

Observatoire régional de santé d'Ile-de-France

Effets sanitaires des moisissures dans l'habitat

L'enquête Esmha, pilote d'une étude épidémiologique
en Ile-de-France

Cette étude a été réalisée par

Sabine HOST, Dorothée GRANGE, Cécile SOMMEN, Edouard CHATIGNOUX,
chargés d'études à l'ORS Ile-de-France, avec la participation de
Murielle DUSSEAUX, Valérie BEX-CAPELLE, Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris,
et de Stéphane MOULARAT, Centre scientifique et technique du bâtiment,
sous la direction d'Isabelle GREMY, directrice de l'ORS Ile-de-France.

Cette étude a été réalisée avec le soutien de son comité de pilotage :

- Isabella Annesi Maesano (Inserm) ;
- Valérie Bex-Capelle (LHVP) ;
- Philippe Bretin (InVS) ;
- Claire Dassonville (Laboratoire de Santé Publique et Environnement – Paris V) ;
- Murielle Dusséaux (LHVP) ;
- Stéphane Moularat (CSTB).

Que tous soient ici vivement remerciés pour leur concours.

Nous adressons également nos remerciements à l'Agence nationale de sécurité sanitaire et au Groupement régional de santé publique d'Ile-de-France dont les financements ont rendu possible cette étude.

Nous tenons enfin à remercier Aurélie Cazenave pour sa contribution au travail de préparation des bases de données en vue des analyses.

| |
|---|
| <p>L'Observatoire régional de santé d'Ile-de-France est subventionné par l'Etat, l'Agence régionale de santé et le Conseil régional d'Ile-de-France</p> |
|---|

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Sommaire | 3 |
| Introduction | 5 |
| Contexte | 7 |
| Objectifs de l'enquête pilote | 11 |
| Stratégie d'échantillonnage et mise en œuvre de l'enquête | 13 |
| Stratégie d'échantillonnage | 15 |
| Enquêteurs et déroulement de l'enquête | 19 |
| Bilan des contacts et analyse des refus | 23 |
| Caractéristiques générales de l'échantillon | 23 |
| Efficacité de la stratégie d'échantillonnage | 29 |
| Moisissures dans l'habitat : caractérisation des contaminations selon différents indices | 31 |
| Méthodes d'évaluation de l'exposition aux moisissures de l'habitat | 33 |
| Détection des contaminations fongiques visibles : description de l'environnement domestique | 37 |
| Détermination de la présence de germes pathogènes : prélèvements sur les surfaces et analyses microbiologiques | 42 |
| Détection des contaminations fongiques actives : mesure des COV microbiens | 53 |
| Mesure des concentrations de la biomasse fongique dans l'air : dosage de l'ergostérol | 57 |
| Mesure de la toxicité de l'aérosol fongique : dosage des mycotoxines | 60 |
| Caractérisation des différentes situations de contamination | 63 |
| Pertinence de la stratégie d'échantillonnage en regard des différents indices de contamination selon la strate | 67 |

| | |
|--|------------|
| Caractéristiques de l'habitat moisi et facteurs prédictifs | 69 |
| Analyse des déterminants potentiels des moisissures | 71 |
| Typologie de logements | 80 |
| Prédire une exposition aux moisissures | 89 |
| Moisissures de l'habitat et santé, autres expositions domestiques à prendre en compte | 95 |
| Pathologies potentiellement liées aux expositions aux moisissures | 97 |
| Recueil des données sanitaires et autres données individuelles | 101 |
| Faisabilité du recueil dans le cadre de ce pilote | 103 |
| Données sanitaires et construction des indicateurs | 103 |
| Autres expositions domestiques : sélection des facteurs de confusion | 111 |
| Conclusions et perspectives | 119 |
| Importance des problèmes de moisissures dans l'habitat | 121 |
| Mise en œuvre d'une enquête épidémiologique | 122 |
| Annexes | 127 |
| Références | 133 |

Introduction

Contexte

L'amélioration de la qualité de l'air intérieur constitue un axe fort de progrès en santé environnementale. Ces dernières années, la connaissance des pollutions de nos environnements intérieurs a fortement progressé, avec notamment le lancement d'enquêtes nationales sur la qualité de l'air dans les logements ou dans les écoles par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI). Si une politique active en faveur de cette problématique est menée au niveau national, en particulier au travers de plans nationaux santé environnement et des travaux de l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses¹) qui œuvre à l'élaboration de « valeurs guides de qualité d'air intérieur » (VGAI) afin de fournir une traduction sanitaire aux niveaux relevés, il n'en demeure pas moins que le champ des connaissances à explorer est large. En effet, il existe une grande diversité de polluants intérieurs avec des niveaux d'exposition variables. Les effets sur la santé attribuables sont de nature et de gravité différentes. Parmi les troubles associés à une mauvaise qualité de l'air intérieur, les pathologies du système respiratoire (rhinite, bronchite, asthme...) sont le plus souvent observées. Parmi ces manifestations, beaucoup sont de nature allergique. Cependant, la relation de causalité entre la présence de ces polluants de l'air intérieur et les effets sanitaires observés est souvent complexe à établir. D'une part, nombre de ces pathologies ne sont pas spécifiques d'un polluant donné. D'autre part, les études épidémiologiques sont souvent confrontées à la difficulté d'évaluer les expositions.

Dans ce contexte, l'ORS Ile-de-France a mené en 2005 une réflexion à ce sujet afin d'identifier les questions les plus pertinentes pour la région compte-tenu de ses spécificités. Ce premier travail a conduit à la publication d'un état des connaissances concernant les effets sanitaires de la pollution de l'air intérieur (Host *et al.*, 2005) et a souligné l'importance des problèmes d'humidité et de moisissures en termes de prévalence et d'effets sanitaires.

Les moisissures dans l'habitat : une problématique de santé publique

En zone tempérée, plusieurs centaines d'espèces de moisissures occupent en permanence notre environnement direct. A l'intérieur, les spores de moisissures en suspension dans l'air, pénétrant par les ouvertures, sont a priori les mêmes que celles retrouvées à l'extérieur. Cependant, certaines espèces trouvent dans l'habitat des substrats propices à leur développement tels que les

¹ L'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail est devenue l'Anses le 1^{er} juillet 2010.

plâtres, les papiers peints, les peintures, le mobilier... La prolifération de moisissures dans les logements est liée la plupart du temps à des problèmes d'humidité. Cette prolifération n'est pas soumise aux variations climatiques saisonnières, l'exposition potentielle des habitants est donc continue. De plus, le confinement peut contribuer à l'accumulation de spores ou fragments mycéliens ainsi que de métabolites (composés organiques volatils (COV), mycotoxines...), pouvant conduire à de fortes doses d'exposition.

Les spores fongiques, grâce à leur petit diamètre, sont capables de pénétrer dans les voies respiratoires, transportant allergènes et toxines (Stevens *et al.*, 1990). Outre les effets allergiques (Seltzer et Fedoruk, 2007), les moisissures sont impliquées dans des mécanismes infectieux (aspergillose), touchant plus particulièrement les sujets immunodéprimés (Curtis *et al.*, 2004 ; Bush *et al.*, 2006). Des effets toxiques leur sont aussi attribuables, effets liés aux mycotoxines produites par les moisissures. Toutefois, les mécanismes mis en jeu restent mal connus et les effets controversés (Beguin et Nolard, 2003 ; Seltzer et Fedoruk, 2007 ; Curtis *et al.*, 2004). Une exposition aux moisissures peut également entraîner des irritations, susceptibles de provoquer ou d'exacerber des pathologies telles que conjonctivite, rhinite ou asthme (Fung et Hughson, 2003). De nombreuses substances potentiellement irritantes sont en effet émises par les moisissures : COV, β (1-3)-glucanes, spores, débris mycéliens... (Bush *et al.*, 2006 ; Hope et Simon, 2007). Par ailleurs, les structures fongiques non viables peuvent être tout aussi nocives (allergisantes, irritantes ou toxiques) que les structures viables. D'autres effets sont suspectés tels que des symptômes généraux (fatigue, maux de tête...) mais les éventuels mécanismes n'ont pas été identifiés (Seltzer et Fedoruk, 2007).

Des études épidémiologiques, principalement scandinaves (Hagerhed-Engman *et al.*, 2009 ; Jaakkola *et al.*, 2002 ; Thorn *et al.*, 2001 ; Pekkanen *et al.*, 2007 ; Bornehag *et al.*, 2004 ; Karvonen *et al.*, 2009) ou nord américaines (Gent *et al.*, 2002 ; Koskinen *et al.*, 1999) ont été menées. Elles ont mis en évidence des liens entre la présence de moisissures et autres signes d'humidité dans l'environnement intérieur et certaines affections. Plus récemment, une méta-analyse montre des associations significatives entre la présence d'humidité et/ou de moisissures et des symptômes respiratoires tels que des symptômes des voies respiratoires supérieures, de la toux, une respiration sifflante ou de l'asthme (Fisk *et al.*, 2007). Une revue des études portant sur les liens entre l'exposition à l'humidité et aux moisissures et l'asthme conclue également à des preuves suffisantes concernant certaines associations (Sahakian *et al.*, 2008).

Une causalité et des seuils difficiles à préciser

Cependant la causalité de ces liens et les mécanismes éventuels mis en jeu restent à préciser (Bornehag *et al.*, 2004 ; Fisk *et al.*, 2007 ; Hope et Simon, 2007) et les rôles respectifs des composantes des moisissures et de l'humidité sont difficiles à distinguer. Par ailleurs, il n'existe pas d'évaluation quantitative de la relation existant entre le niveau d'exposition et le risque sanitaire. Ainsi, aucun seuil sanitaire n'a pu être défini. Ces éléments, la potentielle gravité de ces effets, ainsi que l'absence d'études réalisées en France soulignent la nécessité d'approfondir la connaissance de cette problématique pour sensibiliser les décideurs, les acteurs du bâtiment et de la santé, ainsi que le grand public et améliorer la prévention.

Spécificité de la région Ile-de-France : un parc important de logements anciens

Ce besoin est d'autant plus important en Ile-de-France que la région est caractérisée par l'importance de son parc de logements anciens (33 % des résidences principales datent d'avant 1949) et par l'importance du taux de surpeuplement, très supérieur à la moyenne nationale (19 % contre 9 % d'après l'enquête logement Insee 2006). Or, l'ancienneté de l'habitat, la mauvaise conception de l'isolation et la sur-occupation des logements sont susceptibles de favoriser la présence d'humidité à l'intérieur des logements et par conséquent la prolifération de moisissures. Ainsi, de par la spécificité de leur habitat, les Franciliens sont potentiellement exposés de façon importante à ces contaminants, et ce d'autant plus que la part du temps passé à l'intérieur des locaux s'élève en moyenne à 90 %, ce qui est supérieur à la moyenne nationale (d'après les résultats de l'enquête Insee « emploi du temps », 1998-1999).

Une amélioration des connaissances nécessaire...

Dans ce contexte, la mise en œuvre d'une enquête épidémiologique transversale dans la région pour étudier les effets sanitaires des moisissures dans l'habitat s'avèrerait utile en termes d'aide à la gestion et de sensibilisation des acteurs. En effet, une telle enquête permettrait d'améliorer la connaissance du lien entre les conditions d'humidité, le niveau de contamination fongique du logement et la santé de ses occupants, avec la mise en évidence d'une éventuelle relation exposition risque. Elle viserait par ailleurs à identifier les facteurs environnementaux et comportementaux favorisant le développement de l'humidité et des moisissures dans l'habitat en vue de dégager des recommandations pour les décideurs.

... mais une exposition aux moisissures difficile à évaluer

Néanmoins, la réalisation pratique d'une telle étude se heurte à de nombreuses difficultés, en particulier pour l'estimation des expositions aux moisissures. Cette exposition est généralement évaluée de façon indirecte, via le niveau de contamination fongique du logement. La détermination de la présence de moisissures à l'intérieur d'un logement se fait le plus couramment selon trois méthodes : 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 (quantification et identification de la flore cultivable), et enfin, utilisation de questionnaires environnementaux. Alors que les prélèvements d'air, ponctuels dans le temps, présentent des limites du point de vue de leur représentativité et de leur sensibilité, de nouvelles approches telles que la mesure des composés organiques volatils microbiens dans l'air, traceurs du développement des moisissures, ou de l'ergostérol (constituant des moisissures) ont été développées. Cependant, ces dernières techniques ne permettent pas d'identifier les espèces de moisissures contaminantes.

Réalisation d'une enquête pilote : une première étape

Ainsi, en préalable à la réalisation d'une étude épidémiologique, l'ORS Ile-de-France a réalisé une enquête pilote, afin notamment d'explorer différentes techniques d'évaluation des contaminations fongiques (mesures des traceurs dans l'air, analyse de la flore fongique sur les surfaces contaminées et questionnaire environnemental). L'objectif était d'évaluer leur pertinence et leur éventuelle complémentarité, ainsi que leur faisabilité dans le contexte d'une enquête à grande échelle. Les mesures environnementales étant difficiles et coûteuses à mettre en œuvre, la possibilité de prédire une exposition uniquement à partir de données descriptives a également été étudiée.

Ce pilote a porté sur un échantillon de 150 logements franciliens et a été réalisé en partenariat avec le Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris et le Centre scientifique et technique du bâtiment. Ce projet a reçu un soutien financier de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) dans le cadre de son appel à projet de recherche de 2006 ainsi que du Groupement régional de santé publique (GRSP) Ile-de-France pour la réalisation du recueil des données. Cette enquête a par ailleurs reçu un avis favorable du Comité consultatif sur le traitement de l'information en matière de recherche dans le domaine de la santé, ainsi qu'une autorisation de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (autorisation Cnil n°907227) en date du 23 octobre 2007.

Objectifs de l'enquête pilote

L'objectif de cette enquête pilote était de tester la faisabilité d'une étude épidémiologique à grande échelle, d'optimiser les moyens à mettre en œuvre et de garantir une bonne qualité du recueil des données.

Cette enquête pilote avait pour objectif principal de confronter différentes techniques de recueil d'indices de contamination fongique, basées sur un questionnaire environnemental, des prélèvements de surfaces contaminées et des prélèvements d'air. Ce pilote visait ainsi à tester la faisabilité des techniques sur le terrain, à vérifier la qualité des données recueillies et à étudier la pertinence des différents indices de contamination en vue d'évaluer l'exposition des individus aux moisissures. Pour ce faire, les objectifs étaient notamment les suivants :

- étudier les liens entre les indices de contamination et leurs déterminants potentiels recueillis par questionnaire ;
- dégager des profils de logement et de comportement des foyers déterminant les contaminations fongiques ;
- tester des modèles pour prédire les indices de contamination issus des mesures à partir des données issues du questionnaire.

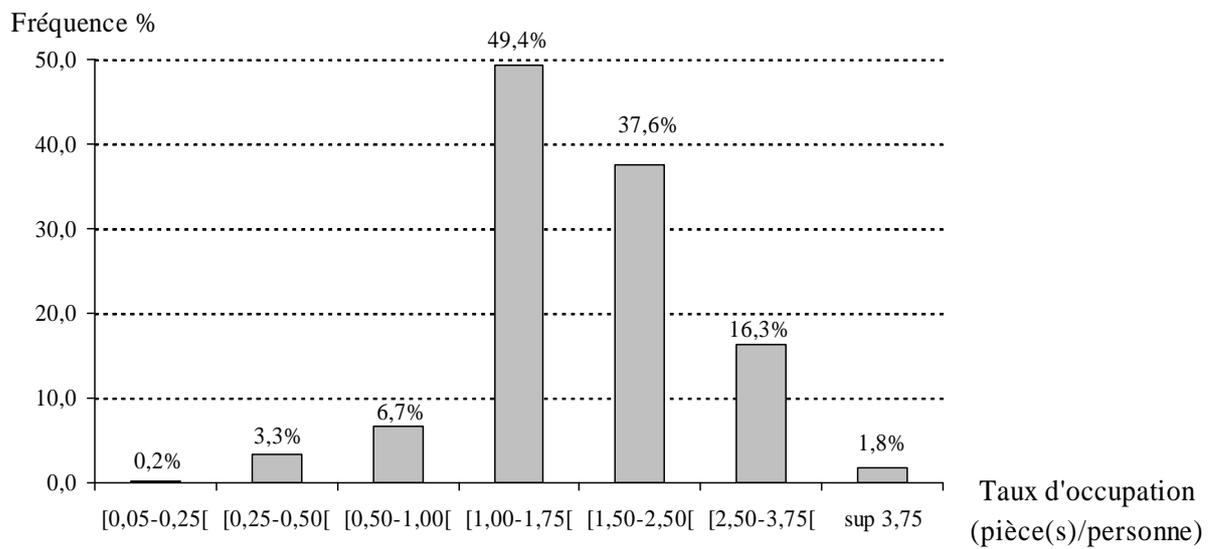
Cette enquête avait également pour objet de :

- valider la pertinence d'une stratégie d'échantillonnage élaborée afin de surreprésenter les logements contaminés par des moisissures ;
- vérifier l'adhésion des foyers à l'enquête, en particulier tester le recueil des données de santé par questionnaires auto-administrés, tester le recueil des données concernant les facteurs de confusion potentiels.

Stratégie d'échantillonnage et mise en œuvre de l'enquête

Dans le cadre de cette enquête, une stratégie d'échantillonnage visant à surreprésenter les logements contaminés dans l'échantillon a été mise en œuvre. Cette stratégie est décrite ici, ainsi que le déroulement du recueil des données. Des premiers éléments de faisabilité sont présentés, de même qu'un descriptif de l'échantillon.

Figure 1: Distribution du taux d'occupation des logements franciliens (données Insee 99)



Stratégie d'échantillonnage

L'objectif du plan d'échantillonnage adopté dans le cadre de ce pilote était de surreprésenter les logements contaminés afin d'améliorer la puissance de l'étude. A cette fin, un sondage stratifié a été mis en place, permettant a priori de sélectionner préférentiellement des logements à risque du point de vue de certaines de leurs caractéristiques. La stratification a été réalisée sur les îlots Insee, unité géographique de base pour la statistique et la diffusion du recensement.

Constitution des strates d'îlots

Trois strates d'îlots ont ainsi été construites à partir des données de recensement de l'Insee de 1999. L'ancienneté du logement et le surpeuplement constituant a priori des facteurs de risque de la présence d'humidité, une typologie de logement a été élaborée à partir des données suivantes : la date d'achèvement de la construction, le nombre d'occupants et le nombre de pièces du logement.

En effet, la présence humaine, du fait de la respiration et des activités domestiques, telles que le ménage, la toilette ou encore la cuisine, génère des quantités d'eau importantes. Ainsi, la suroccupation des logements est susceptible d'entraîner une humidité excessive à l'intérieur de l'habitat. C'est pourquoi ce critère, qui peut être approché en rapportant le nombre d'occupants du logement au nombre de pièces, a été retenu. Trois degrés de peuplement ont ainsi été définis selon la distribution du nombre de pièces par personne (cf. Figure 1) : les logements dont le nombre de pièces par personne est inférieur au 5^{ième} percentile sont considérés comme surpeuplés (soit moins de deux pièces pour trois personnes en moyenne) et constituent le troisième degré de peuplement ; les logements dont le nombre de pièces par personne est compris entre le 5^{ième} et 25^{ième} percentile, qui correspond à une pièce par personne, constituent le deuxième degré de peuplement ; les autres logements constituent le premier degré (soit plus d'une pièce par personne).

Par ailleurs, les prescriptions réglementaires en matière d'aération et d'isolation ont évolué au cours du temps, ainsi le type de ventilation et les performances thermiques des bâtiments sont a priori corrélés à l'ancienneté de l'habitat. S'agissant de la ventilation, dans les logements datant d'avant 1958, le renouvellement de l'air se faisait majoritairement par l'ouverture des portes et des fenêtres. À partir des années 60, la ventilation devait être assurée par les grilles d'aération, et enfin, à partir de 1970, la ventilation mécanique contrôlée (VMC) s'est généralisée. Ainsi, du

Figure 2 : Répartition des îlots Insee selon la strate dans le cœur de l'agglomération parisienne



fait de performances moindres s'agissant de ces critères, les logements anciens sont susceptibles d'être plus particulièrement touchés par des problèmes d'humidité. Les périodes d'achèvement de la construction définies par l'Insee recourent approximativement ces périodes, ainsi trois types de logements susceptibles de correspondre au mieux à ces différents modes de ventilation ont été définis : les logements datant d'avant 1948 (soit 36 %), les logements construits entre 1949 et 1974 (soit 39 %) et enfin les logements construits après 1974 (soit 25 %).

A partir du recouplement de ces deux variables, un indice de risque de contamination par les moisissures a été attribué à chaque logement. Les logements de degré 3 de peuplement (surpeuplés) construits avant 1975 et les logements de degré 2 de peuplement datant d'avant 1948 sont classés très à risque (soit environ 14 % des logements). Les logements de degré 1 de peuplement construits après 1948 et les logements de degré 2 de peuplement construits après 1974 sont considérés à faible risque (soit environ 50 % des logements). Les autres logements, constituant la catégorie intermédiaire, sont considérés à risque (soit environ 36 % des logements).

Les taux de logements potentiellement « à faible risque », « à risque » et « très à risque » dans l'îlot ont ensuite été estimés permettant de construire trois strates homogènes d'îlots :

- La **strate 1** est constituée des îlots comprenant une majorité de logements à « faible risque » (la proportion de logements « à risque » et « très à risque » cumulée est strictement inférieure à 50 %), soit 55 % des îlots ;
- La **strate 2** est constituée des îlots comprenant une majorité de logements « à risque » et « très à risque » (la proportion de logements « à risque » et « très à risque » cumulée est comprise entre 50 % et 90 % (inclus) et la proportion de logements « très à risque » est strictement inférieure à 75 %), soit 32 % des îlots ;
- La **strate 3** est constituée des îlots comprenant presque exclusivement des logements « à risque » et « très à risque » (la proportion de logements « très à risque » est supérieure ou égale à 75 % ou bien la proportion de logements « à risque » et « très à risque » cumulée est supérieure ou égale à 90 %), soit 13 % des îlots.

A titre d'illustration, la répartition des îlots selon la strate dans le cœur dense de l'agglomération parisienne est présentée à la Figure 2.

Les logements qui constitueront l'échantillon du pilote sont ensuite tirés au sort aléatoirement en nombre égal parmi ces trois strates selon les modalités décrites ci-après. Etant donné que la strate la plus à risque ne représente que 13 % des îlots, ce tirage augmente les chances des logements appartenant à cette strate d'être tirés au sort, leur assurant en théorie d'être surreprésentés dans l'échantillon.

Base de sondage et tirage au sort

L'annuaire des pages blanches constituait la base de sondage. Les 150 foyers participant à l'enquête ont ainsi été sélectionnés via leur numéro de téléphone renseigné dans l'annuaire téléphonique francilien. Pour cela, un plan de sondage à deux degrés a été mis en œuvre.

Dans un premier temps, 30 îlots ont été tirés au sort (10 dans chaque strate) parmi les îlots comptant plus de 20 logements (pour des limites de représentativité statistique). Afin de constituer la base de sondage, l'Insee a fourni les adresses correspondant à ces îlots, et France Télécom, les numéros de téléphone (figurant dans les pages blanches) rattachés à ces adresses.

Dans un deuxième temps, un nombre égal de numéros de téléphone a été tiré au sort pour chaque îlot. Le taux d'acceptation attendu était initialement de 40 %, ainsi pour atteindre l'effectif final de 150 logements, 13 numéros de téléphone ont été tirés au sort dans chaque îlot. Au final, le taux d'acceptation s'est révélé inférieur à ce qui était attendu, ainsi l'objectif de 150 logements n'a pu être atteint avec cette première liste de 390 logements. Un deuxième tirage au sort selon les mêmes modalités a alors été réalisé.

Recrutement des individus

Deux options de recrutement des individus au sein du foyer ont été mises en œuvre. Pour une moitié de l'échantillon, seul un adulte du foyer (âgé d'au moins 15 ans) a été sélectionné. L'algorithme de recrutement de cet individu parmi les membres du foyer a été défini comme suit : l'individu adulte (≥ 15 ans) du foyer dont la date d'anniversaire est la plus proche après la date du recueil des données est celui qui est recruté. Pour la seconde moitié de l'échantillon, tous les individus du ménage ont été sélectionnés (y compris les enfants).

Pour pouvoir être inclus dans l'échantillon, le foyer devait par ailleurs répondre aux critères suivants : occuper son logement au titre de sa résidence principale, maîtriser le français oral et écrit.

Enquêteurs et déroulement de l'enquête

Sélection et formation des enquêteurs

Le recueil des données a été confié à l'Institut de sondages BVA. L'enquête a été réalisée par quatre enquêteurs qui ont été recrutés pour leur expérience des enquêtes en face à face. Ces enquêteurs, ainsi que les responsables de BVA chargés de l'enquête, ont par ailleurs reçu une formation de base aux enquêtes épidémiologiques et aux techniques de prélèvements. Cette formation s'est déroulée sur deux journées et a été assurée par les partenaires du projet. Elle a plus particulièrement porté sur les points suivants :

- les objectifs de l'enquête et les principes de l'épidémiologie ;
- les caractéristiques des moisissures, leurs potentiels effets sanitaires ainsi que les principes de base de la microbiologie ;
- la détection des problèmes d'humidité et le « diagnostic » des systèmes de ventilation ;
- les outils de recueil : les questionnaires et l'utilisation du débit de pointe ;
- le fonctionnement des systèmes de prélèvement d'air et les techniques de prélèvements de surface, avec des exercices pratiques.

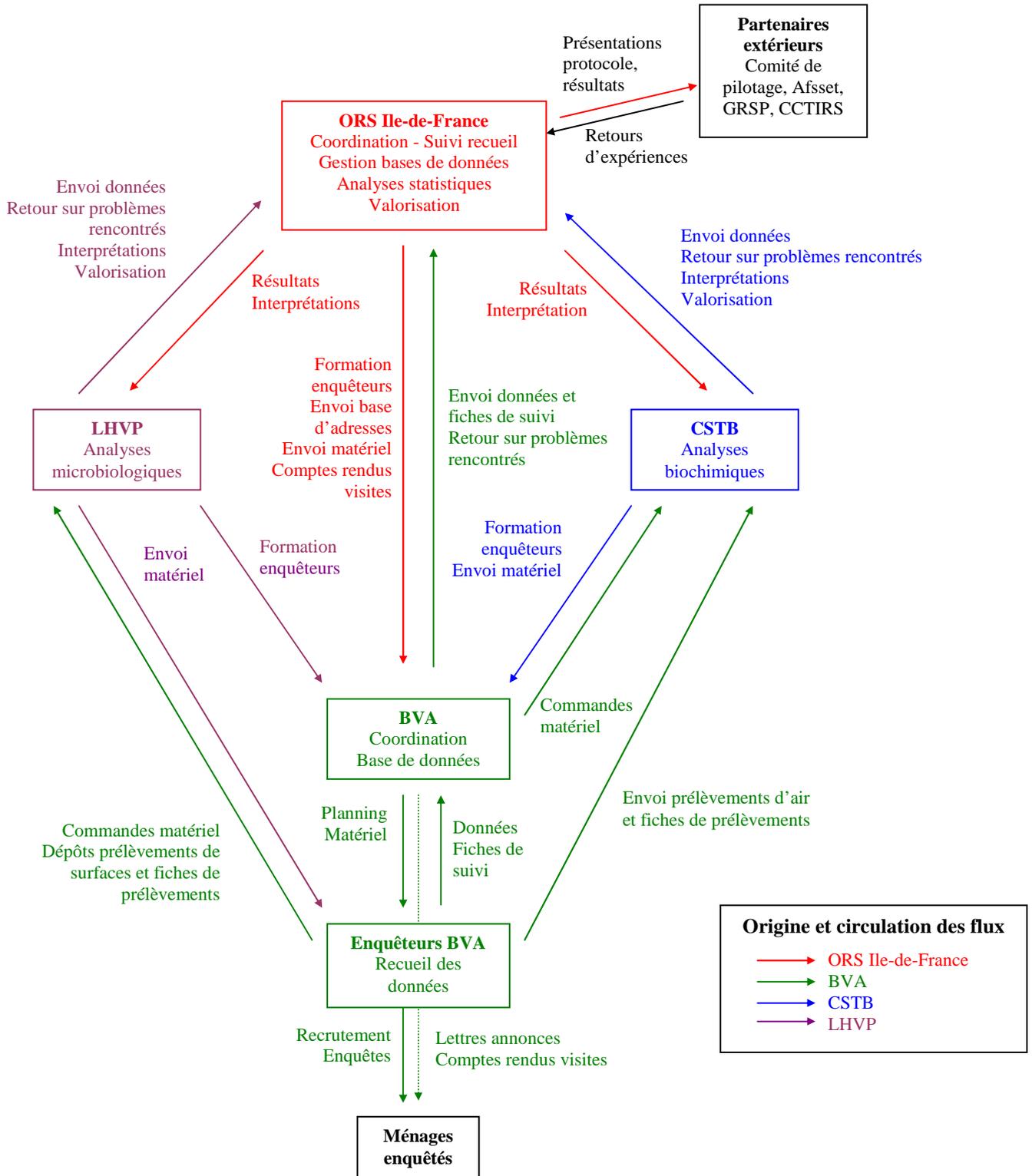
Par ailleurs, un accompagnement sur le terrain a été effectué par les chargés d'études de l'ORS.

Déroulement des enquêtes à domicile et recueil des données

Dans un premier temps, une lettre annonce (cf. Annexe 1) a été adressée à chaque foyer. Dans un deuxième temps, un enquêteur a pris contact par téléphone avec le foyer pour fixer un rendez-vous de visite. L'une et l'autre option de recrutement des individus enquêtés (un ou tous les membres du foyer) étaient alternativement appliquées. Pour un ménage donné, la prise de contact et l'enquête à domicile ont été réalisées par le même enquêteur. Lors de la première prise de contact, l'enquêteur déroulait un argumentaire pré-établi. En cas de refus, les raisons invoquées étaient documentées dans une fiche de suivi standardisée.

Lors d'une première visite à domicile, l'enquêteur renseignait un questionnaire environnemental et mettait en place trois systèmes de prélèvement d'air permettant de mesurer la quantité de biomasse fongique inhalable à l'intérieur et à l'extérieur du logement (niveau d'ergostérol, constituant de la paroi des moisissures) ainsi que des traceurs de développements fongiques (COV microbiens). Par ailleurs, un ou plusieurs questionnaire de santé étai(en)t remis au foyer.

Figure 3 : Rôle des différents acteurs de l'enquête et circulation des informations



Les systèmes de prélèvement d'air ainsi que les échantillons étaient relevés lors d'une deuxième visite qui avait lieu 7 à 10 jours plus tard. Au cours de cette deuxième visite, le cas échéant, des prélèvements de moisissures sur les surfaces contaminées étaient réalisés. L'institut de sondages expédiait les prélèvements aux deux laboratoires concernés (LHVP et CSTB).

Organisation du suivi

L'ORS entretenait des contacts réguliers avec l'institut de sondages et les laboratoires afin de suivre le recueil et assurer le lien entre les différents partenaires. Des fiches de suivi étaient renseignées par les enquêteurs afin de documenter les éventuels problèmes rencontrés. Au démarrage de l'enquête, de nombreuses réunions ont été organisées et ont permis d'adapter le protocole en prenant en compte les difficultés rencontrées sur le terrain. Par la suite, des points téléphoniques hebdomadaires avec l'institut de sondages ont été mis en place afin de faire remonter rapidement les éventuels problèmes pour prendre les mesures correctives nécessaires de manière réactive ou, le cas échéant, fournir des éléments d'interprétation aux données recueillies. Le cheminement des informations ainsi que les rôles respectifs des différents acteurs ayant contribué à cette enquête sont présentés à la Figure 3.

Communication des résultats aux ménages

A l'issue de la visite à domicile, l'enquêteur remettait aux occupants une plaquette sur les dangers des moisissures et les précautions à prendre.

Quelques mois plus tard, une lettre type ainsi qu'un compte rendu de visite personnalisé et une brochure de sensibilisation éditée par l'OQAI (« Les bons gestes pour un bon air »²) étaient adressés aux individus ayant accepté de recevoir les résultats de l'enquête. Le compte rendu consistait en un bilan qualitatif de la ventilation du logement et des problèmes d'humidité et de moisissures relevés par l'enquêteur, assorti de recommandations génériques. Sur la base des résultats de l'indice COV, pour certains logements, la possibilité de développements fongiques masqués a pu être mentionnée.

Les genres et espèces de moisissures éventuellement détectés par l'analyse microbiologique, de même que les niveaux d'ergostérol, n'étaient volontairement pas mentionnés afin de ne pas inquiéter les individus alors qu'aucun seuil sanitaire n'est actuellement défini.

² http://www.air-interieur.org/userdata/documents/Document_135.pdf

Figure 4 : Bilan des prises de contact par strate (effectifs : 405 ménages)

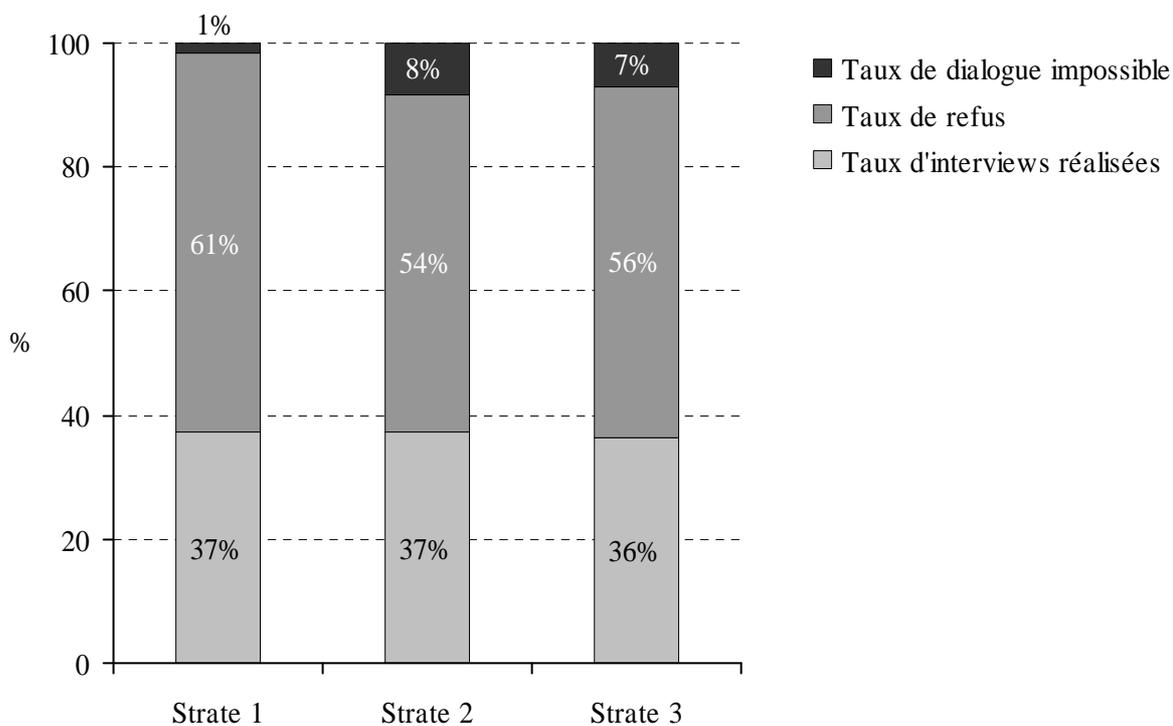
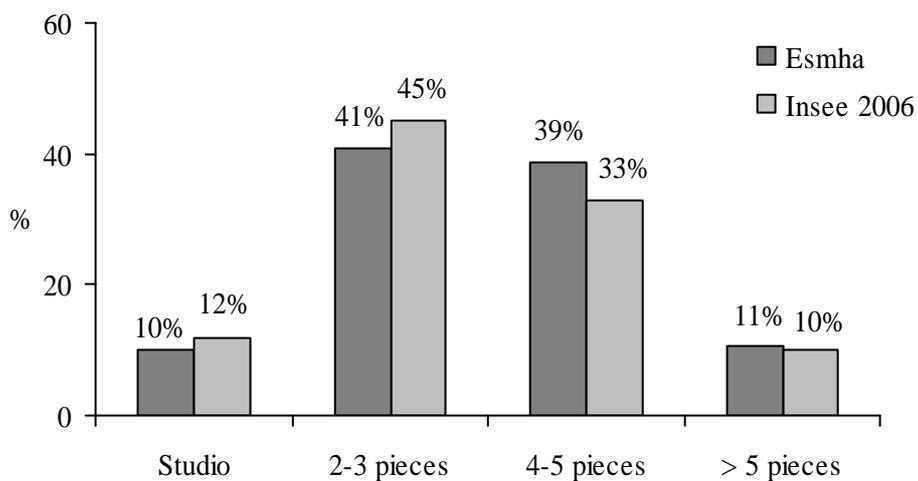


Figure 5 : Répartition des logements enquêtés et franciliens selon le nombre de pièces



Bilan des contacts et analyse des refus

89 % du fichier d'adresses fourni ont été exploités par l'institut de sondages, soit 683 ménages, parmi lesquels 5,6 % correspondaient à des faux numéros, 2,9 % n'habitaient pas à l'adresse tirée au sort et enfin 32,2 % n'ont pu être joints après 10 tentatives de contact.

