



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



Revue Générale

Des capteurs pas comme les autres ! Trente-cinq ans de recueil du pollen en France

Samplers like no others ! Thirty-five years of pollen trapping in France

M. Thibaudon*, G. Oliver, J.-P. Besancenot

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

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 20 août 2019

Accepté le 22 août 2019

Disponible sur Internet le xxx

Mots clés :

Aérobiologie

Surveillance aérobiologique

Capteur de pollen

Réseau de surveillance

Représentativité spatiale

Analyse pollinique

Méthode traditionnelle

Méthodes alternatives

Modélisation

RÉSUMÉ

En France, depuis plus de 35 ans, l'information sur le risque d'allergie lié à l'exposition au pollen fait appel à l'utilisation de capteurs spécifiques. Le réseau de surveillance aérobiologique, aujourd'hui connu sous le sigle RNSA, s'est progressivement constitué à partir de 1984 et il compte à présent environ 80 capteurs « de fond » de type Hirst, épisodiquement complétés pour des recherches ponctuelles par des capteurs « de proximité ». Initialement, le choix des emplacements devait beaucoup à des contingences locales. Mais la représentativité spatiale des sites a ensuite fait l'objet de nombreuses études, qui ont permis une certaine optimisation du maillage. Le dénombrement et l'identification des grains de pollen sont réalisés en microscopie optique, selon une méthode robuste mais chronophage, nécessitant un personnel hautement qualifié et ne fournissant que des données dépassées au moment où elles sont diffusées. C'est pourquoi le RNSA participe activement à divers programmes de recherche orientés, soit vers la détection automatique des particules biologiques en suspension dans l'air, soit vers des technologies telles que la surveillance de la teneur en allergènes, l'analyse de l'ADN ou la reconnaissance d'image. Une autre orientation est la modélisation atmosphérique, qui permet de réaliser des prévisions du risque d'allergie, mais qui n'a pas toujours fait l'objet de validations suffisantes. En fin de compte, et grâce à un partenariat avec la Société française d'allergologie, le RNSA se distingue des réseaux étrangers similaires par la priorité donnée à la diffusion d'informations en termes de risque d'allergie dû à l'exposition au pollen, et non en termes de concentration du pollen aéroporté, qui n'a pas de réelle signification clinique.

© 2019 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

ABSTRACT

Keywords:

Aerobiology

Aerobiological monitoring

Pollen trap

Monitoring network

Spatial representativeness

Pollen analysis

Traditional method

Alternative methods

Modelling

For over thirty-five years in France, the information given out concerning the allergy risk due to pollen exposure has made use of a number of specific samplers. The French aerobiology network, today known as RNSA, was gradually built up from 1984 onwards, and it is now comprises some 80 Hirst-type "background" samplers, which are occasionally accompanied by a number of "proximity" samplers for ad-hoc research. Initially, the choice of sampling locations was highly dependent on local contingencies. However, the spatial representativeness of the traps has been extensively studied, helping to optimise networking to a certain extent. Counting and identifying pollen grains rely on optical microscopy using a robust but time-consuming method, which requires highly qualified personnel and provides data that once computed are obsolete. For this reason, RNSA is now actively involved in several research programs focusing either on automatic detection of airborne biological particles or on technologies such as allergen monitoring, DNA analysis and image recognition. Atmospheric modelling is another approach that enables forecasting of allergy risk levels, but it has not always been validated sufficiently. All things considered, through a strong partnership with the French Society of Allergology, RNSA differs substantially from other comparable networks in that it transmits information in terms of allergy risk due to exposure to pollen rather than information about airborne pollen concentrations, which is not clinically meaningful.

© 2019 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : michel.thibaudon@wanadoo.fr (M. Thibaudon), gilles.oliver@rnsa.fr (G. Oliver), jeanpierre.besancenot@orange.fr (J.-P. Besancenot).

1. Introduction

Depuis plus de 35 ans en France, l'information sur le risque d'allergie lié aux pneumallergènes de l'air extérieur fait appel à l'utilisation de capteurs spécifiques et à des réseaux d'observateurs cliniques et phénologiques. Parmi toutes les particules biologiques aéroportées [1,2], ce sont le pollen et les spores fongiques qui exercent le plus fort impact sur la santé. Le rôle des grains de pollen est de transférer les gamétophytes mâles sur l'appareil reproducteur femelle ; c'est ce qu'on appelle la pollinisation, qui peut utiliser des mécanismes différents comme l'anémophilie, l'entomophilie ou l'hygrophyllie (soit respectivement via le vent, les insectes et l'eau). Cet article se concentrera principalement sur le pollen des plantes anémophiles, qui sont les principales responsables des allergies saisonnières dont la prévalence a considérablement augmenté au cours des dernières décennies [3].

L'aérobiologie est une discipline scientifique jeune, qui a beaucoup progressé dans la seconde moitié du XX^e siècle [4,5]. Ces progrès sont largement dus à l'introduction de méthodes avancées de surveillance [6]. Bien que l'aérobiologie soit liée par excellence à l'écologie, elle a grandi avec les progrès majeurs de l'allergologie. Le terme d'aérobiologie a été introduit dans les années 1930 par Fred Campbell Meier (1893–1938), mais l'aérobiologie n'est devenue une discipline reconnue qu'en septembre 1974, lorsque a été fondée l'International Association for Aerobiology (IAA) au cours du 1st International Congress of Ecology qui se tenait à La Haye, aux Pays-Bas. L'aérobiologie est actuellement considérée comme une science expérimentale pluridisciplinaire, qui fait intervenir des disciplines comme la botanique, la palynologie, la mycologie, l'agronomie, la microbiologie, l'acarologie, la bioclimatologie, la météorologie, l'allergologie et l'écologie [7].

