RNSA
Le Plat du Pin
69690 BRUSSIEU

Tel : 33 (0) 4 74 26 19 48
Fax : 33 (0) 4 74 26 16 33
Mail : rnsa@rnsa.fr
Web : www.pollens.fr

Changement climatique, moisissures aéroportées et risques sanitaires associés

CONVENTION 2010 DGS / RNSA

relative au financement d'une étude sur les impacts attendus du changement climatique sur les moisissures aéroportées et les risques sanitaires associés

RAPPORT DÉFINITIF

Cette étude vise à faire le point des connaissances actuelles sur le lien existant entre le contexte météorologique ou climatique, le contenu de l'air en spores de moisissures et les risques induits pour la santé. Il entre dans le cadre du Plan national Santé Environnement II, qui insiste sur la nécessité de porter une attention particulière à la prévention des allergies (version finale du 26 juin 2009, page 14).

Rédacteurs : Jean-Pierre BESANCENOT *(RNSA)*
Michel THIBAUDON *(RNSA)*

Collaborations : Pierre-Alain FONTEYNE *(Université Catholique de Louvain - Belgique)*
Nicole NOLARD *(Université Catholique de Louvain - Belgique)*
Uwe BERGER *(European Aeroallergen Network - Autriche)*

Décembre 2011

Sommaire

Sommaire ……... **3.**

Acronymes, sigles, symboles et abréviations …….. **5.**

Introduction ……... **9.**

I. Effets des moisissures sur la santé. Lien entre santé et taux de spores fongiques dans l'air ……..... **17.**

a) Allergies …… 18.

- Manifestations cliniques d'allergie de type II, III ou IV et lien avec les bioaérosols fongiques ……..... 19.

- Manifestations cliniques d'allergie de type I et lien avec les bioaérosols fongiques …….. 20.

b) Mycotoxicoses ……... 23.

c) Infections ……... 26.

d) Irritations ……... 26.

e) En guise de résumé …… 27.

II. La surveillance des moisissures aéroportées ……. **31.**

a) Recueil et identification des moisissures ……... 33.

- *Alternaria* …… 35.

- *Cladosporium* …….. 38.

- Les autres taxons ……. 41.

b) Évolution de la dispersion des moisissures atmosphériques au cours des années récentes .. 45.

III. Discussion. Relation entre populations de moisissures dans l'air et évolution du climat. Peut-on faire des projections réalistes pour le XXIème siècle ? …….. **51.**

a) Complexité du problème et absence de modèle …… 51.

b) Variation des concentrations en spores fongiques atmosphériques en fonction du climat … 53.

- Exploitation des données d'EMLab P&K ……...… 53.

- Exploitation des données du *Greeguard Environmental Institute* ……... 56.

c) Variation du risque d'allergie aux spores atmosphériques en fonction du climat …….. 57.

d) Éventuels effets pervers de la lutte contre le réchauffement climatique : la problématique des bâtiments passifs …… 59.

e) Effets de phénomènes météorologiques exceptionnels ……..…… 62.

- Orages ……. 62.

- Inondations et cyclones tropicaux ……... 64.

- Tempêtes de poussières ……... 66.

f) Effets directs de la teneur de l'air atmosphérique en CO_2 ……...……... 67.

g) Limitations méthodologiques actuelles et perspectives ……..…..... 69.
- Vers une meilleure standardisation des méthodes d'aérobiologie …….. 69.
- Concept de seuil d'exposition ……..... 70.
- Mesures de prévention ……..... 71.
Conclusions et recommandations …… 73.
Résumé étendu ……... 79.
Glossaire …….… 85.
Références …….. 91.
Sites Internet utiles …… 99.
Table des figures …….. 101.
Table des tableaux …….. 102.

Acronymes, sigles, symboles et abréviations

AAE : Alvéolite allergique extrinsèque

ARMR : *American Risk Management Resources Network*

BBC : Bâtiment basse consommation

$C_6H_{12}O_6$: Glucose

CDC : *Centers for Disease Control and Prevention*

CO : Monoxyde de carbone

CO_2 : Dioxyde de carbone (gaz carbonique)

COV : Composés organiques volatils

COVM : Composés organiques volatils microbiens

CSHPF : Conseil supérieur d'hygiène publique de France

DGS : Direction générale de la santé

DMM : Diamètre médian massique

DROM-COM : Départements et régions d'outre-mer - Collectivités d'outre-mer

EAN : *European Aeroallergen Network*

EFSA : *European Food Safety Authority* (Autorité européenne de sécurité des aliments)

FAO : *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)

GEI : *Greenguard Environmental Institute*

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (équivalent anglais = IPCC)

H_2O : Eau

HEAL : *Head-off Environmental Asthma in Louisiana*

IgE : Immunoglobuline E

IgG : Immunoglobuline G

IgM : Immunoglobuline M

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

ISP : Institut de santé publique (Bruxelles)

IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change* (équivalent français = GIEC)

MBPA : Mycose bronchopulmonaire allergique

mol : Mole

µg : Microgramme (1 µg = 10^{-6} g = 0,000 001 gramme = 0,001 milligramme)

µm : Micromètre (1 µm = 10^{-6} m = 0,000 001 mètre = 0,001 millimètre)

µmol : Micromole (1 µmol = 10^{-6} mol ; 1 µmol/mol = 1 ppm)

ng : Nanogramme (1 ng = 10^{-12} kg **=** 10^{-9} gramme **=** 0,000 001 milligramme)

O_3 : Ozone

OMS : Organisation mondiale de la santé

OSHA : *Occupational Safety Health Act*

p : Degré de signification

PM_{10} : Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm

$PM_{2,5}$: Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 2,5 µm

ppm : partie par million (10^{-6} ; 1 ppm = 1 µmol/mol)

r : coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson

R^2 : coefficient de détermination

RD50 : *50% Respiratory rate decrease*

RNSA : Réseau national de surveillance aérobiologique

SFA : Sinusite fongique allergique

SO_2 : Dioxyde de soufre

UE : Union européenne

UFC : Unités formant colonies

VMC : Ventilation mécanique contrôlée

φ : Rayonnement solaire

Les termes suivis d'un astérisque (*) sont définis dans le Glossaire (pp. 79-84).

Ils le sont également, le plus souvent, lors de leur première apparition, dans le texte ou en note infrapaginale.

« Although the body of research on the impacts of climate change on mould spores is much smaller than that on pollen, there are several important studies that indicate similar impacts on mould spore production and atmospheric mould spore concentration, mould spore season, and mould spore allergenicity ».

Paul J. Beggs, *Int J Environ Res Public Health* 2010; 7(8): 3009.

« The survival, the reproduction, the dispersal and the geographic distribution of moulds are decided by both direct and indirect effects of climate change. Not only the moulds, but also their hosts and substrates, possible competitors and enemies will be affected by climate change. It is essential to understand the interactions between the members in these ecosystems to be able to control and predict future development of moulds ».

Lone Ross Gobakken, *Effects of global climate change on mould growth - interactions of concern.* Stockholm: IRG 2010: 2.

Introduction

Appelés aussi *mycètes**, les champignons* constituent, aux côtés des animaux et des végétaux, l'un des trois règnes d'organismes vivants eucaryotes[1]* capables de différenciation cellulaire (Webster, 1980).

Ils sont hétérotrophes* vis-à-vis du carbone[2] et trouvent leur nourriture selon trois modalités différentes : la nécrotrophie* [ou saprohytisme*], la biotrophie* [ou parasitisme*] et la symbiose*.

- Les champignons *nécrotrophes**, comme *Botrytis cinerea* (responsable de la pourriture grise et de la pourriture noble), se développent aux dépens de la matière organique en décomposition (litière, bois mort, excréments…), voire à ceux de matières animales chitineuses* comme les cheveux et les ongles, et permettent ainsi le recyclage des éléments à la surface de la planète.
- Les *biotrophes** puisent leur matière organique dans un être vivant (animal, végétal ou autre champignon) et provoquent diverses maladies infectieuses affectant les animaux (mycoses*), mais aussi de nombreuses plantes[3] (oïdiums, rouilles...).
- Les *symbioses** sont soit mycorhiziques* lorsqu'il y a association avec un partenaire chlorophyllien macroscopique (comme *Lactarius subdulcis* associé au hêtre *Fagus sylvatica*), soit lichéniques* lorsque l'association se fait avec un partenaire chlorophyllien microscopique (algue ou cyanobactérie)[4].

Certains champignons* passent d'ailleurs, au cours de leur cycle de vie, d'une modalité d'alimentation à une autre. C'est ainsi que *Cladosporium herbarum*, l'une des espèces les plus couramment rencontrées dans l'air, commence par parasiter des végétaux vivants, avant de connaître une phase nécrotrophique* où elle continue à sporuler* sur des tissus morts ; sa phase de biotrophie* reste cependant assez brève (en moyenne 3 à 5 mois), et elle est suivie d'un lent déclin.

---

1. Les eucaryotes* sont les organismes vivants qui possèdent un noyau isolé du cytoplasme* par une membrane et qui contient de l'ADN. Les eucaryotes* s'opposent aux procaryotes (bactéries, archées) dont la structure cellulaire ne comporte pas de noyau.
2. Dépourvus du principal pigment assimilateur des végétaux photosynthétiques, la chlorophylle, et de ce fait incapables d'utiliser l'énergie solaire, les champignons* doivent, pour se développer, exploiter l'énergie provenant de la dégradation de la matière organique élaborée par d'autres êtres vivants.
3. Bien que son nom soit la francisation phonétique de l'anglais *mildew*, moisissure*, le mildiou n'est pas provoqué par des champignons*, mais par des algues telles que *Peronospora*.
4. L'algue et le champignon* associés dans un même lichen constituent un organisme nouveau, vivant d'une vie nouvelle et capable de se développer dans des conditions où l'algue et le champignon* isolés mourraient.

Le règne fongique* regroupe actuellement un peu plus de 70 000 espèces recensées. La plupart des auteurs considèrent toutefois que cette diversité taxinomique* ne représente pas plus de 5% de l'ensemble de la biodiversité fongique* à l'échelle de la planète, qui dépasserait alors le million d'espèces* (Hawksworth, 2006), voire le million et demi (Chabasse *et al*., 1999). D'ailleurs, une moyenne de 1 700 espèces* nouvelles sont décrites chaque année ! Il faut ajouter que la taxinomie* des champignons* est une science dynamique, en évolution constante grâce à l'avènement d'outils nouveaux qui permettent la révision de catégories anciennes, essentiellement fondées sur l'observation de la morphologie (Malléa et Charpin, 1992). C'est ainsi que la catégorie artificielle des *Deuteromycota* (Deutéromycètes*) ou *Fungi imperfecti* (« champignons imparfaits »), qui regroupait les formes dépourvues de reproduction sexuée, se reproduisant uniquement par voie dite « végétative », n'est plus reconnue en tant que division autonome. Grâce aux critères de parenté biochimique ou moléculaire, on inclut aujourd'hui ces espèces dans les divisions auxquelles elles appartiendraient si leur phase sexuée était décrite (Lacey, 1981 ; Hibbett *et al*., 2007).

Tel est, par exemple, le cas de l'espèce la plus fréquemment citée dans la littérature médicale, *Aspergillus fumigatus* (fig. 1), forme asexuée aujourd'hui classée dans le phylum* (lignée évolutive, ou embranchement) des *Ascomycota* ou Ascomycètes* (plus de 32 000 espèces décrites), chez lesquels les spores*[5] sont produites à l'intérieur de sacs (les asques*) et, une fois arrivées à maturité, sont projetées vers l'extérieur par ouverture de l'asque*.

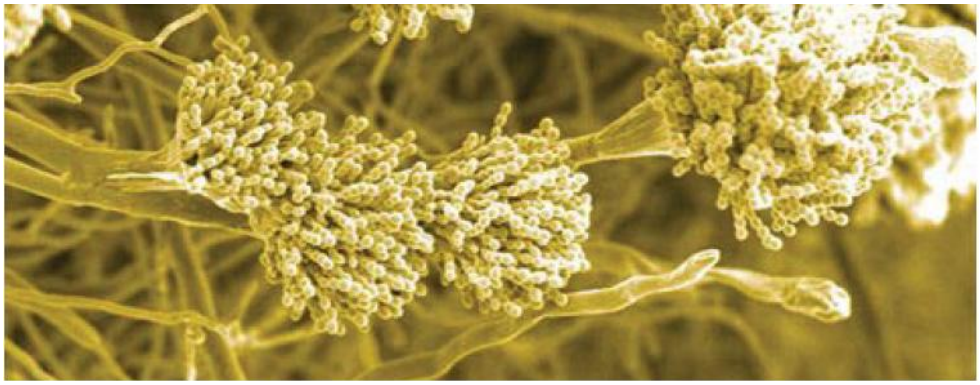


Fig. 1. - Spores d'*Aspergillus fumigatus*.
Photo *Georgia State University*.

Plus de 22 000 espèces, dont un nombre non négligeable d'intérêt majeur pour le présent rapport, sont rangées dans le phylum* des *Basidiomycota*, ou Basidiomycètes*, dont les spores* se développent à l'extrémité de cellules spécialisées (les basides*)[6] et sont dispersées par le vent à maturité.

5. Les *spores** (du grec ancien *sporá*, ensemencement) sont « des unités reproductives microscopiques qui, à l'image des graines chez les plantes, assurent la multiplication des individus chez les fougères, les mousses, les lichens, les myxomycètes et les champignons » (Béguin et Nolard, 2004). À moins que le contexte n'exclue toute ambiguïté, on parlera donc ici de *spores* fongiques** pour désigner les seules spores* de champignons*. Uni- ou pluricellulaires, elles peuvent donner naissance sans fécondation à un nouvel individu.

6. Par analogie avec les plantes, on peut considérer qu'une *baside** est le « fruit » du champignon* et les spores* (basidiospores*) ses « graines ».

On doit également envisager ici le phylum* des *Zygomycota*, ou Zygomycètes* (un peu plus de 1 000 espèces connues), champignons* à spores* dépourvues de flagelles*[7], caractérisés par une abondante reproduction asexuée et une croissance rapide leur permettant de coloniser rapidement leur milieu. À l'avenir, un embranchement redéfini des Zygomycètes* devrait également inclure la catégorie des *Mucoromycotina* ; ces derniers sont incapables de dégrader la cellulose, mais ils assimilent bien les sucres, ce qui fait qu'on les retrouve fréquemment comme agents d'altération des aliments.

Ces quatre groupes taxinomiques*, Ascomycètes*, Basidiomycètes*, Zygomycètes* et Mucors*, représentent la plus grande partie des moisissures* et levures*[8] communes dans les bioaérosols*[9].

L'immense diversité des champignons* (Armstrong et Liaw, 2002) s'exprime aussi par leur caractère ubiquitaire* et par la grande variété de leurs habitats. Ils colonisent toutes les niches écologiques. Grâce notamment à leur paroi riche en chitine*, qui leur assure une résistance notable face aux contraintes extérieures, on les retrouve sous toutes les latitudes, de l'équateur aux pôles, y compris dans des biotopes extrêmes comme les déserts, chauds ou froids, les milieux hypersalins et les environnements exposés aux radiations ionisantes. Même les sédiments marins à grande profondeur ne leur sont pas hostiles. Toutefois, la quasi-totalité des espèces* qui nous intéressent ici sont terrestres.

La plupart de ces champignons* se dispersent activement sous forme de spores* sexuées ou asexuées, éjectées à partir d'organes reproducteurs spécialisés et facilement aérosolisables*, qu'elles soient en suspension seules ou portées par des poussières contaminées. Des mécanismes mécaniques et physiologiques, mais aussi la composition de leur surface favorisent le transport de ces corpuscules, souvent par air, parfois sur de longues distances. On estime que, dans plus de 98% des cas, la dispersion est effectuée par le vent, ce que favorise une densité voisine de 1 dans l'air.

L'éjection des spores* ne constitue pas pour autant la seule source de bioaérosols* fongiques*. Des fragments de filaments mycéliens* arrachés à leur substrat* par la pluie ou par le vent, des particules de matériaux contaminés ou de la poussière contenant des particules fongiques* déposées peuvent également être aéroportés (Górny *et al.*, 2002). Enfin, des composés organiques volatils ou COV sont eux aussi libérés dans l'air, cette fois à l'état gazeux.

---

7. Un *flagelle** (du latin *flagellum*, fouet) est un filament mobile.

8. Une *levure** est définie ici comme un champignon* microscopique, le plus souvent isolé sous forme unicellulaire, qui se multiplie par bourgeonnement et occasionnellement par sporulation*, et qui est capable de provoquer la fermentation des matières organiques animales ou végétales.

9. L'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (Macher, 1999) définit les bioaérosols* comme étant des particules aéroportées constituées d'organismes vivants, tels que des microorganismes (bactéries, moisissures*, virus, protozoaires…), ou provenant d'organismes vivants (toxines*, micro-organismes morts, fragments de microorganismes…). La majorité des bioaérosols* sont de dimension respirable, soit de l'ordre de 0,02 à 0,25 micromètre (µm) pour les virus, de 0,3 à 15 µm pour les bactéries et de 1 à 50 µm pour la majorité des moisissures* et des levures* (1,5 à 5 µm pour *Aspergillus* et *Penicillum*, 20 à 80 µm pour *Alternaria*). Les pollens, quant à eux, s'échelonnent de 2,5 µm pour les plus fins (myosotis) à 150 ou 200 µm pour les plus gros (courge), le pollen de la majorité des plantes anémogames* ayant une taille comprise entre 10 et 40 µm.

Cependant, les données actuellement recueillies en routine ne concernent guère que les concentrations de spores* dans l'air, les méthodes les mieux acceptées consistant en la capture des spores*, suivie d'une identification, directe ou après mise en culture. Le paramètre essentiel de qualité de l'air que l'on prendra en compte dans ce rapport sera donc la *concentration en spores* fongiques**, rapportée à l'unité de volume d'air, en l'occurrence le mètre cube (spores/m^3).

La libération de spores* est extrêmement abondante : Ingold (1946) a pu évaluer aux alentours de 400 millions la production d'une colonie de *Penicillium* de 2,5 centimètres de diamètre. De même, un sporophore*[10] d'amadouvier (*Fomes fomentarius*, redoutable parasite de nombreux feuillus) larguerait dans l'environnement 78 millions de spores* par jour et, comme il peut en émettre pendant quatre ans, sa production totale doit avoisiner les 18 000 milliards de spores* ! Il s'ensuit que les spores* fongiques* aéroportées sont dix à cent fois plus abondantes que ne l'est le pollen (Gubler *et al.*, 1994) et qu'elles constituent la part majoritaire des bioaérosols* présents aussi bien dans l'air atmosphérique (Womiloju *et al.*, 2003) que dans l'air intérieur[11].

Leur durée d'émission varie beaucoup d'une espèce à l'autre. Aux latitudes moyennes[12] et à l'extérieur, les concentrations de la majorité des spores* fongiques*, notamment celles des biotrophes*, tombent à des niveaux extrêmement bas tout au long de l'hiver, alors qu'elles présentent des pics souvent très proéminents au plus fort de l'été ; la période de sporulation* est alors strictement fonction du développement de la plante hôte* (Béguin et Nolard, 2004*a*). Mais il existe des exceptions, relativement nombreuses : certains nécrotrophes* sporulent quasiment sans interruption du début du printemps au milieu de l'automne, et la plupart des *Aspergillaceæ* sont peu sujettes aux variations saisonnières, certaines espèces ayant même tendance à libérer leur maximum de spores* en début d'année. *Penicillium*, quant à lui, est présent pendant les douze mois, à la seule exception des jours de

10. On appelle *sporophore** la fructification du mycélium d'un champignon.

11. Une flore fongique* abondante et variée peut en effet être isolée dans l'air intérieur, sur les lieux de travail (Goyer *et al.*, 2001) et dans l'habitat (Reboux et Nolard, 2007). En France, selon l'enquête réalisée en 2002 par l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), 23% des logements seraient ainsi contaminés (Boutin-Forzano *et al.*, 2006). Les moisissures* se retrouvent alors sur des aliments destinés à la consommation humaine ou animale, ainsi que sur des objets faits de matériaux cellulosiques (coton, papier, bois) ou d'origine animale (cuir). Les spores* de moisissures* en suspension dans l'air intérieur sont *a priori* les mêmes que celles retrouvées à l'extérieur, dans la mesure où ces deux espaces communiquent librement (Shelton *et al.*, 2002). Cependant, certaines espèces* trouvent dans l'habitat des substrats* plus propices à leur développement tels que les plâtres, les papiers peints, les peintures, le mobilier… En outre, le nombre de spores* viables dans l'air intérieur se situe habituellement entre 0 et 1 x 10^5 unités formant colonies* par mètre cube d'air (UFC/$m^{3)}$, bien que de plus fortes concentrations puissent être retrouvées en milieu agricole ou industriel (Goyer *et al.*, 2001). Cependant, les décomptes les plus fréquents en milieu résidentiel ou en milieu de travail non industriel se situent entre 50 et 1 500 UFC/m^3 (Strachan *et al.*, 1990), ce qui reste nettement au-dessous des concentrations habituellement retrouvées à l'extérieur où, à l'abri d'interférences locales, les taux varient selon les régions et les saisons entre 10 000 et 1 000 000 d'UFC/m^3, soit entre 10^4 et 10^6 (Thibaudon, 2009).

12. Il en va différemment en climat tropical chaud et humide, donc dans la plupart des DROM-COM, où la concentration de spores* fongiques* aéroportées culmine régulièrement et massivement en hiver, ainsi que Desbois *et al.* (2006) l'ont bien montré sur l'exemple de Fort-de-France, en Martinique.

très grand froid. Enfin, les Ascomycètes* et Basidiomycètes* prédominent souvent la nuit, surtout après la pluie.

La morphologie des spores* présente, elle aussi, une grande variabilité, ainsi que l'atteste la description de Béguin et Nolard (2004*a*) : une spore* peut être « sphérique, ovoïde, allongée, enroulée sur elle-même, ramifiée, munie d'appendice(s), lisse, épineuse, verruqueuse ou différemment ornementée, hyaline* ou vivement colorée, jaune, rouge, bleue, verte, brune, noire, unicellulaire ou divisée par des cloisons transversales ou horizontales ou les deux ». On conçoit dès lors que l'identification des spores*, au niveau de la famille, du genre ou *a fortiori* de l'espèce*, ne soit jamais chose aisée.

Une fois inhalés, fragments mycéliens* et spores* pénètrent plus ou moins profondément dans l'arbre respiratoire, avant tout selon leur taille, mais aussi en fonction de leur forme, de leur densité, de leur diamètre médian massique*[13] (DMM), de leur viscosité et de leur tension de surface. Les particules dont le diamètre n'excède pas 2 à 5 µm peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires, où leur prise en charge par les macrophages* est en principe rapide mais saturable, tandis que celles de 10 à 60 µm se déposent en majorité dans les voies aériennes supérieures (Hendry et Cole, 1993).

Comme les autres paramètres biologiques de la qualité de l'air, la concentration en spores* fongiques* varie d'un échantillonnage à l'autre en fonction des conditions locales de l'environnement. Parmi ces conditions, nous retiendrons plus particulièrement ici celles qui sont directement ou indirectement liées, à court terme, au « temps qu'il fait » ou, à moyen et long terme, au climat (Jones et Harrison, 2004). Des phénomènes météorologiques tels que le vent et la pluie affectent *directement* et à court terme, positivement ou négativement, la capacité des champignons* à disperser leurs spores* et le transport ultérieur de ces spores* sur de longues distances.

À plus ou moins long terme, une évolution du climat modifiant durablement les conditions locales de température et d'humidité pourrait affecter la prolifération des champignons* sur les substrats* exposés et donc, *indirectement* cette fois, la concentration de spores* dans l'air. Ce n'est du reste pas seulement l'abondance de la production de spores* qui est susceptible d'être influencée par l'évolution des dispositions thermo-hygrométriques, mais aussi la durée d'émission de ces spores* (Ayerst, 1969), voire leur saisonnalité. Le changement climatique annoncé peut également se traduire par une fréquence accrue de phénomènes météorologiques aujourd'hui considérés comme exceptionnels, tels que les ouragans, les tempêtes et les inondations. De tels paroxysmes pourraient avoir un effet local favorable à la prolifération des moisissures*.

Enfin, et de façon plus indirecte encore, le changement climatique, et plus spécialement la perception de ce changement climatique par la population ou par les autorités, pourrait être la cause de modifications importantes des conditions de vie, notamment en ce qui concerne l'habitat et les

13. Le diamètre médian massique* est le diamètre pour lequel 50% de la masse totale des particules constituant l'aérosol* est de taille supérieure et 50% de taille inférieure.

activités agricoles. Ces bouleversements de l'environnement, anthropiques par définition, pourraient à leur tour se répercuter sur le paramètre fongique* de la qualité de l'air intérieur[14] et aussi, éventuellement, sur la qualité fongique* de la chaîne alimentaire. La prolifération de moisissures* dans les logements est liée la plupart du temps à des problèmes d'humidité : lorsque l'humidité relative devient trop importante, des concentrations élevées en spores* peuvent être observées dans l'air intérieur tout au long de l'année - et non plus seulement de juillet à septembre. Cette prolifération n'est pas soumise aux variations climatiques saisonnières, ou l'est peu, si bien que l'exposition potentielle des habitants est continue. De plus, le confinement peut contribuer à l'accumulation de spores* ou fragments mycéliens*, ainsi que de métabolites* (composés organiques volatils, mycotoxines*…), pouvant conduire à de fortes doses d'exposition. Les espèces en cause dans l'air intérieur sont également différentes de celles de l'air extérieur et dépendent de la présence de différents facteurs favorisants qui ne sont pas forcément liés au climat, mais plutôt à la qualité de l'architecture, à la nature des matériaux utilisés et au bon entretien des infrastructures.

Il est, dès lors, tout à fait légitime de s'inquiéter des conséquences possibles sur la santé d'une amplification du risque lié aux moisissures* en cas de modification durable du climat (fig. 2). Ce sera donc l'objet des pages qui suivent que de fournir aux autorités compétentes un certain nombre d'éléments leur permettant de préparer une réponse appropriée au « risque sanitaire climat-moisissure ».

Nous nous appuierons en priorité, pour cela, sur un dépouillement critique, certes non exhaustif mais significatif, de la littérature scientifique internationale consacrée au sujet[15]. Dans les limites des compétences des auteurs et des données disponibles, un « état des lieux » pourra ainsi être dressé, lui-même articulé en trois volets :

- *Caractérisation du risque-moisissure pour la santé, en fonction des espèces* fongiques* ;*
- *Caractérisation de la surveillance des moisissures* aéroportées ;*
- *Caractérisation des facteurs météorologiques et climatiques susceptibles de favoriser la prolifération des espèces* à risque.*

Les dimensions lieu et temps seront utilisées pour décrire la variation du risque en fonction des conditions de l'environnement observées sur la planète, mais aussi en fonction des effets connus de phénomènes exceptionnels comme les grandes inondations. Une attention particulière sera portée aux rares simulations

14. Environ 17% des logements échantillonnés en Île-de-France par Grémy *et al.* (2010) présentaient des moisissures* visibles, et 22% une source endogène d'ergostérol*, l'ergostérol étant un constituant de la membrane cellulaire des champignons* microscopiques dont le dosage dans l'air (Robine *et al.*, 2006) permet d'appréhender le niveau de contamination fongique* des environnements intérieurs. Si les pourcentages qui précèdent sont extrapolés à l'ensemble de la région, ils fournissent un ordre de grandeur du nombre de logements concernés : 750 000 pour la présence de moisissures visibles et un million pour la présence d'une source intérieure d'ergostérol* ! Cependant, en raison de l'échantillonnage et du faible effectif de logements concernés, ces chiffres ont une simple valeur illustrative. Par ailleurs, ils sous-estiment probablement la réalité, compte tenu du fait que les foyers les plus précaires n'ont pas pu être inclus dans l'échantillon.

15. Revue de la littérature scientifique, principalement en langues française et anglaise, dans les revues internationales avec Comité de Lecture et rapports de comités d'experts, seulement dans le cas où les experts et leurs sources sont clairement identifiés.

qui ont pu être réalisées, dans le cadre du GIEC[16] ou dans d'autres cadres, sur ce que pourraient être à l'avenir la distribution des moisissures* et des spores* dans l'atmosphère, si les prévisions sur l'évolution du climat au XXIème siècle se réalisent, en relation avec une intensification de l'effet de serre*.

CDC
CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION

November 29, 2010

Climate Change and Public Health :

Aero-allergens

Increased ambient temperatures over land and increased ground-level carbon dioxide concentrations, both of which are expected with climate change, result in increased plant metabolism and pollen production. These factors may also be associated with **increased fungal growth and spore release**.

Pollen and **mold spores are allergens and can aggravate allergic rhinitis and several respiratory diseases, including asthma and chronic obstructive pulmonary disease**, though the latter diseases have other significant triggers. Allergic diseases are the sixth leading cause of chronic disease in the U.S. and impose a substantial burden on the U.S. population. Asthma alone affects approximately 20 million Americans. Some experts have suggested that the global rise in asthma is an early health effect of climate change.

Aeroallergens act with other harmful air pollution to worsen respiratory disease. While the magnitude of climate change's impact on allergic disease in the U.S. is yet to be determined, preliminary evidence suggests that there could be **a substantial effect**.

Fig. 2. Le point de vue « officiel » des États-Unis.

D'ap. http://www.cdc.gov/climatechange/effects/allergens.htm

On s'efforcera de discuter tout spécialement l'effet d'une modification des concentrations et d'un éventuel allongement des périodes d'exposition sur l'incidence et/ou la prévalence des allergies* aujourd'hui saisonnières. L'effet, d'ores et déjà assez bien documenté, d'une modification du risque mycotoxine* (déterminé par les espèces prévalentes) sur la sécurité de la chaîne alimentaire sera également abordé, et un bref développement sera consacré à l'incidence des mycotoxicoses*.

Les enseignements tirés de la littérature seront de ce point de vue complétés, au moins pour les deux espèces *Alternaria* et *Cladosporium*, par une exploitation plus précise des données disponibles :

- d'une part, dans la base de données française du *Réseau national de surveillance aérobiologique* (RNSA), pour les sites identifiant et dénombrant les moisissures* (Thibaudon, 2008) ;
- d'autre part, dans la base de données de l'*European Aeroallergen Network* (EAN). On s'attachera à citer le plus grand nombre de pays, même si le nombre de stations retenues par pays est inévitablement très limité. Quant aux périodes retenues, elles seront évidemment les plus longues possibles, mais hétérogènes d'un pays à l'autre quant à leurs dates et à leurs durées.

16. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*).

Cet état des lieux se conclura par un tableau de synthèse commenté du risque sanitaire climat-moisissures, permettant d'identifier rapidement les facteurs de risque et leurs effets.

Une dernière partie exploitera alors les données précédemment réunies pour produire une série de recommandations en matière de politique de « recherche et développement », visant à une meilleure maîtrise du risque sanitaire climat-moisissure. D'une part, l'analyse bibliographique aura nécessairement comme sous-produit l'identification de *questions non résolues*, pourtant pertinentes pour la préparation d'une réponse appropriée. D'autre part, des recommandations seront faites relativement à la *prévention des risques* dans le contexte français actuel, puis au regard des évolutions que pourraient engendrer les changements climatiques dans notre pays. En fonction des capacités techniques aujourd'hui disponibles, des priorités de recherche à court, moyen et long terme seront définies. Les améliorations à apporter aux outils de surveillance permettant de suivre l'évolution du risque sanitaire climat-moisissures feront l'objet d'une attention particulière. Des synergies pourront être envisagées avec d'autres domaines de recherche (sécurité de la chaîne alimentaire, défense et sécurité…) faisant l'objet de financements publics conséquents et/ou s'activant à développer de nouveaux outils de surveillance en aérobiologie.

Il conviendra toutefois d'accepter d'emblée la limitation majeure de cette entreprise : si des études ont relativement bien documenté le lien entre la qualité de l'air et les conditions météorologiques locales, il demeure très difficile de rassembler des informations pertinentes sur les variations interannuelles à long terme des mesures de paramètres de qualité de l'air, ici les bioaérosols* fongiques*.

En revanche, à partir de la notion de facteurs favorisant la prolifération des moisissures*, il doit être possible de réfléchir, avec une approximation non excessive, à la manière dont les variations climatiques interannuelles à long terme pourraient influencer les paramètres de qualité de l'air.

En tout état de cause, l'utilité d'une telle démarche sera d'aider à mettre en place les mesures nécessaires à la surveillance et au contrôle de la qualité de l'air dans les années ou les décennies à venir, mais aussi de définir des mesures de prévention[17].

17. Par souci de lisibilité, les termes très fréquemment employés et définis dans le Glossaire, comme champignon*, moisissure*, spore* ou fongique*, ne seront plus suivis d'un astérisque dans la suite de ce Rapport.

I. Effets des moisissures sur la santé
Lien entre santé et taux de spores fongiques dans l'air

Qu'il s'agisse de substances élaborées par les moisissures ou d'éléments constituant les parois des spores et du mycélium*, diverses composantes fongiques[18] sont susceptibles d'entraîner des effets nocifs chez les individus exposés (fig. 3). On ne manquera cependant pas de noter qu'elles n'affectent pas la santé de l'ensemble, ni même de la majorité de la population. C'est seulement lorsque leur concentration atteint un niveau anormalement élevé et/ou chez des patients souffrant de problèmes respiratoires ou de déficiences du système immunitaire qu'apparaissent symptômes et maladies (Sorenson, 1999).

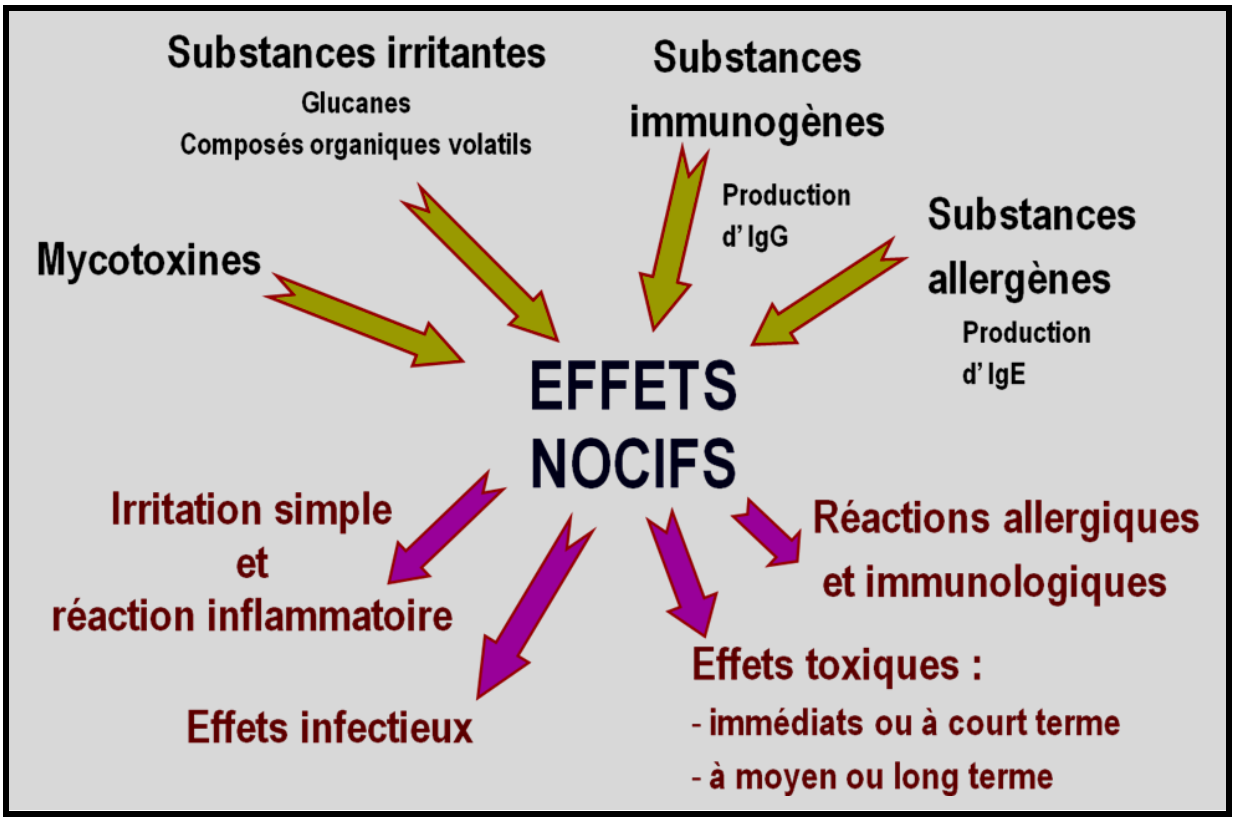


Fig. 3. - Les effets nocifs des moisissures sur la santé.

D'ap. Patrick Boiron, *http://www.ispb.univ-lyon1.fr/.../Site.../Video%20**Allergie**%202.ppt*

L'exposition aux moisissures, en particulier par inhalation de spores fongiques et d'autres éléments mycéliens* en suspension dans l'air, est susceptible d'entraîner de multiples pathologies, majoritaire-

18. En pratique, et même s'il faut souhaiter des investigations complémentaires, il semble bien que les structures fongiques non viables d'une espèce donnée se révèlent tout aussi délétères que ses structures viables (c'est-à-dire ayant conservé leur pouvoir germinatif) et qu'elles aient exactement les mêmes effets (Macher, 1999).

ment respiratoires, mais assez souvent aussi cutanées et quelquefois autres. En fonction des espèces présentes, de leur concentration et de la durée d'exposition, différents mécanismes d'action peuvent être individualisés (Seltzer et Fedoruk, 2007). Les effets sur la santé sont alors des réactions d'hypersensibilité* (largement prépondérantes), des mycotoxicoses*, des infections ou encore des irritations (Chabasse *et al.*, 1999). Si l'on met à part les expositions professionnelles, principalement en milieu agricole ou forestier, la contamination de l'air extérieur (*outdoor*) n'est guère associée qu'à des réactions allergiques, incluant l'asthme, alors que l'exposition intérieure (*indoor*) peut avoir des effets variés, irritation et allergie restant néanmoins prédominantes. La nature de la relation dose-réponse entre l'exposition aux moisissures et l'effet sur la santé n'est pas encore connue avec précision, au moins espèce par espèce et par pathologie (Bush et Portnoy, 2001 ; Goyer *et al*., 2001 ; Green *et al.*, 2006). L'existence d'un seuil d'exposition sécuritaire au-dessous duquel il n'y aurait pas de risque est également controversée, surtout que les sensibilités individuelles sont très variables. En revanche, il est désormais prouvé que des expositions répétées ou prolongées augmentent les risques (Johanning, 1999).

a) Allergies

Les substances telles que protéines, polysaccharides et lipopolysaccharides, contenues dans différents composants des moisissures, sont reconnues comme étant des allergènes*. Il s'ensuit que l'allergie* est la manifestation la plus commune associée à l'exposition à des spores fongiques. Trois à dix pour cent de la population mondiale souffriraient ainsi de réactions allergiques* dues aux moisissures (Hamilos, 2010)[19], et 5 à 22% de la population nord-américaine (Bellanti et Wallerstedt, 2000)[20], tandis que 20 à 30% des sujets atopiques*[21] présentent une allergie d'origine fongique. À ce jour, environ 150 allergènes* fongiques individuels ont été isolés, la plupart chez des espèces courantes dans l'air (Horner *et al.*, 1995), et quelque 340 espèces de micro-champignons, notamment des genres *Aspergillus, Penicillium, Alternaria* et *Cladosporium,* ont été signalées comme allergéniques*.

