



LA QUALITÉ DE L'AIR À L'INTÉRIEUR DES BÂTIMENTS :

EFFETS, CAUSES, PRÉVENTION ET GESTION DES POLLUTIONS

Recueil des résumés des travaux de recherche menés
dans le cadre du programme PRIMEQUAL

Conception et réalisation graphique : opixido

-

© Photos : ADEME et porteurs de projet

-

© Photo de couverture : Guillaume Landry/ADEME

-

Impression : Maugein imprimeurs

Les articles relatifs aux projets ont été rédigés par les équipes de recherche à l'occasion du colloque de valorisation des travaux PRIMEQUAL des 19 et 20 novembre 2013 à La Rochelle et accompagnent les exposés des intervenants. Ils n'engagent que leurs auteurs.

LA QUALITÉ DE L'AIR À L'INTÉRIEUR DES BÂTIMENTS :

EFFETS, CAUSES, PRÉVENTION ET GESTION DES POLLUTIONS

Recueil des résumés des travaux de recherche menés
dans le cadre du programme PRIMEQUAL

Colloque de valorisation
19 & 20 novembre 2013

Université de La Rochelle

SOMMAIRE

Le programme PRIMEQUAL, programme de recherche interorganisme pour une meilleure qualité de l'air p. 5

Qualité de l'air intérieur – effets, causes, prévention et gestion des pollutions : Contexte des travaux de recherche PRIMEQUAL sur la qualité de l'air intérieur p. 6

Quelles sources d'émissions de polluants en air intérieur ? p. 8

Émissions par les meubles destinés à la petite enfance : impact sur la qualité de l'air des crèches et premières réflexions quant à la mise en place d'une procédure d'étiquetage p. 9

Produits ménagers et qualité de l'air intérieur : émissions, réactivité et produits secondaires p. 14

Réactions chimiques sur les surfaces domestiques dans l'habitat : leur rôle dans la production d'acide nitreux p. 20

Quels moyens de mesure pour caractériser la qualité de l'air intérieur ? p. 26

Mesure du formaldéhyde dans l'air : développement d'un analyseur en continu, transportable et automatisé p. 27

Mesure des composés organiques semi-volatils dans les poussières sédimentées de l'habitat et conditions de conservation des échantillons avant analyse p. 33

Quels impacts sanitaires liés à l'exposition aux polluants de l'air intérieur ?

p. 38

Le rôle des polluants en air intérieur dans la survenue et la sévérité des allergies respiratoires : développement d'un modèle cellulaire prédictif

p. 39

Étude et compréhension de la dynamique de colonisation microbienne des matériaux : vers l'élaboration de nouveaux traitements préventifs adaptés aux environnements intérieurs

p. 45

Habitations dégradées par la mэрule et les moisissures : évaluation de l'exposition fongique des occupants et impact sanitaire

p. 52

Syndromes des bâtiments malsains : analyse des facteurs environnementaux et psychosociaux

p. 57

Présentation détaillée du programme PRIMEQUAL

p. 63

Appel à propositions de recherche :

Qualité de l'air intérieur – effets, causes, prévention et gestion

p. 66

LE PROGRAMME PRIMEQUAL,

programme de recherche interorganisme pour une meilleure qualité de l'air

Lancé en 1995, PRIMEQUAL est un programme de recherche copiloté par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) et par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), avec l'appui de l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS).

Il vise à fournir les bases scientifiques et les outils nécessaires aux décideurs et aux gestionnaires de l'environnement pour surveiller et améliorer la qualité de l'air intérieur et extérieur afin de réduire les risques pour la santé et l'environnement. Il présente la particularité de réunir plusieurs disciplines scientifiques concernées par la pollution de l'air et ses impacts : sciences physiques (météorologie, chimie, dynamique, météorologie...), sciences de la vie (biologie, médecine, épidémiologie, écologie...), mathématiques (modélisation, statistiques) et sciences sociales (économie, sociologie, psychologie...).

Parmi les différentes actions mises en œuvre dans PRIMEQUAL, le lancement d'appels à propositions de recherche (APR) permet au MEDDE et à l'ADEME de susciter et de soutenir des projets de recherche appliquée. Jusqu'en 2001, afin de constituer une communauté de chercheurs autour de la problématique « qualité de l'air », les APR pluridisciplinaires abordaient simultanément l'ensemble des thématiques concernées : processus atmosphériques, exposition aux polluants et ses déterminants, effets de la pollution sur la santé humaine, les écosystèmes et les matériaux, mise en place et évaluation des politiques publiques... Depuis 2001, le programme PRIMEQUAL s'est orienté vers des APR ciblés sur des problématiques spécifiques :

- « ESCOMPTE » en 2002, campagne de mesures relative à la pollution photochimique sur la région Marseille-Fos-Berre ;
- « Aérosols et particules » en 2003 ;
- « Évaluation et perception de l'exposition à la pollution atmosphérique » en 2005 ;
- « Pollution de proximité » en 2006 ;
- « Qualité de l'air intérieur » en 2009 (colloque de valorisation des résultats en novembre 2013) ;
- « Pollution longue distance » en 2009 (en cours) ;
- « Contribution à l'évaluation des expérimentations de ZAPA » en 2011 (en cours) ;

- « Environnement intérieur et approches innovantes » en 2011 (en cours) ;
- « Contribution à l'évaluation de l'opération pilote visant à réduire les émissions de particules fines du chauffage au bois individuel dans la zone du PPA de la vallée de l'Arve » en 2013 (en cours).

CHIFFRES CLEFS DU PROGRAMME PRIMEQUAL

- Plus de 275 actions de recherche soutenues depuis la création du programme pour un montant total d'environ 20 millions d'euros.
- 81 recherches soutenues depuis 2001, dont :
 - douze projets financés dans le cadre de l'APR « Pollution longue distance » de 2009 ;
 - neuf projets financés dans le cadre de l'APR « Qualité de l'air intérieur » de 2009 ;
 - trois projets financés dans le cadre de l'APR « Contribution à l'évaluation des expérimentations de ZAPA » de 2011 ;
 - huit projets financés dans le cadre de l'APR « Environnement intérieur et approches innovantes » de 2011 ;
 - projets en cours de sélection dans le cadre de l'APR « Contribution à l'évaluation de l'opération pilote visant à réduire les émissions de particules fines du chauffage au bois individuel dans la zone du PPA de la vallée de l'Arve » de 2013.

QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR - EFFETS, CAUSES, PRÉVENTION ET GESTION DES POLLUTIONS

Contexte des travaux de recherche PRIMEQUAL sur la qualité de l'air intérieur

par Séverine Kirchner, présidente du Conseil scientifique

Avec près de 80% du temps passé dans des espaces clos, l'air intérieur est une préoccupation importante pour les populations et les pouvoirs publics. Logements, établissements d'enseignement et de loisirs, espaces de bureaux, transports, sont ainsi autant de lieux de vie dans lesquels de nombreuses substances et agents d'origines diverses sont souvent présents à des concentrations supérieures à celles mesurées dans l'air extérieur. Les facteurs en cause sont nombreux : présence et activité humaine, matériaux, ameublement et systèmes équipant les bâtiments, environnement extérieur de proximité, etc.

Du fait de la diversité en nature et en intensité des sources de contaminations, des effets nombreux et variés sur la santé ont été documentés comme associés à la pollution intérieure. Aux problèmes plus anciens toujours d'actualité, tels que les intoxications au monoxyde de carbone ou la tuberculose, liées pour partie à la promiscuité ou à l'insalubrité, ont succédé des effets en lien avec les nouveaux modes de vie et l'évolution des techniques de construction visant une meilleure performance des bâtiments. Certains polluants cancérigènes, neurotoxiques ou perturbateurs endocriniens peuvent ainsi être retrouvés dans les environnements intérieurs. On constate également une augmentation des allergies et autres réactions d'hypersensibilité dont l'une des causes est associée à la détérioration de l'environnement intérieur, comme, par exemple, la présence plus importante d'agents irritants ou d'allergènes tels les acariens, les animaux domestiques ou les moisissures. Enfin, une mauvaise qualité d'air intérieur est également associée à des symptômes non spécifiques du type irritations, maux de tête, fatigue, souvent associés au syndrome des bâtiments malsains.

A contrario, une bonne qualité d'air à l'intérieur d'un bâtiment favorise le bien-être des occupants, l'apprentissage des enfants et réduit l'absentéisme dans les espaces de travail.

Au-delà du contexte technique associé aux bâtiments, à leurs environnements de proximité ou à leurs équipements, la question de l'air intérieur s'ancre très largement dans les comportements individuels et collectifs, les modes de vie, voire la(es) culture(s). La perception et la latitude laissées aux individus,

acteurs de leurs espaces de vie, jouent ainsi un rôle essentiel sur leurs environnements. La qualité de l'air intérieur est également au cœur d'un très large éventail de domaines (logement, travail, transports, loisirs) et d'acteurs de l'action collective, privés ou publics, qu'il convient de prendre en compte, depuis les médecins en passant par de nombreuses industries et organisations professionnelles jusqu'aux instances institutionnelles et administratives en matière de santé environnementale aux différentes échelles, nationale, régionale ou locale.

Malgré les efforts consentis depuis les récentes années pour mieux connaître la qualité de l'air dans les lieux de vie et prévenir les situations à risque, le sujet soulève encore de multiples interrogations.

Quels sont les effets des expositions aux polluants en lien avec les pathologies à fort impact sur la santé, comme les cancers, les maladies cardiovasculaires ou les pathologies respiratoires? Quels sont les impacts sur la qualité de vie? Comment identifier les sources de pollution et prédire les situations à risque? Comment expliquer l'apparition des syndromes psychogènes collectifs? Quelles stratégies de prévention et de remédiation sont les plus efficaces et efficientes?

Afin d'apporter des réponses à ces questions, le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) ont lancé en 2009 un appel à propositions de recherche « Qualité de l'air intérieur – Effets, causes, prévention et gestion » dans le cadre de leur programme de recherche commun PRIMEQUAL (cf. présentation du programme page 63).

Parmi les propositions reçues, neuf projets de recherche ont été soutenus et permettent de fournir des bases scientifiques et quelques outils utiles aux décideurs et aux gestionnaires des bâtiments pour évaluer et améliorer la qualité de l'air intérieur, et réduire ainsi les risques pour la santé. Parmi les avancées, on citera :

- la proposition d'un modèle d'évaluation et de gestion des syndromes des bâtiments malsains (SBM) tenant compte des facteurs psychologiques et environnementaux ;

- la caractérisation de sources peu connues de composés chimiques dans les environnements intérieurs : meubles destinés à la petite enfance, produits ménagers, rôle des surfaces internes dans les réactions chimiques ;
- les moyens de mesure pour caractériser la qualité de l'air intérieur : analyseur en continu de formaldéhyde, méthode d'analyse de composés organiques semi-volatils (pesticides, muscs, PCB, phtalates, etc.) dans les poussières intérieures ;
- la contribution à la caractérisation et la gestion du risque sanitaire liés à des pollutions intérieures : modèle cellulaire prédictif permettant de caractériser le rôle des polluants de l'air intérieur dans la survenue et la sévérité des allergies respiratoires, exposition aux moisissures dans des habitations atteintes par des champignons dégradant le bois (lignivores), propositions de nouveaux traitements préventifs contre la contamination bactérienne et fongique de matériaux comme la toile de verre, le papier peint, le lin, le bois, la plaque de plâtre et la dalle de plafond acoustique.

Le colloque organisé les 19 et 20 novembre 2013 à La Rochelle avait pour objet de faire dialoguer scientifiques et acteurs impliqués sur la thématique de l'air intérieur autour des résultats, de la recherche soutenue par PRIMEQUAL. Les différentes parties prenantes intéressées par les questions de qualité de l'air intérieur (ministères, agences, médecins, maîtres d'ouvrage, architectes, bureaux d'études, entreprises, collectivités territoriales, chercheurs, associations, etc.) sont invitées à participer aux débats et contribuer ainsi à définir les perspectives de recherche et d'actions publiques dans ce domaine.

L'ensemble des rapports finaux des projets ainsi que les documents de synthèse sont disponibles en ligne sur le site du programme sous www.primequal.fr.

Quelles sources d'émissions de polluants en air intérieur ?

À l'heure où les établissements recevant du public sont la cible de la surveillance réglementaire de la qualité de l'air intérieur, où les produits de construction affichent leur caractéristique d'émission en substances volatiles *via* un étiquetage obligatoire et les premières valeurs guides réglementaires pour l'air intérieur sont publiées, nos connaissances sur les sources d'émissions de polluants en air intérieur restent partielles, voire insuffisantes, pour identifier et, au besoin, prévenir les risques qui leur sont associés.

Pourtant, ces sources sont pour la plupart des objets ou des produits de notre quotidien, utilisés régulièrement et dont nous ignorons en grande partie la composition et ce qu'ils émettent dans l'air que nous respirons. De plus, leurs interactions avec les constituants de l'air – et notamment les oxydants comme l'ozone ou les radicaux libres – et au final leur rôle dans la chimie de l'air intérieur ne sont pratiquement pas connus.

Les environnements intérieurs regorgent de surfaces disponibles émissives, de par leur revêtement ou l'application de produits ménagers, et de lieux privilégiés d'interactions entre l'air et le matériau, susceptibles d'altérer ses caractéristiques d'émissions. Ainsi faut-il caractériser ces surfaces, le plus souvent par une approche expérimentale en enceinte contrôlée mais également, et de plus en plus, directement *in situ*.

Les trois études de cette session s'inscrivent dans ce processus. La première vise à étendre la procédure d'étiquetage des émissions de composés organiques volatils au mobilier, notamment celui destiné à la petite enfance, en cherchant à identifier la part des différents composants tout en développant un outil simple d'aide à la sélection des meubles les moins émissifs. La seconde étude propose une méthodologie d'évaluation des émissions chimiques par les produits ménagers à la fois en enceinte expérimentale, mais aussi en condition réelle en définissant des scénarios d'usage. L'interaction de ces produits avec les oxydants de l'air, en particulier l'ozone, met en évidence la formation de produits de réaction en phase gazeuse et en phase particulaire. La troisième étude se penche sur le rôle des surfaces intérieures comme support de réactions chimiques en phase hétérogène conduisant à la formation d'acide nitreux, un des précurseurs du radical hydroxyle, élément clé pour mieux comprendre la chimie de l'air intérieur.

Olivier RAMALHO,
Ingénieur au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
et membre du Conseil scientifique de PRIMEQUAL

Émissions par les meubles destinés à la petite enfance : impact sur la qualité de l'air des crèches et premières réflexions quant à la mise en place d'une procédure d'étiquetage

Responsable scientifique :

Marie-Lise ROUX
Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction
Ameublement (FCBA)
Pôle Ameublement
10, avenue de Saint-Mandé
75012 Paris
marie-lise.roux@fcba.fr

Équipes et chercheurs impliqués :

Institut Technologique FCBA: Marie-Lise Roux (pôle Ameublement), Christophe Yrieix (laboratoire Chimie-écotoxicologie)

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment: François Maupeit, Mélanie Nicolas (Division Physicochimie: Sources et Transferts de Polluants)

Mots clefs : ameublement, crèches et écoles, qualité air intérieur, émissions COV, formaldéhyde

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Plusieurs études récentes, consacrées à la **qualité de l'air intérieur des crèches ou d'écoles maternelles**, ont montré des **niveaux de concentration en formaldéhyde et en toluène nettement plus importants dans l'air intérieur que dans l'air extérieur**.

La contribution des produits d'ameublement à cette pollution n'est pas connue, car, aujourd'hui, les données d'émissions en composés organiques volatils (COV) et formaldéhyde (FORM) pour les matériaux utilisés dans la fabrication du mobilier sont limitées aux données de dégagement de formaldéhyde par les panneaux à base de bois.

Très peu d'informations sur les émissions en COV des matériaux et des meubles complets dans l'air intérieur sont donc disponibles.

Parallèlement, la loi de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (dénommée « loi Grenelle I ») prévoit dans son article 40 la mise en place d'un **étiquetage obligatoire des émissions en polluants volatils du mobilier**. Cette disposition reste difficile à mettre en place en ameublement, de par la constitution de multiples combinaisons de matériaux et revêtements.

Dans les crèches et les écoles maternelles se trouvent essentiellement des lits à base de bois ou de métal, des chaises et des tables à base de bois massif ou de panneaux et tubes métal, des meubles de rangement (surtout à base de panneaux), des meubles à langer à base de panneaux, des meubles de motricité (plutôt à base de panneaux ou de mousses).

Le projet **MOBAIR-C** (« Contribution du MOBilier à la qualité de l'AIR des Crèches ») s'est donc fixé les deux grands objectifs suivants :

- apporter des **connaissances pertinentes sur la contribution du mobilier et de ses composants dans l'air intérieur** principalement des crèches, puis, par extension, des écoles maternelles ;
- **élaborer un outil simple d'aide à la décision** pour permettre aux acteurs concernés par l'équipement de salles de crèches ou d'écoles maternelles – à savoir les collectivités locales ou privées, les acheteurs publics, les fabricants de ces équipements – de **choisir les solutions les moins émissives possibles**.

Ce projet a pu être réalisé grâce au partenariat avec le CSTB, le syndicat professionnel des industries de l'ameublement, des entreprises et metteurs sur le marché de produits de l'ameublement.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

D'un point de vue opérationnel, le projet MOBAIR-C s'est attaché à :

- **caractériser les émissions des principaux composés organiques volatils et des composés carbonylés** (dont le formaldéhyde) par des éléments de mobilier destinés à des lieux d'accueil de la petite enfance (crèches et écoles maternelles) ;
- **mettre en perspective les valeurs obtenues avec les dispositions réglementaires décidées pour les produits de construction et de décoration** (étiquetage des émissions de polluants volatils et interdiction des composés cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction, de catégorie 1 et 2).
- **comparer les émissions d'un meuble complet et la résultante des différents composants** de meubles testés, afin d'avoir **un outil d'aide à la décision pour le formaldéhyde** (un des principaux polluants volatils émis par ces éléments de mobilier) **et les COV totaux** ;
- **estimer la contribution du mobilier de crèche et d'école maternelle au travers de scénarios** pour ces bâtiments et les comparer aux valeurs mesurées lors des campagnes de l'OQAI (Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur).

Méthodologie

Échantillonnage

Dans cette étude, les émissions de COV et de formaldéhyde de 21 meubles pour crèche et école maternelle et de 38 éléments constituant ces meubles ont été caractérisées par la série des normes ISO 16000.

Plusieurs types de meubles ont été testés :

- des meubles de rangement (ouverts ou fermés),
- des couchages (lits à barreaux avec sommier et matelas, ou couchettes),
- des tables,
- des chaises,
- un tableau mural,
- un élément de motricité en mousse.

Déroulement des essais et analyses

Les meubles complets, directement fournis par les fabricants, ou importateurs, ont été testés* à l'aide de **chambres d'essai d'émission** de 1 m^3 , ou plus si nécessaire pour certains meubles, dans lesquelles les conditions étaient constantes : température, humidité relative et débit d'air spécifique par unité de surface.

* Les mesures ont été effectuées selon les normes :

- Norme NF EN ISO 16000-9 : Air intérieur – Partie 9 : Dosage de l'émission de composés organiques volatils de produits de construction et d'objets d'équipement – Méthode de la chambre d'essai d'émission (AFNOR, 2006).
- Norme NF EN ISO 16000-11 : Air intérieur – Partie 9 : Dosage de l'émission de composés organiques volatils de produits de construction et d'objets d'équipement – Échantillonnage, conservation des échantillons et préparation d'échantillons pour essai (AFNOR, 2006).
- Norme NF ISO 16000-3 : Air intérieur – Partie 3 : Dosage du formaldéhyde et d'autres composés carbonylés – Méthode par échantillonnage actif (AFNOR, 2002).
- Norme NF ISO 16000-6 : Air intérieur – Partie 6 : Dosage des composés organiques volatils dans l'air intérieur des locaux et enceintes d'essai par échantillonnage actif sur le sorbant Tenax TA, désorption thermique et chromatographie en phase gazeuse utilisant MS/FID (AFNOR, 2005).

Une fois connus la concentration de COV dans l'air à un moment donné, le débit d'air dans la chambre d'essai d'émission et la surface de l'éprouvette d'essai, il est possible de **déterminer les facteurs d'émission spécifiques par unité de surface* pour les COV** provenant des produits soumis à essai.

* Le facteur d'émission spécifique de COV par unité de surface est exprimé en microgrammes par mètre carré et par heure ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$) à partir de la concentration de COV dans l'air (en microgrammes par mètre cube d'air ou $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et du taux de ventilation spécifique par unité de surface dans la chambre (en mètres cubes par mètre carré et par heure ou $\text{m}^3\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$).

Principaux résultats

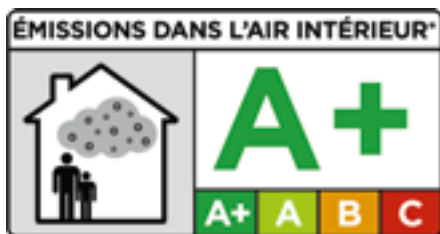
De manière générale, **les émissions des meubles sont restées relativement faibles**, inférieures à $16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ pour le formaldéhyde (hormis pour 2 meubles, $51\text{-}55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$) et à $61 \mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ pour les COV totaux.

Pour les meubles à base de bois, les principaux composés émis sont des **aldéhydes** (formaldéhyde, pentanal, hexanal, ou l'acide acétique, etc.), des **composés naturels** du bois

résineux (notamment des terpènes : alpha-pinène et bêta-pinène) et différents composés pouvant venir du bois ou des finitions appliquées (cyclohexanone, 2-méthylpropanol, 1-butanol). Les meubles les plus émissifs en formaldéhyde étaient la « chaise bois grand import », notamment du fait de ses pieds en bois lamellé-collé, et une chaise avec une assise multiplis vernie sur une seule face. Les plus émissifs en COVT (Composés Organiques Volatils Totaux) étaient une table bois, les meubles vestiaires (par les composés du bois) et le matelas (à cause des toiles plastifiées).

Pour les meubles en plastique (couchettes, chaises, éléments de motricité), **globalement, les émissions de COV et de formaldéhyde sont inférieures à celles des meubles en bois.** On notera cependant des émissions de phénol par une toile de couchette, non détectées sur la couchette complète, et par des éléments de motricité.

Si les exigences de l'étiquetage des émissions de polluants volatils par les produits de construction et de décoration (décret n°2011-321 du 23 mars 2011 et arrêté du 19 avril 2011) étaient appliquées aux meubles complets testés (ce qui revient à placer un meuble complet dans une pièce de référence de 30 m³ avec un taux de renouvellement de l'air de 0,5 h⁻¹ et de calculer la concentration résultante dans cette pièce), **les 21 meubles testés obtiendraient la classe d'émission la plus faible, soit la classe A+.**



Ces résultats sont en ligne avec ceux d'études précédentes ayant montré que la concentration en COVT (Composés Organiques Volatils Totaux) décroît de 40% dans les 14 premiers jours puis de 25% dans les 14 suivants. La concentration en formaldéhyde décroît plus lentement que celle en COVT pour représenter 75% du niveau initial après 14 jours et 68% après 28 jours.

Approche d'un outil d'aide à la décision

Parmi les 21 meubles complets testés, la comparaison entre les facteurs d'émission à 28 jours des meubles complets et des éléments les constituant a pu être réalisée (figure 1) pour 18 meubles. Parmi eux, 16 vérifiaient l'hypothèse selon laquelle la résultante des émissions des composants est supérieure ou du même ordre à celle du meuble complet.

Pour 7 meubles, les facteurs d'émission à 28 jours en formaldéhyde, des meubles complets et de leurs éléments sont équivalents. Parmi 4 des 7 meubles, on observe aussi une bonne corrélation sur les facteurs d'émission à 28 jours en COVT.

Pour les autres meubles, on constate plutôt des facteurs d'émission des éléments testés seuls, nettement supérieurs à ceux des meubles complets, soit pour les COVT, soit pour le formaldéhyde, soit pour les 2.

Seuls 2 meubles montrent des facteurs d'émission des meubles complets nettement supérieurs à ceux des éléments qui les composent.

Les résultats obtenus montrent que **l'hypothèse selon laquelle la résultante des émissions des composants est supérieure ou du même ordre à celle du meuble complet est donc vérifiée à quelques exceptions près.**

Toutefois, les tests effectués montrent que, selon le type de meuble et les circonstances de test, un étiquetage sur la base de cette hypothèse pourrait conduire à un classement erroné du meuble. Notons cependant que les mobiliers de crèche et d'écoles maternelles étudiés provenaient d'Europe et respectaient ainsi des normes contribuant à améliorer l'air intérieur. **Il faut poursuivre la méthodologie sur d'autres typologies de mobiliers pour vérifier la robustesse de l'hypothèse proposée.**

Plusieurs scénarios ont ensuite été construits et testés pour différents types de pièces meublées en fonction de leur usage :

- une salle de classe en école maternelle
- une salle de repos en école maternelle



Figure 1 : Chaise en bois entière en chambre d'essai. Dossier et assise coupés en deux pour essai sur chacun des composants.

Concentration d'exposition	TRA réglementaire		TRA dégradé	
	Meubles	Matériaux	Meubles	Matériaux
C _{exp} Formaldéhyde (µg.m ⁻³)	3.4	5.7	20	34
C _{exp} COVT (µg.m ⁻³)	6.3	20	38	118

Tableau 1 : Contribution des matériaux et des meubles dans une salle de classe. TRA : Taux de renouvellement d'air (h⁻¹).

- une salle de repos en crèche (jardins d'enfants)
- et une salle de repos (bébés).

L'objectif des calculs était de partir des valeurs trouvées lors des essais sur les matériaux (en particulier ceux à base de bois), pour les mettre en situation dans un scénario défini en fonction de la typologie d'une pièce, afin d'obtenir leur **contribution seule et en comparaison avec celle du meuble complet fabriqué avec de tels matériaux**.

À titre d'exemple, le tableau 1 donne les ordres de grandeur des concentrations d'exposition calculées pour le formaldéhyde et les COV pour le scénario « salle de classe » selon 2 taux de renouvellement d'air (réglementaire : 3 h⁻¹ ; et dégradé : 0.5 h⁻¹).

Les ordres de grandeur des concentrations d'exposition se sont avérés similaires pour les meubles et les matériaux dans le cas où le taux de renouvellement d'air est réglementaire. En revanche, dans le cas où ce dernier est dégradé, les écarts de concentrations d'exposition sont dans l'absolu beaucoup plus significatifs, car augmentés d'un facteur correspondant au ratio entre les taux de renouvellement d'air réglementaire et dégradé (6 environ).

D'autre part, les valeurs des scénarios convergent vers les médianes obtenues lors des mesures effectuées dans les logements et les écoles qui étaient, pour le formaldéhyde, de l'ordre de 20 µg/m³ pour les logements et entre 10 et 30 µg/m³ pour les écoles.

ENSEIGNEMENTS DU PROJET

Outil d'aide à la décision

Sur la base de ces travaux, un outil d'aide à la décision a été construit à partir du logiciel Excel pour estimer les émissions en formaldéhyde et en COVT pour un meuble constitué de matériaux dont les émissions ont été mesurées selon les normes ISO 16000. Des exemples ont été construits pour des

tables, des chaises et un lit mais il est aussi possible de personnaliser l'outil et de le configurer pour n'importe quel type de meuble à partir d'une liste de matériaux. Cet outil doit donc être complété par d'autres références de matériaux.