À partir de 1970, des réseaux de surveillance nationaux ont été établis dans la plupart des pays européens, dont la France en 1984, et l'European Aerobiology Society (EAS) a pu être fondée en 2008. L'aérobiologie est encore en développement en tant que discipline, et de nouveaux progrès considérables sont attendus dans les prochaines années. Par exemple, beaucoup d'aérobiologistes utilisent encore du matériel d'échantillonnage basé sur un design des années 1950 [8] et l'analyse des échantillons se fait en microscopie optique, qui est laborieuse et prend beaucoup de temps. Un des principaux domaines de développement futur devrait être la détection automatique des particules organiques en suspension dans l'air [9], et le perfectionnement de technologies d'analyse telles que la surveillance de la teneur en allergènes [10], le metabarcoding [11] ou l'analyse d'image [12]. Il y a aussi des orientations vers la modélisation atmosphérique [13]. Beaucoup de ces progrès sont déjà amorcés et sont alimentés par un besoin croissant en données aérobiologiques, en lien notamment avec l'effet du changement climatique sur la santé humaine.

En France, les premières analyses de pollen dans l'air ont été réalisées par Jacques Charpin et son épouse au début des années 1960 [14], puis le service des allergènes de l'Institut Pasteur a mis en place les premiers capteurs de pollen à Paris, Lens, Lyon et Bordeaux en 1984. Le modèle retenu était celui développé en Belgique et en Italie, mais l'aspect clinique a dès le départ été une préoccupation majeure. Devenu Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA) en 1996, à la suite du rapport de validation réalisé par le Réseau national de santé publique (RNSP), devenu Institut de veille sanitaire (InVS) puis Santé Publique France [15], le réseau français a continué à se développer en gardant sa doctrine clinique. Le nombre de capteurs de pollen a fortement progressé, pour atteindre environ 80 aujourd'hui (Fig. 1).

En 2008, plusieurs articles ont mis en avant l'importance du réseau mis en place par le RNSA en partenariat avec les allergologues de la Société française d'allergologie (SFA). En particulier, un portrait du réseau [16] a souligné le besoin d'une stratégie de

prévention reposant à la fois sur un outil de surveillance météorologique qui assure la meilleure couverture géographique et sur un réseau de médecins sentinelles qui renseigne sur le ressenti de l'impact sanitaire du pollen présent dans l'air. Ce dispositif de surveillance est devenu un outil au service de la santé publique, de la biodiversité et du changement climatique.

La mesure de l'impact sanitaire par son réseau de médecins sentinelles a notamment permis au RNSA d'être le premier, en 2006, à établir un index clinique révélateur du risque allergique lié à l'exposition au pollen [17,18].

2. Représentativité du réseau du RNSA en France

Même si la loi de modernisation du système de santé, en date de janvier 2016, a permis une modification du Code de l'environnement dans le sens de rendre obligatoire la mesure des particules biologiques (pollen et moisissures) dans l'air, ces particules ne font toujours pas partie des polluants réglementés au niveau européen. De ce fait, il n'existe pas de similitudes entre les réseaux de mesures de la pollution chimique (réseaux ATMO) et le réseau de mesure du pollen et encore moins des spores fongiques. De nombreuses interrogations se sont posées sur la représentativité du réseau RNSA et de l'origine des choix. En effet, comme précisé ci-dessus, la création du réseau ne s'est faite que grâce à des médecins que Marie-Roger Ickovic avait su convaincre et rallier à l'aérobiologie [19]. Étant donné que les informations fournies concernaient le risque allergique, et non les concentrations en pollen plus difficiles à exploiter, la représentativité a été d'emblée orientée sur la population des allergiques.

Une réflexion a été engagée au début des années 2000 pour tenter d'optimiser le réseau et de réduire les disparités interrégionales, en supprimant les doublons et en comblant les vides [20]. Il est alors apparu que la stricte équidistance des sites ne pouvait constituer qu'un objectif théorique, le maillage devant aussitôt être corrigé en fonction des effectifs de population concernés par les informations polliniques. De plus, comme il ne s'agissait pas de créer un réseau *ex nihilo*, mais d'améliorer un réseau existant, la sagesse recommandait d'éviter de le remettre trop radicalement en cause, de façon à privilégier l'obtention de séries longues, indispensables aussi bien pour détecter une éventuelle évolution au fil des ans du contenu pollinique de l'air et des dates de pollinisation que pour réaliser des recherches sur le lien météorologie-pollen ou pour valider des modèles de prévision. Un certain nombre de spécificités loco-régionales pouvaient en outre justifier, voire imposer dans certains endroits la présence d'un capteur, par exemple dans les stations de cure, ou légitimer dans certaines régions une densité de surveillance sensiblement plus forte qu'ailleurs – ainsi en Rhône-Alpes pour l'ambroisie ou dans le Midi méditerranéen pour le cyprès.

Un peu plus tard, plusieurs études se sont appliquées à calculer la représentativité statistique du réseau RNSA, afin de définir des « zones polliniquement homogènes » dans un cadre régional, comme la région Rhône-Alpes et ses environs [21,22], ou dans le cadre national [23]. L'un des principaux apports de ces travaux a été l'établissement de dendrogrammes de proximité pollinique des différentes sites (Fig. 2). Il a ainsi été établi que si la « distance pollinique » tendait généralement à croître avec l'augmentation de la distance topographique, ces deux paramètres n'étaient que faiblement corrélés, ainsi qu'en atteste un coefficient de détermination (R^2) ne dépassant pas 0,3 en Rhône-Alpes. À titre d'exemple, malgré des distances sensiblement identiques, Chambéry et Chalon-sur-Saône ont pu être décrits comme appartenant à une zone polliniquement homogène, alors que Chambéry et Gap dépendaient de « régions polliniques » différentes. Par ailleurs, il est clairement ressorti de ces travaux que dans sa configuration

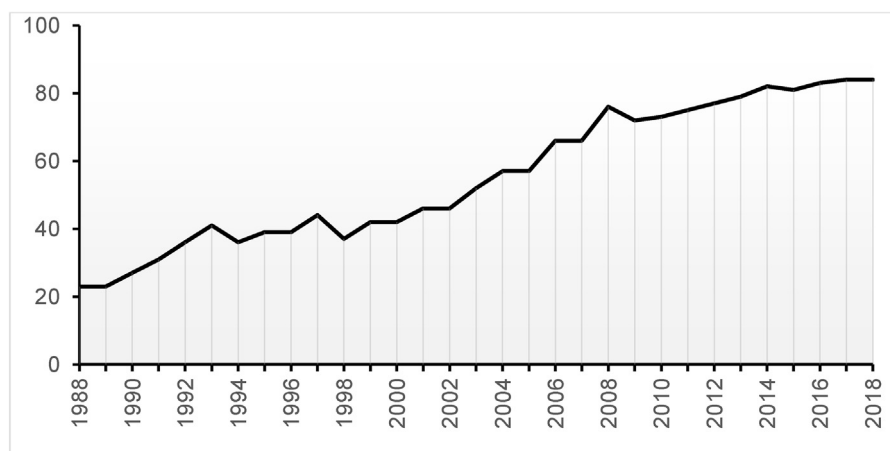


Fig. 1. Évolution du nombre de capteurs en France métropolitaine, 1988–2018, y compris les appareils fonctionnant uniquement sur la saison pollinique de l'ambrosie (11 en 2018), mais en excluant les capteurs ne servant qu'à des études de validation.