Les mécanismes immunologiques impliqués (Boutin-Forzano *et al.*, 2006 ; Simon-Nobbe *et al.*, 2008) sont des réactions d'hypersensibilité* de type I, II, III ou IV[22].

---

19. En France, le chiffre de 3% est régulièrement avancé (Caillaud, 2005), mais il reste à valider.

20. Le taux serait d'environ 20% au Canada ; cf. http://www.science.gc.ca/default.asp?Lang=Fr&n=EC59F76F-1

21. On rappellera que l'*atopie** correspond à une notion ancienne de « terrain » caractérisé par une propension constitutionnelle ou héréditaire de certains individus à développer, plus que d'autres, des manifestations d'hypersensibilité* immédiate (conjonctivite, rhinite allergique, asthme…) ou d'autres réactions allergiques* en présence d'allergènes* qui ne provoquent aucune réaction chez les sujets « normaux ». Quant au terme d'*allergène**, il s'applique à toute substance capable d'entraîner une sensibilisation du système immunitaire et de mener à une réaction allergique*, lors des expositions subséquentes, ainsi qu'aux manifestations cliniques qui y sont associées. Les allergènes* sont restreints à certaines grandes familles de protéines.

22. L'allergie* de type I (ou anaphylactique), la plus courante, est une réaction d'hypersensibilité* *immédiate*, liée à la synthèse exagérée d'anticorps* de la classe E (IgE). L'allergie* de type II, *intermédiaire*, est une hypersensibilité* cytotoxique, dont les anticorps* sont des IgM ou des IgG avec activation du complément*. L'allergie de type III, elle aussi *intermédiaire*, est une hypersensibilité* à complexes immuns circulants antigène-anticorps. Enfin, l'allergie de type IV (eczéma, par exemple) est une allergie* *retardée*, à médiation cellulaire liée aux lymphocytes* T et aux cytokines* qu'ils produisent.

- Manifestations cliniques d'allergie de type II, III ou IV et lien avec les bioaérosols fongiques*

Les composantes des parois cellulaires et du cytoplasme* des cellules fongiques, notamment les substances complexes de poids moléculaire élevé, sont des substances immunogènes*. Dès qu'elles traversent les barrières naturelles de la peau et des muqueuses, elles peuvent déclencher une réaction humorale, avec production d'anticorps* IgG spécifiques, ainsi qu'une réponse d'immunité cellulaire, et cela sans qu'il y ait de processus infectieux. Les IgG spécifiques se fixent alors sur les fragments fongiques respirables et ces complexes immuns provoquent une cascade de réactions cellulaires menant à la mobilisation du complément*[23], à l'inflammation et parfois même à la destruction tissulaire. Une telle réaction amplifiée, déclenchée par un agent non envahisseur, constitue un mécanisme d'hypersensibilité* de type III, c'est-à-dire une réaction due à la formation de complexes immuns différente de l'allergie de type I. Le fait que cette réaction soit parfois suivie de la formation de lésions granulomateuses* suggère en outre la possibilité d'une réaction d'hypersensibilité* de type IV ou réaction cellulaire.

- Les **mycoses* bronchopulmonaires allergiques*** (MBPA) impliquent des réactions allergiques* de type I, III et IV et sont le plus fréquemment causées par l'inhalation d'*Aspergillus*, notamment de l'espèce *fumigatus*, impliquée neuf fois sur dix ; 7 à 22% des asthmatiques seraient concernés, avec évolution fréquente vers une insuffisance respiratoire chronique (Chanal *et al.*, 1993 ; Greenberger, 2002). Dans les conditions normales, le tapis muco-ciliaire de l'épithélium bronchique assure la clairance* de la majorité des spores inhalées et seule une petite fraction atteint les alvéoles pulmonaires, où leur élimination est assurée par les macrophages* alvéolaires. Mais quand la capacité de défense des macrophages* est elle-même dépassée, les spores germent et donnent naissance à des filaments ; les polynucléaires neutrophiles représentent alors la dernière ligne de défense vis à vis de la moisissure. Chez un individu bien portant, la mise en jeu de ces mécanismes fait obstacle à toute dissémination. En revanche, chez les sujets hautement fragilisés et/ou immunodéprimés, aucune barrière ne s'oppose au développement tissulaire d'*Aspergillus*. Le risque d'aspergillose invasive est alors directement proportionnel à la concentration des spores en suspension dans l'air, et l'on a noté une incidence localement accrue dans des circonstances entraînant des dénombrements anormalement élevés d'*Aspergillus* aéroportées, tels que des travaux de construction ou une défectuosité des systèmes de filtration de l'air. Si les contaminations intérieures sont les plus fréquemment incriminées, une corrélation forte a aussi été rapportée avec le nombre de spores dans l'air atmosphérique.

23. Le système du *complément** est un ensemble complexe de protéines circulantes ou membranaires du sang, principalement sécrétées par le foie et faisant partie de l'immunité innée. Il joue un rôle essentiel dans les réactions immunologiques de défense de l'organisme, par ses propriétés neutralisantes et destructrices.

- Plusieurs espèces couramment véhiculées par l'air, telles que les *Aspergillus*, les *Curvularia*[24] (fig. 4) et les *Alternaria*, peuvent provoquer des **sinusites fongiques allergiques*** (SFA) et des « balles fongiques »* formées par accumulation et croissance de microchampignons dans les sinus, sans invasion tissulaire (Braun *et al*., 2007). La réaction associée est de type I, III ou IV. La prévalence des sinusites allergiques* fongiques reste discutée. L'étude de Ponikau *et al*. (1999), fondée sur la détection quantitative de moisissures et d'éosinophiles dans la mucine*, va jusqu'à associer 96% des sinusites chroniques à l'exposition aux moisissures de l'air.

Photo *Am. Soc. Microbiology.*

Fig. 4. - Spores de *Curvularia*.

- Les **alvéolites* allergiques* extrinsèques** (AAE), particulièrement invalidantes et parfois à l'origine d'une fibrose* interstitielle irréversible du tissu pulmonaire, peuvent être causées par une réaction d'hypersensibilité* de type III/IV, après inhalation chronique de substances antigéniques d'origine fongique (Roussel *et al.*, 2005). Ces pneumopathies* aiguës ou subaiguës mettent en jeu des phénomènes d'hypersensibilité* semi-retardée de type III, avec présence d'anticorps* spécifiques du ou des genres d'antigènes* en cause. Dans la très grande majorité des cas, les sources antigéniques* sont d'origine professionnelle et un lien direct a pu être établi avec la durée et l'intensité de l'exposition à des concentrations élevées d'antigènes* dans l'air[25]. Parmi les étiologies liées à la pollution domestique, des cas d'AAE ont été récemment rapportés à l'inhalation d'espèces courantes de moisissures (*Penicillium*, *Serpula*[26], *Aspergillus*...). C'est l'une des principales indications pour la réalisation d'une mesure de la concentration en spores fongiques dans l'habitat.

- Manifestations cliniques d'allergie de type I et lien avec les bioaérosols fongiques*

L'allergie* fongique de type I est induite par un grand nombre d'espèces présentes dans l'air. On retrouve principalement des Ascomycètes* (*Alternaria*, *Aspergillus*, *Bipolaris*, *Cladosporium*,

24. Les *Curvularia* (environ 35 espèces) sont des champignons filamenteux imparfaits appartenant à la classe des Deutéromycètes*. Ils sont surtout répandus en climat tropical et subtropical, notamment sur les plants de graminées, mais une recherche attentive permet de les retrouver sous tous les climats. Leurs spores sont réputées particulièrement allergisantes. Malheureusement, les travaux manquent à ce sujet.

25. Alors que la « maladie des éleveurs d'oiseaux » (*bird breeder's lung*), due à l'inhalation de protéines aviaires contenues dans le sérum ou les déjections desséchées de pigeons, de perruches ou de gallinacés, n'est pas une pathologie fongique, l'exemple-type est celui du « poumon de fermier » (*farmer's lung*), identifié en 1962 et lié à l'inhalation de spores d'Actinomycètes* thermophiles*, notamment *Thermopolyspora polyspora* contaminant le foin. Ces spores, qui ne dépassent pas 0,3 à 1 µm, pénètrent facilement jusqu'aux alvéoles.

26. Le genre *Serpula* fait partie de l'embranchement des Basidiomycètes*. La seule espèce rapportée à la fois comme contaminant du milieu intérieur et comme agent étiologique de problèmes de santé est *S. lacrymans*, mérule ou « champignon des maisons » qui, sur un support suffisamment humide et contenant du bois, prend l'aspect d'un feutrage blanc, épais et cotonneux. Son optimum thermique se situe entre 19 et 21°C. Il tolère mal les températures plus élevées, et le réchauffement climatique pourrait ralentir son développement. On a dénombré dans des appartements jusqu'à 360 000 spores de mérule par mètre cube d'air.

Epicoccum, Phoma…), mais aussi quelques Basidiomycètes* (*Coprinus, Scléroderma…*) et des Zygomycètes* (*Absidia, Mucor, Rhizopus*).

Selon les études, l'incidence de l'allergie* fongique de type I s'échelonne de 5,5 à 25% dans la population générale (Malléa et Charpin, 1992), pour atteindre 44% chez les atopiques*, 45% chez les enfants asthmatiques et 70% chez les adultes asthmatiques. Mais il faut aussitôt signaler qu'une proportion élevée des patients considérés se révèle en réalité polysensibilisée, avec des IgE spécifiques à plusieurs antigènes* fongiques, mais aussi aux pollens, aux acariens et aux blattes, voire à certains aliments.

Les manifestations cliniques, qui n'ont rien de spécifique, touchent essentiellement la peau, l'œil et ses annexes, et les voies respiratoires, hautes ou basses, avec de fréquentes formes mixtes (fig. 5).

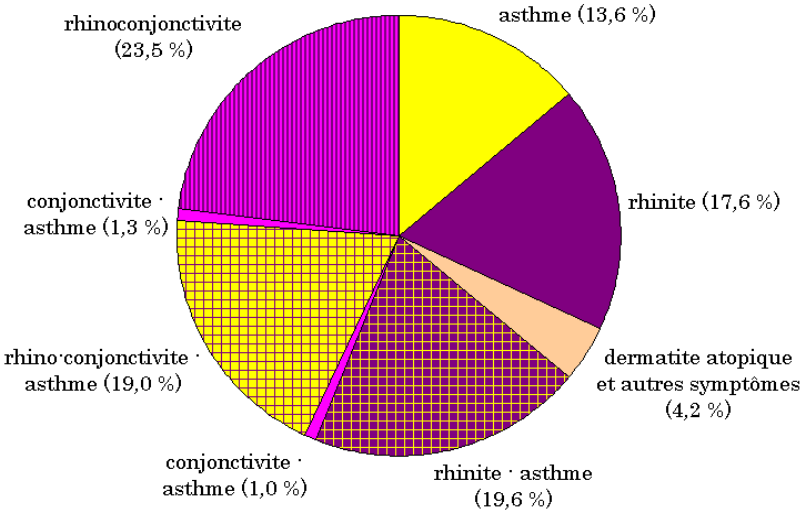


Fig. 5. - Les symptômes de l'allergie à *Alternaria.*

D'ap. Patrick Boiron, *http://www.ispb.univ-lyon1.fr/.../Site.../Video%20**Allergie**%202.ppt*

- Sauf circonstances exceptionnelles, comme la présence de *Saccharomyces cerevisæ* (« levure de boulanger » ou « levure de bière »), la **dermatite atopique*** n'est pas typiquement associée à des espèces rencontrées dans l'air. L'impact d'une modification de la concentration en spores atmosphériques apparaît dès lors hors de propos.

- À l'inverse, la **rhinite**, la **conjonctivite** et la **rhino-conjonctivite allergiques*** peuvent être induites par un grand nombre d'espèces* fongiques courantes dans l'air, les plus fréquemment impliquées étant dans l'ordre *Alternaria, Mucor, Botrytis, Aspergillus, Bipolaris, Curvularia, Penicillium* et *Cladosporium.* Il s'y ajoute *Stemphylium*[27] en domaine méditerranéen, où il peut accéder au premier rang, comme autour de Montpellier (Dakhil *et al.*, 1983). Selon certains au-

27. Moisissure filamenteuse vivant en saprophyte* sur la paille, rarement isolée en ville mais abondante en milieu agricole ; un optimum thermique proche de 25°C, ou légèrement supérieur, laisse à penser qu'un réchauffement climatique pourrait se traduire par une plus forte présence hors du domaine méditerranéen.

teurs (Corey *et al*., 1997), les moisissures seraient responsables de près de la moitié des rhinites allergiques* saisonnières.

- Depuis 1980, un nombre sans cesse croissant d'études suggèrent une association statistique forte, à défaut d'un lien causal avéré entre, d'un côté, sensibilisation aux allergènes* d'origine mycotique* et, de l'autre, apparition, persistance et exacerbation de l'**asthme** (Lawrence *et al.*, 2008 ; Portnoy *et al.*, 2008). C'est ainsi qu'une réactivité cutanée à différentes moisissures a été fréquemment retrouvée, sinon chez tous les asthmatiques, en tout cas chez les patients souffrant d'un asthme engageant le pronostic vital (O'Driscoll *et al*., 2009). Ces allergènes* appartiennent à des espèces* courantes dans l'air, les sept genres *Alternaria, Aspergillus, Cladosporium, Helminthosporium, Epicoccum, Aureobasidium* et *Penicillium* étant les mieux représentés. En de nombreux endroits, il existe un asthme fongique* saisonnier, concomitant ou immédiatement postérieur aux pics atmosphériques d'*Alternaria* et de *Cladosporium*. L'importance clinique d'*Alternaria* a été notamment mise en évidence chez les enfants par Downs *et al*. (2001), qui concluent à une responsabilité peu contestable de *Alt a1* à l'origine des asthmes sévères. De fortes concentrations en spores* ont été associées à une recrudescence des admissions pour asthme dans les hôpitaux de nombreuses villes, sous des climats variés, comme la Nouvelle-Orléans (Salvaggio *et al.*, 1971), Derby (Newson *et al.*, 2000), Cambridge (Pulimood *et al.*, 2007), Manchester (O'Driscoll *et al.*, 2005), Mexico et Ottawa (Dales *et al.*, 2004)[28]. En Californie comme en Pennsylvanie, la courbe des symptômes d'asthme n'est pas loin de se superposer à celle de *Cladosporium*, d'*Alternaria* et/ou d'*Epicoccum pupurascens*[29] : après ajustement sur la température et sur les autres facteurs de confusion, chaque élévation de 1 000 spores/m^3 de la concentration journalière de spores fongiques, tous taxons* confondus ou (fig. 6) pour les cinq taxons majoritaires, se traduit par une hausse de 14 à 16% de la sévérité de l'asthme, évaluée sur une échelle internationalement reconnue (Delfino *et al*., 1997). À Bruxelles, en année moyenne, une quinzaine de jours présentent un risque élevé de crise d'asthme aigu grave par allergie aux moisissures de l'air atmosphérique (Hutsebaut *et al.*, 2004). Une surmortalité par asthme a également été observée chez les jeunes adultes en Angleterre et au Pays de Galles durant le trimestre juillet-septembre, qui coïncide au Royaume-Uni avec les plus forts pics de spores de moisissures dans l'air extérieur : le risque de décès par crise d'asthme serait 2,16 fois plus élevé en présence de concentrations de spores fongiques dépassant 1 000/m^3, en comparaison des concentrations inférieures à ce seuil (Targonski *et al.*,

28. Il n'existe quasiment pas de travaux français sur le lien entre exposition aux moisissures de l'air extérieur et asthme dans la population générale.

29. Moisissure saprophyte* cosmopolite*, souvent associée à des plantes sénescentes et à de la matière végétale en décomposition, capable de se développer entre -3 et +45°C, avec un optimum à 23-28°C. Ses spores sèches sont facilement dispersées par le vent et les mouvements hygroscopiques*. Elles sont plus communes par temps sec et venteux, avec des décomptes plus élevés en fin de journée, mais très inégaux d'un site à l'autre.

1995), sans que les grains de pollen (parfois mille fois moins nombreux) n'exercent un véritable effet confondant. Le lien entre l'asthme et le taux de spores fongiques dans l'air atmosphérique n'est donc plus guère contesté (Denning *et al.*, 2006 ; Atkinson *et al.*, 2006) et le concept de *severe asthma with fungal sensitisation* semble bien correspondre à une réalité.

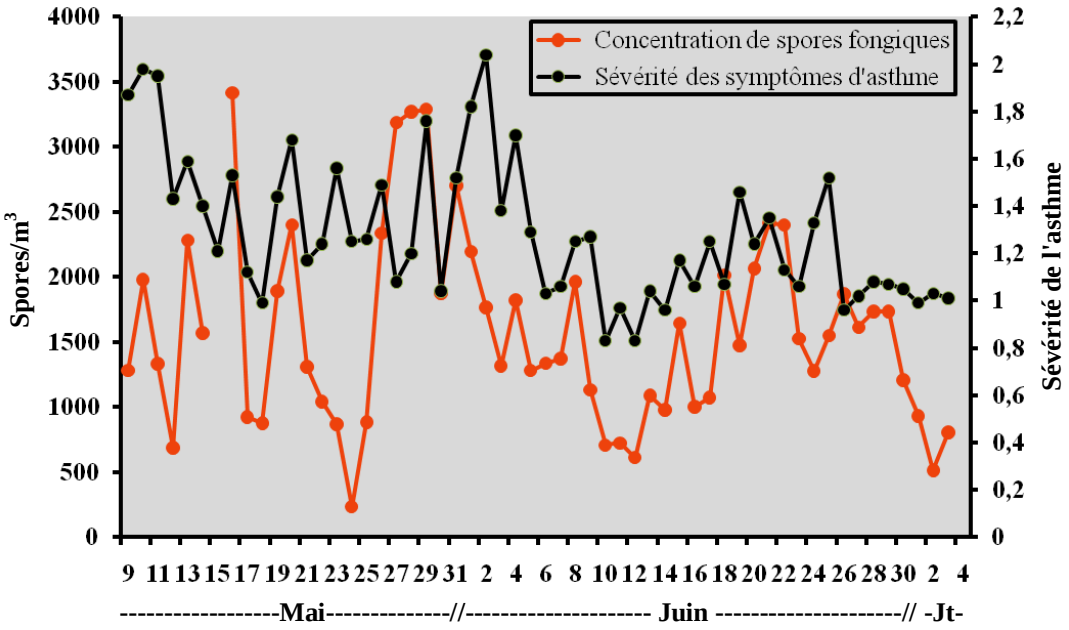


Fig. 6. - Courbes comparées des concentrations atmosphériques de spores fongiques et des symptômes d'asthme en zone rurale du Sud de la Californie.

D'ap. Delfino *et al*. (1997).

Concentrations de spores fongiques (en rouge, échelle de gauche) pour les cinq principaux taxons* : *Alternaria, Helminthosporium, Cladosporium, Aspergillus* et *Penicillium.*

Sévérité des symptômes d'asthme (en noir, échelle de droite).

*b) Mycotoxicoses**

Les mycotoxines*[30] sont des métabolites secondaires*[31] peu ou pas volatils, de faible poids moléculaire en comparaison des allergènes* fongiques. Seules certaines espèces de moisissures sont connues comme ayant la capacité de produire de telles toxines*. Leur biosynthèse dépend de multiples facteurs, aux premiers rangs desquels on citera la température, l'intensité lumineuse, le taux de CO_2 atmosphérique, les éléments nutritifs disponibles et la présence d'autres espèces* en compétition.

Répertoriées au nombre d'un peu plus de 400, dont une vingtaine considérées comme potentiellement dangereuses (Etzel, 2002), les mycotoxines* (qui se retrouvent dans les spores, dans les débris

30. Il est très rare qu'une mycotoxine* soit spécifique à une moisissure donnée ; la gliotoxine, par exemple, peut aussi bien être produite par *Aspergillus fumigatus* que par *Trichoderma viride*. À l'inverse, une moisissure donnée peut produire plusieurs toxines* différentes (au moins 8 dans le cas d'*Aspergillus fumigatus*).

31. Un *métabolite secondaire** est un composé que produisent les microorganismes (bactéries, champignons...) lorsque leur milieu de culture s'appauvrit en éléments nécessaires à leur croissance et, donc, lorsqu'ils entrent dans une phase décroissante de développement ; ce composé est le plus souvent toxique.

mycéliens* et dans le support de croissance des moisissures, à moins qu'elles ne soient adsorbées sur des poussières) peuvent avoir des effets immunosuppresseurs, hépatotoxiques, neurotoxiques, mutagènes*, carcinogènes* et éventuellement tératogènes*[32]. Bien que l'on manque encore de données chiffrées, il paraît acquis que la toxicité persiste longtemps, y compris une fois que les éléments fongiques ne sont plus viables (Peraica *et al.*, 1999).

La sévérité des effets toxiques, aigus ou chroniques, dépend du type de mycotoxine*, de la durée d'exposition et de la dose[33], d'éventuelles synergies ou potentialisations de diverses mycotoxines* présentes simultanément[34], mais aussi de l'âge, du statut nutritionnel et de la susceptibilité de l'individu exposé. L'archétype en est le « feu de Saint-Antoine » ou « mal des ardents », largement décrit dès le Moyen Âge et imputable à un empoisonnement à long terme faisant suite à l'ingestion d'alcaloïdes* produits par l'ergot du seigle (*Claviceps purpurea*), un Ascomycète* qui parasite les graminées. Le nom moderne de la maladie, qui se traduit notamment par des lésions gangreneuses et des atteintes du système nerveux central pouvant conduire au décès, est l'ergotisme. Le jeune millet, récolté après la fonte des neiges, a également provoqué en Russie, de 1942 à 1947, une véritable épidémie d'intoxications, par ingestion de farines contaminées, avec une mortalité approchant 60%. Cette fois, ont été incriminées des trichothécènes* produites par des moisissures appartenant au genre *Fusarium*. Les intoxications surviennent essentiellement à la suite d'un contact ou d'une ingestion du substrat* contaminé par les moisissures toxinogènes*. C'est à peu près uniquement dans le cas des travailleurs agricoles ou d'environnements intérieurs très contaminés qu'un effet direct des bioaérosols* fongiques, par inhalation, doit être considéré. Le phénomène est toutefois indiscutable (Etzel, 2002) et peut-être moins rare qu'on ne l'imaginait jadis, avec pour répercussions les plus fréquentes une destruction des macrophages*, une colonisation des cavités alvéolaires et une exacerbation de certains asthmes.

Plusieurs facteurs d'environnement favorisant le développement de moisissures toxiques sont liés au climat (Paterson et Lima, 2009). Les espèces d'*Aspergillus*, qui peuvent produire l'aflatoxine* contaminant les graines conservées en atmosphère chaude et humide (maïs, arachide...), bénéficient de conditions optimales dans les régions tropicales et subtropicales. Sous un climat tempéré comme celui de la France métropolitaine, les *Fusarium* (fig. 7) et les *Penicillium* (fig. 8) produisant les mycotoxines* du groupe des tricothécènes* (vomitoxine, nivalénol, toxine T-2 et HT-2), la zéaralénone, les fumonisines et les ochratoxines (en particulier l'ochratoxine A) sont les plus préoccupantes.

32. Il n'existe encore aucune étude réalisée chez l'humain concernant l'effet tératogène* associé à une exposition par inhalation aux moisissures environnementales.

33. Compte tenu de la difficulté de l'opération, la mesure des mycotoxines* dans l'environnement commence à peine à être effectuée en routine dans l'air intérieur ; elle ne l'est pour ainsi dire jamais dans l'air extérieur.

34. Lorsque les conditions ambiantes se prêtent à la prolifération fongique, plusieurs espèces de moisissures peuvent croître en même temps, chacune étant susceptible de produire diverses toxines*.

Fig. 7. - Spores de *Fusarium*.
Photo *Centers for Disease Control and Prevention.*

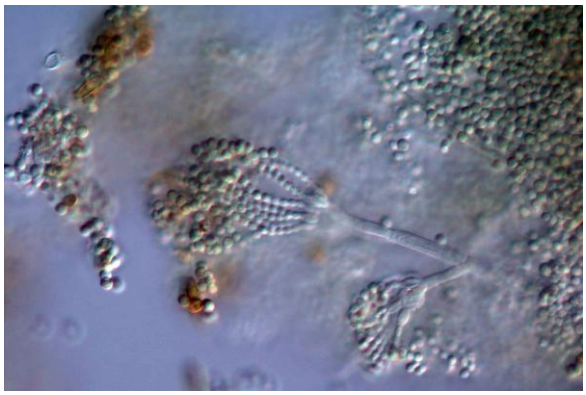


Fig. 8. - Spores de *Penicillium*.
Photo *Presse-Informationen zu Schimmel, Schimmelpilz*

On n'oubliera pas que des températures exceptionnellement élevées ou exceptionnellement basses augmentent la fragilité des plantes et entraînent la prolifération des moisissures. Un taux d'humidité élevé dans les grains et une forte humidité relative dans l'air, ainsi qu'une pluviosité abondante au moment de la floraison ou de la récolte, favorisent la germination et le développement des spores de moisissures. Les dommages causés par les insectes et les ravageurs (rats, souris…) prédisposent également les cultures à la contamination par les mycotoxines*. Cette contamination est difficilement contrôlable, pour ne pas dire qu'elle est en pratique inévitable. Selon la FAO (Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture), au moins 25% de la production agricole mondiale serait polluée par des mycotoxines*. Beaucoup de pays à travers le monde ont établi des normes qui définissent pour l'aflatoxine* la dose minimale admissible à chacune des étapes de la chaîne alimentaire. Parmi les réglementations les plus sévères figure celle de l'Union européenne, avec une limite de 2 µg/kg dans les arachides, les noix, les fruits séchés et les céréales. Cette législation, émise en 1998 et revue en 2006, permet entre autres d'assurer qu'un individu consommant « normalement » ces produits n'ingérera pas une quantité d'aflatoxine* susceptible d'affecter sa santé, le seuil quotidien de nocivité ayant été évalué par une étude américaine entre 253 et 441 ng/kg (Moss, 2002). L'Autorité européenne de sécurité des aliments (*European Food Safety Authority*, EFSA) a par ailleurs lancé, en juillet 2009, un appel à propositions afin d'étudier l'augmentation potentielle, sous l'effet du changement climatique, des aflatoxines* B1 dans les céréales, au sein de l'Union. L'aflatoxine* B1, considérée comme la plus dangereuse, est une mycotoxine* engendrée par des moisissures qui se développent sur certaines céréales, dont le maïs, le blé et le riz. Elle est particulièrement répandue en climat chaud et humide, et elle est classée comme carcinogène*, spécialement pour le foie. Les résultats obtenus permettront de documenter les futurs travaux de l'EFSA dans ce domaine et de fournir des indications sur le risque, sous l'effet du changement climatique, d'une contamination alimentaire émergente par les mycotoxines* au sein de l'UE.

c) Infections

Une centaine d'espèces de moisissures sont reconnues comme agents d'infections chez l'homme. Ces infections sont regroupées en trois classes : systémiques*, opportunistes* et superficielles.

- Les **infections systémiques*** peuvent être provoquées par l'inhalation des spores. C'est le cas, par exemple, des mycoses* dites exotiques causées par *Histoplasma capsulatum* ou *Coccidioides immitis*. Ces Ascomycètes* à l'origine d'infections sévères sont classés en catégorie 3 sur une échelle de 4 pour le niveau de sécurité en laboratoire. Mais, comme l'indique le qualificatif d'exotique, ces champignons ne sont pas présents en Europe. On peut toutefois faire l'hypothèse qu'un changement climatique significatif, aggravé par un facteur anthropique lié à une circulation accrue des biens et des personnes, pourrait favoriser l'installation de ces moisissures en France métropolitaine, spécialement dans les régions méridionales.

- Les **infections opportunistes*** touchent des patients souffrant d'une immunodéficience sévère. Les genres *Aspergillus, Acremonium, Beauvaria, Cladosporium, Fusarium, Mucor, Paecilomyces, Penicillium, Rhizo, Scedosporium, Scopulariosis* et *Trichoderma* sont régulièrement incriminés. Il est *a priori* logique de considérer que le risque d'infections opportunistes* chez les sujets à risque pourrait augmenter avec la concentration des spores de ces champignons dans l'air. Il faut néanmoins rappeler que ces patients sont déjà exposés de façon significative à ces espèces lorsqu'ils vivent dans un environnement non protégé.

- Enfin, les principaux agents d'**infections superficielles** sont les Dermatophytes* et les levures* représentées par les genres *Candida* et *Malassezia*. Ces infections se développent en présence de facteurs favorisants, dont certains, comme la macération ou l'humidité, ont un lien direct avec la température et l'humidité relative ambiantes. Mais la transmission par l'air est très peu probable et il n'y a pas de lien direct avec la concentration atmosphérique en spores.

d) Irritations

De nombreuses substances potentiellement irritantes sont émises par les moisissures, quelles qu'elles soient (Palot *et al.*, 2010).

En premier lieu, le métabolisme de ces moisissures produit sous forme gazeuse des **composés organiques volatils** (COV), aisément identifiables par une odeur de « moisi »[35]. Les effets sur la santé de ces composés, qui diffusent facilement à travers les matériaux poreux des bâtiments (murs et sols, notamment), sont encore controversés. Une irritation des muqueuses (yeux, nez, gorge) est souvent

35. Le seuil très bas de détection olfactive de certains COV permet de déceler des odeurs de « moisi » bien avant l'apparition des signes visibles du développement mycélien* sur les matériaux de construction.

rapportée, mais le mécanisme causal à l'origine de ces troubles n'a pas été établi avec certitude (CSHP, 2006). Dans un espace clos, les facteurs qui favorisent la prolifération des moisissures sont directement associés à une augmentation de la concentration en COV. Des auteurs scandinaves ont proposé le nom de *microbial volatile organic compounds* (en anglais MVOC, en français MCOV) pour désigner les composés organiques volatils issus de l'activité microbienne, principalement des moisissures croissant sur les matériaux de construction. Plusieurs auteurs ont calculé le seuil actif de composés individuels et de mélanges de COV et de MCOV. Il a ainsi été démontré que la concentration d'un ensemble de cinq COV fongiques nécessaire pour réduire de 50% la fréquence respiratoire des souris (RD50 ou *50% Respiratory rate decrease*) était 3,6 fois moins élevée que celle de ces composants pris séparément (RD50 = 35 à 3360 ppm), ce qui prouve l'existence d'un effet de synergie, et confirme l'effet irritatif de très faibles concentrations de mélanges (Boutin-Forzano *et al.*, 2006). Il semble en tout cas acquis que l'effet irritatif des MCOV intervient sans contact direct des spores avec les muqueuses (Bush *et al.*, 2006 ; Korpi *et al.*, 2009).

En second lieu, les **glucanes*** (β[1-3]glucanes) sont des polymères du glucose qui font partie de la membrane cellulaire de la majorité des moisissures et qui peuvent être associés à des molécules de chitine* ou de mannane. Ces sucres complexes, de haut poids moléculaire, sont dans certains cas susceptibles d'entraîner des effets immunogènes*, tout en stimulant la fonction des macrophages* et celle des neutrophiles. La théorie aujourd'hui la plus communément admise est celle d'une implication de ces glucanes* dans les processus inflammatoires, notamment au niveau bronchique, avec production d'IgG spécifiques. Probablement font-ils aussi partie du mélange complexe lié à l'apparition du syndrome toxique*. Ces effets peuvent en particulier se traduire par de la toux, par une exacerbation de l'asthme, par une augmentation de la fréquence des maladies des voies respiratoires supérieures, par des maux de tête ou encore par des nausées, voire par des démangeaisons (Curtis *et al.*, 2004).

e) En guise de résumé

Le tableau I reprend les points forts de ce qui précède en mettant l'accent, d'une part, sur le lien entre le taux de spores fongiques dans l'air et les effets des champignons sur la santé, d'autre part sur l'impact potentiel de l'évolution du climat :

- Dans l'hypothèse où, en France métropolitaine, un changement climatique entraînerait une augmentation significative des concentrations de spores fongiques dans l'air atmosphérique, il apparaît que la répercussion la plus plausible sur la santé des Français se ferait par le biais des allergies* touchant les voies respiratoires, hautes ou basses. En air intérieur, les facteurs anthropiques seraient *a priori* beaucoup plus déterminants que le changement climatique. Toutefois, la multiplication et/ou l'intensité accrue de phénomènes météorologiques exceptionnels, comme les inondations, pourraient affecter directement la sensibilité des bâtiments à la prolifération des moisissures.

Tableau I. - Essai de synthèse.
Lien entre effets des moisissures sur la santé,
taux de spores fongiques dans l'air et impact potentiel d'un changement climatique.

Manifestations cliniques		Lien avec la concentration atmosphérique en spores	Risque d'impact d'un changement climatique
Allergies	**MBPA**	Lien avec la durée et l'intensité de l'exposition	Fort en cas d'augmentation significative des concentrations de spores fongiques atmosphériques Dépendant de facteurs anthropiques pour les spores de l'habitat
	Sinusite		
	AAE		
	Dermatite atopique	Pas de lien	Pas d'impact attendu
	Rhinite, Conjonctivite, Rhino-conjonctivite	Lien avec la durée et l'intensité de l'exposition	Fort en cas d'augmentation significative des concentrations de spores fongiques atmosphériques Dépendant de facteurs anthropiques pour les spores de l'habitat
	Asthme		
Mycotoxicoses		Lien indirect, via l'ingestion de substrats contaminés	Fort en cas de modification durable des facteurs favorisant les contaminations des productions agricoles et éventuellement aggravé par des facteurs anthropiques
Infections	**Systémiques**	Lien direct, mais hors France métropolitaine	Négligeable, sauf facteurs anthropiques de dispersion géographique des espèces exotiques
	Opportunistes	Lien avec la durée et l'intensité de l'exposition	Faible, compte tenu de la sensibilité déjà importante de l'hôte
	Superficielles	Pas de lien	Faible, en lien avec les habitudes vestimentaires, l'humidité relative et la température
Irritations		Lien commun avec la prolifération dans le substrat	Dépendant de facteurs anthropiques favorisant la prolifération dans l'habitat

- En ce qui concerne les mycotoxicoses*, une hausse de température, surtout si elle s'accompagne d'un renforcement de l'humidité, serait susceptible de favoriser la contamination de diverses

plantes cultivées et de nombreux produits alimentaires, d'autant que de multiples facteurs anthropiques pourraient jouer dans le même sens.

- Pour ce qui est du risque infectieux, l'impact d'un changement climatique apparaît négligeable s'il n'est pas accompagné de l'émergence de mycoses* aujourd'hui « exotiques », éventualité faible à moins qu'elle ne soit favorisée par des facteurs anthropiques – ce que l'on ne saurait exclure.
- En dernier lieu, et bien que la question soit à peine abordée dans la littérature, il paraît improbable que l'évolution du climat puisse affecter de façon significative les phénomènes irritatifs mais, là encore, des facteurs anthropiques peuvent intervenir en amenant une prolifération des moisissures dans l'habitat.

Cela dit, il s'agit là de déductions relativement théoriques et il vaut la peine, d'abord, de vérifier si les tendances énoncées commencent à se manifester, et ensuite de les soumettre à une discussion plus approfondie.

II. La surveillance des moisissures aéroportées

C'est, semble-t-il, en 1935 à Chicago qu'a été réalisé, sur une année entière et au pas de temps quotidien, le premier inventaire « scientifique » des spores fongiques de l'atmosphère (Feinberg et Little, 1935). Beaucoup d'autres ont suivi, dans le monde entier, avec l'ambition relativement commune de comparer la chronologie des manifestations allergiques de patients atopiques* avec les fluctuations saisonnières des moisissures. Dans un premier temps, les initiatives sont restées isolées, avec des techniques différentes d'un endroit à l'autre (Valléry-Radot *et al.*, 1950 ; Boutin, 1966) et peu de suivi en années successives. Puis, très lentement, avec un retard sensible sur ce qui se faisait pour les pollens, la standardisation des techniques de recueil et d'identification a été imposée par la constitution de réseaux régionaux ou nationaux, comme en France le Réseau national de surveillance aérobiologique RNSA (Thibaudon, 2008). Ces réseaux se sont récemment fédérés en réseaux internationaux, comme l'*European Aerobiology Network* EAN (Nilsson, 1988 ; Jäger, 2000).

Les tableaux II, III et IV donnent, avec les années correspondantes, la liste des sites du RNSA et de l'EAN qui sont retenus dans la suite du présent rapport, respectivement pour la France et le reste de l'Europe[36].