Au final, 150 ménages ont été enquêtés. Parmi les 405 ménages effectivement joints, 55,6 % ont refusé de participer à l'étude. Ce taux est plus élevé pour la strate la moins à risque ($p < 0,01$) tel qu'illustré à la Figure 4. Par ailleurs, du fait d'un manque de maîtrise de la langue française, 5,7 % des ménages n'ont pu être recrutés. Ce pourcentage est significativement plus élevé dans les deux strates les plus à risque, soit 8 % et 7 % contre 1 % ($p < 0,01$).

Caractéristiques générales de l'échantillon

Dans le cadre de cette enquête pilote, la stratégie d'échantillonnage avait comme objectif de surreprésenter les logements à risque de contamination fongique, en incluant préférentiellement des logements anciens et surpeuplés dans l'échantillon. Les logements enquêtés n'ont donc pas vocation à être représentatifs des logements franciliens. Toutefois, l'échantillon est bâti de telle sorte qu'il offre une diversité de situations. En effet, l'ensemble des logements d'Ile-de-France avait une chance d'y être inclus.

Caractéristiques des logements enquêtés

Parmi les 150 logements enquêtés, 72 % se situaient en zone urbaine avec un habitat dense, 25 % en zone urbaine avec un habitat dispersé et 3 % en milieu rural. De plus, 26 % se situaient à Paris, 42 % en proche couronne et 32 % en grande couronne. Ces chiffres sont relativement proches de la répartition des logements franciliens, avec davantage de logements enquêtés en proche couronne et moins en grande couronne (en 2006, 23 % des résidences principales franciliennes étaient localisées à Paris, 37 % en proche couronne et 40 % en grande couronne) (IAU Ile-de-France, 2009). Concernant le type de logement, il s'agissait respectivement d'appartements et de maisons dans 60 % et 40 % des cas.

Le nombre de pièces des logements enquêtés (selon les critères de l'immobilier) est variable, allant du studio au cinq pièces et plus (Figure 5). Si l'on compare ces chiffres aux données régionales, la taille des logements enquêtés est très proche de celle des logements franciliens, avec une légère surreprésentation des logements de quatre pièces ou plus.

Figure 6 : Répartition des logements enquêtés et franciliens selon la date d'achèvement

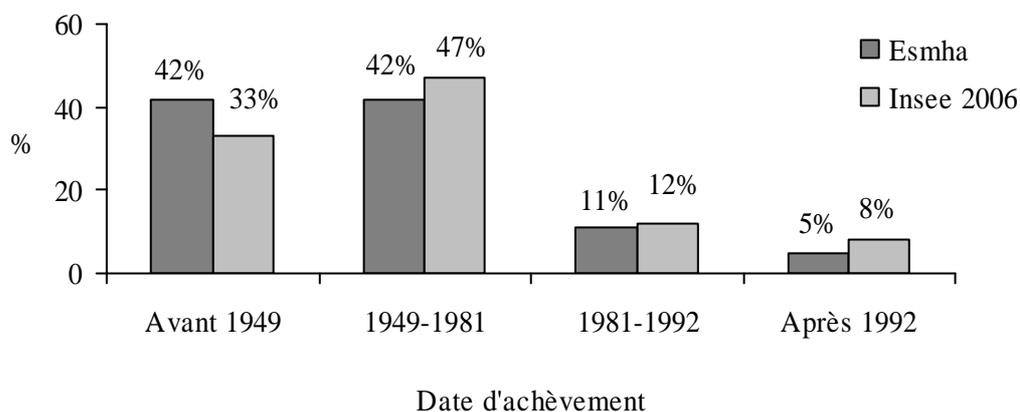


Figure 7 : Répartition des logements enquêtés et franciliens selon le nombre d'occupants

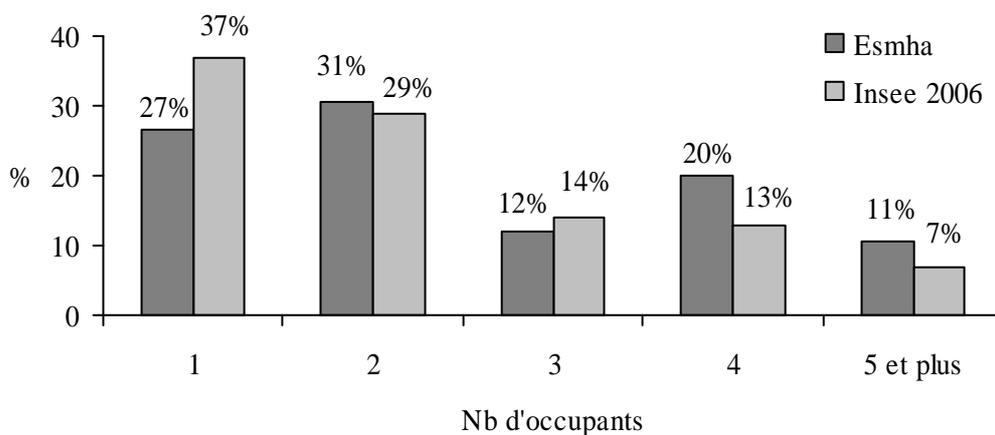
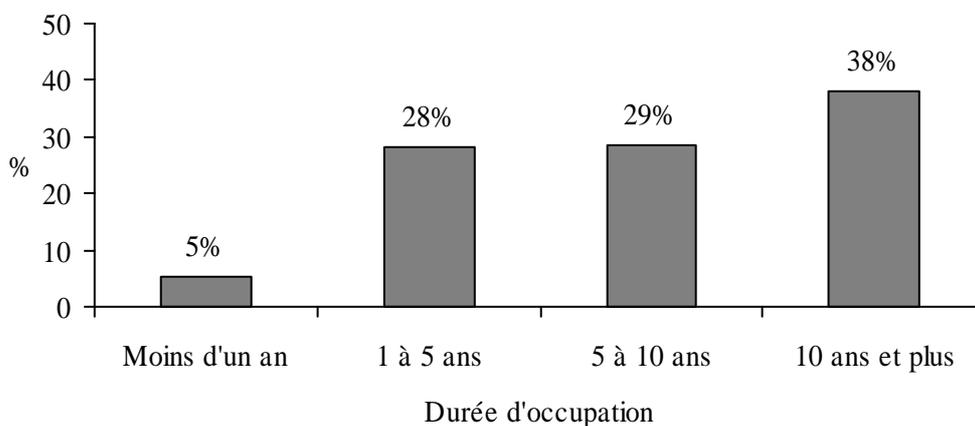


Figure 8 : Répartition des logements selon la durée d'occupation par le foyer



La stratégie d'échantillonnage, qui ciblait les logements anciens et surpeuplés, a priori plus petits, ne semble donc pas avoir atteint cet objectif. Par ailleurs, un taux de refus plus important parmi les personnes occupant de grands logements aurait pu être attendu (en raison de l'inspection du logement, de la durée de la visite de l'enquêteur). Ces personnes semblent à l'inverse avoir bien adhéré à l'enquête.

Concernant l'ancienneté du logement, pour seulement 5 % des logements, les occupants ne connaissaient pas la date d'achèvement de leur logement. Parmi les logements pour lesquels cette donnée est disponible, 42 % ont été achevés avant 1949, soit une proportion nettement supérieure à celle observée au niveau régional en 2006 (33 %) (Figure 6). La stratégie d'échantillonnage a donc bien permis de surreprésenter les logements anciens.

Caractéristiques des foyers enquêtés

Le nombre de personnes occupant en permanence³ les logements enquêtés est variable, allant d'une personne dans 27 % des logements à cinq personnes ou plus dans 11 % des logements. La répartition est légèrement différente de celle observée en Ile-de-France en 2006 (IAU Ile-de-France, 2009), avec une sous-représentation des logements occupés par une seule personne et une surreprésentation de ceux occupés par quatre personnes ou plus (Figure 7). Toutefois, les logements enquêtés étant plus grands que la moyenne régionale, ceci ne permet pas de conclure à une surreprésentation des logements sur-occupés.

Pour la majorité des logements enquêtés (54 %), le foyer était propriétaire, pour un tiers des logements, il était locataire, pour 12 %, il s'agissait d'un logement HLM et pour 1 %, il s'agissait d'un autre statut. Les foyers enquêtés étaient davantage propriétaires ou locataires comparés aux données régionales (IAU Ile-de-France, 2009), il s'agissait moins souvent d'un logement HLM ou d'un autre statut d'occupation (en Ile-de-France, 48 % de propriétaires, 23 % de locataires, 23 % de HLM et 6 % d'autres statuts en 2006).

Pour plus d'un tiers des logements (38 %), le foyer occupait le logement depuis plus de dix ans et pour seulement 5 % des logements, depuis moins d'un an (Figure 8).

³ Sont considérés comme « occupants du logement » toutes les personnes habitant habituellement ce logement, au moins 3 nuits par semaine, du lundi au vendredi. Il n'existe dans cette définition aucune notion de parenté.

Figure 9 : Age des personnes enquêtées

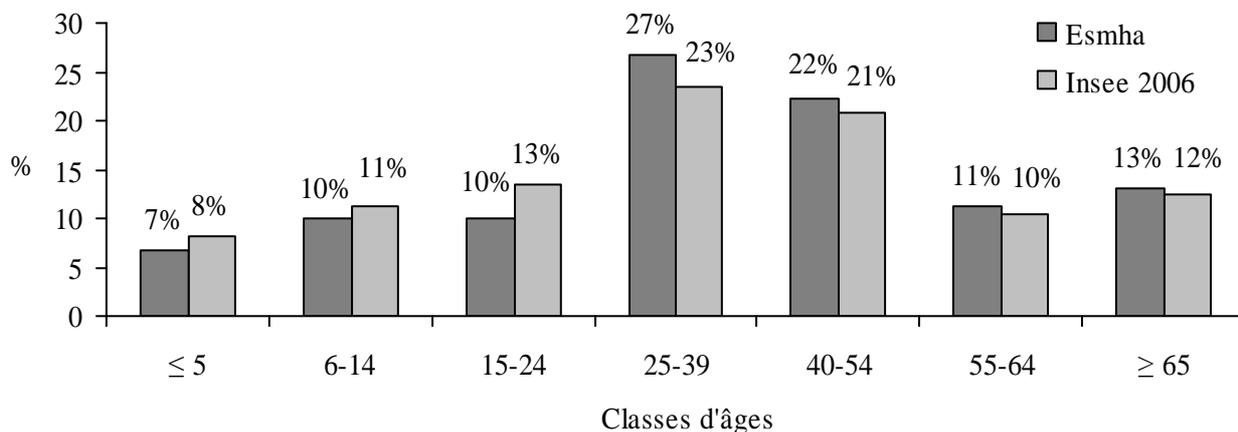


Figure 10 : Situation professionnelle des adultes enquêtés

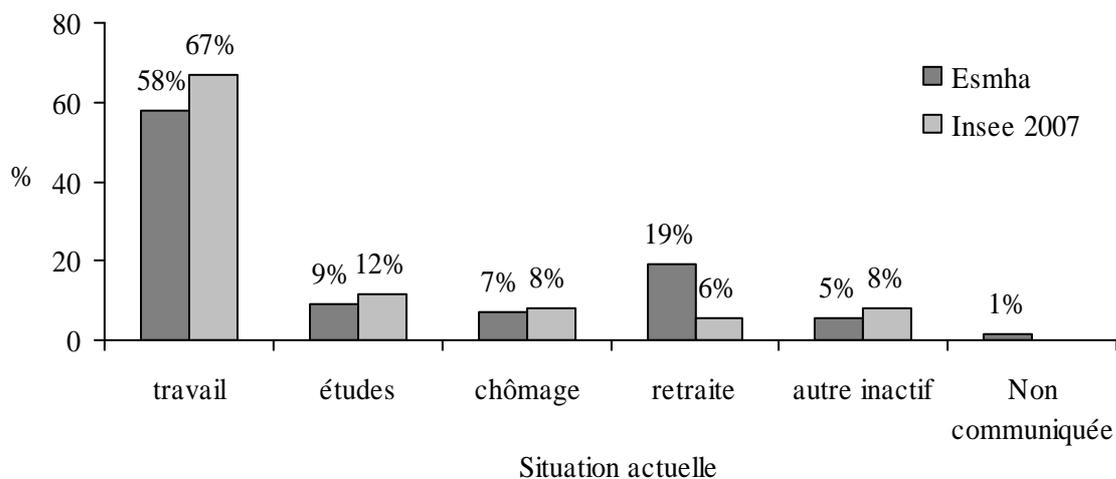
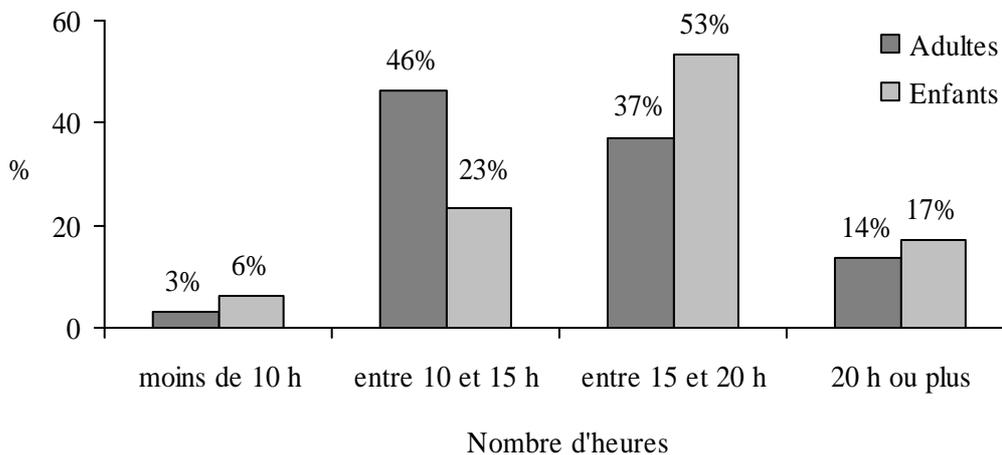


Figure 11 : Nombre d'heures passées en moyenne par jour dans le logement



Cette faible proportion d'occupants récents est favorable dans le cadre d'une éventuelle enquête épidémiologique puisque l'objectif serait d'étudier les liens entre l'exposition aux moisissures à l'intérieur du logement et des indicateurs sanitaires tels que la survenue de symptômes dans les douze mois précédant l'enquête.

Concernant le niveau de revenu des foyers, 16 % des foyers enquêtés avaient un revenu net mensuel inférieur à 900 euros par unité de consommation, 14 % un revenu compris entre 900 et 1499 euros et 46 % un revenu d'au moins 1500 euros. De plus, 24 % des foyers enquêtés ont refusé ou n'ont pas su déclarer leurs revenus. Le revenu mensuel moyen des foyers enquêtés est de 1809 euros par unité de consommation, soit un revenu inférieur au revenu moyen observé au niveau régional qui était de 2010 euros en 2006 (IAU Ile-de-France, 2009).

Par ailleurs, pour la majorité des foyers, la personne de « référence » avait un niveau d'études supérieur au bac (pour 23 % des foyers, un niveau bac+2 à bac+4 et pour 21 % des foyers, un niveau bac+5 ou plus). Pour 15 % des foyers, la personne de « référence » n'avait aucun diplôme, pour 11 % un diplôme inférieur au bac et 9 % un niveau bac. De même que pour le niveau de revenus, 21 % des foyers ont refusé ou n'ont pas su déclarer le niveau de diplôme de la personne de « référence ».

Caractéristiques des personnes enquêtées

Au total, 269 personnes ont été enquêtées par l'intermédiaire du questionnaire de santé, dont 222 adultes âgés de 15 ans ou plus et 47 enfants âgés de moins de 15 ans. La Figure 9 présente la répartition par âge de l'échantillon, comparable à celle de la population générale dans la région (Insee 2006).

Parmi les adultes, 47 % étaient des hommes et 53 % des femmes (62 % de garçons et 38 % de filles parmi les enfants). La majorité des personnes enquêtées avaient un emploi (58 %), toutefois, les retraités étaient surreprésentés par rapport à la population générale. L'échantillon d'individus était constitué de 19 % de retraités contre 6 % en population générale (Insee 2007) (cf. Figure 10).

Concernant le temps passé dans le logement, 51 % des adultes et 70 % des enfants enquêtés déclarent y passer au moins 15 heures par jour. Seuls 3 % des adultes et 6 % des enfants enquêtés déclarent y passer moins de 10 heures (Figure 11).

Figure 12 : Date d'achèvement du logement selon la strate

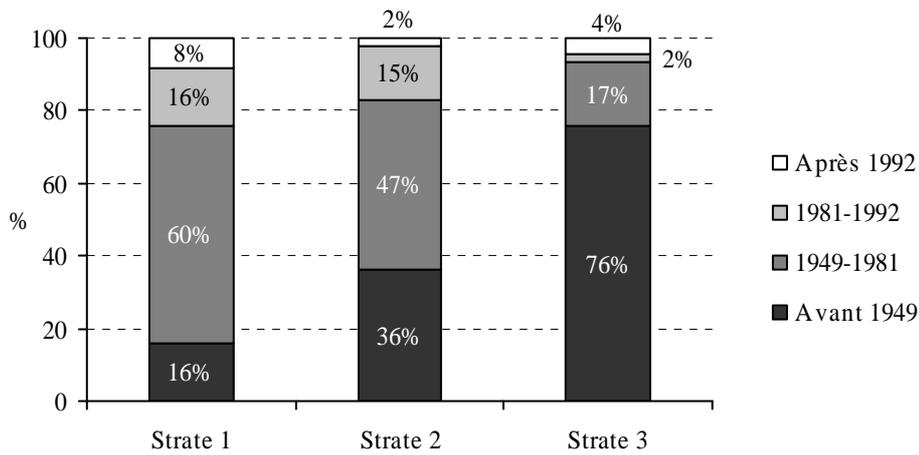


Figure 13 : Degré de population du logement selon la strate

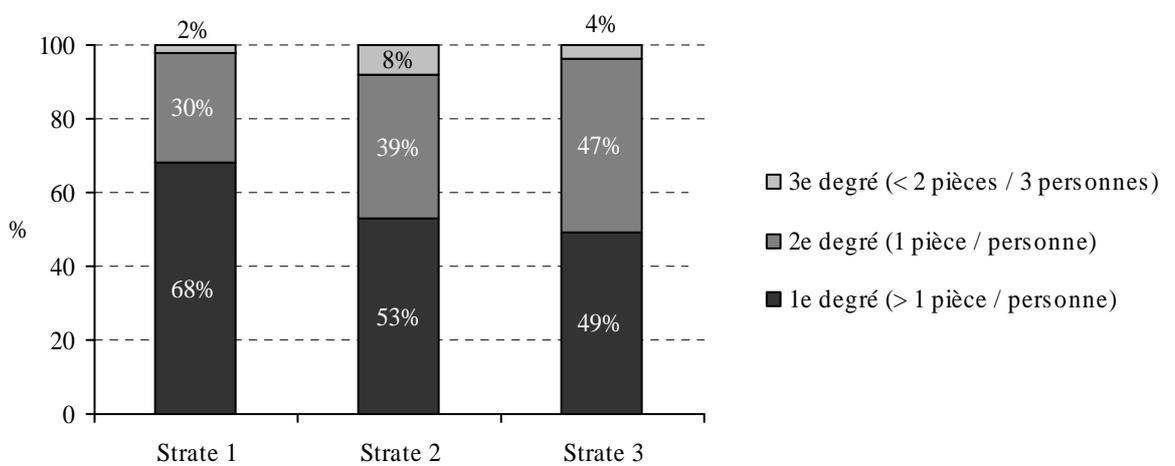
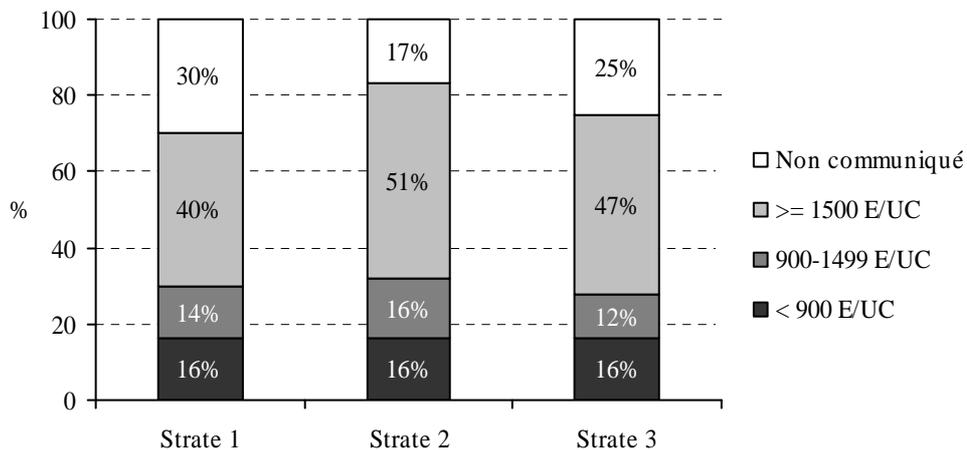


Figure 14 : Revenus du foyer par unité de consommation selon la strate



Efficacité de la stratégie d'échantillonnage

Afin de vérifier l'efficacité de la stratégie d'échantillonnage qui consistait à construire trois strates de risque de contamination fongique à partir de l'ancienneté des logements et leur degré de peuplement, les caractéristiques des trois strates ont été étudiées plus précisément.

Ancienneté de l'habitat

Concernant l'ancienneté du logement, si 16 % des logements de la strate 1 (la moins à risque) ont été achevés avant 1949, ils étaient 76 % dans la strate 3 (la plus à risque). À l'inverse, 24 % des logements de la strate 1 ont été achevés après 1981 contre 6 % dans la strate 3 (Figure 12). La stratégie d'échantillonnage a donc permis de surreprésenter les logements anciens dans la strate 3.

Surpeuplement

Concernant le degré de peuplement, les logements de la strate 1 appartenaient davantage au premier degré de peuplement (68 %) que ceux de la strate 3 (49 %). En revanche, le 3^e degré de peuplement était faiblement surreprésenté dans la strate 3 (2 % des logements de la strate 1 contre 4 % des logements de la strate 3) (Figure 13). La stratégie d'échantillonnage n'a donc pas permis de surreprésenter les logements surpeuplés.

Ceci peut être mis en lien avec le niveau de revenus des foyers enquêtés. En effet, la répartition du niveau de revenus des foyers est indépendante de la strate. Les foyers aux faibles revenus ne sont donc pas surreprésentés dans la strate 3 (Figure 14). La stratégie d'échantillonnage ne semble donc pas avoir permis de surreprésenter les logements occupés par des personnes en situation précaire, logements potentiellement insalubres. Ces personnes s'avèrent difficilement accessibles, elles ont pu davantage refuser de participer à l'enquête ou n'ont pas pu être incluses pour différentes raisons, notamment des problèmes de compréhension du français ou encore l'absence de ligne téléphonique fixe dans le logement. Par ailleurs, dans certains cas, la peur du propriétaire ou du bailleur a pu être évoquée.

Moisissures dans l'habitat : caractérisation des contaminations selon différents indices

Dans le cadre de cette enquête, différentes techniques de recueil d'indices de contamination fongique ont été mises en œuvre. Les méthodes utilisées, questionnaire environnemental, prélèvements d'air et prélèvements de surfaces contaminées, sont détaillées ici ainsi que les résultats obtenus.

Méthodes d'évaluation de l'exposition aux moisissures de l'habitat

L'exposition aux moisissures de l'habitat est généralement évaluée de façon indirecte, via la contamination fongique du logement qui peut être approchée selon différentes techniques.

Les prélèvements et mises en culture

Les moisissures, ou plus exactement les fragments mycéliens et spores, appelés aussi propagules peuvent être analysés dans l'air, sur les surfaces, dans les poussières ou dans les matériaux.

Les techniques actuelles de prélèvements dans l'air s'opèrent sur des temps d'une durée de 10 minutes au plus. Or les mécanismes de dispersion des spores sont mal connus. Selon les espèces de moisissures, le type et l'état du support, les spores se décrochent plus ou moins facilement des surfaces. De plus, les concentrations dans l'air sont fortement dépendantes de l'activité dans la pièce (remise en suspension des poussières) ; ces concentrations sont ainsi soumises à une grande variabilité au cours du temps. Ainsi, ces mesures posent des problèmes de représentativité. Néanmoins, l'échantillonnage de l'air est souvent employé de préférence au prélèvement de surface ou de poussières car il reflète a priori mieux le nombre de propagules fongiques vivantes auxquelles est exposé le système respiratoire d'une personne (Douwes et Pearce, 2003).

Ces techniques de prélèvement, quel que soit le milieu, nécessitent dans un deuxième temps l'analyse des échantillons qui passe en général par une étape de culture avant de procéder à l'identification des espèces et/ou au comptage des unités formant colonie (UFC). Cette technique présente l'inconvénient majeur de ne détecter que la flore revivifiable. Les spores mortes ou restant à l'état végétatif ne sont donc pas comptabilisées alors qu'elles peuvent avoir des propriétés toxiques et allergiques. Par ailleurs, le milieu de culture utilisé peut favoriser certaines espèces au détriment d'autres qui ne seront pas détectées. Les prélèvements d'air et de poussières et les prélèvements de surface par boîte contact permettent d'atteindre une estimation quantitative de la contamination, elle est exprimée respectivement en UFC/m³, en UFC/g de poussière et en UFC/m². Il existe également des techniques directes d'analyse au microscope après coloration des échantillons qui permettent de connaître le type de moisissures mais ne donnent pas de résultats quantitatifs.

La mesure des composants des moisissures et des métabolites

Indicateurs globaux : composants des moisissures

A côté de ces techniques de mesure directe, la contamination fongique peut être appréciée à l'aide d'indicateurs globaux tels que l'ergostérol et les $\beta(1-3)$ glucanes, composants des moisissures. La mesure de ces composés dans l'air est plus représentative car elle se fait sur des temps de prélèvement plus longs, cependant elle ne donne pas d'information sur les espèces en présence.

Mycotoxines

Les mycotoxines sont des métabolites produits par certaines espèces de moisissures dans des conditions environnementales bien particulières. Elles peuvent être responsables d'effets toxiques chez l'homme lorsqu'elles sont ingérées, inhalées ou absorbées par la peau. Plus de 400 mycotoxines ont pu être répertoriées et environ une vingtaine sont considérées comme potentiellement dangereuses (Etzel, 2002). Elles peuvent se retrouver dans les spores, le mycélium et le support de croissance des moisissures ou adsorbées sur les poussières. Le dosage des mycotoxines dans l'air fournit une information sur la toxicité de l'aérosol fongique inhalable.

Composés organiques volatils d'origine microbiologique (COVm)

Les moisissures, quelles qu'elles soient, émettent des COV dès le début de leur développement. Ces derniers ont la particularité de diffuser à travers les parois telles que les murs et les sols, et ainsi d'être détectables y compris lorsque le développement se situe derrière une cloison par exemple. Par conséquent, ce sont des indicateurs chimiques pertinents pour la détection de contaminations cachées et récentes. Aussi, afin d'enrichir les techniques utilisées pour mesurer la qualité microbiologique de l'air intérieur dans un habitat, une méthode, basée sur le calcul d'un indice chimique de contamination fongique, a été développée au CSTB (Moularat *et al.*, 2008a ; Moularat *et al.*, 2008b ; Moularat, 2007a). Cet indice est construit à partir de l'identification de certaines de ces molécules cibles qui, selon qu'elles sont présentes ou non, permettent de l'incrémenter. Cet indice prend également en compte le niveau de spécificité de chaque traceur. Ainsi, l'indice permet de confirmer ou infirmer la présence d'un développement fongique actif dans le logement investigué.

Techniques moléculaires

Des techniques d'analyses moléculaires sont également en cours de développement. Ces techniques, en particulier la PCR (Polymerase Chain Reaction) en temps réel, sont très prometteuses et devraient faire progresser rapidement les connaissances épidémiologiques dans le domaine des biocontaminants. Toutefois, elles sont encore peu utilisées dans ce domaine.

Les questionnaires descriptifs

L'évaluation de l'exposition peut se faire aussi de façon indirecte, à l'aide de questionnaires décrivant les sources intérieures de pollution. Cette évaluation est donc qualitative. Ce type d'enquête a par exemple été mis en œuvre dans l'étude Isaac (Clarisse *et al.*, 2002).

Ces questionnaires se limitent généralement à une description des caractéristiques du foyer (nombre de résidents, facteurs socio-économiques) et à une approche qualitative simple sur la qualité de vie des sujets et la qualité de l'environnement intérieur. Ces questionnaires peuvent aussi aborder la question du ressenti des occupants du logement portant sur les odeurs, l'odeur de moisi notamment, qui est très caractéristique, l'impression d'humidité et la sensation de confinement. Si de tels questionnaires sont déjà utilisés dans certaines études, il n'existe pas encore de questionnaire standardisé.

Ils peuvent être auto-administrés suite à l'envoi par courrier ou après avoir été remis en main propre par un enquêteur. L'information peut également être collectée par téléphone par le biais d'un enquêteur ou d'une infirmière spécialisée. Enfin, les données peuvent être recueillies ou complétées par l'enquêteur lui-même lors d'une visite à domicile (Clarisse *et al.*, 2002).

Les contaminations fongiques étant souvent visibles, leur présence peut être déclarée facilement par l'occupant. Cependant une inspection environnementale plus poussée est parfois nécessaire. L'inspection au domicile par un enquêteur spécialisé peut être parfois nécessaire afin d'obtenir une information fiable. En effet, certains foyers de contamination sont moins facilement détectés lorsqu'ils se situent derrière un meuble ou sous un matelas par exemple. Dans certains cas, il est même impossible de détecter visuellement la contamination lorsque, par exemple, elle se trouve derrière un revêtement. Ainsi, l'utilisation de ces questionnaires peut conduire à une sous-estimation des expositions. D'un autre côté, une sur-déclaration des expositions peut aussi se produire. En effet, les moisissures sur les joints des lavabos/baignoires/douches ou sur les huisseries des fenêtres peuvent être déclarées alors qu'elles n'ont sans doute pas une contribution significative à la contamination de l'air intérieur (Dales *et al.*, 1997).

A côté de la contamination fongique, les déterminants tels que l'humidité ou la performance du système de ventilation peuvent aussi être de bons indicateurs et sont également recueillis.

Méthodes retenues dans le cadre de cette enquête pilote

Ainsi, en l'état actuel des méthodes, l'évaluation quantitative de ces contaminations reste difficile à atteindre. Les mesurages ponctuels ont un intérêt limité car ils ne sont pas représentatifs d'une exposition chronique. Toutefois, une information plus fine sur les espèces contaminantes demeure utile. S'agissant du questionnaire, bien qu'assorti d'un certain nombre de biais et qu'il renseigne mal sur le niveau d'exposition, il semble mieux adapté aux études épidémiologiques car l'information collectée est plus représentative d'une exposition chronique et offre une meilleure sensibilité. De plus, en terme de faisabilité, pratique et financière, il constitue également un outil bien adapté dans le cadre d'enquêtes épidémiologiques à grande échelle. Les approches par mesurage et par questionnaire apparaissent donc complémentaires. Ainsi, dans le cadre de ce pilote, différents indices de contamination ont été recueillis à l'aide d'un questionnaire environnemental et de prélèvements d'air et de surface.

Détection des contaminations fongiques visibles : description de l'environnement domestique

Comme évoqué précédemment, la détection de moisissures visibles ainsi que de signes d'humidité à l'intérieur des logements constitue une première approche pour estimer la présence de contaminations fongiques susceptibles de conduire à une exposition des occupants. C'est pourquoi ces éléments ont été recueillis de manière détaillée dans le cadre de cette enquête.

Outil de recueil : le questionnaire environnemental

Ce questionnaire permettait de décrire l'environnement domestique. Il a été construit à partir du questionnaire développé au sein d'un groupe de travail du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (Conseil supérieur d'hygiène publique de France, 2006) et complété par d'autres items, développés en particulier par l'équipe de recherche de la Faculté de Pharmacie Paris V en charge de la cohorte de nouveau-nés franciliens démarrée en 2003 (Dassonville *et al.*, 2008). Ce questionnaire a été validé par le comité de pilotage. Pour améliorer la fiabilité du recueil, ce dernier a été informatisé par l'institut de sondages selon le système CAPI (Computer Assisted Personal Interview).

Le questionnaire était administré en face à face par l'enquêteur. Il comportait un premier volet renseigné par l'enquêté concernant notamment les caractéristiques du logement, l'environnement domestique, les habitudes de vie ainsi que la survenue de dégâts des eaux ou la présence de problèmes d'humidité dans le logement. Un deuxième volet était renseigné par l'enquêteur lui-même au cours de l'inspection de chacune des pièces. Il recueillait notamment les données concernant le système de ventilation, la présence de signes et problèmes d'humidité ainsi que de moisissures visibles.

Figure 15 : Exemples de photographies de surfaces contaminées par les moisissures dans les logements enquêtés



Figure 16 : Pourcentage de logements présentant des moisissures visibles selon la taille de la surface moisie

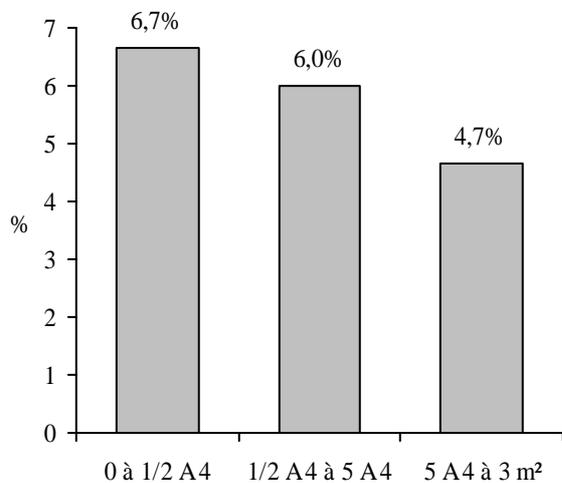
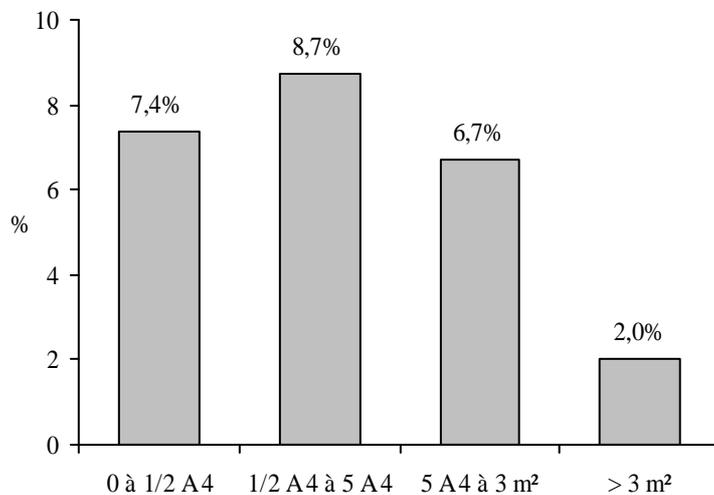


Figure 17 : Pourcentage de logements présentant des moisissures visibles et/ou des taches d'humidité selon la surface cumulée



Faisabilité et qualité du recueil des données

Lors de la première visite, les enquêtes duraient en moyenne 1h30 ; toutefois, dans 15 % des cas, cette visite a duré entre 2h00 et 2h30. Pour 95 % des logements, l'ensemble des pièces principales a pu être inspecté. Ce pourcentage élevé montre une bonne acceptation de l'enquête à partir du moment où le ménage avait accepté d'y participer. Au final, un peu plus de 1 000 pièces ont été inspectées.