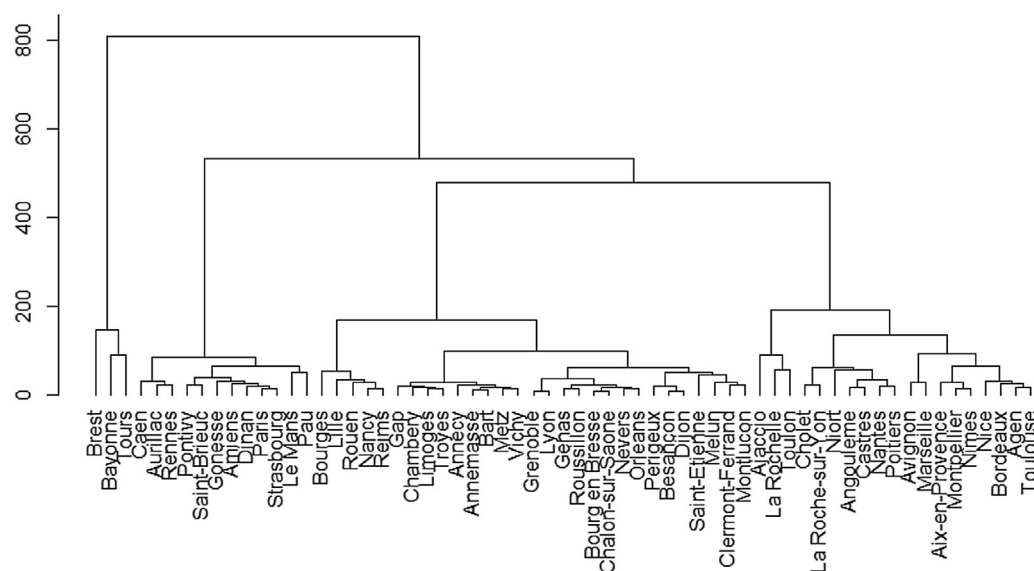


Fig. 2. Dendrogramme de proximité pollinique de 63 capteurs du Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA) sur la période 2008–2016, référence faite aux dates de début de pollinisation. À partir d'une matrice de similarité moyenne, une classification hiérarchique ascendante a été effectuée pour regrouper les stations dans des classes.

D'après [23].

actuelle (Fig. 3), le réseau souffrait plus d'un manque de stations que de redondances : environ 22,6 millions de Français, soit 36,6 % de la population vivant à moins de 1200 m d'altitude, sont à plus de 30 km d'un capteur de pollen [23].

À une échelle plus fine, le RNSA a fait procéder par ses partenaires à des études de validation des capteurs de Paris [24] et de Lyon [25]. Il a ainsi été démontré que le capteur historique de la capitale, situé sur un toit de l'Institut Pasteur, permettait de fournir à la population du Grand Paris une information pleinement satisfaisante sur le risque d'allergie lié à l'exposition au pollen (RAEP), mais que la couverture de toute la région Île-de-France nécessitait la mise en place de trois autres capteurs en périphérie. Sur l'agglomération lyonnaise, malgré une topographie fortement contrastée avec des collines aux flancs raides, la preuve a été faite que le capteur principal, situé sur le toit du centre INSERM dans le quartier de Gerland, assurait une bonne représentativité pour le risque lié aux pollens habituels. En revanche, la problématique ambrosie a nécessité l'implantation de capteurs en situation plus périphérique et en milieu rural, sur le pourtour de l'agglomération et même sur l'ensemble de la région.

3. Méthodologie de mesure des particules biologiques dans l'air

3.1. Capteurs utilisés par le RNSA

S'ils veulent être efficaces, les échantillonneurs de pollen en suspension dans l'air doivent être en mesure, indépendamment de la vitesse du vent, de permettre un enregistrement volumétrique continu de toutes les particules aéroportées, dans une gamme de tailles allant d'environ 5 à 50 μm . De nombreuses stratégies ont ainsi été utilisées pour capter le pollen, y compris des capteurs cylindriques, des capteurs de sédimentation, des impacteurs et des filtres [26–29]. Les échantillonneurs volumétriques de pollen, dérivés du dispositif proposé en 1952 par Hirst [8], sont utilisés comme méthode standard dans de nombreux réseaux nationaux pour mesurer la concentration de pollen dans l'atmosphère [29] : en 2016, ils représentaient 70 % de tous les capteurs en fonction dans le monde, et 98,5 % en Europe [30]. Les particules en suspension sont déposées sur une bande montée sur un tambour, qui tourne lentement grâce à une horloge. Le ruban adhésif est alors



Fig. 3. Le réseau 2019 de surveillance aéropollinique du Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA) en France métropolitaine. Les points noirs désignent les sites surveillant tous les taxons, avec indication de la localité correspondante ; les points blancs se rapportent aux sites ne fonctionnant que pendant la période de l'ambroisie.

découpé puis coloré avec un colorant approprié et analysé sous un microscope à lumière optique, par lequel le pollen et les spores de différents taxons sont déterminés et leur nombre par unité de surface compté selon des procédures standardisées [31,32].