Tableau II. - Stations du réseau français (RNSA) retenues pour *Cladosporium* et *Alternaria.*

Aix-en-Provence	2004-2010
Bordeaux	1999-2010
Dinan	2006-2010
Lille	2007-2009
Lyon	2007-2010
Montluçon	2007-2010
Nantes	2002-2010
Paris	2002-2010
Périgueux	2007-2010
Reims	2004-2007
Rouen	2007-2010
Strasbourg	2007-2010
Toulouse	2000-2010
Troyes	2004-2007

36. Un problème informatique a malencontreusement empêché l'extraction de toute donnée relative à la Belgique.

Tableau III. - Stations du réseau européen (EAN) retenues pour *Cladosporium.*

Allemagne	
Chemnitz	2003-2009
Delmenhorst	1985-1990 et 1994-2010
Erlangen	1992, 1995-1996, 1998 et 2000-2010
Munich	1995-2010
Norderney	1995-1997, 2000-2001 et 2003-2010
Oberhausen	1995-2010
Wangen	1997-1998, 2000-2001 et 2003-2010
Westerloge	1994-1999 et 2001-2010
Autriche	
Salzbourg	1993-2000
Danemark	
Copenhague	2001-2010
Luxembourg	
Luxembourg	1993-2010
Pologne	
Cracovie	2000, 2002-2009
Katowice	1998, 2005-2008 et 2010
Varsovie	1998, 2005-2008 et 2010
République tchèque	
Brno	1993-1994 et 1996-2007
Havlickuv Brod	1999-2004
Karlovy Vary	1995-2003, 2005 et 2007-2008
Liberec	1995, 1999-2009
Plzen	1995, 1998-2001 et 2005-2010
Prague	1993, 1996-2007
Russie	
Moscou	1994-1996, 1999-2002, 2004-2007 et 2010

Tableau IV. - Stations du réseau européen (EAN) retenues pour *Alternaria.*

Allemagne	
Bochum	1995-2010
Chemnitz	2002-2010
Delmenhorst	1985-1990 et 1994-2010
Dresde	2002-2010
Erlangen	1992, 1995-1998 et 2000-2010
Fulda	1995-1997 et 2001-2010
Löwenstein	1995-1997 et 2000-2010
Munich	1995-2010
Norderney	1995-1997 et 2000-2010
Oberhausen	1995-2010
Wangen	1998, 2000-2001 et 2003-2010
Westerloge	1994-1999 et 2001-2010

Autriche	
Graz	1981-1989
Mistelbach	1980-1990
Salzbourg	1986-2003
Schwarzach	1992 et 1994-2003
Tamsweg	1986-1995 et 1997-2003
Vienne	1980-2010
Zell am See	1980 et 1984-2002
Danemark	
Copenhague	2001-2010
Italie	
Modène	1995-2000 et 2006-2009
Naples	1995-2000, 2002 et 2006-2009
Padoue	1995, 1997-2000 et 2006-2010
Parme	1997-2000 et 2006-2010
Pavie	1995, 1997-2000, 2002 et 2006-2009
Piacenza	1995-2000 et 2006-2009
Ravenne	1995-2000 et 2006-2009
Reggio di Calabre	1995-1999 et 2006-2009
Sassari	1995-2000, 2006 et 2008-2009
Luxembourg	
Luxembourg	1993-2010
Pologne	
Cracovie	2000-2010
République tchèque	
Brno	1992-2005 et 2007-2010
Havirov	1997-2005
Havlickuv Brod	1997-2005 et 2010
Karlovy Vary	1995-2003, 2005 et 2007-2008
Liberec	1995-2009
Plzen	1995-2002 et 2005-2010
Prague	1993-2010
Trinec	1995-2001 et 2003-2004
Usti nad Orlici	1993-2005 et 2007-2010
Russie	
Moscou	1995-1996, 1999-2001, 2005-2008 et 2010

a) Recueil et identification des moisissures

La technique la plus répandue repose sur l'utilisation de capteurs volumétriques*, utilisés conjointement pour la surveillance des pollens. Il s'agit du capteur de Hirst (Hirst, 1952), fonctionnant selon un système d'impaction. Il en existe deux déclinaisons, avec une conception et des performances très voisines : le *Burkard Volumetric Spore Sampler* (fig. 9) et le *Lanzoni Volumetric Pollen and Particle Sampler* (fig. 10).

Pour limiter les interférences locales et cerner les concentrations « de fond »[37], les capteurs sont placés en terrasse d'immeubles, idéalement entre 15 et 20 mètres au-dessus du sol, dans des sites urbains ou périurbains dégagés sur 360°. Ces appareils sont habituellement jugés représentatifs dans un rayon de 25 à 30 km, au moins en plaine. La technique de capture est standardisée, elle est la même dans tous les sites et n'a pas varié durant la période étudiée (Caulton, 1995).

Fig. 9. - Burkard Volumetric Spore Sampler.
Photo RNSA

Fig. 10. - Lanzoni Volumetric Pollen and Particle Sampler.
Photo RNSA

Les particules organiques et inorganiques contenues dans l'air sont aspirées en continu à travers un orifice de 14 x 2 mm, orienté face aux vents dominants à l'aide d'un empennage, à un rendement de 10 L/min qui équivaut à une respiration humaine moyenne. Les particules ainsi aspirées sont projetées et impactées sur un ruban de cellophane de 19 mm de largeur, rendu adhésif grâce à un produit d'enduction à base de silicone, fixé sur une pièce cylindrique appelée tambour. Le tambour défile devant la buse d'aspiration, grâce à un mécanisme d'horlogerie, à une vitesse de 2 mm/h et effectue ainsi une

37. Différents auteurs (Chai *et al.*, 2004 ; Bergamini *et al.*, 2004) ont attiré l'attention, notamment pour *Alternaria*, sur des différences considérables entre les mesures faites à 50 cm au-dessus d'une prairie et celles réalisées dans les conditions standards à une quinzaine de mètres de hauteur. Encore la prudence reste-t-elle de règle, car Khattab et Levetin (2008) ont trouvé beaucoup plus de spores d'*Alternaria* sur un toit-terrasse qu'à 1,5 m du sol.

rotation sur une semaine, au terme de laquelle la bande adhésive est retirée, puis découpée en sept parties égales qui correspondent chacune à une journée de prélèvement.

Au laboratoire, chacun de ces segments est placé entre lame et lamelle. Un réactif coloré de fixation, à base de fuchsine, facilite la différenciation des grains de pollen et des spores ou conidies* de moisissures. La lecture au microscope optique au grossissement x400, selon une technique standardisée (Käpylä et Penttinen, 1981), permet de compter le nombre de spores fongiques (aisément rapporté au mètre cube, puisque l'on connaît avec précision le volume d'air aspiré) et d'identifier la majorité de ces spores, dans certains cas au niveau de l'espèce*, le plus souvent à une échelle moins fine telle que le genre ou la catégorie (*Aspergillaceæ*, par exemple, pour toutes les petites spores, le plus souvent rondes, qu'aucune caractéristique morphologique ne permet de déterminer plus précisément)[38].

Les résultats sont disponibles par tranches de deux heures et l'on peut ainsi connaître à tout moment de la journée la nature et l'ampleur des nuages de spores qui ont pu être responsables de la survenue de symptômes.

Deux taxons*, à la fois facilement reconnaissables sur les lames d'aérobiologie* et présents en abondance dans l'air extérieur, au moins à certaines périodes de l'année, sont systématiquement individualisés : *Alternaria* et *Cladosporium* (Thibaudon et Lachasse, 2006).

- *Alternaria*

Les moisissures du genre *Alternaria* (Rotem, 1994) sont des champignons imparfaits, dont il existe 40 à 50 espèces, très cosmopolites*. Entre 2 et 32°C, parfois jusqu'à 35°C, elles se développent principalement sur les végétaux en décomposition, notamment les céréales et les foins. Leurs habitats favoris sont les sols, l'ensilage de maïs, le bois en putréfaction, le compost, les nids d'oiseaux et diverses plantes forestières. On les trouve aussi à l'intérieur des locaux, dans l'habitat humide et mal ventilé, où elles colonisent des substrats* variés (produits alimentaires, textiles d'ameublement, papiers peints, sols, poussière de matelas…) et tout spécialement les bords de châssis de fenêtres. Mais la plupart des concentrations trouvées en intérieur proviennent de sources primaires externes. Les spores d'*Alternaria*, pluricellulaires, relativement grandes (20 à 80 µm), compartimentées par des cloisons ou *septa*, sont ovoïdes à la naissance, mais se prolongent à maturité par une sorte de bec qui

38. C'est pourquoi une technique alternative à celle des lames d'aérobiologie* passe par la mise en culture de prélèvements. L'incubation se fait à une température en général comprise entre 25 et 30°C, mais parfois supérieure à 40°C (notamment pour *Aspergillus fumigatus).* Après la pousse, on compte au microscope les colonies qui se développent et il devient possible de procéder à un recensement détaillé, assez souvent espèce par espèce, mais uniquement pour celles dont les spores sont viables et cultivables. Or, seule une faible proportion des spores fongiques est revivifiable (6% dans le cas des basidiospores*). De plus, les moisissures mortes ou restant à l'état végétatif sont également responsables d'effets sanitaires, puisqu'elles sont encore aptes à libérer des molécules actives telles que des allergènes* et des glucanes* (cf. *supra*¸ note 18, page 17). Ce n'est donc qu'une partie des spores qui sont identifiables par le biais des cultures. La méthode, surtout utilisée pour l'air des espaces clos, est certes intéressante, par exemple pour les *Aspergillaceæ* ; elle ne saurait toutefois remplacer la méthode largement éprouvée des lames, d'autant que sa reproductibilité reste passablement aléatoire.

leur confère peu à peu une forme en raquette ou en massue (fig. 11 et 12). Malgré leur grande taille, ces spores très aérodynamiques peuvent être transportées par le vent à des centaines de kilomètres de leur source.

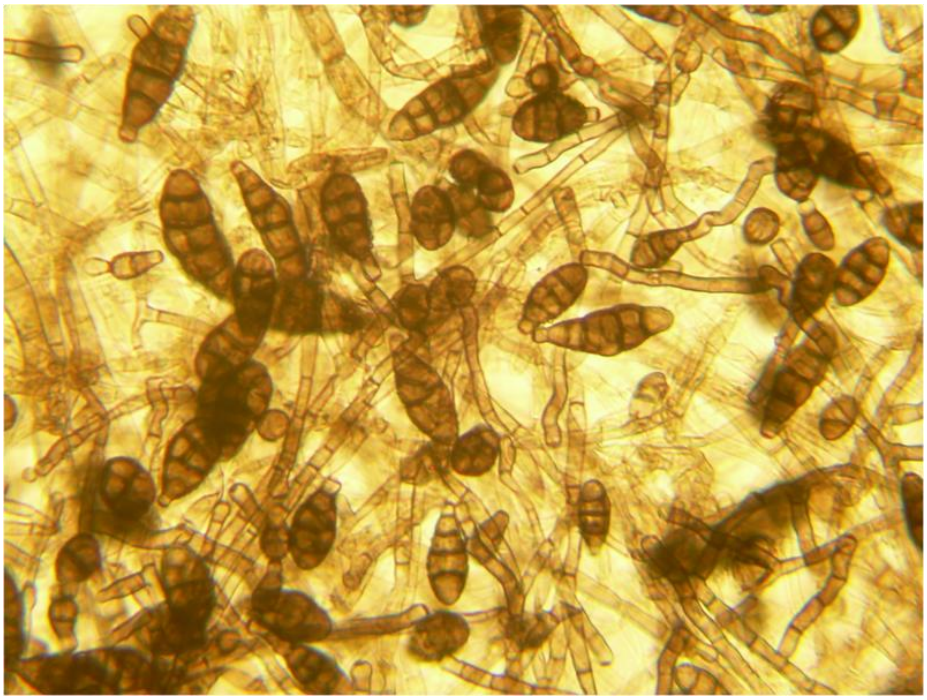


Fig. 11. - Spores d'*Alternaria*. Photo *Wikimedia Commons.*

Fig. 12. - Spore d'*Alternaria alternata* : agrandissement. Photo *M. Vérollet.*

Dans l'air extérieur, où elle est détectable de mai à novembre, *Alternaria* constitue en moyenne 1,5% du total des spores répertoriées sur l'année, avec une variabilité non négligeable d'un site à l'autre. En climat tempéré des latitudes moyennes, la répartition temporelle montre une franche culmination au cours des mois les plus chauds (fig. 13 et 14) et, à l'intérieur de la saison estivale, en présence de températures de 25-28°C après une période de pluie. Le maximum absolu enregistré à Bruxelles sur une série de 25 ans a été de 2 600 spores/m^3 en 24 heures. En France, durant l'année 2010 par exemple, le pic le plus saillant s'est situé à Strasbourg le 14 juillet, avec 2 540 spores/m^3. Le rythme journalier met généralement en évidence un maximum très net vers midi et en début d'après-midi (Stępalska et Wołek, 2009), encore que Rodríguez-Rajo *et al.* (2005) en Galice aient plutôt situé le pic journalier entre 19 et 22 heures. S'il est vrai que Hjelmroos (1993) à Stockholm ou Katial *et al.* (1997) à Denver ont, de façon assez inattendue, réfuté toute influence des conditions météorologiques, la majorité des auteurs s'inscrit en faux contre une telle interprétation. C'est ainsi que Kilic *et al.* (2010), parmi beaucoup d'autres, ont mis en évidence au pas de temps mensuel, une corrélation positive étroite avec la température (r = 0,626 ; p = 0,03) et une corrélation négative tout aussi notable avec la pression atmosphérique (r = -0,613 ; p = 0,03)[39].

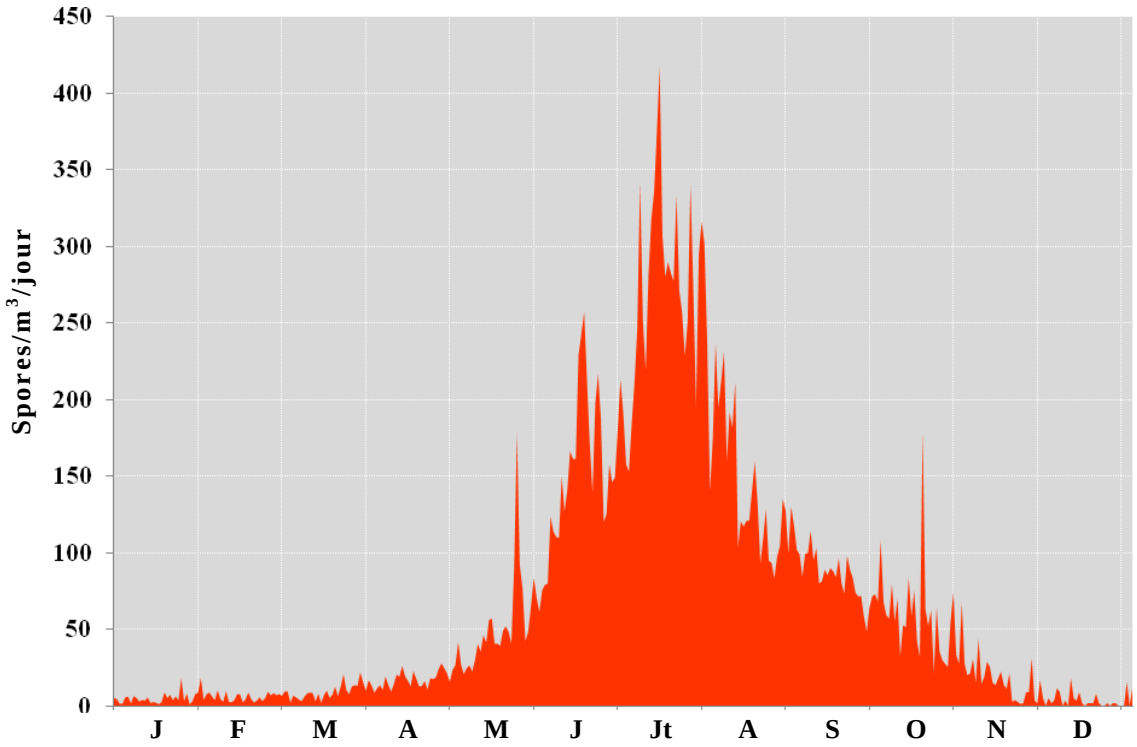


Fig. 13. - Rythme moyen de dispersion des spores d'*Alternaria* sur la France (1999-2010).

Données RNSA. Liste des stations retenues sur le tableau II, p. 31.

39. Dans cette étude, la corrélation avec l'humidité relative n'atteint pas le seuil de significativité (r = 0,548 ; p = 0,06). On ne peut donc parler que d'une *tendance* à une hausse des concentrations atmosphériques en *Alternaria* par temps humide. Probablement le pas de temps mensuel n'était-il pas approprié pour ce genre de calcul. L'absence de corrélation avec la pluviosité et la vitesse du vent admet, au moins en partie, la même explication, et il est vraisemblable que l'analyse statistique de données journalières conduirait à des conclusions différentes.

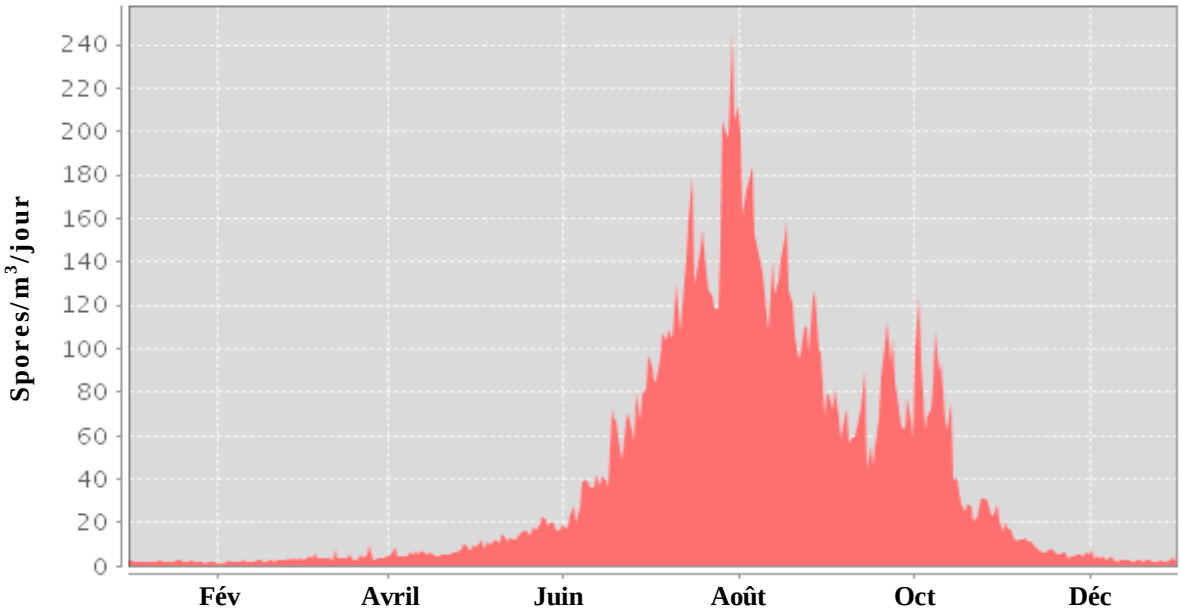


Fig. 14. - Rythme moyen de dispersion des spores d'*Alternaria* sur l'Europe (2001-2010).

Données EAN. Liste des stations retenues sur le tableau IV, pp. 32-33.

Plusieurs allergènes d'*Alternaria*, majeurs[40] (*Alt a1, Alt a2*) ou mineurs (*Alt a3, Alt a6, Alt a7, Alt a10, GP70*…), ont été isolés. La moisissure est responsable de certaines infections opportunistes* et de rares mycoses* cutanées, sous-cutanées ou unguéales. Ses mycotoxines*, alternariol et acide ténuazonique, principalement retrouvées sur les fruits et légumes, peuvent induire des leucopénies*, tandis que les altertoxines sont sans doute mutagéniques*. Mais *Alternaria* est surtout à l'origine d'allergies immédiates, qui se manifestent par une rhinoconjonctivite estivale, dite « pseudo-pollinique », survenant plus souvent en août-septembre qu'en juillet, et par des asthmes sévères, voire mortels, y compris chez les enfants de moins de 10 ans (Bush et Prochnau, 2004). Il a du reste été établi (Neukirch *et al.*, 1999 ; Black *et al.*, 2000) que le pronostic des asthmes associés à une allergie ou à une sensibilisation à *Alternaria* était nettement plus inquiétant que celui des autres asthmes, fussent-ils fongiques mais associés à d'autres moisissures.

Des signes cliniques sont régulièrement notés à partir de concentrations atmosphériques de l'ordre de 100 spores/m^3 (Gravesen, 1979 ; Peternel *et al.*, 2004 ; Kilic *et al.*, 2010). Le seuil de 500 spores/m^3, retenu de façon quelque peu empirique comme susceptible de déclencher des crises d'asthme aiguës chez les sujets les plus sensibles, est dépassé plusieurs fois par an dans plus de la moitié des sites (en France, 8 sur 11 en 2010). Le seuil des 1000 spores/m^3 est également utilisé ; ce serait celui où la quasi-totalité des asthmatiques sensibilisés à *Alternaria* font une crise d'asthme.

40. On appelle *allergène* majeur* un antigène* purifié contre lequel au moins 50% des patients testés présentent des IgE spécifiques, et qui donne des tests cutanés immédiatement positifs, à une concentration très faible, chez au moins 90% des sujets ayant la maladie allergique en relation avec cet allergène*. Un *allergène* mineur* est, quant à lui, reconnu par moins de 50% des individus allergiques. Mais un allergène* mineur peut devenir majeur en référence aux symptômes cliniques (David *et al.*, 2003).

- *Cladosporium*

Les moisissures du genre *Cladosporium* sont des champignons filamenteux cosmopolites*, fréquemment retrouvés sur des plantes sénescentes et sur des débris organiques en décomposition. Certaines des quarante espèces produisent des spores en chaînes ramifiées facilement dissociées par le vent. Globulaires, ovoïdes, elliptiques ou fusiformes, lisses, verruqueuses ou échinulées*, avec des cicatrices d'insertion souvent bien visibles aux extrémités, ces spores de 4 à 11 µm (fig. 15 et 16) sont faciles à identifier au microscope.

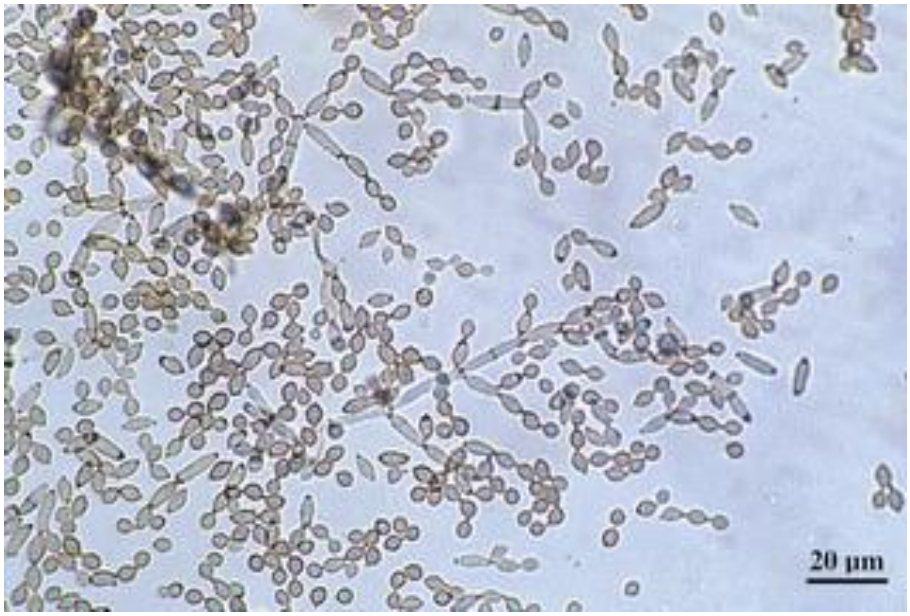


Fig. 15. - Spores de *Cladosporium.*
Photo *University of Adélaide.*

Fig. 16. - Spore de *Cladosporium herbarum* : agrandissement.
Photo *Institut Scientifique de Santé Publique, Bruxelles.*

Cladosporium figure parmi les plus communes des moisissures d'intérieur et d'extérieur. Il n'est pas rare qu'elle représente à elle seule la moitié des spores fongiques aéroportées, voire 72,2% à Thessalonique contre 9,8% pour *Alternaria* (Gioulekas *et al.*, 2004). La variété *herbarum*, adaptée aussi bien aux climats tempérés qu'aux climats tropicaux, subtropicaux ou polaires, même si son optimum de croissance se situe entre 18 et 28°C, est la plus fréquemment rencontrée ; phytopathogène stricte, elle ne se développe pas sur les matériaux utilisés dans la construction, mais ses spores pénètrent facilement dans les locaux par les portes et les fenêtres. D'autres espèces (*C. sphaerospermum* et *cladosporioides)* sont souvent présentes à l'intérieur, hiver comme été. Elles envahissent environ 60% des logements en région tempérée, relarguant parfois dans l'air des concentrations de plusieurs centaines de spores/m^3. Elles peuvent être responsables de larges contaminations en différents endroits de la maison, principalement sur les murs et les plafonds, dans les chambres à coucher et les salles de bains.

La répartition dans le temps est assez proche de celle d'*Alternaria*, avec une culmination sur les journées d'été ou d'automne (fig. 17 et 18), et une recrudescence entre la fin de la matinée et le milieu de l'après-midi. A quelques exceptions près, comme à Dublin (Stephen *et al.*, 1990), l'influence des conditions météorologiques est plus franche que pour *Alternaria*, ainsi que l'atteste la significativité ($p < 0,02$) des corrélations obtenues par Katial *et al.*, 1997 : corrélations positives avec la température et l'humidité relative, corrélation négative avec la pluviosité. Les concentrations peuvent atteindre des niveaux très élevés par temps chaud et humide : à Bruxelles, sur une série de 30 ans, le maximum journalier s'est établi à 75 995 spores/m^3, le 4 août 1984. Comme pour *Alternaria*, c'est Strasbourg qui a connu le pic le plus marqué en 2010, le même jour (14 juillet), mais avec une concentration presque dix huit fois plus importante (45 320 spores/m^3 contre 2 540).

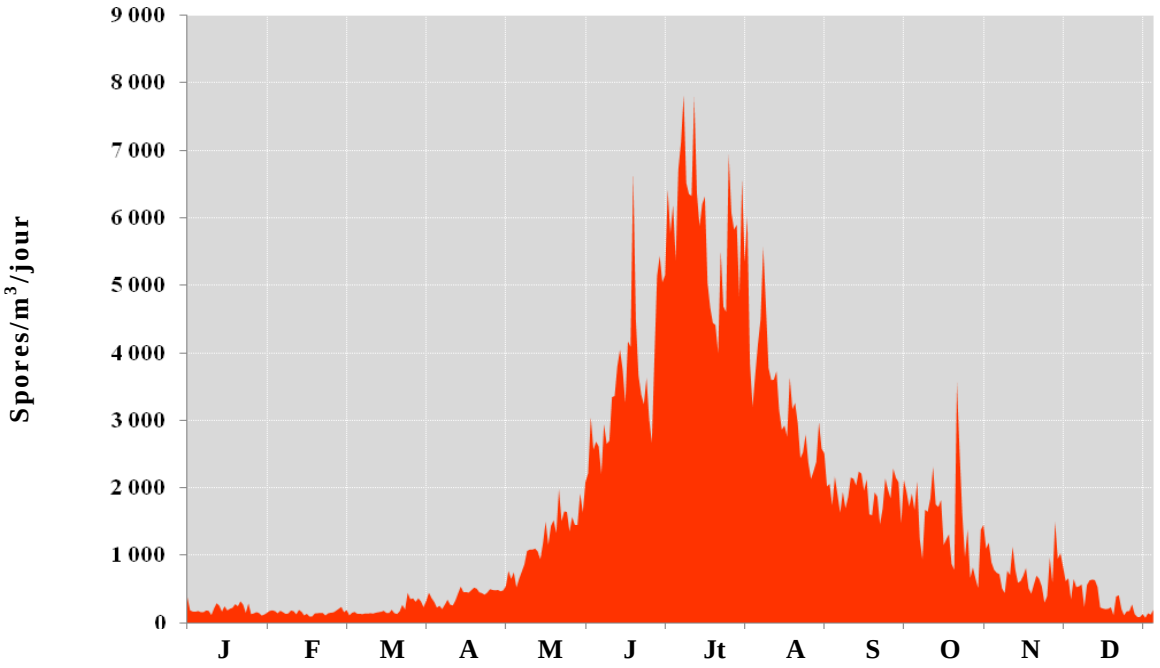


Fig. 17. - Rythme moyen de dispersion des spores de *Cladosporium* sur la France (1999-2010).

Données RNSA. Liste des stations retenues sur le tableau II, p. 31.

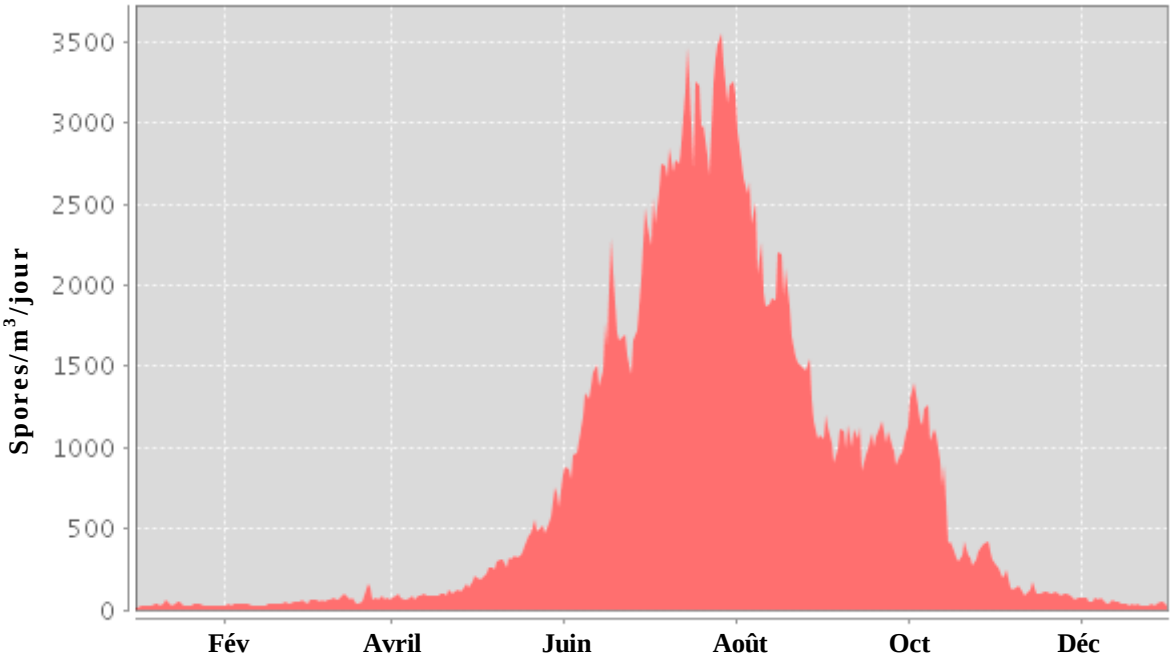


Fig. 18. - Rythme moyen de dispersion des spores de *Cladosporium* sur l'Europe (2001-2010).
Données EAN. Liste des stations retenues sur le tableau III, p. 32.

La plupart des *Cladosporium* ne sont pas pathogènes pour l'homme, mais plusieurs espèces se signalent par leur capacité à causer des infections fongiques de la peau et des ongles, ou comme causes de sinusites et d'infections pulmonaires, pouvant évoluer vers une pneumonie en l'absence de traitement. En outre et surtout, si l'asthme à *Alternaria alternata* a indiscutablement la plus forte incidence sur les pathologies allergiques, surtout chez l'enfant, nombre de cas de rhinites et d'asthme ont aussi été clairement associés à *Cladosporium herbarum.* De fait, deux allergènes* majeurs (*Cla h1, Cla h2)* et un allergène* mineur (*Cla h3,* protéine identique à *Alt a 6)* ont été individualisés dans ses spores. Environ 7,4% des asthmatiques suivis à Thessalonique présentent des prick-tests*[41] cutanés positifs à *Cladosporium*, contre 13,5% pour *Alternaria* (Gioulekas *et al.*, 2004).

Malgré une certaine imprécision, le seuil d'action clinique, correspondant à l'apparition des premiers cas de rhinite ou de rhino-conjonctivite, est souvent placé à 3 000 spores/m^3 (Gravesen, 1979 ; Peternel *et al.*, 2004 ; Kilic *et al.*, 2010). Un second seuil est parfois individualisé à 7 000 ou 8 000 grains/m^3, une telle concentration étant interprétée comme susceptible de déclencher des crises d'asthme chez les sujets sensibilisés.

- Les autres taxons

Quelques sites s'attachent en outre à la reconnaissance de *Didymella exitialis*, parfois aussi appelé *Ascochyta sorghi*. Il s'agit d'une Ascomycète*, aux spores bicellulaires et symétriques (fig. 19), que

41. Le *prick-test** consiste à piquer dans l'épiderme à travers une goutte de solution d'allergène* et à observer la réponse d'hypersensibilité* immédiate, qui se manifeste par un prurit, un érythème, une papule ou l'apparition d'un anneau rougeâtre ; il constitue une bonne méthode d'exploration de la réaction allergique impliquant les immunoglobulines IgE.

l'on trouve principalement sur des tiges de plantes herbacées mortes mais également sur les feuilles de l'orge et du blé à maturité. Les spores peuvent être extrêmement nombreuses, particulièrement après la pluie, mais avec une forte variabilité interannuelle. On soupçonne tout ou partie des 363 espèces de *Didymella* d'être des causes importantes d'asthme en fin d'été et en automne (Frankland et Gregory, 1973 ; Harries *et al.*, 1985 ; Brown et Jackson, 1985). Dans le centre-ville d'Edinburgh, par exemple, donc à bonne distance de leur milieu d'origine, les spores de *Didymella existialis* présentent couramment des pics à 4 400/m^3, avec un maximum très marqué en fin de nuit, indépendamment de la pluviométrie, mais en étroite corrélation avec l'humidité relative (Richardson, 1996). Des schémas voisins ont été décrits à Derby (Corden et Millington, 1994) et à Cracovie (Stępalska et Wołek, 2009). Dans cette dernière ville, la température minimale journalière ressort comme un des paramètres les plus discriminants, rendant compte de 57% de la variance des concentrations en début de saison, et encore de 46% en fin de saison (Stępalska *et al.*, 2008, 2011). À Essen, dans la Ruhr, certains pics horaires peuvent atteindre 30 000 spores/m^3, et la corrélation avec l'humidité relative apparaît hautement significative ($p < 0{,}001$) (Von Wahl et Kersten, 1991). À Strasbourg (fig. 20), le maximum journalier de l'année 2009 s'est établi à 14 460 spores/m^3, le 28 juillet.

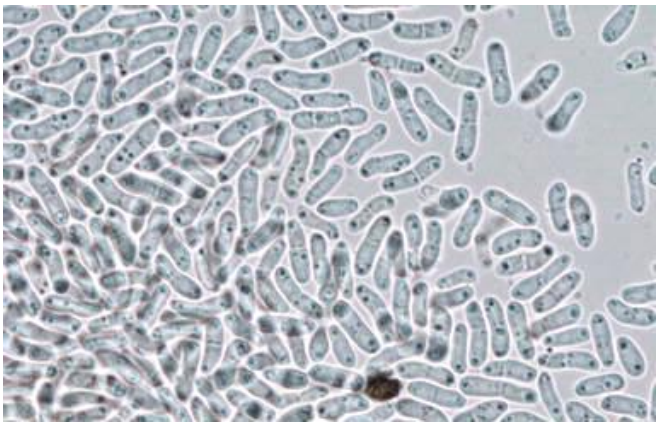


Fig. 19. - Spores de *Didymella exitialis*. Photo *University of Kentucky Research and Education Center*.

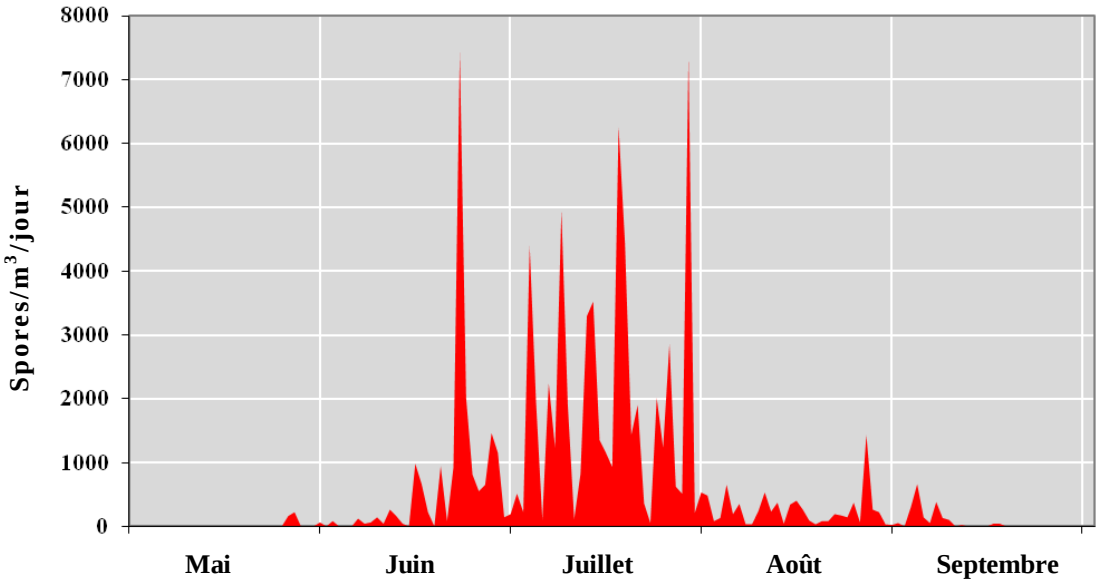


Fig. 20. - Rythme moyen de la dispersion des spores de *Didymella exitialis* à Strasbourg (2008-2009). Données RNSA.

Hors de France, d'autres spores sont parfois individualisées. Ainsi, outre *Alternaria* et *Cladosporium*, la Suisse s'attache à *Ganoderma*[42], *Epicoccum*[43], *Polythrincium*[44] et *Stemphylium*[45]. La Belgique retient un spectre encore plus large, avec une quinzaine de taxons principaux, ce qui permet d'établir d'intéressants calendriers aéromycologiques* (fig. 21), calqués sur le modèle des calendriers aéropolliniques.