Le questionnaire en lui-même était administré en moyenne en 1 heure. D'après une évaluation qualitative des enquêteurs, il était perçu comme long et répétitif. Toutefois, hormis pour les pièces non inspectées, l'ensemble des items a été renseigné. En conclusion, ce questionnaire s'avère assurer une bonne qualité de recueil des données.

Les moisissures visibles et les signes d'humidité

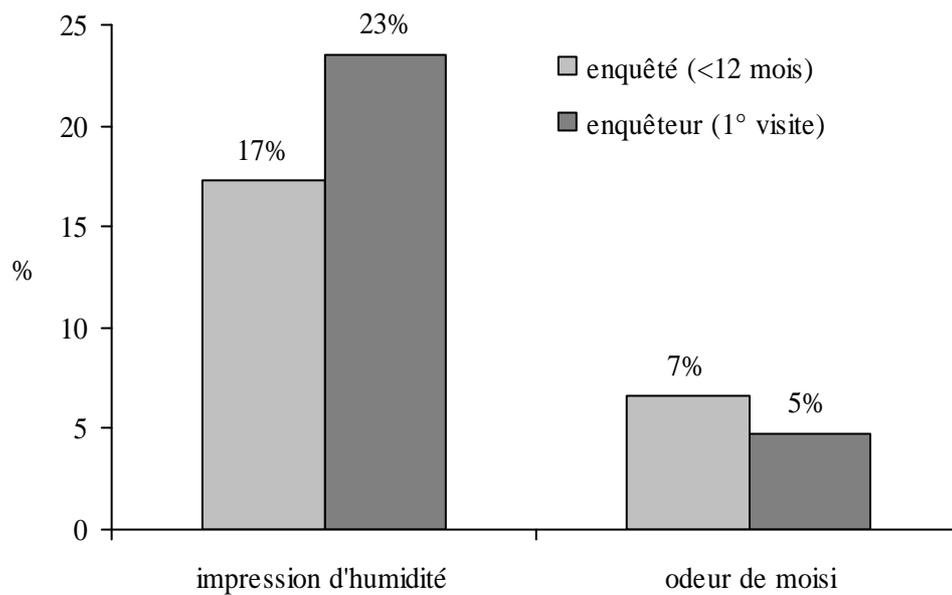
Taches de moisissures et d'humidité

Entrent dans cette définition les surfaces de mur, sol ou plafond contaminées. En revanche, les joints de carrelage ou d'étanchéité autour des éléments sanitaires, ainsi que les huisseries noircies par les moisissures en sont exclus. Ainsi, selon cette définition, 17 % des logements présentaient au moins une trace visible de moisissures, soit 26 logements (cf. Figure 15).

Pour 4 % des logements, plusieurs pièces étaient concernées. Les surfaces contaminées allaient de moins d'une demi-feuille A4 (~0,03 m²) à 3 m² (Figure 16), les tailles étant appréciées visuellement. Des photos de certaines contaminations ont pu être prises (cf. Annexe 23 pour le protocole), mais en l'absence d'indication d'échelle, il n'a pas été possible d'estimer plus précisément ces surfaces. Seules 15 % des moisissures relevées sont apparues il y a moins d'un an.

Concernant les taches d'humidité, 23 % des logements présentaient une tache d'humidité dans au moins une pièce. Dans 80 % des cas, les taches de moisissures étaient également associées à des taches d'humidité. La distinction entre taches d'humidité et taches de moisissures n'étant pas toujours aisée, un indicateur rassemblant les deux types de signe a été construit. Ainsi, 25 % des logements présentaient une tache d'humidité ou de moisissures dans au moins une pièce. Les surfaces cumulées de moisissures et/ou d'humidité allaient de moins de 0,03 m² à plus de 3 m², la répartition des logements selon ces surfaces est présentée à la Figure 17.

Figure 18 : Proportion de logements caractérisés par une odeur de moisi ou une impression d'humidité du point de vue de l'enquêteur et de l'enquêté



Autres signes d'humidité : dégradations

Les dégradations telles que peinture écaillée, papier peint décollé, enduit dégradé, peuvent traduire une humidité excessive dans le logement. Ainsi, 24 % des logements présentaient une de ces dégradations dans au moins une des pièces.

Comparaison des données déclarées et objectivées

Les résultats de ce pilote semblent indiquer une tendance à la sous-déclaration par les ménages de la présence de moisissures à leur domicile. En effet, seulement 42 % des moisissures visibles détectées par l'enquêteur étaient également déclarées par l'individu enquêté. Toutefois, pour 40 % des logements où l'occupant ne déclarait pas la présence de moisissures, une ancienne contamination était mentionnée (moisissures éliminées). Cette sous-déclaration semble concerner des surfaces contaminées de faible ampleur, en effet, plus de 90 % des moisissures non déclarées mesuraient moins de 0,03 m² (soit l'équivalent d'une demi-feuille au format A4).

A l'inverse, deux déclarations de moisissures non résolues n'ont pas été confirmées par l'enquêteur. Le constat est le même s'agissant des taches d'humidité, avec seulement 37 % des taches d'humidité relevées par l'enquêteur qui ont été aussi déclarées par l'individu enquêté.

Ces résultats soulignent, comme relevé dans d'autres études (Pinsonneault *et al.*, 2008), le manque de concordance entre les données recueillies par un inspecteur et les données déclaratives. Du fait de surfaces contaminées peu étendues, la présence de moisissures peut ne pas retenir l'attention des occupants du logement. Par ailleurs, la distinction entre taches d'humidité et taches de moisissures n'est pas toujours aisée. L'intervention d'un enquêteur peut permettre de s'affranchir d'une certaine part de subjectivité ou du moins limiter de possibles biais de déclaration.

Odeur de moisi et impression d'humidité

Pour 17 % et 7 % des logements, les enquêtés ont déclaré respectivement une impression d'humidité et une odeur de moisi dans les douze derniers mois. L'enquêteur a déclaré une impression d'humidité et une odeur de moisi à l'entrée dans le logement pour, respectivement, 23 % et 5 % des logements (cf. Figure 18). Les déclarations de l'enquêté et de l'enquêteur étaient bien corrélées ($p < 0,01$).

Détermination de la présence de germes pathogènes : prélèvements sur les surfaces et analyses microbiologiques

Lorsque des moisissures étaient visibles dans le logement, des prélèvements de moisissures sur les surfaces étaient réalisés par l'enquêteur en vue d'une analyse mycologique. Cette analyse avait pour but d'identifier les principaux genres et espèces habituellement retrouvés dans des intérieurs humides et/ou responsables d'effets sanitaires.

Matériel et méthodes

Lorsque des taches de moisissures étaient détectées lors de la première visite, l'enquêteur prévenait le LHVP pour la commande du matériel de prélèvement. Ces derniers étaient soit envoyés par courrier aux enquêteurs, soit récupérés au LHVP.

Le nombre de points de prélèvements était déterminé selon les caractéristiques des moisissures : couleur, support, localisation... Le nombre maximal de prélèvements était de cinq par logement. Pour chaque site, deux techniques de prélèvement ont été utilisées en parallèle :

- La technique « contact » : une boîte de Pétri, remplie d'un milieu gélosé au malt-chloramphénicol, était appliquée sur le support à étudier selon des conditions standardisées (pression de 25 g/cm² pendant 10 secondes) à l'aide d'un applicateur de boîte contact BIOCONTACT.
- La technique « lame » : un ruban adhésif dont les extrémités sont cartonnées était appliqué sur le support à étudier. La bande était ensuite placée sur une lame porte-objet pour le transport.

Des renseignements recueillis lors des prélèvements, tels que la nature du support, la pièce et la localisation, étaient reportés sur une feuille de route. Les prélèvements, effectués à la deuxième visite, étaient ensuite conservés au froid grâce à l'utilisation de conteneurs isothermes et acheminés rapidement au laboratoire pour analyses.

Pour les boîtes « contact », les colonies étaient dénombrées après 7 jours d'incubation à 25°C, puis isolées en vue de leur identification. Les résultats sont exprimés en nombre d'unités formant colonie (UFC) mycélienne rapporté à un dm². Ce type de prélèvement donne des résultats quantitatifs.

Concernant les lames, de retour au laboratoire, une goutte de bleu de méthylène était déposée entre la lame et le ruban adhésif puis une lamelle était disposée sur la lame pour permettre l'observation au microscope optique des éléments fongiques colorés. Ce type de prélèvement, plus simple à réaliser et à analyser, donne des résultats qualitatifs et ne permet pas une identification très poussée des genres et espèces de moisissures en présence.

Faisabilité de la réalisation des prélèvements de surface

Des prélèvements de surface ont été réalisés et accompagnés de feuilles de route pour 15 % des foyers (n=23). Parmi ces logements, des prélèvements ont été réalisés dans une cave (pièce non retenue pour l'étude), sur des taches d'humidité et sur une tache de moisissures non renseignée par l'enquêteur dans le questionnaire environnemental. Pour ce dernier cas, malgré le suivi au jour le jour du recueil des données par l'ORS via les contacts réguliers avec l'institut de sondages et les autres partenaires, aucune explication n'a pu être fournie.

Par ailleurs, des prélèvements n'ont pu être réalisés dans six logements où des moisissures visibles avaient été déclarées par l'enquêteur, soit dans 25 % des cas. Les raisons ont été les suivantes : impossibilité d'accéder à la surface contaminée, en particulier lorsque la contamination se situait en hauteur ; surface lessivée dans l'intervalle des deux visites de l'enquêteur, problème d'approvisionnement en milieux de culture (boîtes contact).

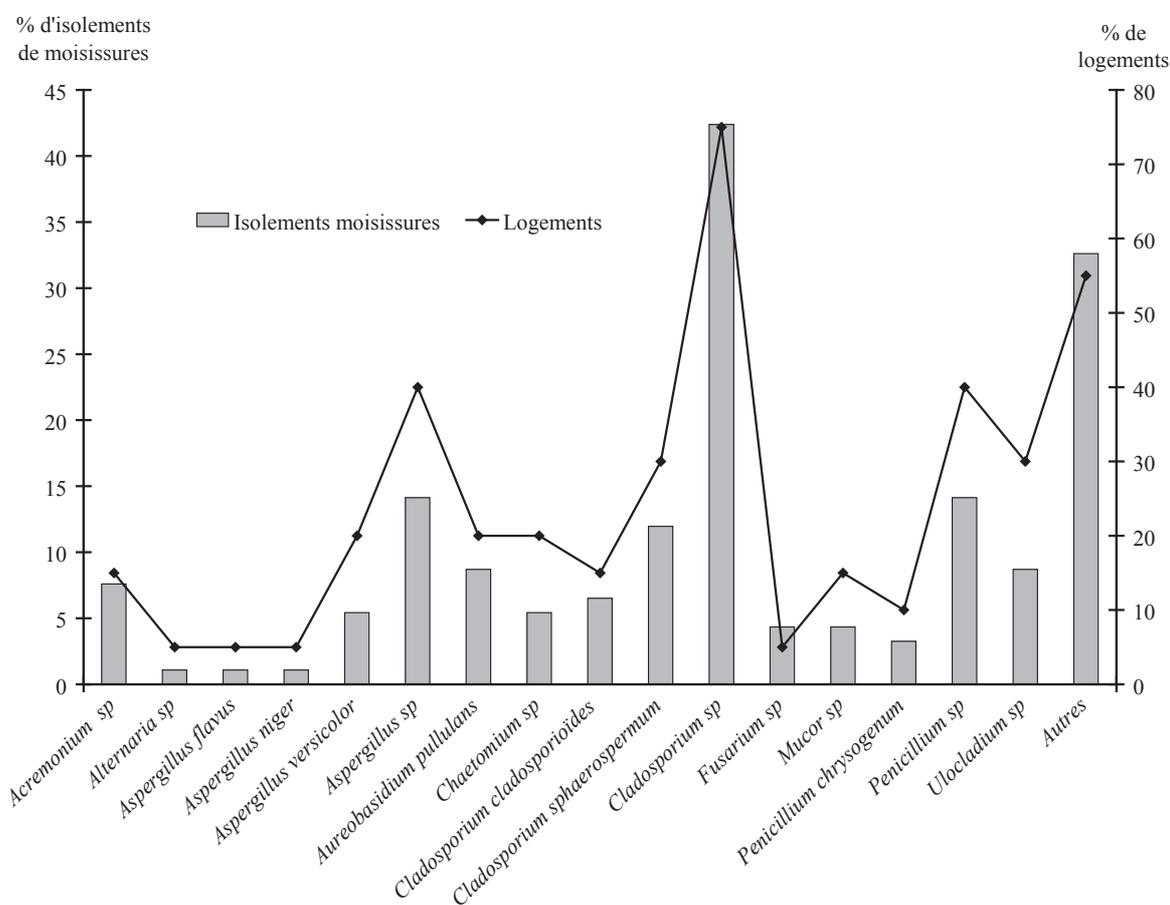
Les résultats des prélèvements effectués sur taches d'humidité n'ont pas été pris en compte. Le prélèvement réalisé dans une cave a également été exclu. Au final, l'exploitation des données a porté sur 20 logements. Les nombres de « contacts » et de « lames » étaient équivalents dans 15 logements. Dans les autres logements, une boîte contact a été doublée pour un même prélèvement dans quatre cas et une lame complémentaire a été réalisée dans un cas, ce qui augmente le nombre de prélèvements mais n'influence pas les résultats qui se sont avérés reproductibles sur les doublons concernés.

La gestion des milieux de culture a constitué une des difficultés majeures pour ces mesures. Au démarrage de l'enquête, les prélèvements de surface devaient être effectués lors de la première visite de l'enquêteur. Ce protocole imposait alors aux enquêteurs d'être munis d'un kit de prélèvement sans avoir connaissance a priori de la présence ou non de moisissures visibles. Etant donné le délai de péremption des milieux de culture qui est de 15 jours, le stock de milieux prêts à l'emploi devait en permanence être renouvelé.

Tableau 1 : Caractéristiques des prélèvements effectués dans les 20 logements

| Nombre de prélèvements dont résultats | Contacts (n=48) | Lames (n=47) |
|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| validés | 48 | 44 |
| négatifs | 1 | 0 |
| quantifiables | 5 (2 à 54 UFC par boîte) | - |
| inquantifiables | 42 | - |
| invalidés | 0 | 3 |

Figure 19 : Fréquence des moisissures identifiées par les deux techniques confondues dans 20 logements



Afin d'alléger ces aspects logistiques, il a été décidé pour la suite du recueil de n'effectuer les prélèvements que lors de la deuxième visite. Ainsi, les enquêteurs ayant constaté la présence de moisissures visibles lors de leur première venue devaient en informer immédiatement le laboratoire afin qu'il expédie rapidement les milieux qui devaient être acheminés impérativement avant la date de la deuxième visite. Or le respect d'un délai de 7 jours pour les résultats des tests de contrôle qualité sur les milieux était théoriquement nécessaire, ce qui représentait une difficulté importante. Enfin, une fois les échantillons prélevés, ils devaient être conservés au froid et rapidement acheminés au laboratoire, ce qui a constitué une contrainte forte pour les enquêteurs amenés à se déplacer dans toute l'Ile-de-France.

Le prélèvement par écouvillonnage des surfaces et le déchargement des spores fongiques sur gélose au laboratoire permettraient de pallier ces différentes contraintes.

Détermination de la flore fongique dans les logements enquêtés

Caractéristiques des prélèvements

Parmi les 20 logements pour lesquels les données des prélèvements de surface ont été exploitées, une seule pièce était contaminée dans 80 % des cas et une seule localisation concernée dans 65 % des cas. Les pièces sèches⁴ représentaient 66 % des locaux où des prélèvements ont été réalisés, avec la chambre comme pièce majoritaire (74 %). Dans les pièces humides, la salle de bain représentait 70 % des locaux contaminés.

Dans ces 20 logements, 92 prélèvements de surface ont été réalisés répartis sur les deux techniques « contacts » et « lames ». Le Tableau 1 présente les caractéristiques des prélèvements. Les résultats des prélèvements sur boîte contact montrent que 88 % des milieux de culture présentent une forte contamination (> 200 UFC par boîte) et ne sont donc pas quantifiables. L'identification des genres ou des espèces fongiques a pu être réalisée. Concernant les lames, trois résultats d'analyse ont été invalidés car l'examen direct au microscope ne montrait que des débris matériels.

⁴ Les pièces sèches sont constituées des chambres, séjours, salles à manger, bureaux, couloirs et débarras ; les pièces humides sont constituées des cuisines, salles de bain et WC.

Figure 20 : Répartition des prélèvements selon la nature du support

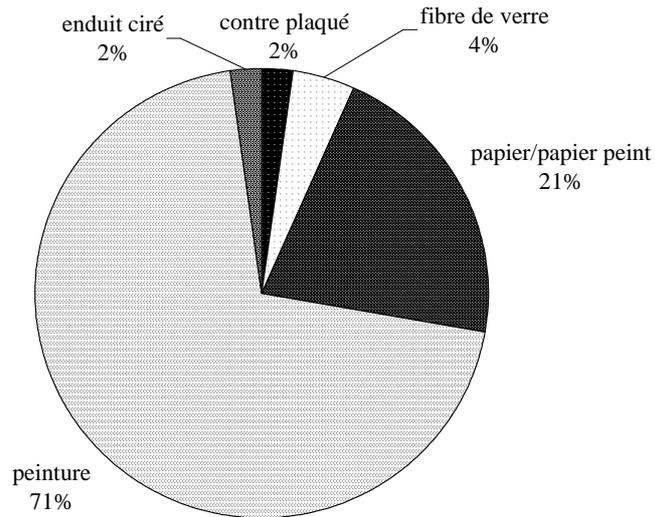
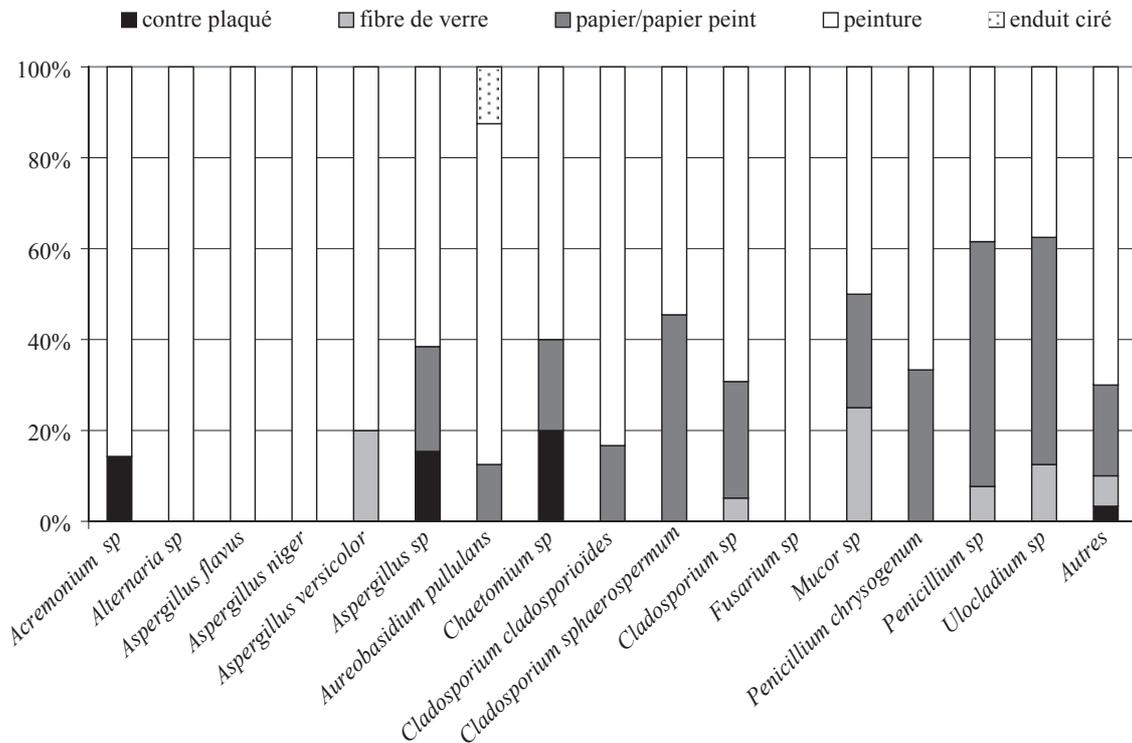


Figure 21 : Fréquence relative des moisissures identifiées selon la nature du support



Identification

L'identification des moisissures sur 92 prélèvements de surface a montré une prédominance des genres *Cladosporium*, *Aspergillus* et *Penicillium*, respectivement observés dans 80 %, 50 % et 45 % des logements où ces prélèvements ont été effectués. Une majorité de moisissures, isolée dans 55 % de ces foyers, correspondait également à la catégorie « autres », regroupant *Botrytis*, *Paecilomyces*, *Geotrichum*, *Phoma*, ainsi que des spores non identifiées et des levures (Figure 19).

Ces données sont cohérentes avec les identifications sur prélèvements de surface issues des audits environnementaux réalisés dans l'habitat en Ile-de-France (Bex *et al.*, 2006). Par ailleurs, *Cladosporium*, *Aspergillus* et *Penicillium* sont également les genres majoritaires retrouvés dans des prélèvements d'air réalisés dans d'autres études (Reboux *et al.*, 2009 ; Dassonville *et al.*, 2008).

Par ailleurs, dans ces études, il a été mis en évidence que les concentrations d'*Aspergillus* et de *Cladosporium* augmentaient significativement avec la présence de taches de moisissures visibles (Reboux *et al.*, 2009). En outre, la présence d'au moins un signe d'humidité (tache de moisissure, tache humide, dégât des eaux et odeur de moisi) représentait un facteur déterminant des concentrations en *Aspergillus* (Dassonville *et al.*, 2008).

Parmi les facteurs de développement des moisissures, l'influence de la nature du support et de la pièce a été étudiée. La peinture et le papier/papier peint représentaient la majorité des supports, où respectivement 71 % et 21 % des prélèvements ont été effectués (Figure 20).

Les trois genres dominants ont été isolés principalement sur la peinture et le papier/papier peint avec de faibles proportions sur la fibre de verre (*Cladosporium* et *Penicillium*) et sur du contre-plaqué (*Aspergillus*). *Aureobasidium*, *Mucor*, *Ulocladium* étaient également présents sur la peinture et le papier peint. *Chaetomium* a été identifié sur du contre-plaqué, du papier peint et de la peinture. En revanche, quelques espèces n'étaient présentes que sur la peinture : *Alternaria*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger* et *Fusarium* (cf. Figure 21).

Figure 22 : Fréquence des moisissures identifiées selon le type de pièce

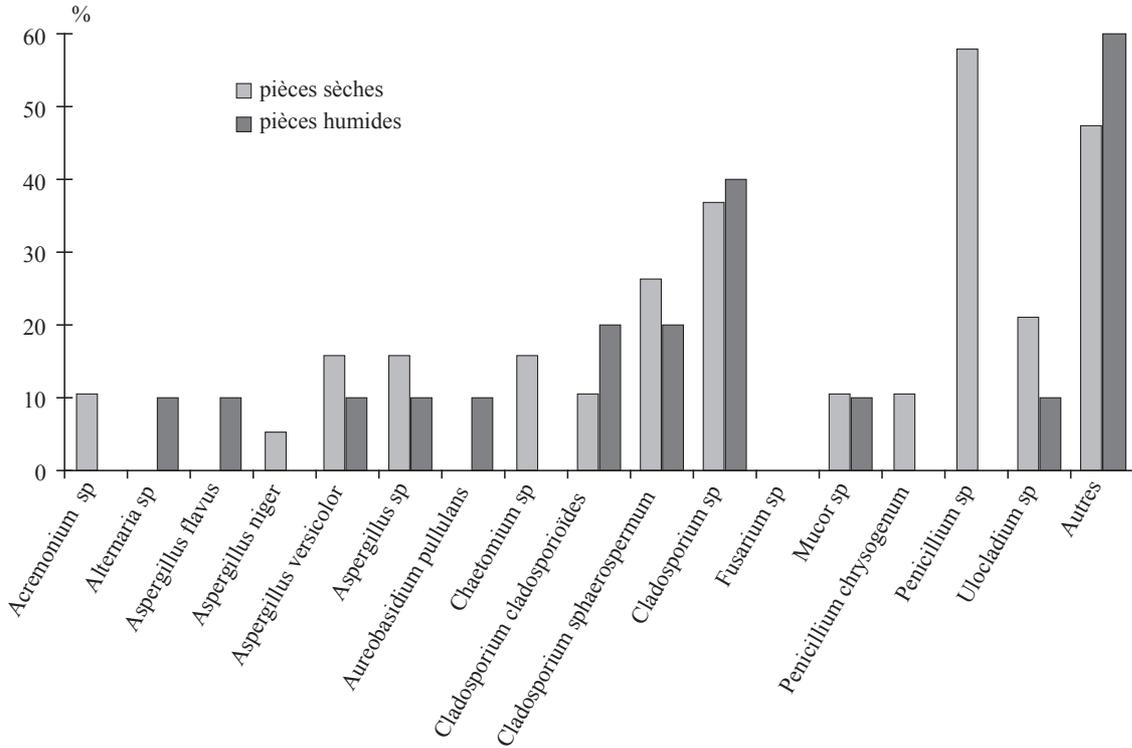
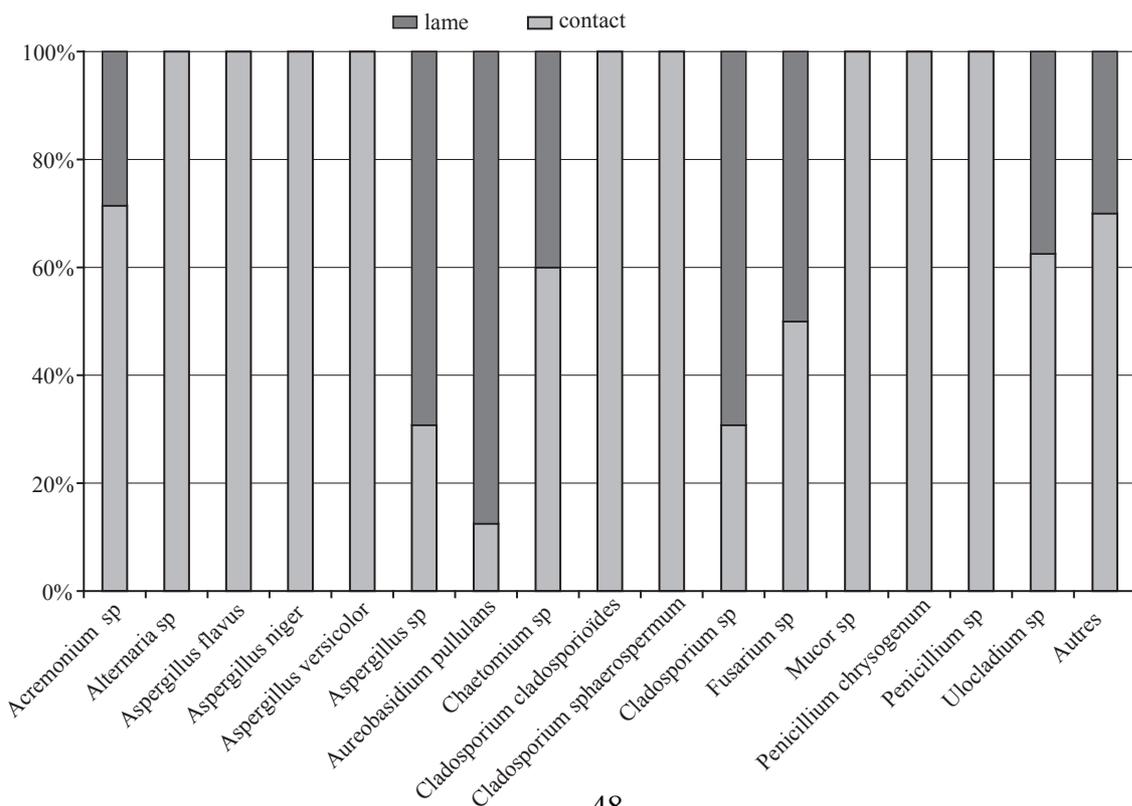


Figure 23 : Fréquence relative des espèces fongiques identifiées selon la technique utilisée



Ces résultats montrent, comme évoqué dans le document du Conseil supérieur d'hygiène publique de France de 2006 (Conseil supérieur d'hygiène publique de France, 2006), que certaines espèces fongiques ne sont pas particulièrement spécifiques d'un support donné, notamment *Penicillium*, *Aspergillus* et *Acremonium*. En revanche, dans cette étude, d'autres moisissures ont été isolées régulièrement sur le papier peint (*Chaetomium*, *Penicillium*, *Cladosporium*) et sur la peinture (*Penicillium*). Le développement fongique dépend du support lui-même mais également de son encrassement qui peut varier au cours du temps, d'où la difficulté d'associer un type de support à des espèces fongiques particulières.

La fréquence des moisissures selon la nature des pièces a montré une plus grande proportion des germes *Aureobasidium pullulans*, *Cladosporium cladosporioïdes*, *Alternaria* sp et *Aspergillus flavus* dans les pièces humides (n=10), espèces fongiques également retrouvées dans une étude sur la contamination des salles de bain japonaises (Conseil supérieur d'hygiène publique de France, 2006). En revanche, *Acremonium* sp, *Penicillium* spp, *Fusarium* sp, *Chaetomium*, *Aspergillus niger* ont été uniquement identifiées dans les pièces sèches (n=19) (cf. Figure 22).

Comparaison des techniques de prélèvement

Dans cette étude, deux techniques de prélèvement ont été utilisées, les fréquences d'identification des moisissures selon la technique sont présentées dans la Figure 23.

La technique de prélèvement utilisant une lame avec examen direct permet d'identifier plus rapidement les spores de morphologie caractéristique (*Cladosporium*, *Aureobasidium*, *Chaetomium*...) tandis que les spores de petit diamètre sont plus difficiles à différencier, notamment *Penicillium*, *Aspergillus*.

Quant à elle, la technique de prélèvement à l'aide de boîte « contact » suivie d'une mise en culture des spores fongiques permet d'identifier plus de genres et d'affiner jusqu'à l'espèce fongique, ce qui représente un intérêt dans la recherche des espèces responsables d'effets sanitaires.

Figure 24 : Fréquence relative des genres fongiques identifiés selon la technique

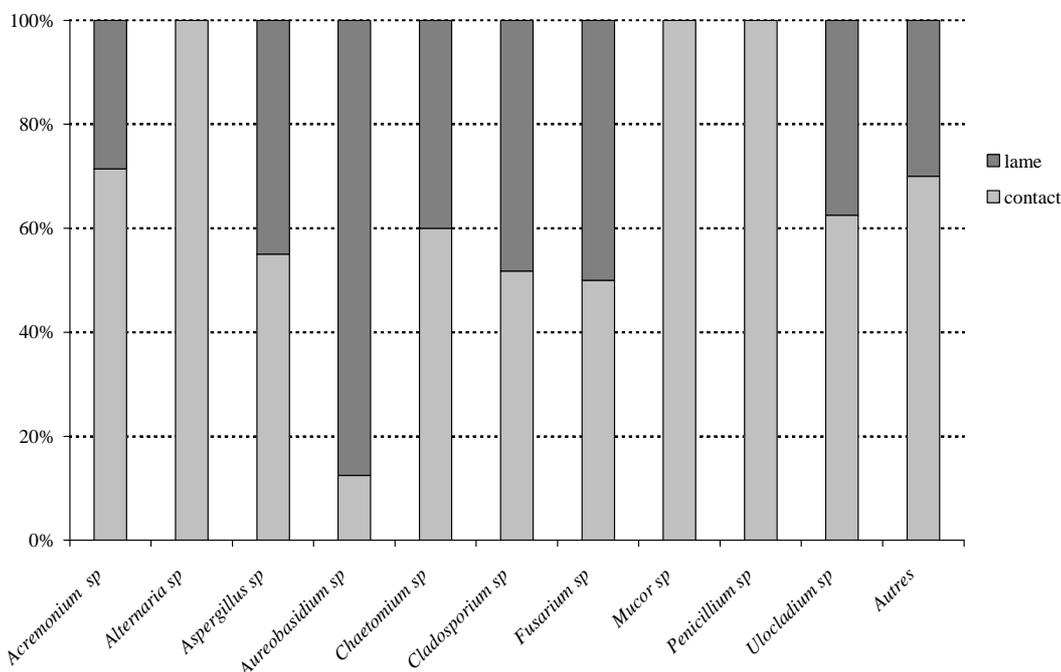


Tableau 2 : Nombre de logements où ont été identifiées des moisissures à effet pathogène

| | Type d'effets | | | |
|---------------------------|---------------|---------|------------|-----------|
| | Allergisant | Toxique | Infectieux | Alvéolite |
| Aucune moisissure | 2 | 14 | 15 | 7 |
| 1 moisissure | 7 | 5 | 4 | 12 |
| 2 moisissures différentes | 8 | 1 | 1 | 1 |
| 3 moisissures différentes | 3 | | | |

Tableau 3 : Moisissures fréquemment rencontrées en environnement intérieur humide et leurs effets pathogènes

| Nom | Effet allergisant | Effet toxique | Effet infectieux | Alvéolite |
|------------------------------------|-------------------|---------------|------------------|-----------|
| <i>Acremonium</i> | x | | | |
| <i>Alternaria alternata</i> | x | | | |
| <i>Aspergillus flavus</i> | x | | x | |
| <i>Aspergillus niger</i> | | | x | |
| <i>Aspergillus versicolor</i> | x | x | | x |
| <i>Aureobasidium</i> | x | | | |
| <i>Chaetomium</i> | x | | | |
| <i>Cladosporium sphaerospermum</i> | x | | | |
| <i>Fusarium</i> | x | | x | x |
| <i>Mucor</i> | x | x | x | x |
| <i>Penicillium</i> | x | | | x |

Source : CSHPF, 2006

Cependant, le regroupement des espèces du même genre a montré qu'à l'exception de *Alternaria*, *Mucor*, *Penicillium* et autres, les deux techniques donnent des résultats assez proches, notamment pour *Cladosporium*, *Aspergillus*, *Chaetomium* et *Fusarium* (Figure 24).

Choix du point de prélèvement

Des prélèvements de surface réalisés sur des taches d'humidité dans deux des logements de l'étude montrent la présence de moisissures, ce qui illustre la difficulté de faire la distinction entre taches d'humidité ou de moisissures. En effet, lors de la formation des enquêteurs, en cas de doute sur la nature des taches, il a été proposé d'effectuer les prélèvements.

Dans une étude à grande échelle, une systématisation des prélèvements sur des surfaces humides ou moisies avec des techniques simples comme la lame peut présenter une solution.

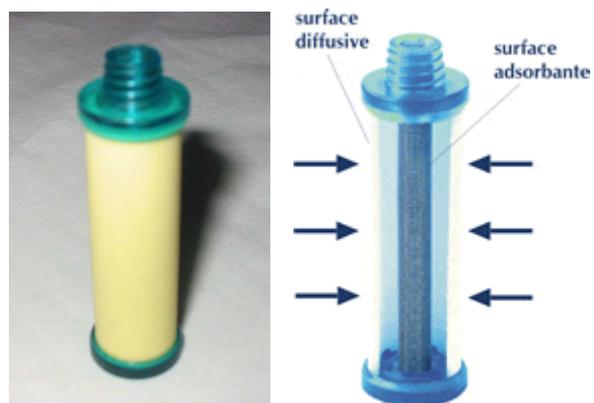
Identification de la flore pathogène

Les moisissures à effet allergisant ont été isolées dans 90 % des logements où les prélèvements ont été effectués, suivies de celles responsables d'alvéolite, isolées dans 65 % des cas. Les autres espèces fongiques à effet toxique et infectieux ont été respectivement identifiées dans 30 % et 25 % des foyers.

Dans 40 % des logements, deux espèces allergisantes différentes étaient présentes et dans 15 %, trois moisissures à effet allergisant étaient retrouvées (Tableau 2). En revanche, 10 % des logements ne présentaient pas de moisissures à effet sanitaire reconnu.

Les moisissures identifiées dans les différents logements de l'étude et responsables d'effets pathogènes sont présentées dans le Tableau 3 extrait du document de la DGS (Conseil supérieur d'hygiène publique de France, 2006).