Le capteur pollinique volumétrique de type Hirst (Fig. 4) fournit des données de concentration de pollen à une résolution temporelle de 2 heures. Le temps d'exposition étant connu, le nombre de grains par mètre cube d'air et par unité de temps peut être facilement calculé. Afin d'éviter la distorsion du taux de pollen par les émissions locales, les capteurs sont positionnés sur des toits de bâtiments, le plus souvent à 10–15 m au-dessus du niveau de la rue selon la rugosité de l'ensemble urbain [6,33–36]. Même si les rares études consacrées aux corrélations qui existent entre les comptes polliniques fournis par différents capteurs plus ou moins éloignés donnent des résultats quelque peu divergents [37,38], il existe désormais un assez large consensus international pour admettre qu'un capteur placé comme il vient d'être indiqué permet une couverture de l'ordre de la trentaine de kilomètres tout alentour [39].

C'est la raison pour laquelle ces appareils sont considérés comme des capteurs « de fond », par opposition aux capteurs « de proximité » que sont, par exemple, les capteurs passifs de type *Sigma2-Like Trap* (SLT) également utilisés en routine par le RNSA (Fig. 5) pour mesurer l'exposition dans des parcs publics [40] ou dans des champs envahis d'ambroisie [41]. D'autres techniques,

pour des travaux particuliers, utilisent des capteurs spécifiques, voire des méthodes originales comme le lavage des cheveux [42], qui présente l'intérêt de proposer des solutions pour connaître l'exposition individuelle des patients au pollen. Le RNSA a aussi utilisé à l'occasion des capteurs individuels comme des broches, et aussi certains capteurs individuels dynamiques comme le CIP 10® (Fig. 6), initialement développé pour répondre aux besoins des mines de charbon et destiné au prélèvement des poussières inhalées par l'homme évoluant à son poste de travail (silicose), mais également déclinable pour les prélèvements microbiologiques [43].

3.2. Méthodes d'analyse pollinique

3.2.1. Méthode traditionnelle

La méthode traditionnelle de dénombrement et d'identification des grains de pollen recueillis par les capteurs de type Hirst (fabriqués soit par la firme britannique Burkard®, soit par la firme italienne Lanzoni®) utilise la microscopie optique opérée par des analystes spécifiquement formés à la reconnaissance des pollens frais. À partir des bandes de recueil, les analystes préparent des lames de microscope en utilisant un milieu de montage coloré à la fuchsine, pour faciliter la discrimination des grains de pollen parmi toutes les autres particules présentes dans le champ de vision [44–46].

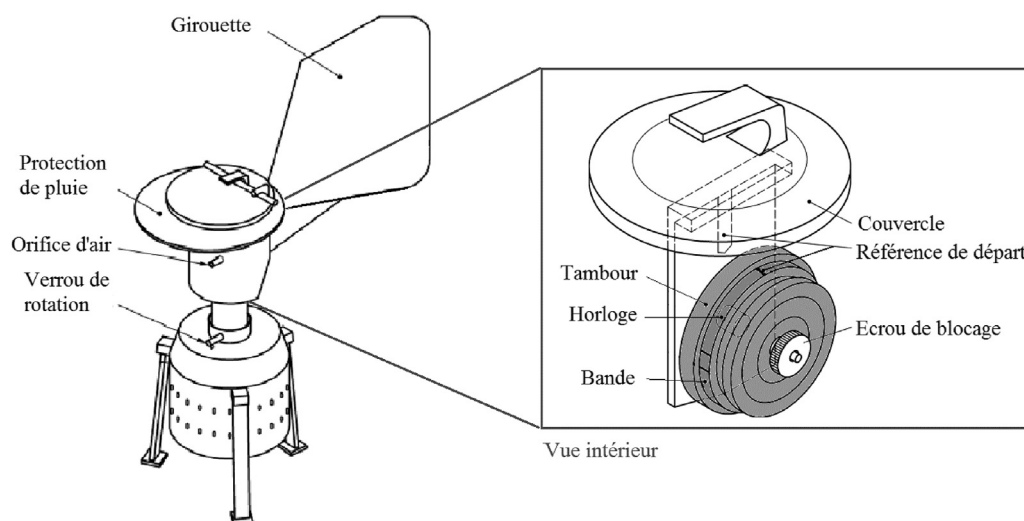


Fig. 4. Capteur de type Hirst (modèle de la firme britannique Burkard).

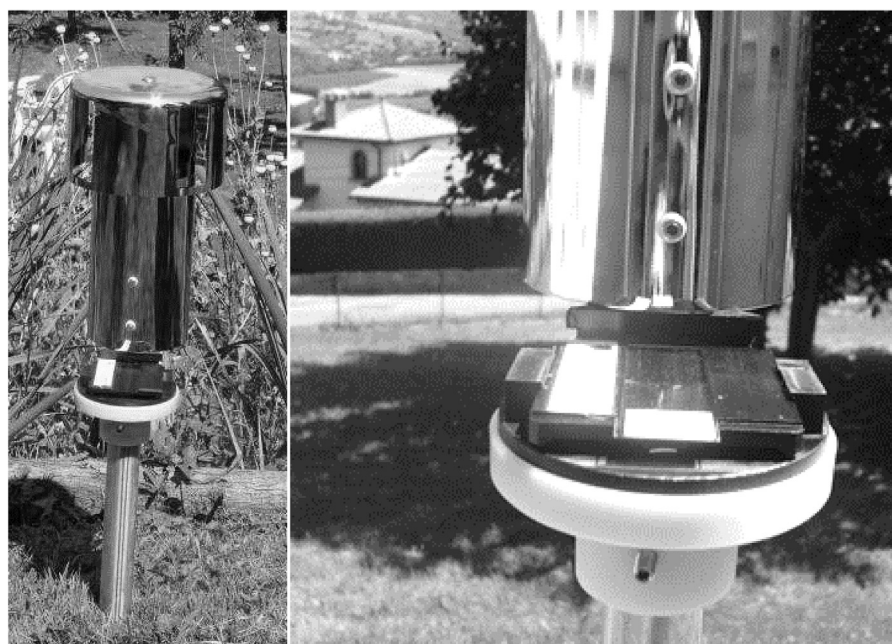


Fig. 5. Capteur de proximité Sigma2-Like Trap® (SLT). À gauche, appareil complet. À droite, élément de recueil des particules et support d'analyse.