En milieu intérieur, l'estimation de l'exposition aux moisissures reste difficile à mettre en œuvre et coûteuse. Cette exposition est généralement évaluée de façon indirecte, via le niveau de contamination fongique du logement, qui se fait d'ordinaire selon trois méthodes, utilisées séparément ou conjointement : prélèvements simples de surface (à l'aide d'un ruban adhésif par exemple) avec une identification directe, prélèvements d'échantillons d'air, de poussières ou de surface suivis d'une mise en culture avant de procéder à l'identification des espèces et/ou au comptage des unités formant colonies*, enfin utilisation de questionnaires permettant de décrire l'environnement domestique. Alors que les prélèvements d'air, ponctuels dans le temps, présentent des limites du point de vue de leur représentativité[46] et de leur sensibilité[47], de nouvelles approches telles que la mesure des composés organiques volatils microbiens dans l'air, traceurs du développement des moisissures, ou de l'ergostérol*[48] ont été développées. Cependant, ces dernières techniques ne donnent pas d'informations sur les espèces en présence (Grémy *et al.*, 2010).

---

42. *Ganoderma* est un Basidiomycète* qui vit sur les troncs d'arbres, feuillus ou résineux. L'allergénicité* de ses spores est acquise (Horner *et al.*, 1993), mais reste difficile à évaluer. Certains auteurs en font « *one of the principal causes of seasonal respiratory allergy* », responsable non correctement identifié de 10 à 48% des prick-tests positifs (Grinn-Gofrón et Strzelczak, 2011). D'autres font observer qu'il n'existe aucun extrait commercial standardisé pour *Ganoderma*, dont le contenu protéinique des spores varie beaucoup, ce qui doit inciter à une grande prudence dans l'interprétation des résultats disponibles ici ou là, d'autant que les réactions IgE sont extrêmement variables dans les tests de sérums d'asthmatiques présentant un test cutané positif à cette moisissure**.** Les spores de *Ganoderma*, très rares l'après-midi et en soirée, seraient surtout présentes dans l'air pendant la nuit et en début de matinée.

43. Cf. *supra*, note 29, p. 22. La saison de sporulation*, avec des comptes significatifs, s'étend de la mi-juillet à la fin septembre. Les spores d'*Epicoccum* peuvent provoquer des allergies (Kukreja *et al.*, 2009).

44. *Polythrincium* se développe sur des plantes, par exemple le trèfle. Rare le reste de l'année, il présente souvent un pic énorme en août. L'allergénicité* de ses spores n'est pas vraiment connue.

45. *Stemphylium* est une moisissure cosmopolite* en climat tempéré. Rare en milieu urbain, elle est beaucoup plus abondante à la campagne. Elle se développe sur des tissus morts, des fibres animales ou végétales (laine, coton, papiers peints, cellulose, cuir). Elle parasite également un grand nombre de plantes. Ses spores sont incriminées dans certaines allergies, notamment des conjonctivites printanières parfois sévères. Une fraction allergénique* paraît commune à *Stemphylium* et *Alternaria*.

46. Une des limites de la méthode tient au fait que les prélèvements d'air s'opèrent au mieux sur une durée de dix minutes, alors que les mécanismes de dispersion des spores sont encore mal connus et que les concentrations varient beaucoup au cours du temps, en relation notamment avec la remise en suspension des poussières par l'activité dans la pièce.

47. On rappellera (cf. *supra*, note 38, p. 35) que cette technique présente l'inconvénient majeur de ne détecter que la flore revivifiable. En outre, le milieu de culture utilisé peut favoriser certaines espèces au détriment d'autres, qui ne sont pas détectées.

48. Cf. *supra*, note 14, p. 14.

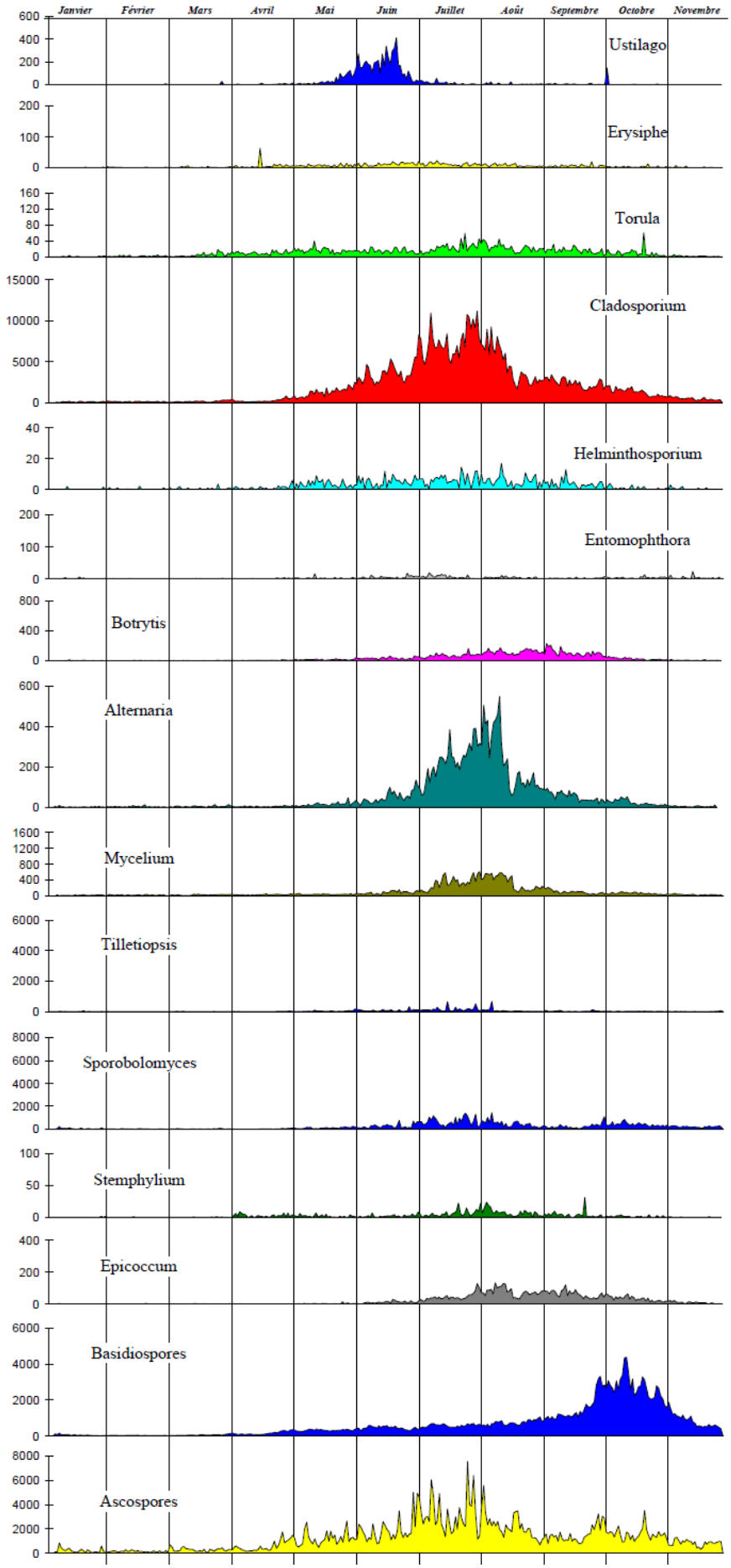


Fig. 21. - Calendrier aéromycologique* de Bruxelles (moyenne 1998-2007).

D'ap. l'Institut de Santé Publique ISP / Mycologie. http://airallergy.iph.fgov.be/sites/airallergy/PDF/Calendrier%20fongique%20de%20l'air%20à%20Bruxelles%201998-2007.pdf

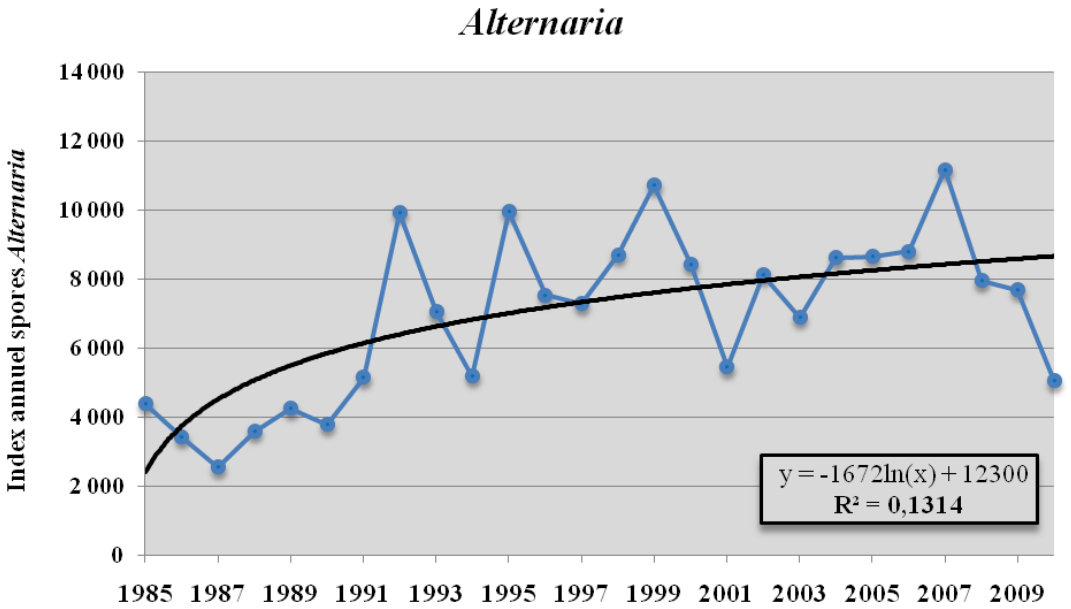
b) Évolution de la dispersion des moisissures atmosphériques au cours des années récentes

Une première indication du rôle possible du changement climatique peut être recherchée dans l'évolution des concentrations de spores fongiques depuis le début des observations. C'est la démarche préconisée, entre autres, par Beggs (2004) pour qui le passé, et spécialement le passé récent, constitue « la clé du futur ». La démarche se justifie dans la mesure où la majorité des auteurs se rejoignent pour considérer que la tendance au réchauffement, détectable sur l'ensemble du XXème siècle, s'est accélérée à partir de 1976 (Kandel, 2002 ; Spagnoli *et al.*, 2002) et surtout à partir des années 1990 (Moisselin *et al.*, 2002), donc sur la période pour laquelle on dispose de données aéromycologiques*.

En moyenne européenne, et sur des périodes éminemment variables d'un site à l'autre, quant à leurs dates et à leurs durées, Jäger et Berger (2008) ne constatent aucune évolution significative pour *Cladosporium*, mais signalent une tendance à un début et à un pic de plus en plus précoces pour *Alternaria*, sans changement notable du nombre de jours dépassant le seuil susceptible de déclencher des manifestations allergiques. Pour cette espèce, les concentrations auraient également présenté un accroissement graduel au fil des ans, qu'il s'agisse du total saisonnier ou de l'intensité des pics, à l'exception peut-être des climats « tempérés chauds » de type méditerranéen.

Pour notre part, nous retrouvons en partie ces tendances à l'échelle du continent européen, ce qui n'a rien pour surprendre puisque, même si la série a été amputée de ses premières années (où le nombre de capteurs était très réduit) et prolongée jusqu'à 2010, nos données (fig. 22) recoupent assez largement celles utilisées par Jäger et Berger. Sur le dernier quart de siècle (1985-2010), et par-delà une assez forte variabilité interannuelle, avec en particulier une année 1989 très productive, les concentrations de *Cladosporium* seraient restées relativement stables, présentant même une très légère tendance à la décroissance. Comme l'indique le coefficient de détermination R^2, le millésime rend compte de moins de 4% de la variance totale, ce qui peut être considéré comme quasi négligeable. Pour *Alternaria*, au contraire, la tendance à la hausse est relativement nette, à défaut d'être forte, avec une variance « expliquée » à un peu plus de 13% par l'évolution chronologique, donc – du moins peut-on le supposer en première hypothèse – par l'évolution du climat.

Mais il convient d'ajouter aussitôt que ces résultats très généraux, obtenus à l'issue d'un calcul de moyenne intégrant selon les cas une vingtaine ou une quarantaine de stations disséminées sur un espace très vaste et climatiquement hétérogène, ne sont pas toujours corroborés, loin s'en faut, à une échelle plus fine. C'est ainsi que les données françaises, sur les douze dernières années (1999-2010), font état d'évolutions beaucoup plus nettes et positives pour les deux taxons (fig. 23), la seule prise en compte de l'année rendant compte de près de 20% de la variance totale pour *Alternaria* et – chiffre énorme ! – de plus de 74% en ce qui concerne *Cladosporium.* Pour cette dernière espèce*, la concentration moyenne « nationale » serait passée de moins de 100 000 spores/m^3 en 1999 à près de 500 000 en 2010.



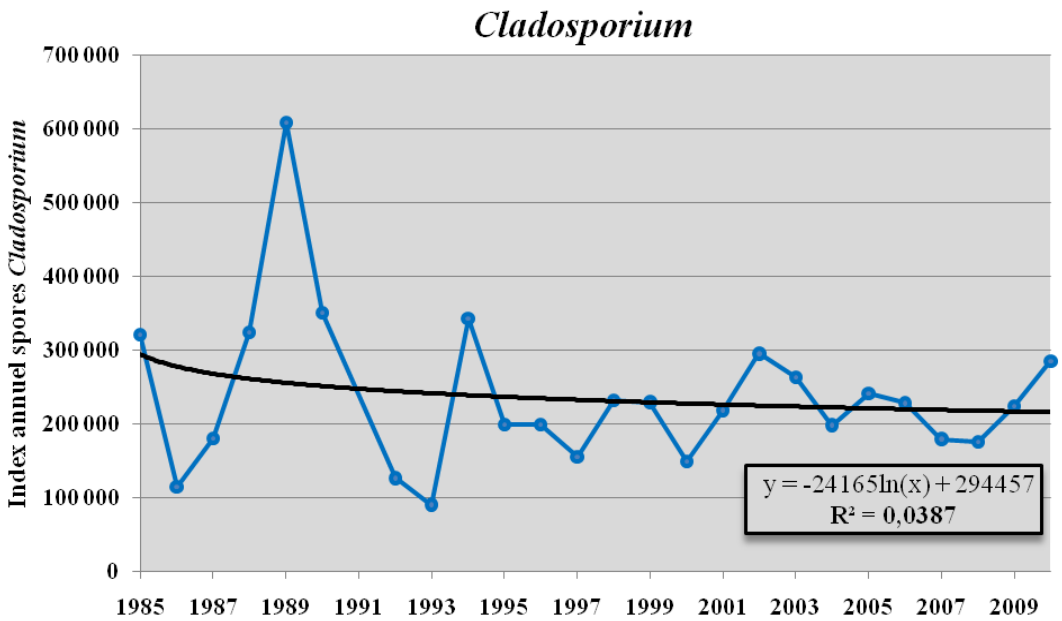
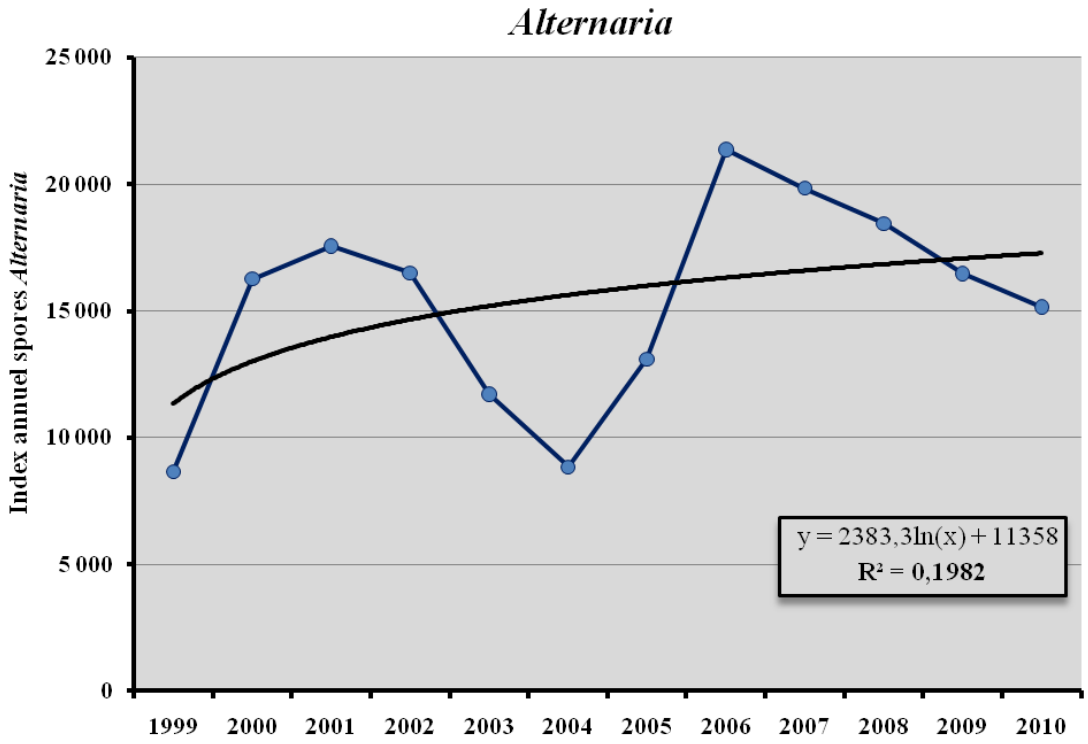


Fig. 22. - Evolution de la dispersion des moisissures atmosphériques sur l'Europe au cours des 25 dernières années (1985-2010).

Données EAN. Liste des stations retenues sur les tableaux III et IV, pp. 32-33.



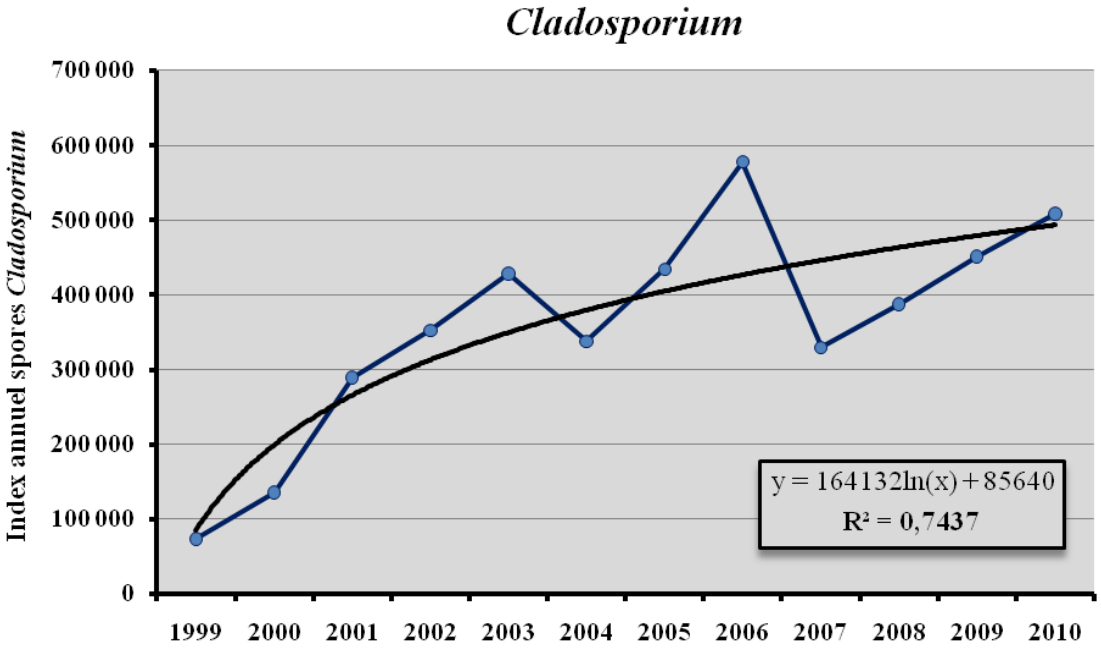


Fig. 23. - **Evolution de la dispersion des moisissures atmosphériques sur la France au cours des douze dernières années (1999-2010).**

Données RNSA. Liste des stations retenues sur le tableau II, p. 31.

On se gardera néanmoins d'en tirer des interprétations trop hâtives, pour au moins quatre raisons :

- La première est que la dispersion des principales moisissures allergisantes présente une grande variabilité, à la fois d'un site à l'autre, d'une année à l'autre et d'un taxon à l'autre (Thibaudon et Lachasse, 2006). Cette variabilité est nettement plus forte que pour les pollens (Bush, 1989). Il serait long, fastidieux et somme toute inutile de procéder à un dépouillement exhaustif des publications consacrées à la question. Mieux vaut se limiter à deux exemples, pris respectivement en Belgique et au Colorado :

- À Bruxelles, les concentrations en spores fongiques sont dénombrées quotidiennement depuis plus de trente ans (Nolard *et al.*, 2001). La température moyenne annuelle a augmenté de 1°C au cours de cette période, mais aucune tendance à l'augmentation ni à la diminution du nombre de spores n'a été détectée pour les deux espèces dominantes dans l'atmosphère, *Cladosporium herbarum* et *Alternaria alternata.*

- À Denver, Katial *et al.* (1997) ont observé une franche tendance à la hausse en années successives des spores de *Cladosporium,* alors qu'ils n'ont décelé aucune tendance significative pour *Alternaria* (ce qui est exactement l'inverse des conclusions de Jäger et Berger, 2008) – et pas davantage pour d'autres espèces de spores fongiques, en particulier *Epicoccum,* résultat confirmé par Stępalska *et al.* (2008) pour *Didymella.*

- Une deuxième raison tient à la fréquente brièveté des séries exploitées (8 ans seulement, par exemple, dans l'étude précitée de Katial *et al.*, 1997 ; 12 ans, au mieux, pour nos séries françaises), qui n'autorise en aucun cas des conclusions définitives : le poids d'une année exceptionnelle y est excessif au point que, suivant que celle-ci se place au début ou à la fin de la série analysée, elle peut inverser la tendance.

- En troisième lieu, des différences importantes ont été rapportées au sein d'une même région climatique. Un bon exemple nous est fourni au Royaume-Uni par les travaux de Corden et Millington (2001), prolongés par ceux de Corden *et al.* (2003) qui, pour *Alternaria,* ont mis en évidence sur la série 1970-1996 des tendances opposées à Derby (dans la partie orientale des Midlands) et à Cardiff (au Pays de Galles), avec respectivement une forte hausse (*« a dramatic upward trend »*) et une baisse sensible (*« a downward trend »*). Pourtant, les deux localités sont distantes de moins de 180 km et plusieurs études ont montré que le climat y évoluait en parfaite concordance de phase. De même, sur le Nord-Ouest de la péninsule ibérique, Rodríguez-Rajo *et al.* (2005) ont mis en évidence des écarts considérables selon l'espèce fongique et l'éloignement de la mer : les concentrations de *Cladoporium cladosporioides* augmenteraient avec la continentalité, alors que celles d'*Alternaria* diminueraient et que celles de *Cladosporium herbarum,* peu influencées par la distance au littoral, seraient directement proportionnelles à l'altitude. De même encore, aux environs de la ville néo-zélandaise d'Auckland, Hasnain (1993) a constaté des divergences énormes entre trois capteurs placés à une dizaine de kilomètres l'un de l'autre.

- Enfin, si elle constitue une solution de facilité, l'imputation au changement climatique des tendances observées résiste rarement à un examen attentif. La question a été bien posée, par exemple, au Colorado. Sur la période de référence (1987-1994), ni les températures, ni l'humidité atmosphérique, ni les précipitations n'ont présenté d'évolution significative. L'explication climatique est donc difficilement défendable, si bien que Katial *et al.* (1997) finissent par attribuer la hausse croissante des concentrations de *Cladosporium* à l'accroissement démographique et à l'urbanisation, la population de Denver étant passée au cours de ces huit années de 2,6 à 2,9 millions d'habitants[49]. De même, et plus nettement encore, Corden *et al.* (2003) invoquent des pratiques agricoles différentes pour rendre compte des évolutions inverses décrites sur Derby et Cardiff. Dans le premier cas, les pics de spores fongiques (qui dépassent 1000/m^3/jour depuis 1992) coïncident régulièrement avec des vents de Sud-Est, qui ont parcouru de vastes étendues de terres agricoles avant d'arriver sur le centre- ville où est situé le capteur, alors que dans l'autre cas les plus fortes concentrations d'*Alternaria* (toujours inférieures à 1000 spores/m^3/jour) sont associées à des vents de secteur Nord, qui ont plutôt parcouru des zones de prairies. La tendance positive notée sur Derby serait donc imputable, pour une faible part, à la hausse des températures du plein été, et pour une part essentielle à l'accroissement constant des surfaces plantées en céréales. On peut donc raisonnablement s'attendre à ce que la tendance observée se poursuive, ou du moins ne s'inverse pas. Inversement, la rareté des cultures céréalières autour de Cardiff fait que les scores d'*Alternaria* ont une forte probabilité d'y rester relativement faibles.

Ainsi, que ce soit par manque de recul, du fait des très gros écarts constatés d'un endroit à l'autre ou en raison de l'intervention majoritaire de facteurs autres que climatiques, l'observation de l'évolution récente des concentrations de spores fongiques permet difficilement de cerner l'influence du changement climatique, et par suite de faire des projections sur le futur, à la différence de ce qui est désormais admis pour les pollens (David et Thibaudon, 2003 ; Beggs, 2004 ; Confalonieri *et al.*, 2007 ; Cohen et Besancenot, 2007 ; Thibaudon, 2007 ; Gamble *et al.*, 2008 ; D'Amato et Cecchi, 2008 ; Shea *et al.*, 2008 ; Ziska *et al.*, 2008 ; Reid et Gamble, 2009 ; Besancenot, 2009…).

49. Cela étant, la question du rôle joué par la croissance urbaine demeure partiellement en suspens. La majorité des études font plutôt état de concentrations de spores fongiques plus élevées en milieu rural qu'en ville (Pasanen, 1992 ; Simeray *et al.*, 1993). C'est ce que Oliveira *et al.* (2009) ont pu vérifier au Portugal, pour presque toutes les espèces de moisissures, en tout cas pour celles qui émettent les plus grosses quantités de spores. En Pologne, Kasprzyk et Worek (2006) sont arrivés à une conclusion très voisine, mais avec la notable exception de *Cladosporium*, plus abondant en ville qu'à la campagne, tant en valeur absolue (spores/m^3) qu'en valeur relative (pourcentage du total des spores fongiques).Un premier élément d'explication est fourni par Awad (2005), qui fait observer que la majorité des moisissures (dont *Alternaria*) se développent surtout sur la végétation, mais que ce n'est pas le cas pour *Cladosporium*, au moins pour les variétés *sphaerospermum* et *cladosporioides*, qui contaminent l'air extérieur à partir des habitations (cf. *supra*, p. 34). *Aspergillus* et *Penicillium* seraient les deux autres moisissures dont la présence dans l'air atmosphérique doit peu à la végétation environnante. Pasanen (1992) suggère que les contrastes d'humidité entre la campagne, la ville et les milieux suburbains pourraient également intervenir.

Les remarques de Troutt et Levetin (2001) sur l'exemple de Tulsa, en Oklahoma, généralisées ultérieurement par Reid et Gamble (2009), sont à cet égard symptomatiques. Les auteurs attirent en effet l'attention sur le fait que, si la température, l'humidité relative et le point de rosée* ressortent presque partout comme de bons prédicteurs des concentrations aéromycologiques* au pas de temps journalier, ou à celui de séquences de quelques jours (Rodríguez-Rajo *et al.*, 2005), les choses se compliquent singulièrement à un pas de temps moins fin. Il n'y aurait pratiquement jamais de lien significatif entre la température ou l'humidité moyenne d'un été et la quantité de spores fongiques aéroportées au cours de cette saison. Une complication supplémentaire tient à ce qu'une tendance observée pour une famille de spores ne se retrouve pas nécessairement, et peut même être inversée pour une autre, et qu'il existe des différences très importantes d'un endroit à l'autre, sans qu'aucun argument ne permette d'en apporter tout ou partie de la responsabilité au climat.

Il s'ensuit que, si l'on veut faire des prévisions réalistes pour le XXIème siècle, l'extrapolation de l'évolution récente ne saurait suffire ; peut-être même n'est-elle d'aucun intérêt. D'autres démarches, faisant plus appel au raisonnement qu'à l'observation, doivent impérativement être mises en œuvre. Ce sera l'objet de la discussion qui suit que d'esquisser quelques pistes dans cette direction.

III. Discussion

Relation entre populations de moisissures dans l'air et évolution du climat

Peut-on faire des projections réalistes pour le XXIème siècle ?

a) Complexité du problème et absence de modèle

La définition du changement climatique ou des changements climatiques[50] donnée par le GIEC fait référence à une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat, à l'échelle de la planète tout entière, ou de sa variabilité, persistant pendant de longues périodes. Il s'agirait donc de phénomènes à la fois globaux et à long terme, qui peuvent être « naturels » ou liés à l'action humaine, notamment avec l'utilisation massive de combustibles fossiles (Meehl *et al.*, 2007). La notion de changement climatique est aujourd'hui associée en priorité au réchauffement qui a débuté dans le monde il y a quelques décennies et qui se caractérise par une hausse de la température *moyenne* des basses couches de l'atmosphère, sans que cela implique une hausse généralisée, aussi bien dans le temps que dans l'espace.

Or, pour l'essentiel, même si d'autres pays sont évoqués à titre de comparaison, nous nous intéressons ici au territoire de la France métropolitaine, qui représente moins de 0,37% de la superficie des terres émergées et moins de 0,11% de la superficie totale du globe. Sur ce territoire, les simulations réalisées par les experts de Météo France et de l'Institut Pierre-Simon Laplace (Joussaume *et al.*, 2007) peuvent être schématisées comme suit, à l'horizon 2100 :

- Dans un scénario modéré d'augmentation des gaz à effet de serre* (scénario B2 du GIEC), la température moyenne augmenterait de 2 à 2,5°C entre la fin du XXème et la fin du XXIème siècle, les précipitations moyennes variant faiblement ou augmentant légèrement en hiver et diminuant sensiblement en été.
- Dans un scénario fort d'augmentation des émissions de gaz à effet de serre* (scénario A2 du GIEC), l'évolution serait beaucoup plus marquée, avec un réchauffement moyen de l'ordre de 3 à 3,5°C, une diminution de 20 à 35% des pluies estivales et une forte recrudescence de certains paroxysmes météorologiques. Un été sur deux serait alors au moins aussi chaud que l'été 2003.

50. La Convention Cadre des Nations Unies définit les changements climatiques comme « les changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ».

En outre, et indépendamment du scénario d'émission, il paraît très probable qu'en été les vagues de chaleur seront à la fois plus fréquentes, plus longues (de 3 à 10 jours par an aujourd'hui à une moyenne comprise entre 20 et 40) et/ou plus intenses, tandis que les périodes de sécheresse seront plus longues. Il est également probable, mais avec un indice de confiance un peu moindre, qu'en hiver le nombre de jours de gel diminuera et que les vagues de froid seront moins longues, sinon plus rares et moins sévères. Il est enfin jugé plausible que les pluies intenses deviennent proportionnellement plus fréquentes. Mais les spécialistes restent très indécis sur les changements susceptibles de concerner les vents forts et les tempêtes.

L'évolution ne serait toutefois pas uniforme sur l'ensemble du territoire (Spagnoli *et al.*, 2002 ; Somot, 2005). Malgré une incertitude grandissant à mesure que l'on descend à une échelle plus fine, sont considérés comme probables ou très probables :

- un réchauffement, surtout hivernal, plus fort à l'Est qu'à l'Ouest, en milieu teinté de continentalité qu'en domaine océanique ;
- un réchauffement estival plus accusé au Sud qu'au Nord, notamment aux abords de la Méditerranée ;
- une diminution des totaux pluviométriques annuels au Sud (où la zone qui enregistre plus de 25 jours consécutifs sans précipitations, aujourd'hui limitée à l'extrême Sud-Est, s'étendrait à la moitié Ouest) ;
- et une augmentation des totaux pluviométriques annuels au Nord.

Les spécialistes se reconnaissent toutefois incapables de préciser la position, à une date donnée, de la ligne de démarcation entre Nord et Sud, ainsi qu'entre Ouest et Est.

Les conséquences possibles d'un tel changement sur la distribution des principales espèces végétales commencent à être bien cernées. En utilisant des modèles de plus en plus sophistiqués, même s'ils n'intègrent pas encore tous les paramètres, notamment les effets des maladies et des parasites, les scientifiques sont d'ores et déjà capables de proposer des schémas d'ensemble cohérents quant à l'évolution prévisible de la végétation. Par exemple, en moyenne nationale, le débourrement interviendrait de 6 à 10 jours plus tôt pour les feuillus, et serait avancé de 15 à 20 jours pour le pin maritime. Pour les espèces qui ont besoin de périodes de froid, la tendance à une plus grande précocité se manifesterait surtout en altitude. En ce qui concerne le couvert forestier, les modèles prévoient une progression générale des aires bioclimatiques océaniques et méditerranéenne, ainsi qu'une régression importante des aires bioclimatiques de montagne Par exemple, le pin maritime (*Pinus maritimus*), aujourd'hui limité à la façade occidentale, s'étendrait sur toute la moitié Ouest du pays, tandis que le chêne vert (*Quercus ilex)* coloniserait la quasi-totalité du tiers Sud, en liaison avec une extension géographique du climat méditerranéen... La modélisation peut aussi s'appliquer aux plantes cultivées (Howden *et al.*, 2007). Ainsi, il apparaît vraisemblable qu'au cours du XXIème siècle, la culture de l'olivier

remontera peu à peu la moyenne vallée du Rhône. Celle du maïs, qui consomme de grandes quantités d'eau, aura tendance à se cantonner au Nord et au Nord-Est. Le rendement des céréales augmentera un peu partout, au moins si l'élévation thermique n'excède pas 2°C...

En revanche, et même si des hypothèses de travail ont déjà été proposées par les spécialistes, on ne dispose encore d'aucun outil permettant de décrire avec précision, à l'échelle de la France entière ou à celle d'une région, la combinaison de paramètres climatiques qui conditionne ou, plus modestement, influence la production et la dispersion atmosphérique des spores fongiques. Dans ces conditions, faute d'une compréhension suffisante de la situation actuelle, toute tentative de simulation ou de prédiction de l'évolution à venir des populations fongiques en fonction de paramètres physiques et écologiques pertinents, tels que l'humidité, la température et la nature du couvert végétal, s'avère très prématurée et ne peut que déboucher sur un échec. À notre connaissance, aucun modèle n'a encore été proposé dans ce sens. La difficulté serait sûrement amplifiée par la diversité des moisissures, dont les exigences climatiques et les limites de tolérance sont très variables. Un seul exemple permettra de le vérifier : si *Aspergillus flavus* ne survit guère au-delà de 35°C, ce qui fait que les périodes caniculaires lui sont fatales, d'autres variétés d'*Aspergillus*, dont le redoutable *A. fumigatus*, supportent sans trop de dommages 55°C !

C'est dire qu'en l'état actuel de la science, la réponse à la question qui fait l'objet principal de ce rapport ne saurait se trouver dans la modélisation.

b) Variation des concentrations en spores atmosphériques en fonction du climat

On a déjà noté à quel point sont discordants les travaux sur le lien entre spores fongiques et conditions météorologiques locales. On n'y reviendra donc pas. En revanche, il peut être intéressant de comparer les comptes aéromycologiques* de régions soumises aujourd'hui à des climats différents. À défaut de matériaux comparables disponibles en France, ou même en Europe, certaines données américaines peuvent fournir un bon point de départ à la réflexion.

- Exploitation des données d'EMLab P&K

Pour discuter de l'impact du climat sur la concentration en spores fongiques, il peut être intéressant d'examiner les données compilées par EMLab P&K, société commerciale leader en Amérique du Nord sur le marché des laboratoires d'analyse de la qualité de l'air intérieur, qu'il s'agisse de spores fongiques, d'amiante, de bactéries, d'allergènes* ou du radon, mais aussi impliquée dans l'analyse de l'air atmosphérique, spécialement en ce qui concerne les spores fongiques[51]. Les tableaux V, VI et VII synthétisent les données publiées pour trois des groupes de spores les plus fréquemment isolés, à savoir les *Alternaria, les Cladosporium* et l'ensemble *Penicillium/Aspergillus*.

51. Cf. http://www.emlab.com

L'intérêt majeur de ces données résulte, d'une part, du très grand nombre de sites d'analyses (plusieurs milliers), d'autre part du fait qu'elles ont été collectées dans des conditions beaucoup mieux standardisées que celles qui résulteraient d'une méta-analyse de la littérature internationale.

Le premier enseignement que l'on peut en tirer (tabl. V) est qu'un territoire aussi contrasté sur le plan climatique que celui des États-Unis n'en présente pas moins une relative homogénéité des concentrations en spores tout au long de l'année ou, en tout cas, une homogénéité bien supérieure à celle que l'on constate sur la seule série longue disponible en Europe : à Bruxelles, pour *Cladosporium*, les mois extrêmes (janvier et juillet) sont au mieux dans le rapport de 1 à 100, et certaines années dans le rapport de 1 à 1000. Ceci confirme ce que l'on a déjà pressenti ci-dessus, à savoir que c'est bien à l'échelle locale qu'il convient d'analyser et d'interpréter la variabilité. Il y a là un premier argument qui doit conduire à relativiser l'impact du changement climatique « global » : s'il majore les risques à un endroit ou pour un taxon donné, il peut tout aussi bien les minorer ailleurs ou pour un autre taxon…

Tableau V. - Concentrations moyennes en spores fongiques aux États-Unis en janvier et juillet : fréquence d'isolement et distribution statistique.

Source : EMLab P&K.