Poursuite de l'étude

Cette étude s'est poursuivie pour des mobiliers domestiques équipant la chambre du bébé et du jeune enfant jusqu'à 10 ans. **L'objectif est de compléter la base de données des matériaux, mais aussi de vérifier la robustesse de la méthodologie.** Les résultats sont attendus fin 2013 – début 2014. Cette étude permettra d'avoir des informations sur les mobiliers qui environnent les jeunes enfants de 0 à 10 ans.

Pistes de recherches

D'autres hypothèses de travail sont à l'étude, comme raccourcir les essais à 7 et 14 jours au lieu de 28 jours, comme le BIFMA (Business and Institutional Furniture Manufacturers Association) le fait déjà aux États-Unis, ou encore utiliser des « maquettes » pour passer les meubles complets dans des chambres de plus petite dimension (chambres de 1 m³).

VALORISATION

Participation à des congrès

Plusieurs communications orales ont été effectuées pour présenter le projet et les résultats du projet. La liste est donnée ci-après :

Maupetit F. Caractérisation des émissions de COV et de formaldéhyde par les produits de construction et d'ameublement – *Journée Grenelle et Ameublement FCBA, Paris, 5 avril 2011*

Yrieix C. Contribution du MOBilier à la qualité de l'Air Intérieur des Crèches : premiers résultats – *Journée Grenelle et Ameublement FCBA, Paris, 5 avril 2011*

Yrieix C. Roux M-L. Contribution du mobilier de crèche à l'air intérieur – projet MOB AIR-C : Les résultats – *Journée Grenelle et Ameublement FCBA, Paris, 4 avril 2012*

Roux M-L. Le Grenelle de l'environnement & l'Étiquetage des émissions des polluants volatils pour les produits d'ameublement : les aspects réglementaires, où en est-on ? – *Atelier Ameublement Responsable, Bordeaux, 23 mai 2012*

Roux M-L. L'allergique et sa maison : les meubles – *5^{es} Rencontres Rhône-Alpines de FMC en Allergologie, Lyon, 8 septembre 2012*

Roux M-L, Gourvès V., Qualité de l'air intérieur du mobilier dans les crèches et les écoles et perspectives pour de nouveaux matériaux – *Pôle Fibres, Techno-dating «Nouveaux matériaux pour un habitat et des transports plus sains» – communication orale, Strasbourg, 25 septembre 2012*

Roux M-L. Le rôle de l'ameublement dans la qualité de l'air des crèches et des écoles – *Les défis des Bâtiments & Santé 2013, Paris, 28 mai 2013*

Publications

Roux M-L. Contribution de MOBilier à la qualité de l'Air Intérieur dans les crèches – MOB AIR-C, – rapport final par FCBA et CSTB de l'étude financée par le MEDDE avec le soutien scientifique de PRIMEQUAL, juin 2013 – 131 pages.

Produits ménagers et qualité de l'air intérieur : émissions, réactivité et produits secondaires

Coreponsables scientifiques :

Mélanie NICOLAS

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Division Physicochimie - Sources et transfert de polluants
24, rue Joseph Fourier
38400 Saint-Martin-d'Hères
melanie.nicolas@cstb.fr

Laura CHIAPPINI

Institut National de l'Environnement industriel et des Risques (INERIS)
Direction des risques chroniques
Unité Chimie, métrologie, essais
Parc Technologique ALATA
BP 2
60550 Verneuil-en-Halatte
drc-cov-aos@ineris.fr

Équipes et chercheurs impliqués :

CSTB: Mélanie Nicolas, Marianne Fernandez, Gwendal Loisel, François Maupetit, Chafika Riouch, Romain Rollet, Priscilla Thiry

INERIS: Laura Chiappini, Sébastien Fable, Claire Greuillet, Stéphanie Rossignol, Aurélien Ustache

Institut de Recherche sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon (IRCELYON): Barbara D'Anna, Aurélie Meme

Jérôme Nicolle (CSTB-IRCELYON)

Mots clefs : activités domestiques, produits ménagers, émissions primaires, émissions secondaires, réactivité, aérosols organiques secondaires, produits de réaction

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Les produits de grande consommation en général et **les produits ménagers en particulier constituent une source importante de polluants en air intérieur**. L'exposition à ces polluants est d'autant plus importante qu'elle a lieu dans des milieux confinés, peu ventilés où l'on

passé la grande majorité de notre temps. L'ampleur de cette exposition reste encore aujourd'hui peu connue.

La loi Grenelle I stipule la poursuite des actions visant à améliorer la qualité de l'air intérieur, notamment en ce qui concerne les connaissances du rôle des produits de grande consommation. Dans ce contexte, le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) soutient des travaux préliminaires en vue de **l'étiquetage des produits de grande consommation**.

Afin d'affiner cet étiquetage, la réalisation de travaux expérimentaux est nécessaire pour préciser les substances cibles. Or, la limitation en teneur dans les produits ne préjuge toutefois pas de l'exposition finale du consommateur, celle-ci dépendant de la catégorie du produit, de son usage et des réactions des substances chimiques émises entre elles et avec les substances présentes dans les environnements intérieurs. Comme pour les produits de construction et de décoration, des limites d'émission pourraient être fixées.

Le but de cette étude, baptisée **ADOQ** (Activités domestiques et qualité de l'air intérieur), était **d'identifier et de quantifier les composés volatils** (Composés Organiques Volatils, COV, et aldéhydes) **et les particules, émis et formés par des activités domestiques** liées à l'emploi de produits ménagers et d'entretien ; **d'évaluer l'influence des paramètres environnementaux** tels la température, l'humidité relative et le taux de renouvellement d'air sur ces émissions ; et de **différencier la part des émissions primaires des formations secondaires**, en particulier dans le cas du formaldéhyde.

L'équipe du projet a imaginé une méthodologie adaptée à la caractérisation des émissions de ces produits dans l'air intérieur afin de fournir les données nécessaires à **l'évaluation du risque encouru par la personne réalisant l'activité domestique** ainsi que par son environnement – et ce en vue d'identifier **les actions à mener au jour le jour pour réduire l'exposition aux COV et aux particules secondaires**.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Méthodologie

La méthodologie mise en œuvre était basée sur trois phases, successives et complémentaires :

- **Phase 1 : sélection des produits ménagers** et évaluation de leur potentiel d'émission de polluants en laboratoire.
- **Phase 2 : évaluation des émissions** des produits ménagers **et de la réactivité** : campagnes de mesures en **environnement réel**.
- **Phase 3 : Étude de l'influence des paramètres environnementaux** sur les émissions des produits ménagers et sur l'apparition des produits de réactions secondaires : mesures en chambre d'essais d'émissions.

Phase 1 : sélection des produits ménagers

La sélection des produits ménagers potentiellement émetteurs de polluants dans l'air intérieur a été réalisée parmi des produits représentatifs des habitudes des ménages français et de la fréquence de leur présence dans les foyers (enquête ECOVER réalisée par le CREDOC en 2009). À partir de ces informations, un échantillonnage a été réalisé dans plusieurs grandes surfaces ; la stratégie de choix des produits retenue étant : sa typologie (nettoyant multiusage ou spécifique), son conditionnement (liquide, poudre, crème, lingette, mousse), sa marque (internationale, distributeur, premier prix et écologique). Au final, **54 produits ménagers** différents ont été présélectionnés (un code spécifique a été attribué à chaque produit sous la forme ADOQ-#) et **évalués en termes d'émission de polluants chimiques** dans des chambres d'essais d'émission.

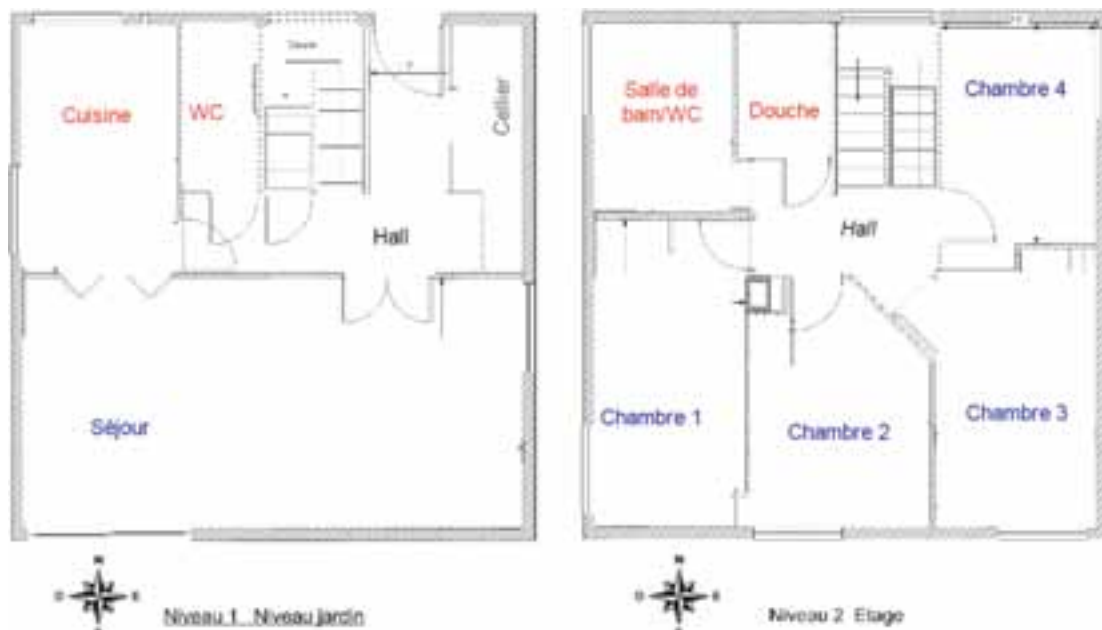


Figure 1 : Maison expérimentale MARIA du CSTB (Champs-sur-Marne).

Phase 2 : évaluation des émissions et de la réactivité en conditions réelles

Sur les 54 produits présélectionnés, les plus émissifs et les plus pertinents vis-à-vis des phénomènes de réactivité liée à l'ozone (c'est-à-dire ceux émettant des COV insaturés susceptibles d'être ozonolysés) ont été choisis afin d'être **utilisés en conditions réelles lors de campagnes de mesures hivernale et estivale**, dans la maison expérimentale MARIA du CSTB (figure 1).

Lors de la campagne estivale, la réactivité était étudiée à partir des niveaux d'ozone provenant de l'extérieur tandis qu'au cours de la campagne hivernale, une source d'ozone a été utilisée. Au final, une vingtaine de produits ont ainsi été testés en été, et une dizaine en hiver, en suivant des scénarios* d'utilisation réalistes, spécifiques à chaque type de produit, et intégrant les recommandations d'usage des fabricants.

Deux types de scénarios ont été mis en œuvre :

- **des scénarios mono-activité** afin de tester chaque produit individuellement, dans des conditions d'emploi conformes aux recommandations du fabricant ;
- **des scénarios multi-activités afin d'évaluer l'exposition totale d'une personne** au cours d'une phase complète ou quasi complète de ménage impliquant donc plusieurs produits ménagers.

** Il est important de noter qu'au moment de la réalisation de ces campagnes, il n'existait pas de protocoles normalisés et peu de données bibliographiques sur des scénarios d'utilisation des produits ménagers.*

Métrologie

Différentes techniques de mesure ont été mises en œuvre à l'intérieur des pièces étudiées (chambre, cuisine, salle de bains).

D'une part, des mesures intégrées dites « off-line » pour :

- les COV : prélevés sur tubes Tenax TA® et analysés par chromatographie gazeuse et spectrométrie de masse associée à un détecteur à ionisation de flamme après thermodésorption (TD/GC/MS/FID, Perkin Elmer) ;
- les aldéhydes : prélevés sur cartouches DNPH et analysés par chromatographie liquide à hautes performances (HPLC, Waters) ;
- les composés oxygénés polyfonctionnels dans les phases organiques gazeuse et particulaire : mesurés simultanément grâce à une méthodologie innovante développée à l'INERIS (Rossignol *et al.*, 2012).

D'autre part, des mesures en continu dites « on line » pour :

- les COV précurseurs d'ozone : avec des mesures spécifiques à l'aide d'analyseurs en continu C2-C6 et C6-C12. Cette technique a permis de suivre l'évolution

des concentrations de certains COV ayant des chaînes carbonées contenant 2 à 12 atomes de carbone, après utilisation de produits ménagers, pour différencier une formation primaire et secondaire (disparition et apparition de COV liées à des réactions en phase gazeuse) ;

- l'évolution des concentrations du formaldéhyde lors de l'emploi de produits ménagers (formation primaire et secondaire, disparition et formation liées à des réactions en phase gazeuse) : utilisation d'un analyseur automatique (AEROLASER, modèle AL4021) ;
- la granulométrie et le nombre des particules : par SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) qui permet de suivre l'évolution des concentrations et de la taille des particules en fonction des actions domestiques menées dans la maison ;
- l'analyse quantitative des sulfates, nitrates, ammonium et de la fraction organique non réfractaire : avec un C-TOF-AMS (Compact-Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer Aerodyne Research), un spectromètre de masse permettant l'analyse en ligne et en temps réel des principales composantes chimiques de l'aérosol submicronique (PM1) ;
- l'ozone et les oxydes d'azote : mesurés en continu à l'aide d'analyseurs spécifiques ;
- et enfin les paramètres environnementaux : suivis à l'aide de sondes et d'enregistreurs spécifiques.

Phase 3 : étude de l'influence des paramètres environnementaux

Après avoir identifié les émissions des produits ménagers en laboratoire, évalué la réactivité liée aux composés gazeux et particulaires émis pendant l'action en conditions réelles, **les mécanismes de réactivité ont été étudiés plus spécifiquement dans des conditions contrôlées et maîtrisables**. En effet, la formation de sous-produits réactionnels tels que les aldéhydes et les aérosols organiques secondaires est fortement dépendante des conditions environnementales telles que les niveaux en réactif, les concentrations en particules initialement présentes, l'humidité, la température...

Afin de s'affranchir de la variabilité inévitable de ces paramètres en atmosphère réelle et caractériser la réactivité liée aux émissions des produits ménagers testés, **un banc d'essai permettant de maîtriser le taux de renouvellement d'air, la concentration en ozone et l'hygrométrie a été utilisé**.

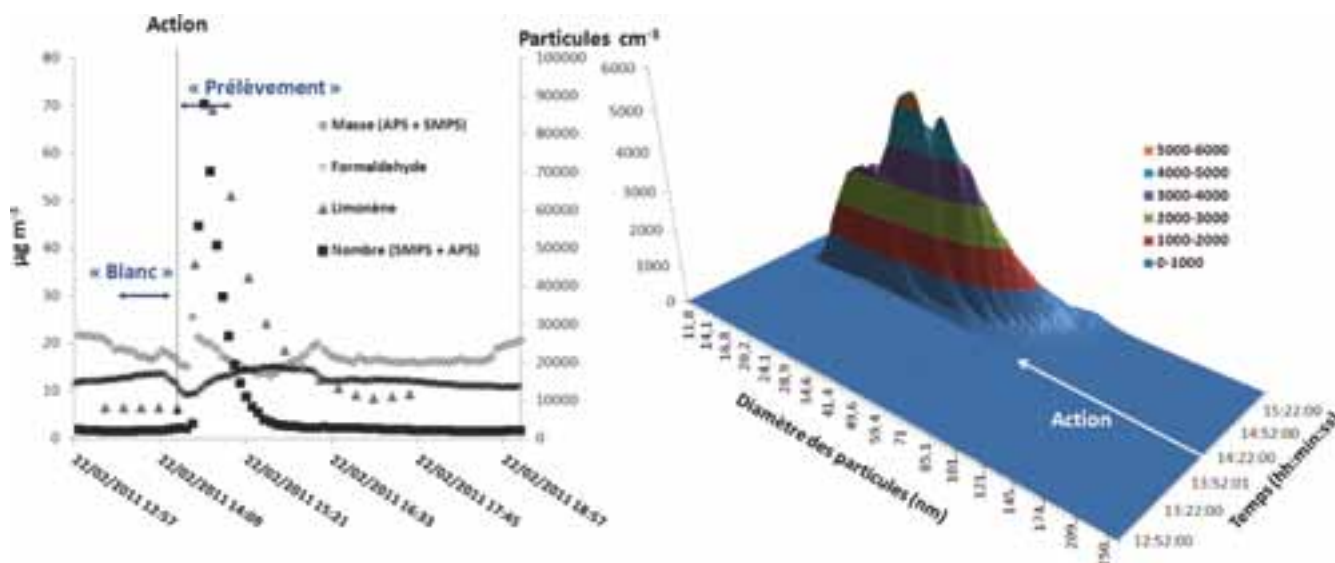


Figure 2 : Évolution temporelle des principaux paramètres physicochimiques dans la cuisine de la maison de MARIA avant, pendant et après l'utilisation du produit ménager ADOQ-53 pour la journée du 22/02/11 (figure de gauche). Évolution temporelle de la distribution granulométrique des particules avant et après l'application du produit ADOQ-53 en présence d'ozone (figure de droite).

Principaux résultats

L'évaluation des émissions des 54 produits en chambre d'essai d'émission a permis de déterminer leurs **facteurs d'émissions massique et surfacique**, constituant ainsi une **base de données d'émissions significative**. Parmi tous les COV et aldéhydes identifiés (près de 230 composés différents au total pour l'ensemble des produits), il est intéressant de noter que **le formaldéhyde a été retrouvé dans 91 % des produits testés et le d-limonène dans 43 %**. Les terpènes constituent le groupe majoritaire de composés identifiés lors des essais (limonène, alpha-pinène, camphène, terpinolène, citronellol) ; suivis des alcools terpéniques (isomères du terpinéol principalement). **En ce qui concerne les substances cancérigènes, le benzène n'a été détecté pour aucun des produits**, mais la présence de 2-nitropropane est à signaler pour une des eaux de Javel testée.

Parmi tous ces produits, une dizaine a été testée dans des conditions réalistes sur la base des scénarios préalablement établis. Pour tous les produits ménagers mis en œuvre en conditions réelles dans la maison expérimentale MARIA du CSTB, **une augmentation des concentrations en COV dans l'air intérieur** a été observée systématiquement, de même que, très fréquemment, **une augmentation des concentrations en aldéhydes**.

Les variations de concentrations en limonène, la décroissance des concentrations en ozone, la formation de nouvelles particules de petite taille, successivement à l'emploi de certains produits ménagers, sont autant d'éléments révélateurs de **la formation d'aérosols organiques secondaires (AOS)**. Des augmentations du nombre de particules de

l'ordre de 50 nm jusqu'à 160 000 particules. cm^{-3} ont pu être mesurées pour des niveaux de fond de l'ordre de 4 000 particules. cm^{-3} . La figure 2 qui présente les résultats obtenus lors de l'utilisation du produit ADOQ-53, lors de la campagne de mesure hivernale, illustre bien cette formation d'AOS.

Parmi la dizaine de produits ménagers testés en condition réelle lors de la campagne hivernale, quatre ont été choisis pour mener des investigations plus poussées. Ainsi, pour chacun de ces produits, les analyses suivantes ont été réalisées : composition du produit pur, distributions granulométriques, composés oxygénés en phases gazeuse et particulaire, suivi des fragments des ions principaux en temps réel par C-TOF-AMS.

La mise en œuvre combinée de techniques analytiques, différentes et complémentaires (analyses sur filtre d'une part et suivi en continu par C-TOF-AMS d'autre part) a permis de **caractériser les phénomènes d'émission et de formation de ces particules**. Ainsi, le suivi en continu des fragments organiques par C-TOF-AMS permet de discriminer les émissions primaires liées directement à l'emploi du produit ménager, des formations secondaires liées aux phénomènes de réactivité. La spéciation chimique, quant à elle, permet de confirmer la nature secondaire de ces formations, d'identifier les produits traceurs de la réactivité et les précurseurs.

La quantification des produits d'oxydation permet également d'estimer la part de l'AOS dans la masse totale de particules auxquels les personnes utilisant ces produits sont exposées, part faible, de l'ordre d'une vingtaine de pourcents. De petite taille, ces AOS participent peu à la masse totale, gouvernée par les particules de plus grosse taille. **Il n'en demeure pas moins que l'augmentation du nombre de particules de petite taille, inférieure à 100 nm** (exemple pour

ADOQ-50 à la figure 2), **est important d'un point de vue sanitaire***.

* En effet, alors que de nombreuses études épidémiologiques basées sur la mesure en masse des particules (et plus particulièrement des PM_{2.5} et PM₁₀) ont démontré le lien entre l'exposition à ces PM et l'augmentation de la mortalité et de la morbidité, un nombre grandissant de travaux suggère que la santé est d'autant plus affectée par les particules inférieures à 100 nm dont la détermination du nombre et de la composition chimique est de ce fait un enjeu sanitaire majeur. La distribution granulométrique des particules dans l'air ambiant fait d'ailleurs l'objet actuellement de travaux de normalisation. De plus, ces nouvelles particules peuvent jouer le rôle de noyau de condensation pour des composés primaires émis en phase gazeuse, lors de l'emploi du produit ménager. Ces composés comme le DPGME ou le 1-butoxypropanol, dont les effets sous leur forme gazeuse ont été démontrés comme négligeables, se retrouvent alors en phase particulaire qui pourrait représenter une nouvelle voie d'exposition à ces composés.

L'analyse chimique des phases gazeuse et particulaire a également **mis en évidence la formation de composés dont les effets sur la santé sont suspectés, comme le méthyl glyoxal et le 4-oxopentanal**, mais également d'autres composés dont les effets sur la santé sont encore méconnus tels les diacides carboxyliques (acide lévulinique et acide limonique), les dialdéhydes (limononaldéhyde)... **Ces analyses mettent en évidence la présence de plusieurs composés fonctionnalisés autant dans la phase**

gazeuse que particulaire et suggèrent ainsi l'importance de considérer les deux voies d'exposition.

Enfin, l'un des produits ménagers testés en atmosphère réelle, a été choisi (produit ADOQ-53) afin d'évaluer l'importance des phénomènes de réactivité vis-à-vis de l'ozonolyse dans des conditions maîtrisées en faisant varier les paramètres environnementaux. Ainsi, **l'augmentation des concentrations en ozone a généré une augmentation des concentrations en formaldéhyde** (tableau 1), soulignant ainsi son caractère secondaire. **Ces essais ont également mis en évidence l'émission de NO₂, composé aux effets sanitaires avérés mais également susceptible d'induire des phénomènes de réactivité de surface avec possible production de HONO, un important précurseur de radicaux OH** (voir l'étude sur «les réactions chimiques sur les surfaces domestiques dans l'habitat: leur rôle dans la production d'acide nitreux», S. Gligorovski, dans le présent fascicule).

Ces essais ont également permis d'observer plusieurs épisodes de nucléation successifs mettant ainsi en évidence l'existence de plusieurs précurseurs, émis plus ou moins rapidement après l'utilisation de certains des produits testés.

L'ensemble des essais menés en atmosphère réelle, l'analyse de la composition chimique du produit ménager et les essais en atmosphère contrôlée suggèrent l'émission d'autres précurseurs et d'autres voies réactionnelles que l'ozonolyse pour la formation d'AOS, ainsi que le rôle éventuel des amines dans ces processus.

Concentration O ₃ (µg.m ⁻³)	<1		20		100		160	
Masse de produit utilisé (g)	0,8	1,1	0,8	0,7	0,7	0,9	1,3	1,2
Nombre de particules max (#/cm ³)	2460	1 100	6800	5 600	10 100	8000	8500	12000
Masse de particules formée max (µg.m ⁻³)	2,7	1,6	7,1	3,3	25	21	22	39
Mode 1 ^{res} particules formées (nm)	25	40	55	40	50	50	60	60
Mode 2 ^e particules formées (nm)	-	-	50	50	70	70	80	80
NO ₂ max (µg.m ⁻³)	45	43	31	41	36	41	50	47
Limonène (µg.m ⁻³)	1 260	1 500	1 150	1 070	1 130	1 200	1 700	1 800
Formaldéhyde (µg.m ⁻³)	0	0	5	3	8	11	11	15

Tableau 1 : Nombre, masse et mode des aérosols formés, concentrations en NO₂, limonène et formaldéhyde en fonction de la concentration en ozone. xx/yy correspondent aux résultats de 2 essais différents.

ENSEIGNEMENTS DU PROJET

Ce travail a permis non seulement d'établir une **méthodologie d'évaluation des émissions chimiques des produits ménagers** inspirée des normes ISO en vigueur **en vue d'un étiquetage de ces produits**, mais également de mettre à disposition de la communauté un nombre important de **données d'émissions** afin d'alimenter les bases de données existantes sur les produits de grande consommation ou plus spécifiques aux produits ménagers, telle la base de données EPHECT. Ce type de données est en effet indispensable pour nourrir les modèles d'émission et de dispersion.

Ce projet met également à disposition **des concentrations en polluants dans l'air intérieur obtenues dans des conditions réelles**.

Des éléments de compréhension des **mécanismes de réactivité et de formation de produits secondaires en air intérieur** ont également pu être apportés grâce à ce travail de recherche.

Les données obtenues dans le cadre du projet de recherche ADOQ pourront également être utilisées dans une évaluation des risques sanitaires, comparable aux évaluations faites dans le cadre de la réglementation REACH. Les données disponibles restant limitées au regard du nombre de produits existants et des substances émises, et des variabilités des conditions d'utilisation et d'exposition, l'évaluation restera indicative. Elle permettra néanmoins de **hiérarchiser les substances et les types de produits et d'utilisations en fonction des risques potentiels respectifs**. Ce travail de hiérarchisation devra s'appuyer sur un travail de revue des données toxicologiques disponibles. En effet, pour la plupart des composés identifiés comme majoritairement émis, peu de données existent. **Cette évaluation sera utile pour orienter les travaux futurs et, le cas échéant, les actions de prévention comme l'étiquetage et l'information des consommateurs.**

VALORISATION

Participation à des congrès

Même A., Nicolas M. *et al.* (2012). Household products and indoor air quality: emission, reactivity and by-products in both gaseous and particulate phases. *European Aerosol Conference (EAC)*, Prague, Czech Republic.

Chiappini L., Rossignol S. *et al.* (2012). Study of SOAs formation from limonene ozonolysis in indoor environment: gas and particulate phases chemical characterization and toxicity prediction. *Healthy Buildings Conference*, Brisbane, Australia.

Nicolas M., Nicolle J., Fernandez M., Chiappini L., D'Anna B., Maupetit F. (2011). ADOQ-Characterization of VOCs and Aldehydes emissions from household products. *Indoor Air International Conference*, Austin, Texas, USA.

Nicolle J., Chiappini L., Fable S., George C., D'Anna B., Maupetit F., Nicolas M. (2011). Field studies on the impact of domestic activities on indoor air quality. *Indoor Air International Conference*, Austin, Texas, USA.

Publications

Rossignol S., Rio C., Greuillet C., Ustache A., Nicolas M. and Chiappini L. (2012). Study of SOAs formation from the ozonolysis of limonene emitted by housecleaning product in indoor environment: gas and particulate phases chemical characterization. *Atmospheric Environment*, vol. 75, 196-205.

Chiappini L., Rossignol S., Rio C., Ustache A., Fable S., Nicolle J. and Nicolas M., (2012). Formation d'aérosols organiques secondaires en air intérieur: le rôle des produits ménagers. *Pollution Atmosphérique* 212-213, 99-106.