Pour faciliter le travail des analystes, le RNSA a développé une clé de détermination des pollens utilisée désormais lors de toutes les formations françaises et internationales, et un logiciel d'acquisition vocale des objets discriminés au microscope. Ce logiciel permet d'incrémenter automatiquement un grain reconnu à une localisation spatiotemporelle de sa récupération sur la bande du capteur. Les enregistrements sur une base de données européenne, European aeroallergens network [47], sont réalisés au pas de temps bi-horaire – ce qui permet, d'une part, de connaître les variations intra-journalières des concentrations polliniques [48–51] et, d'autre part, de vérifier si le pollen recueilli est ou non d'origine locale. Ainsi, l'ambrosie libérant l'essentiel de son pollen en fin de nuit ou en début de matinée, il existe une forte probabilité pour que les grains captés avant midi, ce qui est le cas habituel à Lyon, soient majoritairement autochtones, alors qu'un recueil en milieu ou fin d'après-midi, comme à Aix-en-Provence ou à Dijon, laisse fortement à penser que ce pollen a parcouru une distance non négligeable et qu'il est donc d'origine plutôt éloignée [52].

Afin de garantir la plus grande homogénéité des données au niveau européen, un groupe de travail géré par l'Association française de normalisation (AFNOR) et le RNSA a permis l'élaboration et la publication d'une norme européenne intitulée *NF EN 16868 Air ambiant – Échantillonnage et analyse des grains de pollen en suspension dans l'air et des spores fongiques pour les réseaux relatifs à l'allergie – Méthode volumétrique de Hirst* [53]. Les points essentiels de cette norme sont la définition des spécifications techniques minimales que doivent avoir les capteurs volumétriques utilisant la méthode Hirst [54] et les procédures d'analyse à respecter, comme l'enduction des bandes ou lames de recueil [55,56].

3.2.2. Méthodes alternatives

En dépit de sa robustesse et de l'ancienneté de son utilisation, la méthode traditionnelle présente des limites. Les trois principales sont la lourdeur de l'analyse, qui demande à la fois du personnel confirmé et beaucoup de temps, le fait qu'elle renseigne simplement sur le contenu de l'air en particules, sans donner d'indications



Fig. 6. Capteur individuel CIP 10®.

sur son contenu en allergènes, et enfin le fait que les données ainsi obtenues sont dépassées au moment où elles sont diffusées. Pour ces différentes raisons, divers développements et programmes de recherche se sont orientés depuis une vingtaine d'années tant sur les méthodes d'analyse automatique, discriminantes au niveau des espèces botaniques ou même des allergènes, que sur la mise au point de capteurs automatiques pouvant accepter une analyse en temps réel ou quasi réel [6,7,9,27,29,57]. Depuis sa création, le RNSA a participé activement à différents projets européens portant sur la mesure des allergènes dans l'air, comme les projets ASTHMA,

SPRING, MONALISA [58,59], HIALINE [60,61], etc., et à la validation de nouvelles technologies en cours de développement.

En ce qui concerne les méthodes d'analyse aéropollinique, quatre orientations nouvelles font à présent l'objet d'investigations intensives :

- certaines font appel à l'analyse d'image pour faciliter l'identification des grains de pollen, soit sur les lames classiques, soit en temps réel [9,12,62] ;
- d'autres utilisent la biologie moléculaire et diverses techniques associées, tantôt sur les supports de recueil, tantôt directement au niveau du capteur [11,63] ;
- d'autres encore s'appuient sur les méthodes immunologiques développées dans le cadre du diagnostic in vitro et de la standardisation des allergènes [10,58,59,64] ;
- les dernières recourent à la mesure automatique des paramètres physiques des particules et des capacités de fluorescence des particules biologiques [65], ce qui rend possible une triple automatisation du recueil, de l'analyse et de l'information en temps réel.

À ce jour, les seuls équipements capables de fournir une information en temps réel sont le HUND BAA 500® [66] et le PLAIR Rapid-E® (Fig. 7) [67], mais leurs coûts sont très élevés et, à moins d'un classement des pollens allergisants dans la liste des paramètres réglementés, il semble difficile d'investir dans de tels équipements.

3.3. Modélisation et applications pour smartphones

Le fait que le nombre de capteurs soit restreint sur les différents territoires, fait s'interroger sur la pertinence de la donnée d'un capteur à une zone plus éloignée que celle définie dans les études de représentativité [68]. Comme pour la pollution chimique ou la météorologie, et en s'assurant le concours de divers partenariats institutionnels, des organismes de recherche tels que l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) ont développé des modèles dont l'objectif affiché est de linéariser les données sur l'ensemble du territoire. L'opération est relativement aisée pour les polluants chimiques, mais elle se heurte à de grandes difficultés dans le cas du pollen, faute d'une précision suffisante dans la connaissance des sources émettrices. Différents développements ont néanmoins vu le jour, et les résultats sont régulièrement diffusés par le RNSA malgré le fait que la validation de ces modèles ne soit pas encore réalisée, ou pas encore diffusée. On citera notamment, au niveau régional Auvergne-Rhône-Alpes, la



Fig. 7. Capteur en temps réel Rapid-E® de la firme suisse Plair.

modélisation du pollen d'ambrosie réalisée avec Atmo AURA, qui présente l'avantage de coupler les outils de modélisation d'Atmo avec les données de risque allergique du RNSA [69].

À l'échelle de l'Europe occidentale, France comprise, et de l'Europe centrale, le système COSMO-ART, développé conjointement par MétéoSuisse et par l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT), permet d'actualiser en temps réel les informations sur les niveaux d'exposition au pollen d'aulne, de bouleau, de graminées et d'ambrosie ; la résolution horizontale du modèle est désormais de 1,1 km ; ce système, mis en ligne sur le site du RNSA [70,71], est celui qui semble fournir les résultats les plus réalistes.

À l'échelle de l'ensemble du continent, le projet européen COPERNICUS/CAMS donne des informations en temps réel sur le niveau d'exposition au pollen de bouleau, d'olivier, de graminées et d'ambrosie. La validation de ces modèles, inspirés entre autres du modèle finlandais SILAM [72], n'a pas encore été effectuée. Malheureusement, à ce jour, certains prestataires d'applications pour smartphones fournissent des données en temps réel et des prévisions à deux jours, non seulement sans validation mais surtout en instillant dans l'esprit des utilisateurs une confusion entre niveau d'exposition et niveau de risque allergique. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) a certes mis en route une validation, mais elle ne devrait pas pouvoir être publiée avant 2023 au mieux.