Moyenne US en janvier (spores/m^3)				
Type fongique	**Percentile 2,5%**	**Percentile 50%**	**Percentile 97,5%**	**Fréquence d'isolement (%)**
- *Alternaria*	7	20	173	36
- *Cladosporium*	33	351	4 907	91
- *Penicillium/Aspergillus*	27	213	2 453	91
Moyenne US en juillet (spores/m^3)				
Type fongique	**Percentile 2,5%**	**Percentile 50%**	**Percentile 97,5%**	**Fréquence d'isolement (%)**
- *Alternaria*	7	31	387	69
- *Cladosporium*	53	693	8 431	98
- *Penicillium/Aspergillus*	37	240	2 720	88

Un deuxième point qui mérite d'être souligné est qu'une fois intégré à l'échelle d'un vaste territoire (ici les États-Unis, mais on ne voit aucune raison pour qu'il en aille différemment ailleurs), l'effet de variations modérées des conditions météorologiques au lieu de prélèvement apparaît limité. C'est bien ce qui ressort de la comparaison des journées de temps clair, des journées de vent modéré et, quoique de façon un peu moins nette, des journées de pluie modérée (tabl. VI). Dans ces conditions, il paraît raisonnable de considérer que les données recueillies par des réseaux de type RNSA seraient finalement assez peu affectées par la modification locale des conditions météorologiques.

Même si une analyse détaillée des données disponibles pour la Californie et l'Arizona serait nécessaire, il reste qu'une différence marquée existe entre le climat subtropical de la Floride et le climat continental humide du Massachussetts. Or, entre ces deux États, les comptages de spores par mètre cube restent similaires (tabl. VII).

Tableau VI. - Concentrations moyennes en spores fongiques aux États-Unis selon le type de temps : fréquence d'isolement et distribution statistique.

Source : EMLab P&K.

Moyenne US par temps clair (spores/m^3)				
Type fongique	**Percentile 2,5%**	**Percentile 50%**	**Percentile 97,5%**	**Fréquence d'isolement (%)**
- *Alternaria*	7	27	325	54
- *Cladosporium*	52	533	8 067	96
- *Penicillium/Aspergillus*	27	213	2 427	92
Moyenne US par vent modéré (spores/m^3)				
Type fongique	**Percentile 2,5%**	**Percentile 50%**	**Percentile 97,5%**	**Fréquence d'isolement (%)**
- *Alternaria*	7	27	467	49
- *Cladosporium*	27	427	7 787	95
- *Penicillium/Aspergillus*	27	160	2 287	88
Moyenne US par pluie modérée (spores/m^3)				
Type fongique	**Percentile 2,5%**	**Percentile 50%**	**Percentile 97,5%**	**Fréquence d'isolement (%)**
- *Alternaria*	5	27	180	31
- *Cladosporium*	27	333	12667	93
- *Penicillium/Aspergillus*	27	267	7253	91

Tableau VII. - Concentrations moyennes en spores fongiques dans quatre États climatiquement contrastés des États-Unis : fréquence d'isolement et distribution statistique.

Source : EMLab P&K.

Moyenne pour la Californie (spores/m^3)				
Type fongique	**Percentile 2,5%**	**Percentile 50%**	**Percentile 97,5%**	**Fréquence d'isolement (%)**
- *Alternaria*	13	267	7297	62
- *Cladosporium*	53	640	6199	98
- *Penicillium/Aspergillus*	50	213	2667	88
Moyenne pour la Floride (spores/m^3)				
Type fongique	**Percentile 2,5%**	**Percentile 50%**	**Percentile 97,5%**	**Fréquence d'isolement (%)**
- *Alternaria*	7	373	193	96
- *Cladosporium*	27	427	7817	94
- *Penicillium/Aspergillus*	27	213	3657	84
Moyenne pour l'Arizona (spores/m^3)				
Type fongique	**Percentile 2,5%**	**Percentile 50%**	**Percentile 97,5%**	**Fréquence d'isolement (%)**
- *Alternaria*	13	107	1467	62
- *Cladosporium*	53	267	2560	91
- *Penicillium/Aspergillus*	53	213	1333	93
Moyenne pour le Massachussets (spores/m^3)				
Type fongique	**Percentile 2,5%**	**Percentile 50%**	**Percentile 97,5%**	**Fréquence d'isolement (%)**
- *Alternaria*	7	27	227	31
- *Cladosporium*	27	320	6293	81
- *Penicillium/Aspergillus*	27	213	2987	85

Or, tout porte à penser que les variations de climat susceptibles d'affecter tel ou tel site français au cours du siècle en cours n'auront pas une amplitude supérieure aux écarts observés aujourd'hui sur l'immense territoire des États-Unis. Il semble donc raisonnable de considérer que le changement climatique annoncé ne devrait avoir qu'un effet limité sur la distribution des spores fongiques atmosphériques en France.

- *Exploitation des données du Greenguard Environmental Institute*

Le climat ne joue peut-être pas non plus un rôle dominant dans la prolifération des moisissures des environnements intérieurs. Aux États-Unis, le secteur des assurances accorde une importance particulière aux risques pour la santé induits par la prolifération de moisissures dans l'habitat privé et commercial. Récemment, une somme de 32 millions de dollars a été obtenue en dédommagement d'une prise en charge inappropriée d'une contamination par *Sachybotrys atra*, une moisissure fréquente sur les papiers peints et les bois moisis et hautement toxinogène*, notamment pour les très jeunes enfants[52].

L'*American Risk Management Resources Network* (ARMR), a développé un modèle de classification du risque relatif en comparant les pertes dues aux moisissures réclamées aux assurances avec les primes payées. Ce modèle permet de classer les États selon le risque de contamination des propriétés commerciales et privées.

Top 10 des États à plus haut risque	
Texas	2,95
Floride	2,50
Oklahoma	2,45
Caroline du Sud	1,91
Nevada	1,90
Arizona	1,90
Californie	1,73
Dakota du Sud	1,47
Tennessee	1,33
Kansas	1,25

Tableau VIII. - Top 10 des États à plus haut risque de contamination par les moisissures des propriétés commerciales et privées aux États-Unis.

Source : *American Risk Management Resources Network.*

52. Le *Stachybotrys* a été notamment lié à une maladie grave et au décès par hémorragie pulmonaire de plusieurs bébés à Cleveland. Il est possible, mais on ne peut le prouver, que ces très jeunes enfants aient été exposés à des concentrations élevées de toxines* en respirant des spores de *Stachybotrys*. Les bébés sont plus vulnérables aux toxines* dans l'air que les enfants plus âgés et les adultes parce que leurs poumons se développent très rapidement.

Top 5 des États à risque le plus faible	
Wisconsin	0,06
Virginie Occidentale	0,07
Alabama	0,13
Massachussets	0,18
Minnesota	0,19

Tableau IX. - Top 5 des États à plus faible risque de contamination par les moisissures des propriétés commerciales et privées aux États-Unis.

Source : *American Risk Management Resources Network.*

Comme le fait remarquer le *Greenguard Environmental Institute* (GEI), une organisation travaillant avec les propriétaires et les constructeurs sur le contrôle du risque moisissures, les « États secs » (Oklahoma, Kansas…) se retrouvent dans le top 10 avec des États pour lesquels la qualification de « zone à risque pour moisissures » est attendue (Floride, Caroline du Sud…) et curieusement le premier de tous est le Texas !

Il est également intéressant de noter que le risque relatif n'est pas non plus lié aux États touchés par les ouragans exceptionnels de 2005.

La conclusion à laquelle aboutissent les assureurs est que la contamination des biens immobiliers par les moisissures touchés par les ouragans est en général moins coûteuse que la croissance de moisissures causée par les défauts de construction ou par la piètre qualité des matériaux. Pour le bâtiment, la qualité de l'architecture et des matériaux joue donc le premier rôle. Le risque peut, de ce fait, être contrôlé même en cas de détérioration des conditions climatiques.

Cela dit, si le changement climatique ne semble pas devoir affecter outre mesure les concentrations de spores fongiques, qu'en est-il du risque allergique associé ?

c) Variation du risque d'allergie aux spores atmosphériques en fonction du climat

Une première indication, approximative, peut être fournie par la comparaison de deux villes françaises connaissant des climats contrastés, en l'occurrence Aix-en-Provence et Paris, sur les années 2004-2010, les seules pour lesquelles on dispose de données aéromycologiques* dans les deux endroits. Les figures 24 et 25 mettent en regard, pour *Cladosporium* et *Alternaria*, les nombres annuels de jours à risque, déterminés en utilisant des seuils compatibles avec les valeurs retrouvées le plus souvent dans la littérature et avec ce qui a été dit plus haut (cf. pp. 38 et 41), à savoir 3 500 et 7 000 spores/m^3 pour *Cladosporium*, 500 et 1 000 pour *Alternaria*.

Si l'on observe une différence marquée du nombre de jours à risque d'allergie à *Cladosporium* entre Paris et Aix, c'est là où il fait le plus chaud, en Provence, que les allergiques courent actuellement le moins de risque (fig. 24). Dans ces conditions, un réchauffement du climat doublé d'une extension du domaine méditerranéen vers le Nord et vers l'Ouest ne peut apparemment que s'avérer bénéfique. Malheureusement, la même analyse faite pour *Alternaria* aboutit à un constat diamétralement opposé : cette fois, c'est à Aix que les seuils critiques sont le plus fréquemment dépassés, ce qui peut laisser présager pour le futur un renforcement du risque (fig. 25). Mais il serait prématuré de décider

si les différences observées entre les deux villes sont le reflet de la différence de climat ou si elles résultent d'influences encore plus difficiles à cerner, comme l'occupation du sol à proximité des capteurs.

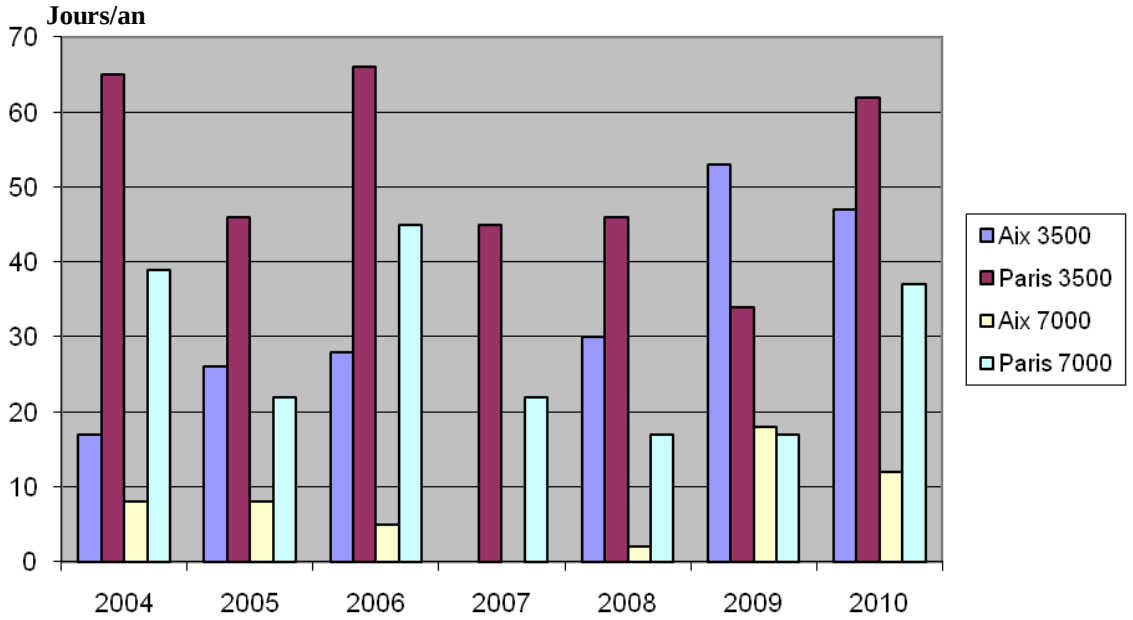


Fig. 24. - Nombre annuel de jours à risque d'allergie à *Cladosporium* à Aix-en-Provence et Paris, en fonction de deux seuils de risque (3 500 et 7 000 spores/m^3).

Données RNSA.

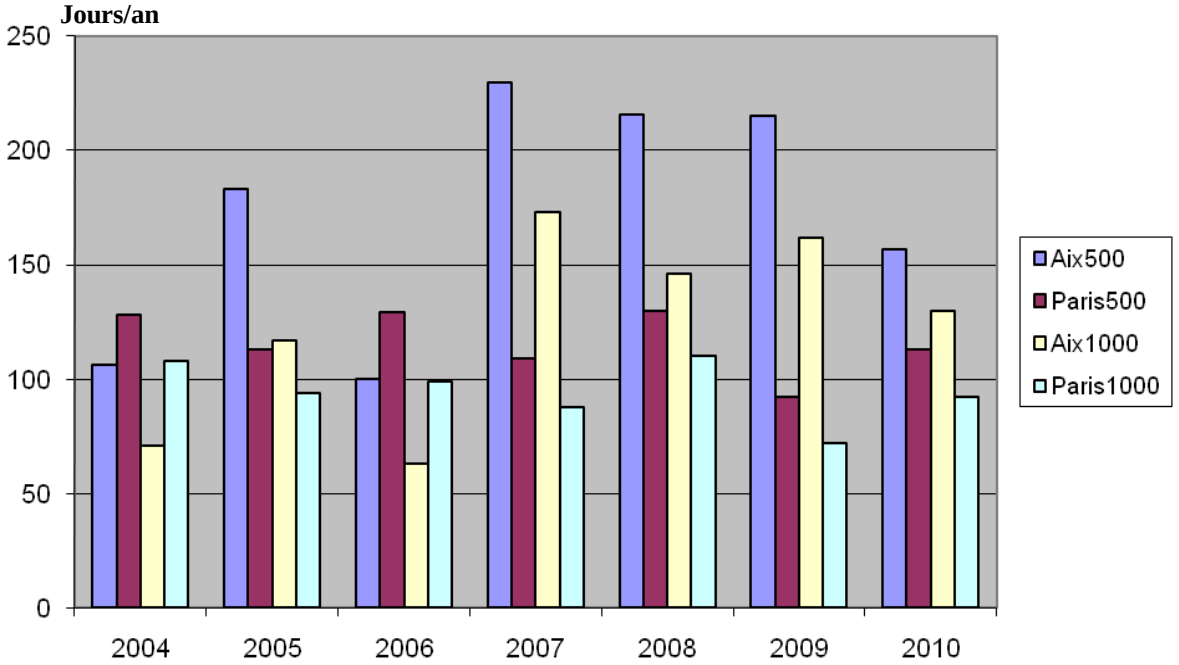


Fig. 25. - Nombre annuel de jours à risque d'allergie à *Alternaria* à Aix-en-Provence et Paris, en fonction de deux seuils de risque (500 et 1000 spores/m^3).

Données RNSA.

Trois enseignements de portée générale peuvent être tirés à ce stade de la réflexion :

- Le changement climatique est par définition global, alors que l'analyse de risque pour la population n'a de sens qu'au niveau local.
- Les séries longues manquent et les périodes couvertes ne permettent pas encore de décrire des évolutions notables du climat, sauf peut-être dans les régions alpines. Il est donc plus intéressant de comparer entre elles différentes régions climatiques, mais il est alors indispensable de tenir compte de l'environnement des capteurs.
- La précision biologique est importante, car les prédictions peuvent s'inverser selon le taxon examiné, même quand on se limite à ceux qui donnent les plus fortes concentrations atmosphériques.

C'est donc en ajoutant des fonctionnalités au réseau de capteurs que l'on se donne les meilleures chances de décrire les risques présents et de prédire les risques à venir. On notera toutefois qu'une méta-analyse réalisée par Schmier et Ebi (2009) suggère, sur l'exemple des États-Unis, que le changement climatique pourrait avoir un impact bien réel sur le risque encouru par les enfants sensibilisés aux moisissures de faire des crises d'asthme sévères.

d) Éventuels effets pervers de la lutte contre le réchauffement climatique : la problématique des bâtiments passifs

Le concept de « maison passive » (Ruelle, 2008), élaboré en 1988 par l'institut *Wohnen und Umwelt* (Habitat et Environnement) de Darmstadt, avec la collaboration de l'université de Lund, s'applique à un bâtiment dont les besoins en énergie sont réduits, essentiellement par des mesures architecturales et constructives – dites « passives » – au point que, contrairement à une maison de construction conventionnelle, il offre toute l'année une température ambiante confortable sans comporter d'équipements « actifs » de chauffage ni de climatisation. Le premier prototype a été réalisé à Darmstadt-Kranichstein en 1991 ; il fait depuis lors l'objet d'une surveillance approfondie. Plusieurs milliers de « maisons passives » ont ensuite été construites à travers toute l'Europe, et de nombreux composants techniques répondant spécifiquement aux exigences de ce type de bâtiment sont désormais commercialisés. À l'origine élaboré pour des pavillons individuels, le concept est étendu aujourd'hui aux immeubles de logements collectifs, ainsi qu'aux bâtiments à usage tertiaire (bureaux, écoles…).

Photo *La Haute Molune.*

Le principe est séduisant puisque, avec le standard de la « maison passive », l'occupant dispose de la double garantie d'un grand confort thermique et d'une qualité constructive supérieure, grâce à une

conception intelligente et non grâce à une infrastructure technique démesurée, coûteuse et énergivore. De façon simplifiée, un bâtiment passif pousse à l'extrême l'isolation des murs, des fenêtres, du sol et des plafonds, pour arriver idéalement à se priver de toute installation de chauffage. Mais cette « isolation à l'extrême » implique des systèmes de ventilation et d'aération particulièrement performants. On utilise, pour cela, une ventilation mécanique contrôlée (ou VMC) couplée à un échangeur de chaleur. Pour peu que la VMC soit correctement dimensionnée, le volume d'air de chaque pièce est renouvelé toutes les deux heures. Pendant ce temps, dans l'échangeur, l'air chaud sortant restitue ses calories à l'air froid entrant. Ainsi, 80% des déperditions sont évitées et la chaleur reste à l'intérieur du logement. Un des effets secondaires positifs liés à l'utilisation de cette VMC est, au moins théoriquement, qu'un bâtiment passif, du fait de sa ventilation constante, ne connaît jamais de problèmes de moisissures. À l'inverse, la quantité d'air qui circule est si faible que l'on n'a jamais l'impression de sentir des « courants d'air » ni d'avoir froid, à quelque endroit que l'on se trouve. Si l'on se réfère à l'information mise à la disposition du grand public, le risque d'une prolifération non contrôlée de moisissures sur les murs, les tuiles de plafond, les meubles, etc., demeure extrêmement minime dans une maison passive (Bovet et Jeanvoine, 2006), certains documents allant même jusqu'à le déclarer impossible[53].

Il reste que tout dépend de la qualité du « *système de ventilation, qui comporte des pièces mécaniques, s'use et finit par tomber en panne. L'utilisateur doit être particulièrement attentif à ce genre de panne car, dans une maison étanche, la panne signifie aussi un développement des moisissures, acariens et problèmes d'humidité fulgurants ! La solution est une ventilation décentralisée (plusieurs petits ventilateurs interchangeables), qui évite les défaillances simultanées* »[54]. En outre, le système de gaine est un réceptacle difficilement nettoyable. Un tel type de bâtiment n'est donc pas aussi anodin pour les asthmatiques et autres allergiques aux spores fongiques que la publicité voudrait le faire croire. Or, il ne s'agit pas là d'une question purement théorique. En effet, la volonté politique est désormais, dans toute l'Europe, de rendre obligatoire pour toute nouvelle construction le recours au principe du « passif ». À titre d'exemple, en 2015, plus aucune construction publique ou privée ne pourra être mise en œuvre à Bruxelles sans qu'elle respecte ces nouvelles préconisations[55]. Il est donc primordial que les propriétaires de bâtiments passifs soient clai-

53. Cf, par exemple, la plate-forme « Réseau écologique » créée en 2007 dans le cadre de la Convention alpine : « …la construction d'une maison passive rend l'apparition de moisissures pratiquement impossible. Du fait de la répartition équilibrée des températures dans les éléments de construction - grâce à une excellente isolation thermique et à la suppression des ponts thermiques - l'humidité de l'air ne peut se déposer nulle part. La construction ouverte à la diffusion des maisons à absorption solaire directe permet à la vapeur d'eau de pénétrer librement à travers l'élément de construction et de ne pas se déposer » (http://www.cipra.org/fr/climalp/construction-renovation/maisons-efficientes/prejuges/).

54. Cf. http://www.biereau.be/construction/index.php?perma=1152102448

55. En France, la Réglementation thermique « Grenelle Environnement 2012 » n'emploie à aucun moment le terme de « maison passive », et vise plutôt la généralisation des « bâtiments basse consommation » (BBC), avec « une consommation globale d'énergie réduite d'un facteur 2 à 4 et des besoins de chauffage divisés par 2 ou 3 grâce à une meilleure conception des bâtiments et à une généralisation des techniques les plus performantes ». Les textes insistent toutefois lourdement sur l'exigence d'une « bonne étanchéité à l'air » et, à

rement informés de la nécessité d'entretenir correctement les systèmes de ventilation et qu'ils prévoient les budgets de fonctionnement nécessaires.

Le problème déborde d'ailleurs largement le cadre de l'habitat passif (Ezratty *et al.*, 2009). Depuis que l'isolation conduit au calfeutrage des habitations, pour améliorer la performance énergétique des bâtiments, réduire les émissions de gaz à effet de serre et limiter les changements climatiques, les systèmes de ventilation sont devenus incontournables. Si leur utilisation peut être gaspilleuse d'énergie, ils jouent un rôle clé quant à la qualité de l'air intérieur et à la longévité du bâti. Celui-ci a besoin de « respirer », faute de quoi bactéries et moisissures s'y incrustent et le minent. Mais, à bien des égards, l'évolution récente a de quoi inquiéter. Ainsi, une enquête nord-américaine réalisée en 1990 par l'*Occupational Safety Health Act* (OSHA) n'avait découvert qu'environ 5% de bâtiments réellement infectés par des moisissures ; six ans plus tard, au Canada, le taux dépassait 20% (Mainville, 2004), et la situation n'a fait qu'empirer depuis 1996 (D'Halewyn *et al.*, 2002 ; Heseltine et Rosen, 2009). Dans le seul état du Texas, les compagnies d'assurance ont dû débourser en 2003 environ 200 millions de dollars US pour des réclamations faisant suite à une contamination par moisissures. Les bâtiments qui sont sous l'emprise des politiques d'économies d'énergie consistant à sceller les fenêtres et à augmenter l'isolation thermique, ceux qui réduisent le temps et/ou le débit d'air neuf de ventilation, ceux qui ont des couvre-plancher en tapis et/ou un entretien ménager réduit semblent exposer aux risques les plus élevés... De même en Suède, où la prévalence de l'asthme, de la rhinite allergique et de l'eczéma a quasiment doublé chez l'enfant entre 1979 et 1991, Åberg *et al.* (1995, 1996) ont pu mettre en cause sans équivoque le plus grand confinement des appartements et le renforcement de leur isolation, dans les années qui ont suivi le « premier choc pétrolier » de 1973. La preuve est fournie par le constat que les patients dont les logements ont été équipés d'une ventilation mécanique active bien conçue et correctement entretenue ont presque immédiatement vu la prévalence de leurs allergies amorcer une baisse, légère mais significative.

Photo Zibro

Dans un registre assez voisin, Wong *et al.* (2009) ont pu établir à Hong Kong que la crainte des changements climatiques était l'un des facteurs qui incitaient le plus à généraliser la climatisation des bâtiments, et spécialement des immeubles de bureaux. Dans le même temps, ils ont constaté dans l'environnement intérieur des bureaux climatisés, en dépit d'une forte variabilité, des concentrations de spores fongiques très nettement supérieures à celles des bureaux non climatisés, au moins en ce qui concerne *Aspergillus*, *Cladosporium* et *Penicillium*.

Ainsi donc, si l'on n'y prend garde, une majoration du risque d'allergie aux moisissures pourrait être un effet pervers, non pas du changement climatique *stricto sensu*, mais des mesures incitant à

l'horizon 2020, il est envisagé que les bâtiments neufs soient non seulement autosuffisants en énergie, mais qu'ils puissent produire plus d'énergie qu'ils n'en consomment – ce qui ne pourra être obtenu qu'à l'aide de dispositifs proches de ceux de la maison passive.

améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments – donc, en fin de compte, des mesures prises pour lutter contre le changement climatique.

e) Effets de phénomènes météorologiques exceptionnels

Les résultats synthétisés dans le dernier rapport du GIEC et confortés par des recherches plus récentes soulignent une convergence pour un très probable renforcement des événements extrêmes[56], c'est-à-dire à faible probabilité d'occurrence mais à conséquences redoutables sur les systèmes écologiques et sociaux, y compris sanitaires, qu'ils impactent (Planton *et al.*, 2008 ; Décamps, 2010) : grandes vagues de chaleur (ou de froid…) au-dessus des surfaces continentales, épisodes pluvieux courts mais de très forte intensité, sécheresses prolongées, vents violents, trombes et tornades, passage de cyclones tropicaux, etc.

Nous détaillerons ici trois exemples de paroxysmes météorologiques qui ont été invoqués comme susceptibles de majorer le risque d'allergies aux spores fongiques : les orages, les inondations (surtout lorsqu'elles sont dues aux pluies diluviennes déversées par les cyclones tropicaux) et les tempêtes de poussière.

- *Orages*

Plusieurs articles relatent les mêmes faits : des services d'urgence ont enregistré des augmentations spectaculaires du nombre des hospitalisations pour asthme chez l'enfant ou, plus rarement, chez l'adulte quelques heures après qu'aient éclaté des orages violents. Ce phénomène de *« thunderstorm associated asthma »* a été bien décrit, tantôt à l'échelle locale dans des villes comme La Nouvelle-Orléans (Salvaggio *et al.*, 1971), Birmingham (Packe et Ayres, 1985), Melbourne (Bellomo *et al.*, 1992), Atlanta (Grundstein *et al.*, 2008) ou Barcelone (Codina et Lockey, 1998), et tantôt à l'échelle régionale, au Canada (Dales *et al.*, 2003) ou sur le Sud et l'Est de l'Angleterre (Higham *et al.*, 1997)… À chaque fois, le nombre des hospitalisations pour asthme aigu a été cinq à dix fois supérieur à ce qui était attendu. Un violent orage s'est par exemple déclenché à Londres le 24 juin 1994 à 18 heures et il s'est prolongé pendant une partie de la nuit, avec plus de 5 000 impacts de foudre sur une superficie d'un peu moins de 6 000 km^2 (Celenza *et al.*, 1996). La température a alors chuté presque instantanément de 26,5 à 18,7°C. La lame d'eau précipitée a atteint 46 mm en deux heures, et le taux d'humidité a fait un bond de 50 à 87%. Dans les heures suivantes, 640 asthmatiques ont dû être hospitalisés, contre une moyenne de 66 pour les jours non orageux de la seconde quinzaine de juin (Wallis *et al.*, 1996) !

56. Afin d'analyser la variabilité climatique, une approche statistique s'est imposée depuis quelques années : le climat y est réduit à une distribution de probabilité des différents phénomènes météorologiques, dont les « queues » constituent ce que l'on appelle des événements extrêmes ou des paroxysmes majeurs. La plupart des auteurs s'attendent à ce que les variations de fréquence de ces événements extrêmes soient beaucoup plus marquées au XXIème siècle que ne le seront les variations du climat « moyen ».

Même si « le mécanisme sous-jacent n'est pas encore aujourd'hui parfaitement élucidé » (Caillaud *et al.*, 2005) et s'il est vraisemblable qu'intervient une conjonction de plusieurs facteurs, l'augmentation des crises aiguës d'asthme lors du déclenchement des orages, ou de certains orages, semble bien devoir être mise en relation avec une élévation simultanée (Celenza *et al.*, 1996 ; Higham *et al.*, 1997 ; Wardman *et al.*, 2002 ; Caillaud *et al.*, 2005…) de la concentration de spores fongiques dans l'air (fig. 26). Les plus incriminées seraient les spores de *Didymella* (Thibaudon *et al.*, 2011) et de *Cladosporium*, ainsi que des fragments de spores d'*Alternaria* (Pulimood *et al.*, 2007). Il a également été montré que les asthmatiques hospitalisés les jours d'orages étaient plus souvent sensibles à *Cladosporium* et/ou à *Alternaria* que les asthmatiques hospitalisés à d'autres dates (Pulimood *et al.*, 2007). L'hypothèse dominante est que l'humidité accrue, couplée à des coups de vent particulièrement forts (Li et Kendrick, 1995), déclenche une augmentation subite de la dispersion de spores (Dales *et al.*, 2003). Lewis *et al.* (2000) font ainsi état d'un risque multiplié par 2,1 entre le 1er et le 3ème tertiles des concentrations atmosphériques de *Cladosporium*, résultat très hautement significatif ($p < 0,0001$). Dales *et al.* (2003) mettent en évidence un doublement des spores fongiques totales (de 1 512 à 2 749/m^3) les jours d'orage. Dans certaines études, une corrélation a aussi été notée avec les concentrations en pollens, notamment de graminées, surtout lorsque les vents sont assez violents pour déchiqueter l'enveloppe des grains de pollen ramollis par la pluie (Bellomo *et al.*, 1992 ; Newson *et al.*, 1997 ; Suphioglu, 1998 ; Marks *et al.*, 2001). Une interaction entre les deux types d'aéro-allergènes* a également été invoquée (Anderson *et al.*, 2001), mais il a pu être démontré à Birmingham que la recrudescence de crises d'asthme observée durant les orages devait beaucoup plus à la hausse des concentrations de spores fongiques qu'à celle des pollens ou à la pollution atmosphérique, notamment par l'ozone, le dioxyde d'azote et les particules fines (Dales *et al.*, 2003).

Si le changement climatique accroît la fréquence et/ou l'intensité des orages, il y a donc lieu de redouter une augmentation du risque de sévères crises d'asthme chez les allergiques aux spores fongiques.

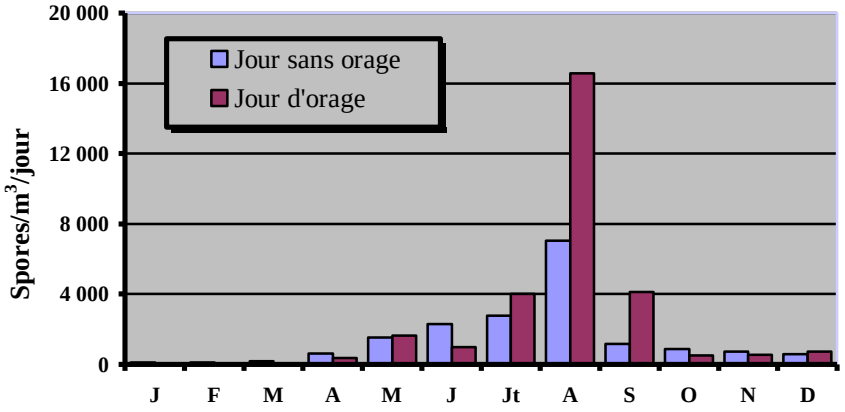


Fig. 26 - Concentrations moyennes de spores fongiques dans l'atmosphère de Cardiff en présence et en absence d'orage.

D'ap. Anderson *et al.* (2001).

Toutes espèces confondues.

- Inondations et cyclones tropicaux

Les inondations massives consécutives aux ouragans Katrina (fin août 2005) et Rita (mi-septembre 2005) ont créé dans le Sud-Est des États-Unis des conditions apparemment idéales pour la prolifération des moisissures dans l'habitat. Les études réalisées dans la zone métropolitaine de La Nouvelle-Orléans au cours des mois qui ont suivi, notamment en octobre et novembre, révèlent en effet une augmentation des concentrations de spores fongiques, à l'extérieur comme à l'intérieur des locaux (Solomon *et al.*, 2006 ; Chew *et al.*, 2006). En plein air, où 23 sites de prélèvement ont été retenus, les chiffres s'échelonnaient de 21 000 à 102 000 spores/m^3, voire 259 000[57], avec des niveaux sensiblement doublés dans les secteurs qui avaient été submergés par les eaux en comparaison de ceux qui ne l'avaient pas été[58]. Dans les habitations (8 sites de mesure, représentant différents degrés d'inondation), les taux (de 82 000 à 630 000 spores/m^3) étaient systématiquement supérieurs à ceux de l'extérieur, avec des pointes dépassant le million de spores/m^3, pour une « normale » inférieure à 4 000 spores/m^3 dans 90% des bâtiments (Solomon *et al.*, 2006). Quelque 45 espèces de moisissures ont été identifiées[59], avec une prédominance de *Cladosporium*[60], d'*Aspergillus niger*, de *Penicillium*, de *Trichoderma*[61] et de *Pœcilomyces*[62], sans différence majeure entre l'intérieur et l'extérieur, en dehors d'une présence massive de *Stachybotrys* dans certaines habitations (Rao *et al.*, 2007). Un lien a pu être établi entre la hauteur atteinte par l'eau dans les maisons et la multiplication des moisissures, un seuil critique se situant autour de 90 centimètres (trois pieds). L'infiltration d'eau par les toits endommagés a également été une source importante de prolifération fongique. De même, sur les 112 habitations investiguées par les *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC),

Photo *Transit-City*.

57. On dispose malheureusement de peu de données de référence pour les périodes antérieures, d'autant que les méthodes de surveillance des moisissures aéroportées ont changé en 2005. Néanmoins, après avoir dépouillé l'ensemble des séries existantes, Solomon *et al.* (2006) ont pu considérer comme probable pour le mois d'octobre, hors des périodes cycloniques, la fourchette 1 300-23 500 spores/m^3.

58. Les concentrations atteignaient néanmoins des niveaux nettement supérieurs aux valeurs habituelles dans les quartiers non inondés.

59. Pour un tableau détaillé (Louisiane et Mississippi), cf. http://www.ewire.com/display.cfm/Wire_ID/2846

60. On notera toutefois que Bennett (2006) n'a retrouvé que très peu de *Cladosporium*, ce qui accrédite la thèse de fortes variations sur de courtes distances.

61. Les *Trichoderma* (environ 20 espèces) sont des champignons filamenteux imparfaits appartenant à la classe des Deutéromycètes*. Les colonies laineuses, à croissance rapide, sont de couleur blanche, jaune-verte ou verte. Ces champignons cosmopolites* et ubiquitaires*, saprophytes* en milieu extérieur, contaminants habituels des cultures, sont en général jugés peu pathogènes. Ils sont toutefois impliqués dans des allergies de type I et III et dans quelques rares cas de mycoses* chez des individus immunodéprimés.

62. Les *Pœcilomyces* (31 espèces) sont, eux aussi, des champignons filamenteux imparfaits de la classe des Deutéromycètes*. Les colonies poudreuses, à croissance rapide, sont généralement blanches, parfois roses ou chamois, mais jamais vertes. On les trouve principalement dans l'air, dans le sol et sur les végétaux. Certaines espèces sont impliquées dans des allergies de type I et III et parfois dans des infections ; mais surtout, elles peuvent produire de nombreuses mycotoxines* dangereuses.

presque la moitié présentaient « des moisissures visibles » (fig. 27), la contamination étant jugée intense dans 17% des cas (Ratard *et al.*, 2005) et la persistance de l'eau pendant plus de 48 heures constituant un puissant facteur aggravant (Brandt *et al.*, 2006).

Fig. 27. - Logement de La Nouvelle-Orléans contaminé par les moisissures après le passage de Katrina.
D'ap. Bennett (2006).

Le bilan sanitaire de cette *mold invasion* reste controversé. Quelques études très récentes soutiennent que la prolifération de moisissures n'a entraîné aucune modification du risque d'affections respiratoires, l'une des explications proposées étant que les habitations ont été à ce point endommagées qu'elles n'ont pas pu être habitées pendant la période de plus grande exposition (Barbeau *et al.*, 2010 ; Rabito *et al.*, 2010). La prévalence des sensibilisations cutanées aux moisissures, durant les trois années qui ont suivi Katrina, serait restée comparable à la moyenne des États-Unis, et même légèrement inférieure chez les asthmatiques[63] (Levetin *et al.*, 2007). Il n'empêche que les hôpitaux de La Nouvelle-Orléans ont rapporté un nombre croissant de patients présentant des symptômes d'allergie* et de rhinites (Wilson, 2006). Plusieurs études ont également fait état de toux persistantes, d'ailleurs baptisées « toux Katrina », qui peuvent être dues au moins en partie à la présence en quantités très élevées de moisissures dans l'air respiré (Manuel, 2006). Surtout, depuis 2005, l'incidence de l'asthme est en progression régulière à La Nouvelle-Orléans : alors que 14% des enfants y étaient reconnus asthmatiques en 2003, le taux a grimpé à 18% en 2006, les critères de diagnostic étant restés rigoureusement identiques. C'est un des taux les plus élevés des États-Unis, la situation la plus critique étant réalisée dans les quartiers où les inondations ont été les plus fortes ou les plus prolongées, ainsi que dans les minorités ethniques et les catégories sociales les plus défavorisées (Epstein *et al.*, 2005), avec des taux de prévalence majorés de 60% par rapport à la moyenne chez les petits Afro-Américains et de près de 300% chez les petits Portoricains.

63. Ces résultats sont largement contredits par une enquête en cours du projet HEAL (*Head-off Environmental Asthma in Louisiana*) : 78% des enfants de La Nouvelle-Orléans nés avant Katrina présenteraient une sensibilisation aux moisissures. Le chiffre est supérieur d'environ 30% à la moyenne du Sud-Ouest des États-Unis. Cf. : http://www.guardianpreservation.com/blog/five-years-after-katrina-mold-leaves-a-lasting-legacy/ On n'a pas encore d'informations valables sur les enfants nés depuis les inondations.