Réactions chimiques sur les surfaces domestiques dans l'habitat : leur rôle dans la production d'acide nitreux

Responsable scientifique :

Sasho GLIGOROVSKI
Aix-Marseille Université
Laboratoire de chimie de l'environnement
FRE: 3416
3, place Victor Hugo (case 29)
13331 Marseille
saso.gligorovski@univ-amu.fr

Équipes et chercheurs impliqués :

Laboratoire de chimie de l'environnement (LCE, FRE 3416) : Vincent Bartolomei, Sasho Gligorovski, Elena Gomez Alvarez, Henri Wortham

Institut de recherche sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IRCELYON, UMR 5256) : Raluca Ciararu, Christian George

Physicochimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère (PC2A, UMR 8522) : Damien Amedro, Christa Fitschen, Coralie Schoemaeker

Laboratoire Interuniversitaire des systèmes atmosphériques (LISA, UMR 7583) : Charbel Afif, Jean-François Doussin

Mots clés : acide nitreux, radical hydroxyle, chimie l'intérieur, photochimie, chimie hétérogène, les oxydes d'azote

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

L'acide nitreux (HONO) est une espèce particulièrement importante en chimie atmosphérique, car sa photolyse ($305 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$) est l'**une des sources majeures des radicaux hydroxyles** (OH) qui sont **les principaux oxydants atmosphériques**.

Rappel

Le radical hydroxyle (OH) est le principal oxydant atmosphérique et contrôle à lui seul la capacité oxydante de l'atmosphère. Il peut être produit par divers mécanismes, notamment la photolyse de l'ozone ou de l'acide nitreux (HONO).

Si le mécanisme de production de l'acide nitreux n'est pas parfaitement connu, il a toutefois été montré que, dans les atmosphères extérieures, **la réactivité hétérogène du dioxyde d'azote (NO₂) sur les surfaces organiques constitue l'une des principales voies de formation de l'acide nitreux**. Dans les atmosphères intérieures, les concentrations de NO₂ peuvent être équivalentes voire même supérieures à l'extérieur, mais le rapport surface/volume se révèle également beaucoup plus grand.

Les conditions semblent donc particulièrement favorables à une production importante d'acide nitreux dans les atmosphères intérieures. Malgré la filtration de la lumière par les vitres (arrêt des photons en dessous de 340 nm), **l'éventualité d'une photolyse de l'acide nitreux, et donc d'une production de OH dans les habitations, ne peut pas être écartée**. L'existence d'une telle source de OH nous obligerait à **repenser la qualité des atmosphères intérieures en incluant la réactivité chimique dans le schéma mécanistique global**.

En outre, la présence de HONO dans l'atmosphère doit également être suivie avec attention, car **cet acide peut réagir avec des amines pour former des nitroamines dont les propriétés cancérigènes ont été démontrées**.

Ce projet, dénommé **SURFIN**, avait pour objectif de :

- **caractériser les sources et les puits d'acide nitreux** (HONO) ;
- **déterminer la fraction de OH produite par photolyse** de cette molécule.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Deux types d'expérimentation ont été conduits :

- des **expérimentations de laboratoire** qui ont permis de déterminer les vitesses de production de HONO dans des conditions représentatives des atmosphères intérieures et d'identifier les paramètres susceptibles d'influencer ces cinétiques ;

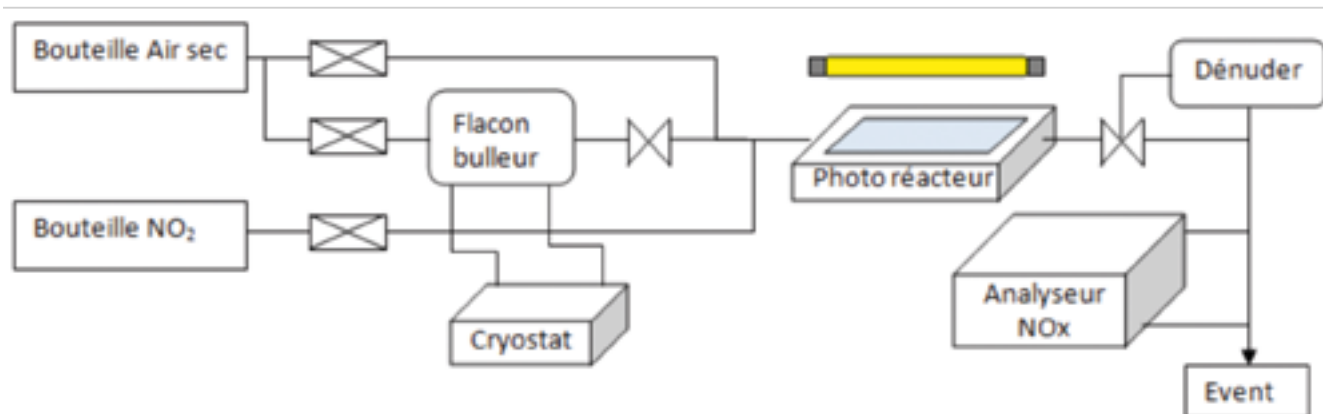


Figure 1 : Schéma de principe des dispositifs expérimentaux d'étude de la réactivité hétérogène de NO₂.

- des **expérimentations de terrain** qui ont permis de mesurer, pour la première fois dans une atmosphère intérieure, les taux de productions de OH.

Étude de laboratoire

En l'absence de données précises dans la littérature, l'objectif était de travailler avec des **surfaces de natures variées** afin de tester les différences d'efficacité de ces surfaces pour la production de HONO et de **tester l'influence des paramètres environnementaux** (luminosité, température, humidité...) sur les taux de production de HONO.

Différentes surfaces domestiques ont été étudiées : surfaces recouvertes d'un film de détergent alcalin ou acide, béton, peinture, vitres et vernis pour parquet.

Schématiquement, les dispositifs expérimentaux étaient constitués de quatre éléments (figure 1) :

- *un dispositif de production du gaz réactif* : le NO₂ gazeux est obtenu à partir d'une bouteille de NO₂ dilué dans un gaz inerte (azote ou hélium). Des concentrations variables de NO₂ sont obtenues en diluant le flux de NO₂ avec de l'air propre. Chacun des débits de gaz est contrôlé par un débitmètre à flux massique. Le flux de NO₂ résultant est injecté dans le photoréacteur *via* un injecteur mobile ;
- *un dispositif de production du gaz vecteur à humidité contrôlée* : un gaz vecteur (air synthétique) balaye en continu le photo-réacteur. Son rôle est à la fois de contrôler l'humidité dans le réacteur et d'éviter la rétrodiffusion du NO₂ en sortie d'injecteur. Le contrôle de l'humidité est obtenu en mélangeant à des taux variables un flux d'air sec avec un flux d'air proche de la saturation en eau. Chacun des débits (air sec et air proche de la saturation) est contrôlé par un débitmètre à flux massique et l'humidité relative résultante est mesurée par une sonde humidité/température en sortie de réacteur ;
- *un photoréacteur* : contenant la surface d'intérêt sur laquelle s'effectue la réaction hétérogène avec le NO₂ gazeux. Sa géométrie est variable selon la rigidité des matériaux à étudier (forme plate pour les matériaux rigides et forme cylindrique pour les films souples) ;
- *des détecteurs de suivi du signal* : l'état d'avancement de la réaction est suivi en couplant le réacteur à des analyseurs permettant une mesure en continu du gaz réactif (NO₂) ou des produits de réactions (NO et HONO).

Principaux résultats obtenus en laboratoire

Les mesures ont montré que **la réactivité hétérogène du dioxyde d'azote avec les diverses surfaces présentes en milieu domestique constitue une importante source d'acide nitreux** et que **cette réaction doit être photoactivée pour être efficace**.

D'autre part, **l'efficacité de production est variable d'une surface à l'autre**, mais les quantités de HONO produites sont du même ordre de grandeur que ce qui avait été observé sur des surfaces telles que les aérosols organiques ou les sols, lors des études précédentes dédiées aux atmosphères extérieures.

La très grande variété des surfaces domestiques ne permet pas d'utiliser ces résultats de laboratoire pour estimer la production de HONO à l'échelle d'une pièce. Par contre, ils montrent sans équivoque que **les surfaces et les intensités lumineuses disponibles dans les atmosphères intérieures jouent un rôle fondamental dans les mécanismes de production d'acide nitreux dans les environnements clos**.

Ce travail de laboratoire est une contribution significative à la compréhension de la chimie de HONO dans les atmosphères intérieures qui, outre son intérêt pour la connaissance fondamentale, a permis de concevoir et de calibrer des expérimentations de terrain réalisées dans une pièce réelle.

Étude de terrain

Préambule

Si l'étude d'une pièce meublée présente l'avantage du réalisme, il est cependant impossible de connaître la composition, le degré de propreté, l'importance relative de chaque nature de surface et, bien souvent, la nature exacte des surfaces présentes dans la pièce.

Les voies de production photolytiques de OH dans les environnements intérieurs ont jusqu'à ce jour été considérées comme négligeables en raison de l'atténuation de la lumière solaire par le passage au travers des vitres. L'hypothèse couramment admise est que l'ozonolyse des alcènes constitue la principale voie de production de OH. Ainsi, en 2007, Carslaw a estimé que l'ozonolyse des alcènes, dominés par les monoterpènes, représentait environ 90% de la production de OH dans les atmosphères domestiques alors que la photolyse de HONO ne représentait qu'un peu plus de 10%. Sur cette base, les modèles et les mesures indirectes de OH estiment que les concentrations en radicaux hydroxyle doivent être de l'ordre de 10^4 à 10^5 molécules.cm⁻³. Toutefois, ces mêmes travaux soulignent la nécessité de réaliser des mesures directes et locales de OH, car il pourrait exister une grande hétérogénéité des concentrations de OH au sein d'une même pièce en raison de la très forte réactivité de cette espèce chimique et de la faible turbulence dans des atmosphères intérieures.

Dispositif d'étude

Pour la première fois, une mesure *in situ* des concentrations de radicaux OH a été réalisée. Ce travail a été effectué dans une salle de classe en milieu urbain et a mobilisé de très nombreux équipements* pendant deux semaines, non seulement pour mesurer les radicaux OH mais aussi pour **caractériser et suivre en temps réel l'évolution chimique de l'atmosphère de la pièce** d'étude. Les principaux paramètres mesurés étaient : l'irradiation, l'humidité relative et les concentrations en Composé Organiques Volatils (COV), NO_x, HONO et OH.

Compte tenu de la très forte réactivité des espèces d'intérêt, les mesures ont été effectuées en ligne avec des pas de temps compris entre 1 et 15 minutes selon le composé considéré. Afin que les équipements ne perturbent pas les conditions chimiques et photochimiques de la salle d'expé-

rience, les analyseurs ont été installés dans la pièce voisine et seules les têtes et les cannes de prélèvement étaient présentes dans la salle d'expérience.

* Principaux instruments :

- un analyseur d'ozone : une mesure par minute, méthode absorption UV, limites de détection de l'ordre de 1 ppb ;
- un analyseur de NO_x : une analyse par minute, chimiluminescence et conversion catalytique ;
- un analyseur d'acide nitreux (NITROMAC) : une analyse toutes les 10 minutes, piégeage de HONO dans une matrice aqueuse puis dérivation avec une solution de sulfanilamide/ N-(1-naphthyl)-éthylènediamine (Afif, 2008), analyse du produit de réaction par HPLC (Chromatographie en phase liquide à haute performance) couplée à un détecteur UV à 540 nm ;
- un analyseur LIF-FAGE (Fluorescence Induite par Laser - Fluorescence Assay by Gas Expansion) pour suivre en continu les radicaux hydroxyle (OH) et hydroperoxyde (HO₂) : une analyse par minute, limite de détection de l'ordre de 10^5 moles.cm⁻³, fluorescence induite par laser sur OH collecté à 308 nm à basse pression (1,5 Torr) ;
- un spectromètre de masse à temps de vol avec ionisation par transfert de proton (PTR-MS-ToF) pour suivre en ligne les Composés Organiques Volatils (COV) : résolution de l'ordre de la minute ;
- un spectroradiomètre (LICOR) pour mesurer le flux solaire ;
- des sondes de mesure de température et d'humidité relative (humidité contrôlée et température libre).

Principaux résultats sur le terrain

Des **pics de concentration en radicaux OH** ont **localement** été mesurés jusqu'à $1,8 \cdot 10^6$ molécules.cm⁻³, soit un ordre de grandeur **au-dessus de ce que prévoient les modèles** ou les mesures indirectes pour des concentrations moyennes à l'échelle de la pièce. Ce **niveau de concentration est équivalent à ce qui peut être observé à l'extérieur**, dans des atmosphères urbaines. **Ce résultat inattendu modifie la vision et l'approche de la qualité de l'air intérieur.** Jusqu'à ce jour, on considérait les atmosphères intérieures comme des milieux plutôt inertes où la réactivité chimique était négligeable. Les concentrations des espèces chimiques évoluent en fonction de l'équilibre entre les sources primaires et un puits unique constitué par le taux de renouvellement de l'air. Les fortes concentrations de radicaux OH observées lors de cette étude obligent à considérer que **la réactivité chimique peut modifier significativement la composition de l'air dans les atmosphères intérieures, dès lors qu'une part significative de la pièce est irradiée par le soleil.**

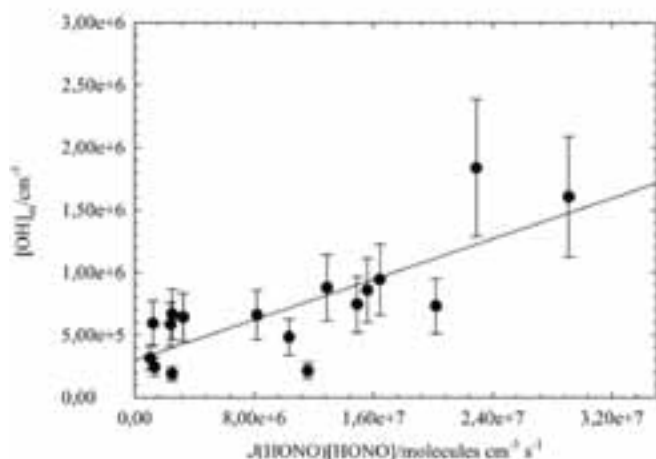


Figure 2 : Concentration de radicaux OH mesurée en fonction de la fréquence de photolyse de HONO ($[OH]_m = 0.04 J[HONO] \cdot [HONO]$; $r^2 = 0.62$).

De plus, ces travaux ont montré qu'il existe une relation linéaire entre les concentrations de OH et la photolyse de HONO (figure 2). Dans les conditions expérimentales, caractérisées par de fortes concentrations en oxydes d'azote (quelques dizaines de ppbv) représentatives de pièces possédant une source de NO_2 (cuisinière, chauffe-eau, cheminée, bougie...), **la photolyse de l'acide nitreux est donc la principale source de OH.**

Les résultats sont présentés dans la figure 2. Les données utilisées correspondent aux concentrations mesurées systématiquement tous les jours de la campagne à 18h21 et 18h41. Les barres d'erreur représentent l'incertitude analytique et la principale incertitude sur la détermination de OH qui provient de la calibration de l'instrument peut être estimée à 30%.

L'importance de la photolyse de HONO pour la production de OH a été confirmée et quantifiée en comparant les concentrations mesurées de OH avec les concentrations de OH calculées à l'aide d'un modèle quasi photostationnaire (PSS). Les résultats de ce travail sont présentés sur la figure 3 et montrent que l'ozonolyse des alcènes est une source secondaire de OH.

ENSEIGNEMENTS DU PROJET

Les expérimentations de terrain ont clairement montré que les concentrations de OH mesurées étaient des valeurs ponctuelles très sensibles au niveau d'irradiation. Quel serait, à l'échelle d'une pièce, le niveau de concentration de OH et quelle serait sa sensibilité aux modifications d'ensoleillement ? **Ce sont là des questions auxquelles le projet n'a pas pu répondre et des études complémentaires pourraient être conduites dans ce but.**

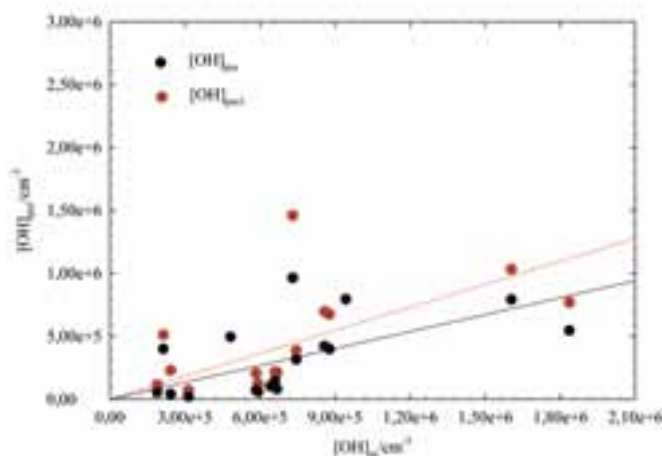


Figure 3 : Concentrations théoriques de OH calculées avec un modèle photostationnaire en fonction des concentrations mesurées de OH.

$[OH]_{pss}$, modèle prédictif des concentrations de OH considérant la photolyse de HONO comme seule source de OH. $[OH]_{pssI}$, modèle prédictif des concentrations de OH considérant la photolyse de HONO et l'ozonolyse des alcènes comme source de OH.

$$[OH]_{pss} = 0.44 [OH]_m; r^2 = 0.4$$

$$[OH]_{pssI} = 0.61 [OH]_m; r^2 = 0.4$$

Quelques éléments permettent d'orienter ces prochaines recherches. Ainsi, des mesures du spectre solaire ont été réalisées un même jour dans différentes pièces équipées de vitrage simple ou double. Aucune différence notable du spectre n'a été observée quelle que soit la longueur d'onde considérée. **Il ne semble donc pas nécessaire de reconsidérer les conclusions de ce travail en cas de fenêtres équipées de double ou triple vitrage.**

Par ailleurs, de nombreuses qualités de verre permettant de filtrer la lumière sont aujourd'hui disponibles. Aucun test n'a été conduit dans le cadre de ce projet avec ce type de matériau mais on peut déjà exclure tous les verres destinés à filtrer les infrarouges peu énergétiques et donc photochimiquement inactifs pour les réactions d'intérêt. **On pourrait donc se concentrer sur les vitrages filtrant les UV.**

Au final, l'ensemble des résultats modifie fondamentalement la vision des atmosphères intérieures, car les fortes concentrations de OH mesurées dans les zones irradiées par le soleil peuvent initier une chimie dans les atmosphères intérieures.

D'autres questions restent en suspens et il conviendrait d'y répondre pour mieux évaluer l'importance de la réactivité chimique dans les atmosphères intérieures :

- en premier lieu, les résultats ont été obtenus en début d'été alors que la position zénithale du soleil ne lui permettait de pénétrer dans la pièce qu'en fin de journée. Or, les expérimentations en laboratoire ont clairement montré l'influence de l'intensité lumineuse sur la production de HONO. Dans ces conditions, **on peut s'interroger sur les niveaux**

de concentration qu'il serait possible d'atteindre au printemps ou à l'automne lorsque le soleil rentre dans les bâtiments aux heures d'intensités lumineuses maximales ;

- par ailleurs, la question est posée de savoir si **les lumières artificielles ont des spectres d'émission et des intensités lumineuses compatibles avec la production hétérogène de HONO et avec sa photolyse ?**

VALORISATION

Participation à des congrès

Gligorovski S., Gómez Alvarez E., Amedro D., Afif C., Schœmacker C., Fittschen C., Doussin J-F., Wortham H. "Photolysis of nitrous acid as a source of hydroxyl radicals indoors", *3rd Sino-French Joint Workshop on Atmospheric Environment*, 23-27 September, 2012 (Oral).

Gligorovski S., Gómez Alvarez E., Sörgel M., Bartolomei V., Zetzsch C., Amedro D., Schœmacker C., Doussin J-F., Afif C., Wortham H. "Light-induced NO₂ heterogeneous reactions: How they affect the balance of nitrous acid indoors" *Photo-PAQ symposium*, Ajaccio, 14-17 mai 2012 (Oral).

Gómez Alvarez E., Sörgel M., Bassil S., Zetzsch C., Gligorovski S. and Wortham H. "Light-induced heterogeneous reactions of NO₂ on indoor surfaces: How they affect the balance of nitrous acid", *AGU fall meeting*, San Francisco, California, USA, 5-9 décembre 2011 (Oral).

Bartolomei V., Gomez Alvarez E., Gligorovski S. and Wortham H. "Light induced heterogeneous reactions of gas-phase NO₂ on lacquer and paint surfaces indoors" *Congrès annuel de cinétique et de photochimie en phase gazeuse*, Bordeaux (France), 4-5 juin 2012 (Oral).

Bartolomei V., Sörgel M., Gligorovski S., Gómez Alvarez E., Zetzsch C. and Wortham H. "Photoenhanced uptakes of NO₂ by indoor surfaces: A new HONO source" *AGU fall meeting*, San Francisco, CA, USA, 3-7 Dec 2012 (Oral).

Gómez Alvarez, E., Amedro, D., Afif, C., Gligorovski, S., Schœmacker, C., Fittschen, C., Doussin, J-F., Wortham, H. "Photolysis of nitrous acid as a primary source of OH radicals indoors" *AGU fall meeting*, San Francisco, California, USA, 9-13 December, 2013 (Oral).

Publications

E. Gómez Alvarez, D. Amedro, C. Afif, S. Gligorovski, C. Schœmacker, C. Fittschen, J.F. Doussin, H. Wortham. "Unexpectedly high indoor hydroxyl radical concentrations associated with nitrous acid" *PNAS*, Vol 110, n° 33, 13294-13299, 2013.

E. Gómez Alvarez, M. Sörgel, S. Gligorovski, S. Bassil, V. Bartolomei, C. Zetzsch, and H. Wortham. "Light-induced NO₂ heterogeneous reactions on household surfaces as a source of nitrous acid" En révision dans *Environmental Science and Technology*.

V. Bartolomei, M. Sörgel, S. Gligorovski, E. Gómez Alvarez, R. Strekowski, E. Quivet, B. Coulomb, A. Held, C. Zetzsch, H. Wortham. "Light enhanced nitrous acid (HONO) formation in indoor environments" En révision dans *Indoor Air*.

Quels moyens de mesure pour caractériser la qualité de l'air intérieur ?

La pollution contemporaine n'est généralement pas facilement perceptible par les sens humains avant que ne surviennent ses premiers effets sanitaires délétères. Cela est spécialement vrai pour la pollution de l'air intérieur, surtout appréhendée par des moyens métrologiques : des appareils de mesure et/ou de prélèvement de complexité variable mesurent diverses concentrations. Ces chiffres sont bien sûr indispensables pour communiquer sur cette pollution, alerter, rassurer, et étudier... mais ils sont aussi la pierre angulaire de toutes les démarches de prévention ou de réglementation lorsqu'une situation n'est plus acceptable sanitaire.

Historiquement, de nombreux pays, dont la France, ont d'abord consacré d'importants efforts à la pollution de l'air extérieur, en équipant les villes de réseaux de mesure atmosphérique performants, aujourd'hui matures. L'étude de la pollution de l'air intérieur de nos établissements recevant du public, de nos transports, de nos logements est bien plus récente et présente un champ d'investigations très ouvert : comment la mesurer simplement ? à faible coût ? précisément ? régulièrement ? etc. Un formidable terrain de jeu penseront avec moi les métrologues, ingénieurs et autres scientifiques qui consacrent leur travaux à améliorer ces méthodes de mesure !

Les deux travaux présentés dans cette session s'inscrivent dans cette perspective. Ils apportent une pierre à l'édifice encore en construction d'une boîte à outils universelle, permettant à chacun de connaître la qualité de son air intérieur.

Le premier travail de recherche traite du développement d'un analyseur en continu de formaldéhyde, une molécule régulièrement mise sous les feux de la rampe. L'absence de moyen de mesure en continu facilement accessible à ce jour est un frein à la répétition des mesures dans le temps qui permettrait pourtant de mieux comprendre, et donc prévenir, les phénomènes conduisant à l'émission de ce polluant dans l'air intérieur. Cet analyseur représente donc une réelle attente des opérateurs de terrain.

Le second travail de recherche s'intéresse à une forme de pollution encore plus récente : la pollution nichée dans les poussières sédimentées des habitats, caractéristique de molécules peu volatiles, pesticides ou plastifiants par exemple. En analysant précisément les conditions dans lesquelles les poussières peuvent être stockées avant analyse au laboratoire, ce travail indispensable ouvre la voie à la réalisation d'études de grande ampleur pour mieux comprendre cette forme de pollution de l'air intérieur.

Jean-Ulrich MULLOT,
Pharmacien au Laboratoire d'analyses, de surveillance et d'expertises de la Marine de Toulon
et membre du Conseil scientifique de PRIMEQUAL

Mesure du formaldéhyde dans l'air : développement d'un analyseur en continu, transportable et automatisé

Responsable scientifique :

Stéphane LE CALVÉ
Institut de Chimie et Procédés pour l'Énergie,
l'Environnement et la Santé (ICPEES)
UMR 7515 (CNRS/UdS)
1, rue Blessig
67084 Strasbourg
slecalve@unistra.fr

Équipes et chercheurs impliqués :

ICPEES (UMR 7515, CNRS/UdS) : Stéphane Le Calvé, Pierre Bernhardt, Wuyin Zheng, Maud Guglielmino, Stéphanette Englaro, Stéphanie Becker, Marine Brogat, Mélanie Emo.

Mots clés : Formaldéhyde, analyseur automatique, air intérieur, mesures continues

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Parmi les composés volatils, **le formaldéhyde (HCHO) est l'un des polluants le plus fréquent de l'air intérieur, avec des impacts avérés sur la santé humaine** (reconnu comme cancérigène de classe 1 par l'OMS en 2004). **Ses concentrations dans l'air intérieur sont 2 à 15 fois plus élevées qu'à l'extérieur** et varient typiquement entre 10 et 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Il est à ce titre classé parmi les 7 substances hautement prioritaires (groupe A) par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) depuis 2005.

Le formaldéhyde provient notamment des matériaux de construction, des meubles et des combustions. Depuis la prise de conscience des pouvoirs publics des enjeux sanitaires associés, des **réglementations se mettent en place** sur :

- **les émissions de formaldéhyde provenant des matériaux de construction** (étiquetage obligatoire à partir de 2011) ;
- **les concentrations dans les lieux publics d'ici 2015** tels que les écoles et les crèches (suivi obligatoire à partir de 2015).

Pour répondre à ces nouveaux besoins normatifs, **un outil performant de mesure des concentrations** ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

et des taux d'émissions des matériaux ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) était devenu indispensable.

Jusqu'alors, la méthode de référence pour l'analyse du formaldéhyde dans l'air est l'HPLC/UV (chromatographie en phase liquide à haute performance avec Détecteur à absorption UV) après dérivation par la DNPH (dinitrophénylhydrazine), qui ne permet :

- ni le suivi temporel de la concentration de formaldéhyde, car les temps de prélèvement (actifs ou passifs) sont trop longs, typiquement de 30 minutes à plusieurs heures ;
- ni une mesure instantanée sur site avec obtention des résultats immédiatement, car elle nécessite une analyse en laboratoire chromatographique *a posteriori*.

Des recherches antérieures avaient permis la mise au point d'un prototype de laboratoire et une méthodologie originale permettant d'analyser le formaldéhyde dans l'air avec des bonnes performances, notamment avec une résolution temporelle de quelques minutes (6 minutes environ) et une sensibilité permettant de détecter des concentrations de formaldéhyde inférieures à 0,1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Cette technologie innovante a d'ailleurs fait l'objet d'un dépôt de brevet français par le CNRS en 2009 (étendu à l'international depuis).