Figure 25 : Photo et schéma du principe d'un corps diffusif Radiello



Détection des contaminations fongiques actives : mesure des COV microbiens

L'indice chimique de contamination fongique basé sur l'identification de molécules cibles (COV microbiens) développé au CSTB (Moularat *et al.*, 2008a ; Moularat *et al.*, 2008b ; Moularat, 2007a) a été calculé pour chaque logement investigué afin de confirmer ou infirmer la présence d'un développement fongique actif.

Matériel et méthode

Les prélèvements de COV ont été réalisés par échantillonnage diffusif sur un adsorbant solide de type carbograph 4. Un tube à diffusion de la marque Radiello (Fondazione Salvatore Maugeri, Clinica del Lavoro e della Riabilitazione – IRCCS, Centre de Recherche Environnementale, via Svizzera, 16 – I 35127 PADOVA) est employé.

La cartouche cylindrique, de diamètre externe 4,8 mm, contient 300 mg de charbon graphité (Carbograph 4). Cette cartouche était placée avant le prélèvement dans un corps diffusif en polyéthylène (Figure 25). Cette opération était réalisée par l'enquêteur lors de la première visite.

Le point de prélèvement se situait entre 1 mètre et 1,5 mètres de hauteur. Les tubes passifs étaient exposés sur site durant 7 à 10 jours. Ils étaient relevés lors de la deuxième visite et étaient immédiatement expédiés au CSTB par Chronopost accompagnés de la feuille de prélèvement complétée. Après exposition, les cartouches étaient conservées au réfrigérateur avant analyse.

La chaîne analytique utilisée pour analyser les COV consiste en la combinaison de deux techniques :

- la chromatographie en phase gazeuse (GC) utilisée pour séparer les COV ;
- la spectrométrie de masse (MS) employée pour identifier ces composés.

Après l'analyse des chromatogrammes et spectres associés, les résultats sont comparés à une bibliothèque de spectres de masse (NIST, 1998).

Figure 26 : Mise en place des prélèvements d'air dans les logements enquêtés

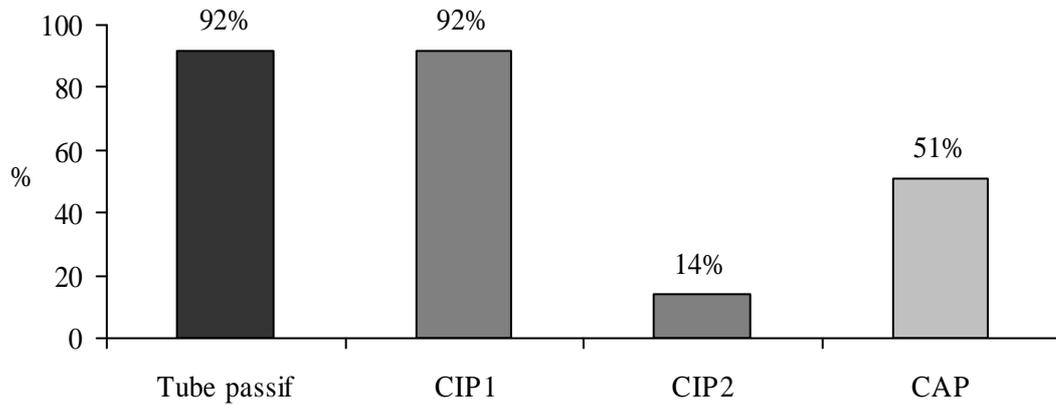


Figure 27 : Résultats de mesures dans l'air disponibles

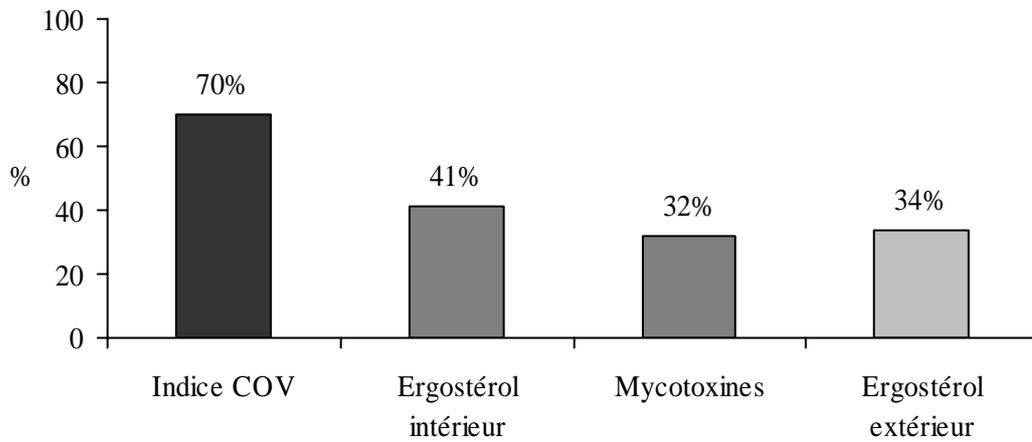
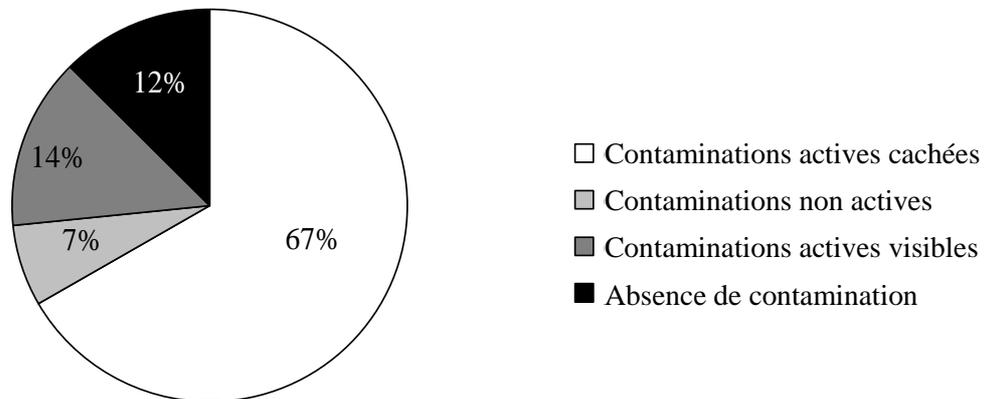


Figure 28 : Proportion de contamination fongique dans les logements analysés



Faisabilité de la réalisation des prélèvements

Le tube passif permettant l'analyse des COV d'origine fongique a pu être mis en place dans 92 % des logements enquêtés (Figure 26). Les résultats ont pu être exploités pour 105 logements, représentant ainsi 70 % de l'ensemble des logements investigués (Figure 27).

La pose du tube diffusif n'a pas engendré de réticence auprès des occupants et les enquêteurs n'ont pas fait part de difficultés pour la pose de ce capteur. L'absence de bruit et de branchement électrique pour cette mesure est un atout incontestable pour ce type d'enquête.

Les pertes liées à ce prélèvement sont principalement dues à des dégradations de tubes lors du transport par la poste ou des problèmes d'acheminement. Dans certains cas, le capteur semble avoir été exposé à une source de pollution, plusieurs hypothèses peuvent alors être émises sur l'origine de cette contamination du tube : sur le site de prélèvement, lors du transport, ou encore sur la chaîne analytique. Aussi, la mise en place d'une stratégie d'acheminement du capteur vers le laboratoire par un transporteur pourrait augmenter significativement le taux d'échantillons analysables.

Contaminations fongiques actives dans les logements enquêtés

Parmi les logements analysés, 80 % présentaient un développement fongique actif. Cette proportion est plus élevée que celle observée au niveau national qui est de 37 % de cas de développement fongique actif, que la contamination soit visible ou non (Moularat *et al.*, 2008).

La comparaison entre les cas de contaminations visibles et non visibles permet de distinguer quatre situations :

1. Indice de contamination positif et absence de moisissures visibles :
« *contaminations actives cachées* »
2. Indice de contamination positif et présence de moisissures visibles :
« *contaminations actives visibles* »
3. Indice de contamination négatif et présence de moisissures visibles :
« *contaminations non actives* »
4. Indice de contamination négatif et absence de moisissures visibles :
« *absence de contamination* »

La Figure 28 présente la répartition de ces situations pour les 105 logements analysés.

Si, dans cette enquête, les cas de contaminations fongiques sont particulièrement nombreux comparés à d'autres études utilisant la même mesure, la proportion de moisissures cachées parmi les logements contaminés (moisissures visibles et/ou développement actif) reste équivalente à celle rencontrée dans les logements citadins (76 % ici contre 80 % dans une étude composé de 47 logements citadins) (Moularat *et al.*, 2010). Il est à noter que la construction de l'échantillon ne permet pas d'être représentatif d'un type de logement, les comparaisons avec d'autres études doivent donc être faites avec prudence.

Ainsi, 76 % des logements contaminés de l'étude ne présentaient pas de dégâts visibles liés aux moisissures. Comme cela a pu être mis en évidence dans d'autres travaux, ces proportions confirment que l'examen visuel est susceptible de sous-estimer le nombre de logements effectivement contaminés (Dales *et al.*, 1997).

Par ailleurs, dans 7 % des logements, les résultats fournis par l'examen visuel et l'indice semblent, en première approche, contradictoires, le premier révélant la présence de moisissures alors que le second l'exclue. Deux hypothèses peuvent alors être émises :

- une erreur d'appréciation de l'enquêteur qui a pu confondre taches visibles d'humidité ou de salpêtre par exemple avec un développement fongique ;
- le développement fongique a pu être stoppé suite à une modification au sein de l'environnement intérieur tel que la réparation d'une fuite d'eau.

Mesure des concentrations de la biomasse fongique dans l'air : dosage de l'ergostérol

Les moisissures contiennent dans leur membrane cellulaire un ester d'ergostérol dont l'alcool associé est commun à la majorité des micromycètes⁵. Il s'agit d'un stérol cristallin de formule $C_{28}H_{43}OH$.

Le dosage de l'ergostérol est couramment utilisé pour déterminer la contamination de substrats solides : céréales (Seitz *et al.*, 1979), sols (Grant et West, 1986), matériaux de construction (Pasanen *et al.*, 1999), poussières de maisons (Alexson *et al.*, 1995), ce dosage est également utilisé pour estimer la concentration fongique aéroportée des environnements intérieurs (Miller et Young, 1997 ; Robine *et al.*, 2005). Ainsi, ce dosage, couplé à un appareil de collecte à coupelle rotative, permet d'évaluer près d'une semaine d'exposition cumulée en quantifiant la biomasse fongique totale.

Matériel et méthode

La collecte des aérosols fongiques a été effectuée à l'aide de Capteurs Atmosphériques de Poussière pour les mesures en extérieur (CAP, Arelco) et de Capteurs Individuels de Poussière pour les mesures en intérieur (CIP, Arelco). Les capteurs sont munis d'une coupelle rotative contenant une mousse en polyuréthane surmontée d'une tête de prélèvement spécifique (sélecteur) permettant de sélectionner ici la fraction inhalable ($Da_{50} < 100 \mu m$, en conformité avec les normes CEN 481 et ISO TR 7708). L'air est alors aspiré à un débit de 10 L/min.

Les prélèvements étaient effectués sur une durée de 7 à 10 jours, assurant ainsi une bonne représentativité de la mesure de l'exposition des personnes (Robine *et al.*, 2005). Les deux types de capteurs étaient mis en place par l'enquêteur lors de sa première visite, celui-ci notait également les heures de pose sur les feuilles de prélèvement relatives à chaque type d'appareil. Par ailleurs, une feuille de suivi du déroulement de la semaine de prélèvement était remise aux occupants afin qu'ils renseignent les éventuels événements ayant pu perturber les mesures, ainsi que les conditions d'aération du logement durant la période. Lors de la deuxième visite, les appareils étaient retirés et les échantillons, accompagnés des feuilles de prélèvement, étaient acheminés au laboratoire par Chronopost.

⁵ Champignons microscopiques

Après extraction des structures fongiques (spores et hyphes), l'ergostérol était dosé par HPLC. Ce dosage, qui s'appuie sur l'absorbance de cette molécule à 281 nm dans l'UV, permet d'estimer quantitativement la biomasse fongique totale (Moularat, 2007). La limite de quantification atteinte est de 0,5 ng d'ergostérol par m³ d'air prélevé, soit une valeur théorique de 150 spores/m³.

Faisabilité de la réalisation des prélèvements d'ergostérol

Deux prélèvements d'ergostérol ont été prévus pour chaque logement (un à l'extérieur et un à l'intérieur). Pour ce faire, deux CIP ont été mis en place à l'intérieur du logement et un CAP à l'extérieur. Le premier CIP a pu être mis en place dans 92 % des logements enquêtés, le second dans seulement 14 % des logements (Figure 26), essentiellement en raison de pannes des appareils. Le CAP, quant à lui, a pu être mis en place dans 51 % des logements. Les principales raisons pour lesquelles il n'a pas pu être mis en place sont l'absence de balcon, de rebord de fenêtre ou encore la peur d'un vol de l'appareil (appartements au rez-de-chaussée). Certains enquêtés ont également refusé la mise en place de ces appareils de mesure, en particulier pour des raisons de gêne lié au bruit du préleveur.

Parmi les échantillons recueillis, seule une partie a pu être analysée, principalement à cause de problèmes lors de la collecte. Certains CIP ont notamment été débranchés avant la fin du prélèvement.

Or, les niveaux d'ergostérol ont été estimés en rapportant la concentration mesurée dans l'échantillon recueilli au volume prélevé. Alors que les préleveurs utilisés en extérieur (CAP) étaient munis d'un compteur, les temps de prélèvement des appareils utilisés à l'intérieur (CIP) n'étaient connus que par les heures de mise en place et de retrait. Si les occupants du foyer avaient pour consignes de noter précisément les événements susceptibles de perturber la mesure, tels que pannes, mise hors tension... ainsi que le moment de leur survenue, il n'a pas été possible de vérifier ces déclarations. Ces éléments ont été pris en compte pour le calcul du temps de prélèvement pour ces appareils, toutefois, s'il subsistait un doute (échantillon « clair », appareil hors tension lors de l'enlèvement...), la mesure a été invalidée.

Ainsi, 51 échantillons d'ergostérol extérieur ont été réellement analysés et 61 pour l'ergostérol intérieur, soit pour respectivement 34 et 41 % de l'échantillon (Figure 27). Les logements avec à la fois une analyse intérieure et extérieure sont au nombre de 46, ce qui représente 31 % de l'échantillon. Toutefois, la présence d'une source endogène d'ergostérol a pu être déterminée

pour 37 % des logements lorsque la mesure extérieure était disponible et/ou le niveau intérieur était nul.

L'emploi d'un CAP (plus robuste, fonctionnant sur batteries et permettant un suivi du prélèvement avec un compteur de volume prélevé) pour les mesures intérieures devrait permettre d'augmenter considérablement le taux de récupération des échantillons. En revanche, s'agissant des prélèvements réalisés à l'extérieur, la difficulté de trouver un emplacement pour la pose d'un CAP en extérieur (absence de rebords de fenêtre, risque de vol...) reste une limite.

Niveaux d'ergostérol dans l'air des logements enquêtés

Le dosage de l'ergostérol dans les aérosols permet d'évaluer la biomasse fongique totale inhalable. Ainsi, il s'agit d'un indicateur de l'exposition aux aérosols de micromycètes.

Pour 31 logements, soit 51 % des logements avec une mesure intérieure, de l'ergostérol a été détecté à l'intérieur du logement, montrant un risque d'exposition des occupants par inhalation. Il s'agissait de cas de contaminations endogènes avec un risque d'exposition directement lié aux logements lorsque la concentration d'ergostérol mesurée à l'intérieur était strictement supérieure à celle mesurée à l'extérieur. Douze logements étaient dans ce cas, soit 22 % des logements dans lesquels la présence ou l'absence d'une source intérieure a pu être confirmée. Enfin, lorsque la concentration d'ergostérol mesurée à l'extérieur était supérieure à celle mesurée à l'intérieur, il pouvait s'agir d'habitations avec une ventilation (naturelle ou mécanique) permettant une dilution et donc un abaissement de la pollution biologique. 25 logements ont été ainsi identifiés, soit 54 % des logements avec les deux mesures réalisées.

D'un point de vue quantitatif, la concentration moyenne d'ergostérol mesurée à l'intérieur était de 0,58 ng/m³ (médiane de 0,34 ng/m³) avec un maximum de 7,93 ng/m³. Le choix de considérer les concentrations détectées mais inférieures à la limite de quantification comme égales à cette limite a pu surestimer la moyenne obtenue. Dans le cas de la mesure en extérieur, la concentration moyenne d'ergostérol mesurée était de 1,79 ng/m³ (médiane de 0,53 ng/m³) avec un maximum à 19,35 ng/m³. L'ensemble des résultats obtenus est cohérent avec les concentrations *in situ* d'ergostérol mesurées par Robine *et al.* en 2005 (Robine *et al.*, 2005).

Considérant les cas de contaminations endogènes (niveau intérieur d'ergostérol strictement supérieur au niveau extérieur), la concentration moyenne était de 1,38 ng/m³ (médiane de 1,17 ng/m³) avec un maximum à 3,22 ng/m³. Cette donnée permet d'estimer l'impact d'une contamination endogène dans l'exposition des occupants d'habitations contaminées.

Mesure de la toxicité de l'aérosol fongique : dosage des mycotoxines

Les mycotoxines, peu volatiles, se retrouvent dans les spores et débris mycéliens. Ainsi, dans le cadre de cette enquête, la présence de mycotoxines a été recherchée dans l'aérosol fongique collecté. Une technique de dosage permettant la détection des composés polaires et la quantification de trois mycotoxines aéroportées a été employée (Moularat, 2007).

Matériel et méthode

D'un point de vue expérimental, cette technique a été développée en utilisant les solutions étalons de trois mycotoxines :

- La stérigmatocystine (pur à 99,0 % ; S3255, Sigma) : l'impact sanitaire de cette toxine a été largement évoqué dans la littérature. De plus, *Aspergillus versicolor* (moisissure fréquemment isolée dans les environnements intérieurs) produit de grandes quantités de cette toxine (jusqu'à 1 % de sa biomasse totale). La stérigmatocystine est également un précurseur d'une autre mycotoxine, l'aflatoxine B1, incriminée dans des cas de cancer du poumon après inhalation.
- La déoxynivalénol (DON) (pur à 99,0 % ; D0156, Sigma) : ce métabolite fait partie de la famille des trichothécènes. L'impact sanitaire lié à la présence de ce groupe de mycotoxines dans les environnements intérieurs a été largement décrit dans la littérature. *Stachybotrys chartarum* est le principal producteur de trichothécènes dans les environnements intérieurs.
- L'ochratoxine A (pur à 99,5% ; O1877, Sigma) : les effets immunotoxiques par inhalation de cette mycotoxine ont été démontrés chez le rat [29]. Elle est classée cancérigène 2B (cancérigène possible pour l'homme) par l'agence internationale pour la recherche sur le cancer (IARC). Elle est produite par *Aspergillus niger* ainsi que par *Penicillium sp.*

La collecte des aérosols de mycotoxines était identique à celle dédiée à la mesure de l'ergostérol. Ainsi, un prélèvement était réalisé à l'intérieur du logement à l'aide d'un CIP-10 (Arelco) à un débit de 10 L/min durant 7 jours.

Les capteurs sont également munis d'une coupelle rotative contenant une mousse en polyuréthane surmontée d'une tête de prélèvement spécifique (sélecteur) permettant de sélectionner la fraction inhalable ($Da_{50} < 100 \mu\text{m}$).

L'extraction et la purification des mycotoxines à partir du prélèvement étaient réalisées en phase solide (SPE). Les mycotoxines étaient ensuite analysées par chromatographie en phase liquide et la détection était assurée par un détecteur UV.

Faisabilité de la réalisation des prélèvements de mycotoxines

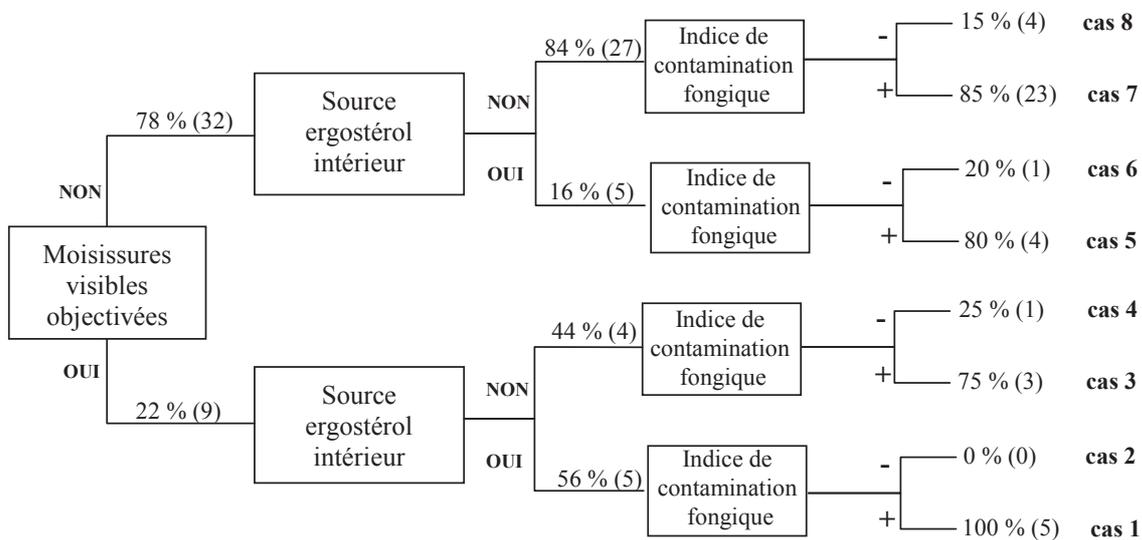
L'analyse des mycotoxines n'a pu être réalisée que dans 32 % des logements investigués (Figure 27). La mesure des mycotoxines a été largement entravée par des problèmes liés aux appareils de collecte. D'une part, face à des pannes successives de CIP, il a été décidé de privilégier le dosage de l'ergostérol dans les cas où seul un collecteur était disponible. D'autre part, les faibles concentrations recherchées de mycotoxines rendent ce dosage bien plus sensible aux différents arrêts d'appareils ayant eu lieu.

Pour améliorer cette collecte, l'emploi d'un CAP au lieu du CIP pourrait être envisagé, pour les mêmes raisons que celles décrites précédemment pour le dosage de l'ergostérol en milieu intérieur. Le développement, à court terme, d'une méthode de dosage permettant le dosage conjoint de l'ergostérol et des mycotoxines à partir d'un échantillon unique pourrait également être intéressant.

Niveaux de mycotoxines dans l'air des logements enquêtés

Aucune mycotoxine n'a été détectée dans l'ensemble des échantillons analysés. Cependant, les nombreux problèmes rencontrés lors de la collecte empêchent d'affirmer l'absence de mycotoxines dans les prélèvements d'air réalisés. Les solutions proposées précédemment permettraient de rendre cette mesure possible dans ce type d'étude. Aujourd'hui, la mesure des mycotoxines directement dans l'air reste le seul moyen d'estimer la toxicité des aérosols inhalables, puisque ni le dosage des mycotoxines sur les surfaces, ni l'identification des espèces, ne peuvent s'y substituer (Moularat et Robine, 2008).

Figure 29 : Descriptif des différentes situations de contamination rencontrées au cours du pilote (n=41 logements)



Caractérisation des différentes situations de contamination

Les différentes approches pour caractériser la présence de moisissures à l'intérieur d'un logement mises en œuvre dans le cadre de ce pilote ont mis en évidence une grande variété des situations de contamination. Les différents cas de figure sont présentés à la Figure 29, uniquement pour la partie de l'échantillon pour laquelle l'ensemble des données de mesures était disponible, soit 28 % de l'échantillon (41 logements). Par ailleurs, l'analyse des prélèvements de surfaces a confirmé que toutes les taches identifiées comme des moisissures étaient en effet des contaminations fongiques.

Comme indiqué précédemment, l'ergostérol est considéré comme un indicateur de la présence de moisissures, essentiellement des spores présentes dans l'air, alors que l'indice de contamination fongique indique un développement fongique actif. Ainsi, sept cas de figure, sur les huit cas de figure théoriques, ont pu être identifiés :

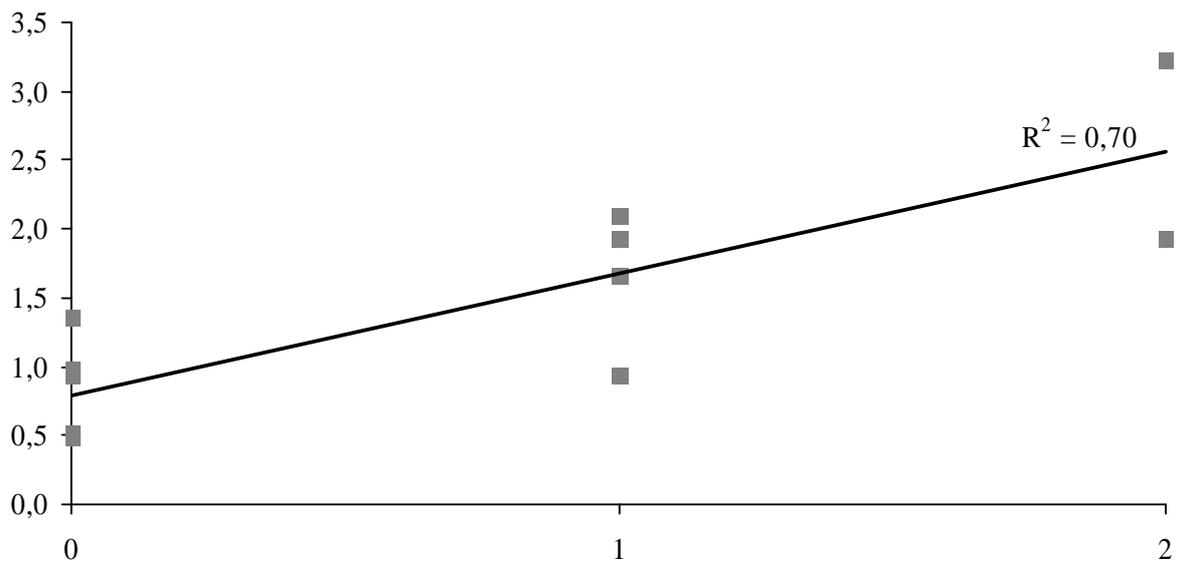
- cas 1 : moisissures visibles en développement avec émission de spores dans l'air (12 %)
- cas 3 : moisissures visibles en développement (7 %)
- cas 4 : moisissures visibles uniquement (2 %)
- cas 5 : moisissures cachées en développement avec émission de spores dans l'air (10 %)
- cas 6 : moisissures cachées avec émission de spores dans l'air (2 %)
- cas 7 : moisissures cachées en développement (56 %)
- cas 8 : absence de moisissures (10 %)

Au final, la présence de moisissures a été mise en évidence par au moins un des indicateurs dans 90 % des logements. Seul 10 % des logements ne présentaient aucune contamination (cas 8). Dans 29 % des logements, la présence de moisissures était révélée par au moins deux indicateurs. Les trois indicateurs de contamination étaient positifs dans 12 % des logements (cas 1).

Les résultats des différents indices fournissent une information complémentaire qui permet de construire différentes hypothèses pour expliquer les situations décrites ci-dessus. Ces hypothèses sont par ailleurs étayées par les caractéristiques des moisissures, leurs modes de développement et de dissémination.

Figure 30 : Niveau d'ergostérol en fonction de la taille de la surface moisie

Niveau d'ergostérol
intérieur ng/m³
(source intérieure)



Taille de la surface contaminée
(N0=0m² ; 0m²< N1≤1/2A4 ; 1/2A4<N2≤3m²)

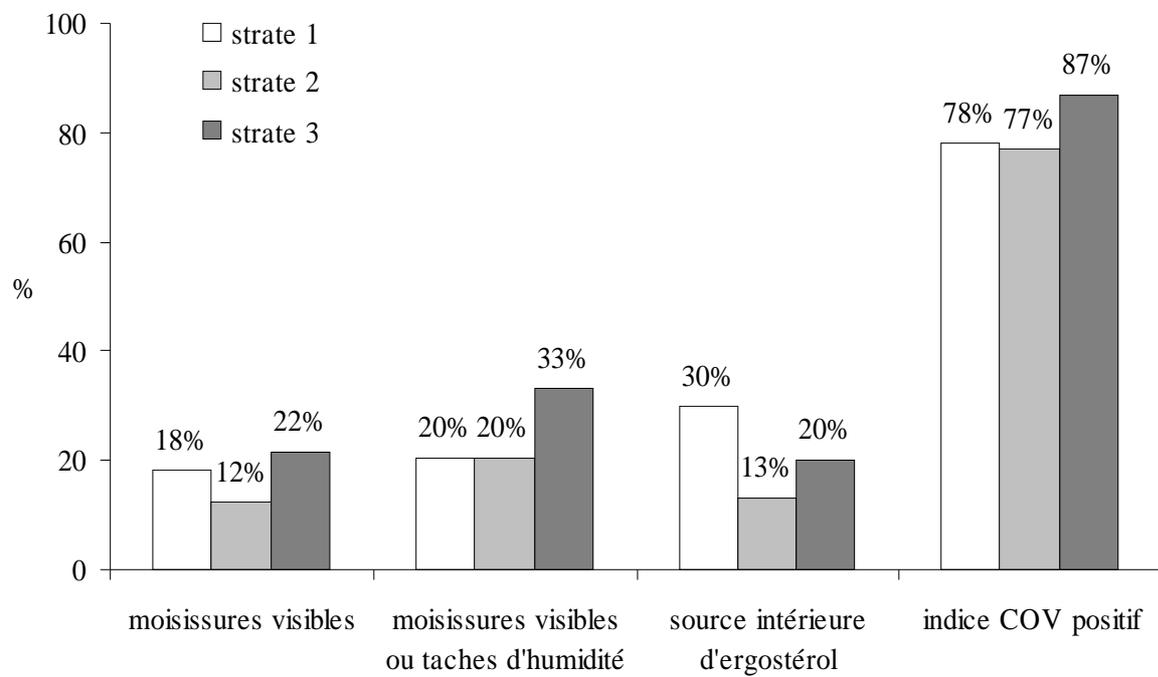
A ce titre, l'émission de spores ou d'autres éléments mycéliens dans l'air dépend du type de moisissures, de la nature du support ainsi que de son taux d'humidité. Ainsi, la présence de moisissures visibles ne se traduit pas nécessairement par la présence d'ergostérol dans l'air (cas 3 et 4). A l'inverse, si une source intérieure d'ergostérol a été détectée, l'enquêteur a pu ne pas repérer la trace de moisissures, masquée par un revêtement, un meuble, ou bien tout simplement parce qu'elle est incolore (cas 5 et 6). Ces deux types de situation représentent respectivement 10 % et 12 % des cas.

Toutefois, la présence d'une source intérieure d'ergostérol était reliée significativement à la présence de moisissures visibles ($p < 0,01$). En effet, une source intérieure d'ergostérol était retrouvée dans 55 % des logements présentant des moisissures visibles, contre 14 % des logements où les moisissures n'étaient pas apparentes. Ainsi, l'appréciation de la contamination, basée uniquement sur un critère visuel, induirait 22 % d'erreurs de classement dont respectivement 10 % de faux positifs et 12 % de faux négatifs.

A titre exploratoire, compte-tenu de l'effectif réduit concerné, le niveau d'ergostérol intérieur (en cas de source intérieure) a été relié à la taille de la surface contaminée (cf. Figure 30). Ainsi, le niveau d'ergostérol intérieur apparaîtrait corrélé à la taille de la surface, l'absence de moisissure visible correspondant aux niveaux les plus faibles et inversement. Pour autant, les petites surfaces (entre 0 et ½ feuille A4) contaminées ne seraient pas à négliger.

Les contaminations fongiques révélées par un indice COV positif, quant à elles, n'étaient pas associées à la présence de moisissures visibles, ni à la présence d'une source intérieure d'ergostérol. L'indice COV permet de détecter des contaminations récentes potentiellement peu étendues donc moins facilement décelables à l'examen visuel et accompagnées d'une faible dissémination de spores, ce qui explique les cas où la présence d'une contamination est décelée uniquement par cet indice (cas n°7), soit 56 % des logements. La contamination peut également être étendue mais localisée derrière un obstacle qui la masque et prévient l'émission de spores dans l'air. Enfin, une absence de développement fongique peut malgré tout se traduire par la présence de moisissures visibles, dans la mesure où la source d'humidité qui alimentait à l'origine la surface contaminée a pu être tarie. Toutefois, ce cas de figure n'a concerné ici que 2 % des logements (cas 4).

Figure 31 : Proportion de logements contaminés dans chaque strate selon l'indicateur



Pertinence de la stratégie d'échantillonnage en regard des différents indices de contamination selon la strate

Le plan de sondage mis en œuvre dans le cadre de ce pilote avait pour objectif de surreprésenter les logements contaminés. Pour cela, trois strates d'ilots présentant des proportions de logements à risque inégales ont été constituées. Ainsi, les logements appartenant à la strate 3, la plus à risque, devraient théoriquement être plus nombreux en proportion à présenter des contaminations. Afin de vérifier l'efficacité de cette stratégie d'échantillonnage, les proportions de logements contaminés dans chacune des strates, selon les quatre indicateurs décrits précédemment, ont été comparées (cf. Figure 31).

Quel que soit l'indicateur de contamination considéré, les trois strates n'apparaissent pas significativement différentes. Ainsi, la stratégie d'échantillonnage mise en œuvre dans le cadre de ce pilote ne semble pas avoir permis de surreprésenter les logements présentant des contaminations.

En effet, dans notre échantillon, 17 % des logements présentaient des contaminations visibles, or ce pourcentage est du même ordre de grandeur que ce qui a été observé dans la campagne nationale logements de l'OQAI, soit 15 % (Moularat, 2007). En revanche, une proportion beaucoup plus élevée de logements présentant des contaminations actives (indice COV positif) a été retrouvée dans notre échantillon par rapport à l'enquête nationale, environ 80 % contre 37 %. La proportion importante de logements citadins, pour lesquels une prévalence plus importante de contaminations masquée a été retrouvée dans une autre enquête (Moularat *et al.*, 2010), pourrait en partie expliquer ce phénomène.

Ainsi, la pertinence des critères utilisés, à savoir l'ancienneté du bâti et la suroccupation, peut être remise en question. S'agissant de l'ancienneté du bâti, il a été montré que le plan de sondage mis en œuvre a permis de surreprésenter les logements anciens. Toutefois, ce critère n'est pas apparu si déterminant vis-à-vis du risque de contamination fongique (cf. paragraphe concernant les « Analyse des déterminants potentiels des moisissures » p. 71). S'agissant de la suroccupation, il a été montré que les logements surpeuplés ont été difficiles à inclure dans notre échantillon.

Caractéristiques de l’habitat moisi et facteurs prédictifs

Les mesures environnementales étant difficiles et coûteuses à mettre en œuvre, la possibilité de prédire une exposition uniquement à partir de données descriptives a été étudiée. Au préalable, afin de sélectionner les facteurs prédictifs à retenir, les liens entre les indices de contamination et leurs déterminants potentiels recueillis par questionnaire ont été examinés. Des profils de logement et de comportement des foyers déterminant les contaminations fongiques ont par ailleurs été établis.