Les projections climatiques pour le XXIème siècle font état d'un probable renforcement des fortes précipitations, principalement dans les climats tempérés, et d'une augmentation de l'activité cyclonique aux basses latitudes. Certes, peu d'indices plaident en faveur d'un changement prévisible de la fréquence des cyclones tropicaux ou d'une modification de leurs zones de formation. En revanche, nombre de simulations laissent entrevoir un accroissement de leur intensité, et il semble ressortir de différentes études théoriques que la limite supérieure de cette intensité pourrait encore continuer à augmenter. Quant à l'intensité moyenne et maximale des précipitations associées à ces hydrométéores, elle devrait, elle aussi, s'accroître sensiblement (André *et al.*, 2008)... On se gardera assurément de considérer qu'un événement isolé, fût-il de l'ampleur de Katrina, peut être indicatif d'une tendance ; il ne peut même en aucun cas être attribué au seul changement climatique et on est à l'évidence en présence de phénomènes largement multifactoriels. De même, la recrudescence des moisissures qui a suivi le passage de l'ouragan doit certainement davantage à la mauvaise gestion de la crise qu'à la crise elle-même. Mais cet exemple souligne ce qui est susceptible de se produire à l'avenir, et pas seulement dans les zones soumises aux cyclones tropicaux[64], si des précipitations plus fortes se produisent sans que soit améliorée notre aptitude à nous adapter ou à réagir de façon appropriée (Besancenot, 2010) – ne serait-ce que par un contrôle strict et répété du niveau de spores fongiques dans les habitations ou les locaux de travail qui ont été inondés, spécialement lorsqu'ils sont à nouveau occupés, et par un suivi médical ultérieur, sans doute prolongé (Brandt *et al.*, 2006).

- *Tempêtes de sable ou de poussière*

Il n'existe encore que très peu de travaux relatifs à la façon dont le changement climatique pourrait affecter non pas la production, mais la dispersion à longue distance des spores fongiques, en présence de phénomènes météorologiques à caractère exceptionnel comme les grandes tempêtes de sable ou de poussière. Non seulement ces envols de particules de toutes sortes opacifient l'atmosphère très loin de leur zone de formation, mais ils peuvent aussi modifier le climat. De plus, en transportant toutes sortes de pathogènes (bactéries, virus, aéroallergènes*, etc.), tout en diminuant l'activité désinfectante des ultraviolets solaires, ils sont susceptibles d'avoir des impacts sanitaires non négligeables.

Husar *et al*. (2001) ont décrit avec minutie les deux énormes tempêtes de sable jaune qui sont nées dans le désert de Gobi les 15 et 19 avril 1998 et qui, une dizaine de jours plus tard, après avoir traversé une partie de la Chine, la Corée, le Japon et tout le Pacifique, ont provoqué des pics impressionnants de concentration de matière particulaire en façade occidentale du continent nord-américain, de la Colombie-Britannique à la Californie. Un certain nombre d'arguments per-

Photo *Envisat*.

64. Un autre exemple très démonstratif est fourni par la terrible recrudescence de moisissures observée sur la Nouvelle-Angleterre en 1998, très tôt dans la saison, alors qu'un fort Niño provoquait sur la région un temps exceptionnellement chaud et humide, avec de fortes pluies génératrices d'inondations (Freye *et al.*, 2001).

mettent de supposer que ces vents étaient chargés de grosses quantités de grains de pollen et de spores fongiques, mais les preuves formelles de manifestations allergiques occasionnées aux États-Unis par ces « dragons jaunes » font encore défaut.

D'autres études ont, en revanche, confirmé le transport de différentes espèces de spores fongiques, sur de très longues distances, au sein des nuages de sable ou de poussière issus notamment des déserts du Sahara, de Gobi et de Taklimakan (Shinn *et al.*, 2003 ; Kellog et Griffin, 2006). La qualité de l'air se trouve alors altérée, non seulement sur la majeure partie des continents africain et asiatique, mais aussi en Europe et sur les Amériques où, le jour même de l'arrivée de ces météores, les concentrations de spores présentent un pic significatif dans l'air extérieur, souvent suivi d'un autre, quelques jours plus tard, dans les bâtiments. Au Sud-Ouest de Taiwan, Wu *et al.* (2004) ont établi que, lors des tempêtes de sable jaune originaires de Chine continentale, la teneur en spores fongiques des aérosols* urbains ou périurbains variait beaucoup avec les turbulences de la couche d'air de surface, mais atteignait couramment des niveaux 2 à 12 fois supérieurs aux valeurs habituelles, avec prédominance de *Cladosporium* (plus de 60% de toutes les spores). Les Basidiomycètes*, *Penicillium, Aspergillus, Nigrospora* et quelques espèces rares, difficilement identifiables, voyaient également leur concentration augmenter de façon significative, avec répercussion incontestable sur la prévalence des allergies*. Griffin *et al.* (2001) attribuent d'ailleurs à la multiplication des tempêtes de sable chargées de moisissures africaines la véritable « épidémie d'asthme » qui frappe la Barbade depuis 1973, avec une incidence multipliée par 17 en un quart de siècle.

Ainsi donc, la probabilité accrue d'événements extrêmes induite par les changements climatiques annoncés peut renforcer le risque d'allergies aux moisissures. La France métropolitaine ne figure pas parmi les pays les plus concernés, mais elle n'est pas pour autant à l'abri. En outre, un effet direct de la hausse des gaz à effet de serre*, et spécialement du dioxyde de carbone, ne peut pas être écarté.

f) Effets directs de la teneur de l'air atmosphérique en CO_2

On sait que certains gaz à effet de serre* agissent directement sur la croissance végétale. C'est notamment le cas du CO_2, dont le rôle fertilisant n'est plus à démontrer puisque, sous l'effet du rayonnement solaire φ, la photosynthèse produit du glucose $C_6H_{12}O_6$ à partir du mélange du gaz carbonique et de l'eau :

$$6\ H_2O + 6\ CO_2 + \varphi \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2.$$

Les horticulteurs le savent bien, qui améliorent depuis longtemps leurs rendements en enrichissant en CO_2 l'air de leurs serres. Sans qu'il y proportionnalité parfaite, l'accroissement de la production pollinique suit en gros celui de la photosynthèse. Il a ainsi été montré expérimentalement que, par rapport à une concentration ambiante en CO_2 de type préindustriel (280 µmol/mol), la production de pollen d'ambroisie augmentait de 131% en présence d'une concentration « actuelle » (370 µmol/mol), et de 320% en présence d'une concentration projetée dans le XXIème siècle (600 µmol/mol).

On regrette de ne pas disposer d'études aussi précises sur les moisissures, mais il n'est pas exclu que l'accroissement continu des teneurs atmosphériques en CO_2 influence également la production de spores fongiques et contribue ainsi à expliquer l'accroissement du risque d'allergies.

De fait, une recherche récente conduite à l'Université du Massachusetts (Wolf *et al.*, 2010) suggère pour la première fois que, non seulement les plantes se développent plus vite lorsqu'elles sont exposées à des concentrations de 500 à 600 µmol/mol de dioxyde de carbone, par rapport à une concentration de 300 µmol/mol, mais que les *Alternaria alternata* croissant sur ces plantes enrichies en CO_2 produisent presque trois fois plus de spores. En outre, même si le contenu protéinique de chaque spore peut être légèrement diminué, le contenu en allergènes* de l'ensemble des spores développées sur un pied de fléole des prés (*Phleum pratense*), mesuré par un test Elisa, serait presque doublé (tabl. X). Finalement, le taux de CO_2 rend compte de 9% de la variabilité de la sporulation par pied et de 15% de l'allergénicité de ces spores. En revanche, les auteurs n'ont pas constaté de répercussion notable sur la production de spores de *Cladosporium*, dont la variabilité serait « expliquée » à moins de 4,5% par le dioxyde de carbone ambiant.

Tableau X. - Effets de la teneur de l'air atmosphérique en CO_2 sur la production de spores fongiques et leur allergénicité : moyennes et intervalles de confiance à 95%.

D'ap. Wolf *et al.* (2010), simplifié et modifié.

	Concentration de CO2 atmosphérique (µmol/mol)			
	300	**400**	**500**	**600**
Nombre de spores d'*Alternaria alternata* par pied de fléole	16,0 (15,6 -16,4)	15,7 (15,3 -16,1)	16,7 (16,2 - 17,1)	17,0 (16,6 - 17,4)
Antigènes d'*A. alternata* (µg) par pied de fléole	87,4 (67,0 - 105,3)	93,3 (75,8 - 112,5)	125,3 (106,0 - 144,5)	140,6 (124,1 - 159,8)
Nombre de spores de *Cladosporium phlei* par pied de fléole	14,6 (14,2 - 15,1)	13,9 (13,5 - 14,3)	14,5 (14,0 - 14,9)	14,6 (14,2 - 15-0)

La répétitivité des résultats n'a pas encore été suffisamment prouvée[65]. Mais, si les observations ainsi faites en laboratoire devaient se vérifier en environnement extérieur et être étendues aux moisissures développées sur d'autres substrats*, il y aurait là un motif sérieux d'inquiétude quant au risque d'allergies saisonnières à *Alternaria*. En effet, les quatre niveaux de CO_2 testés dans cette étude ont été

65. Klironomos *et al.* (1997) ont toutefois validé, eux aussi, mais sur divers champignons communs du sol, l'hypothèse qu'une teneur accrue en CO_2 conduirait à une augmentation de la sporulation*. Leurs résultats, obtenus au champ, montrent que la concentration atmosphérique en spores fongiques quadruple quand la teneur en CO_2 double dans l'air ambiant. Une analyse des champignons décomposeurs de litière, qui constituent vraisemblablement la principale source de spores fongiques aéroportées, indique que ces champignons produisent cinq fois plus de spores après enrichissement de l'environnement en CO_2. En outre, le CO_2 affecte directement les fonctions microbiennes, ce qui peut avoir d'importantes répercussions sur la décomposition des litières et, par suite, sur la prolifération des champignons.

choisis pour simuler quatre situations correspondant respectivement au XIXème siècle (300 ppm), à la période actuelle (400 ppm), aux prévisions du GIEC pour les alentours de l'an 2025 (500 ppm) et à ces mêmes prévisions pour le milieu du siècle, vers 2040-2050 (600 ppm), étant entendu que certaines zones urbaines enregistrent dès à présent des moyennes de l'ordre de 500 ppm. Le paramètre CO_2 viendrait donc compléter les paramètres physiques de température et d'humidité relative déjà cités comme facteurs susceptibles de favoriser la prolifération des moisissures.

g) Limitations méthodologiques actuelles et perspectives

Trois points seront développés, au sujet desquels des avancées significatives paraissent non seulement nécessaires, mais possibles dans les années qui viennent (Kasprzyk, 2008). Ils concernent l'harmonisation des techniques d'échantillonnage et d'identification des moisissures, la fixation des seuils d'action clinique et les mesures de prévention à mettre en œuvre.

- Vers une meilleure standardisation des méthodes d'aérobiologie

Dans la plupart des pays, l'évaluation du risque lié aux bioaérosols fongiques repose le plus souvent sur le dénombrement et l'identification des spores par balayage systématique au microscope optique, après capture par la technique volumétrique utilisant un appareil de type Hirst. La méthode a fait la preuve de son efficacité et doit continuer à être privilégiée, mais un nombre important de spores ne présentent pas de spécificité suffisante pour pouvoir être identifiées sur les lames d'aérobiologie. D'où la nécessité de regroupements, en fonction de caractéristiques communes, dans différentes « catégories » : basidiospores*, ballistospores, urédiniospores ou rouilles, ascospores, *Aspergillaceæ*, etc. – ce qui entraîne une perte d'information qui peut s'avérer préjudiciable.

Un recensement plus précis, espèce* par espèce*, doit dès lors faire intervenir la mise en culture, après échantillonnage de l'air à contrôler. Mais, on l'a dit, cette approche dite « classique » présente de nombreuses limites, de nature biologique et opérationnelle.

En effet, l'efficacité des méthodes de culture dépend non seulement de la viabilité des organismes collectés, mais aussi et surtout de leur cultivabilité, c'est-à-dire de leur capacité à pousser sur un milieu gélosé plus ou moins spécifique, dans des conditions de température données, après un stress lié à leur collecte. Une fraction inconnue, mais sûrement importante, de la charge fongique transportée par l'air échappe donc au dénombrement, bien qu'elle ait conservé un potentiel allergène* ou toxique. De plus, même cultivables, les micromycètes* récoltés présentent de gros différentiels de croissance. Certains champignons à développement rapide peuvent, par exemple, masquer la présence de champignons à développement plus lent. Dans certains cas, la sécrétion de métabolites* toxiques dans le milieu de culture inhibe la croissance de compétiteurs. Enfin, beaucoup d'espèces étant transportées sous forme d'agglomérats, la croissance d'une colonie peut être associée à un nombre très variable de spores.

Sur le plan opérationnel, le délai de réponse dépend du temps nécessaire à la croissance des microorganismes, et peut donc être long. De plus, l'identification requiert une expertise malaisément transférable, ce qui implique des difficultés de reproductibilité d'un opérateur à l'autre. Enfin, étant incompatible avec l'automatisation, la méthode classique rend presque impossible le travail sur de grandes séries d'échantillons.

Une réflexion s'impose donc sur les perfectionnements qui pourraient être apportés.

Durant les deux dernières décennies, les techniques de détection et d'identification des micro-organismes faisant appel aux biotechnologies ont évolué, en parallèle avec de nouvelles méthodes d'échantillonnage d'air (Carvalho *et al.*, 2008). Le financement de la recherche en micro-aérobiologie* a en outre bénéficié du développement du marché de la « sécurité ». De nouvelles approches prometteuses ont en effet été mises au point pour la détection et l'identification, rapide et automatisée, des agents bactériens ou viraux du bioterrorisme. Ces méthodes peuvent être adaptées à la caractérisation des bioaérosols* fongiques, permettant ainsi d'obtenir des résultats plus rapides, plus spécifiques et compatibles avec l'automatisation et la standardisation des procédés.

Par ailleurs, si *Alternaria* et *Cladosporium* font désormais l'objet d'une attention soutenue, dans la mesure où leur potentiel allergisant n'est plus à démontrer, les investigations sont encore beaucoup trop fragmentaires concernant les autres moisissures. Un certain nombre d'entre elles mériteraient sans aucun doute des recherches plus poussées dans les années qui viennent.

- *Concept de seuil d'exposition*

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de données permettant, pour une espèce donnée de spores fongiques, de déterminer un seuil au-dessous duquel aucun effet sur la santé ne serait à redouter, que ce soit pour l'irritation, l'hypersensibilité* ou la réponse toxique, pas plus qu'il n'existe de liste de référence permettant d'évaluer le niveau de risque pour la santé selon une espèce donnée de spores. Pour évaluer la gravité de la contamination, les spécialistes utilisent des valeurs-guides empiriques, reposant sur le nombre de moisissures dans des échantillons d'air ou de poussière, ou encore la superficie des surfaces moisies visibles. Toutefois, des dissensions subsistent sur l'utilisation de ces valeurs-guides. Ainsi, le recours à des échantillons d'air, tels qu'on les pratique depuis une dizaine d'années, est de plus en plus critiqué. Les échantillons sont jugés peu fiables, car sujets à de très importantes variations inter-horaires. Certains préfèrent donc, pour estimer la quantité de moisissures dans l'air, analyser des échantillons de poussière prélevés dans la maison. Mais, à leur tour, d'autres jugent l'échantillonnage de poussière peu représentatif de la qualité de l'air ambiant. Il paraît donc urgent que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) propose un référentiel précis, qui fixe en particulier le seuil d'exposition « à risque » pour une variété donnée de spores. Sans doute une telle échelle de classification suscitera-t-elle des réserves, en l'état actuel des connaissances, mais en

s'imposant à tous, elle constituera un progrès et permettra une certaine gradation dans l'évaluation du risque sanitaire.

- *Mesures de prévention*

Dans sa séance du 31 janvier 2006, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France a émis un avis relatif aux contaminations fongiques dans les milieux intérieurs. Cet avis[66] se fonde sur les recommandations du bilan des connaissances effectué par les experts du groupe de travail « Moisissures dans l'habitat » (CSHPF, 2006). La première recommandation porte sur la standardisation des techniques utilisées par les laboratoires pour l'échantillonnage et l'analyse des moisissures dans l'habitat, en particulier :

- les modalités d'échantillonnage (de l'air, des surfaces, des poussières),
- les conditions de transport et de stockage des échantillons,
- les conditions des primocultures,
- les modes d'expression des résultats.

L'avis recommande aussi, afin de diminuer l'insalubrité par la prévention et le traitement des moisissures dans les milieux intérieurs, les trois actions suivantes :

1. compléter la grille d'évaluation de l'insalubrité d'un bâtiment ou d'un logement en y intégrant l'évaluation de la contamination fongique, en considérant au moins la superficie affectée et la localisation des moisissures par rapport à l'exposition potentielle des habitants ;
2. proposer aux personnels des structures amenées à effectuer des enquêtes environnementales dans l'habitat des formations portant sur la recherche des sources d'humidité, ainsi que sur les conduites à tenir pour le bon usage d'un logement et pour l'éviction des moisissures ;
3. mener des actions d'information auprès du public.

Afin d'améliorer le diagnostic des effets sur la santé des moisissures en milieux intérieurs, il est conseillé d'établir un questionnaire médical spécifique standardisé.

Afin de diminuer la gravité des effets éventuels pour les personnes à risque, trois suggestions sont faites :

1. développer une évaluation des risques sanitaires respiratoires à domicile, en prenant en compte la nature des espèces fongiques présentes ;
2. appliquer tout moyen approprié pour une éviction rapide des moisissures ;
3. mettre en œuvre une éducation sanitaire visant à promouvoir les mesures d'hygiène adéquates.

En dernier lieu, afin d'améliorer les connaissances relatives à l'exposition des populations aux moisissures, il est préconisé :

66. Cf. http://www.hcsp.fr/docspdf/cshpf/a_mv_310106_contamfongiques.pdf

1. d'engager des campagnes systématiques de mesurage (dénombrement et caractérisation des espèces présentes) des moisissures dans l'habitat ;
2. d'élargir les compétences du Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA) à la surveillance des moisissures de l'air extérieur, dans quelques grandes villes françaises.

L'ensemble de ces recommandations, émises en janvier 2006, reste valable cinq ans plus tard. Leur mise en œuvre demandera un effort soutenu de la part de l'ensemble des intervenants. Il s'agit là d'un effort de longue haleine, qui devra sans aucun doute être poursuivi pendant plusieurs décennies, même dans le cas où aucune modification significative du risque sanitaire associé aux moisissures ne devrait advenir, mais à plus forte raison si le changement climatique annoncé entraîne une modification qualitative ou quantitative de ce risque.

Deux lignes d'action supplémentaires pourraient d'ailleurs venir opportunément renforcer l'arsenal des préconisations du CSHPF.

En ce qui concerne l'habitat (Béguin et Nolard, 2004*b)*, il serait bon de réaliser au plus vite un bilan de l'impact éventuel de la généralisation des bâtiments passifs, de façon à pouvoir diffuser aux constructeurs et aux propriétaires une information spécifique, scientifiquement fondée.

Pour ce qui est de l'air atmosphérique (Cecchi *et al.*, 2010), les données aérobiologiques recueillies par le RNSA devraient être mises en relation avec l'ensemble des paramètres susceptibles d'agir sur les concentrations de spores fongiques (température, humidité relative, CO_2, modifications de l'affectation des sols…) aux lieux de prélèvement, de manière à pouvoir contribuer à la mise au point de modèles plus efficaces de prédiction des risques.

Conclusions et recommandations

En comparaison des pollens, il est sûr que les spores fongiques ont été peu étudiées sous l'angle de leur possible sensibilité au changement climatique (Beggs, 2010). L'une des raisons tient certainement au fait qu'un peu partout dans le monde, la surveillance en routine des moisissures reste très dispersée et que la plupart des séries disponibles sont trop courtes, et parfois trop discontinues, pour autoriser la détection d'une tendance. Une autre raison réside, à n'en point douter, dans la complexité des facteurs qui interagissent pour conditionner, à un moment donné, la concentration de spores fongiques en tel ou tel endroit (fig. 28).

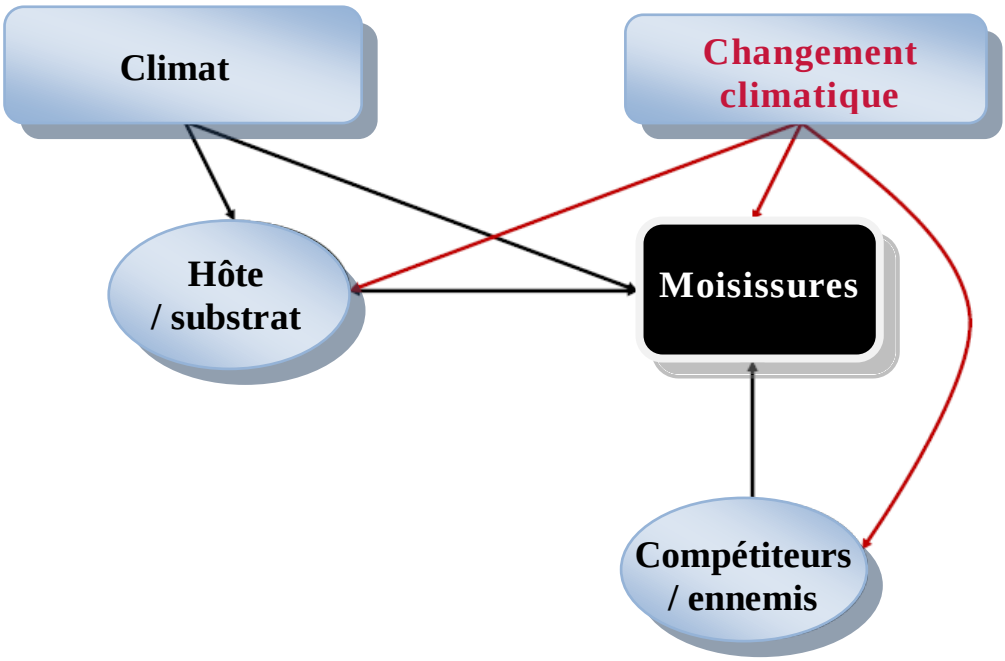


Fig. 28. – Interactions entre les moisissures, leurs hôtes ou substrats, leurs compétiteurs ou ennemis, l'influence directe du climat et celle du changement climatique.
D'ap. Gobakken (2010).

La comparaison de Cardiff et Derby (cf. *supra*, pp. 48-49) a bien montré que le type d'occupation du sol commandait beaucoup plus que le contexte climatique le niveau de contamination de l'atmosphère par *Alternaria*. Si un réchauffement apparaît susceptible de modifier la date de franchissement du seuil d'action clinique, les concentrations de spores fongiques ou la durée de la saison « à risque », cet impact direct ne doit pas être surestimé ; il reste en tout cas bien inférieur à celui constaté pour les pollens. Mais le même réchauffement peut exercer une influence indirecte considérable, par exemple

via une évolution du mode d'occupation des sols ou des pratiques culturales. Comme le pic d'*Alternaria* coïncide presque toujours et partout avec la période des moissons, toute modification du calendrier agricole se répercutera inévitablement sur la contamination fongique et, donc, sur le risque allergique (Corden *et al.*, 2003). Dans ces conditions, il doit être raisonnable d'affirmer que les effets indirects du changement climatique seront plus marqués que ses effets directs.

Une difficulté supplémentaire dans le cas des moisissures, par rapport à celui des pollens, est l'existence de très fréquentes interactions entre les contaminations *indoor* et *outdoor*, l'une et l'autre susceptibles d'être influencées par le changement climatique, mais pas nécessairement au même moment, ni dans la même proportion, et encore moins selon les mêmes modalités. Alors que le paramètre climatique le plus déterminant à l'extérieur est certainement l'évolution de la température, le rôle essentiel revient dans les locaux à l'humidité (Burge, 2002) ; l'exemple de Katrina a été de ce point de vue très éloquent.

Un glissement est d'ailleurs perceptible sur ce point dans la littérature scientifique. Il y a sept ans, tel auteur (Beggs, 2004) annonçait péremptoirement pour le XXIème siècle des concentrations atmosphériques croissantes de pollens et de moisissures, notamment en ce qui concerne les pollens et les moisissures allergisantes, mais aussi des « saisons à risque » plus précoces et plus longues, ainsi qu'une nouvelle géographie de la répartition des aéro-allergènes*, avec une translation généralisée vers le nord (dans l'hémisphère boréal) , vers le sud (dans l'hémisphère austral) ou, un peu partout, vers de plus hautes altitudes. Aujourd'hui, le même auteur (Beggs, 2010) défend une position beaucoup plus nuancée, en distinguant soigneusement pollens et spores fongiques, en insistant (surtout à propos des moisissures) sur la complexité du problème, sur l'importance des effets indirects et des interactions, enfin sur le fait que le changement climatique peut avoir des effets diamétralement opposés suivant le contexte et qu'il ne sera pas toujours le facteur d'évolution le plus décisif. Ce qui amène notre auteur à préconiser, plutôt qu'une lutte assez utopique contre le changement climatique, une longue série de mesures d'adaptation, déclinables à l'échelle locale et devant être engagées au plus vite dans la mesure où beaucoup ne feront sentir leurs effets qu'à long terme. Cela va de la surveillance en continu des teneurs atmosphériques en moisissures au développement de méthodes de prévision, en passant par un aménagement rural et urbain adapté, par le choix de modes d'occupation du sol minimisant la production de moisissures, par le choix d'options urbanistiques et architecturales innovantes, par un effort d'amélioration des modes de chauffage, de ventilation ou de climatisation, par un financement accru de la recherche et par la diffusion auprès du public le plus large possible d'informations soigneusement validées. On ne peut que souscrire à un tel programme, qui rejoint d'ailleurs celui esquissé plus sommairement par Kinney (2008).

La France métropolitaine est caractérisée aujourd'hui par une variété climatique bien supérieure à celle des pays voisins. Du domaine méditerranéen (à hivers doux et étés chauds et secs) aux espaces montagnards (froids et neigeux en hiver), des contrastes importants peuvent être perçus entre les

différentes régions. Cette variété climatique se reflète dans la grande variabilité spatio-temporelle de la dispersion des spores fongiques dans l'air, telle que la révèlent depuis 1999 les observations du RNSA (Thibaudon et Lachasse, 2006). Les caractéristiques locales de l'environnement, qu'il s'agisse du relief ou de l'occupation des sols à proximité des capteurs, jouent également un rôle important, qui devrait sans doute être mieux documenté. La mise en relation systématique des données aéro-mycologiques* recueillies par le RNSA avec les données météorologiques locales permettrait en outre de définir avec précision, à diverses échelles, quelles sont les variables climatiques ou météorologiques qui régissent la dispersion des spores atmosphériques, à chaque moment du cycle annuel. Cependant, il paraît illusoire d'imaginer qu'une connaissance même améliorée des situations locales permettra de réaliser des prévisions fiables sur la variation à venir des populations fongiques en relation avec les changements climatiques annoncés.

Parce que ces changements sont souvent perçus comme l'arrivée d'un climat plus chaud et (au moins dans certaines régions et/ou à certaines saisons) plus humide, l'aérobiologiste* pourrait intuitivement conclure à l'avènement de facteurs favorisant des concentrations plus élevées de spores fongiques dans l'air atmosphérique. Mais l'examen de la variabilité enregistrée jusqu'ici entre des régions aux climats très différenciés suggère qu'en réalité, le changement climatique n'aura vraisemblablement qu'un impact direct limité sur les taux de spores fongiques dans l'air atmosphérique. Les risques pour la santé associés au niveau d'exposition ne devraient donc pas s'accroître de façon trop préoccupante.

L'examen des données récoltées dans l'habitat suggère également que l'impact direct du changement climatique sur la qualité de l'air intérieur ne sera pas significatif. Pour l'air intérieur, ce sont des facteurs favorisants liés à la qualité architecturale, aux matériaux utilisés, à la qualité de l'infrastructure et au mode de vie qui jouent le premier rôle. Toutefois, et de façon quelque peu paradoxale, les mesures prises pour lutter contre le réchauffement climatique par la généralisation des bâtiments passifs pourraient s'avérer préjudiciables, si des précautions particulières ne sont pas prises pour assurer l'entretien adéquat à long terme des mécanismes d'assistance à la ventilation. La recherche de l'efficacité énergétique à tout prix des logements n'est peut-être pas totalement compatible avec l'aspiration à une réduction du risque d'allergies.

Une augmentation durable de la température et de l'humidité favorisant la contamination des plantes cultivables et des stocks de nourriture pourrait également avoir comme conséquence une recrudescence des mycotoxicoses* en France. Les mesures de contrôle sanitaire doivent donc être maintenues. Il conviendrait même de les renforcer si des études spécifiques concluent à une augmentation du risque.

Quoi qu'il en soit, à l'échelle de la France, il faut poursuivre et amplifier l'étude globale des paramètres de qualité de l'air combinant (liste non exhaustive !) O_3, CO, SO_2, PM_{10}, $PM_{2.5}$, aérosols* acides, pollens et spores fongiques, en fonction des données météorologiques et climatiques. Cette

étude se fera de préférence grâce à un réseau de capteurs distribués de façon aussi homogène que possible sur le territoire. Il sera idéalement complété par un archivage des échantillons aérobiologiques*, dans des conditions permettant la réalisation d'études prospectives à l'aide de nouveaux outils plus performants et de méthodes standardisées.

Un effort significatif devrait être soutenu par les agences de financement de la recherche, qu'elles soient nationales ou européennes. Cet effort devrait, nous semble-t-il, se concentrer sur trois axes principaux (tableau XI) :

- la surveillance en continu des teneurs atmosphériques en moisissures, avec une double réflexion sur les moisissures à prendre en compte et sur les perfectionnements techniques qui pourraient être apportés, notamment avec la conception de collecteurs d'air compatibles avec l'analyse de multiples paramètres chimiques et biologiques ;
- le développement de protocoles standardisés pour la caractérisation de la relation entre exposition aux spores fongiques de l'air et allergie ;
- la mise au point de modèles permettant de prédire le risque d'allergie fongique en fonction des paramètres de l'environnement.

Des synergies pourraient en outre être développées avec d'autres domaines de recherche en aérobiologie*, en particulier ceux qui bénéficient du financement de la recherche en « sécurité ».

« ... comment accorderait-on une confiance absolue à des projections (d'ailleurs multiples!), utilisant des données (plus ou moins discutables) extraites du contexte actuel (avec les simplifications de rigueur), et sans tenir compte (mais comment tenir compte?) de la longue série d'inconnues qui interviendront sans aucun doute dans la nature physique, et dans la technologie et le comportement humain ? Je suis prêt à parier que le monde de 2100 sera meilleur ou pire, mais à coup sûr ne ressemblera à aucun des scénarios actuels ... ».

Lucien Boia, *L'homme face au climat.* Paris : Les Belles Lettres 2004: 200.

Tableau XI. - Récapitulatif des principaux axes de recherche à développer ou à encourager.

Surveillance en continu des teneurs atmosphériques en moisissures	- Élargissement des **compétences du RNSA** à la surveillance mycologique de l'air extérieur. - Renforcement de la **densité du réseau de surveillance**, en veillant à une distribution aussi homogène que possible sur le territoire national et en évitant toute discontinuité, de façon à pouvoir disposer de séries longues. - Réflexion sur les **moisissures autres** que *Alternaria* et *Cladosporium* à prendre en compte (*Didymella* peut-être en priorité, puis éventuellement *Curvularia* et *Ganoderma*, ou *Epicoccum*, *Polythrincium* et *Stemphylium ???).* - Réflexion sur les perfectionnements qui pourraient être apportés aux **techniques de détection et d'identification** des principales espèces fongiques présentes dans l'air. - Développement de **collecteurs d'air** compatibles avec l'analyse de multiples paramètres chimiques et biologiques. - **Automatisation** et **standardisation** des procédés.
Développement de protocoles standardisés pour la caractérisation de la relation entre exposition aux spores fongiques de l'air et allergie	- Détermination du **seuil au-dessous duquel aucun effet sur la santé ne serait à redouter**, que ce soit pour l'irritation, l'hypersensibilité ou la réponse toxique. - Évaluation du **niveau de risque** de chaque espèce de spores. - Fixation du **seuil d'exposition « à risque »** pour une variété donnée de spores.
Prévision du risque d'allergie fongique en fonction des paramètres de l'environnement	- Développement et test de **modèles** permettant de prévoir le risque d'allergie fongique, à partir des paramètres météorologiques, de la pollution chimique, de facteurs anthropiques, etc.
Bilan de l'impact éventuel de la généralisation des bâtiments passifs	- Diffusion d'une information spécifique, scientifiquement fondée, auprès des constructeurs et des propriétaires.

Résumé étendu

Les **champignons*** constituent, aux côtés des animaux et des végétaux, l'un des trois règnes d'organismes vivants capables de différenciation cellulaire. Un peu plus de 70 000 espèces sont actuellement recensées. Cette diversité taxinomique* ne représente toutefois pas plus de 5% de l'ensemble de la biodiversité fongique* à l'échelle de la planète, qui dépasse probablement le million, voire le million et demi d'espèces*. La **diversité** des champignons* s'exprime aussi par leur caractère ubiquitaire* et par la grande variété de leurs habitats ; ils colonisent toutes les niches écologiques, y compris dans les biotopes extrêmes.

La plupart de ces champignons* se dispersent sous forme de **spores***, sexuées ou asexuées, et facilement aérosolisables*, qu'elles soient en suspension seules ou portées par des poussières contaminées. La dispersion de ces corpuscules est assurée dans plus de 98% des cas par le vent. Les spores* fongiques* aéroportées sont **dix à cent fois plus abondantes que ne l'est le pollen**, et elles constituent la part majoritaire des bioaérosols* présents aussi bien dans l'air atmosphérique que dans l'air intérieur. Toutefois, des filaments mycéliens* arrachés à leur substrat*, des particules de matériaux contaminés ou de la poussière contenant des fragments fongiques* déposées peuvent également être aéroportés. Enfin, des composés organiques volatils ou COV sont eux aussi libérés dans l'air, cette fois à l'état gazeux. Cependant, les données actuellement recueillies en routine ne concernent guère que les concentrations de spores* dans l'air, les méthodes les mieux acceptées consistant en la capture des spores*, suivie d'une identification, directe ou après mise en culture. Le paramètre essentiel pris en compte est donc la **concentration en spores* fongiques*,** rapportée à l'unité de volume d'air (spores/m^3). Aux latitudes moyennes et à l'extérieur, cette concentration tombe à des niveaux quasi nuls en hiver, alors qu'elle présente des pics souvent très proéminents en été.

Spores* et fragments mycéliens* en suspension dans l'air sont susceptibles d'entraîner des **effets nocifs** chez les individus exposés. Ils n'affectent pas la santé de l'ensemble, ni même de la majorité de la population : c'est seulement lorsque leur concentration atteint un niveau anormalement élevé et/ou chez des patients souffrant de problèmes respiratoires ou de déficiences du système immunitaire qu'apparaissent symptômes et maladies. Les pathologies concernées sont majoritairement **respiratoires**, mais assez souvent aussi cutanées et quelquefois autres. Différents mécanismes d'action peuvent être individualisés. Les effets sur la santé sont alors des réactions d'**hypersensibilité*** (largement prépondérantes), des mycotoxicoses*, des infections ou des irritations. La nature de la relation dose-réponse entre l'exposition aux moisissures* et l'effet sur la santé n'est pas encore connue avec précision, au moins espèce par espèce et pathologie par pathologie. L'existence d'un seuil d'exposition sécuritaire au-dessous duquel il n'y aurait pas de risque reste également controversée, surtout que les sensibilités individuelles sont très inégales. En revanche, il est prouvé que des expositions répétées ou prolongées augmentent les risques.

Trois à dix pour cent de la population mondiale souffriraient ainsi de réactions allergiques* dues aux moisissures. Environ 150 allergènes* fongiques* individuels ont été isolés, la plupart chez des espèces courantes dans l'air, et quelque 340 espèces de micro-champignons, notamment des genres *Aspergillus, Penicillium, Alternaria* et *Cladosporium,* ont été signalées comme allergéniques*.

La surveillance des **moisissures aéroportées** repose sur l'utilisation de capteurs volumétriques*, utilisés conjointement pour la surveillance des pollens. Deux taxons* sont systématiquement individualisés : *Alternaria* et *Cladosporium.*

Dans l'air extérieur, ***Alternaria*** constitue en moyenne 1,5% du total des spores* répertoriées sur l'année. La répartition temporelle montre une franche culmination au cours des mois de mai à novembre et, à l'intérieur de cette saison, en présence de températures de 25-28°C suivant une période de pluie. Le rythme journalier met en évidence un maximum habituel vers midi et en début d'après-midi. *Alternaria* est surtout à l'origine d'**allergies*** immédiates qui se manifestent par une rhinoconjonctivite estivale, dite « pseudo-pollinique », et par des asthmes sévères, y compris chez les enfants de moins de 10 ans. Des signes cliniques sont régulièrement notés à partir de concentrations atmosphériques de l'ordre de 100 spores/m^3. Le seuil de 500 spores/m^3, retenu de façon quelque peu empirique comme susceptible de déclencher des crises d'asthme aiguës chez les sujets les plus sensibles, est dépassé plusieurs fois par an dans plus de la moitié des sites. Le seuil des 1000 spores/m^3 est également utilisé ; c'est celui où la quasi-totalité des asthmatiques sensibilisés à *Alternaria* feraient une crise.

Cladosporium figure parmi les plus communes des moisissures d'intérieur et d'extérieur : il n'est pas rare qu'elle représente à elle seule plus de la moitié des spores fongiques aéroportées. La répartition dans le temps est proche de celle d'*Alternaria*, avec une culmination sur l'été ou l'automne, et une recrudescence entre la fin de la matinée et le milieu de l'après-midi. Elle est, plus qu'*Alternaria*, influencée par les conditions météorologiques (corrélation positive avec la température et l'humidité relative, négative avec la pluviosité). Par temps chaud et humide, les concentrations peuvent atteindre des **niveaux au moins dix fois supérieurs aux pics d'*Alternaria***. Malgré une certaine imprécision, le seuil d'action clinique, correspondant à l'apparition des premiers cas de rhinite, est souvent placé à 3 000 spores/m^3. Un autre seuil est parfois individualisé à 7 000 ou 8 000 spores/m^3, cette concentration étant interprétée comme susceptible de déclencher des crises d'asthme chez les sujets sensibilisés.

Quelques sites s'attachent en outre à la reconnaissance de ***Didymella***. Les spores peuvent être extrêmement nombreuses, particulièrement après la pluie, mais avec une énorme variabilité interannuelle et plus encore interjournalière, voire intrajournalière. On soupçonne tout ou partie des 363 espèces de *Didymella* d'être des causes importantes d'asthme en fin d'été et en automne.