Le présent projet visait à réaliser un prototype transportable (à visée industrielle), sur la base du prototype de laboratoire, **en réduisant le coût, l'encombrement et le poids**, qui apparaissent comme des critères prépondérants pour les utilisateurs sur le terrain.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Le principe de cet analyseur de formaldéhyde repose sur la réaction* du formaldéhyde avec un agent dérivatif sélectif (fluoral-P) pour former une espèce fluorescente facilement analysable, le 3,5-diacétyl-1,4-dihydrolutidine (DDL).

* Les résultats obtenus confirment l'absence d'interférence entre les autres aldéhydes et le fluoral-P, car en solution, même à des concentrations 10 fois supérieures à celle du formaldéhyde, le signal de fluorescence n'est pas modifié.



Figure 1 : Prototype de 2^e génération de l'analyseur. Le prototype est transportable (env. 8 kg) et a une dimension de 28,5 x 23 x 38 cm (soit environ la taille d'une imprimante).

L'analyseur mesure les concentrations de formaldéhyde selon 3 étapes fortement couplées entre elles :

1. le **piégeage** du formaldéhyde gazeux en solution ;
2. la **dérivation sélective** du formaldéhyde par réaction avec le fluor-al-P ;
3. l'**analyse par spectroscopie** de fluorescence du produit de la réaction.

Au cours de ce projet, **deux prototypes automatiques portables de 2^e génération ont été réalisés** au LMSPC (figure 1).

L'ensemble de cette méthode analytique a fait l'objet d'un brevet français publié en décembre 2010 avant d'être étendu à l'international en juin 2012.

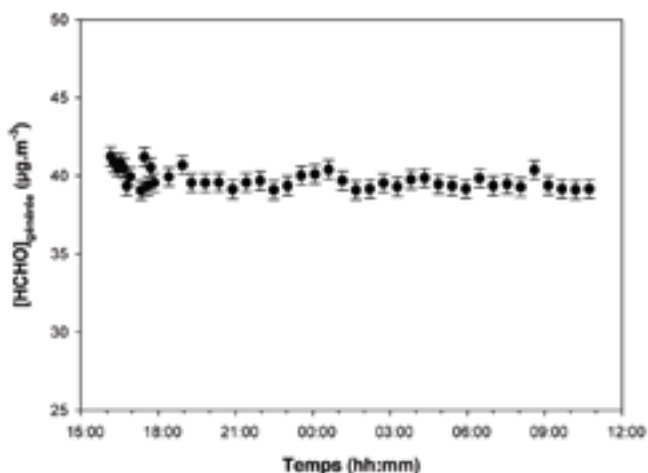


Figure 2 : Stabilité de la source portable en fonction du temps, sur une durée de 19 heures, pour une concentration proche de 40 µg.m⁻³.

Développement réalisé dans des conditions contrôlées de laboratoire

Afin de bien évaluer les performances de l'analyseur en phase gazeuse, il a fallu **développer une source portable calibrée* de formaldéhyde gazeux régulée en température**, dont la calibration a été réalisée par piégeage sur des cartouches de DNPH puis analyse par HPLC/UV.

* Cette source, qui permettait de générer des concentrations variant entre 2 et plus de 450 µg.m⁻³, s'est révélée non seulement extrêmement stable dans le temps, mais également, une fois elle-même calibrée, très efficace pour la calibration de l'analyseur avec plusieurs concentrations gazeuses différentes (soit en 2 heures environ).

Le pilotage des paramètres de l'analyseur (gain, temps et débit de prélèvement, etc.) et de la source de formaldéhyde (température, débit) est assuré par un seul et même logiciel développé à l'ICPEES (sous Windows). Il permet en outre l'intégration automatique des pics de fluorescence et le calcul automatique de la concentration de formaldéhyde à partir d'une calibration préalable. Ces valeurs sont affichées à l'écran du PC dès l'intégration terminée.

La réponse de l'analyseur s'est avérée linéaire entre 2 et 450 µg.m⁻³, mais nécessite une modification du gain du détecteur entre les plus faibles concentrations et les plus élevées. Avec le prototype, **la limite de quantification du formaldéhyde en phase gazeuse obtenue est de l'ordre de 0,1 µg.m⁻³** avec un rapport signal/bruit de 10 pour un temps de prélèvement de 2 min. **Dans ces conditions, la résolution temporelle résultante est de l'ordre de 6 min.**

Le couplage de l'analyseur à la source portable de formaldéhyde (qui génère une concentration de formaldéhyde égale à 32, 40 ou 60 µg.m⁻³ sur la durée de l'expérience) a permis

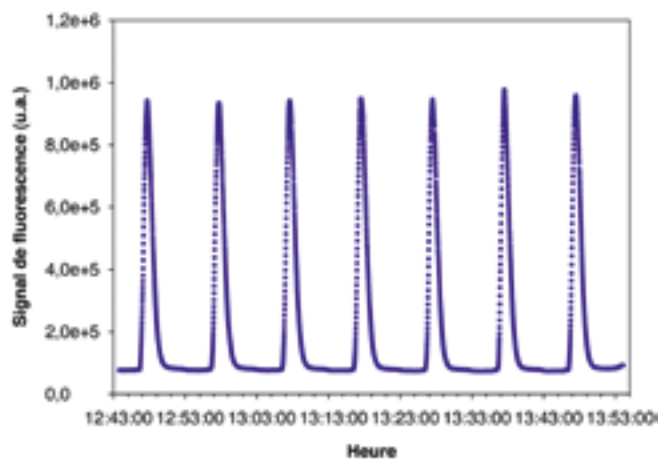


Figure 3 : Signal de fluorescence obtenu pour une concentration de formaldéhyde gazeux égale à 60 µg.m⁻³ générée à partir de notre source de formaldéhyde gazeux.

de tester les **répétabilité et reproductibilité de la mesure (figures 2 et 3)**. L'une comme l'autre ont été **excellentes** puisque les déviations relatives standard sont sensiblement inférieures à 5% dans les deux cas.

L'abaissement du débit de prélèvement de 1 300 à 300 mL.min⁻¹ a permis d'obtenir un rendement de piégeage du formaldéhyde proche de 100% **ce qui permet d'entrevoir la possibilité de s'affranchir à terme d'une source gazeuse extérieure de calibration, du moins sur le terrain**, car celle-ci nécessite d'être alimentée avec de l'air synthétique. Dès lors, une recalibration de la fluorescence à partir d'une solution liquide de formaldéhyde serait envisageable et faciliterait l'utilisation de l'analyseur sur le terrain. La source de formaldéhyde gazeuse calibrée reste néanmoins très précieuse pour la recalibration au laboratoire. Avec ce nouveau débit de prélèvement, la limite de quantification reste égale à 0.1 µg.m⁻³ pour un temps de prélèvement de 4 min, ce qui induit **un pas de temps minimum de 8 min ramené pour raison de commodité à 10 minutes en pratique**.

La comparaison avec les autres techniques d'analyse du formaldéhyde disponibles met en évidence les performances de l'analyseur développé, en termes de précision, répétabilité, reproductibilité et sensibilité.

Mise en application de l'analyseur de formaldéhyde sur des échantillons d'air ambiant

Une fois les conditions analytiques optimisées, l'analyseur a été comparé avec le modèle commercialisé par Aerolaser, en la possession d'ICARE (Institut de Combustion Aérothermique Réactivité et Environnement, CNRS, Orléans). **La comparaison a mis en exergue une excellente**

corrélation entre toutes les mesures, validant de fait l'analyseur de formaldéhyde (figure 4).

Puis, le nouvel analyseur de formaldéhyde a été testé en air intérieur et extérieur pour la mesure des concentrations ambiantes (en µg.m⁻³). Il a également été couplé avec une cellule d'émission FLEC® afin de mesurer le taux d'émission en formaldéhyde de certains matériaux (µg.m⁻².h⁻¹)*.

** L'analyseur de formaldéhyde a permis notamment d'identifier, en quelques heures, la source de formaldéhyde dans une école du Haut-Rhin (en partenariat avec l'ASPA) où des concentrations anormalement élevées en HCHO avaient été détectées depuis 8 ans (environ 300 µg.m⁻³). Outre la spatialisation de la concentration de formaldéhyde entre les différentes pièces de l'école, l'analyseur a permis une identification rapide de la source en mode « renifleur » qui a été confirmée par des mesures de taux d'émission des différents matériaux suspectés en couplant l'analyseur avec une cellule d'émission de type FLEC® (Field and Laboratory Emission Cell). Les mesures des concentrations ambiantes étaient cohérentes avec celles mesurées par la méthode de référence, à savoir des prélèvements actifs sur des cartouches de DNPH.*

Pour valider le couplage de l'analyseur de formaldéhyde avec une cellule d'émission de type FLEC®, des mesures ont été entreprises au laboratoire pour **déterminer le taux d'émission de certains matériaux de construction** en relation avec les nouvelles réglementations d'étiquetage des matériaux de construction et d'ameublement. La concentration de formaldéhyde a été mesurée en sortie de cellule toutes les 10 min à partir de l'analyseur, ce qui permettait la détermination du taux d'émission. Il en résulte que **les courbes de décroissance du taux d'émission en fonction du temps sont exponentielles et tendent vers une valeur quasiment constante après 24 heures** (figure 5) : ceci laisse supposer

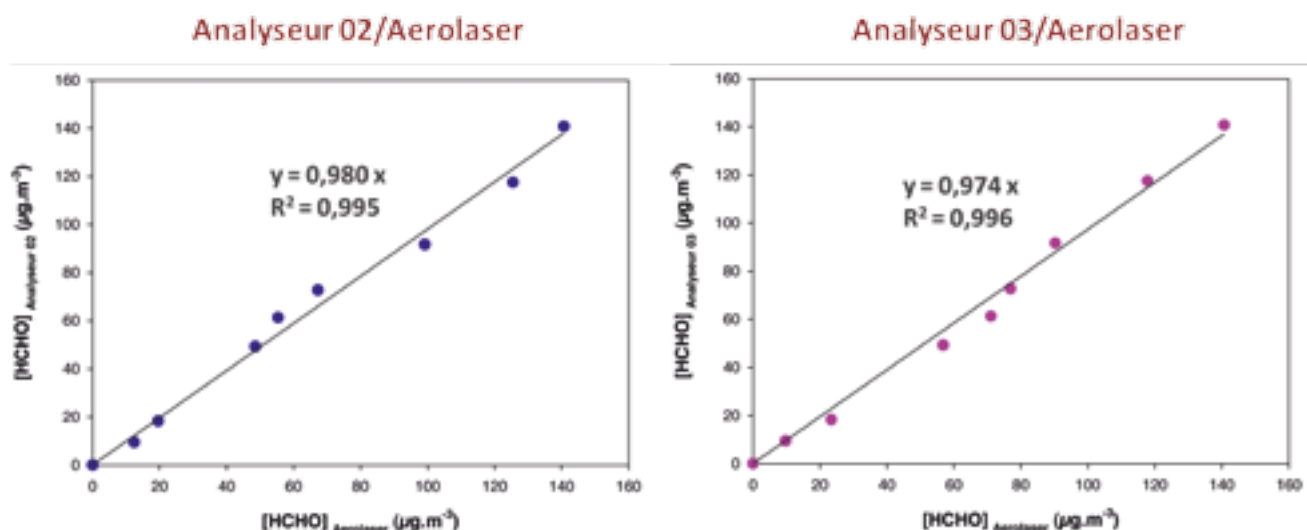


Figure 4 : Concentrations de formaldéhyde mesurées avec les analyseurs 02 ou 03 de l'ICPEES en fonction des concentrations mesurées avec l'analyseur AL-4021 d'Aerolaser.

que les taux d'émission extrapolés à 3 et 28 jours seraient de fait en dessous de cette valeur. **Dans le cas où cette valeur après 24 heures satisfait d'ores et déjà aux valeurs limites fixées par la législation, une mesure de ce type pourrait être suffisante pour l'étiquetage et permettrait un gain de temps précieux.** Encore une fois, les mesures des taux d'émissions avec des cartouches de DNPH, réalisées en fin d'expérience quand les émissions sont stables, montrent un excellent accord avec les résultats obtenus avec l'analyseur.

Une **campagne en air extérieur**, réalisée en région parisienne sur une période de 12 jours au cours desquels les concentrations de formaldéhyde n'ont pas dépassé $7 \mu\text{g.m}^{-3}$, a montré que **le prototype était capable non seulement de mesurer des variations très faibles de la concentration de formaldéhyde mais encore de fonctionner en continu sur cette durée.** Ces variations des concentrations de formaldéhyde sont corrélées avec l'ozone (polluant photochimique) ainsi qu'avec les radicaux OH (principaux oxydants atmosphériques). La corrélation avec de brefs pics de polluants primaires en début de matinée suggère la présence d'une inversion de température éphémère, phénomène très fréquent. L'augmentation de la concentration de HCHO corrélée à celles de tous les autres polluants a été observée lorsque le vent est passé en régime de nord-est, le site de mesure étant directement impacté par les émissions primaires de Paris.

L'expérience acquise sur ces cas concrets montre qu'**en pratique, les nombreux paramètres de l'analyseur de formaldéhyde (gain du détecteur, temps de prélèvement, débit du prélèvement, etc.) permettent de s'adapter aux concentrations ambiantes.** À faibles

concentrations comme dans l'air extérieur ($1 \text{ à } 10 \mu\text{g.m}^{-3}$), un volume d'air de 1,2 L prélevé à 300 mL.min^{-1} est préconisé ce qui permet de réaliser confortablement une mesure toutes les 10 minutes. À l'inverse, à de fortes concentrations, en milieu professionnel ou très pollué ($> 100 \mu\text{g.m}^{-3}$), le volume d'air prélevé peut être réduit à 400 mL (soit 200 mL.min^{-1} pendant 2 min ou 100 mL.min^{-1} pendant 4 min). Pour les concentrations intermédiaires, les conditions de prélèvement de l'air extérieur sont applicables, ce qui induit une légère baisse du gain du détecteur (1 mesure toutes les 10 min), mais il est possible également de privilégier la résolution temporelle en réalisant une mesure toutes les 6 min avec un prélèvement de 300 mL.min^{-1} pendant 2 minutes.

En conclusion, la légèreté, la calibration aisée et un logiciel performant font de ce prototype un analyseur de formaldéhyde polyvalent très pratique d'utilisation, même s'il se destine encore aujourd'hui à des « spécialistes ». Les objectifs du projet ont été entièrement atteints en termes de sensibilité, de transportabilité et d'automatisation.

ENSEIGNEMENTS DU PROJET

Ce développement technologique a été valorisé par un **brevet déposé par le CNRS en France puis étendu à l'international.**

Ces avancées technologiques ont également mené à la **création d'une start-up** qui a reçu trois prix distinctifs (voir liste ci-dessus). Cette start-up développera, intégrera et

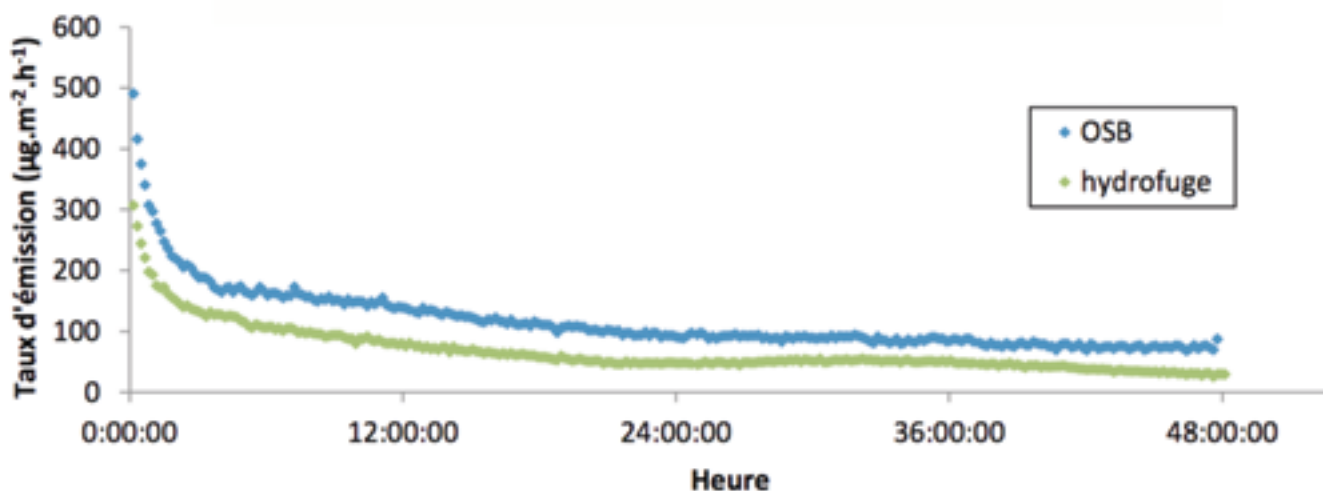


Figure 5: Évolution du taux d'émission de HCHO en fonction du temps pour la cellule d'émission pour deux matériaux, Bois OSB et matériau hydrofuge. Débit d'air dans la cellule: 800 mL.min^{-1} .

commercialisera des microanalyseurs de polluants d'intérêt pour la qualité de l'air intérieur et notamment un microanalyseur de formaldéhyde.

Forte de son expérience acquise dans ce projet, **l'équipe de physicochimie de l'atmosphère a récemment développé un nouveau microanalyseur de formaldéhyde dont l'autonomie en réactif et la portabilité sont accrues**. Le système de piégeage est novateur et permet de s'affranchir des problèmes liés aux conditions environnementales (Température et Humidité Relative). Ces travaux font également l'objet d'un **dépôt de brevet** par le CNRS.

VALORISATION

D'évidentes raisons de propriété industrielle ont empêché une valorisation « classique » de ce travail de recherche, en particulier les publications dans des revues scientifiques. Néanmoins, ces travaux ont fait l'objet de nombreuses présentations orales ou affichées, et de plusieurs parutions dans les médias (ARTE, Alsace TV, Dernières Nouvelles d'Alsace).

Thèses, rapports de stage

M. Emo, *Développement, optimisation et validation d'une méthode analytique permettant de doser le formaldéhyde dans l'air*, Stage de Master Sciences Analytiques, École de Chimie, Polymères et Matériaux de Strasbourg, Université de Strasbourg, septembre 2009.

S. Becker, *Miniaturisation et optimisation d'un analyseur portable automatique de formaldéhyde dans l'air*. Stage d'IUT de mesures physiques, Strasbourg, juin 2010.

M. Brogat, *Développement d'un analyseur rapide et transportable du formaldéhyde dans l'air*, Stage de Master Sciences Analytiques, École de Chimie, Polymères et Matériaux de Strasbourg, Université de Strasbourg, septembre 2010.

W. Zheng, *Développement d'un analyseur rapide et transportable du formaldéhyde dans l'air*, Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 21 octobre 2010.

M. Cloud, *Conception et réalisation d'une cellule d'émission standardisée et couplage avec un analyseur de formaldéhyde: applications aux émissions de matériaux*. Stage d'IUT de mesures physiques, Strasbourg, juin 2011.

M. Guglielmino, *Mesures de formaldéhyde en air intérieur et extérieur*, Stage de Master Sciences Analytiques, École de Chimie, Polymères et Matériaux de Strasbourg, Université de Strasbourg, septembre 2011.

Communications orales ou affichées

S. Le Calvé, W. Zheng, J.-L. Ponche, P. Bernhardt, M. Emo, M. Brogat, W. Mellouki, V. Daële, *Analyseur du formaldéhyde dans l'air - Réalisation d'un prototype transportable automatisé et piloté*, PRIMEQUAL 2, Paris, 19-20 mai 2010 (présentation orale).

W. Zheng, M. Brogat, M. Emo, P. Bernhardt, S. Le Calvé, *Développement d'un analyseur de formaldéhyde, Réunion de cinétique et photochimie*, Wimereux, 9-10 juin 2010 (présentation orale).

S. Le Calvé, W. Zheng, J.-L. Ponche, P. Bernhardt, M. Emo, M. Brogat, *Développement d'un analyseur automatique du formaldéhyde dans l'air : application au diagnostic dans l'air intérieur, Pôle Fibres, Techno-dating, « Matériaux : Quel impact sur notre santé ? Quelles solutions ? »* Strasbourg, octobre 2010 (présentation orale).

S. Le Calvé, N. Blond, *Qualité de l'air et pollution atmosphérique*, Institut de Recherche sur l'Environnement du Rhin Supérieur, Karlsruhe, 19 novembre 2010 (présentation orale).

W. Zheng, M. Emo, M. Brogat, P. Bernhardt, J.-L. Ponche, S. Le Calvé, *Development of a rapid and portable analyzer of gaseous formaldehyde*, 2nd Sino-French Joint Workshop on Atmospheric Environment, Orléans, 6-9 décembre 2010 (présentation orale).

S. Le Calvé, M. Guglielmino, P. Bernhardt, S. Englaro, *Développement d'un analyseur de formaldéhyde : validation au laboratoire et applications*, Séminaire à l'INRS, Nancy, 15 mars 2012 (présentation orale).

S. Le Calvé, M. Guglielmino, P. Bernhardt, S. Englaro, *Développement d'un analyseur de formaldéhyde: validation au laboratoire et applications sur le terrain*, Séminaire avec EXERA, Paris, 5 juin 2012 (présentation orale).

S. Le Calvé, M. Guglielmino, P. Bernhardt, S. Englaro, *Développement d'un analyseur de formaldéhyde : validation au laboratoire et applications sur le terrain*, Séminaire au CETIM-CERMAT, Mulhouse, 25 juin 2012 (présentation orale).

M. Guglielmino, A. Allouch, P. Bernhardt, C. A. Serra, S. Le Calvé, *Development of a Formaldehyde Microanalyzer Devoted for Air Measurements*, GDR Microfluidique, Agay (France), 15-22 septembre 2012 (présentation affichée).

M. Guglielmino, A. Allouch, P. Bernhardt, C. A. Serra, S. Le Calvé, *Development of a Formaldehyde Microanalyzer Devoted for Air Measurements*, Symposium Environmental Sensors, Anglet (France), 23-28 septembre 2012 (présentation affichée).



Publications, brevets

S. Le Calvé, W. Zheng, J.-L. Ponche, P. Bernhardt, *Dispositif et procédé de détermination de la concentration d'un composé dans une phase aqueuse ou gazeuse*, brevet français FR2946751, publié le 17 décembre 2010.

S. Le Calvé, W. Zheng, J.-L. Ponche, P. Bernhardt, *Device and method for determining the concentration of a compound in an aqueous or gaseous phase*, french patent 20120149122, publié le 14 juin 2012.

Valorisations dans les médias

S. Le Calvé, « L'Alsace se donne de l'air » (1^{re} page de l'édition de Strasbourg), « L'Alsace/Plusieurs projets prometteurs en Alsace : "Des avancées dans l'air du temps" », *Dernières Nouvelles d'Alsace*, édition du 7 juin 2012.

S. Le Calvé, *Pollution de l'air intérieur : sources de formaldéhyde, impacts sanitaires et présentation d'un nouvel analyseur pour le mesurer*, Alsace 20 (TV), reportage de 8 min environ dans l'émission « LAB 20 », émission du 25 juin 2012.

S. Le Calvé et al., *Pollution de l'air intérieur : sources, étiquetages des matériaux, etc.*, ARTE (TV), reportage de 2 min environ dans l'émission « Xenius : l'air de nos maisons », émission du 2 août 2012.

Prix et récompenses

Lauréat du 13^e (2011) Concours National d'Aide à la Création d'Entreprises et Technologies Innovantes dans la catégorie « Émergence » pour le projet IN'AIR SOLUTIONS qui porte sur : « Développement et fabrication d'instruments permettant la mesure de polluants de l'air intérieur ». Porteur de projet : S. Le Calvé.

Prix « Région Alsace 2011 » de 20 000 € pour soutenir le projet IN'AIR SOLUTIONS. Porteur de projet : S. Le Calvé.

Lauréat du 15^e (2013) Concours National d'Aide à la Création d'Entreprises et Technologies Innovantes dans la catégorie « Création développement » pour le projet IN'AIR SOLUTIONS qui porte sur : « Développement et fabrication d'instruments permettant la mesure de polluants de l'air intérieur ». Porteur de projet : S. Englaro.

Mesure des composés organiques semi-volatils dans les poussières sédimentées de l'habitat et conditions de conservation des échantillons avant analyse

Responsable scientifique :

Philippe GLORENNEC
 École des hautes études en santé publique (EHESP)
 Institut de Recherche sur la Santé, l'Environnement et le Travail (IRSET), UMR Inserm I085
 Avenue du Pr Léon Bernard
 35043 Rennes Cedex
philippe.glorennec@ehesp.fr

Équipes et chercheurs impliqués :

École des hautes études en santé publique, Institut de Recherche sur la Santé, l'Environnement et le Travail : Fabien Mercier*, Olivier Blanchard, Barbara Le Bot*, Philippe Glorennec

* Laboratoire d'étude et recherche en environnement et santé, LERES.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment : Corinne Mandin, Olivier Ramalho. Division Expologie des environnements intérieurs – OQAI

Mots clefs : composés organiques semi-volatils, GC/MS/MS, développement analytique, conservation échantillon, poussière déposée

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre plus global du projet **ECOS-Habitat** : « Expositions Cumulées aux Composés Organiques Semi-volatils (COSV) dans l'habitat » qui vise à **apprécier l'importance du problème de santé publique posé par les COSV** présents dans les logements français par une **approche d'évaluation des risques**.

En effet, l'utilisation de nombreux produits de consommation et matériaux dans les environnements intérieurs peut conduire à la dissémination de composés organiques semi-

volatils (COSV) utilisés comme plastifiants, retardateurs de flamme, pesticides, parfums, etc. **Cette contamination est peu documentée** en France alors que **des effets sur la santé sont suspectés**.

Soixante-deux COSV ont été sélectionnés après une hiérarchisation sur la base des données de contamination issues de la littérature et de valeurs toxicologiques de référence.

La partie du projet financée par le programme PRIMEQUAL concerne **la faisabilité de la mesure de ces COSV dans les poussières sédimentées au sol dans les logements**.

Le premier objectif était de développer et d'évaluer une méthode d'analyse de COSV dans les poussières sédimentées, collectées au moyen d'un aspirateur ménager ou d'une lingette.

Le second objectif était d'évaluer l'influence des conditions de stockage sur la conservation des échantillons de poussières. Ces travaux visent notamment à étudier la faisabilité de l'analyse des échantillons collectés en 2008 et 2009 lors de la campagne nationale « Plomb-Habitat ».

In fine, la méthode d'analyse développée pourra être mise en œuvre pour **quantifier la contamination en COSV dans les poussières d'habitation**, pour les échantillons répondant aux conditions de conservation requises.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Développement d'une méthode d'analyse des COSV dans les poussières sédimentées

Ce travail visait à développer une méthode d'analyse par GC/MS/MS (chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem).

Sur les 62 COSV visés initialement, 7 composés ont dû être éliminés, en raison de compromis techniques (injection ou séparation chromatographique) : le folpet, le propoxur, le malathion, le parathion éthyl, le parathion méthyl, le BDE 209 et le benzo[g,h,i]pérylène.