Pour ce qui est des applications pour smartphones diffusant des informations en temps réel [73,74], il est indispensable de bien discerner celles qui s'en tiennent, comme évoqué ci-dessus, au niveau d'exposition mesuré ou dérivé de la modélisation, sans prendre en compte le niveau de risque allergique lié au pollen. Citons, par exemple, les applis Breezometer® sous l'égide d'une société israélienne, avec une couverture mondiale [75], Météo Pollen® pour le bouleau, les graminées, l'olivier et l'ambrosie en France métropolitaine [76], Alerte Pollen® qui répertorie 19 taxons différents [77], etc. D'autres applications s'en tiennent à des données polliniques mesurées, ainsi qu'aux niveaux de risque allergique qui leurs sont liés. Tel est, pour se limiter à celles qui utilisent les données du RNSA, le cas d'Alertes Pollens® [78], d'Allergik® [79] ou de Pollen®, désormais disponible pour la France [80], etc.

Finalement, ce sont encore les sites Internet qui fournissent aux allergologues et aux patients allergiques l'information la plus sûre et la plus directement utilisable [81]. Les principaux sites sont celui du RNSA [82] et ceux qui relaient l'information du RNSA, comme celui de Mété-France, ceux des différentes Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), celui du ministère des Solidarités et de la Santé et ceux de certaines Agences régionales de santé (ARS).

4. Conclusion

Depuis 35 ans, c'est grâce à la collaboration avec la Société française d'allergologie que le RNSA a pu diffuser une information sur le risque allergique lié à l'exposition au pollen, information largement relayée auprès du corps médical, des autorités de santé et des allergiques. Cette information rentre dans la stratégie de prévention de l'allergie au pollen [83] et participe à la meilleure prise en charge des traitements, tant symptomatiques que de désensibilisation spécifique.

Déclaration de liens d'intérêts

M.T. et J.-P.B. déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts. G.O. est salarié du RNSA.

Références

- [1] Gregory PH. The microbiology of the atmosphere. London/New York: Leonard Hill/Interscience Publishers; 1961.

- [2] Amato P, Brisebois E, Draghi M, Duchaine C, Fröhlich-Nowoisky J, Huffman JA, et al. Main biological aerosols, specificities, abundance and diversity. In: Delort AM, Amato P, editors. Microbiology of aerosols. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell; 2018. p. 3–21.
- [3] Charpin D, Caillaud D. Épidémiologie de l'allergie pollinique. Rev Mal Respir 2014;31:365–74.
- [4] Comtois P, Isard S. Aerobiology: coming of age in a new millennium. Aerobiologia 1999;15:259–66.
- [5] Beggs PJ, Šikoparija B, Smith M. Aerobiology in the International Journal of Biometeorology, 1957–2017. Int J Biometeorol 2017;61(Suppl. 1):51–8.
- [6] Scheifinger H, Belmonte J, Buters J, Celenk S, Damialis A, Dechamp C, et al. Monitoring, modelling and forecasting 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. 71–126.
- [7] Thibaudon M, Caillaud D, Besancenot J-P. Méthodes d'étude des pollens atmosphériques et calendriers polliniques. Rev Mal Respir 2013;30:463–79.
- [8] Hirst JM. An automatic volumetric spore trap. Ann Appl Biol 1952;39:257–65.
- [9] Buters J, Schmidt-Weber C, Oteros J. Next-generation pollen monitoring and dissemination. Allergy 2018;73:1944–5.
- [10] Thibaudon M, Sindt C. Mesure des allergènes de pollens d'arbre dans l'air (bouleau, olivier). Rev Fr Allergol Immunol Clin 2008;48:179–86.
- [11] Bell KL, de Vere N, Keller A, Richardson RT, Gous A, Burgess KS, et al. Pollen DNA barcoding: current applications and future prospects. Genome 2016;59:629–40.
- [12] Kadaikar A, Trocan M, Amiel F, Conde-Céspedes P, Guinot B, Sarda-Estève R, et al. Sharp images detection for microscope pollen slides observation. In: Nguyen NT, Gaol FL, Hong TP, Trawiński B, editors. Intelligent Information and Database Systems – 11th Asian Conference, ACIDS 2019, Yogyakarta, Indonesia, April 8–11, 2019, Proceedings, Part I. Cham: Springer; 2019. p. 661–71.
- [13] DellaValle CT, Triche EW, Bell ML. Spatial and temporal modeling of daily pollen concentrations. Int J Biometeorol 2012;56:183–94.
- [14] Charpin J, Wolffromm R, Aubert J, Charpin H, Guehot E, Lauriol M. Le calendrier pollinique de Paris. Rev Fr Allergol 1965;5:65–75.
- [15] Le Goaster C, Quénel P, Chambaud L, Almoussa M, Ickovic MR, Thibaudon M, et al. Évaluation du Réseau national de surveillance aérologique. Rev Fr Allergol Immunol Clin 1997;37:891–5.
- [16] Thibaudon M. Le Réseau national de surveillance aérologique (RNSA) : un outil au service de la santé publique, de la biodiversité, du changement climatique et de la recherche. Environ Risques Sante 2008;7:217–9.
- [17] Thibaudon M, Oliver G, Cheynel A. L'index clinique : outil d'évaluation de l'impact sanitaire du pollen. Environ Risques Sante 2008;7:411–6.
- [18] Thibaudon M, Oliver G. Biological particles of the air and their health impact. In: Görner P, Thomassen Y, editors. 8th International symposium on modern principles for air monitoring and biomonitoring (AIRMON, Marseille, 15–19 June 2014). Paris: Institut National de Recherche et de Sécurité; 2014. p. 55.
- [19] Ickovic MR. The French Aerobiological Monitoring Network: two years of clinical experience (1986–1987). Aerobiologia 1988;4:12–5.
- [20] Besancenot J-P, Sulmont G, Laaidi M, Thibaudon M. Le réseau français de surveillance aérologique : situation présente et perspectives d'optimisation. Eur Ann Allergy Clin Immunol 2003;35:158–63.
- [21] Rieux C, Personnaz M-B, Thibaudon M. La variation spatiale du contenu pollinique de l'air : implications pour la gestion d'un réseau météorologique. Environ Risques Sante 2008;7:103–11.
- [22] Rieux C, Personnaz M-B, Thibaudon M. Spatial variation of airborne pollen over south-east France: characterization and implications for monitoring networks management. Aerobiologia 2008;24:43–52.
- [23] Raffard M. Étude de la représentativité statistique du Réseau national de surveillance aérologique (RNSA) en France métropolitaine. Orléans/Puteaux: Université/Commissariat général au développement durable; 2017. <https://www.pollens.fr/docs/RapportStageMarieRaffard.pdf>.
- [24] Barral S, Oliver G, Bordenave L, Dusseaux M, Bex-Capelle V, Squinazzi F, et al. Contenu pollinique de l'air à Paris : étude de la représentativité du site Pasteur de 2003 à 2007. Pollut Atmos 2009;51:79–89.
- [25] Thibaudon M, Burnichon A, Deruaz D, Laurent O. Étude de la couverture du capteur de pollen de Lyon sur trois saisons (1999, 2000 et 2001). Allerg Immunol 2002;34:161–3.
- [26] Gagnon L, Comtois P. Peut-on comparer les résultats de différents types de capteurs polliniques ? Grana 1992;31:125–30.
- [27] Reponen T, Willeke K, Grinshpun S, Nevalainen A. Biological particle sampling. In: Kulkarni P, Baron PA, Willeke K, editors. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley; 2011. p. 549–70.
- [28] Amato P, Brisebois E, Draghi M, Duchaine C, Fröhlich-Nowoisky J, Huffman JA, et al. Sampling techniques. In: Delort AM, Amato P, editors. Microbiology of aerosols. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell; 2018. p. 23–48.
- [29] West JS, Kimber RBE. Innovations in air sampling to detect plant pathogens. Ann Appl Biol 2015;166:4–17.
- [30] Hyde HA. Atmospheric pollen and spores in relation to allergy. Part I. Clin Exp Allergy 1972;2:153–79.
- [31] Buters JTM, Antunes C, Galveias A, Bergmann K-C, Thibaudon M, Galán C, et al. Pollen and spore monitoring in the world. Clin Transl Allergy 2018;8:9.
- [32] Hrabina M. Les pollens dans l'air et leurs allergènes. In: Charpin D, editor. L'air et la santé. Paris: Flammarion; 2004. p. 83–100.
- [33] Clot B, Küpfer P. 1979–1998 : 20 ans d'analyse aéro-palynologique à Neuchâtel. Bull Soc Neuchâtel Sc Nat 1999;122:99–107.