Figure 32 : Présence de sources d'humidité dans les logements

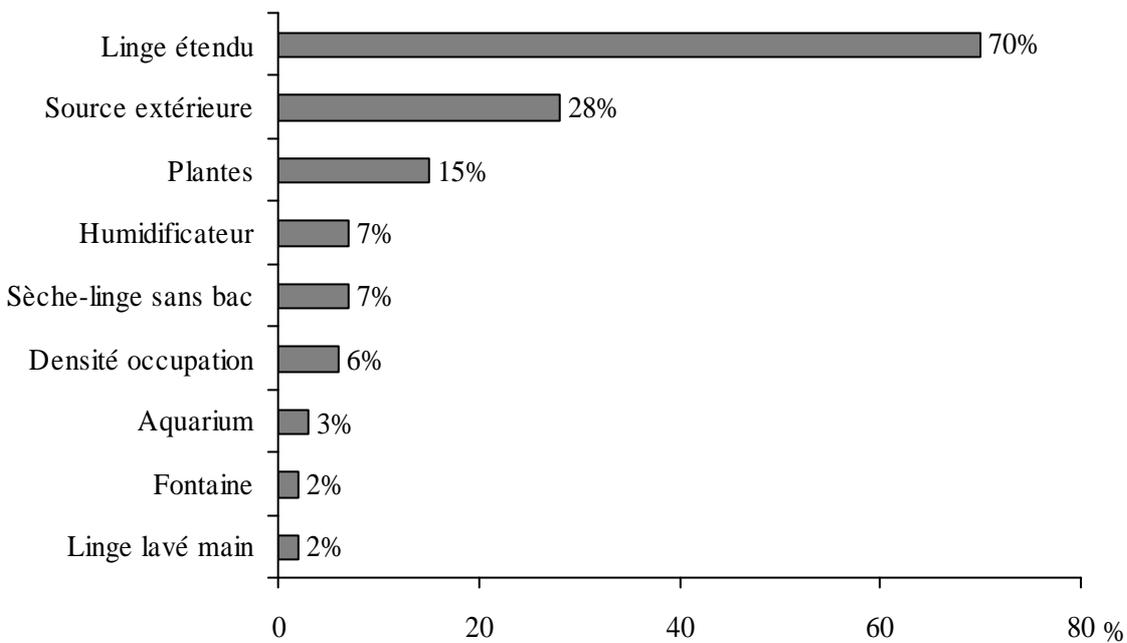
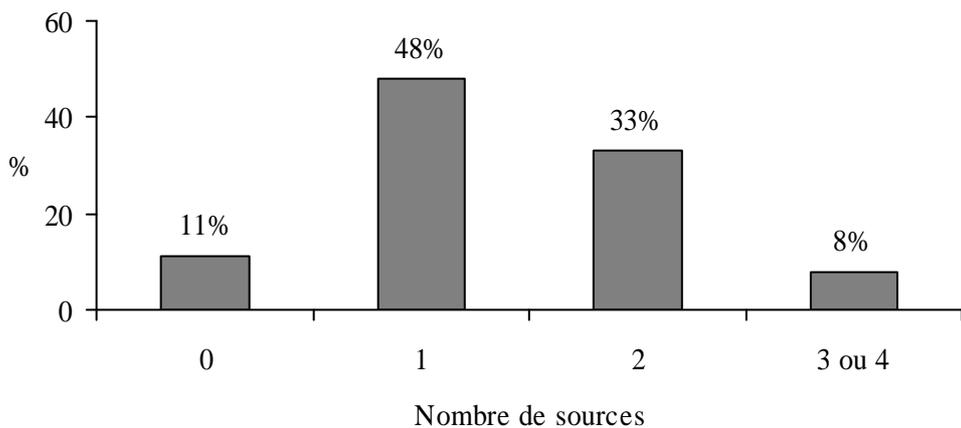


Figure 33 : Nombre de sources d'humidité dans les logements



Analyse des déterminants potentiels des moisissures

Sources d'humidité

Les moisissures ne se développent qu'en présence d'humidité. C'est pourquoi la présence de sources d'humidité a été recueillie de manière détaillée dans le cadre de cette enquête et en particulier les dégâts des eaux qui conduisent à une accumulation d'eau dans les surfaces. Dans une autre enquête, la présence de moisissures a par ailleurs été reliée à la survenue d'un dégât des eaux dans le logement (Roussel *et al.*, 2008).

L'existence d'un dégât des eaux non résolu ou résolu au cours des douze derniers mois a été déclarée pour 11 % des logements enquêtés. Parmi les problèmes déclarés, les plus fréquents étaient les infiltrations (5 % des logements). Des cas de fuite, d'humidité ascensionnelle, de pont thermique et d'inondation ont également été cités pour certains logements. Si l'on considère le nombre de problèmes d'humidité non résolus ou résolus au cours des douze derniers mois pour chaque logement, 89 % des logements enquêtés n'ont déclaré aucun problème d'humidité, 10 % un problème et 1 % deux problèmes.

Les autres sources potentielles d'humidité dans le logement étaient :

- une densité d'occupation importante⁶ dans le logement,
- le fait d'étendre son linge dans le logement,
- le fait de laver son linge à la main,
- la présence d'un sèche-linge sans bac de condensation et non raccordé vers l'extérieur,
- la présence de cinq plantes ou plus dans au moins une pièce du logement,
- la présence d'un aquarium ouvert dans le logement,
- la présence d'une fontaine décorative dans le logement,
- la présence d'un humidificateur dans le logement,
- la présence de sources extérieures d'humidité à proximité du logement (rivière, bassin...).

La fréquence et le nombre de ces sources d'humidité dans les logements enquêtés sont présentés sur les Figure 32 et Figure 33.

⁶ Selon les critères Insee, est considéré comme surpeuplé un logement dont la surface habitable est inférieure à 18 m² par personne de référence, plus 12 m² par autre personne de 14 ans ou plus et 9 m² par enfant de moins de 14 ans.

Afin de tenir compte de la taille des logements, ce nombre de sources d'humidité a été rapporté au nombre de pièces. Trois classes ont ensuite été constituées à partir de la répartition de l'échantillon : 11 % des logements n'avaient aucune source, 76 % avaient moins de 0,5 source par pièce et 12 % avaient 0,5 source ou plus par pièce.

Parmi ces différentes sources d'humidité, la présence de moisissures visibles dans le logement était très liée :

- à l'existence d'au moins un problème d'humidité non résolu ou résolu au cours des douze derniers mois (56 % des logements présentant un tel problème d'humidité avaient des moisissures visibles, contre 12 % de ceux ne présentant pas un tel problème, $p < 0,001$) ;
- à la suroccupation (63 % des logements suroccupés avaient des moisissures visibles, contre 15 % de ceux non suroccupés, $p < 0,001$) ;
- au nombre de sources d'humidité dans le logement (42 % des logements ayant trois ou quatre sources d'humidité parmi celles étudiées avaient des moisissures visibles, contre 15 % de ceux en ayant moins, $p < 0,05$).

Malgré les faibles effectifs, une tendance à une plus grande proportion de logements présentant des moisissures visibles parmi ceux ayant un aquarium ouvert a également été observée (50 % contre 17 %, $p = 0,08$). En revanche, la présence de moisissures visibles était moins fréquente parmi les logements à l'intérieur desquels du linge était étendu (13 % contre 27 %, $p < 0,05$). Ceci pourrait suggérer des comportements différents des occupants de ces logements, tels qu'une aération plus importante.

Des résultats similaires étaient observés lorsque la présence d'au moins une trace d'humidité ou de moisissures dans le logement était considérée. La présence d'au moins une telle trace avait également tendance à être plus fréquente lorsqu'au moins cinq plantes étaient présentes dans le logement (39 % contre 22 %, $p = 0,08$).

L'indice COV, quant à lui, n'était pas lié à l'existence d'un problème d'humidité non résolu ou résolu au cours des douze derniers mois, ni à la suroccupation du logement. En revanche, l'indice COV était plus fréquemment positif lorsque la présence d'une source d'humidité à l'extérieur et à proximité du logement était déclarée (93 % contre 76 %, $p = 0,05$). Aucun autre lien n'a été observé avec les sources d'humidité.

La présence d'une source intérieure d'ergostérol apparaissait peu liée aux sources d'humidité étudiées, probablement en raison des faibles effectifs (sous-effectif de 55 logements). Toutefois, une tendance à une plus forte proportion de logements présentant une source intérieure d'ergostérol parmi ceux suroccupés ou encore parmi ceux ayant un aquarium ouvert a été observée. Aucun autre lien n'a été observé avec les sources d'humidité.

Concernant l'éventuelle odeur de moisi constatée au cours des douze derniers mois par l'enquêté, celle-ci apparaissait associée :

- à l'existence d'au moins un problème d'humidité non résolu ou résolu au cours des douze derniers mois (19 % contre 5 %, $p < 0,05$), de même qu'avec le nombre de problèmes d'humidité (50 % parmi les logements ayant deux problèmes, 14 % de ceux ayant un problème et 5 % de ceux n'en ayant aucun, $p < 0,05$) ;
- à la présence d'un humidificateur (30 % contre 5 %, $p < 0,01$).

Cette odeur de moisi avait également tendance à être associée au nombre de sources d'humidité dans le logement (17 % des logements ayant trois ou quatre sources contre 6 % de ceux en ayant moins, $p = 0,15$).

L'impression d'humidité ressentie au cours des douze derniers mois par l'enquêté était, quant à elle, associée à l'existence d'au moins un problème d'humidité non résolu ou résolu au cours des douze derniers mois (69 % contre 11 %, $p < 0,001$). Une tendance à une impression d'humidité plus fréquente lorsque les logements disposaient d'un humidificateur a également été observée (40 % contre 16 %, $p = 0,05$).

Systeme de ventilation et habitudes d'aération

L'aération des logements permet d'évacuer les polluants éventuellement émis à l'intérieur ainsi que l'humidité produite par les occupants et leurs activités. Ainsi, un défaut d'aération est susceptible d'entraîner une accumulation de ces polluants et un excès d'humidité, favorable à la croissance des moisissures. C'est pourquoi des éléments précis concernant ce paramètre ont été recueillis. L'aération doit être générale et permanente selon le principe suivant : l'air neuf entre dans les pièces principales (séjour, chambres...) et l'air vicié est extrait dans les pièces de service (cuisine, WC, salles de bain). L'air peut être évacué de façon naturelle à l'aide de mouvements d'air créés par les caractéristiques du bâtiment lui-même (ventilation naturelle) ou bien par un ventilateur (ventilation mécanique).

Figure 34 : Répartition des logements selon le type de dispositif d'aération et le "diagnostic"

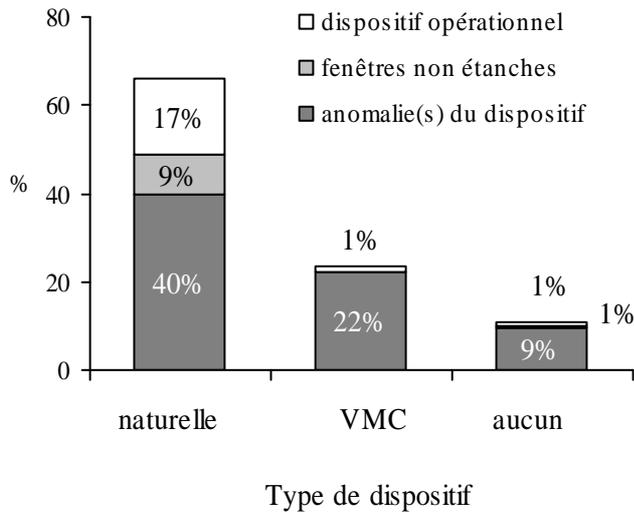


Figure 35 : Répartition des logements selon la proportion d'anomalies du dispositif d'aération

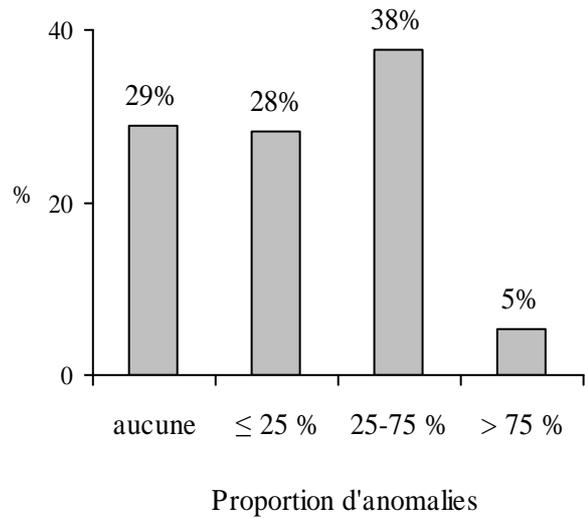
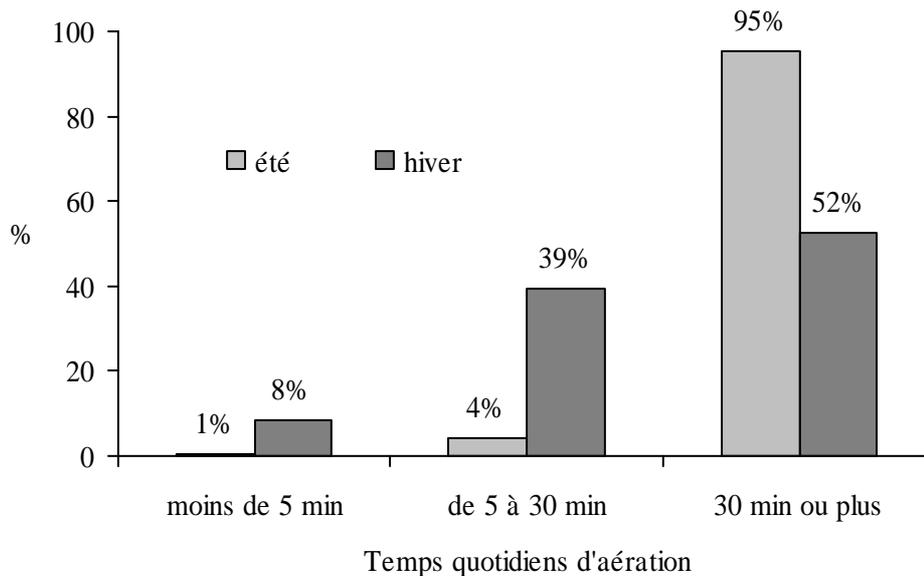


Figure 36 : Distribution des temps moyens d'aération quotidiens pour les logements selon la saison



A chaque type de dispositif correspond une configuration particulière des entrées et sorties d'air. Ainsi, cette configuration a été évaluée par l'enquêteur afin de fournir une première indication sur la qualité de l'aération du logement.

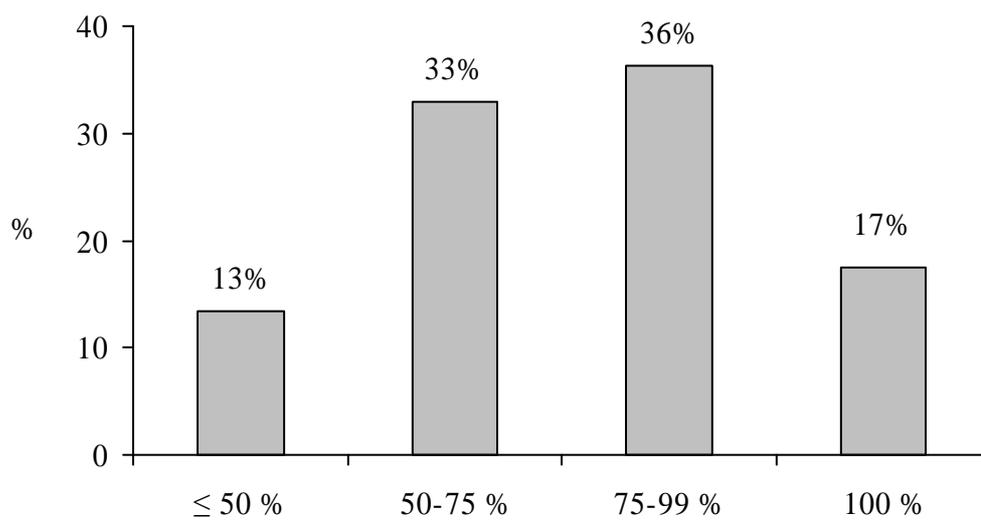
Ainsi, 11 % des logements ne disposaient d'aucun dispositif de ventilation, 66 % disposaient d'un dispositif d'aération naturelle et 23 % d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC). La présence d'anomalies susceptibles d'altérer le fonctionnement du dispositif relevées par l'enquêteur (présence ou absence d'entrées et de sorties d'air dans les pièces concernées) a permis d'établir un diagnostic du dispositif. Ainsi, seulement 19 % des logements, tout type de dispositif confondu, disposaient d'un système d'aération a priori opérationnel (cf. Figure 34).

Toutefois, ce diagnostic ne permettait pas de conclure si le taux de renouvellement était assuré convenablement. Il a par ailleurs été tenu compte de l'état des châssis des fenêtres qui, selon leur vétusté, permettent des infiltrations d'air susceptibles de compenser l'absence de grilles d'aération dans le cas d'une ventilation naturelle. Ainsi, pour 10 % des logements, les anomalies du système d'aération pourraient être compensées par les infiltrations d'air permanentes via les ouvrants. En revanche, pour 1 % des logements, l'occupant a déclaré l'absence de dispositif ; or à l'inspection, les entrées et sorties d'air relevées par l'enquêteur ont permis d'identifier un système de ventilation naturelle opérationnel.

Au final, 71 % des logements présentaient un risque de confinement. Toutefois, le dispositif d'aération de ces logements présentait une proportion variable d'anomalies (cf. Figure 35).

En cas d'anomalies du système d'aération, le rôle de l'occupant s'avère déterminant dans le renouvellement d'air. L'ouverture des fenêtres est apparue quasi-systématique hors période de chauffe. En effet, les occupants ont déclaré aérer plus d'une demi-heure par jour en été dans 95 % des cas. En revanche, en hiver, ce pourcentage ne s'élève plus qu'à 52 % des logements (cf. Figure 36). Ainsi, 39 % des logements présentaient un risque de confinement et des temps d'ouverture moyens des fenêtres de moins de 30 minutes en hiver, et 7 % si l'on considère uniquement des temps d'ouverture inférieurs à 5 min.

Figure 37 : Répartition des logements selon la proportion de fenêtres munies de double vitrage



L'enquêteur a ressenti une impression de confinement à l'entrée dans le logement dans 8 % des cas. Pour 10 % de l'échantillon, l'occupant a déclaré que son logement ne lui semblait pas correctement ventilé. Ces occupants ont par ailleurs déclaré en plus grande proportion une odeur de moisi dans les douze derniers mois (27 % contre 4 %, $p < 0,001$) ainsi qu'une impression d'humidité (40 % contre 15 %, $p < 0,01$).

Aucun lien n'a été observé entre d'une part le diagnostic du système de ventilation ou les habitudes d'aération et d'autre part les impressions de l'enquêteur ou le ressenti de l'occupant. Par ailleurs, aucun de ces paramètres n'a pu être relié à un des indicateurs de contamination.

Isolation thermique et chauffage

Une mauvaise isolation thermique est susceptible d'entraîner des problèmes de condensation sur les surfaces, telles que les murs, les plafonds ou encore les sols, qui demeurent froides lors de la saison hivernale. Des liens entre présence de moisissures et problèmes d'isolation ont pu être mis en évidence dans d'autres études (Howden-Chapman *et al.*, 2005). Ce paramètre est toutefois difficile à recueillir de manière fiable uniquement sur la base d'observations ou de déclarations. Si des mesures existent, elles sont lourdes à mettre en œuvre et n'ont pas été mises en place dans le cadre de cette enquête. Les paramètres décrits ci-après ont été retenus afin de décrire au mieux cette caractéristique.

Dans 10 % des cas, l'occupant a déclaré que son logement était mal isolé. 17 % des logements étaient équipés intégralement en double vitrage, toutefois l'ensemble des logements disposaient d'au moins une fenêtre équipée de double vitrage. Ainsi, afin de fournir un descriptif plus détaillé de ce paramètre, la proportion de fenêtres munies d'un double vitrage a été calculée pour chaque logement, la distribution de l'échantillon selon cette proportion est illustrée à la Figure 37.

Dans 15 % des cas, l'occupant a déclaré que son logement était mal chauffé. Plusieurs raisons possibles ont été mentionnées : mauvaise performance du système de chauffage, coût trop élevé ou encore mauvaise isolation.

La présence de contaminations visibles était associée à un logement mal chauffé en hiver ainsi qu'à des problèmes d'isolation : 36 % des logements mal chauffés et 40 % des logements mal isolés présentaient des moisissures contre 14 % et 15 % des logements où ces problèmes n'étaient pas déclarés ($p < 0,05$).

Figure 38 : Proportion de logements présentant des dégradations du bâti

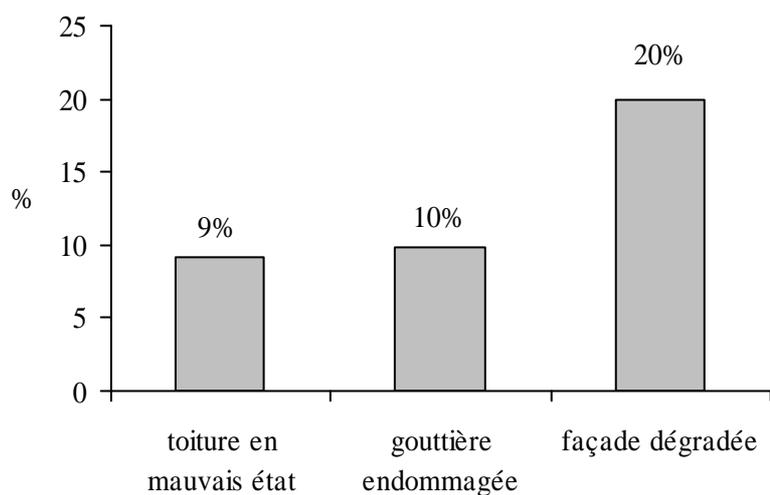
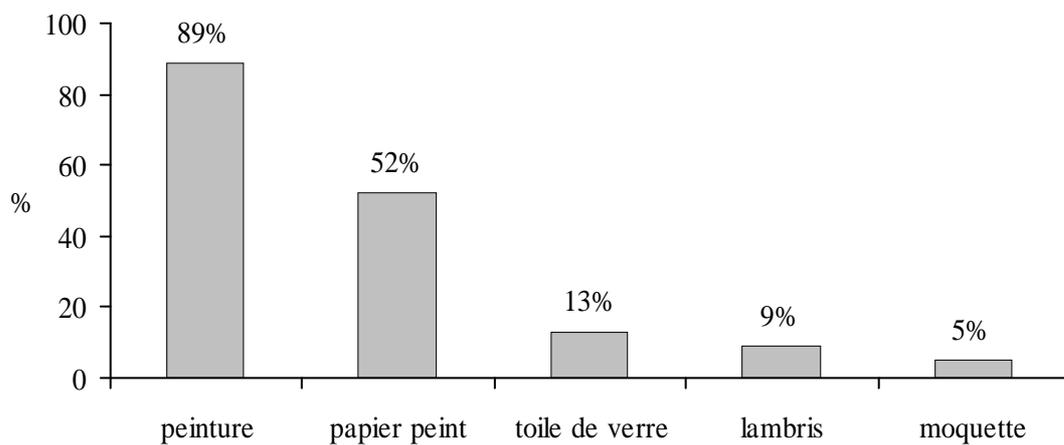


Figure 39 : Revêtements présents sur les murs ou les plafonds des logements



Ancienneté et état du bâti

La répartition des logements selon l'ancienneté du bâti est présentée à la Figure 6 (p. 24). Ce critère a été retenu pour la construction des strates d'îlots car il correspond a priori à l'évolution historique des normes en matière de ventilation et d'isolation thermique. Ainsi, il a été considéré que les logements anciens constituaient une catégorie de logements à risque vis-à-vis des contaminations fongiques. Or, aucun lien n'a été mis en évidence entre l'ancienneté du bâti et les différents indicateurs de contamination. L'âge du bâti n'apparaît donc pas être un critère pertinent, en effet, il ne renseigne pas sur les éventuels travaux de rénovation qui ont pu être effectués depuis la construction du logement.

D'autres paramètres tels que l'état de la toiture, des gouttières et de la façade peuvent renseigner sur l'état du bâti. Ainsi, 26 % des logements présentaient au moins une dégradation extérieure dont la répartition est illustrée à la Figure 38. Parmi ces critères, seule la façade dégradée était reliée à la présence de trace de moisissures ou d'humidité, avec 50 % des logements présentant une façade dégradée contaminés par des moisissures visibles ou des traces d'humidité, contre 20 % de ceux ne présentant pas une telle dégradation ($p < 0,01$). Ce critère était également relié à une odeur de moisi constatée dans les douze derniers mois (30 % contre 4 %, $p < 0,01$).

Revêtements

Les moisissures, outre la présence d'eau, ont besoin d'un substrat de croissance pour se développer. A cet égard, les matériaux couramment retrouvés dans l'habitat constituent de bons substrats, certaines espèces étant susceptibles d'avoir plus d'affinité avec l'un ou l'autre. C'est pourquoi, dans le cadre de ce pilote, les différents revêtements présents à l'intérieur du logement ont été relevés. Ainsi, 89 % des logements présentaient au moins un mur ou un plafond recouvert de peinture, plus de la moitié des logements avaient au moins un mur recouvert de papier peint (Figure 39).

Des liens entre le type de revêtement et la présence de source intérieure d'ergostérol ont été observés : une telle source d'ergostérol était moins souvent détectée lorsque certains murs ou plafonds du logement étaient recouverts de peinture (17 % contre 50 %, $p < 0,05$) et à l'inverse avait tendance à être plus souvent détectée dans le cas de papier peint (29 % contre 13 %, $p = 0,14$). De même, l'enquêteur avait tendance à avoir davantage constaté une odeur de moisi au cours des douze derniers mois lorsque son logement disposait de papier peint (10 % contre 3 %, $p = 0,07$).

Typologie de logements

Afin d'avoir une vision synthétique des caractéristiques des logements enquêtés, une analyse factorielle multiple a été réalisée. Sur la base de cette analyse, une classification ascendante hiérarchique a permis de dégager des profils de logement et de comportement déterminant les contaminations fongiques.

Méthode

Analyses factorielles

L'analyse factorielle (Escofier et Pagès, 2008) permet de voir graphiquement les rapprochements et les oppositions entre les différentes caractéristiques des observations (les logements ici) en donnant une représentation géométrique de celles-ci. Elle consiste en effet à construire des axes (axes factoriels) à partir de certaines variables de l'enquête (variables actives) résumant les principales caractéristiques de l'échantillon. Elle permet aussi de projeter sur ces axes des variables qui n'ont pas contribué à la formation de ces axes (variables illustratives) afin de représenter la proximité de ces variables par rapport aux variables actives. Cet outil est pertinent lorsque les variables sont nombreuses, comme dans le cadre de cette enquête.

La méthode diffère selon le type de variables utilisées. Pour les variables quantitatives, l'analyse en composantes principales (ACP) est mise en œuvre, alors que pour les variables qualitatives, c'est une analyse en composantes multiples (ACM) qui est utilisée. Lorsque les variables peuvent être regroupées en plusieurs groupes homogènes (groupes thématiques par exemple), l'analyse factorielle multiple (AFM) est la méthode la plus adaptée. Schématiquement, l'AFM réalise les analyses factorielles (ACM pour les variables qualitatives et ACP pour les variables quantitatives) de chaque groupe de variables actives et utilise les axes factoriels (après pondération) de ces analyses comme variables actives dans une ACP. Ainsi, on dispose, d'une part, des outils diagnostiques et d'aide à l'interprétation des analyses factorielles classiques, et d'autre part, d'un ensemble d'indices spécifiques à cette méthode, qui permettent en particulier de caractériser les liens entre les groupes de variables.

Les variables de cette enquête étant regroupées au sein de différents groupes thématiques, une analyse factorielle multiple a été réalisée. L'ensemble des variables portant sur les dégradations, les signes et les sources d'humidité présents dans le logement, ainsi que celles portant sur l'isolation, la ventilation, l'état du bâtiment et le ressenti (des enquêtés/enquêteurs) ont été

incluses dans l'analyse factorielle en tant que variables actives. Les variables concernant les résultats des prélèvements, les données socio-démographiques du foyer, la saison au cours de laquelle a eu lieu l'enquête et les revêtements présents dans le logement ont été retenues comme variables illustratives (cf. Annexe 2).

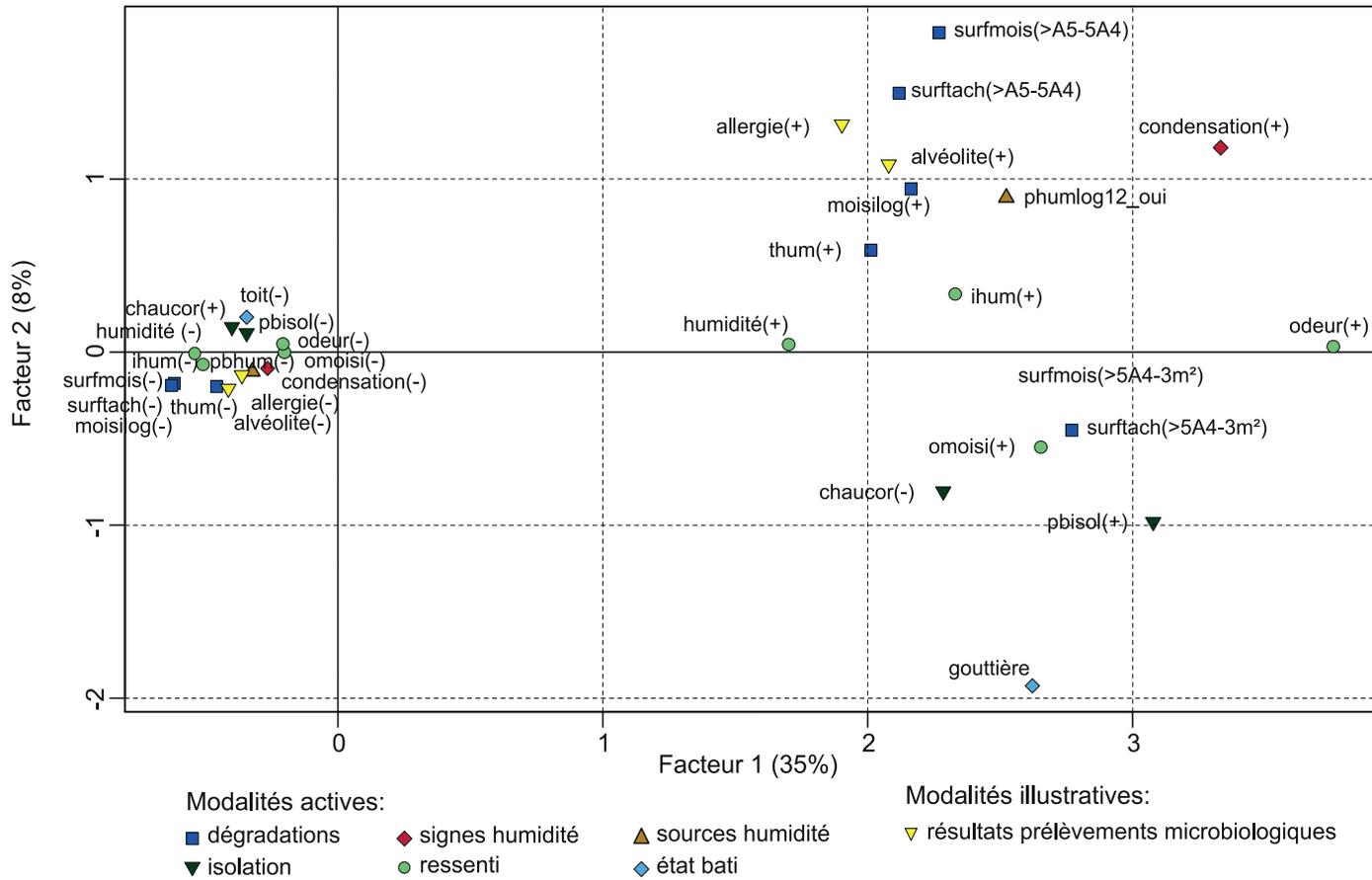
Classification ascendante hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est un outil complémentaire à l'analyse factorielle : elle permet de distinguer des profils types au sein de l'échantillon enquêté.

La CAH organise en effet les observations (les logements ici), définies par un certain nombre de variables et de modalités (caractéristiques des logements), en les regroupant de façon hiérarchique. Elle commence par agréger les observations qui sont les plus semblables entre elles, puis les observations ou groupes d'observations un peu moins semblables et ainsi de suite jusqu'au regroupement de l'ensemble de l'échantillon.

L'objectif d'une classification est de regrouper les observations (les logements ici) en un petit nombre de classes, chacune très homogène vis-à-vis des variables d'intérêt, mais très hétérogènes entre elles, afin d'avoir une vision synthétique des grands types de caractéristiques que l'on observe dans l'échantillon. Un compromis doit donc être trouvé entre un nombre important de classes très homogènes et un nombre plus restreint de classes moins homogènes.

Figure 40 : Représentation des modalités des variables sur les deux premiers axes factoriels



Guide de lecture : les points représentent les modalités des variables projetées dans le plan formé par les deux premiers axes factoriels. Deux modalités sont d'autant plus proches qu'elles se retrouvent dans les mêmes logements. Seules les modalités les plus significatives sont représentées (valeurs tests* supérieures à 5).

* La valeur test d'une modalité d'une variable qualitative dans un groupe de variables permet de mesurer si l'occurrence de la modalité dans le groupe de variables s'écarte d'une situation entièrement aléatoire.

Résultats

Liens entre les différentes caractéristiques des logements potentiellement liées aux contaminations fongiques

Les résultats de l'analyse factorielle multiple sont présentés graphiquement sur la Figure 40. Cette représentation permet de mettre en évidence les liens entre les différentes caractéristiques des logements, en particulier celles potentiellement liées aux contaminations fongiques. En effet, deux caractéristiques (modalités de variables) y sont d'autant plus proches qu'elles se retrouvent dans les mêmes logements.

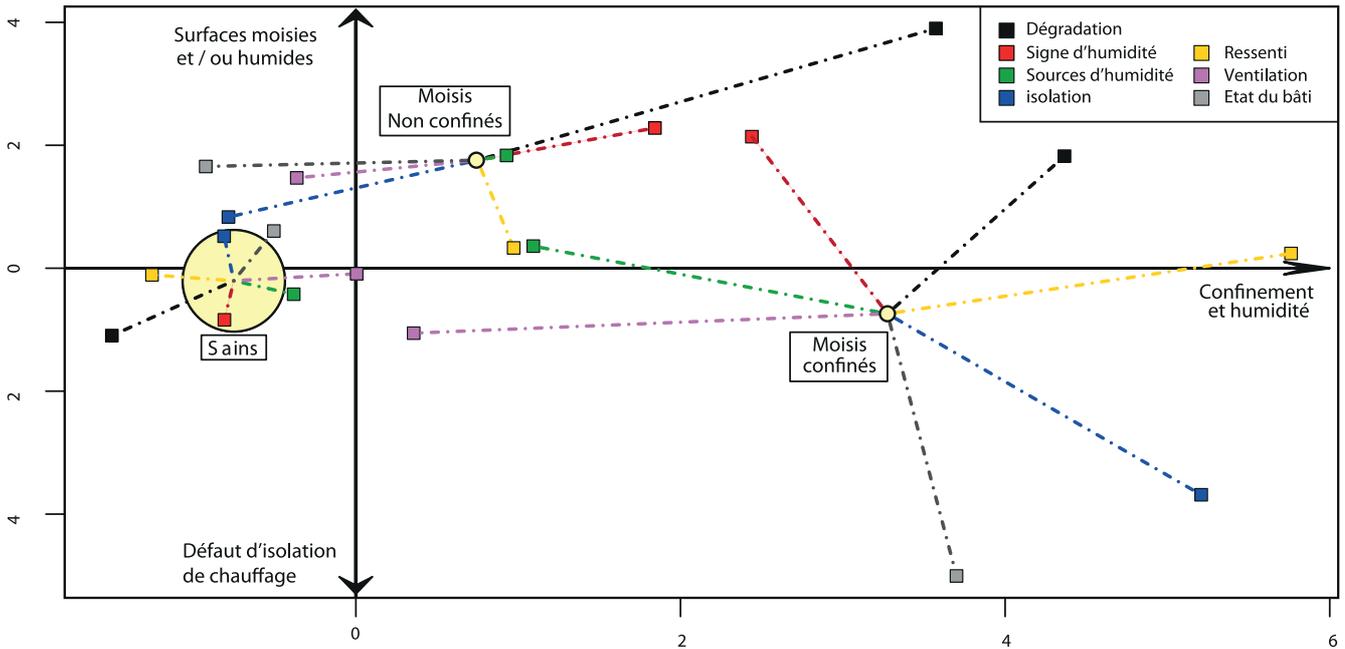
Le plan factoriel formé par les axes 1 et 2 permet de décrire les modalités des variables correspondant aux dégradations, à la présence d'humidité et de moisissures, ainsi qu'à leur ressenti. Il permet aussi de mettre en évidence les problèmes d'isolation et de chauffage. Ce plan représente plus de 44 % de l'information apportée par les variables actives.

Plus particulièrement, le premier axe, qui représente à lui seul 35 % de l'information apportée par les variables actives, met en évidence une association entre la présence de moisissures et de signes d'humidité (moisilog, surfmois, surftach, condensation), le ressenti (odeur, omoisi, ihum) et la survenue récente de problèmes d'humidité dans le logement (pbhum).