Au final, 55 substances ont été considérées :

- **Pesticides organochlorés**
Aldrine, cis et trans-chlordane, 4,4'-DDE, 4,4'-DDT, dieldrine, alpha-endosulfan, endrine, heptachlore, alpha-HCH, gamma-HCH (lindane) et métolachlore
- **Pesticides organophosphorés**
Chlorpyrifos éthyl, diazinon, dichlorvos
- **Autres pesticides**
Atrazine, oxadiazon
- **Pyréthroïdes**
Cyfluthrine, cyperméthrine, deltaméthrine, perméthrine et tétraméthrine
- **Esters phosphoriques**
Tributylphosphate
- **Muscs polycycliques**
Galaxolide (HHCB) et tonalide (AHTN)
- **Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)**
Acénaphthène, anthracène, benzo[a]pyrène, fluoranthène, fluorène, phénanthrène et pyrène
- **Polychlorobiphényles (PCB)**
PCB 28, 31, 52, 77, 101, 105, 118, 126, 138, 153 et 180
- **Phtalates**
BBP, DBP, DEHP, DEP, DiBP, DiNP, DMEP et DMP
- **Polybromodiphényléthers (PBDE)**
BDE 85, 99, 100, 119 (penta)

Les échantillons de poussières étudiés ont été collectés dans le cadre d'une campagne nationale menée dans les logements (Projet Plomb-Habitat coordonné par le CSTB en partenariat avec l'EHESP, l'Institut de veille sanitaire, le laboratoire de toxicologie de l'hôpital Lariboisière et l'Institut Supérieur d'Agriculture de Lille*). La stratégie de prélèvement mise en œuvre a été établie en fonction d'une analyse systématique de la littérature scientifique, de la liste des COSV choisis, et des opportunités logistiques inhérentes à la campagne du projet Plomb-Habitat.

* Le projet Plomb-Habitat vise à identifier les déterminants des plombémies des enfants en France et à établir des relations quantitatives entre plomb sanguin et plomb au domicile de l'enfant : le plomb a été mesuré au domicile des enfants par des prélèvements de différents compartiments environnementaux (eau, sols, poussières, peintures). Près de cinq cents logements de France métropolitaine ont ainsi été visités (2008-2009). Profitant de l'opportunité de collecter des échantillons de poussières sédimen-

tées dans un échantillon de logements représentatif de l'habitat français, des prélèvements additionnels à ceux destinés à la mesure du plomb ont été effectués par les techniciens enquêteurs.

La méthode de prélèvement choisie présentait un encombrement minimum du matériel pour l'enquêteur et un temps de prélèvement réduit (5 minutes) pendant lequel étaient pratiqués :

- le recueil, avec l'accord des occupants, du **sac de l'aspirateur familial**, moyen simple permettant d'obtenir une grande quantité de poussières très rapidement, mais présentant deux inconvénients majeurs : la représentativité inconnue à la fois des surfaces et de la poussière prélevées, d'une part, et le risque d'une contamination par les éléments en plastique de l'aspirateur, d'autre part ;
- l'application d'une **lingette humide** sur une surface de 0,1 m² (norme NF X 46-032, (3)) pour pallier les inconvénients mentionnés précédemment, mais présentant l'inconvénient d'une quantité moindre de poussières et donc de plus grandes interrogations *a priori* sur la faisabilité du dosage.

Principaux résultats

La méthode d'analyse (figure 1) développée comprenait :

- une **extraction par solvant à haute température** et à haute pression (poussières d'aspirateur) ou aux **ultrasons** (poussières sur lingettes) ;
- une **injection et séparation chromatographique en phase gazeuse** ;
- une **détection par spectrométrie de masse en tandem**.

La méthode a été **évaluée (fonction d'étalonnage, limite de quantification, exactitude, incertitude de mesure et rendement d'extraction) selon les normes NF T 90-210 et XP T 90-220** relatives respectivement à l'évaluation initiale des performances d'une méthode dans un laboratoire et à l'estimation de l'incertitude de mesure associée à un résultat d'analyse, normes associées à la qualité de l'eau utilisées à défaut de normes équivalentes pour les matrices solides.

Les résultats de l'évaluation ont permis de valider la stratégie de mesure (seul l'anthracène s'est avéré impossible à quantifier). Par ailleurs, l'analyse de grandes séries d'échantillons de poussières sur lingette nécessiterait des essais d'optimisation supplémentaires pour améliorer les rendements d'extraction.

Deux objectifs secondaires ont été inclus :

- description de la **variabilité des concentrations en COSV** dans un échantillon de poussières tamisé afin de tester l'influence de la prise d'essai.

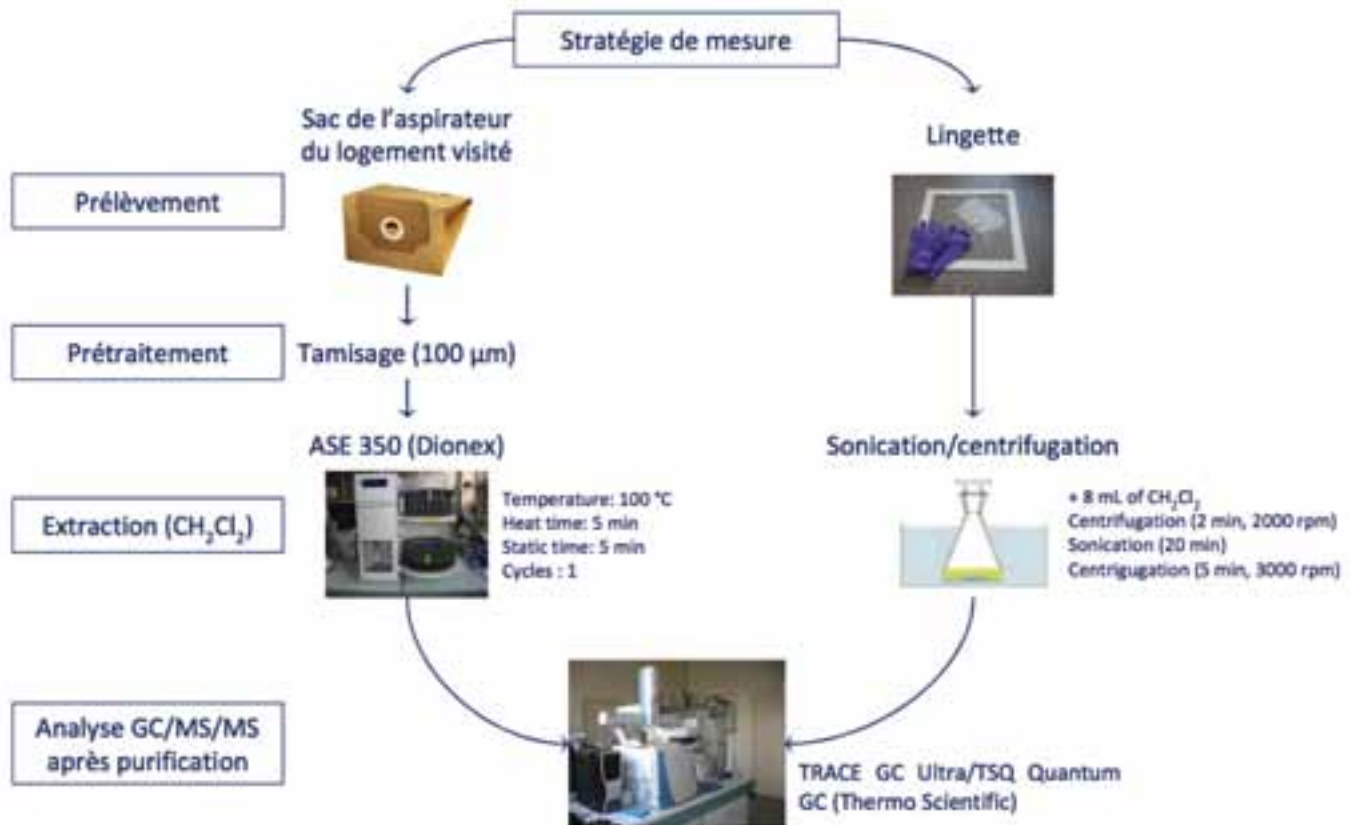


Figure 1 : Méthode d'analyse des COSV dans les poussières collectées au sol.

Dix prises d'essai (200 mg, même opérateur) d'un échantillon tamisé ont été analysées (échantillon choisi au hasard parmi les échantillons de la campagne Plomb-Habitat). Les **coefficients de variation (CV) observés sont majoritairement inférieurs à 10%**, ce qui paraît faible au regard des incertitudes associées au prélèvement et à la mesure. **On peut en conclure que la préparation de l'échantillon est suffisante pour assurer son homogénéité ;**

- étude de la **variabilité spatiale des COSV** dans une pièce lorsque les échantillons de poussières sont prélevés par une lingette. Douze prélèvements ont été réalisés chacun au moyen d'une lingette, uniquement dans le salon (présence d'un poêle à bois, d'une télévision, d'un poste informatique, de plantes vertes ; revêtement de sol parquet vitrifié). Seuls 5 phtalates et la galaxolide ont été quantifiés lors de cet essai, limitant ainsi son interprétation.

Conditions de stockage des échantillons

D'après la littérature scientifique, les processus de dégradation chimique (hydrolyse, photolyse et oxydation) et biologique (micro-organismes) seraient beaucoup plus lents en environnement intérieur qu'à l'extérieur : photochimie

moindre, activité microbienne réduite *a contrario* du cas des sols, ni vent, ni pluie et une température plus constante par exemple. Cependant, on ne dispose globalement que de peu d'informations à ce sujet, ce qui explique probablement la diversité des conditions de conservation des échantillons de poussières d'aspirateur dans les différentes études répertoriées (quand ces conditions sont renseignées). La température de conservation en est le parfait exemple : selon les études, elle varie de -70 °C à la température ambiante, avec une nette majorité à -20 °C. En ce qui concerne le conditionnement, la poussière, une fois tamisée, est le plus souvent stockée dans un flacon en verre à l'abri de la lumière.

Pour **évaluer l'influence des conditions de stockage sur la conservation**, un échantillon homogène de poussières contenant une majorité des composés ciblés a été constitué à partir d'échantillons réels et d'un matériau de référence. Il a ensuite été stocké dans des conditions variées de **durée** (de 7 à 180 jours), de **température** (de -18 °C à 35 °C), de **conditionnement** (sachet zippé ou sac poubelle) et de **luminosité** (obscurité ou lumière du jour) (figure 2). Ces conditions ont été choisies en fonction de celles observées lors de la campagne de prélèvement Plomb-Habitat.

Puis, les concentrations mesurées à l'issue de chaque essai ont été comparées aux concentrations initiales de l'échantillon homogène en tenant compte des incertitudes de mesure.



Figure 2 : Tests de conservation des poussières d'aspirateur.

Les **lingettes** imprégnées d'eau ont été **conditionnées immédiatement après échantillonnage dans des flacons en verre ambré**. Des essais comparables à ceux menés sur la poussière d'aspirateur ont été réalisés (figure 3) jusque 15 jours, et 3 ans pour -18°C.



Figure 3 : Tests de conservation des poussières collectées sur lingette.

Principaux résultats

Pour les **poussières d'aspirateur**, les résultats montrent que les écarts, relatifs à une éventuelle diminution de concentration des composés, varient entre 0 et -72%. **De manière générale, ces écarts augmentent avec la durée** des essais. En outre, **les différences les plus fortes sont observées pour les essais à 35°C**. L'effet de la température sur la conservation des composés est d'autant plus fort lorsque celle-ci est élevée. Des écarts positifs (jusque 70%) ont aussi été observés, en lien avec une éventuelle contamination.

Aucune modification significative des concentrations en COSV n'a été observée pour un stockage à -18°C. En revanche **la durée de conservation affecte à la baisse la concentration de quelques composés** (en particulier le lindane et l'aldrine) **lorsque les échantillons sont conservés à température positive**.

On n'observe pas d'influence du conditionnement ni de la luminosité.

Pour la majorité des composés, le stockage des poussières d'aspirateur avant congélation peut aller jusqu'à 6 mois à 5°C et 2 mois à 20°C. La décroissance des concentrations n'est pas toujours linéaire et il est donc **difficile d'établir une courbe de tendance applicable à l'ensemble des composés qui permettrait de prendre en compte l'influence des différents paramètres étudiés**. *In fine*, **la conservation d'un échantillon de poussières d'aspirateur à une température de -18°C semble un moyen efficace pour stocker les échantillons de poussières avant leur analyse**.

Pour les **poussières sur lingette**, les résultats sont moins nombreux du fait de difficultés analytiques, mais on n'observe **pas d'évolution significative de la concentration sur les 15 jours de stockage à 5, 20 et 35°C, ni lors de la conservation à -18°C**.

ENSEIGNEMENTS DU PROJET

Ce projet a permis de **développer une méthode multi-résidus pour l'analyse de COSV sélectionnés sur des critères d'intérêt a priori de santé publique**. Par rapport à une approche multi-méthodes (plusieurs méthodes spécifiques à une ou plusieurs substances), l'approche multi-résidus adoptée ici présente l'avantage de **prendre en compte de nombreux composés** pouvant avoir des effets toxiques communs, **sans pour autant multiplier les coûts** d'analyses, au prix de quelques compromis analytiques, notamment en termes de limites de quantification. **Les performances de la méthode ont été évaluées, attestant de sa robustesse pour une utilisation ultérieure**.

Des **recommandations pratiques en termes de stockage des échantillons** ont pu être définies selon les molécules recherchées, permettant ainsi de savoir **dans quelle mesure les échantillons collectés dans le cadre d'études de grande envergure peuvent être analysés a posteriori** (notamment ceux de la campagne nationale « Plomb-Habitat » conduite en 2008 et 2009). Les tests de conservation des poussières ont indiqué que **la température de conservation optimale était -18°C pour les durées étudiées**. Ils ont également permis de **fixer des durées maximales selon la température de stockage et les substances visées**.

VALORISATION ET FORMATION

NB: d'autres communications et publications sont réalisées dans le cadre plus global du Projet Écos-habitat.

Communications orales

Mercier F., Glorennec P., Derbez M., Thomas O., Le Bot B. "Cumulative indoor exposures to Semi-Volatile Organic Compounds in France: measurement methods in settled dust." *Indoor Air Conference*. Austin, TX. June 05-10, 2011.

Blanchard O., Mercier F., Le Bot B., Ramalho O., Mandin C., Glorennec P. "Semi-Volatile Organic Compounds (SVOCs) in dust samples: what about the storage conditions?" *Indoor Air Conference*. Austin, TX. June 05-10, 2011.

Mercier F., Thomas O., Le Bot B. « Mise au point de méthodes d'analyse de composés organiques semi-volatils (COSV) dans les poussières domestiques » *Sixième édition des Journées Interdisciplinaires de la Qualité de l'Air (JIQA 2010)*. Villeneuve d'Ascq, France. 4 et 5 février 2010.

Le Bot B., Mercier F., Blanchard O., Glorennec P. « Projet ECOS-Habitat: Développement métrologique pour la recherche de composés organiques semi-volatils (COSV) en environnement intérieur (gaz, particules en suspension et poussières déposées) » *Journées techniques RSEIN/OQAI « les particules dans l'air intérieur »*. Lille, France. 23 novembre 2010.

Communications par affiche

Mercier F., Glorennec P., Thomas O., Le Bot B. "New development in GC/MS/MS for the analysis of semi-volatile organic compounds in settled house dust" *34th International Symposium on Capillary Chromatography*. Riva del Garda, Italy. June 1-4, 2010.

Mercier F., Glorennec P., Thomas O., Le Bot B. "Assessment of organic contamination of settled house dust in an exposure assessment perspective" *Rencontres de l'Hôtel-Dieu du réseau doctoral de l'École des Hautes Études en Santé Publique*. Paris, France. 20 janvier 2010.

Publications

A multi-residue analytical method for the simultaneous determination of 55 semi-volatile organic compounds in indoor dust by gas chromatography/tandem mass spectrometry. Soumise.

Blanchard, O., Mercier, F., Ramalho, O., Mandin, C., Bot, B., & Glorennec, P. (2013). Measurements of semi-volatile organic compounds in settled dust: influence of storage temperature and duration. *Indoor Air*. DOI: 10.1111/ina.12066

Formations

Ce projet contribue aux formations doctorales (4 thèses dont 2 spécifiquement en lien avec cette partie financée par PRIMEQUAL) et initiales en métrologie et expologie de l'École des hautes études en santé publique.

Quels impacts sanitaires liés à l'exposition aux polluants de l'air intérieur ?

L'air intérieur renferme de nombreux polluants susceptibles de favoriser l'apparition de pathologies respiratoires allergiques, infectieuses ou toxiques. Les travaux présentés dans cette session se sont intéressés à l'impact de l'exposition aux polluants intérieurs en terme de santé, des mécanismes physiopathologiques mis en jeu à la prise en charge de crises sanitaires.

Ainsi, la réponse de l'épithélium respiratoire exposé à des polluants fréquents du milieu intérieur (formaldéhyde, dioxyde d'azote, endotoxines, allergènes respiratoires) a été étudiée. Ces expérimentations sont les premières à avoir testé l'impact de mélanges de polluants sur l'épithélium respiratoire. Les résultats ont permis d'apporter de nouveaux éléments sur les mécanismes physiopathologiques mis en jeu lors de l'inhalation de ces polluants, et donc, de mieux comprendre leur impact sur la santé respiratoire, notamment les allergies et l'asthme.

Autres biocontaminants courants des environnements intérieurs, les moisissures ont fait l'objet d'études de caractérisation de l'exposition fongique en milieu intérieur et d'une analyse de la dynamique de colonisation microbienne de différents supports. Ces expérimentations ont permis d'identifier des supports plus vulnérables au développement des moisissures et de proposer des traitements efficaces pour prévenir cette prolifération.

Une autre équipe s'est appliquée à caractériser la composition fongique de bioaérosols prélevés dans les logements contaminés par la mэрule (*Serpula lacrymans*). Ces analyses ont mis en évidence la présence de nombreuses espèces fongiques accompagnant la mэрule, dont certaines présentant un potentiel toxigène. Ce travail illustre ainsi les limites d'un seul examen visuel ou olfactif pour évaluer l'exposition réelle des habitants et l'importance d'aller jusqu'à l'identification de l'espèce pour connaître le potentiel allergisant, toxique ou infectieux des bioaérosols des logements.

Enfin, n'oublions pas la psychologie des habitants, dont la perception joue un rôle fondamental dans la survenue de « crises sanitaires » à l'échelle d'un bâtiment (ou d'un ensemble de bâtiments). Une équipe pluridisciplinaire a non seulement analysé plusieurs crises passées en détail, pour en comprendre le fonctionnement, mais surtout proposé une méthodologie opérationnelle de gestion des « syndromes des bâtiments malsains ».

Au final, l'ensemble de ces projets illustre la complexité de la contamination en milieu intérieur et l'importance de déterminer de manière approfondie les profils de contamination afin d'élaborer des modalités de diagnostic adaptées et réalistes.

Anne-Pauline BELLANGER,
Pharmacien biologiste au Laboratoire de parasitologie-mycologie CHU de Besançon
et membre du Conseil scientifique de PRIMEQUAL

Le rôle des polluants en air intérieur dans la survenue et la sévérité des allergies respiratoires : développement d'un modèle cellulaire prédictif

Responsable scientifique :

Françoise PONS
Laboratoire CAMB, UMR 7199 CNRS/Université de Strasbourg
Faculté de Pharmacie
67400 Illkirch
pons@unistra.fr

Équipes et chercheurs impliqués :

Laboratoire de Conception et Application de Molécules Bioactives, UMR 7199 CNRS/Université de Strasbourg : Anne Casset, Pierre Édouard Kastner, Françoise Pons

Laboratoire des Matériaux, Surfaces et Procédés pour la Catalyse, UMR 7515 CNRS/Université de Strasbourg : Stéphane Le Calvé, Wuyin Zheng

Mots clefs : air intérieur, polluants gazeux, formaldéhyde, dioxyde d'azote, épithélium respiratoire, inflammation, cytotoxicité, allergie, asthme

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Cette étude visait à comprendre le **lien entre la pollution de l'air intérieur et l'incidence et la morbidité des allergies et de l'asthme**, qui ont augmenté fortement dans les pays industrialisés au cours des dernières décennies et posent un problème majeur de santé publique.

En effet, **l'air intérieur renferme de nombreux polluants non-allergéniques mais toutefois susceptibles de favoriser l'installation, la progression et la gravité de ces maladies**. Jusqu'à présent, les effets de bon nombre de ces composés sur la sensibilisation et la réponse bronchiques à l'allergène ne sont pas bien connus. De plus, comme les pollutions coexistent très souvent, les besoins de connaissance concernent non seulement l'impact de ces polluants pris individuellement, mais encore les **conséquences d'expositions à leurs mélanges**.

Enfin, les effets des composés sur la sensibilisation et la réponse bronchiques à l'allergène pourraient résulter d'une action sur l'épithélium respiratoire. L'épithélium est, en effet, la première structure des voies respiratoires à entrer en contact avec les allergènes et les polluants atmosphériques. Or, ce tissu cellulaire joue un rôle majeur dans la défense du poumon, en formant une barrière imperméable, en assurant le piégeage et la clairance des toxiques inhalés, et en produisant des médiateurs impliqués dans la régulation de l'inflammation et de la réponse immunitaire ou encore la réparation tissulaire.

Dans ce contexte, l'objectif du projet était de développer un **modèle cellulaire alternatif à l'expérimentation animale, permettant d'évaluer l'impact de polluants du milieu intérieur sur la réponse à l'allergène**.

Pour y parvenir, deux étapes ont été conduites :

- la conception et la **construction d'un système permettant d'exposer des cellules en culture** à des concentrations connues, stables et reproductibles de polluants gazeux ;
- l'étude de **l'effet aigu et répété de polluants** majeurs de l'air intérieur, seuls ou en mélange, mais également associés à des allergènes respiratoires, **sur des marqueurs cellulaires et moléculaires** liés aux différentes fonctions de défense **de l'épithélium respiratoire**.

Trois polluants ont été choisis pour développer le modèle :

- le **formaldéhyde** gazeux (HCHO) ;
- le **dioxyde d'azote** gazeux (NO₂) ;
- les **endotoxines**, un polluant biologique.

Ces 3 polluants ont été classés prioritaire (endotoxines), très prioritaire (NO₂) ou hautement prioritaire (HCHO) par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur.

Les allergènes respiratoires utilisés pour mimer la réponse à l'allergène sont les **allergènes d'acariens** de l'espèce *Dermatophagoides pteronyssinus*, car fréquemment retrouvés en milieu intérieur. Ils constituent, d'ailleurs, la première cause d'asthme allergique chez l'enfant et l'adulte.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Conception d'un système d'exposition de cellules en culture au HCHO et NO₂ gazeux

Le système était composé de trois modules (figure 1) devant permettre :

1. de **générer des concentrations choisies, stables et reproductibles** en HCHO et NO₂ (module 1 : génération) ;
2. d'alimenter une enceinte d'exposition avec le mélange gazeux ainsi généré pour y exposer des cellules en culture*. **Ceci est novateur, car les études publiées à ce jour sur l'exposition de cellules respiratoires à des polluants gazeux n'ont concerné que des polluants individuels** (module 2 : exposition) ;
3. de **mesurer, en temps réel**, tout au long des expositions, **les concentrations** en HCHO et NO₂ effectivement présentes dans l'enceinte d'exposition. **Cette qualité de métrologie est rarement atteinte dans la littérature**, en particulier pour le HCHO (module 3 : analyse).

* Cette exposition devait pouvoir se faire sur des cultures à l'interface air-liquide ou sur des cultures immergées mais maintenues sous bascule afin d'assurer un contact direct des cellules avec le flux gazeux et le milieu de culture, alternativement. Ainsi, pour la première fois, ces deux modes d'exposition, qui présentent chacun des avantages et des inconvénients, ont pu être comparés dans le même système. En effet, alors que la méthode à l'interface air-liquide est jugée représentative de la situation in vivo, elle est trop stressante pour permettre des expositions uniques de plus de 30 min, ou des expositions répétées. La méthode d'exposition en mode immergé permet, grâce au milieu de culture présent au pôle apical des cellules, de limiter ce stress, et donc d'augmenter le temps d'exposition, ainsi que les répétitions. Les concentrations en HCHO étaient mesurées, en temps réel, à l'aide de l'analyseur de HCHO développé par le Laboratoire des Matériaux, Surfaces et Procédés pour la Catalyse, qui donne une mesure toutes les 6 minutes, ou a posteriori par HPLC/ V après prélèvement et dérivation sur des cartouches de 2,4-DNPH. Les concentrations en NO₂ étaient mesurées à l'aide d'un analyseur commercial de NOx basé sur la chimioluminescence et donnant une mesure par minute. Enfin, l'enceinte permettait d'exposer simultanément deux plaques de culture, et donc de tester un grand nombre de conditions expérimentales.

Avant son utilisation pour l'étude, le dispositif a été étalonné, puis des expositions test de cellules en culture à l'air synthétique ont été réalisées afin d'évaluer le stress que pouvait représenter une ou plusieurs expositions des cellules à un flux gazeux.

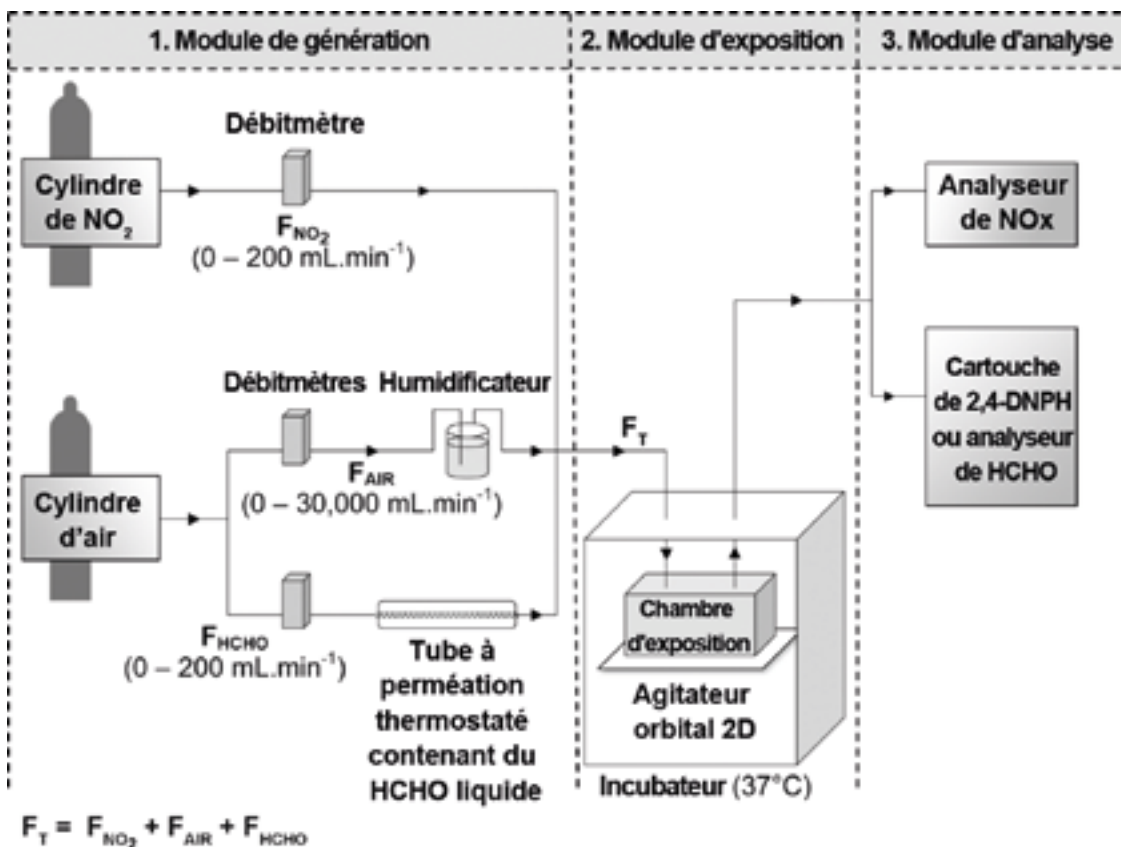


Figure 1 : Dispositif d'exposition de cellules.