Parce que le **changement climatique** attendu est souvent perçu comme l'arrivée d'un climat plus chaud et (au moins dans certaines régions et/ou à certaines saisons) plus humide, l'aérobiologiste* est intuitivement tenté de conclure à l'avènement de facteurs favorisant des concentrations plus élevées de spores fongiques dans l'air atmosphérique, mais aussi des « saisons à risque » plus précoces et plus

longues, ainsi qu'une nouvelle géographie de la répartition des aéro-allergènes*, avec une translation généralisée vers le nord (dans l'hémisphère boréal) , vers le sud (dans l'hémisphère austral) ou, un peu partout, vers de plus hautes altitudes. Mais il peut être intéressant de vérifier si l'évolution est déjà amorcée. Sur la période 1985-2010, et par-delà une assez forte variabilité interannuelle, les concentrations de *Cladosporium* sont restées relativement stables en moyenne européenne, où le millésime rend compte de moins de 4% de la variance totale, ce qui peut être considéré comme négligeable. Pour *Alternaria*, la tendance à la hausse est plus nette, à défaut d'être forte, avec une variance « expliquée » à un peu plus de 13% par l'évolution chronologique, donc – du moins peut-on le supposer – par l'évolution du climat. Encore ces résultats très généraux, obtenus à l'issue d'un calcul intégrant de 20 à 40 stations disséminées sur un espace très vaste et climatiquement hétérogène, ne sont-ils pas toujours corroborés à une échelle plus fine. C'est ainsi que les données françaises, sur les années 1999-2010, font état d'évolutions positives pour les deux taxons, la seule prise en compte de l'année rendant compte de près de 20% de la variance totale pour *Alternaria* et de plus de 74% pour *Cladosporium*, dont la concentration moyenne « nationale » serait passée de moins de 100 000 spores/m^3 en 1999 à près de 500 000 en 2010.

On se gardera néanmoins d'en tirer des interprétations trop hâtives. En effet, la dispersion des moisissures allergisantes présente une **grande variabilité**, à la fois d'un site à l'autre, d'une année à l'autre et d'un taxon à l'autre. En outre, la **brièveté** des séries exploitées n'autorise aucune conclusion définitive : le poids d'une année exceptionnelle y est excessif au point que, suivant que celle-ci se place au début ou à la fin de la série analysée, elle peut inverser la tendance. En troisième lieu, des différences importantes sont souvent décelées **au sein d'une même région climatique** ; inversement, un territoire aussi contrasté sur le plan climatique que celui des États-Unis n'en présente pas moins une relative homogénéité des concentrations en spores, sans différence significative par exemple entre le climat subtropical de la Floride et le climat continental humide du Massachussetts. Enfin, si elle constitue une solution de facilité, l'imputation au changement climatique de toutes les tendances observées résiste rarement à un examen attentif : le **mode d'occupation des sols** et les **pratiques culturales** commandent beaucoup plus que le contexte climatique le niveau de contamination de l'atmosphère.

Le changement climatique « global » ne devrait donc avoir qu'un impact direct assez limité sur les taux de spores fongiques **dans l'air atmosphérique** : s'il majore les risques en un endroit ou pour une espèce donnée, il peut tout aussi bien les minorer ailleurs ou pour une autre espèce. L'examen des données récoltées **dans l'habitat** suggère également que l'impact direct du changement climatique sur la qualité de l'air intérieur ne sera pas significatif. Ce sont alors des facteurs liés à la qualité architecturale, aux matériaux utilisés, à la qualité de l'infrastructure et au mode de vie qui jouent le premier rôle. Toutefois, et de façon quelque peu paradoxale, les mesures prises pour lutter contre le réchauffement climatique par la **généralisation des bâtiments passifs** pourraient s'avérer préjudiciables, si des précautions ne sont pas prises pour assurer l'entretien adéquat à long terme des mécanismes d'assistance à la ventilation. Toute panne du système de ventilation dans une maison étanche amène en effet un développement fulgurant des moisissures. En outre, les gaines y sont des réceptacles difficiles à nettoyer. Un tel type de bâtiment n'est donc pas anodin pour les asthmatiques et autres allergiques aux spores* fongiques*. La recherche de l'efficacité énergétique à tout prix des logements n'est peut-être pas totalement compatible avec l'aspiration à une réduction du risque d'allergies. Il est donc primordial que les

propriétaires de bâtiments passifs soient clairement informés de la nécessité d'entretenir correctement les systèmes de ventilation et qu'ils prévoient les budgets de fonctionnement nécessaires.

Une augmentation durable de la température et de l'humidité favorisant la contamination des plantes cultivables et des stocks de nourriture pourrait également avoir comme conséquence une recrudescence des **mycotoxicoses***. Les mesures de contrôle sanitaire doivent donc être maintenues. Il conviendrait même de les renforcer si des études spécifiques concluent à une augmentation du risque.

Dans ces conditions, il paraît raisonnable de considérer que **les effets indirects du changement climatique sur la distribution des spores fongiques seront plus marqués que ses effets directs**.

Mais le changement climatique annoncé peut également se traduire par un renforcement des **événements extrêmes**, à faible probabilité d'occurrence mais à conséquences redoutables sur les systèmes écologiques et sociaux, y compris sanitaires, qu'ils impactent. La France métropolitaine ne figure pas parmi les pays les plus concernés, mais elle n'est pas pour autant à l'abri. Trois exemples de paroxysmes météorologiques, invoqués comme susceptibles de majorer le risque d'allergies aux spores fongiques, ont été plus spécialement développés :

- les **orages**, ou du moins certains orages qui, en quelques heures, multiplient par cinq ou par dix le nombre des hospitalisations pour asthme chez l'enfant ou, plus rarement, chez l'adulte ; même si le mécanisme sous-jacent n'est toujours pas parfaitement élucidé et s'il est vraisemblable qu'intervient une conjonction de plusieurs facteurs, le phénomène de *« thunderstorm associated asthma »* semble bien devoir être mis en relation avec une élévation brutale de la concentration de spores fongiques dans l'air, les plus incriminées étant alors *Didymella, Cladosporium* et des fragments d'*Alternaria* ; si le changement climatique accroît la fréquence et/ou l'intensité des orages, il y a lieu de redouter une augmentation du risque de sévères crises d'asthme chez les allergiques aux spores fongiques.

- les **inondations**, surtout lorsqu'elles sont dues aux pluies diluviennes déversées par les **cyclones tropicaux**, comme l'ont montré dans la zone métropolitaine de La Nouvelle-Orléans le passage des ouragans Katrina (fin août 2005) et Rita (mi-septembre 2005), avec des augmentations spectaculaires des concentrations de spores fongiques, à l'extérieur comme à l'intérieur des locaux ; le bilan sanitaire de cette *mold invasion* reste controversé, mais plusieurs études font état de toux persistantes, dues au moins en partie à la présence en quantités très élevées de moisissures dans l'air respiré ; surtout, depuis 2005, l'incidence de l'asthme est en progression régulière à La Nouvelle-Orléans, notamment dans les quartiers où les inondations ont été les plus fortes ou les plus prolongées... Or, les projections climatiques font état d'un probable renforcement des fortes précipitations, principalement dans les climats tempérés, et d'une augmentation de l'activité cyclonique aux basses latitudes.

- et les énormes **nuages de sable ou de poussière** issus notamment des déserts du Sahara, de Gobi et de Taklimakan ; la qualité de l'air se trouve alors altérée, non seulement sur la majeure partie des continents africain et asiatique, mais aussi en Europe et sur les Amériques où, le jour même de l'arrivée de ces météores, les concentrations de spores présentent un pic significatif dans l'air extérieur, souvent suivi d'un autre quelques jours plus tard dans les bâtiments, avec une franche répercussion sur la prévalence des allergies*.

En dernier lieu, un **effet direct de la hausse des gaz à effet de serre*** ne peut pas être écarté. On sait que le CO_2 agit directement sur la croissance végétale puisque, sous l'effet du rayonnement solaire, la photosynthèse produit du glucose à partir du mélange du gaz carbonique et de l'eau. Non seulement les plantes se développent alors plus vite, mais les *Alternaria* croissant sur ces plantes enrichies en CO_2 produisent presque trois fois plus de spores et leur contenu en allergènes* est presque doublé. Finalement, le taux de CO_2 rend compte de 9% de la variabilité de la sporulation par pied de fléole des prés et de 15% de l'allergénicité* de ces spores. Il y a là un motif sérieux d'inquiétude quant au risque de recrudescence des allergies saisonnières à *Alternaria*. Le paramètre CO_2 viendrait alors compléter les paramètres physiques de température et d'humidité relative déjà cités comme facteurs susceptibles de favoriser la prolifération des moisissures.

Il est sûr que les spores fongiques ont été **peu étudiées** sous l'angle de leur possible sensibilité au changement climatique. L'une des raisons tient au fait qu'un peu partout dans le monde, la surveillance en routine des moisissures reste très dispersée et que la plupart des séries disponibles sont trop courtes, et parfois trop discontinues, pour autoriser la détection d'une tendance. Une autre raison réside, à n'en point douter, dans la complexité des facteurs qui interagissent pour conditionner, à un moment donné, la concentration de spores fongiques en tel ou tel endroit. Une difficulté supplémentaire est l'existence de fréquentes interactions entre les contaminations *indoor* et *outdoor*, l'une et l'autre susceptibles d'être influencées par le changement climatique, mais pas nécessairement au même moment, ni dans la même proportion, et encore moins selon les mêmes modalités. Alors que le paramètre climatique le plus déterminant à l'extérieur est certainement l'évolution de la température, le rôle essentiel revient dans les locaux à l'humidité.

Quelques **recommandations majeures** peuvent être formulées.

La première concerne la **surveillance en continu des teneurs atmosphériques en moisissures**, ce qui implique d'élargir les **compétences du RNSA** à la surveillance mycologique de l'air extérieur. Il conviendrait ainsi de renforcer la **densité du réseau de surveillance**, en veillant à une distribution aussi homogène que possible sur le territoire national et en évitant toute discontinuité, de façon à pouvoir disposer de séries longues. Mais, si *Alternaria* et *Cladosporium* font désormais l'objet d'une attention soutenue, dans la mesure où leur potentiel allergisant n'est plus à démontrer, les investigations sont encore fragmentaires concernant les **autres moisissures** ; un certain nombre d'entre elles mériteraient sans aucun doute des recherches plus poussées dans les années qui viennent (*Didymella* peut-être en priorité, puis éventuellement *Curvularia* et *Ganoderma*, ou *Epicoccum*, *Polythrincium* et *Stemphylium* ; une réflexion approfondie s'impose avant tout choix). Par ailleurs, la méthode de dénombrement et de caractérisation des espèces présentes, qui repose sur un balayage systématique au microscope optique après capture des spores par la technique volumétrique utilisant un appareil de type Hirst, a fait la preuve de son efficacité et doit continuer à être privilégiée. Mais il ne faut pas dissimuler qu'un nombre important de spores ne présentent pas de spécificité suffisante pour pouvoir être identifiées sur les lames d'aérobiologie. C'est, entre autres, le cas des *Aspergillaceæ*. La mise en culture, après échantillonnage de l'air à contrôler, présente elle-même de nombreuses limites, de nature biologique et opérationnelle. Une réflexion s'impose donc sur les perfectionnements

qui pourraient être apportés, ainsi que sur le développement de collecteurs d'air compatibles avec l'analyse de multiples paramètres chimiques et biologiques. Or, durant les deux dernières décennies, les **techniques de détection et d'identification des microorganismes** faisant appel aux biotechnologies ont évolué, en parallèle avec de nouvelles méthodes d'échantillonnage d'air. Le financement de la recherche en aérobiologie* a en outre bénéficié du développement du marché de la « sécurité ». De nouvelles approches prometteuses ont été mises au point pour la détection et l'identification, rapide et automatisée, des agents bactériens ou viraux du bioterrorisme. Ces méthodes peuvent être adaptées à la caractérisation des bioaérosols* fongiques, permettant ainsi d'obtenir des résultats plus rapides, plus spécifiques et compatibles avec l'automatisation et la standardisation des procédés.

La deuxième recommandation porte sur le développement de protocoles standardisés pour la caractérisation de la **relation entre exposition aux spores fongiques de l'air et allergie**. Il faut en effet rappeler qu'il n'existe, à l'heure actuelle, que des données très approximatives pour **déterminer le seuil** au-dessous duquel aucun effet sur la santé ne serait à redouter, que ce soit pour l'irritation, l'hypersensibilité* ou la réponse toxique. Il n'existe pas non plus de liste de référence permettant d'**évaluer le niveau de risque** de chaque espèce de spores. Ce sont pourtant là des informations indispensables. Il paraît donc urgent que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) propose un **référentiel précis**, qui fixe en particulier le seuil d'exposition « à risque » pour une variété donnée de spores. Sans doute, en l'état actuel des connaissances, une telle échelle suscitera-t-elle des réserves mais, en s'imposant à tous, elle constituera un progrès et permettra une certaine gradation dans l'évaluation du risque sanitaire.

Une troisième recommandation, dont la mise en œuvre suppose que les deux précédentes aient été largement suivies d'effet, vise le développement de modèles permettant de **prédire le risque d'allergie fongique** en fonction des paramètres de l'environnement.

Enfin, en ce qui concerne l'habitat, il serait bon de réaliser au plus vite un **bilan de l'impact éventuel de la généralisation des bâtiments passifs**, de façon à pouvoir diffuser aux constructeurs et aux propriétaires une information spécifique, scientifiquement fondée.

Assurément, la mise en œuvre de l'ensemble de ces recommandations demandera un **effort soutenu** de la part de l'ensemble des intervenants, à commencer par les agences de financement de la recherche, qu'elles soient nationales ou européennes. Il s'agit là d'un effort de longue haleine, qui devra sans aucun doute être poursuivi pendant plusieurs décennies, même dans le cas où aucune modification significative du risque sanitaire associé aux moisissures ne devrait advenir, mais à plus forte raison si le changement climatique annoncé entraîne une **modification qualitative ou quantitative de ce risque**.

Glossaire

Tous les termes suivis d'un astérisque (*) dans le texte sont définis ici.

Certains termes peuvent avoir des acceptions multiples ;
ne sont retenues que celles qui ont été utilisées dans le présent rapport.

Actinomycète : champignon* microscopique ressemblant à des bactéries filamenteuses ramifiées (du grec *actis* : rayon, et *muké* : champignon).

aérobiologie : partie de la biologie spécialisée dans l'étude des microorganismes de l'atmosphère (du grec *aêr* : air, *bios* : vie, et *logos* : discours).

aérobiologiste : spécialiste d'aérobiologie*.

aéromycologie : étude des spores* de moisissures* présentes dans l'air.

aéromycologique : relatif aux spores* de moisissures* présentes dans l'air.

aérosol : ensemble de très fines particules solides et/ou liquides en suspension dans un milieu gazeux, notamment dans l'air.

aérosolisable : libérable dans l'atmosphère, pour constituer un aérosol*.

aflatoxine : mycotoxine* produite par des champignons* proliférant sur des graines conservées en atmosphère chaude et humide ; elle possède un pouvoir carcinogène* élevé.

alcaloïde : substance organique azotée d'origine végétale, à caractère alcalin (contraire d'acide), présentant une structure complexe et exerçant sur les organismes une action puissante, le plus souvent toxique (de l'arabe *al kali* : potasse, et du grec *eidos* : forme).

allergène : substance qui, suite à un contact, une infection, une ingestion ou une inhalation, déclenche ou favorise l'allergie*, le terme étant pris ici dans le sens d'augmentation de la sensibilité.

allergénicité : capacité que possède une substance de provoquer une réaction allergique*.

allergénique : qui provoque ou favorise une réaction allergique*.

allergie : réaction problématique du système immunitaire chez certains sujets, lesquels manifestent une hypersensibilité* à l'égard de cette substance ; l'allergie met en jeu plusieurs anticorps*, dont l'immunoglobuline E (IgE) ; en présence de l'allergène*, l'anticorps* déclenche la libération de médiateurs toxiques qui causent la réaction allergique* (du grec *allos* : autre, et *ergon* : réaction).

allergique : qui se rapporte à l'allergie*, ou qui réagit en développant une allergie*.

alvéolite* : inflammation des alvéoles pulmonaires.

anémogame : qualifie une plante pollinisée par le vent (du grec *anemos* : vent, et *gamos* : mariage, union).

anticorps : protéine complexe de la famille des immunoglobulines, utilisée par le système immunitaire pour détecter et neutraliser les agents pathogènes de manière spécifique.

antigène : substance complexe de nature protéinique qui, étrangère à un organisme donné, y induit la formation d'anticorps* spécifiques.

Ascomycète : champignon* chez lequel les spores* se forment dans des asques* (du grec *askos* : outre, et *muké* : champignon).

asque : cellule reproductrice à l'intérieur de laquelle sont produites les spores*, chez les Ascomycètes* (du grec *askos* : outre).

atopie : prédisposition génétique à présenter des manifestations cliniques d'allergie* au contact d'allergènes* banals, inoffensifs pour des sujets « normaux » (du grec *a-* : sans, et *topos* : lieu).

atopique : relatif à l'atopie*.

balle fongique : amas de spores* fongiques* obstruant les cavités nasosinusiennes.

baside : cellule reproductrice au sommet de laquelle sont produites les spores*, chez les Basidiomycètes* (du grec *basis* : base).

Basidiomycète : champignon* dont les spores* se forment dans des basides* (du grec *basis* : base, et *muké* : champignon).

basidiospore : spore* fongique* sexuée, née sur une baside*, caractéristique des Basidiomycètes*.

bioaérosol : ensemble de particules aéroportées constituées de microorganismes vivants (bactéries, pollens, spores de moisissures, virus, protozoaires, …), ou provenant d'organismes vivants (toxines, microorganismes morts, fragments de microorganismes…).

biotrophe : synonyme de parasite* ; fixé sur un organisme vivant et vivant à ses dépens, sans entraîner sa mort (du grec *bios* : vie, et *trophê* : nourriture).

biotrophie : synonyme de parasitisme* ; modalité d'alimentation des organismes biotrophes*.

carcinogène : synonyme de cancérigène ou cancérogène ; susceptible de provoquer le développement d'un cancer.

champignon : synonyme de mycète* ; les champignons ne sont pas des plantes, mais forment un règne à part entière ; autrefois classés avec les algues parmi les végétaux « sans rameaux feuillés », non chlorophylliens, dépourvus de tiges, de feuilles et de racines, ils constituent à présent un règne autonome, le cinquième règne ou règne fongique *.

chitine : substance organique azotée qui constitue le principal élément de la cuticule des insectes, des araignées et des crustacés, et qui est aussi un constituant essentiel de la paroi latérale qui entoure et protège les cellules fongiques* vis-à-vis de l'environnement (du grec *khitôn* : tunique).

chitineux : qui est formé de chitine*.

clairance : capacité d'un tissu, d'un organe ou d'un organisme à éliminer d'un fluide (sang, lymphe, etc.) une substance donnée (de l'anglais *clearance* : enlèvement, débarras).

complément : ensemble complexe de protéines circulantes ou membranaires du sang, principalement sécrétées par le foie et faisant partie de l'immunité innée ; le système du complément joue un rôle essentiel dans les réactions immunologiques de défense de l'organisme, par ses propriétés neutralisantes et destructrices.

conidie : spore* fongique* qui permet la reproduction asexuée (du grec *konis* : poussière, et *eidos* : apparence).

cosmopolite : quasi synonyme de ubiquitaire* et de ubiquiste* ; qui s'accommode de tous les pays.

cytokine : médiateur synthétisée par les cellules du système immunitaire ou par d'autres cellules et/ou tissus, agissant à distance sur d'autres cellules pour en réguler l'activité et la fonction (du grec *cyto* : cellule, et *kinos* : mouvement).

cytoplasme : contenu d'une cellule vivante, à l'exclusion de son noyau.

débourrement : moment de l'année où les bourgeons végétatifs et floraux des arbres se développent pour laisser apparaître leurs feuilles et leurs fleurs ; on dit aussi débourrage.

Dermatophyte : champignon* microscopique filamenteux responsable d'une mycose* cutanée (du grec *derma* : peau, et *phuton* : plante).

Deutéromycète : « champignon* imparfait » qui ne présente pas de forme de reproduction sexuée connue ou naturellement observable ; il ne s'agit pas d'un groupement naturel, mais d'un ensemble hétérogène et artificiel rapprochant des champignons* (peut-être 20 000) appartenant à des « classes » variées, sur l'unique base de l'absence de reproduction sexuée visible ; cette catégorie n'est plus reconnue en tant que division autonome.

diamètre médian massique : diamètre pour lequel 50% de la masse totale des particules constituant l'aérosol* est de taille supérieure et 50% de taille inférieure.

échinulé : hérissé de petites épines ou de petits tubercules (du grec *ékhinos* : hérisson).

effet de serre : processus thermique naturel, où l'atmosphère laisse passer une partie du rayonnement solaire qui vient frapper le sol ; réchauffé, celui-ci émet un rayonnement infrarouge qui est en partie piégé par l'atmosphère rendue « imperméable » par la présence de gaz dont principalement la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone CO_2 et le méthane CH_4 ; il y a alors une isolation accrue de la planète et un réchauffement général de celle-ci ; cet effet a été ainsi nommé par analogie avec la pratique en culture et jardinerie de construire des serres, espaces clos dont une ou plusieurs faces sont transparentes, laissant passer le rayonnement du soleil et le retenant prisonnier à l'intérieur.

ergostérol : constituant de la membrane cellulaire d'un grand nombre de parasites végétaux et de champignons* microscopiques ; son dosage dans l'air permet d'appréhender le niveau de contamination fongique* des environnements intérieurs.

espèce : population ou ensemble de populations dont les individus peuvent effectivement ou potentiellement se reproduire entre eux et engendrer une descendance viable et féconde, dans des conditions naturelles ; l'espèce est le taxon* de base de la systématique* (du latin *species* : type, apparence).

eucaryote : organisme vivant dont les cellules possèdent un « vrai » noyau isolé du cytoplasme* par une membrane, noyau entouré d'une enveloppe et dont l'ADN est porté par des chromosomes ; les eucaryotes s'opposent aux procaryotes (bactéries, archées) dont la structure cellulaire ne comporte pas de noyau (du grec *eu* : bien, et *karuon* : noyau).

fibrose : formation pathologique de tissu fibreux.

flagelle : filament mobile (du latin *flagellum* : fouet).

fongique : qui se rapporte aux champignons* [du latin *fungus* = champignon].

glucane : polymère du glucose, qui fait partie de la membrane cellulaire de la majorité des moisissures et qui peut être associé à des molécules de chitine* ; ces sucres complexes, de haut poids moléculaire, sont dans certains cas susceptibles d'entraîner des effets immunogènes, tout en stimulant la fonction des macrophages* ; les glucanes sont impliqués dans les processus inflammatoires, notamment au niveau bronchique.

granulomateux : ayant l'apparence de granulomes, de tissus fortement vascularisés dans un tissu œdémateux.

hétérotrophe : qualifie un organisme dépourvu de pigments chlorophylliens, incapable de synthétiser sa matière organique à partir d'eau, de CO_2 et d'énergie ; les champignons* assurent ainsi leur subsistance en exploitant l'énergie provenant de la dégradation de la matière organique élaborée par d'autres êtres vivants (du grec *heteros* : autre, et *trophê* : nourriture).

hôte : organisme (plante, animal ou champignon*) servant de support et de nourriture à un parasite*.

hyalin : transparent comme le verre, ou presque (du grec *hyalos* : pierre transparente).

hygrophile : qui a besoin de beaucoup d'humidité pour se développer (du grec *ugros* : humide, et *philos* : ami).

hygroscopique : qui a tendance à absorber l'humidité, ou relatif à la quantité d'eau contenue dans l'air (du grec *ugros* : humide, et *skopeîn* : observer, examiner).

hypersensibilité : réaction d'un organisme présentant des manifestations « anormales », pathologiques, à l'occasion de la rencontre entre un antigène* et un anticorps*.

immunogène : capable de provoquer la formation d'anticorps* ou d'induire une réaction d'hypersensibilité* retardée.

immunoglobuline : protéine jouant un rôle essentiel dans la défense de l'organisme contre les agressions.

leucopénie : diminution globale des globules blancs (du grec *leukos* : blanc, et *pénia* : pauvreté).

levure : champignon* microscopique, le plus souvent isolé sous forme unicellulaire, qui se multiplie par bourgeonnement et occasionnellement par sporulation*, et qui est capable de provoquer la fermentation des matières organiques animales ou végétales.

lichénique : type de symbiose* associant un champignon* à un partenaire chlorophyllien microscopique, comme une algue ou une cyanobactérie.

lymphocyte : variété de globules blancs qui ont un rôle majeur dans le système immunitaire.

macrophage : cellule de grande taille, très mobile, d'origine sanguine, qui provient de la différenciation de certains globules blancs, les monocytes, et infiltre les tissus ; le macrophage a la propriété d'absorber et de détruire de grosses particules, comme une cellule lésée ou vieillie, mais aussi des éléments étrangers (bactéries, virus, champignons…) par un procédé appelé phagocytose ; il participe ainsi à la défense de l'organisme (du grec *makros* : grand, gros, et *phagein* : manger).

mérule : « champignon des maisons » qui, sur un support suffisamment humide et contenant du bois, prend l'aspect d'un feutrage blanc, épais et cotonneux.

métabolite : produit de la transformation biochimique d'une molécule ou d'une substance, au cours de son utilisation dans l'organisme.

métabolite secondaire : composé que produisent les microorganismes (bactéries, champignons*...) lorsque leur milieu de culture s'appauvrit en éléments nécessaires à leur croissance et, donc, lorsqu'ils entrent dans une phase décroissante de développement ; ce composé est souvent toxique.

moisissure : champignon* microscopique qui intéresse l'économie et l'environnement humains, de façon bénéfique ou néfaste ; le terme n'a pas réellement de signification systématique.

mucine : substance transparente, visqueuse, ne se coagulant pas par la chaleur, élaborée par les cellules des muqueuses et s'accumulant dans leur intervalle.

Mucor : moisissure* commune souvent saprophyte*, qui ne peut actuellement être rattachée à aucun embranchement mais dont on pense qu'à l'avenir, elle pourra être incluse dans un embranchement des Zygomycètes* redéfini ; incapable de dégrader la cellulose, mais assimilant bien les sucres, le Mucor se retrouve fréquemment comme agent d'altération des aliments.

mutagène : qui change le génome, en général l'ADN, d'un organisme et élève ainsi le nombre de mutations génétiques au-dessus du taux naturel.

mycélien : en rapport avec les champignons* et moisissures*.

mycélium : partie végétative du champignon*, se présentant sous la forme d'un ensemble de filaments ramifiés et enchevêtrés provenant des spores*.

mycète : synonyme de champignon* (du grec *muké* : champignon).

mycologie : partie de la botanique consacrée à l'étude des champignons* (du grec *muké* : champignon, et *logos* : discours).

mycose : nom générique donné à toutes les affections parasitaires provoquées par des champignons*.

mycosique : qui se rapporte à une mycose*.

mycotique : lié aux champignons*.

mycotoxine : toxine* sécrétée par un champignon* microscopique, susceptible de contaminer des denrées alimentaires et de provoquer des intoxications (du grec *muké* : champignon, et *toxikon*, poison).

mycotoxicose : intoxication due à une mycotoxine*.

mycorhizique : type de symbiose* associant un champignon à un partenaire chlorophyllien macroscopique, comme une racine de plante.

nécrotrophe : synonyme de saprophyte* ; se dit d'un organisme qui puise ses ressources alimentaires dans des matières organiques mortes, décomposées ou non (u grec *nékros* : mort, cadavre, et *trophê* : nourriture)**.**

nécrotrophie : synonyme de saprophytisme* ; modalité d'alimentation des organismes nécrotrophes*.

opportuniste : se dit d'une infection due à des germes habituellement peu agressifs mais qui sont susceptibles de provoquer de graves complications en affectant des personnes ayant un système immunitaire très affaibli (du latin *opportunus* : profitable).

parasite : organisme fixé à un hôte*, et s'en nourrissant, sans avantage pour l'hôte* (du grec *para* : auprès, et *sitos* : nourriture).

parasitisme : synonyme de biotrophie* ; modalité d'alimentation des organismes parasites*.

phylum : lignée évolutive, embranchement.

pneumopathie : nom générique de toutes les affections du poumon (du grec *pneumôn* : poumon, et *pathê* : affection).

point de rosée : température à laquelle la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air est égale à sa pression de vapeur saturante ; plus l'air est sec, plus la différence de température entre l'air et le point de rosée est grande ; plus l'air est humide, plus cet écart est faible.

prick-test : test explorant la réaction allergique impliquant les immunoglobulines IgE ; il consiste à piquer dans l'épiderme à travers une goutte de solution d'allergène et à observer la réponse d'hypersensibilité immédiate, qui se manifeste par un prurit, un érythème, une papule ou l'apparition d'un anneau rougeâtre ; le prick-test constitue une bonne méthode de diagnostic (de l'anglais *prick* : piqûre d'aiguille, et *test* : épreuve).

saprophyte : synonyme de nécrotrophe* ; on dit parfois aussi saprotrophe (du grec *sapros* : pourri, et *phuton* plante).

saprophytisme : synonyme de nécrotrophie* (du grec *sapros* : pourri, et *phuton* plante).

spore : cellule formée lors de la reproduction sexuée du champignon*, afin de disséminer l'espèce : les spores sont formées sur la partie fertile du champignon* *(hyménium)*, à partir de cellules spécialisées (basides* ou asques*) (du grec *sporá* : ensemencement).

sporophore : tout organe qui porte des spores*, sous diverses formes, et permet la reproduction.

sporulation : formation et la libération de spores*.

sporuler : produire des spores*.

substrat : désigne la matière à laquelle le champignon* adhère et dont il se nourrit (humus, litière, feuille, plante vivante ou morte, excrément, etc.).

symbiose : relation intime entre deux organismes, dont chaque partenaire retire un bénéfice ; l'association ainsi constituée permet généralement au couple d'occuper des milieux où chacun des organismes ne pourrait pas se maintenir ou proliférer seul (du grec *sun* : avec, et *bios* : vie).

systématique : en sciences de la vie et en histoire naturelle, science qui a pour objet de dénombrer et de classer les taxons* dans un certain ordre, basé sur des principes divers.

systémique : se dit d'une infection diffuse, touchant généralement plusieurs organes, s'exprimant par divers symptômes, et dont l'origine reste au moins en partie inconnue.

taxon : unité de la classification dans le monde vivant, dont la hiérarchisation constitue la systématique* ; le taxon de base du système est l'espèce*.

taxinomie : science qui a pour objet de décrire les organismes vivants et de les regrouper en entités appelées taxons* afin de les identifier, puis de les nommer, et enfin de les classer ; on dit aussi taxonomie (du grec *taxis* : placement, classement, ordre, et *nomos* : loi, règle).

taxinomique : relatif à la taxinomie* ; on dit aussi taxonomique.

tératogène : qui provoque des malformations ou des monstruosités (du grec *teras* : monstre, et *genos* : origine).

thermophile : qui pousse préférentiellement dans les lieux ou les régions chaudes (du grec *thermê* : chaleur, et *philein :* aimer).

toxine : poison, généralement soluble, sécrété par un être vivant (du grec *toxikon* : poison).

toxinogène : produisant des toxines.

tricothécène : mycotoxine* sécrétée par certaines espèces de champignons* du sol pouvant devenir des parasites de végétaux en y produisant une maladie dite fusariose, qui peut avoir des effets sur la santé des animaux d'élevage et des humains.

ubiquiste : synonyme de ubiquitaire* et de cosmopolite* ; capable de pousser dans des biotopes très variés (du latin *ubique* : partout).

ubiquitaire : synonyme de ubiquiste* et de cosmopolite* (du latin *ubique* : partout).

unité formant colonie : en abrégé UFC, unité de mesure utilisée en microbiologie pour exprimer la quantité de microorganismes présents dans un échantillon ; plus précisément, il s'agit ici de mesurer le nombre de colonies apparaissant sur une gélose, qui est un milieu nutritif sans inhibiteurs, dont l'intérêt est de favoriser le développement à 30°C de tous les microorganismes que l'on y a déposés ; on admet que chaque colonie est issue d'une spore qui a germé ; plus le nombre d'UFC est élevé, plus la contamination mycotique est forte.

volumétrique : se dit d'un capteur permettant de rapporter le contenu particulaire de l'air à l'unité de volume d'air.

Zygomycète : champignon*, souvent de taille microscopique, à spores* dépourvues de flagelles*, caractérisé par une abondante reproduction asexuée et une croissance rapide.

Références

Åberg N., Hesselmar B., Åberg B., Eriksson B. Increase of asthma, allergic rhinitis and eczema in Swedish schoolchildren between 1979 and 1991. *Clin Exp Allergy* 1995; 25(9): 815-819.

Åberg N., Sundell J., Eriksson B., Hesselmar B., Åberg B. Prevalence of allergic diseases in schoolchildren in relation to family history, upper respiratory infections, and residential characteristics. *Allergy* 1996; 51(4): 232-237.

Anderson W., Preston G.J., Packham S., Mullins J., Brookes M., Seaton A. Asthma admissions and thunderstorms: a study of pollen, fungal spores, rainfall, and ozone. *Q J Med* 2001; 94(8): 429-433.

André J.C., Royer J.F., Chauvin F. Les cyclones tropicaux et le changement climatique. *CR Geosc* 2008; 340(9-10): 575-583.

Armstrong S., Liaw J. The fundamentals of fungi. *Am Soc Heat Refrig Air-Cond Eng J* 2002; 44(11): 18-24.

Atkinson R.W., Strachan D.P., Anderson H.R., Hajat S., Emberlin J. Temporal associations between daily counts of fungal spores and asthma exacerbations. *Occup Environ Med* 2006; 63(9): 580-590.

Awad A.H.A. Vegetation: a source of air fungal bio-contaminant. *Aerobiologia* 2005; 21(1): 53-61.

Ayerst G. Effects of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. *J Stored Prod Res* 1969; 5(2): 127-141.

Barbeau D.N., Grimsley L.F., White L.E., El-Dahr J.M., Lichtveld M. Mold exposure and health effects following hurricanes Katrina and Rita. *Annu Rev Public Health* 2010; 21(31): 165-178.

Beggs P.J. Impacts of climate change on aeroallergens: past and future. *Clin Exp Allergy* 2004; 34(10): 1507-1513.

Beggs P.J. Adaptation to impacts of climate change on aeroallergens and allergic respiratory diseases. *Int J Environ Res Public Health* 2010; 7(8): 3006-3021.

Beggs P.J. Impacts of climate change on aeroallergens and allergic respiratory diseases in children in rural areas. *Int Public Health J* 2011, 2(4 sp.): 377-383.

Béguin H., Nolard N. Flore fongique dans l'air extérieur. In: Charpin D., *L'air et la santé*. Paris: Flammarion 2004*a*: 71-82.

Béguin H., Nolard N. Flore fongique de l'intérieur des habitations. In: Charpin D., *L'air et la santé*. Paris: Flammarion 2004*b*: 101-107.

Bellanti J.A., Wallerstedt D.B. Allergic rhinitis update: epidemiology and natural history. *Allergy Asthma Proc* 2000; 21(6): 367-370.

Bellomo R., Gigliotti P., Treloar A., Holmes P., Suphioglu C., Singh M., Knox B. Two consecutive thunderstorm associated epidemics of asthma in the city of Melbourne. *Med J Austr* 1992; 156(12): 834-837.

Bennett J.W. The molds of Katrina. *The Sciences 2.0* 2006(March-April): 8-11.

Bergamini B.M., Grillenzoni S., Andreoni A.D., Natali P., Ranzi A., Bertolani M.F. *Alternaria* spores at different heights from the ground. *Allergy* 2004; 59(7): 746-752.

Besancenot J.P. Pollens et pollinoses à l'épreuve du changement climatique. *Allergol Pratique* 2009. 89: 5-10.

Besancenot J.P. Événements climatiques extrêmes et santé. In: Décamps H. (ed.). *Événements climatiques extrêmes. Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux***.** Les Ulis: EDP Sciences 2010: 73-86.

Black P.N., Udy A.A., Brodie S.M. Sensitivity to fungal allergens is a risk factor for life-threatening asthma. *Allergy* 2000; 55(5): 501-504.

Boutin C. *L'allergie respiratoire fongique*. Marseille : Imprimerie Générale de Provence 1966: 168 p.

Boutin-Forzano S., Kadouch-Charpin C., Hammou Y., Gouitaa M., Botta A., Dumon H., Charpin D. Moisissures domestiques, mycotoxines et risques sanitaires. *Environ Risques Santé* 2006; 5(5): 383-389.

Boutin-Forzano S., Charpin-Kadouch C., Gouitaa M., Dumon H., Charpin D. Audit environnemental des logements : intérêt d'identifier la ou les moisissure(s) en cause. *Rev Fr Allergol Immunol Clin* 2006; 46(3): 197-203.

Bovet P., Jeanvoine N. L'habitat passif en action. *La Maison écologique* 2006 ; 33 : 19-29.

Brandt M., Brown C., Burkhart J., Burton N., Cox-Ganser J., Damon S., Falk H., Fridkin S., Garbe P., McGeehin M., Morgan J., Page E., Rao C., Redd S., Sinks T., Trout D., Wallingford K., Warnock D., Weissman D. Mold prevention strategies and possible health effects in the aftermath of hurricanes and major floods. *MMWR Recomm Rep* 2006; 55(RR-8): 1-27.

Braun J.J., Pauli G., Schultz P., Molard A., Gentine A., de Blay F. La sinusite fongique allergique (SFA) : « équivalent nasosinusien » de l'aspergillose bronchopulmonaire allergique (ABPA) ». *Rev Fr Allergol* 2007; 47(4): 298-304.

Brown H.M., Jackson F.A. *Didymella*, asthma, and the weather. *Lancet* 1985; 1(8441): 1326-1327.

Burge H.A. An update on pollen and fungal spore aerobiology. *J Allergy Clin Immunol* 2002; 110(4): 544-552.

Bush R.K. Aerobiology of pollen and fungal allergens. *J Allergy Clin Immunol* 1989; 84(6/2): 1120-1124.