Le second axe, représentant 8 % de l'information, montre par ailleurs que les problèmes d'isolation (pbisol) et de chauffage (chaucor) renforcent la présence de grandes surfaces moisies ou humides ainsi que la déclaration d'odeur de moisi chez l'enquêté.

La projection des variables illustratives dans le plan permet de mettre en évidence des liens entre la présence de moisissures potentiellement allergisantes (allergie) et responsables d'alvéolites (alveolite) et les variables liées aux dégradations et aux signes et problèmes d'humidité (moisilog, thum, condensation, pbhum). En revanche, les variables résultant des prélèvements d'air, à savoir la présence d'un développement fongique actif (indice COV positif) et d'une source intérieure d'ergostérol, ne sont pas associées aux caractéristiques des logements dans l'AFM.

Figure 41 : Représentation dans le premier plan factoriel des trois classes mises en évidence par la classification



Guide de lecture :

Le logement «moyen» de chaque classe (barycentre de la classe) est situé au centre du cercle jaune pâle, de taille proportionnelle au nombre de logements de la classe. Les carrés de couleurs, reliés par un trait à une classe, représentent le logement «moyen» qu'aurait la classe, si elle était uniquement caractérisée par les variables du groupe correspondant. Cette représentation permet ainsi de visualiser les groupes de variables les plus caractéristiques des classes, qui sont ceux ayant les coordonnées les plus extrêmes sur les axes.

Par exemple, on voit que la classe des logements «moisis vétustes» présente des caractéristiques extrême en termes de ressenti des problèmes de moisissures et d'humidité, alors que son profil concernant les sources d'humidité est plutôt proche de la moyenne de l'ensemble des logements (origine des axes).

Ceci montre la complexité des situations de contamination et notamment la difficulté de mettre en évidence des liens entre les indices de contamination susceptibles d'être recueillis et les déterminants potentiels des moisissures. Toutefois des modèles prédictifs de la présence d'une source intérieure d'ergostérol et d'un développement fongique actif pourront être développés à partir des variables actives (cf. paragraphe « Prédire une exposition aux moisissures » p. 89).

Profils des logements

La classification ascendante hiérarchique réalisée à partir des axes de l'analyse factorielle permet de compléter la description précédente en établissant des profils de logements mettant en évidence les différentes situations de contaminations fongiques. Elle permet ainsi de distinguer trois types de logements. Afin d'aider à l'interprétation, la Figure 41 met en évidence graphiquement les groupes de variables qui sont caractéristiques de chaque profil.

On observe ainsi que :

- la classe regroupant la grande majorité des logements (73 % des logements enquêtés) se distingue des deux autres classes principalement par le groupe de variables correspondant aux dégradations, et dans une moindre mesure par ceux liés aux signes et sources d'humidité et au ressenti ;
- les deux autres classes se distinguent entre elles par les groupes de variables d'isolation, d'état du bâtiment et de ressenti.

Les Tableau 4 et Tableau 5 permettent de compléter la description de ces trois profils de logement en présentant leurs caractéristiques comparées à celles de l'échantillon global.

Tableau 4 : Caractéristiques des profils de logement (pourcentage de logements concernés au sein de chaque profil)

| Variables actives | | Ensemble (100%) | Sains (73%) | Moisis vétustes (13%) | Moisis (14%) | |
|--|--------------------|--------------------|----------------|--------------------------|-----------------|----|
| Signes d'humidité | | | | | | |
| Condensation | | 7 | 0 | 35 | 19 | |
| Présence d'un déshumidificateur | | 7 | 2 | 15 | 29 | |
| Dégradations | | | | | | |
| Revêtements altérés | | 24 | 16 | 55 | 38 | |
| Moissures visibles | | 17 | 1 | 60 | 62 | |
| Tache d'humidité | | 24 | 5 | 75 | 71 | |
| Sources d'humidité | | | | | | |
| Problème d'humidité | | 11 | 0 | 45 | 33 | |
| Sur-occupation | | 5 | 3 | 15 | 10 | |
| Source extérieure d'humidité | | 28 | 25 | 15 | 57 | |
| Linge étendu dans le logement | | 71 | 73 | 70 | 57 | |
| Sèche-linge sans bac de condensation | | 7 | 8 | 0 | 5 | |
| Aquarium | | 3 | 2 | 0 | 10 | |
| Cinq plantes ou plus dans une pièce | | 15 | 13 | 0 | 29 | |
| Au moins trois sources d'humidité | | 8 | 4 | 10 | 29 | |
| Isolation | | | | | | |
| Problème d'isolation | | 10 | 2 | 65 | 0 | |
| Double vitrage (75 % à 100 % des pièces) | | 54 | 56 | 55 | 43 | |
| Logement bien chauffé en hiver | | 85 | 94 | 30 | 91 | |
| Ventilation | | | | | | |
| Dispositif d'aération | VMC | 24 | 23 | 5 | 48 | |
| | Aération naturelle | 66 | 68 | 75 | 48 | |
| | Aucun dispositif | 11 | 10 | 20 | 5 | |
| Habitudes d'aération journalière | été | < 5min | 1 | 0 | 5 | |
| | | 5-30 min | 4 | 4 | 10 | 0 |
| | | >30 min | 93 | 94 | 90 | 91 |
| | hiver | < 5min | 8 | 9 | 5 | 5 |
| | | 5-30 min | 38 | 38 | 35 | 43 |
| | | >30 min | 51 | 50 | 60 | 48 |
| Ressenti | | | | | | |
| Impression d'humidité | Enquêté | 17 | 5 | 70 | 33 | |
| | Enquêteur | 24 | 11 | 70 | 43 | |
| Odeur de moisi | Enquêté | 7 | 3 | 35 | 0 | |
| | Enquêteur | 5 | 1 | 25 | 5 | |
| Etat du bâtiment | | | | | | |
| Ancienneté du bâtiment | < 1945 | 38 | 36 | 50 | 38 | |
| | 1945-1975 | 38 | 42 | 35 | 24 | |
| | > 1975 | 19 | 19 | 0 | 38 | |
| Rénovation récente du bâtiment | | 52 | 52 | 50 | 57 | |
| Façade dégradée | | 13 | 10 | 40 | 5 | |
| Toiture en mauvais état | | 8 | 7 | 15 | 10 | |
| Gouttière endommagée | | 9 | 7 | 10 | 19 | |

Guide de lecture : 35 % des logements de la classe des « moisis vétustes » présentent un problème de condensation, alors que cette proportion est de 7 % dans l'ensemble des logements. Les chiffres en gras sont les valeurs les plus significatives au sens des valeurs tests (>5) testant l'égalité des moyennes de la variable dans la classe considérée et dans l'échantillon global.

A partir de ces caractéristiques, les profils de logement ont été qualifiés de « sains », de « moisis » et de « moisis vétustes ».

Les logements « sains » représentent 73 % de l'échantillon. Ces logements se différencient des deux autres profils principalement par l'absence totale de condensation et quasi-totale de moisissures (0,9 % par rapport à plus de 60 % dans les autres profils de logement). Dans ces logements, une faible proportion des enquêtés déclare des odeurs de moisi, une impression d'humidité et des problèmes de chauffage en hiver. Les habitudes d'aération ne sont pas plus développées dans ce groupe que dans les autres.

Les logements « moisis vétustes » représentent 13 % de l'échantillon. Ces logements se caractérisent par la présence de taches de moisissure et d'humidité, par des problèmes d'humidité et d'isolation déclarés. On peut aussi observer de la condensation dans une proportion importante de ces logements. De plus, la proportion d'enquêtés déclarant être bien chauffés en hiver est beaucoup plus faible que dans l'ensemble de l'échantillon (30 % contre 85 %). Enfin, ces mêmes enquêtés déclarent aussi plus souvent une impression d'humidité ou une odeur de moisi.

Les logements « moisis » représentent 14 % de l'échantillon. Ce profil de logements se caractérise principalement par la présence de taches de moisissure et d'humidité. Une proportion importante des prélèvements de surface effectués dans ces logements présente des espèces de moisissures potentiellement allergisantes ou responsables d'alvéolites (respectivement 62 % et 43 % contre 13 % et 11 % dans l'échantillon global).

Tableau 5 : Caractéristiques des profils de logement (pourcentage de logements concernés au sein de chaque profil) (suite)

| Variables illustratives | | Ensemble (100 %) | Sains (73 %) | Moisis vétustes (13 %) | Moisis (14%) |
|---|-----------------------------|---------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
| Saison de l'enquête | | | | | |
| Eté | | 25 | 25 | 20 | 29 |
| Données socio-démographiques | | | | | |
| Statut d'occupation | Propriétaire | 54 | 58 | 20 | 62 |
| | Locataire | 33 | 30 | 55 | 29 |
| | HLM | 12 | 11 | 25 | 5 |
| Niveau d'étude de la personne de référence | < bac | 26 | 32 | 15 | 10 |
| | Bac | 10 | 9 | 22 | 14 |
| | Bac +2 à +4 | 28 | 26 | 35 | 33 |
| | Bac +5 et plus | 26 | 23 | 30 | 33 |
| Revenus par unité de consommation | < 900 € | 16 | 18 | 10 | 14 |
| | 900-1499 € | 13 | 11 | 25 | 14 |
| | > 1500 € | 46 | 44 | 45 | 57 |
| Revêtements des murs et plafonds | | | | | |
| Peinture | | 89 | 90 | 95 | 76 |
| Papier peint | | 52 | 53 | 50 | 52 |
| Lambris | | 9 | 10 | 5 | 5 |
| Moquette | | 5 | 7 | 0 | 0 |
| Toile de verre | | 13 | 9 | 20 | 29 |
| Résultats des prélèvements | | | | | |
| Indice COV positif | | 81 | 59 | 100 | 84 |
| Source intérieure d'ergostérol | | 22 | 15 | 33 | 44 |
| Type de moisissures | infectieuses | 3 | 0 | 10 | 14 |
| | allergisantes | 13 | 1 | 30 | 62 |
| | responsables d'alvéolite | 11 | 1 | 30 | 43 |
| | toxiques | 5 | 1 | 10 | 19 |

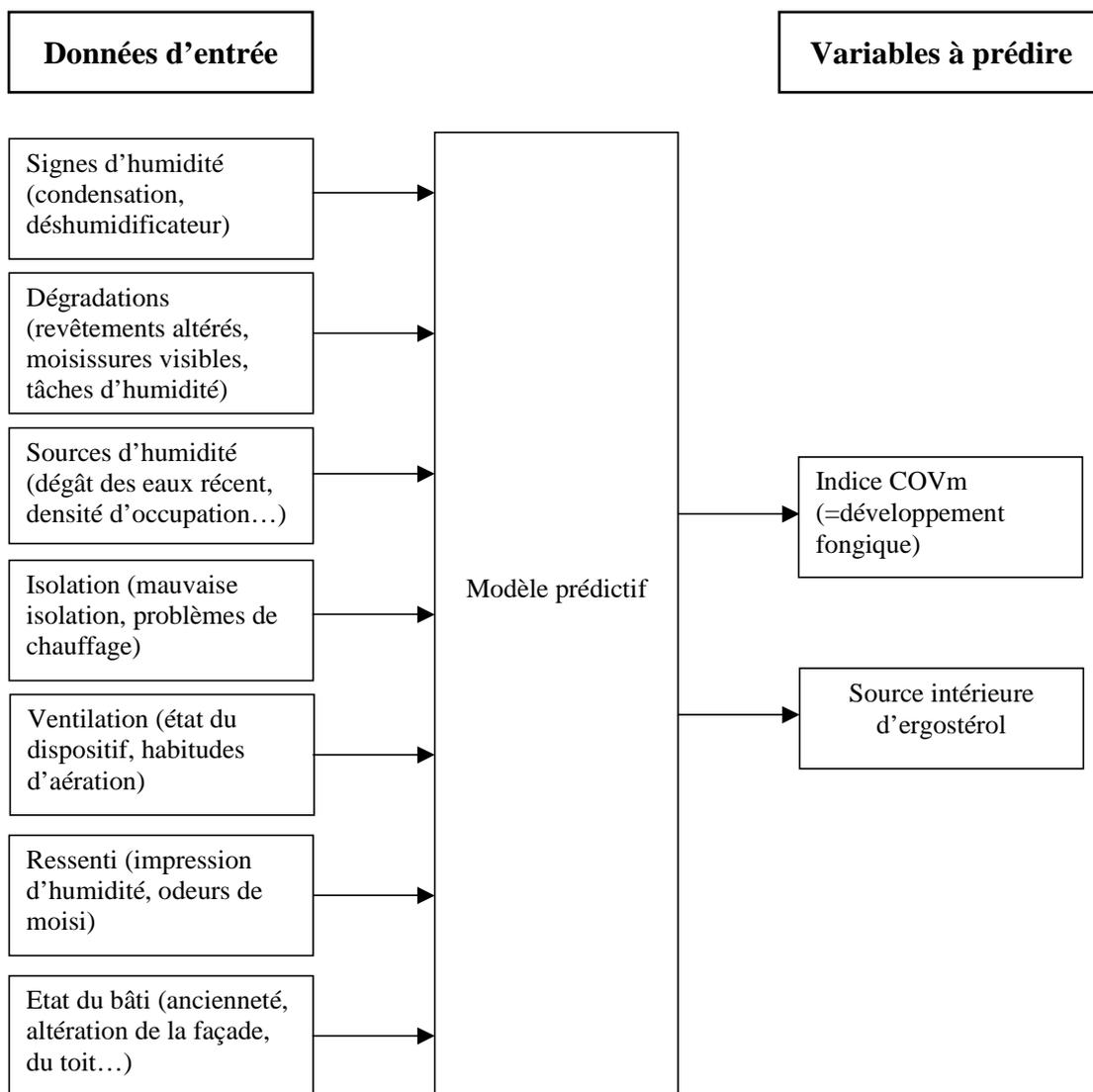
Globalement, ces tableaux confirment que les variables de ventilation ne différencient pas les différents profils. On peut aussi noter que le fait d'étendre son linge dans le logement et la présence de plantes ou d'aquarium ouvert ne semblent pas non plus liés à la présence de moisissures ou d'humidité. Enfin, les profils de logement ne différaient pas de manière significative selon les variables socio-démographiques, les variables de revêtement, d'état du bâtiment ou la saison.

Prédire une exposition aux moisissures

Un des objectifs de cette étude était de réaliser un modèle pour prédire la présence d'une contamination fongique objectivée par la mesure, soit la présence d'une source intérieure d'ergostérol ou d'un développement fongique actif (indice COV positif), à partir des variables issues du questionnaire environnemental tel qu'illustré sur la Figure 42.

En raison du grand nombre de variables, du faible effectif de l'échantillon et du nombre important de données manquantes sur les variables d'intérêt (en particulier les niveaux d'ergostérol), la régression logistique classique n'est pas applicable. En revanche, des méthodes de régression PLS (Partial Least Square) sont plus adaptées.

Figure 42 : Principe de l'élaboration d'un modèle prédictif d'exposition aux moisissures à partir des données recueillies



La régression PLS : éléments de méthode

La régression PLS (Partial Least Square) permet de relier des variables à prédire à un ensemble de variables explicatives lorsque le nombre de variables explicatives est élevé (Tenenhaus, 1998). Elle consiste à effectuer une analyse en composantes principales (telle que décrite précédemment) de l'ensemble des variables explicatives, sous la contrainte que les composantes principales expliquent au mieux la ou les variables à prédire. La régression se fait alors sur les composantes principales (et non sur les variables explicatives). La régression PLS peut être adaptée aux modèles de régression généralisée, en particulier à la régression logistique mise en œuvre dans le cadre de cette étude.

Les composantes principales étant des combinaisons linéaires des variables explicatives, il est possible de calculer les paramètres associés aux variables explicatives dans le modèle final à partir des paramètres de régression des composantes. Cependant, il n'est pas possible d'utiliser les tests classiques pour étudier la significativité des paramètres. Ainsi, des méthodes Bootstrap ont été utilisées afin de construire des intervalles de confiance des paramètres estimés.

Cette méthode, proposée à la fin des années 70 par Bradley Efron, permet d'améliorer la robustesse d'un modèle ou de renseigner sur la stabilité de ses estimateurs (Efron *et al.*, 1993). Elle consiste à construire de nouveaux échantillons, en général par tirage aléatoire sur l'échantillon de départ, et de réévaluer le modèle sur chacun de ces échantillons. On obtient alors une distribution des paramètres du modèle, ce qui permet notamment d'en déduire des intervalles de confiance de 95 % à partir des quantiles 0,025 et 0,975.

Deux modèles de régression logistique PLS ont ainsi été réalisés pour prédire d'une part la présence d'une source intérieure d'ergostérol (variable *ergostero2*) et d'autre part la présence d'un développement fongique actif (variable *icov*). Ces modèles ont été validés par une technique de validation croisée (Leave One Out).

Les variables explicatives sont les variables actives retenues dans l'analyse factorielle. Ces variables ont été transformées afin de conserver dans le modèle uniquement des variables binomiales. Les variables binaires dont une des deux modalités avait un effectif inférieur à 2 n'ont pas pu être retenues dans le modèle, à savoir la surrocupation, le temps d'aération en été et la présence d'une gouttière endommagée. Le package *plsRglm* de R a été utilisé (Bertrand *et al.*, 2009).

Tableau 6 : Résultats des estimations des paramètres du modèle prédictif d'une contamination fongique active (indice COV positif)

| Variables | OR ajusté | IC Bootstrap | Significativité ¹ |
|---|-------------|-------------------------|------------------------------|
| Présence de condensation (réf. absence) | 0,70 | [0,00 - 80,64] | non |
| Présence d'un déshumificateur (réf. absence) | 0,64 | [0,00 - 31,82] | non |
| Dégradation d'un revêtement (réf. pas de dégradation) | 1,97 | [0,58 - 6,82] | non |
| Moisissures visibles (réf. pas de moisissure visible) | 1,39 | [0,54 - 8,00] | non |
| Surface moisie de > 0 à ½ A4 (réf. aucune surface) | 1,26 | [0,00 - 18,54] | non |
| Surface moisie de ½ A4 à 5 A4 (réf. aucune surface) | 1,12 | [0,00 - 33,12] | non |
| Surface moisie de 5 A4 à 3 m ² (réf. aucune surface) | 1,80 | [0,1 - ∞ ²] | non |
| Taches d'humidité (réf. aucune tache) | 1,02 | [0,57 - 3,74] | non |
| Surface moisie ou humide > 0 à ½ A4 (réf. aucune surface) | 0,55 | [0,00 - 3,10] | non |
| Surface moisie ou humide de ½ A4 à 5 A4 (réf. aucune surface) | 1,11 | [0,00 - 11,13] | non |
| Surface moisie ou humide > 5 A4 (réf. aucune surface) | 1,45 | [0,41 - 27,11] | non |
| Problèmes d'humidité dans les 12 mois (réf. pas de problème) | 0,89 | [0,00 - 7,32] | non |
| Présence d'une source d'humidité à proximité (réf. absence) | 0,30 | [0,00 - 0,98] | oui |
| Linge étendu dans le logement (réf. absence) | 1,51 | [0,68 - 10,59] | non |
| Présence d'un sèche-linge sans bac de condensation (réf. absence) | 0,00 | [0,00 - 0,00] | oui |
| Présence d'au moins 5 plantes (réf. moins de 5 plantes) | 0,48 | [0,00 - 1,84] | non |
| Présence d'au moins 3 sources d'humidité (réf. moins de 3 sources) | 0,89 | [0,00 - 5,58] | non |
| Moins de 0,5 source d'humidité par pièce (réf. aucune) | 1,14 | [0,42 - 4,48] | non |
| Au moins 0,5 source d'humidité par pièce (réf. aucune) | 0,44 | [0,00 - 2,08] | non |
| Problème d'isolation (réf. pas de problème) | 0,83 | [0,00 - 7,03] | non |
| Double vitrage dans 50 à 75 % des pièces (réf. <50 %) | 0,96 | [0,47 - 3,97] | non |
| Double vitrage dans 75 à 99 % des pièces (réf. <50 %) | 0,64 | [0,15 - 1,80] | non |
| Toutes les pièces avec double vitrage (réf. pas toutes les pièces) | 0,45 | [0,00 - 1,73] | non |
| Logement correctement chauffé (réf. mal chauffé) | 1,01 | [0,26 - 3,71] | non |
| Aération naturelle (réf. pas d'aération) | 0,87 | [0,37 - 2,66] | non |
| Aération VMC (réf. pas d'aération) | 0,79 | [0,23 - 2,46] | non |
| Proportion de défauts du dispositif d'aération ³ : < 0,25 (réf. 0) | 1,11 | [0,00 - 7,39] | non |
| Proportion de défauts du dispositif d'aération ³ : de 0,25 à 0,75 (réf. 0) | 0,31 | [0,00 - 1,16] | non |
| Aération du logement en hiver < 30 min (réf. <= 5 min) | 0,70 | [0,05 - 1,40] | non |
| Aération du logement en hiver > 30 min (réf. <= 5 min) | 1,28 | [0,69 - 7,24] | non |
| Impression d'humidité de l'enquêté dans les 12 mois (réf. aucune) | 1,12 | [0,35 - 5,87] | non |
| Impression d'humidité de l'enquêteur (réf. aucune) | 1,68 | [0,83 - 10,07] | non |
| Bâtiment achevé entre 1945 et 1975 (réf. avant 1945) | 1,52 | [0,73 - 5,99] | non |
| Bâtiment achevé après 1975 (réf. avant 1945) | 0,78 | [0,00 - 2,39] | non |
| Rénovation récente du bâtiment (réf. non récente) | 0,86 | [0,30 - 2,25] | non |
| Façade dégradée (réf. non dégradée) | 0,76 | [0,00 - 5,75] | non |
| Toiture en mauvais état (réf. en bon état) | 0,64 | [0,00 - 4,53] | non |

¹ un paramètre est significatif si son intervalle de confiance (IC Bootstrap) n'inclut pas la valeur 1.² > 10⁴³ en tenant compte de la perméabilité des fenêtres

Guide de lecture : toute chose égale par ailleurs, le modèle montre que les logements présentant une source d'humidité à proximité ont 0,3 fois plus de chance que les logements sans source d'humidité à proximité de développer des contaminations fongiques actives que de ne pas en développer.

Performance des modèles prédictifs

Dans la modélisation de la présence d'une source intérieure d'ergostérol, les faibles effectifs observés pour une grande partie des modalités ont pour conséquence un manque de stabilité dans l'estimation des paramètres : les intervalles de confiances et les variances estimées sont très larges et très peu de variables apparaissent significatives. Les estimations des paramètres jugées trop peu robustes ne seront pas présentées dans ce rapport. Cependant, la validation croisée a permis d'estimer un pourcentage d'erreur de 19 % pour le modèle prédictif de présence d'ergostérol. Il apparaît alors que le questionnaire environnemental permet une bonne prédiction de l'ergostérol (>80 %). Ces 19 % d'erreurs correspondent à des logements présentant une source intérieure d'ergostérol dont la présence n'a pas été prédite par le modèle.

Pour la modélisation de la présence d'un développement fongique actif à travers l'indice COV, le problème d'effectifs trop faibles de certaines modalités était moins présent et l'estimation des paramètres était plus stable (l'estimation du modèle et l'estimation Bootstrap sont très proches) bien que les intervalles de confiances paraissent encore assez larges. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6. La validation croisée a estimé un pourcentage d'erreur de 57 % pour la présence d'un développement fongique actif : le modèle ne semble donc pas adapté avec seulement 43 % de bonne prédiction.

Le modèle met en évidence seulement deux variables explicatives avec un effet significatif : la présence d'une source d'humidité à proximité d'un logement et la présence d'un sèche-linge. A priori, ces variables n'étaient pas considérées comme les plus déterminantes, en effet d'autres variables, telles que les problèmes d'humidité, étaient pressenties pour la prédiction des contaminations fongiques. Ceci est toutefois cohérent avec les résultats obtenus précédemment lors de l'analyse des déterminants potentiels. En effet, aucun des facteurs étudiés n'avait pu être relié à un développement actif de moisissure. Encore une fois, il est important de noter que ces résultats ne sont que préliminaires car obtenus sur un échantillon trop faible ; les estimations manquent alors de robustesse et des effets significatifs peuvent ne pas avoir été mis en évidence.

Moisissures de l'habitat et santé, autres expositions domestiques à prendre en compte

L'enquête pilote, compte tenu de l'échantillon réduit de logements enquêtés, n'avait pas pour ambition de mettre en relation une exposition aux moisissures et d'éventuels effets sanitaires. Ainsi, les données sur la santé des membres des foyers enquêtés ont été collectées uniquement afin de tester la faisabilité du recueil en vue d'une enquête épidémiologique à grande échelle.

Les moisissures sont susceptibles d'être responsables d'effets variés sur la santé tels que présentés dans ce chapitre. Ainsi, les indicateurs sanitaires, recueillis par questionnaire, ont été retenus selon les éléments rapportés dans la littérature. Par ailleurs, les effets des moisissures ne sont pas spécifiques, d'autres expositions domestiques, ainsi que des facteurs comportementaux, sont en effet également susceptibles d'en être à l'origine. C'est pourquoi ces expositions, à prendre en compte en tant que facteurs de confusion dans le cadre d'une analyse épidémiologique, ont été documentées.

Pathologies potentiellement liées aux expositions aux moisissures

Les spores fongiques, grâce à leur petit diamètre, sont capables de pénétrer dans les voies respiratoires, transportant allergènes et toxines. L'exposition aux moisissures, en particulier par inhalation de spores fongiques et autres éléments mycéliens émis en quantité dans l'air par les moisissures, est ainsi susceptible d'entraîner des pathologies respiratoires et cutanées diverses parmi lesquelles les manifestations allergiques occupent une place prépondérante. Différents mécanismes d'action peuvent être décrits (Seltzer et Fedoruk, 2007).

Outre les effets immuno-allergiques, les moisissures sont aussi impliquées dans des mécanismes infectieux (aspergillose), touchant plus particulièrement les sujets immunodéprimés.

Des effets toxiques et irritatifs leur sont aussi attribuables. En effet, diverses substances émises par les moisissures, tels que les composés organiques volatils, les mycotoxines ou encore certains éléments constituant les parois cellulaires tels que les glucanes sont en effet susceptibles d'entraîner des effets nocifs chez un individu exposé. Ces effets peuvent en particulier se traduire par une exacerbation de l'asthme, une augmentation de la fréquence des maladies des voies respiratoires supérieures, des maux de tête ou encore des nausées (Curtis *et al.*, 2004).

Si les mécanismes immuno-allergiques, infectieux et irritatifs sont bien établis, aucune relation dose-réponse n'est disponible, par ailleurs les sensibilités individuelles sont très variables. Les effets potentiels induits par les mycotoxines sont quant eux sujets à controverse (Pestka *et al.*, 2008).

Les mécanismes allergiques

Les substances telles que protéines, polysaccharides et lipopolysaccharides, contenues dans différents composants des moisissures, sont reconnues comme étant des substances allergènes. Une soixantaine d'espèces de moisissures, dont les principaux genres sont *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria* et *Cladosporium*, peuvent être responsables d'un effet immunoallergique. L'inhalation de fragments, de débris ou de spores de ces différentes espèces de moisissures peut entraîner une réaction d'hypersensibilité de type I (Boutin-Forzano *et al.*, 2005).

L'allergie de type I, dont l'expression clinique peut être la rhinite, la conjonctivite et l'asthme, a fait l'objet de nombreuses études cliniques et épidémiologiques. Cependant, en raison de l'absence de standardisation de certains extraits allergéniques, le rôle des moisissures dans ces pathologies, bien que connu, est difficile à démontrer. Certaines études suggèrent un lien entre exposition aux moisissures et sensibilisation, environ 10 % de la population étant sensibilisés aux allergènes des moisissures les plus communes. La sensibilisation aux moisissures, en particulier à *Alternaria alternata*, est reliée à la présence, la persistance et la sévérité de l'asthme (Charpin *et al.*, 2003).

Des associations entre prévalence accrue de symptômes associés à l'asthme, tels que la respiration sifflante et la toux, et expositions aux moisissures du milieu intérieur ont été mises en évidence par certains travaux, mais cette relation n'est pas retrouvée dans toutes les études (Bush *et al.*, 2006). D'autres études évoquent la possibilité d'apparition de l'asthme en relation avec une exposition aux moisissures (Sahakian *et al.*, 2008).

D'autres manifestations allergiques, plus rares, peuvent être observées. L'allergie de type III peut entraîner une alvéolite allergique extrinsèque. Il s'agit de pneumopathies aiguës ou subaiguës de mécanisme immunoallergique en rapport avec l'inhalation chronique de substances antigéniques. Dans l'immense majorité des cas, les sources antigéniques sont d'origine professionnelle. Parmi les étiologies liées à la pollution domestique, plusieurs études récentes ont rapporté des cas d'alvéolites allergiques extrinsèques en rapport avec l'inhalation de différentes espèces de moisissures de l'habitat (*Penicillium*, *Serpula*, *Aspergillus*, etc.).

Quant à elle, l'aspergillose bronchopulmonaire allergique, caractérisée par la colonisation chronique des voies aériennes par *Aspergillus fumigatus*, fait intervenir un mécanisme immunologique mixte, avec des réactions de types I et III.

Les mécanismes infectieux

Parmi les pathologies infectieuses, l'aspergillose bronchopulmonaire invasive est la plus connue. Elle se traduit par une croissance fongique à l'intérieur du poumon et est due principalement à *Aspergillus fumigatus* et à quelques espèces voisines : *A. flavus*, *A. terreus*, *A. nidulans*.

Cette infection est rare mais possible chez un individu immunodéprimé et est constatée le plus souvent dans les services d'hématologie des hôpitaux où elle représente la première cause de mortalité. Ces cas surviennent le plus souvent lors de travaux d'entretien ou de rénovation hospitaliers (travaux d'excavation, démolition... à proximité ou dans le bâtiment ; contamination du système de traitement d'air) (Boutin-Forzano *et al.*, 2005).

Les mécanismes irritatifs

Les moisissures produisent de nombreuses substances potentiellement irritantes. A ce titre, deux types de substances ont été identifiées comme pouvant être responsables d'effets irritatifs.

Tout d'abord, les particules fongiques telles que des fragments d'hyphes ou spores ont d'une part une action mécanique et, d'autre part, sont susceptibles de produire une irritation liée aux constituants même que sont les $\beta(1-3)$ glucanes, polymères du glucose de haut poids moléculaire (Fung et Hughson, 2003). Ces substances agissent comme puissant agent inflammatoire, quelques études rapportent une augmentation de la prévalence des signes respiratoires corrélée à l'augmentation du taux de glucanes chez des personnes exposées.

Ces effets irritatifs peuvent également être liés aux COV produits par les moisissures lors de leur croissance et qui sont responsables de l'odeur caractéristique de « moisi ». Ils comprennent un large éventail de composés tels que alcools, cétones, aldéhydes, esters, composés azotés et sulfurés... Les effets des COV microbiens sont susceptibles de se manifester au niveau des muqueuses oculaires, nasales, digestives ou bronchiques (ou même la peau), mais les mécanismes ne sont pas clairement identifiés. Des symptômes d'irritation des yeux, du nez et de la gorge ont souvent été rapportés en présence de fortes odeurs produites par une croissance abondante de moisissures (Walinder *et al.*, 2005).

Des auteurs scandinaves ont calculé le seuil actif de composés individuels et de mélanges de COV et de COV microbiens. Dans une de leurs études, ces chercheurs ont démontré l'effet de synergie ainsi que l'effet irritatif d'une très petite concentration d'un mélange. Dans des circonstances exceptionnelles, les COV peuvent atteindre des niveaux suffisants pour produire des effets sur le système nerveux central tels que maux de tête, difficultés de concentration, fatigue (Fung et Hughson, 2008). Ces différentes manifestations cliniques sont fonction de la dose d'exposition et sont transitoires, disparaissant avec une diminution ou une suppression de l'exposition.

Les mécanismes toxiques

Les effets toxiques résultent de l'action pathogène de toxines élaborées par les moisissures, appelées mycotoxines.

Les mycotoxines sont des métabolites secondaires produits par les moisissures. Ces substances de faible poids moléculaire ne sont pas volatiles et se retrouvent dans l'air associées aux spores. Seules certaines espèces sont capables de les produire et ce, sous certaines conditions. Ainsi, la seule présence de ces espèces dans un logement ne renseigne pas sur la potentielle exposition par

voie d'inhalation des occupants du logement. Selon les auteurs, jusqu'à 400 mycotoxines ont été répertoriées. Dans l'environnement intérieur, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Memnoniella*, *Penicillium*, *Stachybotrys*, *Trichoderma* sont les principaux genres identifiés comme pouvant produire de nombreuses mycotoxines (Hodgson et Dearborn, 2009).

S'il est bien établi que l'ingestion de mycotoxine (cf. aflatoxine) peut entraîner maladie et mort chez l'homme, la toxicité par inhalation est moins documentée. Cependant, diverses études montrent que des doses identiques de ces mycotoxines peuvent être plus toxiques inhalées qu'ingérées.

La majorité des mycotoxines sont de puissants cytotoxiques qui interfèrent à plusieurs niveaux de la vie cellulaire. Certaines mycotoxines peuvent bloquer la production de surfactants ou détruire les macrophages au niveau pulmonaire. Certaines toxines attaquent l'intégrité de la structure de l'épithélium pulmonaire permettant à la moisissure de coloniser les cavités alvéolaires. Ces différents modes d'action ont des effets délétères sur les voies respiratoires et peuvent mener à l'exacerbation de l'asthme, à des infections fongiques (immunodéprimés) ou à des infections secondaires dues aux effets immunosuppresseurs des mycotoxines. L'exposition à ces toxines pourrait aussi être à l'origine de symptômes généraux non spécifiques tels que maux de tête, de gorge, diarrhée, fièvre...

Les conséquences de l'inhalation de mycotoxines sont soupçonnées d'être particulièrement graves chez certaines catégories de personnes telles que les nourrissons. Ainsi, *Stachybotrys chartarum*, reconnue pour causer diverses mycotoxicoses, a été associée à des cas d'hémorragie pulmonaire chez de jeunes enfants. Bien que le lien étiologique ne soit pas clairement établi, cette moisissure suscite une méfiance particulière vis-à-vis des risques pour la santé (Pestka *et al.*, 2008).

Certains auteurs restent sceptiques quant à la plausibilité des effets décrits précédemment en lien avec une exposition domestique : en effet, compte-tenu des fortes doses d'exposition nécessaires, il est peu probable de les rencontrer dans l'habitat (Bush *et al.*, 2006).

Recueil des données sanitaires et autres données individuelles

Dans le cadre de cette étude, les données sanitaires ont été recueillies à l'aide d'un questionnaire auto-administré qui était remis aux participants par l'enquêteur en main propre lors de la première visite. Les individus avaient pour consigne de le remettre à l'enquêteur lors de la deuxième visite.

La prise en compte des divers effets rapportés dans la littérature a orienté le choix des indicateurs sanitaires à recueillir. Les enquêtes épidémiologiques ont souvent recours aux questionnaires de santé en tant qu'outil de recueil. De ce fait, en particulier pour les symptômes respiratoires, il existe des questionnaires standardisés ayant fait l'objet de validations rigoureuses. Ainsi, le questionnaire utilisé a été adapté à partir du questionnaire de l'enquête ISAAC⁷ (Kauffmann *et al.*, 2002) auquel un module rhinite allergique (Annesi-Maesano *et al.*, 2002) a été adjoint ainsi qu'un module symptômes généraux et pathologies infectieuses tel que développé dans une enquête suédoise (Engvall *et al.*, 2004). Au final, ont été recueillies les données sanitaires suivantes :

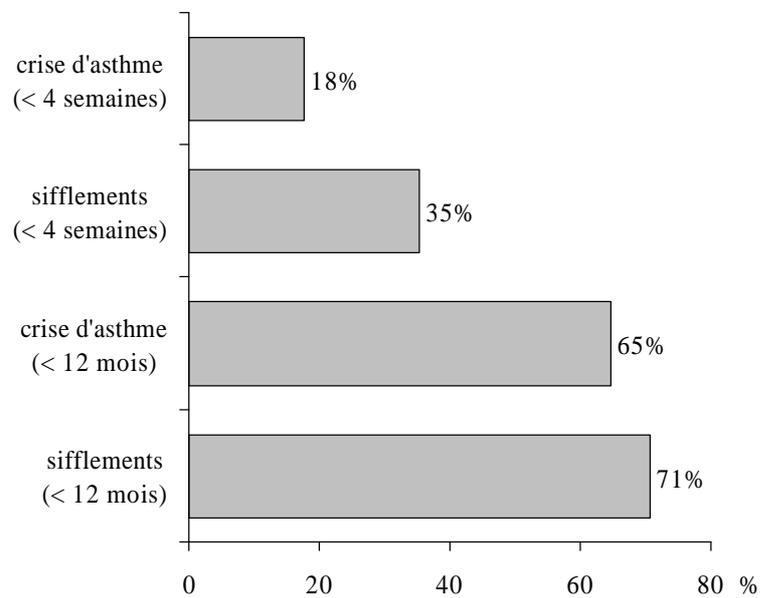
- état général de santé ;
- symptômes d'asthme, de bronchite, de rhinite allergique ;
- fréquence des infections respiratoires ;
- symptômes généraux (fatigue, maux de tête/migraine, nausée/perte d'appétit).