Évaluation de l'effet du HCHO et du NO₂ dans les différents modèles cellulaires

L'évaluation de l'impact de l'exposition au HCHO et NO₂, seuls ou en mélange, et associés ou non à des endotoxines ou des allergènes d'acariens, sur des marqueurs cellulaires et moléculaires liés aux différentes fonctions de défense de l'épithélium respiratoire, dans différents modèles cellulaires, s'est déroulée en trois étapes :

1. l'évaluation de l'impact du HCHO solubilisé ;
2. l'évaluation de l'impact du HCHO et NO₂ gazeux, seuls ou en mélange ;
3. l'évaluation de l'impact du HCHO et NO₂ gazeux sur les réponses induites par les endotoxines ou les allergènes d'acariens.

La composition cellulaire de l'épithélium n'étant pas identique en tous points du système respiratoire, six lignées épithéliales respiratoires ont été utilisées :

- deux lignées bronchiques (Calu-3, 16-HBE), sélectionnées pour leurs très bonnes propriétés de barrière ;
- une troisième lignée bronchique (NCI-H292), choisie pour sa capacité à produire du mucus ;
- une dernière lignée bronchique (BEAS-2B), utilisée à titre comparatif ;
- une lignée alvéolaire (A549) ;
- une lignée nasale (RPMI 2650).

Plusieurs marqueurs ont été étudiés :

1. les changements de perméabilité épithéliale et la mort cellulaire permettant d'évaluer d'éventuelles pertes dans la fonction de barrière de l'épithélium ;
2. la production de facteurs impliqués dans le recrutement ou l'activation des cellules immunitaires permettant d'évaluer d'éventuelles altérations de la fonction d'immunorégulation de l'épithélium ;
3. le stress oxydant facteur d'inflammation et de mort cellulaire ;
4. la production de mucus essentielle dans le rôle de clairance de l'épithélium ;
5. la production de facteurs de croissance impliqués dans le remodelage tissulaire.

Seuls les marqueurs ayant donné des résultats pertinents et exploitables ont été retenus :

- **les changements de perméabilité épithéliale ;**
- **la mort cellulaire ;**
- **le stress oxydant ;**

- **la production de facteurs impliqués dans la régulation de l'inflammation.**

Effets du HCHO solubilisé

Le HCHO, disponible commercialement sous forme liquide, peut être solubilisé dans les milieux de culture cellulaire afin d'étudier sa toxicité, avant d'entreprendre l'étude sur le HCHO et le NO₂ gazeux, il a été jugé important de l'utiliser pour évaluer la réactivité des modèles cellulaires utilisés dans ce projet et appréhender les effets susceptibles d'être observés en réponse au HCHO gazeux.

Ainsi, **les effets du HCHO solubilisé** sur des marqueurs cellulaires et moléculaires liés aux différentes fonctions de défense de l'épithélium respiratoire ont été caractérisés dans deux lignées cellulaires (16-HBE et Calu-3), après une exposition à court terme (30 min ou 24 h) ou une exposition à long terme (4 semaines).

L'étude à court terme a montré que **le HCHO solubilisé est capable d'interférer avec l'intégrité et la fonction d'immunorégulation de l'épithélium respiratoire** de manière dose- et temps-dépendante. Ainsi, une **mort des cellules par nécrose** a été mise en évidence après une exposition de 24 h à de très fortes concentrations (1 400-7 000 µM) en HCHO. Cette nécrose s'accompagne d'une augmentation de la quantité d'espèces réactives de l'oxygène, un marqueur de **stress oxydant**. De même, une **augmentation de perméabilité épithéliale et une inhibition de la production basale** et induite par les endotoxines de cytokines pro-inflammatoires ont été observées suite à une exposition de 30 min à des concentrations non cytotoxiques, mais relativement élevées (3 500-7 000 µM) en HCHO. On peut noter qu'aucune différence majeure de réponse n'a été observée entre les deux lignées cellulaires utilisées. **Ces résultats suggèrent que seules des expositions d'une durée supérieure à plusieurs heures à des concentrations en HCHO, bien au-delà des concentrations physiologiques, sont susceptibles d'induire des lésions de l'épithélium respiratoire** (la concentration sanguine en HCHO dans l'organisme est estimée à 70-100 µM).

L'étude à long terme (exposition journalière de 30 min à 70 µM de HCHO pendant 4 semaines) n'a pas montré d'effet direct du HCHO, ni d'effet du polluant sur les réponses induites par les endotoxines. **Ces données renforcent l'idée que seules des concentrations très élevées en HCHO solubilisé sont susceptibles d'interférer avec l'intégrité et les fonctions de l'épithélium respiratoire.**

Il est important d'insister sur le fait que les concentrations ayant conduit à des effets du HCHO solubilisé sur des durées d'exposition courtes (max 24h) sont bien supérieures aux concentrations sanguines physiologiques de cet aldéhyde.

Effets des polluants en phase gazeuse, seuls ou en mélange

Les travaux conduits sur les polluants gazeux ont montré qu'une exposition unique* aux concentrations typiques des pollutions de l'air intérieur n'a pas d'effet sur l'intégrité et les fonctions de barrière et d'immunorégulation des cellules de l'épithélium respiratoire.

* Exposition unique, de 30 min à l'interface air-liquide ou de 2 h en mode immergé, de cellules épithéliales bronchiques, nasales ou alvéolaires, confluentes ou non confluentes, à des concentrations élevées en HCHO ($200 \mu\text{g.m}^{-3}$) et NO_2 ($800 \mu\text{g.m}^{-3}$) au regard des concentrations moyennes retrouvées en milieu intérieur (10 à $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour le HCHO et 10 à $200 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour le NO_2).

En revanche, des expositions répétées** au mélange gazeux induisent des effets significatifs sur l'intégrité et la fonction d'immunorégulation de ces cellules, qui ne surviennent pas en réponse à une exposition unique (figure 2). Sur la base des connaissances de l'équipe du projet, ces données sont les premières à rapporter l'effet d'une exposition répétée de cellules en culture à un mélange de polluants gazeux. Elles suggèrent ainsi l'intérêt de pouvoir tester l'impact d'expositions répétées afin de mettre en évidence un effet de ces polluants (ou d'autres composés) sur l'épithélium respiratoire, dans des modèles *in vitro*, à des concentrations retrouvées en milieu intérieur.

** Expositions répétées (30 min par jour pendant 4 jours consécutifs) de cellules Calu-3 au mélange HCHO ($200 \mu\text{g.m}^{-3}$) et NO_2 ($800 \mu\text{g.m}^{-3}$)

Impact du HCHO et du NO_2 sur la réponse de l'épithélium respiratoire aux allergènes d'acariens ou aux endotoxines

Le dernier objectif de ce projet était d'étudier l'impact du HCHO et du NO_2 sur la réponse de l'épithélium respiratoire à deux polluants biologiques, les endotoxines et les allergènes d'acariens. Comme évoqué plus haut, les travaux sur le HCHO solubilisé ont montré son effet inhibiteur sur les fonctions immunorégulatrices de l'épithélium respiratoire à l'état basal et en réponse aux endotoxines. Les travaux d'association du HCHO et du NO_2 gazeux aux allergènes d'acariens n'ont pas mis en évidence d'effet potentialisateur ou inhibiteur des polluants gazeux sur la réponse à l'allergène. Il faut souligner toutefois que, dans cette partie du projet, les investigations ont été limitées par l'impossibilité de disposer d'un modèle cellulaire capable de répondre de façon reproductible aux allergènes d'acariens.

ENSEIGNEMENTS DU PROJET

Cette étude a permis la conception et la fabrication d'un dispositif d'exposition de cellules en culture à des polluants en phase gazeuse qui pourra être adapté pour d'autres projets.

Les résultats obtenus ont suggéré, en accord avec la littérature, que seules des concentrations gazeuses très élevées en HCHO ou en NO_2 , ou des expositions répétées à ces polluants sont capables d'altérer l'intégrité et les propriétés d'immunorégulation de l'épithélium respiratoire. Ces résultats n'excluent pas que le HCHO et le NO_2 jouent un rôle dans les allergies respiratoires et l'asthme, aux concentrations classiquement mesurées en air intérieur.

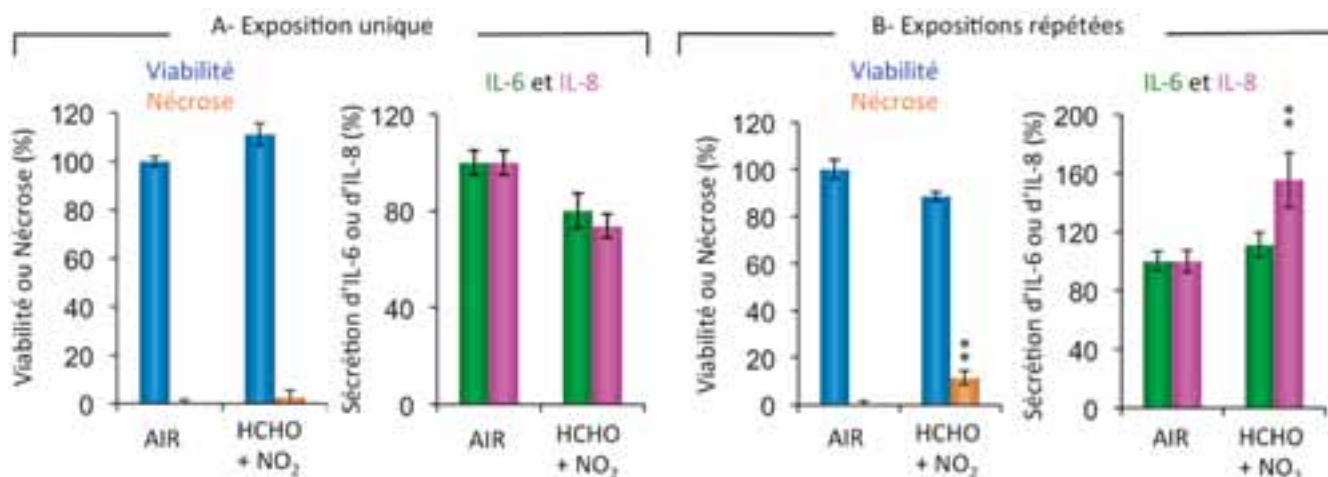


Figure 2: Effet des polluants en phase gazeuse, en mélange. Viabilité, nécrose et sécrétion de cytokines (IL-6 ou IL-8) des cellules Calu-3 après exposition unique (A: 1 x 30 min) ou répétée (B: 4 x 30 min) au mélange HCHO ($200 \mu\text{g.m}^{-3}$) et NO_2 ($800 \mu\text{g.m}^{-3}$) en comparaison à de l'air.

En conséquence, ce projet a permis d'identifier plusieurs axes de recherches futures :

- **Le modèle cellulaire d'étude** : il est possible que les modèles utilisés ne miment pas parfaitement un épithélium respiratoire, et notamment un épithélium d'asthmatique. Une piste pourrait consister en l'utilisation de cellules présensibilisées à l'aide d'une cytokine pro-inflammatoire ou de cellules primaires. De même, on sait désormais qu'*in vivo*, la cellule épithéliale respiratoire interagit avec des cellules du système immunitaire, et que cette interaction peut jouer un rôle important dans sa réponse aux toxiques. Un système associant des cellules épithéliales et des cellules immunitaires a été récemment proposé par Rothen-Rutishauser et ses collaborateurs pour l'étude de la toxicité respiratoire de particules. Ce type de modèle pourrait s'avérer utile pour affiner les conclusions opérationnelles d'une future étude.
- **les marqueurs** utilisés pour mettre en évidence d'éventuels effets des polluants : les marqueurs fonctionnels utilisés au cours de ce projet pourraient être insuffisamment sensibles pour détecter des effets liés à des expositions uniques de courte durée à de faibles concentrations en toxiques. La solution réside peut-être dans la génomique, qui permet désormais l'étude simultanée de plusieurs milliers de gènes. Une étude récente a d'ailleurs décrit, dans des cellules épithéliales nasales primaires, des modifications de l'expression de nombreux gènes, dans des conditions d'exposition au HCHO solubilisé induisant moins de 10% de mort cellulaire.
- **les polluants eux-mêmes** : pour s'approcher encore davantage des conditions d'exposition réelles de l'épithélium respiratoire aux polluants atmosphériques dans les environnements intérieurs non industriels, il serait pertinent de réaliser des expositions à des mélanges complexes de polluants gazeux. En effet, l'air présent à l'intérieur des locaux, et notamment des habitations, contient bien souvent de nombreux polluants chimiques de nature très variée (composés organiques volatils, oxydes de carbone, de soufre ou d'azote, hydrocarbures aromatiques polycycliques, particules, etc.) auxquels les voies respiratoires sont exposées de manière simultanée et récurrente. Bien que certains de ces polluants soient parfois présents uniquement à des concentrations très faibles voire infimes, leur présence continue pourrait jouer un rôle direct ou potentialisateur sur la réponse de l'épithélium respiratoire à une pollution dont ils ne sont pas les constituants majoritaires. Notons, cependant, que ce type d'étude serait d'une grande complexité métrologique.

VALORISATION

Thèse d'université

Pierre-Édouard Kastner, Université de Strasbourg : « Impact de l'exposition au formaldéhyde et/ou au dioxyde d'azote sur les fonctions de l'épithélium bronchique ». Date de soutenance : 21 septembre 2011

Communications orales

Kastner P.E., Le Calvé S., Casset A., Zheng W. et Pons F. *Conception d'un système d'exposition de cellules épithéliales bronchiques en culture à des polluants gazeux*. Journées de Recherche Respiratoire des 23 et 24 octobre 2009, Strasbourg.

Kastner P.E., Casset A., Le Calvé S., Pons F. *Développement d'un modèle cellulaire prédictif du rôle des polluants du milieu intérieur dans la survenue et la sévérité des allergies respiratoires*. Forum de REALISE (Réseau Alsace des Laboratoires en Ingénierie et Sciences pour l'Environnement), 31 mars 2010, Strasbourg.

Kastner P.E., Casset A., Le Calvé S. et Pons F. *Development of a respiratory epithelium cellular model for applications in pharmacology and toxicology*. Journées du Campus d'Illkirch des 3 et 4 mai 2010, Illkirch.

Kastner P.E., Le Calvé S., Pons F. *Impact de l'exposition au formaldéhyde et/ou au dioxyde d'azote sur la réponse de l'épithélium bronchique à l'allergène*. Journée des doctorants du service d'évaluation de la qualité de l'air de l'ADEME, 17 mai 2010, Paris.

Kastner P.E., Le Calvé S., Zheng W., Casset A. et Pons F. *Design of a dynamic exposure system to study the toxicological impact of controlled mixtures of gaseous pollutants on the airway epithelium in vitro*. Congrès de la Société Française de Toxicologie, 25 et 26 novembre 2010, Institut Pasteur, Paris.

Kastner P.E., Casset A. et Pons F. *In vitro assessment of the impact of air pollutants on the respiratory epithelium functions and integrity – Example of formaldehyde*. Congrès de la Société Française de Toxicologie des 25 et 26 novembre 2010, Institut Pasteur, Paris.

Kastner P.E., Casset A., Pons F. *Évaluation de l'impact de polluants atmosphériques sur l'intégrité et les fonctions de l'épithélium respiratoire in vitro – Exemple du formaldéhyde*. Rencontres scientifiques de l'ANSES, 6 décembre 2010, Paris.

Kastner P.E., Le Calvé S., Zheng W., Casset A., Pons F. *Design of a dynamic exposure system to study the toxicological impact of controlled mixtures of gaseous pollutants on the airway epithelium in vitro*. Forum de REALISE (Réseau Alsace des Labo-

ratoires en Ingénierie et Sciences pour l'Environnement), 29 mars 2011, Strasbourg.

Kastner P.E., Casset A., Pons F. *In vitro* assessment of the impact of air pollutants on the respiratory epithelium functions and integrity – Example of formaldehyde. Forum de RÉALISE, 29 mars 2011, Strasbourg.

Kastner P.E., Le Calvé S., Zheng W., Casset A., Pons F. *Étude de l'impact des polluants du milieu intérieur sur l'intégrité et les fonctions de l'épithélium bronchique*. 6^e Congrès Francophone d'Allergologie, 19-22 avril 2011, Paris.

Kastner P.E., Le Calvé S., Zheng W., Casset A., Pons F. *Conception d'un système permettant d'exposer des cellules en culture à des polluants gazeux afin d'étudier l'impact de ces polluants sur l'épithélium bronchique*. 6^e Congrès Francophone d'Allergologie, 19-22 avril 2011, Paris.

Kastner P.E., Le Calvé S., Zheng W., Casset A., Pons F. *Étude de l'impact du formaldéhyde et du dioxyde d'azote sur l'intégrité et les fonctions de l'épithélium bronchique*. Journée Scientifique de l'UMR 7199, 24 mai 2011, Illkirch.

Kastner P.E., Le Calvé S., Zheng W., Casset A., Pons F. *Exposure of airway epithelial cells in culture to a mixture of gaseous pollutants: impact on cell integrity*. Eurotox 2011 – 47th Congress of the European Societies of Toxicology, 28-31 août 2011, Paris.

Actes de colloques

Kastner P.E., Le Calvé S., Zheng W., Casset A., Pons F. *Conception d'un système permettant d'exposer des cellules en culture à des polluants gazeux afin d'étudier l'impact de ces polluants sur l'épithélium bronchique*. *Revue Française d'Allergologie*, 2011, 51(3): 380.

Kastner P.E., Le Calvé S., Casset A., Zheng W., Pons F. *Exposure of airway epithelial cells in culture to a mixture of gaseous pollutants: Impact on cell integrity*. *Toxicology Letters*, 2011, 205S: S123-S123.

Publications scientifiques

Kastner P.E., Casset A., Pons F. *Formaldehyde interferes with airway epithelium integrity and functions in a dose- and time-dependent manner*. *Toxicology Letters*, 2011, 200:109- 116.

Kastner P.E., Le Calvé S., Zheng W., Casset A., Pons F. *A dynamic system for single and repeated exposure of airway epithelial cells to gaseous pollutants*. *Toxicology In Vitro*, 2013, 27:632-640.

Étude et compréhension de la dynamique de colonisation microbienne des matériaux : vers l'élaboration de nouveaux traitements préventifs adaptés aux environnements intérieurs

Responsable scientifique :

Stéphane MOULARAT
 Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
 Direction Santé Confort
 Division Agents Biologiques et Aérocontaminants
 84, avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne
 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2
stephane.moulat@cstb.fr

Équipes et chercheurs impliqués :

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) : Stéphane Moularat, Marjorie Draghi, Isabelle Lacaze, Marina Moletta-Denat, Enric Robine

Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) : Faisl Boustia, Geneviève Oriol

Mots clefs : moisissures, dynamique de colonisation microbienne, diversité microbienne, matériaux, traitements préventifs

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Depuis les années 70, la politique d'économie d'énergie, notamment en France, a entraîné une réduction des débits d'air dans les bâtiments et augmenté le risque de condensation sur des surfaces sensibles au développement de micro-organismes. L'OQAI (Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur) a d'ailleurs pu le mesurer : **15% des foyers présentent des contaminations fongiques visibles**, des micro-organismes susceptibles d'induire chez les occupants diverses **pathologies respiratoires** comme des allergies, des infections ou des toxi-infections.

La contamination fongique est un problème majeur et récurrent touchant non seulement les habitations, mais **aussi les établissements patrimoniaux et les œuvres d'art**, avec une variété très large d'espèces fongiques incriminées selon les pays, sujet largement traité dans la littérature scientifique.

A contrario, il existe peu d'études relatives aux associations microbiennes. L'étude d'Andersson, en 1997, fut ainsi la première cherchant à mettre en évidence les espèces bactériennes et fongiques présentes sur divers matériaux de construction dans une crèche. Une grande diversité d'espèces bactériennes fut ainsi identifiée sur des panneaux de plâtre, avec une prédominance des bactéries mésophiles et de *Mycobacterium komossense*.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était :

- **d'étudier et de comprendre la dynamique de colonisation microbienne des supports ;**
- de proposer, à la lumière des résultats obtenus, une **stratégie destinée à protéger les matériaux de la prolifération fongique** avec la mise en œuvre d'un traitement adapté à la problématique des matériaux de construction et de décoration présents dans des logements et/ou des sites patrimoniaux.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

La colonisation des supports par les moisissures suit trois étapes successives :

- **l'adhésion** qui résulte de forces de diverses natures (forces de van der Waals, électrostatiques...);
- **le développement fongique** qui se traduit par la colonisation proprement dite du support et sa biodétérioration ;

- **la dissémination** durant laquelle les spores ou conidies produites par les structures conidiogènes du micro-organisme sont dispersées et peuvent infester d'autres supports de leur environnement.

La phase de **développement fongique*** suit elle-même trois étapes :

- la germination ;
- la croissance ;
- la sporulation.

* En 2001, Oshero et May étudient et décrivent les différentes phases du cycle de vie asexuel d'*Aspergillus nidulans*. Les conidies sont produites par une structure spécialisée, le conidiophore. Après dispersion et contact avec un milieu adéquat, les conidies germent et donnent naissance à un hyphes. La colonisation du substrat est réalisée par extension et ramification de cet hyphes dont l'accroissement s'effectue par le sommet (apex). Les parties terminales constituent les zones actives où se produit l'essentiel des activités de synthèse et de dégradation nécessaires à la croissance et à la reproduction. Ces zones sont caractérisées par la présence de nombreuses vésicules cytoplasmiques contenant les enzymes et les précurseurs de synthèse de la matière cellulaire.

	Matériaux colonisés	Espèces fongiques isolées
Murs et revêtements muraux	Murs	Cladosporium cladosporioides, Eurotium herboriorum, Paecilomyces variotii, Penicillium glabrum
	Peintures	Aspergillus penicillioides, Penicillium brevicompactum, P. chrysogenum , P. glabrum
	Papier peint	Alternaria alternata, Aspergillus penicillioides, A. versicolor , Cladosporium cladosporioides, Paecilomyces variotii, Penicillium brevicompactum, P. chrysogenum , P. glabrum , Trichoderma harzianum,
	Bois	Penicillium brevicompactum
	Colle	Aspergillus versicolor
	Caoutchouc des cadres de fenêtre	Cladosporium cladosporioides
Produits de décoration	Textiles	Aspergillus niger, A. sydowii , Cladosporium cladosporioides, C. herbarum , C. sphaerospermum , Emericella nidulans, Eurotium herboriorum, Penicillium brevicompactum, P. chrysogenum , Trichoderma harzianum, Wallemia sebi,
	Tapis	Emericella nidulans, Eurotium herboriorum, Paecilomyces variotii, Penicillium chrysogenum
	Cuir	Aspergillus niger, A. penicillioides , A. sydowii , Cladosporium sphaerospermum, Paecilomyces variotii
	Archives	Eurotium herboriorum
	Matériaux celluloseux	Aspergillus sydowii, Stachybotrys chartarum
	Caoutchouc vulcanisé	Cladosporium sphaerospermum, Penicillium brevicompactum
	Produits céramiques	Aspergillus versicolor
	Papier	Penicillium glabrum, Wallemia sebi
	Plastiques	Penicillium glabrum
Polyuréthane, tapisserie renfermant de l'arsenic	Aspergillus niger, Cladosporium sphaerospermum	
Systèmes de traitement d'air	Filtres et conduits	Aspergillus fumigatus
	Réservoir d'eau, humidificateur	Exophiala jeanselmei

Tableau 1 : Espèces fongiques isolées de divers matériaux.

La colonisation et le degré de biodétérioration qui en résulte éventuellement dépendent de divers facteurs liés au support (nature, propriétés physicochimiques, état de surface, teneur en eau, pH), au micro-organisme et aux conditions environnementales (humidité relative, température). **La présence de nutriments, une quantité d'eau suffisante et une température appropriée constituent, cependant, les principaux paramètres de germination et de développement des spores fongiques** [température optimale de croissance généralement comprise entre 22 et 35°C pour les espèces fongiques des environnements intérieurs].

Dans les logements, les espèces fongiques les plus couramment isolées appartiennent aux genres *Penicillium*, *Aspergillus* et *Cladosporium*. **Ces moisissures sont capables de coloniser la plupart des matériaux dès l'instant où le micro-organisme dispose d'une quantité d'eau suffisante** (tableau I).

Sur les sites patrimoniaux, les biens culturels tout comme les environnements intérieurs sont soumis à de nombreux facteurs d'altération, parmi lesquels la biodétérioration qui occupe une place non négligeable. **Les œuvres d'art, telles que les peintures ou fresques**, composées d'un matériau support (cellulose papier, toile, bois, soie tissée...) mais également de colles, glus, émulsifiants ou épaississants, autant de composés biodégradables par les micro-organismes, **peuvent subir de dommages esthétiques irréversibles***.

** La croissance des microflore et les produits de leur métabolisme peuvent causer sur les œuvres des dommages esthétiques. Les cyanobactéries et les algues sont capables de prospérer sur des fresques et les façades des bâtiments exposés à la lumière. Sur les fresques murales, les primocolonisateurs sont des bactéries nitrifiantes et des bactéries appartenant au cycle du soufre, qui jouent un rôle important dans la détérioration des pierres et des maçonneries (Pseudomonas, Arthrobacter, Streptomyces). La flore fongique est principalement constituée d'espèces appartenant aux genres Penicillium, Aspergillus, Cladosporium, Chaetomium et Alternaria. Cladosporium sphaerospermum est l'agent principal de la dégradation des fresques. Les peintures sur bois sont généralement dégradées par les espèces Aureobasidium et Pseudomonas. Sur les reproductions de peintures, on note la présence fréquente de Bacillus pumilus et Penicillium chrysogenum. On peut noter que la succession des espèces colonisatrices sur les œuvres dépend de la nature chimique du substrat.*

Les principaux **traitements antifongiques actuels** concernent le bois et le papier. Ils peuvent être :

- **Physiques** :
 - chauffage du **bois** (180°C à 280°C) ;
 - déshydratation, irradiation par rayonnement gamma, application d'un courant haute fréquence, usage

d'environnements pauvres en oxygène, radiations UV, ou encore températures extrêmes pour le **papier**.

- **Chimiques** :

- **modification chimique du bois** par la fixation de motifs chimiques (estérification, acétylation, alkylation...), **incorporation de composés chimiques doués de propriétés fongicides sur le bois** (produits organiques, sels métalliques, goudrons, huiles, silicones, résines, alcool...) ;
- **application de composés chimiques sur le papier** (alcools, phénols, acides, salicylanilides, sels d'ammonium quaternaire...).

Parmi ces procédés, nombreux sont ceux présentant des problématiques de **toxicité pour l'environnement**. Des **traitements biocides alternatifs**, utilisés dans divers domaines (agroalimentaire, thérapeutique...) en raison de leurs propriétés antifongiques, ont ainsi été identifiés. Parmi eux, **deux traitements potentiellement applicables à la présente étude**, à savoir la préservation des produits de construction et de décoration des environnements intérieurs, ont été jugés intéressants : **l'extrait de plantes du genre Allium (ail) et les huiles essentielles**.

Méthodologie

Pour les besoins de l'étude, des bancs et protocoles d'essai ont été développés afin d'assurer, selon deux scénarios de contamination, le suivi des flores fongiques et bactériennes sur différents matériaux choisis par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et le LRMH (Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques) au vu de leur expertise.