- [34] Galán Soldevilla C, Alcázar-Teno P, Domínguez-Vilches E, Villamandos de la Torre, García-Pantaleón FI. Airborne pollen grain concentrations at two different heights. *Aerobiologia* 1995;11:105–9.
- [35] Alcázar P, Galán C, Cariñanos P, Domínguez-Vilches E. Diurnal variation of airborne pollen at two different heights. *J Invest Allergol Clin Immunol* 1999;9:89–95.
- [36] Thibaudon M, Sulmont G. Influence de la position en hauteur de deux capteurs à Amiens. *Allerg Immunol* 2002;34:169–71.
- [37] Frenz DA. Interpreting atmospheric pollen counts for use in clinical allergy: spatial variability. *Ann Allergy Asthma Immunol* 2000;84:481–91.
- [38] Ranta H, Sokol C, Hicks S, Heino S, Kubin E. How do airborne and deposition pollen samplers reflect the atmospheric dispersal of different pollen types? *Grana* 2008;47:285–96.
- [39] Katelaris CH, Burke TV, Byth K. Spatial variability in the pollen count in Sydney, Australia: can one sampling site accurately reflect the pollen count for a region? *Ann Allergy Asthma Immunol* 2004;93:131–6.
- [40] Pham-Thi N, Thibaudon M, Monnier S, Besancenot J-P. L'air que nous respirons : influence des sources de pollen dans les espaces verts. Exemple de Lyon. *Rev Fr Allergol* 2019;59. <https://www.em-consulte.com/article/1312235> [à paraître].
- [41] Thibaudon M, Monnier S. Résultats de l'étude ANSES/Observatoire des ambrosies/RNSA Mise en place de trois capteurs SLT pour mesurer la présence de pollen d'ambrosie (*Ambrosia psilostachya*) en relation avec l'observation sur le terrain de plants d'ambrosie. *Brussieu: RNSA; 2014*. <https://www.pollens.fr/uploads/media/default/0001/01/02f190553bf7aa6cb5ddda78d09b05107-a271f7.pdf>.
- [42] Penel V, Calleja M, Pichot C, Charpin D. Static and elevated pollen traps do not provide an accurate assessment of personal pollen exposure. *Eur Ann Allergy Clin Immunol* 2017;49:59–65.
- [43] Simon X, Görner P, Duquenne P, Bau S, Witschger O. Prélèvement des aérosols par le dispositif CIP 10. Version 2. Vandœuvre-lès-Nancy: *MétroPol INRS; 2017*. <http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metro-pol-prelevement-cip10.pdf>.
- [44] Kämpylä M, Penttinen A. An evaluation of the microscopical counting methods of the tape in Hirst-Burkard pollen and spore trap. *Grana* 1981;20:131–41.
- [45] Levetin E. Methods for aeroallergen sampling. *Curr Allergy Asthma Rep* 2004;4:376–83.
- [46] Agashe SN, Caulton E. Pollen and spores. Applications with special emphasis on aerobiology and allergy. Enfield (NH)-Jersey-Plymouth: Science Publishers; 2009.
- [47] <https://www.ean-net.org/en.html>.
- [48] Rantio-Lehtimäki A, Helander ML, Pessi AM. Circadian periodicity of airborne pollen and spores; significance of sampling height. *Aerobiologia* 1991;7:129–35.
- [49] Laaidi M. La périodicité intra-journalière des émissions polliniques. Utilisation dans la gestion quotidienne des pollinoses par les malades. *Rev Fr Allergol Immunol Clin* 2000;40:597–605.
- [50] Laaidi M, Thibaudon M. Rythmes nyctéméraux de la pollinisation de quelques taxons allergisants. *Acta Bot Gallica* 2002;149:445–56.
- [51] Jean A. Étude du rythme nyctéméral de la production des principaux pollens allergisants. *Brussieu: RNSA; 2013*. <https://www.pollens.fr/uploads/media/default/0001/01/fb46f3f6308b49471be98f7567175-1c1d3fdb300.pdf>.
- [52] Thibaudon M, Oliver G, Sindt C. Le capteur de pollen : un outil pour déterminer l'origine des grains de pollen d'ambrosie. *Rev Fr Allergol* 2009;49:515–23.
- [53] Thibaudon M, Monnier S, Galán C. Pollens et spores fongiques : une norme européenne. *Rev Fr Allergol* 2019;59 [à paraître].
- [54] Galán C, Smith M, Thibaudon M, Frenguelli G, Oteros J, Gehrig R, et al. Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia* 2014;30:385–95.
- [55] Thibaudon M, Galán C, Lanzoni C, Monnier S. Validation of a new adhesive coating solution: comparative study of carbon tetrachloride and diethyl ether. *Aerobiologia* 2015;31:57–62.
- [56] Gharbi D, Trigo MM, Recio M. The use of cyclohexane as new solvent for airborne pollen sampling. *Aerobiologia* 2019;35:441–5 [in press].