Par ailleurs, ce questionnaire permettait de recueillir des données socio-démographiques (âge, sexe, profession, niveau d'étude, revenus...), ainsi que des facteurs de risques individuels tels que les habitudes tabagiques. Trois questionnaires ont été développés : un questionnaire pour les adultes (âgés d'au moins 15 ans) qui comprenait environ 150 variables, un questionnaire spécifique pour les asthmatiques (soit environ 75 variables), ainsi qu'un questionnaire comportant un nombre réduit de questions pour les enfants (soit environ 40 variables). Les individus adultes avaient pour consignes de remplir eux-mêmes le questionnaire les concernant. Pour les enfants âgés de moins de 15 ans, le questionnaire était complété par l'adulte responsable.

Enfin, les individus âgés de plus de 5 ans inclus dans l'enquête se voyaient confiés un débit de pointe afin qu'ils réalisent eux-mêmes une mesure de leur débit expiratoire de pointe selon les consignes d'utilisation qui leur étaient fournies.

⁷ L'enquête ISAAC "International Study of Asthma and Allergies in Childhood " a pour objectif général de mieux connaître la fréquence et les facteurs de risque des maladies allergiques de l'enfant.

Figure 43: Répartition des symptômes d'asthme parmi les adultes présentant un asthme actuel (n=17)



Faisabilité du recueil dans le cadre de ce pilote

222 questionnaires adultes ont été recueillis ainsi que 47 questionnaires enfants, ce qui représente un taux de réponse de 95 %. 2 % des foyers n'ont remis aucun questionnaire et dans 3 % des cas, seuls certains membres du foyer n'ont pas rempli le questionnaire. Le questionnaire de santé a donc reçu une bonne adhésion, y compris lorsque l'ensemble des membres du foyer devait le compléter.

Au démarrage du pilote, les questionnaires étaient expédiés avant la première visite de l'enquêteur et les individus avaient pour consigne de le remplir avant sa venue, afin de limiter les biais de réponses (influence possible de l'enquête environnementale sur les réponses) (Clarisse *et al.*, 2002). Par la suite, le protocole a dû être revu car, dans de nombreux cas, les individus prétendaient n'avoir jamais reçu le questionnaire ou bien l'avoir perdu. C'est pourquoi, il a été décidé que le questionnaire serait remis en main propre lors de la première visite de l'enquêteur et récupéré à sa deuxième venue.

La mesure du souffle a également rencontré une bonne adhésion des participants puisque environ 90 % des mesures ont été réalisées.

Données sanitaires et construction des indicateurs

Les indicateurs sanitaires ont été construits pour les adultes d'une part (âgés d'au moins 15 ans) et les enfants d'autre part. Compte-tenu du nombre réduit de questions adressées aux enfants, certains indicateurs ne sont disponibles que pour les adultes. Le descriptif de ces indicateurs est présenté ci-après. Les pourcentages exprimés sont rapportés respectivement aux échantillons d'adultes, soit 222 individus, et d'enfants, soit 47 individus.

Pour les adultes

Asthme

10,4 % des adultes ont déclaré avoir déjà eu de l'asthme dans leur vie, cet asthme ayant été confirmé par un médecin. 8 % ont déclaré des symptômes dans les douze derniers mois (sifflements, gêne respiratoire ou essoufflement nocturne) (cf. Figure 43), et/ou avoir pris un traitement médicamenteux pour cette pathologie.

Figure 44 : Débit expiratoire de pointe théorique en fonction de la taille, l'âge et le sexe et valeurs pour l'échantillon

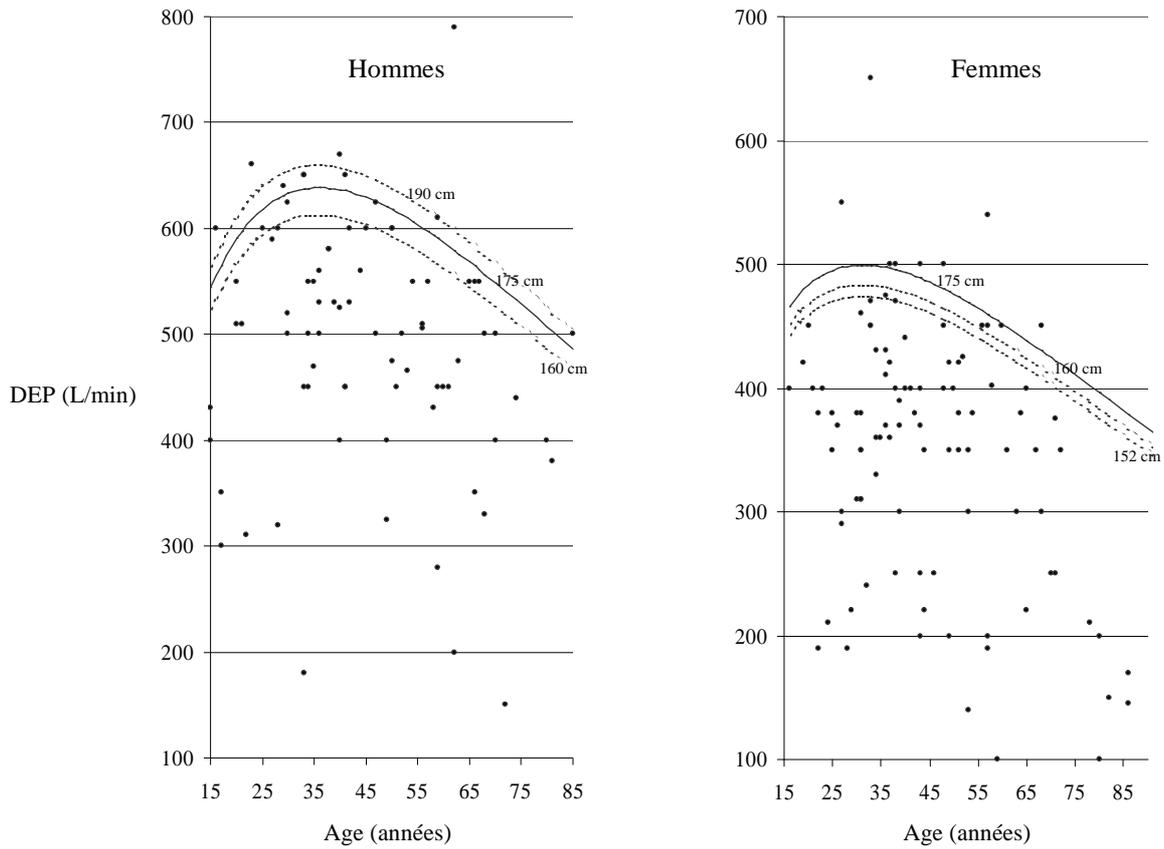
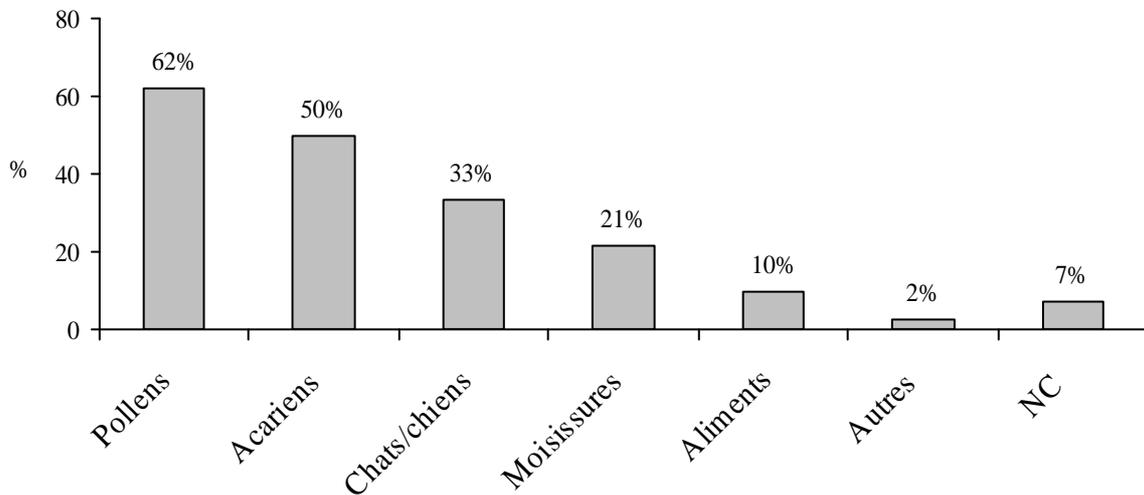


Figure 45 : Pourcentage de tests positifs pour chaque allergène testé parmi les adultes ayant réalisé un bilan (n=42)



Les individus manifestant des symptômes et/ou sous traitement sont considérés comme atteints d'asthme actuel. 53 % des individus présentant un asthme actuel déclarent être sous traitement médicamenteux. Aucun asthme grave, c'est-à-dire ayant donné lieu à une consultation aux urgences ou à une hospitalisation dans les douze derniers mois, n'a été déclaré.

A partir d'une analyse des données de l'enquête santé Insee 2002-2003, la prévalence de l'asthme actuel, établie selon les mêmes critères, a été estimée en France à 6 % (Delmas *et al.*, 2008). Les résultats obtenus dans le cadre de notre enquête (8 %) sont donc proches.

Débit expiratoire de pointe

Les mesures de débit expiratoire de pointe sont présentées à la Figure 44 ainsi que les valeurs théoriques attendues selon la taille, l'âge et le sexe (Nunn et Gregg, 1989). A la vue de ces mesures qui apparaissent très dispersées et en moyenne bien inférieures aux valeurs théoriques, il ne semble pas pertinent d'exploiter ces données. En effet, il n'est pas possible de vérifier que les consignes d'utilisation de l'appareil de mesure ont été bien respectées, les individus ayant eux-mêmes effectué cette mesure.

Rhinite allergique

Un score de rhinite allergique a été calculé d'après une méthodologie validée (Annesi-Maesano *et al.*, 2002). Un individu est considéré comme atteint de rhinite allergique lorsqu'il obtient un SFAR (score for allergic rhinitis) au moins égal à 7, pour un score maximum de 16. Selon ce critère, environ 24 % des adultes de l'échantillon étaient atteints de rhinite allergique. La prévalence de cette pathologie a été estimée à 21 % dans l'enquête de Annesi-Maesano *et al.*, ce qui était comparable aux estimations françaises établies par d'autres enquêtes.

Allergie

30 % des adultes déclarent une allergie confirmée par un médecin ou par un test positif. Parmi les individus ayant réalisé un bilan (test cutané, sanguin...), soit environ 2/3 des individus allergiques, l'allergie aux pollens apparaissait comme dominante avec 62 % des individus du sous-échantillon concernés. Par ailleurs, 21 % déclaraient un test positif aux moisissures (cf. Figure 45). Ceci représente une prévalence de 4 % d'individus sensibilisés dans notre échantillon d'adultes.

Figure 46 : Répartition du nombre de consultations pour infection des voies respiratoires supérieures et inférieures dans les douze derniers mois chez les adultes (n=222)

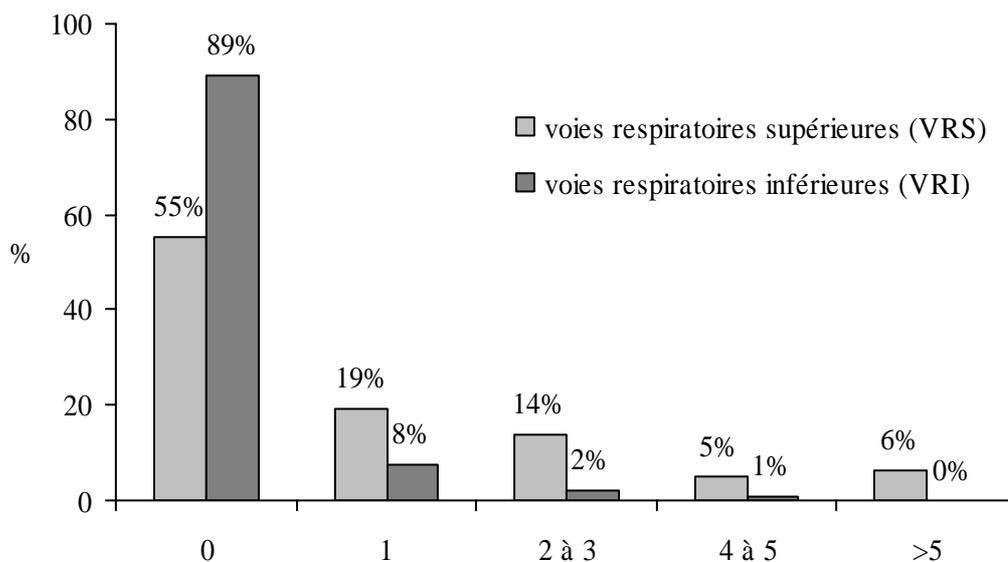
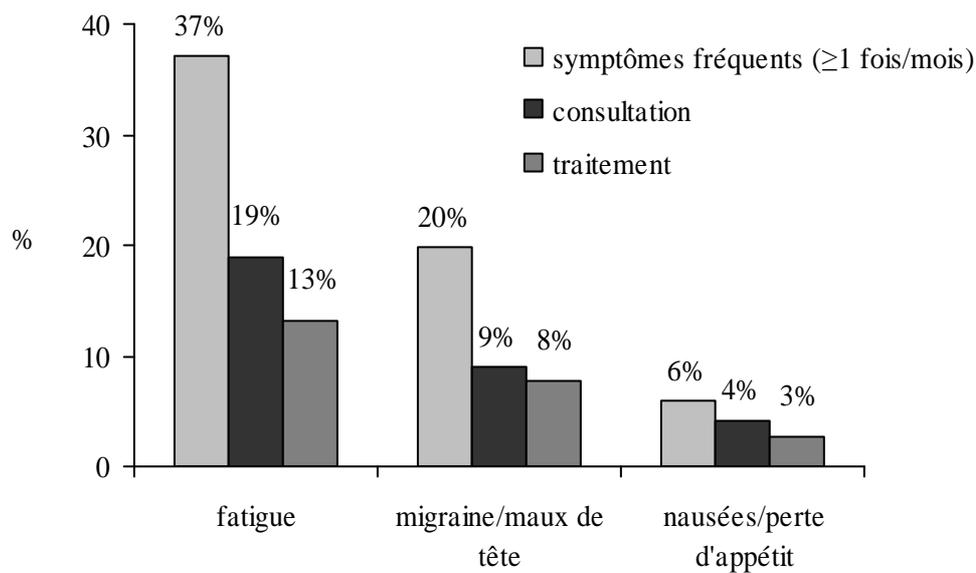


Figure 47 : Proportion d'adultes ayant déclaré des symptômes généraux au moins une fois par mois ou bien ayant consulté ou pris un traitement pour ces symptômes (n=222)



Bronchite chronique

2,7 % des adultes présentaient des symptômes de bronchite chronique, à savoir de la toux et des crachats quotidiens pendant 3 mois consécutifs chaque année. A partir d'une analyse des données de l'enquête santé Insee 2002-2003, la prévalence de la bronchite chronique a été estimée en France à 3,5 % chez les adultes de 45 ans ou plus (Fuhrman et Delmas, 2010).

Infections respiratoires

Ces indicateurs ont été construits afin d'étudier les liens éventuels entre exposition aux moisissures et atteinte des voies respiratoires se traduisant par une augmentation de la fréquence des consultations médicales pour ces pathologies.

Respectivement, 3 % et 11 % des adultes ont consulté pour une infection des voies respiratoires inférieures (VRI : bronchite ou pneumonie) ou supérieures (VRS : rhume, sinusite, angine) à une fréquence élevée au cours des douze derniers mois, soit au moins deux fois pour une infection des VRI et au moins quatre fois pour une infection des VRS (Figure 46).

Symptômes généraux

Ces indicateurs ont été construits afin d'étudier les liens éventuels entre une exposition aux moisissures et la manifestation de symptômes généraux non spécifiques tels que décrits dans le syndrome des bâtiments malsains, soit fatigue, nausée, maux de tête... Le rôle potentiel des moisissures dans ce syndrome a pu être avancé (Sahakian *et al.*, 2008).

La Figure 47 indique la proportion d'adultes ayant déclaré des symptômes généraux (fatigue, migraine, maux de tête, nausées et perte d'appétit) au moins une fois par mois ou bien ayant consulté ou pris un traitement pour ces symptômes dans les douze derniers mois. 17 % des adultes déclarent avoir ressenti plus d'une fois par mois ou bien avoir consulté pour au moins deux des symptômes parmi fatigue, maux de tête/migraine et nausées/perse d'appétit.

Figure 48 : Répartition du nombre de consultations pour infection des voies respiratoires supérieures et inférieures dans les douze derniers mois chez les enfants (n=47)

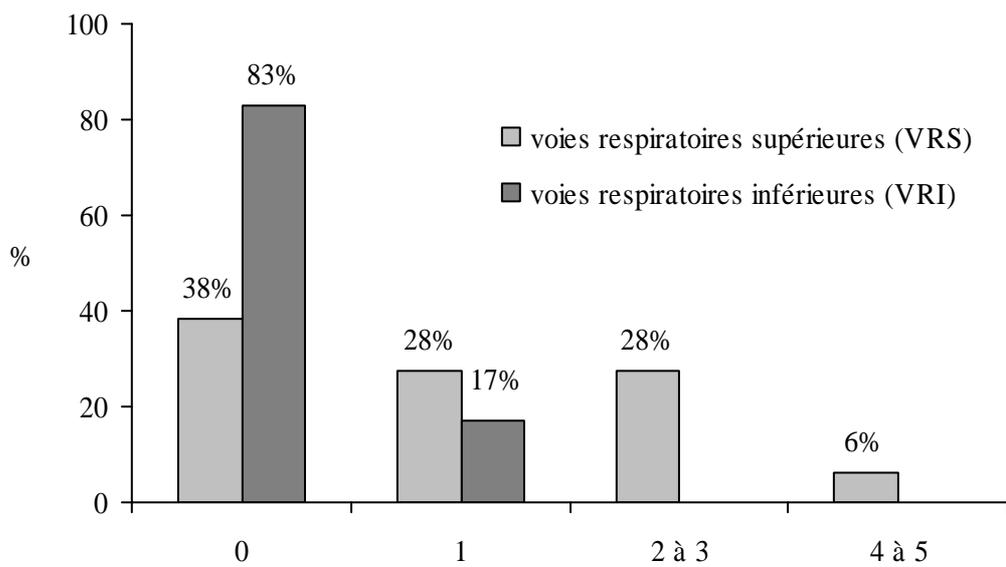
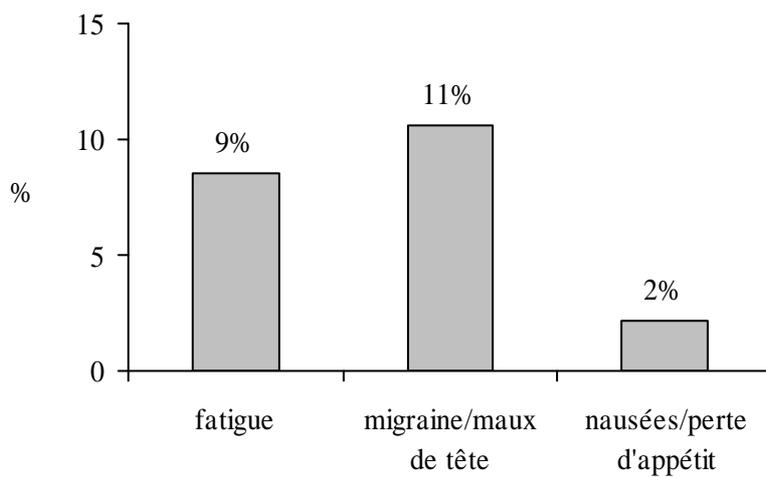


Figure 49 : Proportion d'enfants ayant déclaré des symptômes généraux au moins une fois par mois au cours des douze derniers mois (n=47)



Pour les enfants

Asthme et allergie

Pour 9 % des enfants, un asthme a été déclaré. Les symptômes d'asthme et de consommation de médicaments n'ont pas été recueillis pour les enfants.

Pour 9 % des enfants, une allergie nasale a été déclarée. Pour respectivement 6 %, 9 % et 6 % des enfants, une allergie aux acariens, animaux domestique (chats ou chiens) et pollens a été déclarée. Aucune allergie aux moisissures n'a été déclarée.

Infections respiratoires

6 % des enfants ont consulté pour une infection des voies respiratoires supérieures (VRS : rhume, sinusite, angine) à une fréquence élevée, soit au moins 4 fois au cours des douze derniers mois (Figure 48). Les consultations pour infections des voies respiratoires inférieures étaient, quant à elles, beaucoup moins fréquentes pour l'ensemble de l'échantillon, 17 % des enfants ont consulté pour ces pathologies, et ce seulement une fois au cours des douze derniers mois.

Symptômes généraux

La Figure 49 indique la proportion d'enfants ayant déclaré des symptômes généraux (fatigue, migraine, maux de tête, nausées et perte d'appétit) au moins une fois par mois au cours des douze derniers mois. Les données de consultations ou de consommation de médicaments n'ont pas été recueillies pour les enfants.

Tableau 7 : Indicateurs de présence de sources d'allergènes dans le logement

| Types de sources | Indicateurs créés | % de logements * | % données manquantes |
|---------------------|--|------------------|----------------------|
| Animaux domestiques | Présence d'au moins un chien, un chat ou des rongeurs | 19 | 0 |
| Peluches | Présence de plus de dix peluches dans au moins une pièce de vie | 21 | 0 |
| Livres | Présence de livres en grande quantité non rangés dans une bibliothèque fermée dans au moins une pièce de vie | 43 | 0 |
| Plantes | Présence d'au moins un ficus dans le logement | 18 | 2 |
| Aspirateur | Utilisation d'un aspirateur sans filtre HEPA plusieurs fois par semaine | 26 | 4 |
| Moquette | Présence d'une moquette de plus de dix ans dans au moins une pièce de vie | 9 | 1 |
| Tapis | Présence de deux tapis ou plus dans au moins une pièce de vie | 23 | 1 |
| Rideaux | Présence de double-rideaux dans au moins une pièce de vie | 38 | 1 |

* % parmi les logements pour lesquels les données sont disponibles

Tableau 8 : Indicateurs de présence de sources d'allergènes dans la chambre

| Types de sources | Indicateurs créés | % de personnes* | % données manquantes |
|------------------|--|-----------------|----------------------|
| Literie | Présence d'un matelas de plus de dix ans sans housse anti-acariens dans la chambre | 21 | 7 |
| | Présence d'une couette en duvet dans la chambre | 16 | 6 |
| | Présence d'oreillers en duvet dans la chambre | 22 | 4 |

* % parmi les personnes pour lesquelles les données sont disponibles

Autres expositions domestiques : sélection des facteurs de confusion

Sources d'allergènes

De nombreux allergènes sont susceptibles d'être retrouvés à l'intérieur des logements, en particulier dans la poussière, du fait notamment de la présence d'animaux domestiques ou d'acariens. Ces allergènes peuvent être à l'origine de pathologies telles que des allergies, ou encore du développement et/ou de l'exacerbation de l'asthme (Gaffin et Phipatanakul, 2009).

Le questionnaire environnemental a permis de recueillir des données sur la présence de sources potentielles d'allergènes dans le logement, en particulier d'animaux domestiques. Certains facteurs favorisant l'accumulation de poussières telles que la moquette, les peluches, les livres, les tapis, les double-rideaux ont également été pris en compte (Tableau 7). La présence de ficus a également été recueillie du fait de son potentiel allergisant. Par ailleurs, l'utilisation d'un aspirateur étant susceptible d'entraîner une remise en suspension de la poussière dans l'air, des données ont été recueillies concernant la fréquence d'utilisation d'un aspirateur dans le logement ainsi que sur le type d'appareil utilisé (avec ou sans filtre HEPA⁸).

Des données sur le type de literie ont également été recueillies pour chaque personne du foyer, en particulier la présence d'un vieux matelas, d'une housse anti-acariens ou encore de couette et/ou d'oreillers en duvet (Tableau 8).

La présence de rats, de souris, de blattes ou de cafards à l'intérieur du logement est aussi susceptible d'être une source d'allergènes. Des données ont été recueillies sur la présence de ces types d'animaux et sur les dates des dernières dératisation et désinsectisation, mais elles ne semblent pas être suffisamment précises pour pouvoir être exploitées.

Les impressions de l'enquêteur concernant l'encombrement et la présence de poussières dans le logement ont également été recueillies.

⁸ La dénomination HEPA (High Efficiency Particulate Air) s'applique à tout dispositif capable de filtrer, en un passage, au moins 99,97 % des particules de diamètre supérieur ou égal à 0,3 µm.

Figure 50 : Répartition du score d'utilisation de produits d'entretien

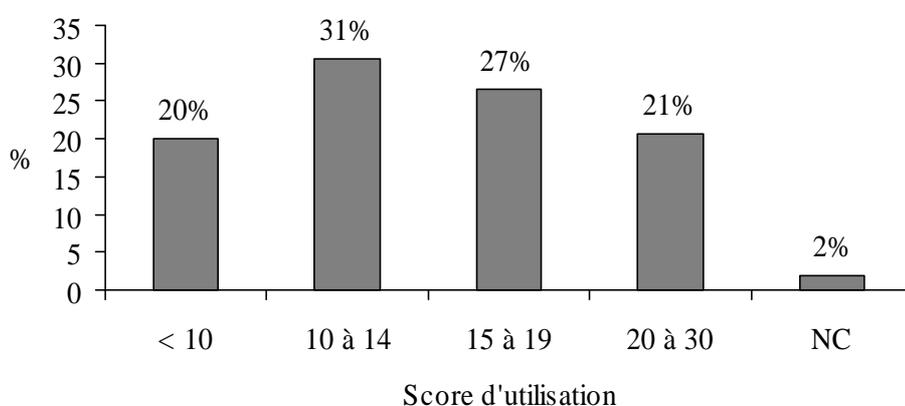


Tableau 9 : Indicateurs de présence d'une situation à risque d'émission de gaz de combustion

| Types de sources | Indicateurs créés | % logements* | % données manquantes |
|----------------------|--|--------------|----------------------|
| Chaudière | Présence d'une chaudière (hors électrique) non raccordée dans le logement | 1 | 2 |
| Chauffage d'appoint | Présence d'un chauffage d'appoint mobile au pétrole ou mazout dans le logement | 2 | 0 |
| Poêle | Présence d'un poêle non raccordé dans le logement | 1 | 0 |
| Cheminée | Présence d'une cheminée ouverte dans le logement | 3 | 0 |
| Chauffe-eau | Présence d'un chauffe-eau au gaz non raccordé dans le logement | 2 | 0 |
| Appareils de cuisson | Présence d'appareils de cuisson au gaz dans la cuisine | 50 | 11 |

* % parmi les logements pour lesquels les données sont disponibles

Sources de polluants chimiques

De nombreux polluants chimiques (COV...) sont susceptibles d'être présents dans l'air intérieur des logements (OQAI, 2006) et entraîner divers effets sanitaires, notamment respiratoires ou encore des symptômes plus généraux. Ils constituent ainsi d'importants facteurs de confusion. Ces polluants peuvent provenir de sources intérieures (utilisation de produits ménagers, chauffage émettant des gaz de combustion...) ou de sources extérieures telles que le trafic routier ou les activités industrielles.

Produits ménagers

De nombreux produits ménagers émettent des substances chimiques dans l'air intérieur lors de leur utilisation (Henderson *et al.*, 2008). C'est pourquoi, les fréquences d'utilisation par le foyer de quinze types de produits d'entretien domestique ont été recueillies (produits pour nettoyer les vitres, le sol, les WC, la moquette ou les tapis, les métaux, le four, les vêtements à sec, eau de javel, désinfectants, peinture ou vernis, White Spirit, pesticides, sprays, parfums d'intérieur, produits de coloration). A partir de ces données, un score d'utilisation de produits ménagers a été créé en attribuant un indice à la fréquence d'utilisation (0 à 4) pour chaque type de produit et en sommant ces indices pour l'ensemble des types de produits (Henderson *et al.*, 2008). Quatre classes représentant le « niveau » d'utilisation des produits ménagers ont ensuite été créées à partir de la répartition du score dans l'échantillon (Figure 50).

Gaz de combustion liés au chauffage

Des données détaillées ont été recueillies concernant le chauffage du logement puisque, selon le type de combustible utilisé ainsi que le type d'appareil, il est susceptible d'être une source d'émission de gaz de combustion. Ainsi, le chauffage domestique au bois est une source d'émission de polluants tels que des COV et des particules (Ineris, 2008). De même, des appareils de chauffage au gaz, au pétrole ou au mazout non raccordés vers l'extérieur sont des sources potentielles d'émission de polluants à l'intérieur des logements.

Dans le cadre de cette enquête, les situations considérées comme à risque d'émission de gaz de combustion sont : la présence d'une chaudière non raccordée, d'un chauffage d'appoint mobile au pétrole ou mazout, d'un poêle non raccordé, d'une cheminée ouverte et/ou d'un chauffe-eau à gaz non raccordé (Tableau 9). Au final, 9 % des logements présenteraient une situation à risque. Les appareils de cuisson au gaz sont également susceptibles d'émettre des gaz de combustion, et ce tout au long de l'année, toutefois ce risque est faible et leur présence dans la cuisine est considérée comme moins à risque comparée aux situations précédentes.

Tableau 10 : Indicateurs de présence de sources d'autres polluants chimiques dans le logement (hors utilisation de produits ménagers et chauffage)

| Types de sources | Indicateurs créés | % de logements* | % données manquantes |
|--------------------------|--|-----------------|----------------------|
| Meubles agglomérés | Présence de meubles agglomérés de moins d'un an dans au moins une pièce de vie | 13 | 1 |
| Travaux dans le logement | Travaux de peinture dans le logement au cours des douze derniers mois | 19 | 0 |
| Moquette | Présence d'une moquette de moins d'un an dans au moins une pièce de vie | 1 | 1 |
| Parking ou garage | Présence d'un parking ou d'un garage communiquant avec le logement | 17 | 1 |
| Trafic dans la rue | Logement situé dans une rue à fort trafic automobile | 22 | 0 |
| Sources extérieures | Au moins une source extérieure de pollution à proximité du logement parmi dix types de sources potentielles ** | 38 | 0 |

* % parmi les logements pour lesquels les données sont disponibles

** autoroute, gare routière, station-service, aéroport, voie ferroviaire, site industriel, centrale thermique, chantier de construction, usine d'incinération, station d'épuration

Autres polluants chimiques

Les autres sources potentielles de polluants chimiques dans le logement pour lesquelles des données ont été recueillies sont la présence de meubles agglomérés récents, la réalisation récente de travaux de peinture et la présence d'une moquette récente. En effet, l'ameublement et les matériaux de construction sont des sources potentielles d'émission de polluants, en particulier de COV (Afsset, 2006).

Des données ont également été recueillies sur des sources extérieures de polluants chimiques : la localisation du logement dans une rue à fort trafic et la présence à proximité du logement de sources extérieures de pollution telles qu'une autoroute, une station-service, un site industriel ou un aéroport (Tableau 10). La présence d'un parking ou d'un garage communiquant avec le logement a également été prise en compte du fait de son impact notable sur la qualité de l'air intérieur des logements (OQAI, 2006).

Tabac

Le tabagisme est un facteur de risque important pour de nombreuses pathologies, notamment respiratoires. Il faut donc tenir compte du tabagisme actif mais aussi passif comme facteurs de confusion (OMS, 2009).

Tabagisme de la personne enquêtée

Parmi les adultes enquêtés, 54 % déclaraient avoir déjà fumé dans leur vie et 24 % déclaraient fumer au moment de l'enquête. Parmi les personnes fumant au moment de l'enquête, 28 % déclaraient fumer moins de 10 cigarettes par jour, 45 % entre 10 et 19 cigarettes et 26 % 20 cigarettes ou plus. Par ailleurs, 24 % des adultes enquêtés déclaraient être régulièrement exposés à la fumée de tabac des autres personnes.

Tabagisme à l'intérieur du logement

83 % des adultes enquêtés fumant au moment de l'enquête déclaraient fumer à l'intérieur de leur logement, dont 79 % tous les jours. La grande majorité des personnes fumant à l'intérieur de leur logement (86 %) déclaraient prendre des précautions dans ce cas. La première précaution était d'aérer (quasi-totalité des personnes déclarant prendre des précautions), les deux autres principales précautions étant fumer dans une pièce particulière et/ou fumer sur le balcon ou la terrasse. Toutefois, ces données ne sont pas disponibles pour l'ensemble des membres des foyers

enquêtés puisque, dans le cadre de ce pilote, le questionnaire de santé n'était renseigné que par un seul membre du foyer pour la moitié des foyers enquêtés.

Des données sur le tabagisme à l'intérieur du logement ont également été recueillies par l'intermédiaire du questionnaire environnemental. Ce questionnaire était renseigné par le membre du foyer présent lors de la visite de l'enquêteur, qu'il soit fumeur ou non, et les données recueillies sur le tabagisme sont susceptibles d'être moins fiables. Mais les analyses montrent des résultats relativement similaires : pour 25 % des logements enquêtés, certaines personnes du foyer fumaient habituellement à l'intérieur du logement. Pour 92 % de ces logements, c'était le cas tous les jours et pour 73 %, des précautions étaient généralement prises. Les principales précautions prises étaient aérer (70 % des cas), puis fumer dans une pièce particulière (44 %), fumer sur le balcon ou la terrasse (22 %) et/ou utiliser des désodorisants (15 %).

Autres facteurs de confusion potentiels

Niveau socio-économique

Il a été montré dans de nombreux travaux que les populations socio-économiquement défavorisées sont davantage touchées par de nombreux problèmes de santé que les populations plus aisées du fait de nombreux facteurs (accès et recours aux soins, éducation à la santé, expositions professionnelles, tabagisme, expositions environnementales...) (Goldberg *et al.*, 2003). C'est pourquoi, dans le cadre de cette enquête, le niveau de ressources a été recueilli. Ainsi, 23 % des personnes enquêtées déclaraient avoir moins de 900 euros par mois par unité de consommation (19 % de données manquantes).

Milieu professionnel

Certaines professions peuvent être considérées « à risques » pour les pathologies étudiées dans le cadre de cette enquête et donc être des facteurs de confusion potentiels. Il s'agit des professions entraînant une exposition à des agents sensibilisants susceptibles de provoquer des allergies, en particulier cutanées ou respiratoires (INRS, 2009). Les professions retenues dans le cadre de cette enquête sont : boulanger, coiffeur, employé de nettoyage, peintre, travailleur du bois, des métaux, de l'électronique, professionnel du bâtiment, de santé.

Les données recueillies lors de ce pilote montrent que la profession n'est pas renseignée pour 7 % des adultes enquêtés. Parmi les adultes pour lesquels cette donnée est disponible, 13 % exerçaient une de ces professions au moment de l'enquête. Il serait possible d'affiner ces résultats en considérant plus précisément le type de profession lorsqu'il s'agit des professions exercées dans le domaine de la santé et du bâtiment.

Par ailleurs, deux adultes enquêtés (1 %) déclaraient qu'une allergie d'origine professionnelle leur a été diagnostiquée.

Maladies chroniques

Une pathologie chronique peut être à l'origine de divers symptômes susceptibles d'être en lien avec les pathologies étudiées dans le cadre de cette enquête. Il est donc important de recueillir cette donnée. Parmi les adultes enquêtés, 9 % déclaraient avoir une maladie chronique (hors asthme) (n=18). Les maladies déclarées étaient le diabète (n=6), une maladie cardio-vasculaire (n=4), un cancer (n=3), une sinusite allergique (n=1) ou une autre maladie (n=2) (2 données manquantes).

Parmi les enfants enquêtés, aucune maladie chronique n'a été déclarée et aucune donnée n'est manquante.