Six supports vulnérables vis-à-vis de la prolifération microbienne ont été sélectionnés :

- la **toile de verre** et le **papier peint** pour la thématique « environnements intérieurs » ;
- le **lin** et le **bois** pour la thématique « patrimoine » ;
- la **plaque de plâtre** et la **dalle de plafond acoustique** étant communes aux deux types d'environnement.

Des analyses en microscopie électronique à balayage, culturelles et de biologie moléculaire, ont alors été effectuées sur une période de 23 jours.

Deux campagnes d'essais ont été réalisées :

- une **première campagne** avait pour but d'observer, dans des conditions réalistes, le **déroulement d'une contamination des supports par de l'air « tout-venant »**. Cette procédure, durant laquelle les conditions hydriques des matériaux variaient

Prélèvement d'air
4 L/min

Sonde température/
pression



Plateaux contenant
les matériaux d'étude

Figure 1 : Prélèvement en continu de la flore aéropartées au-dessus des supports testés.

(alternance journalière humidification/séchage), visait à **simuler des cas de contamination sur de longues durées avec une source d'eau discontinue, telles celles pouvant résulter de phénomènes intermittents** : condensations, capillarité ou encore défauts d'étanchéité.

Sur toute la durée de la Campagne I, la température et l'humidité relative de l'air ont été mesurées avec un thermohygromètre (Hygrolog-D, Rotronic) muni d'une sonde (Hygroclip-SC05, Rotronic). Ces paramètres ont été enregistrés durant les 23 jours de l'essai sur un pas de temps de 10 minutes. Parallèlement, la microflore aéropartée était collectée en continu durant l'essai, à l'aide d'un système de prélèvement muni d'un ventilateur et d'un média filtrant, mis au point au CSTB (figure 1).

- une **seconde campagne** a consisté en l'étude de la **dynamique de colonisation microbienne**

des deux supports les plus vulnérables identifiés lors de la première campagne (bois et toile de verre) (figures 2, 3 et 4), et dont la colonisation

était accélérée en forçant la contamination, toujours par de l'« air tout-venant ». L'unique contamination forcée, réalisée en début d'essai avec une humidité des matériaux contaminés maintenue à saturation durant tout l'essai, s'apparente à des cas de **contamination avec une source en eau continue comme les fuites ou infiltrations**. Dans un premier temps, les supports étaient contaminés de manière forcée par l'intermédiaire d'un impacteur Andersen muni d'un crible permettant la collecte à la fois des particules fongiques et bactériennes. La contamination des supports était réalisée durant une heure à l'extérieur, puis pendant une heure dans un bureau occupé. Trois essais ont été réalisés afin de vérifier les scénarios de contamination communs. Au terme des deux heures d'impaction, les supports étaient placés dans des dessiccateurs



Figure 2 : Contamination sur toile de verre (salle de classe – école).



Figure 3 : Contamination sur chêne (plancher vue de dessous). Ancien couvent des Ursulines, XVII^e siècle. Ancenis (Loire-Atlantique).

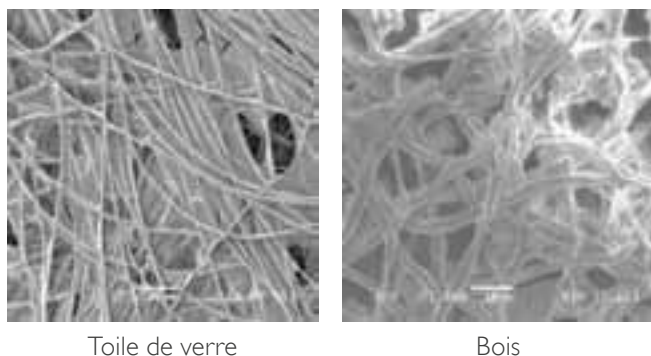


Figure 4 : Images réalisées au microscope électronique des supports de l'étude après 23 jours (T23) d'exposition (Campagne 1).

saturés en humidité pour incubation. Un témoin n'ayant pas subi d'impaction, ainsi qu'un T0 contaminé, ont été analysés extemporanément. Les dessiccateurs étaient placés à l'étuve à 25° C et à l'abri de la lumière. À chaque temps de prélèvement (Ti), un échantillon de chaque matériau était récupéré puis analysé.

Dans les deux campagnes, afin de n'étudier que la contamination issue de l'air, l'eau utilisée était filtrée et stérilisée.

Enfin, les traitements biocides testés ont été fabriqués au laboratoire :

- un **extrait d'ail** à 30% a été élaboré à partir de gousses issues de l'agriculture biologique. L'extrait ainsi obtenu a été filtré au travers d'un média poreux (diamètre des pores : 0,45 µm). Le filtrat limpide ainsi obtenu a été dilué au dixième ;
- des **suspensions d'huiles essentielles** (thym et menthol) de dilution égale à 1/500 ont été préparées. Pour ce faire, un volume de 100 µL d'huile essentielle a été ajouté à 50 mL d'eau déionisée et filtrée.

L'application des différents traitements sur les matériaux a consisté à l'immersion individuelle, préalable à la contamination, de chaque échantillon dans chacune des suspensions.

Principaux résultats

Concernant la Campagne 1, les analyses ont montré une **croissance microbienne sur l'ensemble des matériaux avec une augmentation des charges bactérienne et fongique** durant les essais (figure 5).

Les analyses par culture ont permis de distinguer deux types de comportement des supports vis-à-vis de la croissance bactérienne :

- la **dalle de plafond**, la **plaque de plâtre** et la **toile de verre** présentaient une **biomasse bactérienne élevée** (supérieure à 3.10^5 UFC/cm²) à 23 jours ;

- le **lin**, le **bois** et le **papier peint** présentaient une **charge bactérienne moindre** (entre 4.10^3 et 10^4 UFC/cm²).

Concernant la contamination fongique, à l'exception du papier peint, tous les supports testés présentaient, à 23 jours, une forte augmentation de cette biomasse microbienne, le bois étant le support à la surface de laquelle a été récupéré le nombre le plus élevé de spores viables et fragments mycéliens, et ce quelle que soit la durée d'exposition (jusqu'à 2.10^3 UFC/cm²).

L'approche biomoléculaire a, quant à elle, conforté en partie ces résultats : **la toile de verre étant la plus vulnérable vis-à-vis de la croissance bactérienne, le bois étant de loin le plus sensible vis-à-vis de la contamination fongique**. Ces deux supports ont, de fait, été sélectionnés pour appréhender la dynamique de colonisation microbienne lors de la Campagne 2.

Ainsi, **la colonisation apparaît être un processus dynamique aussi bien au niveau bactérie qu'eucaryote**. Il a été mis en évidence une **succession de colonisateurs** et la présence **d'espèces majoritaires** qui se succèdent et **dépendent du support de colonisation, y compris avec une même contamination initiale** (Campagne 2). Cette dynamique, observée pour les bactéries et la flore fongique en quelques jours, peut être expliquée par des différences de vitesses de croissance, une variation des conditions de croissance (nutriment, humidité, espèces en compétition) ou encore la production de métabolites secondaires tels que les mycotoxines, endotoxines, ou encore COV.

À 23 jours de colonisation, la toile de verre est majoritairement colonisée par des **amibes** (*Amæbozoa*) avec 73% des séquences. Ceci souligne **l'impact potentiel de cette microflore, sur la qualité microbiologique**

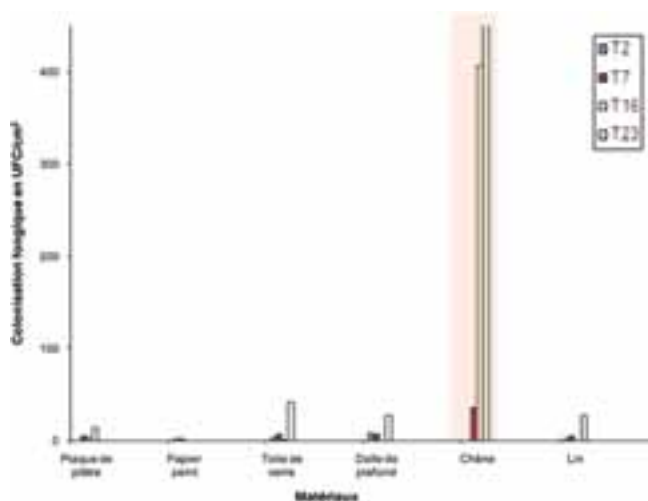


Figure 5 : Campagne 1 : dénombrement de la flore fongique présente à la surface des matériaux à T2, T7, T16 et T23 (UFC/cm²).

Nature du matériau	Flore fongique (UFC/cm ³)			Flore bactérienne (UFC/cm ³)		
	Durée d'incubation (jours)			Durée d'incubation (jours)		
	T0	T7	T28	T0	T7	T28
	Bois			Bois		
Sans traitement	2,93E+02	4,49E+02		7	ND	
Extrait d'ail (1/10)		1,04E+02	0		0	0
Huile essentielle de menthe poivrée (1/500)		1,58E+05	1,60E+06		ND	ND
Huile essentielle de thym (1/500)		2,62E+01	0		3,94E+01	0
	Toile de verre			Toile de verre		
Sans traitement	62	1,53E+06		11	1,75E+03	
Extrait d'ail (1/10)		2,95E+05	2,99E+05		ND	4,45E+04
Huile essentielle de menthe poivrée (1/500)		7,28E+04	1,97E+05		2,97E+03	3,87E+06
Huile essentielle de thym (1/500)		4,96E+04	5,22E+04		ND	3,49E+06

Tableau 2 : Flores bactérienne et fongique évaluées par méthode culturale sur les différents matériaux testés après diverses durées d'incubation (ND : Non dénombrable).

des environnements intérieurs et la nécessité de développer des moyens de prévention et de gestion prenant en compte la diversité microbienne dans son ensemble (figure 5).

Bien que le mode de contamination forcée de la Campagne 2 ait permis une colonisation fongique rapide, la diversité microbienne est restée plus importante dans la Campagne 1. Ce résultat pourrait être expliqué par la variabilité de la microflore aéroportée.

L'ensemble des résultats obtenus lors des deux campagnes montre que **la dynamique microbienne présente une forte dépendance d'abord au support, puis au mode de contamination.** Dans tous les cas, cette contamination a été décrite par une ou deux espèces dominantes avec une évolution de ces espèces au cours du temps. Cette observation est vérifiée lors des deux campagnes de mesure, c'est-à-dire avec (campagne 1) Cet sans (Campagne 2) apport de nouvelles espèces et modification des conditions hydriques durant l'essai. Par conséquent, **l'inhibition d'une espèce a pour répercussion le développement d'une autre, que ce soit pour les bactéries ou pour les moisissures.**

Si la modification des espèces bactériennes et des espèces fongiques a lieu simultanément, en revanche, il n'a pas été mis en évidence de couple « bactérie-moisissure » commun à l'ensemble des essais. Par conséquent, la relation entre micro-organismes ne permet pas, à elle seule, d'expliquer cette modification qui semble également liée aux conditions environnementales.

Concernant les traitements alternatifs aux biocides existants et identifiés au travers de la littérature comme possédant des propriétés antimicrobiennes, **seuls l'huile essentielle de thym et l'extrait d'ail se sont révélés efficaces sur la prolifération fongique sur le bois** (tableau 2). En effet, l'huile essentielle de menthe poivrée, troisième traitement testé, n'a limité la croissance microbienne ni sur le bois, ni sur la toile de verre. L'inefficacité constatée des trois traitements sur la toile de verre est sans doute imputable à la faible teneur en solution traitante absorbée par ce support, par rapport à la charge microbienne impactée. **Les résultats obtenus sur le bois corroborent les conclusions d'études visant à développer des traitements du bois à base d'huiles essentielles. L'efficacité de ces traitements reste à être démontrée sur d'autres supports.**

ENSEIGNEMENTS DU PROJET

À la lumière de ces résultats et de l'existence d'une diversité microbienne abondante et variable constatée lors des Campagnes 1 et 2, **le recours à un traitement à spectre d'action large apparaît indispensable pour prévenir le développement microbien.** Notamment, **l'utilisation de mélanges d'huiles essentielles apparaît pertinente en favorisant la synergie entre molécules actives.** Cependant, **cette synergie reste à étudier pour éviter des effets antagonistes.** Les interactions entre ces composantes peuvent conduire à des effets anta-

gonistes, additifs ou synergiques. Ainsi, certaines études ont démontré qu'un mélange d'huiles essentielles présente généralement une activité antibactérienne plus élevée que les mélanges de leurs composantes principales, ce qui suggère que les composantes mineures sont essentielles à l'activité synergique, bien que des effets antagonistes et additifs aient également été observés.

L'étude des mécanismes de croissance fongique pourrait également constituer une approche pertinente pour affiner le choix des traitements préventifs. Aussi, la poursuite de ce travail consistera à étudier les mécanismes de colonisation et de dégradation des supports par les micromycètes. Pour cela, la technique d'amplification des ITS* pourra être sélectionnée afin d'être plus spécifique des micromycètes.

* ITS (Internal Transcribed Spacer) : région très polymorphe de l'ADN utilisée en biologie cellulaire pour déterminer les différences génétiques entre deux espèces.

VALORISATION

Publication en cours de rédaction :

Isabelle Lacaze, Stéphane Moularat, Marjorie Draghi, Marina Moletta-Denat, Faisl Boust, Geneviève Orial, Enric Robine : *Étude de la dynamique microbienne sur les produits de décoration.*

Habitations dégradées par la mэрule et les moisissures : évaluation de l'exposition fongique des occupants et impact sanitaire

Responsable scientifique :

David GARON
Unité ABTE EA 4651 – équipe ToxEMAC
UFR des Sciences Pharmaceutiques
Université de Caen
Avenue Général Harris
BP 5026
14076 Caen Cedex 05
david.garon@unicaen.fr

Équipes et chercheurs impliqués :

Université de Caen Basse-Normandie, UFR des Sciences Pharmaceutiques, unité ABTE EA 4651 – équipe ToxEMAC :
Véronique Andre, David Garon, Didier Pottier, Jean-Philippe Rioult

Cabinet A. Bourreau, Saint-Manvieu-Norrey : Alain Bourreau
Laboratoire de microbiologie, CHU de Caen : Chantal Duhamel

Laboratoire Départemental Frank Duncombe, Caen : Valérie Bouchart, Rachel Picquet

Université de Rouen, Faculté de Médecine-Pharmacie, unité ABTE EA 4651 – équipe ToxEMAC : Philippe Verite

Mots clefs : bioaérosols, champignons lignivores, mэрule (*Serpula lacrymans*), moisissures, mutagénicité, mycotoxines

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Depuis quelques années, **le nombre d'habitations atteintes par des champignons dégradant le bois (lignivores), tels que la mэрule (*Serpula lacrymans*), est en progression**, en particulier dans l'ouest de la France. Il devient ainsi nécessaire de mieux caractériser cette atteinte fongique afin de pouvoir évaluer l'exposition des habitants.

La mэрule (figures 1 à 3), qui possède un développement rapide dans des conditions d'humidité importante, est très sporulante : son sporophore, partie fertile de la mэрule (sorte de crêpe ridée, plissée, orangée à ourlet blanc et mesurant 20 à 30 cm de diamètre), produit de nombreux spores microscopiques qui se dispersent dans l'atmosphère, colorant souvent en rouille orangé les supports sur lesquels elles se déposent. Dans les conditions optimales d'humidité et de chaleur, les spores se développent et donnent un mycélium primaire. Lorsque deux mycéliums primaires compatibles se rencontrent, ils forment un mycélium secondaire blanc (de consistance ouateuse et qui jaunit à la lumière). Le mycélium secrète des enzymes qui dégradent principalement la cellulose et les hémicelluloses, provoquant l'apparition d'une **pourriture cubique brune et sèche qui réduit dangereusement la résistance mécanique du bois d'œuvre jusqu'à la rupture des structures**.

La présence de mэрule dans des habitations **s'accompagne** le plus souvent **d'autres espèces fongiques, en particulier des moisissures potentiellement toxiques**, capables de



Figure 1 : Mycélium de mэрule.



Figure 2 : Mэрule et pourriture cubique.



Figure 3 : Sporophores de mэрule.

produire des mycotoxines dont certaines présentent un risque cancérigène. L'inhalation de poussières contenant des spores fongiques et/ou des fragments mycéliens est surtout connue pour être à l'origine **d'affections respiratoires professionnelles ou domestiques**, mais demeure encore peu explorée du point de vue de leur impact génotoxique.

Malgré la mise en évidence de mycotoxines dans les bioaérosols et les poussières sur les lieux de travail et dans les habitations, **peu d'informations existent sur les niveaux d'exposition en moisissures et mycotoxines dans ces habitats dégradés. De plus, l'impact réel de l'inhalation des mycotoxines sur la santé humaine reste encore controversé.**

En raison du manque de connaissances concernant la nature et les effets sanitaires de la contamination fongique dans ce milieu intérieur, une **approche pluridisciplinaire** a été privilégiée. Cette étude, baptisée **MYCOAEROTOX**, constitue ainsi la **première étude sur les bioaérosols dans les habitations dégradées par des champignons lignivores tels que la mérule.**

Quatre principaux objectifs ont été suivis dans cette étude MYCOAEROTOX :

- décrire le **profil fongique détaillé** de ces habitations dégradées,
- évaluer l'**exposition aux mycotoxines** dans ces habitations,
- étudier la **mutagénicité des bioaérosols** collectés,
- **caractériser les isolats fongiques** (potentiel toxigène et mutagène) issus de ces habitations.

L'étude Mycoerotox apporte des données quantitatives sur la contamination fongique en milieu intérieur, données encore peu nombreuses dans la littérature, et des informations techniques sur les modes de collecte de bioaérosols (comparaison entre deux modes de prélèvements : sur filtre et dans du liquide stérile).

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Méthodologie

Au total, 20 habitations atteintes par un champignon lignivore, essentiellement la mérule (*Serpula lacrymans*), ont été étudiées au moyen de questionnaires (habitation et santé) et de prélèvements (air et matériaux). Pour chaque habitation, deux pièces ont été expertisées : celle présentant un développement visible de champignons lignivores et une autre pièce ne présentant pas d'atteinte visible. Deux modes de collecte de bioaérosols ont été testés : sur filtre (au moyen de pompes portatives) et dans du liquide (au moyen d'un collecteur de type cyclone).

Des outils méthodologiques variés (tableau 1) ont été développés et/ou appliqués : techniques culturales (figures 4 à 6) et moléculaires de microbiologie fongique (PCR), méthode de dosage multimycotoxine par CLHP-SM, test de mutagénicité (test d'Ames).

Principaux résultats

Ce travail constitue la première étude sur les bioaérosols dans les habitations dégradées par des champignons lignivores.

Mesures physiques dans les habitations

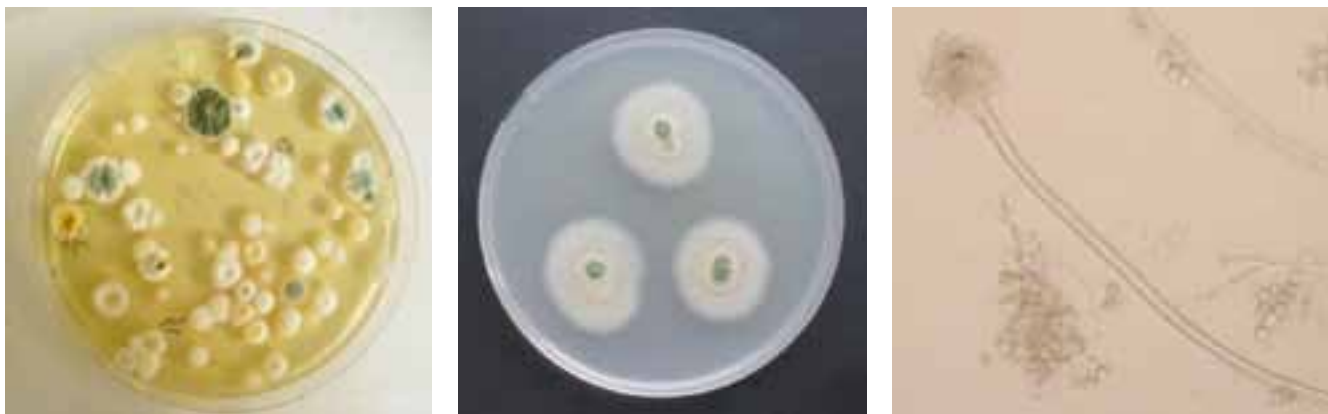
Les représentations du nombre de particules (2 à 15 µm) en fonction du temps montrent des **pics de particules** au sein des pièces étudiées. **Ces bouffées de particules indiquent qu'il est important de privilégier une mesure continue** plutôt qu'une mesure ponctuelle qui ne refléterait pas les conditions d'exposition réelles (figure 7).

Champignons lignivores dans l'air

La recherche de champignons lignivores montre que 9 habitations sur les 20 étudiées présentaient des champignons

Caractéristiques physicochimiques	Champignons et moisissures dans l'air et sur matériaux	Mycotoxines dans l'air Mycotoxines produites par les isolats fongiques	Génotoxicité des bioaérosols et des isolats fongiques
Évaluation du nombre et de la taille des particules, suivi température et humidité relative	Identification des champignons lignivores Identification et quantification des moisissures (UFC.l ⁻¹)	Recherche et quantification multimycotoxines (ng/filtre)	Nombre d'échantillons mutagènes et niveaux de réponse

Tableau 1 : Analyses effectuées dans l'étude Mycoerotox.



Figures 4 à 6 : Exemple de comptage des colonies, purification et identification d'une colonie d'*Aspergillus versicolor*.

lignivores dans l'air: *Serpula lacrymans* (mérule) dans 7 cas et *Donkioporia expansa* dans 2 cas. Pour 3 habitations, aucun champignon lignivore n'a été détecté dans l'air malgré la présence de sporophores: il s'agit, dans ces cas, de formes non actives (sporophore âgé ou non sporulant). Ces résultats démontrent que **l'exposition des habitants aux spores et fragments mycéliens de champignons lignivores est essentiellement dépendante du stade de développement du champignon**, c'est-à-dire de sa capacité à produire des spores ou des filaments mycéliens dans l'air intérieur de l'habitation.

La contamination de l'air est parfois plus complexe. En effet, dans le cas de logements atteints par *Serpula lacrymans*, les analyses de l'air ont révélé la présence simultanée d'une autre espèce de champignon lignivore: *Donkioporia expansa*. Ce basidiomycète dégradant le bois est une pourriture fibreuse s'attaquant à la lignine: son action plus discrète pourrait être complémentaire de celle de la mérule, agent de pourriture cubique qui touche essentiellement la cellulose.

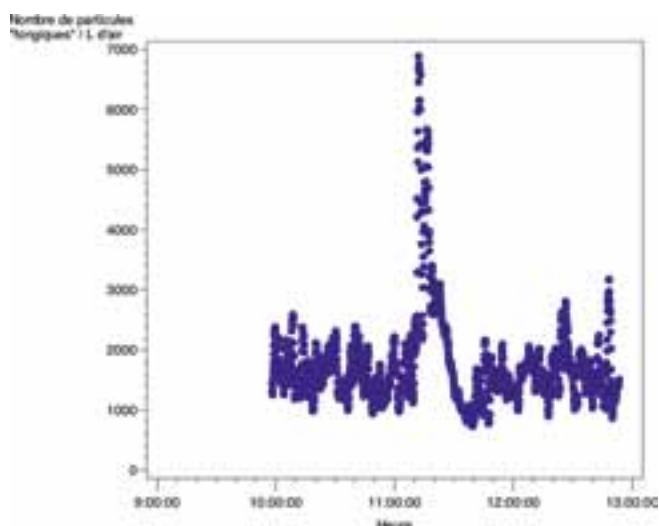


Figure 7 : Exemple de suivi du nombre de particules (2-15 µm) selon l'heure.

Moisissures dans l'air

L'analyse de la microfonge aéroportée des habitations atteintes a mis en évidence **155 espèces de moisissures** (entre 15 et 37 espèces différentes par habitation). **Certaines espèces se caractérisent par leur récurrence**, c'est le cas d'*Aspergillus fumigatus*, *A. versicolor* et *Penicillium fellutanum*. Des espèces cellulolytiques, comme *Trichoderma viride* et *Epicoccum purpurascens*, sont également présentes.

L'étude apporte également des données quantitatives sur la contamination fongique en milieu intérieur. Les niveaux globaux en contaminants fongiques (exprimés en unité formant colonie: UFC totales) s'avèrent variables selon les habitations (allant de 0,01 à plus de 300 UFC.l⁻¹ d'air). Le nombre de CFU totales est, de plus, corrélé au nombre médian de particules entre 2 et 15 µm.

***Aspergillus versicolor* et *Penicillium fellutanum* sont les deux espèces prédominantes d'un point de vue quantitatif.** Les niveaux observés sont supérieurs à ceux d'habitations non dégradées. **D'autres espèces** (comme *Aureobasidium pullulans* ou *Exophiala moniliae*) **sont peu fréquentes mais parfois présentes à des niveaux importants dans certaines habitations dégradées.**

Du point de vue métrologique, on observe une **meilleure performance du capteur liquide pour le dénombrement des structures fongiques viables.**

Mycotoxines

L'exposition aux mycotoxines dans les habitations atteintes par un champignon lignivore s'avère limitée, puisque seulement 4 habitations étaient contaminées par l'alternariol et/ou l'ochratoxine A.

De plus, **aucune activité mutagène n'a été mise en évidence à partir des bioaérosols.**

Par ailleurs, l'étude du potentiel toxigène d'isolats fongiques collectés à partir des bioaérosols montre que certains

isolats ont la capacité de produire *in vitro* de fortes concentrations en mycotoxines. C'est le cas des isolats d'*Aspergillus fumigatus*, *A. versicolor*, *A. melleus*, *Emericella nidulans*, *Eurotium repens* et *Alternaria alternata*. Une évaluation de la mutagénicité de ces isolats producteurs montre que **seuls les isolats produisant de la stérigmatocystine présentent une activité mutagène**. Celle-ci est dépendante de l'espèce testée – et donc, probablement, de son profil métabolique.

Matériaux contaminés

L'analyse de plus de 150 matériaux a permis d'identifier 107 espèces de moisissures, parmi lesquelles *Aspergillus versicolor*, *Cladosporium cladosporioides*, *Penicillium chrysogenum* et *P. fellutanum*, qui sont présentes de façon récurrente sur les matériaux des deux pièces et également détectées dans l'air des habitations (tableau 2). L'espèce cellulolytique *Trichoderma viride* apparaît très fréquemment sur les matériaux de la pièce où l'atteinte par un champignon lignivore est visible, ce qui démontre **la cohabitation et probablement l'action conjuguée des moisissures cellulolytiques avec le(s) champignon(s) lignivore(s) dans la dégradation de l'habitat**.

***Serpula lacrymans* est retrouvé sur les matériaux organiques et minéraux, sous ses trois formes (mycélium, sporophores et spores), ce qui montre sa capacité à coloniser tout type de support en émettant de longs cordons mycéliens capables de prélever de l'eau et des nutriments sur une très grande distance.**

Santé des occupants

Les habitations pour lesquelles des troubles cliniques ont été rapportés ne comportaient pas toutes la présence de spores de mэрule (la contamination se limitant parfois au développement de mycélium). En revanche, **la présence de moisissures est toujours observée**. Une habitation illustre le **rôle possible des espèces de moisissures associées à la mэрule**, avec des signes cliniques (respiratoires et cutanés) observés chez deux enfants. Un suivi post-enquête a permis de constater que ces signes sont en nette régression après déménagement de la famille. Des travaux complémentaires* ont été initiés afin de déterminer le rôle exact des moisissures dans l'apparition des problèmes de santé (en particulier, troubles respiratoires et cutanés). Il faut également noter le **fort impact psychologique** lié aux effets destructeurs du champignon sur l'habitat et aux **conséquences économiques et judiciaires** de cette atteinte.