- [57] Thibaudon M, Sindt C, Oliver G, Besancenot J-P, Pham-Thi N. Les risques polliniques en temps réel : mode d'emploi. *Rev Fr Allergol* 2019;59:159–61.
- [58] Sindt C, Oliver G, Thibaudon M. Projet MONALISA (Monitoring Network of Allergens by Immuno-Sampling). In: Journées Interdisciplinaires de la Qualité de l'Air (JIQA) 2008 (Villeneuve d'Ascq). Loos: APPA; 2008. p. 1–7. <http://www.jiqa.fr/doc/2008/Article/SINDT.pdf>.
- [59] Sindt C, Thibaudon M. A new perspective on pollen allergy (MONALISA Project). *Turkiye Klinikleri J Immunol Allergy* 2011;4:43–58.
- [60] Buters JTM, Thibaudon M, Smith M, Kennedy R, Rantio-Lehtimäki A, Albertini R, et al. Release of Bet v 1 from birch pollen from 5 European countries. Results from the HIALINE study. *Atmos Environ* 2012;55:496–505.
- [61] 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 (2009). *Rev Allergy Clin Immunol* 2013;23:14–20.
- [62] Marcos JV, Nava R, Cristóbal G, Redondo R, Escalante-Ramírez B, Bueno G, et al. Automated pollen identification using microscopic imaging and texture analysis. *Micron* 2015;68:36–46.
- [63] Keller A, Danner N, Grimmer G, Ankenbrand MVD, Von Der Ohe K, Von Der Ohe W, et al. Evaluating multiplexed next-generation sequencing as a method in palynology for mixed pollen samples. *Plant Biol* 2015;17:558–66.
- [64] Carvalho E, Sindt C, Verdier A, Galán C, O'Donoghue L, Parks S, et al. Performance of the Coriolis air sampler, a high-volume aerosol-collection system for quantification of airborne spores and pollen grains. *Aerobiologia* 2008;24:191–201.
- [65] Kawashima S, Thibaudon M, Matsuda S, Fujita T, Lemonis N, Clot B, et al. Automated pollen monitoring system using laser optics for observing seasonal changes in the concentration of total airborne pollen. *Aerobiologia* 2017;33:351–62.
- [66] Oteros J, Pusch G, Weichenmeier I, Heimann U, Moller R, Roseler S, et al. Automatic and online pollen monitoring. *Int Arch Allergy Immunol* 2015;167:158–66.
- [67] Šaulienė I, Šukienė L, Daunys G, Valiulis G, Vaitkevičius L, Matavulj P, et al. Automatic pollen recognition with the Rapid-E particle counter: the first-level procedure, experience and next steps. *Atmos Meas Tech Discuss* 2019;2:1–33.
- [68] Oteros J, Bergmann K-C, Menzel A, Damialis A, Traidl-Hoffmann C, Schmidt-Weber CB, et al. Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists. *Atmos Environ* 2019;199:435–42.
- [69] <https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/allergie-pollen/risque-allergique-ambrosie>.
- [70] <https://www.pollens.fr/les-bulletins/previsions-graminees>.
- [71] <https://www.pollens.fr/les-bulletins/previsions-ambrosie>.
- [72] Sofiev M, Siljamo P, Valkama I, Ilvonen M, Kukkonen J. A dispersion modeling system SILAM and its evaluation against ETEX data. *Atmos Environ* 2006;40:674–85.
- [73] Bastl K, Berger U, Kmenta M. Evaluation of pollen apps forecasts: the need for quality control in an eHealth service. *J Med Internet Res* 2017;19:e152.
- [74] Johnston FH, Wheeler AJ, Williamson GJ, Campbell SL, Jones PJ, Koolhof IS, et al. Using smartphone technology to reduce health impacts from atmospheric environmental hazards. *Environ Res Lett* 2018;13:044019.
- [75] <https://breezometer.com/fr/products/pollen-api>.
- [76] <https://meteopollen.com/>.
- [77] <https://play.google.com/store/apps/details?id=alerte.pollen&hl=fr>.
- [78] <https://www.stallergenesgreer.fr/alertes-pollens>.
- [79] <https://www.alk.fr/nos-services/nos-applications>.
- [80] <https://play.google.com/store/apps/details?id=screencode.pollenwarndienst> ou <https://apps.apple.com/fr/app/pollen/id515301928?l=de&ls=1>.
- [81] Thibaudon M, Besancenot J-P, Pham-Thi N. Données aéropolliniques en France : les comptes polliniques, influence de l'homme sur certains pollens. *Lett Pneumol* 2019;22:96–9.
- [82] <https://www.pollens.fr/>.
- [83] HCSP. Avis relatif à l'information et aux recommandations à diffuser en vue de prévenir les risques sanitaires liés aux pollens allergisants. Paris: Haut Conseil de la santé publique; 2016. <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=556>.