Bush R.K., Portnoy J.M. The role and abatement of fungal allergens in allergic diseases. *J Allergy Clin Immunol* 2001; 107(3 B): 430-442.

Bush R.K., Portnoy J.M., Saxon A., Terr A.I**.,** Wood R.A. The medical effects of mold exposure. *J Allergy Clin Immunol* 2006; 117(2): 326-333.

Bush R.K., Prochnau J.J. *Alternaria*-induced asthma. *J Allergy Clin Immunol* 2004; 113 (2): 227-234.

Caillaud D. Moisissures dans l'air intérieur. *Extrapol* 2005 ; 27 : 5.

Caillaud D., Merle P., Marson H., Jeannin A. Tempête et asthme / Asthma and thunderstorms. *Rev fr Allergol Immunol Clin* 2005; 45(1): 29-32.

Carvalho E., Sindt C., Verdier A., Galan C., O'Donoghue L., Parks S., Thibaudon M. Performance of Coriolis® Air Sampler, a high-volume aerosol collection system for the quantification of airborne spores and pollen grains. *Aerobiologia* 2008; 24(4): 191-201.

Caulton E. *Airborne pollens and spores, a guide to trapping and counting*. Worcester: The British Aerobiology Federation 1995: 1-60.

Cecchi L., D'Amato G., Ayres J.G., Galan C., Forastiere F., Forsberg B., Gerritsen J., Nunes C., Behrendt H., Akdis C., Dahl R., Annesi-Maesano I. Projections of the effects of climate change on allergic asthma: the contribution of aerobiology. *Allergy* 2010; 65(9): 1073-1081.

Celenza A., Fothergill J., Kupek E., Shaw R.J. Thunderstorm associated asthma: a detailed analysis of environmental factors. *Br Med J* 1996; 312(7031): 604-607.

Chabasse D., Guiguen C., Contet-Audonneau N. *Mycologie médicale*. Paris: Masson 1999: 324 p.

Chai S.K., Nga N.N., Checkoway H., Takaro T.K., Redding G.J., Keifer M.C., Trung L.V., Barnhart S. Comparison of local risk factors for children's atopic symptoms in Hanoi, Vietnam. *Allergy* 2004; 59(6): 636-644.

Chanal I., Dhivert H., Knani J., Bousquet J., Godard P., Michel F.B. Allergies broncho-pulmonaires aux moisissures. *Med Hyg* 1993; 51(2005): 3005-3007.

Chew G.L., Wilson J., Rabito F.A., Grimsley F., Iqbal S., Reponen T., Muilenberg M.L., Thorne P.S., Dearborn D.G., Morley R.L. Mold and endotoxin levels in the aftermath of Hurricane Katrina: a pilot project of homes in New Orleans undergoing renovation. *Environ Health Persp* 2006; 114(12): 1883-1889.

Codina R., Lockey R.F. Possible role of molds as secondary etiologic agents of the asthma epidemics in Barcelona, Spain. *J Allergy Clin Immunol* 1998; 102(2): 318-320.

Cohen J.C., Besancenot J.P. Changement climatique, canicules et allergies : la nouvelle donne culturelle. In: *Changements climatiques et risques sanitaires en France.* Paris: Documentation Française 2007: 37-55.

Confalonieri U., Menne B., Akhtar R., Ebi K.L., Hauengue M., Kovats R.S., Revich B., Woodward A., Abeku T., Alam M., Beggs P., Clot B., Furgal C., Hales S., Hutton G., Islam S., Kjellstrom T., Lewis N., Markandya A., McGregor G., Smith K.R., Tirado C., Thomson M., Wolf T. Human health. In: Parry M.L., Canziani O.F.,

Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E. (eds), *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press 2007: 391-431.

Corden J.M., Millington W. *Didymella* ascospores in Derby. *Grana* 1994; 33(2): 104-107.

Corden J.M., Millington W.M. The long-term trends and seasonal variation of the aeroallergen *Alternaria* in Derby, UK. *Aerobiologia* 2001; 17(2): 127-136.

Corden J.M., Millington W., Mullins J. Long-term trends and regional variation in the aeroallergen *Alternaria* in Cardiff and Derby, UK – are differences in climate and cereal production having an effect ? *Aerobiologia* 2003; 19(3-4): 191-199.

Corey J.P., Kaiseruddin S., Gungor A. Prevalence of mold-specific immunoglobulins in a Midwestern allergy practice. *Otolaryngol Head Neck Surg* 1997; 117(5): 516-520.

CSHPF. *Contaminations fongiques en milieux intérieurs. Diagnostic. Effets sur la santé respiratoire. Conduites à tenir*. Paris: Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France 2006: 101 p.

Curtis L., Lieberman A., Stark M., Rea W., Vetter M. Adverse health effects of indoor molds. *J Nutr Environ Med* 2004; 14(3): 261-274.

Dakhil J., Bousquet J., Ménardo J.L., Dhivert H., Michel F.B. Tests cutanés aux moisissures dans la région languedocienne. *Rev Fr Allergol Immunol Clin* 1983; 23(2): 91-93.

Dales R.E., Cakmak S., Judek S., Dann T., Coates F., Brook JR., Burnett RT. The role of fungal spores in thunderstorm asthma. *Chest* 2003; 123(3): 745-750.

Dales R.E., Cakmak S., Judek S., Dann T., Coates F., Brook J.R., Burnett R.T. Influence of outdoor aeroallergens on hospitalization for asthma in Canada. *J Allergy Clin Immunol* 2004; 113(2): 303-306.

D'Amato G., Spieksma F.Th.M. Aerobiologic and clinical aspects of mould allergy in Europe. *Allergy* 1995; 50(11): 870-877.

D'Amato G., Cecchi L. Effects of climate change on environmental factors in respiratory allergic diseases. *Clin Exp Allergy* 2008; 38(8): 1264-1274.

David B. (ed.). *Mieux comprendre les maladies allergiques.* Paris: Elsevier 2003: 239 p.

David B., Thibaudon M. Variations climatiques et allergies. *Ann Inst Pasteur / Actual* 2003; 16: 133-147.

Décamps H. (ed.). *Événements climatiques extrêmes. Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux***.** Les Ulis: EDP Sciences 2010: 194 p.

Delfino R.J., Zeiger R.S., Seltzer J.M., Street D.H., Matteucci R.M., Anderson P.R., Koutrakis P. The effect of outdoor fungal spore concentrations on daily asthma severity. *Environ Health Perspect* 1997; 105(6): 622-635.

Denning D.W., O'Driscoll B.R., Hogaboam C., Bowyer P., Niven R.M. The link between fungi and severe asthma; a summary of the evidence. *Eur Resp J* 2006; 27(3): 615-626.

Desbois N., Béguin H., Ruck G., Nere J., Nolard N. Calendrier des spores fongiques de la Martinique. *J Mycol Med* 2006; 16(4): 189-196.

D'Halewyn M.A., Leclerc J.M., King N., Bélanger M., Legris M., Frenette Y. *Les risques à la santé associés à la présence de moisissures en milieu intérieur.* Institut national de santé publique du Québec 2002: 166 p.

Downs S.H., Mitakakis T.Z., Marks G.B., Car N.G., Belousova E.G., Leüppi J.D., Xuan W., Downie S.R., Tobias A., Peat J.K. Clinical importance of *Alternaria* exposure in children. *Am J Respir Crit Care Med* 2001; 164(3): 455-459.

Epstein P.A. Climate change and human health. *N Engl J Med* 2005; 353(14): 1433-1436.

Epton M.J., Martin I.R., Graham P., Healy P.E., Smith H., Balasubramaniam R., Harvey I.C., Fountain D.W., Hedley J., Town G.I. Climate and aeroallergen levels in asthma: a 12 month prospective study. *Thorax* 1997; 52(6): 528-534.

Etzel R.A. Mycotoxins. *JAMA* 2002; 287(4): 425-427.

Ezratty V., Duburcq A., Emery C., Lambrozo J. Liens entre l'efficacité énergétique du logement et la santé des résidents : résultats de l'étude européenne LARES. *Environ Risques Santé* 2009; 8(6): 497-506.

Feinberg S.M., Little H.T. Studies on the relation of microorganisms to allergy. III. A year's survey of daily mold spore content of the air. *J Allergy* 1935; 7: 149.

Frankland A.W., Gregory P.H. Allergenic and agricultural implications of airborne ascospore concentrations from a fungus, *Didymella exitialis. Nature* 1973; 245: 336-337.

Freye H.B., King J., Litwin C.M. Variations of pollen and mold concentrations in 1998 during the strong El Niño event of 1997-1998 and their impact on clinical exacerbations of allergic rhinitis, asthma, and sinusitis. *Allergy Asthma Proc* 2001; 22(4): 239-247.

Gamble J.L., Reid C.E., 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, US Environmental Protection Agency 2008: 91 p.

Gioulekas D., Damialis A., Mpalafoutis C., Papakosta D., Giouleka P., Patakas D. Allergenic fungal spore records (15 years) and relationship with meteorological parameters in Thessaloniki, Greece. *Allergy Clin Immunol Int* 2004; 16(2): 52-59.

Gioulekas D., Damialis A., Papakosta D., Spieksma F., Giouleka P., Patakas D. Allergenic fungal spore records (15 years) and sensitization in patients with respiratory allergy in Thessaloniki, Greece. *J Investig Allergol Clin Immunol* 2004; 14(3): 225-231.

Gobakken L.R. *Effects of global climate change on mould growth - interactions of concern*. Stockholm: The International Research Group on Wood Protection 2010: 11 p.

Górny R.L., Reponen T., Willeke K., Schmechel D., Robine E., Boissier M., Grinshpun S.A. Fungal fragments as indoor air biocontaminants. *Appl Environ Microbiol* 2002; 68(7): 3522-3531.

Goyer N., Lavoie J., Lazure L., Marchand G. *Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention.* Montréal : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail 2001: 72 p.

Gravesen S. Fungi as a cause of allergic disease. *Allergy* 1979; 34(3): 135-154.

Green B.J., Tovey E.R., Sercombe J.K., Blachere F.M., Beezhold D.H., Schmechel D. Airborne fungal fragments and allergenicity. *Med Mycol* 2006; 44(suppl): 245-255.

Greenberger P.A. Allergic bronchopulmonary aspergillosis. *J Allergy Clin Immunol* 2002; 110(5): 685-692.

Grémy I., Host S., Grange D., Sommen C., Chatignoux E., Dusseaux M., Bex-Capelle V., Moularat S. *Effets sanitaires des moisissures dans l'habitat. L'enquête Esmha, pilote d'une étude épidémiologique en Île-de-France*. Paris: Observatoire régional de santé d'Ile-de-France 2010: 141 p.

Griffin D.W., Garrison V.H., Herman J.R., Shinn E.A. African desert dust in the Caribbean atmosphere: microbiology and public health. *Aerobiologia* 2001; 17(3): 203-213.

Grinn-Gofrón A., Strzelczak A. The effects of meteorological factors on the occurrence of *Ganoderma* sp. spores in the air. *Int J Biometeorol* 2011; 55(2): 235-241.

Grundstein A., Sarnat S.E., Klein M., Shepherd M., Naeher L., Mote T., Tolbert P. Thunderstorm associated asthma in Atlanta, Georgia. *Thorax.* 2008; 63(7): 659-660.

Gubler C.G., Peeters A., Wüthrich B. *Zur mykogenen Allergie: Pilzsporengehalt in der Luft von Zürich.* Zürich: The UCB Institute of Allergy 1994: 111 p.

D'Halewyn M.A., Leclerc J.M., King N., Bélanger M., Legris M., Frenette Y. *Les risques à la santé associés à la présence de moisissures en milieu intérieur.* Québec : Institut national de santé publique du Québec 2002: 166 p.

Hamilos D.L., Allergic fungal rhinitis and rhinosinusitis. *Proc Am Thorac Soc* 2010; 7(3): 245-252.

Harries M.G., Lacey J., Tee R.D., Cayley G.R., Newman Taylor A.J. *Didymella exitialis* and late summer asthma. *Lancet* 1985; 325(8437): 1063-1066.

Hasnain S.M. Influence of meteorological factors on the air spora. *Grana* 1993; 32(3): 184-188.

Hawksworth D.L. The fungal dimension of biodiversity: magnitude, significance, and conservation. *Mycol Res* 2006; 95(6): 641-655.

Hendry K.H., Cole E.C. A review of mycotoxins in indoor air. *J Toxicol Environ Health* 1993; 38(2): 183-198.

Heseltine E., Rosen J. WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe 2009: 228 p.

Hibbett D.S. Binder M., Bischoff J.F., Blackwell M., Cannon P.F., Eriksson O.E., Huhndorf S., James T., Kirk P.M., Lücking R., Thorsten Lumbsch H., Lutzoni F., Matheny P.B., McLaughlin D.J., Powell M.I., Redhead S., Schoch C.L., Spatafora J.W., Stalpers J.A., Vilgalys R., Aime M.C., Aptroot A., Bauer R., Begerow D., Benny G.L., Castlebury L.A., Crous P.W., Dai Y.C., Gams W., Geiser D.M., Griffith G.W., Gueidan C., Hawksworth D.L., Hestmark G., Hosaka K., Humber R.A., Hyde K.D., Ironside J.E., Kõljalg U., Kurtzman C.P., Larsson K.H., Lichtwardt R., Longcore J., Miadlikowska J., Miller A., Moncalvo J.M., Mozley-Standridge S., Oberwinkler F., Parmasto E., Reeb V., Rogers J.D., Roux C., Ryvarden L., Sampaio J.P., Schüßler A., Sugiyama J., Thorn R.G., Tibell L., Untereiner W.A., Walker C., Wang Z., Weir A., Weiss M., White M.M., Winka K., Yao Y.J., Zhang N., A higher-level phylogenetic classification of the Fungi. *Mycol Res* 2007; 111(5): 509-547.

Higham J., Venables K., Kopek E., Bajekal M. Asthma and thunderstorms: description of an epidemic in general practice in Britain using data from a doctors' deputising service in the UK. *J Epidemiol Com Health* 1997; 51(3): 233-238.

Hirst J.M. An automatic volumetric spore traps. *Ann Appl Biology* 1952; 39: 257-265.

Hjelmroos M. Relationship between airborne fungal spore presence and weather variables: *Cladosporium* and *Alternaria*. *Grana* 1993; 32(1): 40-47.

Horner W.E., Helbling A., Salvaggio J.E., Lehrer S.B. Fungal allergens. *Clin Microbiol Rev* 1995; 8(2): 161-179.

Horner W.E., Helbling A., Lehrer S.B. Basidiomycete allergens: comparison of three *Ganoderma* species. *Allergy* 1993; 48(2): 110-116.

Howden M., Soussana J.F., Tubiello F.N., Chtetri N., Dunlop M., Aggarwal P.K. Adapting agriculture to climate change. *Proc Nat Acad Sc* 2007; 104(50): 19691-19696.

Husar R.B., Tratt D.M., Schichtel B., Falke S.R., Li F., Jaffe D., Gassó S., Gill T., Laulainen N.S., Lu F., Reheis M.C., Chun Y., Westphal D., Holben B.N., Gueymard C., McKendry I., Kuring N., Feldman G.C., McClain C., Frouin R.J., Merrill J., DuBois D., Vignola F., Murayama T., Nickovic S., Wilson W.E., Sassen K., Sugimoto N., Malm W.C. Asian dust events of April 1998. *J Geophys Res* 2001; 106(D16): 18317-18330.

Hutsebaut J., Hutsebaut N., Jacob V., Béguin H., Nolard N. Asthme bronchique d'origine fongique. *Rev Med Bruxelles* 2004; 25(A): 248-255.

Ingold C.T. Spore discharge in *Daldinia concentrica*. *Trans Br Mycol Soc* 1946; 29(1-2): 43-51.

Jäger S. The European Aeroallergen Network EAN. *Abstract band 2nd ECA Vienna 2000*.

Jäger S., Berger U. Effects of climate change to pollen and spores. In: Oikonen M., *Abstracts of the 4th ESA 2008, 2nd ed.* Turku: European Symposium on Aerobiology 2008: 8-9.

Johanning E. (ed.). *Bioaerosols, fungi and mycotoxins: health effects, assessment, prevention and control.* New York: Eastern New York Occupational and Environmental Health Center 1999: 675 p.

Jones A.M., Harrison R.M. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations, a review. *Sci Total Environ* 2004; 326(1-3): 151-180.

Joussaume S., Armand D., Delecluse P., Seguin B., Journé V., Delmas R., Gillet M. *Les recherches françaises sur le changement climatique.* Paris: Insu 2007: 19 p.

Kandel R. *Le réchauffement climatique.* Paris: PUF: 128 p.

Käpylâ M., Penttinen A. An evaluation of the microscopical counting method of the tape in Hirst-Burkard pollen and spore trap. *Grana* 1981; 20(2): 131-141.

Kasprzyk I. Aeromycology – main research fields of interest during the last 25 years. *Ann Agric Environ Med* 2008; 15(1): 1-7.

Kasprzyk I., Worek M. Airborne fungal spores in urban and rural environments in Poland. *Aerobiologia* 2006; 22(3): 169-176.

Katial R.K., ZhangY., Jones R.H., Dyer P.D. Atmospheric mold spore counts in relation to meteorological parameters. *Int J Biometeorol* 1997; 41(1): 17-22.

Kellogg C.A., Griffin D.W. Aerobiology and the global transport of desert dust. *Trends Ecol Evol* 2006; 21(11): 638-644.

Khattab A., Levetin E. Effect of sampling height on the concentration of airborne fungal spores. *Ann Allergy Asthma Immunol* 2008; 101(5): 529-534.

Kilic M., Ufuk Altintas D., Yilmaz M., Güneşer Kendirli S., Bingöl Karakoc G., Taskin E., Ceter T., Pinar N.M. The effects of meteorological factors and *Alternaria* spore concentrations on children sensitised to *Alternaria*. *Allergol Immunopathol* 2010; 38(3): 122-128.

Kinney P.L. Climate change, air quality, and human health. *Am J Prev Med* 2008; 35(5): 459-467.

Klironomos J.N., Rillig M.C., Allen M.F., Zak D.R., Pregitzer K.S., Kubiske M.E. Increased levels of airborne fungal spores in response to *Populus tremuloides* grown under elevated atmospheric CO_2. *Can J Bot* 1997; 75(10): 1670-1673.

Korpi A., Järnberg J., Pasanen A.L. Microbial volatile organic compounds. *Crit Rev Toxicol* 2009; 39(2) : 139-193.

Kukreja N., Sridhara S., Singh B.P., Gaur S.N., Arora N. Purification and immunological characterization of a 12-kDa allergen from *Epicoccum purpurascens*. *FEMS Immunol Med Microbiol* 2009; 56(1): 32-40.

Lacey J. The aerobiology of conidial fungi. In: Cole G.T., Kendrick B. (eds.), *Biology of conidial fungi, vol 1.* New York: Academic Press 1981: 400 p.

Lawrence C.B., Mitchell T.K., Craven K.D., Cho Y., Cramer RR.A., Kim K.H. At death'door: *Alternaria* phatogenicity mechanisms. *Plant Pathol J* 2008; 24(2): 101-111.

Levetin E., Horner W.E., Davis W.E., Lehrer S.B. Airborne spore levels and skin test reactivity in New Orleans following Hurricane Katrina. *J Allergy Clin Immunol* 2007; 119(1 suppl): S99.

Lewis S.A., Corden J.M., Forster G.E., Newlands M. Combined effects of aerobiological pollutants, chemical pollutants and meteorological conditions on asthma admissions and A & E attendances in Derbyshire UK,1993-96. *Clin Exp Allergy* 2000; 30(12): 1724-1732.

Li D.W., Kendrick B. A year-round study on functional relationships of airborne fungi with meteorological factors. *Int J Biometeorol* 1995; 39(2): 74-80.

Macher J. (ed.). *Bioaerosols: assessment and control*. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists 1999: 322 p.

Mainville C. La contamination par les moisissures dans les bâtiments. Montreal: Natur'Air-Kiwatin 2004: 6 p.

Malléa M., Charpin J. Moisissures. In: Charpin J., Vervloet D. *Allergologie*. Paris : Flammarion 1992: 305-319.

Manuel J. In Katrina's wake. *Environ Health Perspect* 2006; 114(1): A32-A39.

Marks G.B., Colquhoun J.R., Girgis S.T., Hjelmroos Koski M., treloar A.B.A., Hansen P., Downs S.H., Car N.G. Thunderstom outflows preceding epidemics of asthma during spring and summer. *Thorax* 2001; 56(6): 468-471.

Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.C. Global climate projections. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M.M.B., Miller Jr H.L. (eds). *Climate change 2007: the physical science basis.* Cambridge-New York: Cambridge University Press 2007: 747-845.

Moisselin J.M., Schneider M., Canellas C., Mestre O. Les changements climatiques en France au XXème siècle. Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorol* 2002; 8(38): 45-56.

Moss M.O. Risk assessment for aflatoxins in foodstuffs. *Int Biodeterior Biodegrad* 2002; 50(3-4): 137-142.

Neukirch C., Henry C., Leynaert B., Liard R., Bousquet J., Neukirch H.F. Is sensitization to *Alternaria alternata* a risk factor for severe asthma? A population-based study. *J Allergy Clin Immunology* 1999; 103(4): 709-711.

Newson R., Strachan D., Archibald E., Emberlin J., Hardaker P., Collier C. Effect of thunderstorms and airborne grass pollen on the incidence of acute asthma in England, 1990-1994. *Thorax* 1997; 52(8): 680-685.

Newson R., Strachan D., Corden J., Millington W. Fungal and other spore counts as predictors of admissions for asthma in the Trent region. *Occup Environ Med* 2000; 57(11): 786-792.

Nilsson S. Preliminary inventory of aerobiological monitoring stations in Europe. *Aerobiologia* 1988; 4(1-2): 4-7.

Nolard N., Béguin H., Chasseur C. Allergie aux moisissures : 25 années d'études « Indoor » et « Outdoor » en Belgique. *Allerg Immunol* 2001; 33(2): 101-102.

O'Driscoll B.R., Hopkinson L.C., Denning D.W. Mold sensitization is common amongst patients with severe asthma requiring multiple hospital admissions. *BMC Pulm Med* 2005; 5: 4.

O'Driscoll B.R., Powell G., Chew F., Niven R., Miles J., Vyas A.A., Denning D.W. Comparison of skin prick tests with specific serum immunoglobulin E in the diagnosis of fungal sensitization in patients with severe asthma. *Clin Exp Allergy* 2009; 39(11): 1677-1683.

Oliveira M., Ribeiro H., Delgado J.L., Abreu I. The effects of meteorological factors on airborne fungal spore concentration in two areas differing in urbanisation level. *Int J Biometeorol* 2009; 53(1): 61-73.

Packe G.E., Ayres J.G. Asthma outbreak during a thunderstorm. *Lancet* 1985; 326(8448): 199-204.

Palot A., Charpin-Kadouch C., Dumon H., Charpin D. Pathologie non allergique et exposition aux moisissures domestiques. *Rev Mal Respir* 2010; 27(2): 180-187.

Pasanen A.L. Airborne mesophilic fungal spores in various residential environments. *Atmos Environ* 1992; 26(16): 2861-2868.

Paterson R.R.M., Lima N. How will climate change affect mycotoxins in food? *Food Res Int* 2009; 43(7): 1902-1914.

Peraica M., Radic B., Lucic A., Pavlovic M. Toxic effects of mycotoxins in humans. *Bull World Health Org* 1999; 77(9):754-766.

Peternel R., Culig J., Hrga I. Atmospheric concentrations of *Cladosporium* spp. and *Alternaria* spp. spores in Zagreb (Croatia) and effects of some meteorological factors. *Ann Agric Environ Med* 2004; 11(2): 303-307.

Planton S., Déqué M., Chauvin F., Terray L. Expected impacts of climate change on extreme climate events. *CR Geosc* 2008; 340(9-10): 564-574.

Ponikau J.U., Sherris D.A., Kern E.B., Homburger H.A., Frigas E., Gaffey T.A., Roberts G.D. The diagnosis and incidence of allergic fungal sinusitis. *Mayo Clin Proc* 1999; 74(9): 877-884.

Portnoy J.M., Barnes C.S., Kennedy K. Importance of mold allergy in asthma. *Curr Allergy Asthma Rep* 2008; 8(1): 71-78.

Pulimood T.B., Corden J.M., Bryden C., Sharples L., Nasser S.M. Epidemic asthma and the role of the fungal mold *Alternaria alternata. J Allergy Clin Immunol* 2007; 120(3): 610-617.

Rabito F.A., Perry S., Davis W.E., Yau C.L., Levetin E. The relationship between mold exposure and allergic response in post-Katrina New Orleans. *J Allergy (Cairo)* 2010; 7 p.

Rao C.Y., Riggs M.A., Chew G.L., Muilenberg M.L., Thorne P.S., Van Sickle D., Dunn K.H., Brown C. Characterization of airborne molds, endotoxins, and glucans in New Orleans after hurricanes Katrina and Rita. *Appl Environ Microbiol* 2007; 73(5): 1630-1634.

Ratard R., Brown C.M., Ferdinands J., Callahan D. Health concerns associated with mold in water-damaged homes after Hurricanes Katrina and Rita - New Orleans, Louisiana, October 2005. *Morb Mort Wkly Rep* 2006; 55(2): 41-44.

Reboux G., Nolard N. Moulds in indoor environments: sampling and measurement techniques. *Rev Mal Respir* 2007; 24(2): 243-245.

Reid C.E., Gamble J.L. Aeroallergens, allergic disease, and climate change: impacts and adaptation. *Ecohealth* 2009; 6(3): 458-470.

Richardson M.J. The occurrence of airborne *Didymella* spores in Edinburgh. *Mycol Res* 1996; 100(2): 213-216.

Robine E., Lacaze I., Moularat S., Boissier M., Ritoux S. Mesure des aérosols fongiques dans l'air : utilisation de l'ergostérol. *Rev Fr Allergol* 2006; 46(3) : 174-179.

Rodríguez-Rajo F.J., Iglesias I., Jato V. Variation assessment of airborne *Alternaria* and *Cladosporium* spores at different bioclimatical conditions. *Mycol Res* 2005; 109(4): 497-507.

Rotem J. *The genus Alternaria: biology, epidemiology, and pathogenicity*. St. Paul, Minn.: APS Press 1994: 326 p.

Roussel S., Reboux G., Dalphin J.C., Piarroux R., Alvéolites allergiques extrinsèques et exposition aux moisissures. *Rev Fr Laboratoires* 2005; 373: 51-60.

Ruelle F. *Le standard « maison passive » en Belgique : potentialités et obstacles*. Bruxelles**:** Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire 2008: 133 p.

Salvaggio J., Seabury J., Schoenhardt E. New Orleans Asthma. V. Relationship between Charity Hospital admission rates, semiquantitative pollen and fungal spore counts and total particulate aerometric sampling data. *J Allergy Clin Immunol* 1971; 48(2)**:** 96-114.

Schmier J.K., Ebi K.L. The impact of climate change and aeroallergens on children's health. *Allergy Asthma Proc* 2009; 30(3): 229-237.

Seltzer J.M., Fedoruk M.J. Health effects of mold in children. *Pediatr Clin North Am* 2007; 54(2): 309-333.

Shea K.M., Truckner R.T., Weber R.W., Peden D.B. Climate change and allergic disease. *J Allergy Clin Immunol* 2008; 122(3): 443-453.

Shelton B.G., Kirkland K.H., Flanders W.D., Morris G.K. Profiles of airborne fungi in buildings and outdoor environments in the United States. *Appl Environ Microbiol* 2002; 68(4):1743-1753.

Shinn E.A., Griffin D.W., Seba D.B. Atmospheric transport of mold spores in clouds of desert dust. *Arch Environ Health* 2003; 58(8): 498-504.

Simeray J., Chaumont J.P., Léger D. Seasonal variations in the airborne fungal spore population of the east of France (Franche-Comté): comparison between urban and rural environment during two years. *Aerobiologia* 1993; 9(2-3): 201-206.

Simon-Nobbe B., Denk U., Pöll V., Rid R., Breitenbach M. The spectrum of fungal allergy. *Int Arch Allergy Immunol* 2008; 145(1): 58-86.

Solomon G.M., Hjelmroos-Koski M., Rotkin-Ellman M., Hammond S.K. Airborne mold and endotoxin concentrations in New Orleans, Louisiana, after flooding, October through November 2005. *Environ Health Perspect* 2006; 114(9): 1381-1386.

Somot S. Régionalisation des scénarios de changement climatique. *Environ Risques Santé* 2005; 4(2): 89-94.

Sorenson W.G. Fungal spores: hazardous to health? *Environ Health Perspect* 1999; 107(suppl.3): 469-472.

Spagnoli B., Planton S., Déqué M., Mestre O., Moisselin J.M. Detecting climate change at a regional scale: the case of France. *Geophys Res Lett* 2002; 29(10): 90-91.

Stępalska D., Wołek J., Piotrowicz K. *Didymella* spore concentrations in Cracow in 1997-2006. In: Oikonen M., *Abstracts of the 4th ESA 2008, 2nd ed.* Turku: European Symposium on Aerobiology 2008: 63.

Stępalska D., Wołek J. Intradiurnal periodicity of fungal spore concentrations (*Alternaria, Botrytis, Cladosporium, Didymella, Ganoderma*) in Cracow, Poland. *Aerobiologia* 2009; 25(4): 333-340.

Stępalska D., Grinn-Gofroń A., Piotrowicz K. Occurrence of *Didymella* in western and southern Poland in 2004-2006. *Aerobiologia* 2011; *in press*.

Stephen E., Raftery A., Dowding P. Forecasting spore concentrations: a time series approach. *Int J Biometeorol* 1990; 34(2): 87-89.

Strachan D.P., Flannigan B., McCabe E.M., McGarry F. Quantification of airborne moulds in the homes of children with and without wheeze. *Thorax* 1990; 45(5): 382-387.

Suphioglu C. Thunderstorm asthma due to grass pollen. *Int Arch Allergy Immunol* 1998; 116(4): 253-260.

Targonski P.V., Persky V.W., Ramekrishnan V. Effect of environmental molds on risk of death from asthma during the pollen season. *J Allergy Clin Immunol* 1995; 95(5/1): 955-961.

Thibaudon M. Pollens, allergies et changements climatiques. *Presse Therm Clim* 2007; 144: 117-120.

Thibaudon M. Le réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA). Un outil au service de la santé publique, de la biodiversité, du changement climatique et de la recherche. *Environ Risque Sante* 2008; 7(3): 217-219.

Thibaudon M. Édito. *Info Santé Environnement intérieur* 2009 ; 27 : 1.

Thibaudon M., Lachasse C. *Alternaria, Cladosporium* : dispersion atmosphérique, rythmes nycthéméral et saisonnier. *Rev fr Allergol Immunol Clin* 2006; 46(3): 188-196.

Thibaudon M., Poirot A., De Blay F. Moisissures, orages et asthme. *Rev fr Allergol* 2011; 51(6): 560-563.

Troutt C., Levetin E. Correlation of spring spore concentrations and meteorological conditions in Tulsa, Oklahoma. *Int J Biometeorol* 2001; 45(2): 64-74.

Valléry-Radot P., Halpern B.N., Secretain A., Pomart A. Étude de la nature et de la densité de la flore mycologique dans l'atmosphère de Paris durant l'année 1948. *Allergy* 1950; 3(3): 179-197.

Villeneuve P.J., Leech J., Bourque D. Frequency of emergency room visits for childhood asthma in Ottawa, Canada: the role of weather. *Int J Biometeorol* 2005; 50(1): 48-56.

Von Wahl P.G., Kersten W. *Fusarium* and *Didymella* – neglected spores in the air. Aerobiologia 1991; 7(2): 111-117.

Wallis D.N., Webb J., Brooke D., Brookes B., Brown R., Findlay A., Harris M., Hulbert D., Little G., Nonoo C., O'Donnell C., Park G., Soorma A., Davidson A.C., Emberlin J., Cook A.D., Venables K.M. A major outbreak of asthma associated with a thunderstorm: experience of accident and emergency departments and patients' characteristics. *Br Med J* 1996; 312(7031): 601-604.

Wardman A.E., Stefani D., MacDonald J.C. Thunderstorm-associated asthma or shortness of breath epidemic: a Canadian case report. *Can Respir J* 2002; 9(4): 267-270.

Webster J. *Introduction to fungi, 2nd ed.* New York: Cambridge University Press 1980: 669 p.

Wilson J.F. Health and the environment after Hurricane Katrina. *Ann Int Med* 2006; 144(2): 153-156.

Wolf J., O'Neill N.R., Rogers C.A., Muilenberg M.L., Ziska L.H. Elevated atmospheric carbon dioxide concentrations amplify *Alternaria alternata* sporulation and total antigen production. *Environ Health Perspect* 2010**;** 118(9): 1223-1228.

Womiloju T.O., Miller J.D., Mayer P.M., Brook J.R. Methods to determine the biological composition of particulate matter collected from outdoor air. *Atmos Environ* 2003; 37(31): 4335-4344.

Wong L.T., Chan W.Y., Mui K.W., Hui P.S. An assessment of airborne fungi exposure risk level in air-conditioned offices. *Indoor Built Environ* 2009; 18(6): 553-561.

Woodcock A. Moulds and asthma: time for indoor climate change? *Thorax* 2007; 62(9): 745-746.

Wu P.C., Tsai J.C., Li F.C., Lung S.C., Su H.J. Increased levels of ambient fungal spores in Taiwan are associated with dust events from China. *Atmos Environ* 2004; 38(29): 4879-4886.

Ziska L.H., Epstein P.R., Rogers C.A. Climate change, aerobiology, and public health in the Northeast United States. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 2008; 13(5-6):607-613.

Sites Internet utiles

http://www.ispb.univ-lyon1.fr/.../Site.../Video%20**Allergie**%202.ppt

http://www.greenguard.org/en/index.aspx

http://www.armr.net

http://www.acgih.org

http://www.pollens.fr/les-bulletins/bulletin-moisissures.php

http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/climat_261010.pdf

http://www.insurancejournal.com

http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-fr.pdf

http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/127_RisquesMoisissuresMilieuInterieurResume.pdf

http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/cshpf/a_mv_310106_contamfongiques.pdf

Table des figures

1. Spore d'*Aspergillus fumigatus* ……. 10.
2. Le point de vue « officiel » des États-Unis ……... 15.
3. Les effets nocifs des moisissures sur la santé ……..……. 17.
4. Spore de *Curvularia* …… 20.
5. Les symptômes de l'allergie à *Alternaria* …….. 21.
6. Courbes comparées des concentrations atmosphériques de spores fongiques et des symptômes moyens d'asthme en zone rurale du Sud de la Californie ……. 23.
7. Spores de *Fusarium* ……...…… 25.
8. Spores de *Penicillium* …… 25.
9. Burkard Volumetric Spore Sampler ……. 24.
10. Lanzoni Volumetric Pollen and Particle Sampler VPPS 2000 …….. 34.
11. Spores d'*Alternaria* …… 36.
12. Spores d'*Alternaria alternata* : agrandissement …… 36.
13. Rythme moyen de dispersion des spores d'*Alternaria* sur la France (1999-2010) …… 37.
14. Rythme moyen de dispersion des spores d'*Alternaria* sur l'Europe (2001-2010) ……. 38.
15. Spores de *Cladosporium* ……. 39.
16. Spores de *Cladosporium herbarum* : agrandissement ……... 39.
17. Rythme moyen de dispersion des spores de *Cladosporium* sur la France (1999-2010) ... 40.
18. Rythme moyen de dispersion des spores de *Cladosporium* sur l'Europe (2001-2010) …. 41.
19. Spores de *Didymella exitialis* …… 42.
20. Rythme moyen de la dispersion des spores de *Didymella exitialis* sur Strasbourg (2008-2009) …….. 42.
21. Calendrier des spores fongiques de l'air à Bruxelles (moyenne 1998-2007) …… 44.
22. Évolution de la dispersion des moisissures atmosphériques sur l'Europe au cours des 25 dernières années (1985-2010) ……... 46.
23. Évolution de la dispersion des moisissures atmosphériques sur la France au cours des douze dernières années (1999-2010) ……. 47.
24. Nombre annuel de jours à risque d'allergie à *Cladosporium* à Paris et Aix-en-Provence, en fonction de deux seuils de risque (3 500 et 7 000 spores/m^3) ……..…… 52.
25. Nombre annuel de jours à risque d'allergie à *Alternaria* à Paris et Aix-en-Provence, en fonction de deux seuils de risque (500 et 1000 spores/m^3) …….. 52.
26. Concentrations moyennes de spores fongiques dans l'atmosphère de Cardiff en présence et en absence d'orage …….. 57.
27. Logement de La Nouvelle-Orléans contaminé par les moisissures après le passage de Katrina ……..……. 59.
28. Interactions entre les moisissures, leurs hôtes ou substrats, leurs compétiteurs ou ennemis, l'influence directe du climat et celle du changement climatique …….. 67.

Table des tableaux

I. Essai de synthèse. Lien entre effets des moisissures sur la santé, taux de spores fongiques dans l'air et impact potentiel d'un changement climatique ……. 28.

II. Stations du réseau français (RNSA) retenues pour *Cladosporium* et *Alternaria* ……. 31.

III. Stations du réseau européen (EAN) retenues pour *Cladosporium* …… 32.

IV. Stations du réseau européen (EAN) retenues pour *Alternaria* ……. 32.

V. Concentrations moyennes en spores fongiques aux États-Unis en janvier et juillet : fréquence d'isolement et distribution statistique ……... 54.

VI. Concentrations moyennes en spores fongiques aux États-Unis selon le type de temps : fréquence d'isolement et distribution statistique …….. 55.

VII. Concentrations moyennes en spores fongiques dans quatre États climatiquement contrastés des États-Unis : fréquence d'isolement et distribution statistique ……... 55.

VIII. Top 10 des États à plus haut risque de contamination par les moisissures des propriétés commerciales et privées aux États-Unis…… 56.

IX. Top 5 des États à plus faible risque de contamination par les moisissures des propriétés commerciales et privées aux États-Unis …… 57.

X. Effets de la teneur de l'air atmosphérique en CO_2 sur la production de spores fongiques et leur allergénicité : moyennes et intervalles de confiance à 95% …….. 68.

XI. Récapitulatif des principaux axes de recherche à développer ou à encourager …… 77.