Grossesse au cours des douze derniers mois

Une grossesse peut entraîner des symptômes, en particulier des symptômes généraux tels que ceux étudiés dans le cadre de cette enquête (maux de tête, nausées, fatigue...). Une grossesse récente est donc un facteur de confusion potentiel. Parmi les femmes enquêtées, 6 % déclaraient être enceinte au moment de l'enquête ou avoir été enceinte au cours des douze derniers mois.

Conclusions et perspectives

Importance des problèmes de moisissures dans l'habitat

Le problème de l'habitat humide, étroitement lié à la prolifération de moisissures, est actuellement peu pris en compte, alors que la prévalence des logements humides apparaît importante, notamment en Ile-de-France.

Dans le cadre de ce pilote, 25 % des logements enquêtés présentaient au moins une tache d'humidité ou de moisissures. D'après l'enquête sur les conditions de logement en Ile-de-France en 2006, 21 % des ménages interrogés ont fait état de traces d'humidité sur les murs de leur logement, l'humidité constitue ainsi la première cause d'inconfort (IAU Ile-de-France, 2009). Ces chiffres sont tout à fait comparables.

S'agissant des contaminations fongiques, 17 % des logements de notre échantillon présentaient des moisissures visibles, et une source endogène d'ergostérol a été détectée pour 22 % d'entre eux. Si ces pourcentages sont extrapolés à l'ensemble de l'Ile-de-France, ils fournissent un ordre de grandeur du nombre de logements potentiellement concernés dans la région. Ainsi, selon l'indice de contamination considéré, 750 000 logements pour ce qui concerne la présence de moisissures visibles, et un million de logements pour ce qui concerne la présence d'une source intérieure d'ergostérol, pourraient être concernés. 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 pu être inclus dans l'échantillon.

Ainsi, le problème des moisissures dans l'habitat apparaît comme un phénomène de grande ampleur. Toutefois, en l'absence de relations dose-réponse, les risques sanitaires ne peuvent être quantifiés. A cet égard, il apparaît important de déterminer un éventuel seuil de contamination au-delà duquel se manifestent les effets sur la santé tels qu'exacerbation des symptômes d'asthme et d'allergie et autres atteintes du système respiratoire, qui sont aujourd'hui bien admis, ainsi que d'identifier les populations les plus sensibles. La mise en œuvre de mesures de gestion se heurte en effet au manque d'appréciation des situations de contamination les plus à risque. Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches, en particulier pour améliorer la mesure des expositions aux moisissures. Le travail mené dans le cadre de ce pilote s'inscrit dans ces démarches et contribue à l'amélioration des connaissances.

Mise en œuvre d'une enquête épidémiologique

Stratégie d'échantillonnage

La stratégie d'échantillonnage utilisée dans le cadre de ce pilote avait pour objectif de surreprésenter les logements contaminés par les moisissures, mais cet objectif n'a pas été atteint. En particulier, il n'a pas été possible d'inclure des logements à forte densité d'occupation et/ou des ménages en situation précaire.

Deux pistes sont à envisager afin d'améliorer ce plan de sondage. Dans un premier temps, il apparaît que la stratification selon l'ancienneté du bâti et la suroccupation des logements à partir des données de l'Insee est insuffisante. Cette limite tient d'une part à l'ancienneté des données du recensement (1999) au moment de l'enquête (2006). D'autre part, les variables de stratification, en particulier l'ancienneté du bâti qui peut recouvrir des conditions d'habitat très diverses et qui ne prend pas en compte d'éventuels travaux de réhabilitation ou de rénovation, ont manqué de pertinence. Il serait donc vraisemblablement judicieux d'avoir recours à des données plus ciblées, issues du recensement renouvelé de l'Insee ou autres, afin de mettre en place une stratification plus adéquate.

Dans un second temps, l'annuaire des pages blanches utilisé comme base de sondage dans ce pilote semble peu adapté. En effet, s'il a permis de contacter les foyers par l'intermédiaire d'une lettre annonce et d'un contact téléphonique préliminaire, il a également pu contribuer à augmenter les difficultés d'atteindre des ménages en situation précaire, et ce pour des raisons notamment d'absence de ligne téléphonique fixe, de problèmes de compréhension du français ou encore de refus. L'utilisation d'autres bases de sondage serait donc à envisager, pour éventuellement compléter l'échantillon. Par exemple, les dossiers de plaintes envoyés aux DDASS par des locataires concernant leur logement pourraient être utilisés, de même que les dossiers reçus par l'ANAH concernant des demandes d'aides financières de la part de propriétaires en vue de l'amélioration de leur logement.

Recueil des données

Données sanitaires

Les questionnaires de santé ont reçu une bonne adhésion lors de ce pilote, que ce soit par les foyers où uniquement une personne devait remplir un questionnaire ou par les foyers où chacun des membres du foyer devait remplir un questionnaire. Il peut donc être envisagé de recueillir les données de santé pour tous les membres du foyer. Concernant les enfants, le questionnaire très simplifié utilisé lors du pilote pourrait être complété par quelques questions qui

permettraient d'affiner les analyses (symptômes d'asthme et consommation de médicaments anti-asthmatiques en particulier).

La mesure du souffle en revanche ne semble pas pertinente si elle n'est pas réalisée en présence d'un médecin, ou du moins d'un enquêteur formé à la réalisation de cette mesure.

Données environnementales

Dans le cadre de ce pilote, la présence de moisissures à l'intérieur des logements a été mise en évidence au travers de différents indices. Ces indices fournissent une information complémentaire permettant de caractériser différentes situations de contamination.

Le questionnaire environnemental utilisé ici a permis de recueillir un très grand nombre de données concernant les logements enquêtés. Jugé long et répétitif, il a toutefois reçu une bonne adhésion de la part des enquêtés et a permis de recueillir des données de bonne qualité. Suite aux analyses, il pourra être simplifié en retenant les variables les plus pertinentes et les plus fiables. Une administration en face à face de ce questionnaire présente des avantages, en particulier une meilleure fiabilité de certaines données relativement complexes à recueillir et pouvant nécessiter une inspection rapide du logement par un enquêteur formé (dispositif de ventilation, présence de dégradations...).

Les prélèvements de surface réalisés sur les taches de moisissures visibles peuvent être utilisés à plus grande échelle, mais nécessitent l'intervention d'un enquêteur formé à la réalisation de ces prélèvements. La technique utilisant des « lames scotch » est particulièrement simple à mettre en œuvre et est moins coûteuse comparée à celle utilisant des « biocontacts » ou l'écouvillonnage, nécessitant une mise en culture des germes.

Le prélèvement permettant de déterminer l'indice COV est relativement facile à mettre en place. Le tube passif utilisé doit être mis en place pendant 7 jours et il pourrait être envisagé que les enquêtés eux-mêmes renvoient le tube par courrier à la fin du prélèvement. Toutefois, les précautions à prendre lors de la manipulation du tube doivent être dans ce cas clairement expliquées afin d'assurer une bonne qualité des données.

Enfin, en l'état actuel des techniques, les prélèvements permettant de mesurer les niveaux d'ergostérol ne sont pas utilisables à plus grande échelle du fait des nombreux problèmes rencontrés (manque de capacité des batteries, pannes fréquentes...).

Indicateur d'exposition

D'un point de vue sanitaire, l'enjeu est de traduire ces différentes situations en termes d'expositions présentant potentiellement un risque pour la santé des occupants du logement.

A ce titre, l'inhalation de COV microbiens peut présenter un risque sanitaire. En effet, des effets irritatifs ont pu être observés, toutefois, ils sont susceptibles d'intervenir à des niveaux élevés (Korpi *et al.*, 2009). Or, dans le cadre de cette enquête, les niveaux de COV n'ont pas été quantifiés. L'indice COV déterminé ici a fourni uniquement une information sur la présence ou non d'un développement fongique actif. En 2010, Hulin *et al.* ont montré une association significative entre l'asthme non atopique chez l'enfant et les contaminations fongiques (visibles ou cachées) dans les logements (Hulin *et al.*, 2010). La même étude a également montré l'absence d'association lorsque les contaminations ne sont détectées que par l'examen visuel. Ces premiers résultats pourraient suggérer que la détection des développements actifs, visibles ou masqués, fournit une meilleure estimation de l'exposition comparée à l'examen visuel seul. Ces résultats doivent être confrontés à ceux d'autres enquêtes afin d'être confirmés. Dans le cadre de notre enquête, l'analyse de l'indice COV a montré une grande sensibilité puisqu'il était positif dans 80 % des logements testés. Ainsi, bien que discriminant vis-à-vis de la détection des contaminations fongiques actives, l'indice COV s'avère peu discriminant en vue de la détermination d'une exposition dans le cadre d'une enquête épidémiologique. En effet, comme explicité au paragraphe « Caractérisation des différentes situations de contamination » p. 63, il est susceptible de traduire des situations de contamination très différentes.

Les niveaux intérieurs d'ergostérol constituent, quant à eux, un bon indicateur de la biomasse fongique inhalable (Robine *et al.*, 2005). Cette information, croisée avec les caractéristiques de la flore fongique, permet a priori d'évaluer l'exposition potentielle des occupants du logement aux composantes et/ou métabolites des moisissures d'intérêt sanitaire. Dans l'optique d'une recherche épidémiologique, l'idéal serait de recueillir ces deux informations de manière exhaustive. Or, les travaux menés dans le cadre de ce pilote ont démontré qu'il n'était pas possible d'effectuer la mesure du niveau d'ergostérol à grande échelle.

Afin de pallier cette contrainte, l'enjeu du travail mené ici était de prédire ces niveaux à partir des caractéristiques du logement. En effet, pour qu'un développement fongique survienne, il faut que plusieurs conditions soient réunies. Ainsi, la démarche a été de recueillir les informations concernant l'état du bâti (vétusté, isolation...), les sources d'humidité ainsi que l'aération qui permettent a priori d'approcher au mieux ces conditions, ce sont les déterminants.

Dans un premier temps, ces déterminants ont été confrontés aux différents indices de contamination afin de tester leur pertinence. Si les sources d'humidité ainsi que l'état du bâti sont apparus liés à la présence de moisissures, le dispositif de ventilation, quant à lui, ne semblait avoir aucune incidence. Or, un faible taux de renouvellement d'air s'avère être un facteur de risque important vis-à-vis des contaminations fongiques (OMS, 2009). Ces résultats semblent indiquer que l'indicateur construit à partir des données recueillies dans le questionnaire traduit de manière imparfaite cette caractéristique.

Par ailleurs, il a été considéré que les signes visibles d'humidité, tels que taches d'humidité, dégradations ou moisissures visibles, pouvaient également renseigner sur la présence éventuelle d'une contamination fongique. A ce titre, ce pilote a montré que la présence d'une source intérieure d'ergostérol était reliée significativement à la présence de moisissures visibles (cf. paragraphe «Caractérisation des différentes situations de contamination» p. 63). Ainsi, si l'exposition était déterminée par l'appréciation visuelle, 22 % d'erreurs de classement seraient à déplorer, dont respectivement 10 % de faux positifs et 12 % de faux négatifs.

Les déterminants ainsi que les signes d'humidité ont ainsi été introduits dans un modèle statistique en vue de prédire la présence d'une source intérieure d'ergostérol. La mise en œuvre de ce modèle a permis d'améliorer légèrement la prédiction, avec seulement 19 % d'erreur (uniquement des faux négatifs). Toutefois, ces résultats demeurent très préliminaires, le modèle devra être appliqué à un autre jeu de données pour vérifier sa validité.

Conclusion

Au final, ce travail a permis de mieux décrire les différentes situations de contamination, ce qui constitue un pas de plus vers la compréhension des phénomènes. Toutefois, il souligne les difficultés à objectiver et recueillir les expositions aux moisissures dans l'habitat, notamment dans le cadre d'une enquête à grande échelle. En effet, les situations d'exposition s'avèrent multiples et difficiles à prédire en fonction des caractéristiques environnementales des logements. Cette étude montre ainsi que les outils utilisés actuellement permettent de décrire l'exposition aux moisissures seulement de manière imparfaite. En effet, les techniques de prélèvement d'air pour la mesure de l'ergostérol nécessitent d'être améliorées, en particulier du point de vue de l'autonomie de l'alimentation électrique. Par ailleurs, il s'avère nécessaire de munir les dispositifs de prélèvements de compteurs. S'agissant de l'indice de contamination fongique, d'autres études in situ devraient être menées afin de mieux comprendre la signification des différentes situations de contamination.

Néanmoins, la bonne corrélation retrouvée dans le cadre de ce pilote entre les niveaux de biomasse fongique dans l'air et les surfaces de moisissures visibles tend à confirmer que la présence de moisissures visibles pourrait être utilisée, en première approche, comme indicateur d'une exposition aux moisissures. Des travaux plus poussés seraient nécessaires afin de conforter ces premiers résultats et d'établir d'éventuelles classes d'exposition.

Ainsi, la réalisation d'une enquête épidémiologique semble se heurter encore aujourd'hui au manque de maturité des méthodes de recueil des expositions aux moisissures actuellement disponibles, en particulier pour l'établissement de relations dose-réponse qui nécessite une estimation quantitative de l'exposition. Toutefois, une estimation plus « rudimentaire » des expositions, à partir d'un questionnaire environnemental et éventuellement de prélèvements de surface simples, dans le cadre d'une enquête épidémiologique, pourrait fournir des premiers enseignements utiles en termes de gestion de la santé publique, ainsi qu'une plus grande mobilisation des pouvoirs publics et des acteurs de terrain. Par ailleurs, pour mener à bien une telle enquête épidémiologique, le plan de sondage devra être adapté afin d'inclure les populations les plus à risque dans l'échantillon.

Annexes

Annexe 1 : Exemple type de lettre annonce



Observatoire régional de santé d'Île-de-France

Paris, le 15 octobre 2007

Mme ~~~~~
~~~~~  
75014 Paris

Madame,

**L'Observatoire Régional de Santé d'Île-de-France, organisme reconnu d'utilité publique, réalise une enquête auprès des foyers de la région Ile-de-France** afin de mieux connaître la qualité de l'air des logements et les liens avec la santé. Cette enquête est réalisée auprès de 150 foyers tirés au sort.

**Votre adresse a été tirée au sort et un enquêteur de l'Institut de sondage BVA vous appellera prochainement pour vous inviter à participer à cette enquête.** Nous vous remercions de lui réserver le meilleur accueil. Si votre foyer accepte de participer, **l'enquêteur vous enverra un bref questionnaire concernant votre état de santé et vous proposera de convenir d'un rendez-vous** afin d'évaluer la qualité de l'air de votre logement. **Vous recevrez bien sûr un compte-rendu de cette visite.**

**L'Institut BVA, garantit votre anonymat.** Les enquêteurs sont soumis au secret professionnel. Vos réponses personnelles alimenteront une base de données, et ne pourront jamais être identifiées comme telles.

**Vos réponses constitueront une contribution très précieuse à la recherche mise en place en vue d'améliorer les actions de prévention.** La validité scientifique de cette enquête sera d'autant mieux assurée que le nombre de foyers acceptant de participer sera le plus élevé possible, et je reste donc certaine de l'intérêt que vous ne manquerez pas de porter à cette étude.

Nous comptons sur votre collaboration et vous remercions par avance du temps que vous voudrez bien nous accorder.

Je vous prie d'agréer, Madame, Monsieur, l'assurance de toute ma considération.

Dr. Isabelle GREMY  
Directrice de l'ORS



## Annexe 2 : Variables retenues pour établir la typologie des logements

**Tableau. Variables actives retenues dans l'analyse factorielle**

| <b>Signes d'humidité (<i>humsign</i>)</b>    |                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Condensation                                 | <b>condensation</b> : présence ou non de condensation déclarée non résolue                                                                                                                                          |
| Déshumidificateur                            | <b>pdeshumi</b> : présence ou non d'un déshumidificateur                                                                                                                                                            |
| <b>Dégradations (<i>degrad</i>)</b>          |                                                                                                                                                                                                                     |
| Revêtements altérés                          | <b>dégradation</b> : au moins un revêtement altéré dans le logement                                                                                                                                                 |
| Moisissures visibles                         | <b>moisilog</b> : au moins une pièce du logement dans laquelle on observe une moisissure                                                                                                                            |
| Surface totale moisie                        | <b>surfmois</b> : aucune, de 0 à ½ A4, de ½ A4 à 5 A4, de 5 A4 à 3 m <sup>2</sup> et supérieure à 3 m <sup>2</sup>                                                                                                  |
| Tache d'humidité                             | <b>thum</b> : au moins une pièce du logement dans laquelle on observe une tache d'humidité                                                                                                                          |
| Surface totale moisie ou humide              | <b>surftach</b> : inférieure à ½ A4, de ½ A4 à 5 A4, de 5 A4 à 3 m <sup>2</sup> et supérieure à 3 m <sup>2</sup>                                                                                                    |
| <b>Sources d'humidité (<i>humsource</i>)</b> |                                                                                                                                                                                                                     |
| Problème d'humidité                          | <b>pbum</b> : au moins un problème d'humidité déclaré non résolu ou résolu dans les 12 mois précédant l'enquête                                                                                                     |
| Sur-occupation                               | <b>surroc</b> : logement surpeuplé selon les critères de l'Insee, soit une surface habitable inférieure à 18 m <sup>2</sup> + 12 m <sup>2</sup> /adulte(s) supplémentaire(s) + 9 m <sup>2</sup> /enfant(s)          |
| Humidité extérieure                          | <b>pshum</b> : présence d'une source d'humidité à proximité du logement                                                                                                                                             |
| Linge                                        | <b>eteninc2</b> : linge étendu dans le logement (sauf cave)                                                                                                                                                         |
| Sèche-linge sans bac                         | <b>snobac2</b> : présence d'un sèche-linge sans raccordement extérieur et sans bac                                                                                                                                  |
| Aquarium                                     | <b>paqua</b> : présence d'un aquarium                                                                                                                                                                               |
| Plantes                                      | <b>pbcpplan</b> : présence de 5 plantes ou plus dans au moins une pièce du logement                                                                                                                                 |
| Nombre de sources d'humidité                 | <b>bcsource</b> : présence d'au moins 3 sources d'humidité parmi celles présentées dans la partie descriptive<br><b>txsource</b> : nb de sources présentées dans la partie descriptive rapporté au nombre de pièces |
| <b>Isolation (<i>isolation</i>)</b>          |                                                                                                                                                                                                                     |
| Problème d'isolation                         | <b>pbisol</b> : problème d'isolation                                                                                                                                                                                |
| Double vitrage                               | <b>isolvit</b> : pourcentage de pièces équipées en double vitrage ≤50%, 50-75%, 75-99% et 100%                                                                                                                      |
| Chauffage                                    | <b>chaucor</b> : logement bien chauffé en hiver                                                                                                                                                                     |
| <b>Ventilation (<i>ventilation</i>)</b>      |                                                                                                                                                                                                                     |
| Dispositif d'aération                        | <b>typaeer</b> : type de dispositif d'aération : aucun, naturelle, VMC<br><b>scdefaercl</b> : proportion de défauts du dispositif d'aération, en tenant compte de la perméabilité des fenêtres                      |

|                                           |                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Habitudes d'aération en minutes par jour  | <b>lgaerhcl</b> : en été <=5 min, 5-30 min, >30 min<br><b>lgaerecl</b> : en hiver <=5 min, 5-30 min, >30 min                                                                               |
| <b>Ressenti (<i>ressenti</i>)</b>         |                                                                                                                                                                                            |
| Impression d'humidité                     | <b>ihum</b> : impression d'humidité dans les 12 mois précédant l'enquête déclarée par l'enquêté<br><b>humidite</b> : impression d'humidité ressentie par l'enquêteur dans l'une des pièces |
| Odeur de moisi                            | <b>omoisi</b> : odeur de moisi dans les 12 mois précédant l'enquête déclarée par l'enquêté<br><b>odeur</b> : odeur de moisi détectée par l'enquêteur dans l'une des pièces                 |
| <b>Etat du bâtiment (<i>etatbati</i>)</b> |                                                                                                                                                                                            |
| Ancienneté bâtiment                       | <b>achevstr</b> : période à laquelle le bâtiment a été achevé : < 1945, 1945-1975, > 1976                                                                                                  |
| Rénovation récente                        | <b>renov</b> : bâtiment rénové récemment                                                                                                                                                   |
| Façade dégradée                           | <b>faca</b> : façade du bâtiment dégradée                                                                                                                                                  |
| Toiture en mauvais état                   | <b>toit</b> : toiture du bâtiment en mauvais état                                                                                                                                          |
| Gouttière endommagée                      | <b>gouttiere</b> : gouttières et/ou descentes d'eaux pluviales endommagées ou bouchées                                                                                                     |

**Tableau. Variables illustratives retenues dans l'analyse factorielle**

|                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Saison (<i>ete</i>)</b>                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Ete ou hiver                                          | <b>ete</b> : si été sinon hiver                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Données socio-démographiques (<i>socdem</i>)</b>   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Statut d'occupation                                   | <b>statut</b> : propriétaire, locataire ou HLM                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Niveau d'études                                       | <b>etudrefc</b> : niveau d'études < bac, bac, bac +2 à +4, bac +5 et plus                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Revenus                                               | <b>revucl</b> : revenu par UC < 900 €, 900-1499 €, >=1500 €                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Type de logement                                      | <b>typlog</b> : maison ou appartement                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Revêtement des murs et plafonds (<i>revet</i>)</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Peinture                                              | <b>revetement1</b> : présence de peinture                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Papier peint                                          | <b>revetement2</b> : présence de papier peint                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Lambris                                               | <b>revetement3</b> : présence de lambris                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Moquette                                              | <b>revetement4</b> : présence de moquette                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Toile de verre                                        | <b>revetement5</b> : présence de toile de verre                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Résultats prélèvements (<i>resprel</i>)</b>        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| COV                                                   | <b>icov</b> : indice COV                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Ergostérol                                            | <b>ergostero2</b> : source intérieure d'ergostérol (niveau intérieur d'ergostérol supérieur au niveau extérieur)<br><b>ergintl3</b> : niveau d'ergostérol intérieur en classes : 0, LQ, >=0,2ng/m <sup>3</sup> , > 0,2ng/m <sup>3</sup>                                                                                       |
| Type de moisissures                                   | <b>infectieux</b> : au moins une espèce ou genre potentiellement infectieux<br><b>allergie</b> : au moins une espèce ou genre potentiellement allergisant<br><b>alveolite</b> : au moins une espèce ou genre potentiellement responsable d'alvéolite<br><b>toxique</b> : au moins une espèce ou genre potentiellement toxique |

# Références



Afsset. Risques sanitaires liés aux composés organiques volatils dans l'air intérieur - Risques sanitaires liés aux émissions de composés organiques volatils par les produits de construction et d'aménagement intérieur.. 2006. 160 p.

Alexson B, Saraf A et Larsson L. Determination of ergosterol in organic dust by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography* , 1995 ; B(1) : 77-84.

Alvarez L, Gil AG, Ezpeleta O, García-Jalón JA et López de Cerain A. Immunotoxic effects of Ochratoxin A in Wistar rats after oral administration. *Food Chem. Toxicol.*, 2004 ; 42 : 825-34.

Annesi-Maesano I, Didier A, Klossek M, Chanal I, Moreau D et Bousquet J. The score for allergic rhinitis (SFAR): a simple and valid assessment method in population studies. *Allergy*, 2002 ; 57 : 107-14.

Beguïn H et Nolard N. Flore fongique à l'intérieur des habitations. In *L'air et la santé. Médecine-Sciences Flammarion* (Ed.). 2003. pp 101-107.

Bertrand F, Maumy M et Meyer N. plsRglm, modèles linéaires généralisés PLS sous R. , 2009.

Bex V, Barral S, Dusséaux M, Bordenave L, Mouilleseaux A et Squinazi F. Housing environmental audits: the experience of the hygiene laboratory of Paris city. *Journal de Mycologie Médicale*, 2006 ; 16 : 197-203.

Bornehag C, Sundell J et Sigsgaard T. Dampness in buildings and health (DBH): Report from an ongoing epidemiological investigation on the association between indoor environmental factors and health effects among children in Sweden. *Indoor Air*, 2004 ; 14 Suppl 7 : 59-66.

Boutin-Forzano S, Kadouch-Charpin C, Hammou Y, Gouitaa M, Botta A, Dumon H et Charpin D. Moisissures domestiques, mycotoxines et risques sanitaires. *Environnement Risques et Santé*, 2005 ; 5 : 383-389.

Bush RK, Portnoy JM, Saxon A, Terr AI et Wood RA. The medical effects of mold exposure. *J. Allergy Clin. Immunol.*, 2006 ; 117 : 326-33.

Charpin D, Boutin-Forzano S et Charpin-Kadouch C. Habitat et santé respiratoire. In L'air et la santé. Paris : Médecine-Sciences Flammarion (Ed.). 2003. pp 161-73.

Clarisse B, Seta N, El Hasnaoui A, Terrioux P et Momas I. [How to describe indoor environment in epidemiological studies dealing with respiratory diseases]. Rev Epidemiol Sante Publique, 2002 ; 50 : 179-200.

Conseil supérieur d'hygiène publique de France. Contaminations fongiques en milieux intérieurs : Diagnostic, effets sur la sante respiratoire, conduites a tenir. 2006. 101 p.

Curtis L, Lieberman A, Stark M, Rea W et Vetter M. Adverse health effects of indoor molds. Journal of Nutritional and Environmental Medicine, 2004 ; 14 : 261-274.

Dales RE, Miller D et McMullen E. Indoor air quality and health: validity and determinants of reported home dampness and moulds. Int J Epidemiol, 1997 ; 26 : 120-5.

Dassonville C, Demattei C, Detaint B, Barral S, Bex-Capelle V et Momas I. Assessment and predictors determination of indoor airborne fungal concentrations in Paris newborn babies' homes. Environ. Res., 2008 ; 108 : 80-5.

Delmas M, Leynaert B, Com-Ruelel L, Annesi-Maesano I et Fuhrman C. Asthme : prévalence et impact sur la vie quotidienne. Analyse des données de l'enquête décennale santé 2003 de l'Insee. 2008. 89 p. p.

Douwes J et Pearce N. Invited commentary: is indoor mold exposure a risk factor for asthma?. Am. J. Epidemiol., 2003 ; 158 : 203-6.

Efron B, Tibshirani R et Tibshirani R. An introduction to the bootstrap. 1993.

Engvall K, Norrby C et Sandstedt E. The Stockholm Indoor Environment Questionnaire: a sociologically based tool for the assessment of indoor environment and health in dwellings. Indoor Air, 2004 ; 14 : 24-33.

Escofier B et Pagès J. Analyses factorielles simples et multiples: objectifs, méthodes et interprétation. 2008.

Etzel RA. Mycotoxins. JAMA, 2002 ; 287 : 425-7.

Fisk WJ, Lei-Gomez Q et Mendell MJ. Meta-analyses of the associations of respiratory health effects with dampness and mold in homes. *Indoor Air*, 2007 ; 17 : 284-96.

Fuhrman C et Delmas M. Bronchite chronique : prévalence et impact sur la vie quotidienne. Analyse des données de l'enquête santé Insee 2002-2003. *Rev Mal Respir*, 2010 ; 27 : 160-8.

Fung F et Hughson WG. Health effects of indoor fungal bioaerosol exposure. *Appl Occup Environ Hyg*, 2003 ; 18 : 535-44.

Fung F et Hughson WG. The fundamentals of mold-related illness: when to suspect the environment is making a patient sick. *Postgrad Med*, 2008 ; 120 : 80-4.

Gaffin JM et Phipatanakul W. The role of indoor allergens in the development of asthma. *Curr Opin Allergy Clin Immunol*, 2009 ; 9 : 128-35.

Gent JF, Ren P, Belanger K, Triche E, Bracken MB, Holford TR et Leaderer BP. Levels of household mold associated with respiratory symptoms in the first year of life in a cohort at risk for asthma. *Environ. Health Perspect.*, 2002 ; 110 : A781-6.

Goldberg M, Melchior M, Leclerc A et Lert F. [Epidemiology and social determinants of health inequalities]. *Rev Epidemiol Sante Publique*, 2003 ; 51 : 381-401.

Grant W et West A. Measurement of ergosterol, diaminopimelic acid and glucosamine in soil: evaluation as indicators of microbial biomass. *Journal of microbiological methods*, 1986 ; 6 : 47-53.

Hagerhed-Engman L, Bornehag C et Sundell J. Building characteristics associated with moisture related problems in 8,918 Swedish dwellings. *Int J Environ Health Res*, 2009 ; : 1-15.

Henderson J, Sherriff A, Farrow A et Ayres JG. Household chemicals, persistent wheezing and lung function: effect modification by atopy?. *Eur. Respir. J.*, 2008 ; 31 : 547-54.

Hodgson MJ et Dearborn DG. Literature on mycotoxins and human health at the time of the ACOEM report. *Int J Occup Environ Health*, 2009 ; 15 : 115-7.

Hope AP et Simon RA. Excess dampness and mold growth in homes: an evidence-based review of the aeroirritant effect and its potential causes. *Allergy Asthma Proc*, 2007 ; 28 : 262-70.

Host S, Agnès Lefranc, Camard J, Chardon B et Gremy I. Pollution de l'air intérieur : Etat de connaissances concernant les effets sanitaires et faisabilité d'une étude épidémiologique en Ile-de-France . 2005. 108 p.

Howden-Chapman P, Saville-Smith K, Crane J et Wilson N. Risk factors for mold in housing: a national survey. *Indoor Air*, 2005 ; 15 : 469-76.

Hulin M, Annesi-Maesano I, Robine E et Moularat S. Implication of non-allergic mechanisms in the relationships between molds and childhood asthma. *J. Allergy Clin. Immunol.*, 2010 ; Soumis : .

IAU Ile-de-France, Insee, Dreif. Les conditions de logement en Ile-de-France en 2006. 2009. 159 p.

INRS [en ligne]. <http://www.inrs.fr>. 2009.

Ineris. Evaluation de l'impact des appareils de chauffage à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur. 2008. 202 p.

Jaakkola MS, Nordman H, Piipari R, Uitti J, Laitinen J, Karjalainen A, Hahtola P et Jaakkola JJK. Indoor dampness and molds and development of adult-onset asthma: a population-based incident case-control study. *Environ. Health Perspect.*, 2002 ; 110 : 543-7.

Karvonen AM, Hyvarinen A, Roponen M, Hoffmann M, Korppi M, Remes S, von Mutius E, Nevalainen A et Pekkanen J. Confirmed moisture damage at home, respiratory symptoms and atopy in early life: a birth-cohort study. *Pediatrics*, 2009 ; 124 : e329-38.

Kauffmann F, Annesi-Maesano I, Liard R, Paty E, Faraldo B, Neukirch F et Dizier MH. [Construction and validation of a respiratory epidemiological questionnaire]. *Rev Mal Respir*, 2002 ; 19 : 323-33.

Korpi A, Jarnberg J et Pasanen A. Microbial volatile organic compounds. *Crit. Rev. Toxicol.*, 2009 ; 39 : 139-93.

Koskinen OM, Husman TM, Meklin TM et Nevalainen AI. The relationship between moisture or mould observations in houses and the state of health of their occupants. *Eur. Respir. J.*, 1999 ; 14 : 1363-7.

Miller JD et Young JC. The use of ergosterol to measure exposure to fungal propagules in indoor air. *Am Ind Hyg Assoc J*, 1997 ; 58 : 39-43.

Moularat S. Procédé de détection d'une contamination fongique. France, INPI n°07 01578. 2007.

Moularat S. Procédé de dosage d'ergostérol et de mycotoxines. France, Inpi n°07 01583. 2007.

Moularat S. Contamination fongique dans le parc de logements français. La qualité de l'air intérieur, lieux de vie et santé. Pollutec. Paris-Nord/Villepinte, 28 novembre 2007.

Moularat S et Robine E. A Method to Determine the Transfer of Mycotoxins from Materials to Air. *Clean - Soil, Air, Water*, 2008 ; Vol. 36, 7 : 578-583.

Moularat S, Derbez M, Kirchner S, Ramalho O et Robine E. Détermination de la contamination fongique des logements français par un indice chimique. *Pollution Atmosphérique*, 2008 ; 197 : 37-44.

Moularat S, Flamant-Hulin M, Annesi-Maesano I, Robine E et Caillaud D. Contamination par les moisissures (M) de 94 logements: comparaison entre milieu rural (R) et urbain (U) par l'examen visuel et les composés organiques volatiles d'origine microbienne (COVm). Congrès de Pneumologie de Langue Française. SPLF. Marseille (France), 29 janvier-1<sup>er</sup> février 2010.

Moularat S, Robine E, Ramalho O et Oturan M. Detection of fungal development in a closed environment through the identification of specific VOC: Demonstration of a specific VOC fingerprint for fungal development. *Sci. Total Environ.*, 2008 ; : .

Moularat S, Robine E, Ramalho O et Oturan MA. Detection of fungal development in closed spaces through the determination of specific chemical targets. *Chemosphere*, 2008 ; 72 : 224-32.

Nunn AJ et Gregg I. New regression equations for predicting peak expiratory flow in adults. *BMJ*, 1989 ; 298 : 1068-70.

OMS. WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. 2009. 288 p.

OMS. WHO Report on the Global Tobacco Epidemic, 2009: Implementing smoke-free environments. 2009. 136 p.

OQAI. Campagne nationale Logements - Etat de la qualité de l'air dans les logements français - Rapport final. 2006. 165 p.

Pasanen A, Yli-Pietila K, Pasanen P, Kalliokoski P et Tarhanen J. Ergosterol content in various fungal species and biocontaminated building materials . *Appl. Environ. Microbiol.*, 1999 ; 65 : 138-42.

Pekkanen J, Hyvarinen A, Haverinen-Shaughnessy U, Korppi M, Putus T et Nevalainen A. Moisture damage and childhood asthma: a population-based incident case-control study. *Eur. Respir. J.*, 2007 ; 29 : 509-15.

Pestka JJ, Yike I, Dearborn DG, Ward MDW et Harkema JR. *Stachybotrys chartarum*, trichothecene mycotoxins, and damp building-related illness: new insights into a public health enigma. *Toxicol. Sci.*, 2008 ; 104 : 4-26.

Pinsonneault L, Blanchette C et Leclerc J. Validité de deux instruments de mesure des caractéristiques des habitations liées à la qualité de l'air intérieur. 2008. 31 p.

Reboux G, Bellanger AP, Roussel S, Grenouillet F, Sornin S, Piarroux R, Dalphin JC et Millon L. Indoor mold concentration in Eastern France. *Indoor Air*, 2009 ; 19 : 446-53.

Robine E, Lacaze I, Moularat S, Ritoux S et Boissier M. Characterisation of exposure to airborne fungi: measurement of ergosterol. *J. Microbiol. Methods*, 2005 ; 63 : 185-92.

Roussel S, Reboux G, Bellanger A, Sornin S, Grenouillet F, Dalphin J, Piarroux R et Millon L. Characteristics of dwellings contaminated by moulds. *J Environ Monit*, 2008 ; 10 : 724-9.

Sahakian NM, Park J et Cox-Ganser JM. Dampness and mold in the indoor environment: implications for asthma. *Immunol Allergy Clin North Am*, 2008 ; 28 : 485-505, vii.

Sahakian NM, White SK, Park J, Cox-Ganser JM et Kreiss K. Identification of mold and dampness-associated respiratory morbidity in 2 schools: comparison of questionnaire survey responses to national data. *J Sch Health*, 2008 ; 78 : 32-7.

Seitz L, Saeur B, Burroughs R, Mohr H et Hubbard J. Ergosterol as a measure of fungal growth. *Physiology and Biochemistry*, 1979 ; 69 (11) : 1202-1203.

Seltzer JM et Fedoruk MJ. Health effects of mold in children. *Pediatr. Clin. North Am.*, 2007 ; 54 : 309-33, viii-ix.

Stevens RK, Lewis CW, Dzubay TG, Cupitt LT et Lewtas J. Sources of mutagenic activity in urban fine particles. *Toxicol Ind Health*, 1990 ; 6 : 81-94.

Tenenhaus M. *La régression PLS: théorie et pratique*. 1998.

Thorn J, Brisman J et Toren K. Adult-onset asthma is associated with self-reported mold or environmental tobacco smoke exposures in the home. *Allergy*, 2001 ; 56 : 287-92.

Walinder R, Ernstgard L, Johanson G, Norback D, Venge P et Wieslander G. Acute effects of a fungal volatile compound. *Environ. Health Perspect.*, 2005 ; 113 : 1775-8.