* Une étude pilote sur les habitats humides a été réalisée de janvier à juin 2013 avec l'École de l'Asthme de Vire et l'Agence Régionale de Santé de Basse-Normandie.

Nature du matériau	Fréquence de détection d'une espèce fongique sur le support
Bois	292
Mortier	126
Plastique	46
Papier peint	35
Métal	32
Bois (chêne)	27
Peinture	22
Carrelage	21
Brique	11
Carton	10
Joints ciment entre briques	9
Revêtement minéral sur plancher bois	9
Bois + mortier	8
Moquette	7
Plâtre	7
Bois + mousse expansive	6
Polystyrène	6
PVC	4
Contreplaqué bois	3
Matelas	3
Papier	3

Tableau 2 : Fréquence de détection de champignons sur un matériau en fonction de sa nature.

ENSEIGNEMENTS DU PROJET

Les résultats obtenus permettent de mieux caractériser le risque fongique des habitations touchées par la mэрule, d'évaluer l'exposition humaine aux spores fongiques et mycotoxines en milieu intérieur, et de contribuer, en étudiant l'impact génotoxique des bioaérosols, à l'évaluation du risque de cancer lié à l'inhalation de spores fongiques et mycotoxines.

La complexité de la contamination fongique montre l'importance **d'améliorer la recherche sur les mycotoxines en milieu intérieur** (augmenter le nombre de mycotoxines quantifiées, améliorer la sensibilité de la méthode), ainsi que

d'évaluer de façon plus approfondie les profils métaboliques et toxiques des moisissures identifiées.

Des applications pratiques sont envisageables à plus court terme

Tout d'abord, la présence à des niveaux parfois très élevés de nombreuses espèces de moisissures dans les habitations atteintes par un champignon lignivore (y compris dans la pièce ne présentant pas d'atteinte visible) démontre la **circulation d'éléments fongiques dans l'habitation**. Les espèces les plus abondantes ne semblent pas spécifiques de ce type d'habitat, hormis **les espèces cellulolytiques qui pourraient alors constituer une signature de cette dégradation**.

L'étude des bioaérosols et des matériaux présentant une atteinte par un champignon lignivore montre que la contamination est parfois due à plusieurs espèces de basidiomycètes. Ceci montre **l'importance d'un diagnostic précis au sein de l'habitation. Les modalités de ce diagnostic doivent être clairement définies et ne pas se limiter à un simple examen visuel de l'habitat. Une analyse microscopique et moléculaire** (identification par PCR) **des échantillons prélevés est nécessaire**.

D'autre part, la présence des constituants fongiques viables (UFC totales) est corrélée au **nombre médian de particules de 2 à 15 µm**, ce qui pourrait faire de cette mesure de particules **un indicateur du niveau de contamination fongique dans l'habitation**.

Enfin, l'étude apporte également des informations techniques sur les modes de collecte de bioaérosols en milieu intérieur. La comparaison des deux modes de prélèvements, sur filtre et dans du liquide stérile, montre que **le capteur liquide permet de recueillir davantage de structures fongiques**. Cet effet est particulièrement visible pour certaines espèces fongiques comme *Cladosporium cladosporioides* et *Aureobasidium pullulans*. En revanche, la collecte d'*Aspergillus fumigatus* est sensiblement meilleure à partir de filtres PTFE. Ainsi même si les deux types de collecteurs sont complémentaires, **le biocollecteur de type cyclone paraît plus adapté pour une évaluation quantitative globale de l'exposition fongique dans ces habitats dégradés**. De même, une température de **mise en culture des échantillons à 25°C est optimal** pour évaluer quantitativement la contamination fongique.

VALORISATION

Participation à des congrès

- Communication orale au Congrès international ATMOS'FAIR à Lyon, le 26 septembre 2012: Virginie

Séguin, Véronique André, Jean-Philippe Rioult, Didier Pottier, Mathieu Guibert, Alain Bourreau, Rachel Picquet, Valérie Kientz-Bouchart, Philippe Vérité, David Garon. "Fungal profiles of bioaerosols collected in houses damaged by *Serpula lacrymans* and molds: exposure and genotoxicity assessment."

Publications soumises

- Publication dans la revue *World Mycotoxin Journal* : V. Séguin, S. Gente, N. Heutte, P. Vérité, V. Kientz-Bouchart, L. Sage, D. Goux, D. Garon. "First report of mycophenolic acid production by *Eurotium repens* isolated from agricultural and indoor environments"
- Publication dans la revue *Indoor Air*: D. Pottier, V. André, J-P. Rioult, A. Bourreau, C. Duhamel, V. Kientz Bouchart, E. Richard, M. Guibert, P. Vérité, D. Garon. "Airborne molds, wood-decaying fungi and mycotoxins in *Serpula lacrymans*-damaged homes"
- Une publication sur les aspects « isolats toxinogènes » sera également réalisée à partir des résultats de production de mycotoxines *in vitro* et des tests de mutagénicité réalisés sur les souches collectées dans les habitations dégradées.

Vulgarisation

Des articles ont été publiés dans des journaux « grand public » afin de présenter le projet: journal *Liberté – le bonhomme libre* (avril 2010), revue *Connexions Basse-Normandie* (mai 2010), journal *Ouest-France* (mai 2010).

Une fiche technique a été rédigée pour Bertin Technologies®.

Une plaquette de synthèse des résultats, destinée à l'ensemble des participants au projet, est également en cours de rédaction.

Expertises

Le laboratoire possède, en lien avec le Service d'Activités Industrielles et Commerciales (SAIC) de l'Université de Caen, une cellule d'expertises en mycologie: Expertises, Reconnaissances et Études en Mycologie (EREM). Cette structure, sous la responsabilité de J-Ph. Rioult et D. Garon, propose des identifications de champignons lignivores et de moisissures.

Syndromes des bâtiments malsains : analyse des facteurs environnementaux et psychosociaux

Responsable scientifique :

Dorothee MARCHAND
 Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
 Département Économie et Sciences Humaines
 PST Descartes - Bâtiment « Le Bienvenüe », Plot A – 5^e étage.
 14-20, boulevard Newton
 Champs-sur-Marne/77447 Marne-la-Vallée cedex 2
dorothee.marchand@cstb.fr

Équipes et chercheurs impliqués :

CSTB : Dorothee Marchand, Olivier Ramalho, Bernard Collignan, Joëlle-Dorcas Laffitte (thèse)

Consultant indépendant : Franck Chaventré

Université de Nîmes : Karine Weiss

Mots clefs : syndrome des bâtiments malsains, approche interdisciplinaire, méthode multicritère, enquête psychosociologique, audit du bâtiment, schéma d'évaluation et gestion des SBM.

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Ce projet de recherche, baptisé **PSYCOBAT**, visait à développer une meilleure **connaissance des processus susceptibles d'expliquer certaines crises sanitaires**, le plus souvent nommées **Syndromes des Bâtiments Malsains (SBM)**. Le SBM* se traduit par des symptômes ou des gênes aspécifiques, sans qu'aucune cause ne soit identifiée. Bien que leur étiologie reste floue, nombre de **facteurs augmentant le risque** de SBM ont été identifiés dès les années 80 : bâtiment lui-même, qualité de l'air intérieur mais également les individus.

* L'OMS a précisé le concept en le définissant comme « une condition médicale dans laquelle des individus, dans un bâtiment, souffrent de symptômes ou ne se sentent pas bien sans raison apparente » (WHO, 1995 p. 3). À quoi il est ajouté que le SBM « peut être identifié lorsque des individus dans un bâtiment développent, à une fréquence plus importante que prévue, un éventail

de symptômes courants qui causent inconfort et une sensation de mal-être » (WHO, 1995 p. 4). Cette définition met en avant une incertitude qui porte tant sur les symptômes, qui ne forment pas un tableau clinique défini, que sur le diagnostic qui est posé lorsque les symptômes sont ressentis « à une fréquence plus importante que prévue », et enfin sur les causes, puisque qu'aucune cause apparente ne peut être identifiée. Les SBM décrits dans la littérature ont tous un point commun : une partie des occupants d'un bâtiment développe un ou plusieurs symptômes (irritations, nausées, céphalées...) sur des durées plus ou moins longues en fonction de l'amplification du phénomène (nombre de cas, gravité des symptômes, communication, médiatisation, gestion, etc.). Au début de la crise, avant son signalement, l'exploitant ignore à quel phénomène il fait face : un problème ponctuel ou les prémices d'une véritable crise sanitaire ? On retrouve des cas de SBM majoritairement dans le milieu hospitalier, l'éducation et la fonction administrative publique (avec un biais possible, les informations relatives au secteur privé étant moins accessibles).

La problématique de recherche repose sur le **croisement des dimensions psychologiques, sensorielles et environnementales** susceptibles de participer à l'explication de l'évolution de ce syndrome. Cette **approche systémique** (hypothèses psychosociologiques et psycho-environnementalistes, techniques et sensorielles) présuppose que plusieurs dimensions sont impliquées dans la genèse et l'évolution des SBM.

Une hypothèse générale de travail a été choisie : l'étiologie de ces syndromes ne serait pas univoque. Trois hypothèses opérationnelles ont ainsi été étudiées :

- **l'évolution de certaines crises serait corrélée au processus de communication suivi ;**
- **le stress** déclenché par la perception d'une information environnementale ou sanitaire (odeur et/ou irritation) **pourrait être lié à un environnement social fragilisé** par des tensions ;
- la **perception de l'information** environnementale **varierait avec la représentation de l'environnement** dans lequel elle est perçue.

Une revue de littérature (nombreux retours d'expérience et études épidémiologiques) a également permis d'ancrer

la problématique des SBM dans le champ de la gestion du risque et dans les différentes disciplines mobilisées.

Ces travaux pourraient aboutir à des **outils méthodologiques opérationnels** nouveaux et/ou complémentaires à ceux déjà existants (depuis très peu de temps en France, avec le *Guide InVS* de 2010) qui restent peu connus des exploitants ou gestionnaires de bâtiments.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Méthodologie

La méthode développée reposait sur la construction d'outils permettant le **recueil et le traitement conjoint de données psychologiques, techniques et sensorielles**. Elle a nécessité une adaptation aux problématiques spécifiques des cas concrets étudiés.

Pour chacun des cas, ont été adaptés :

- une grille d'entretien individuel ;
- un ou plusieurs *focus group* ;
- des visites des bâtiments ;
- des analyses de la qualité de l'air intérieur ;
- l'analyse de documents (techniques, cartes, articles de presse, documents officiels et/ou administratifs...).

En dehors des entretiens psychologiques individuels et des *focus group*, le recueil des données sur le terrain a systématiquement été effectué de façon conjointe, **associant les chercheurs des différentes disciplines**. De la même manière, les résultats ont été analysés et écrits de façon croisée.

Recueil et analyse des données

Trois crises ont été investiguées dans les établissements suivants :

- un établissement scolaire en Bretagne ;
- une médiathèque en Champagne-Ardenne ;
- un centre médico-social en région Centre.

Le nombre d'entretiens individuels a varié en fonction des cas. Respectivement 20, 23 et 38 entretiens individuels ont été menés auprès d'agents volontaires et dans le respect de l'anonymat. Après retranscription, les données discursives ont fait l'objet d'analyses de contenu thématique. Les dimensions de ces analyses ont ensuite fait l'objet de discussion en *focus group* en vue de rapporter des éléments

auprès des groupes de travail constitués avec les différentes instances locales et nationales. Ces données étaient mises en perspective avec les données techniques, chimiques et sensorielles de PSYCOBAT, mais aussi des données cliniques et épidémiologiques disponibles dans le cadre de ces groupes de travail.

La présentation des trois études de cas reposait sur :

- une description de la situation ;
- la présentation de la méthode suivie et des données recueillies ;
- la chronologie des événements ;
- l'analyse des données (psychosociales, techniques, chimiques) ;
- les observations et préconisations faites dans le cadre de groupes de travail locaux ;
- les hypothèses explicatives formulées pour chaque crise.

Principaux résultats

Proposition d'un plan de retour d'expérience pour les SBM

Un plan de rédaction de retour d'expérience (RETEX) sur des crises sanitaires a été imaginé (voir page suivante). L'objectif de cette proposition serait de structurer les RETEX selon **une méthode commune qui en faciliterait la capitalisation et les comparaisons**.

Proposition d'un modèle d'évaluation et de gestion des syndromes des bâtiments malsains (SBM)

Un arbre de décision (figure 1) qui conjugue les volets évaluation et gestion a été proposé. Une procédure par étapes y est détaillée, ainsi que les acteurs à mobiliser à chaque phase décisionnelle :

• Phase I : origine de l'alerte

Dans un premier temps une prise en charge locale est suggérée : elle repose sur l'information des services sanitaires mais pas nécessairement sur leur mobilisation. Deux types d'informations peuvent apparaître :

- des plaintes sanitaires en relation avec l'environnement ;
- ou un nombre d'arrêts de travail ou de plaintes supérieures au bruit de fond.

L'association de la plainte avec l'environnement est réalisée, à ce stade, de manière subjective par la ou les sentinelles mobilisées. En cas de doute, il convient de ne pas écarter la plainte et de poursuivre avec le schéma proposé.

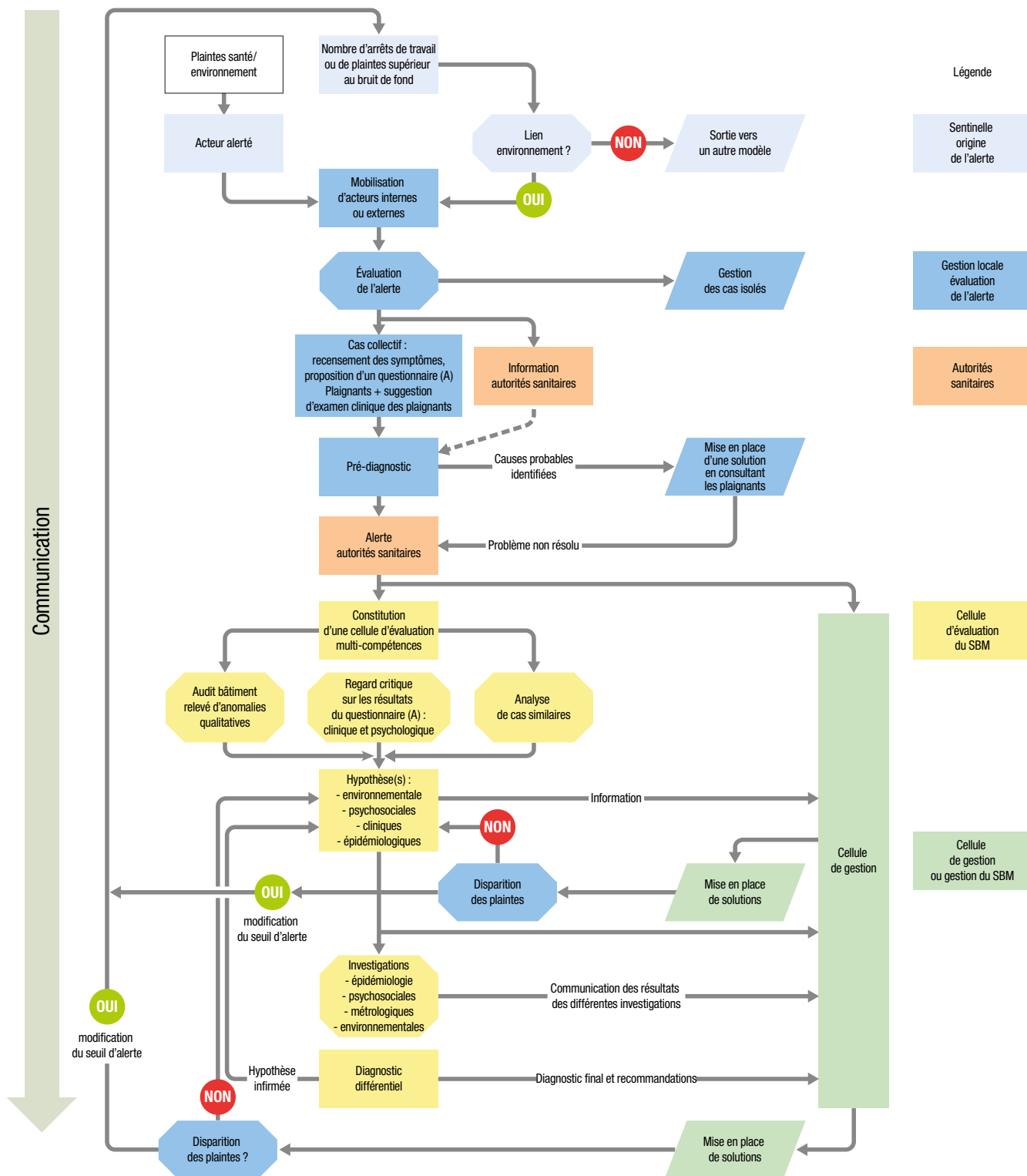


Figure 1 : Arbre de décision croisant les volets d'évaluation et de gestion des SBM.

RETEX

1. Description du contexte : lieu, alerte et saisine

- amplitude du phénomène ;
- facteur(s) déclenchant(s) si identifiés ;
- description de la situation(s) index ;
- délai de déclaration à l'ARS ;
- délai de la crise ;
- nombre de personnes touchées ;
- symptômes recensés sur une base commune de catégorisation ;
- etc.

2. Modalités de prise en charge de la crise

- adoption d'une méthode ? ;
- constitution de cellules ? ;
- description des acteurs, des responsabilités et de l'organisation de ceux-ci par rapport à la cellule de gestion de crise et la cellule scientifique (organigramme fonctionnel).

3. Chronologie des événements (précisément datée)

4. Investigations

- investigations épidémiologiques : méthode de recueil des données, résultats obtenus, analyse des données, hypothèses explicatives ;
- investigations environnementales : facteurs environnementaux déclencheurs probables et présentation des hypothèses environnementales, choix de la méthodologie d'investigation, description du bâtiment, description des usages, approche métrologique, présentation d'hypothèses explicatives et de recommandations ;
- investigations cliniques : méthode de recueil des données, résultats obtenus, analyse des données, hypothèses explicatives ;
- investigations psychosociologiques : méthode de recueil des données (entretiens individuels, *focus group*), analyse des données (analyse de contenu), résultats obtenus (dimensions explicatives données à la crise), hypothèses explicatives (dimensions psychologiques et psychosociologiques) ;
- autres investigations pertinentes ;
- interprétation collective : mise en commun des hypothèses explicatives, construction d'une hypothèse explicative globale/pluridisciplinaire.

5. Communication entre les différents acteurs

6. Suivi temporel (après la crise)

• Phase 2 : évaluation de l'alerte

Cette phase nécessite le recensement des informations qui permettront de réaliser une chronologie des événements. Les acteurs mobilisés dans la gestion locale de l'alerte peuvent être les sentinelles de la phase 1 :

- les acteurs mobilisés réalisent une **évaluation** de l'alerte : cas isolé ou collectif ; recensement des symptômes par questionnaire, pré diagnostic, examens cliniques, information des autorités sanitaires ;
- deux cas se présentent ensuite :
 - l'évaluation permet d'aboutir à un pré-diagnostic et à des solutions locales si des causes probables sont identifiées. Si le problème perdure, il convient d'alerter les autorités sanitaires ;
 - le prédiagnostic met en évidence **l'émergence d'un SBM**, c'est-à-dire qu'il ne montre pas de cause probable mais permet de constater des dégradations de l'environnement physique et social : il convient d'alerter les autorités sanitaires.

• Phase 3 : évaluation et gestion du SBM

Sont alors constituées deux cellules : une cellule d'évaluation et une cellule de gestion.

- La **cellule d'évaluation** multicritère (composition pluridisciplinaire) a pour rôle :
 - un audit du bâtiment : visite technique, analyse des plans et cahiers des charges des travaux de rénovation, historique des sols ;
 - un regard critique clinique et psychosociologique sur les résultats des questionnaires ;
 - des analyses de cas similaires ;
 - l'élaboration d'hypothèses environnementales, psychosociales, cliniques et épidémiologiques par l'analyse conjointe des différentes expertises.
- La **cellule de gestion** permet d'associer les différentes parties concernées (propriétaire du bâtiment, gestionnaire, CHSCT et services concernés) avec la cellule d'évaluation. Cette dernière y expose la progression des recherches (hypothèses, investigations, présentation des résultats par les experts). La cellule de gestion assure, par ailleurs, le relais des orientations prises par la cellule d'experts dans un processus de reconstruction de la communication ou de partage des informations.

Les investigations menées sont guidées par ces hypothèses et intègrent, selon les cas, les champs épidémiologique, psychosocial, métrologique et/ou environnemental, pour aboutir à un diagnostic différentiel consistant à mettre en évidence les différentes dimensions explicatives de la crise ainsi que les interrelations entre ces dimensions.

COMMUNICATION

Dans chacun des cas investigués, le processus de communication est une dimension explicative de l'évolution des SBM. Qu'il s'agisse d'un défaut d'écoute de la plainte, d'une circulation unilatérale de l'information, d'un partage insuffisant des résultats d'expertises, d'une mauvaise façon de les exposer, etc., la communication s'impose comme un processus complexe dont il faut définir les règles pour une meilleure gestion de crise.

Quelques **principes de communication** utiles ont été identifiés :

- phase 1 : **écoute et prise en compte de l'expression de la plainte** (un signal) ;
- phases 2 et 3 : mise en place d'un **système de communication bilatéral et dynamique**.
L'écoute et la **discussion** doivent être entendues dans un **processus continu**, pratiqué par les différentes parties en charge de l'évaluation et de la gestion ;
- idéalement, les experts mobilisés doivent expliquer leurs investigations et commenter leurs résultats en présence des gestionnaires pour asseoir la légitimité de l'expertise. La durée et l'enchaînement des différentes analyses doivent également être expliquées dès leur lancement. C'est à ce prix que les plaignants ne pourront douter des gestionnaires. Une grande transparence dans la progression des étapes de la prise en charge permet de couper court aux rumeurs et aux angoisses qui les accompagnent. De même, les incertitudes qui caractérisent le processus de recherche des causes des symptômes doivent être dédramatisées. Il vaut mieux expliquer les raisons de l'incertitude plutôt que de précipiter de fausses réponses ;
- le processus de communication doit être fluide entre les différentes parties impliquées (avec un pilotage centralisé).

Le diagnostic est communiqué à la cellule de gestion qui met en place les solutions.

Une fois les solutions mises en place :

- **soit les plaintes disparaissent** : après la résolution de la crise, le suivi sera plus sensible à des retours de plaintes et le seuil d'acceptabilité sera modifié. À cette étape, **la mise en place d'un suivi est préconisée. La littérature montre que des crises peuvent être récurrentes et resurgir parfois, même à des périodes précises de l'année ;**
- soit les plaintes perdurent : il faut alors revenir aux hypothèses pour explorer d'autres pistes.

Dans tous les cas, la communication (voir encadré) **paraît primordiale dans le succès des solutions.**

1. de dépasser les débats sur les rôles explicatifs de ces dimensions dans l'émergence et l'évolution des crises ;
2. de **proposer des solutions dans la prise en charge des SBM**. Toutefois, **la méthode présente des limites qui ne permettent pas de conclure sur l'origine des SBM.**

Validation des hypothèses

Les hypothèses ont été partiellement validées et conduisent à formuler l'hypothèse selon laquelle **l'origine des SBM trouverait une explication dans des dysfonctionnements environnementaux. Les erreurs et/ou l'absence de prise en charge adaptée dès le début de la crise auraient des incidences psychosociales** rendant d'autant plus complexe l'analyse de leur évolution.

Pistes de recherche

En complément des publications et des communications dans des colloques scientifiques, **la méthode proposée dans PSYCOBAT mériterait d'être approfondie.**

Le modèle d'évaluation et de gestion pourrait être testé dans différentes situations pour le valider et/ou le faire évoluer. Son opérationnalisation nécessite notamment la définition d'outils d'évaluation des situations, en particulier **l'élaboration d'un questionnaire de recensement des symp-**

ENSEIGNEMENTS DU PROJET

Validation critique de la méthode

La richesse des résultats atteste de la **pertinence d'une approche interdisciplinaire** dans l'investigation des SBM.

Le croisement des facteurs psychologiques et environnementaux a été indispensable pour développer une **approche multicritère** qui permet :

tômes et la création **d'échelles de stress en fonction des périodes** d'évolution d'une crise.

La méthode mérite, par ailleurs, d'être enrichie d'autres techniques n'ayant pas pu être utilisées pour l'étude. Ainsi, **la caractérisation sensorielle permettrait d'objectiver les symptômes olfactifs ressentis par les occupants en les comparant aux perceptions de personnes extérieures sans lien avec le bâtiment**. L'approfondissement de cette approche perceptive serait un moyen d'**étudier la réflexion sur la relation entre le confort** (difficilement mesurable) **et la santé**. En effet, les scientifiques sont partagés sur la distinction entre le confort et la santé; le confort est-il un indicateur de santé? L'inconfort constitue-t-il un signal de santé, un indicateur d'une situation sanitaire dégradée?

VALORISATION

Participation à des congrès

Rivière M, Laffitte J, Gayral JC, Chaventré F, Brachet D, Ramalho O, Jeannel D (2013). *23rd Conference on Epidemiology in Occupational Health, EPICOH 2.0.13*: "Improving the Impact", Utrecht, The Netherlands 18 - 21 June 2013.

Marchand D, Chaventré F, Ramalho O, Laffitte J, Collignan B, Weiss K (2012). De l'évaluation du risque à la gestion de crise. Le cas des syndromes des bâtiments malsains. *3^e Congrès National de Santé et Environnement*: «Les signaux faibles en santé environnement: de l'alerte à la décision» SFSE, Paris, 5-6 décembre 2012.

Marchand D, Laffitte J, Ramalho O, Collignan B, Chaventré F, Weiss K (2012). «De la représentation du risque environnemental à l'incertitude. Quels facteurs explicatifs de l'évolution des crises de Syndrome des Bâtiments Malsains?» *7^e Congrès de Psychologie de la Santé de langue Française*. «Individus, Familles & Sociétés». Lille, 17-19 décembre 2012.

Rivière M, Laffitte J, Gayral JC, Chaventré F, Brachet D, Ramalho O, Jeannel D (2012). «Syndrome collectif inexplicable dans un bâtiment administratif en Eure-et-Loir», *14^e Colloque de l'Aderest* «Épidémiologie en Santé et Travail», 29-30 mars 2012, La Rochelle (France), poster.

Kermarec F, Marchand D, Demillac R, Esvan M, Jourden A, Ralaivao M (2012). «Un exemple d'évaluation interdisciplinaire des syndromes collectifs inexplicables. Rennes – France». *5^e Congrès International d'Épidémiologie*, Bruxelles, 12-14 septembre 2012.

Kermarec F, Dor F, Marchand D, Demillac R, Esvan M, Briand A, Jourden A, Ralaivao M, de Amorim F, Dedourge C, Perrey C (2011). "Contribution of an interdisciplinary approach

in assessing acute sick building syndromes: a case study" *Environment and public health in modern society*. Berlin-Postdam, 7-9 novembre 2011.

Publications

Marchand D, Weiss K, Laffitte JD, Ramalho O, Chaventré F et Collignan B (*soumis pour numéro hiver 2013*). Le bien-être face aux incertitudes environnementales? *APPA – Revue Pollution Atmosphérique*.

Marchand D, Laffitte JD, Weiss K, Ramalho O, Chaventré F et Collignan B. (*soumis*). «L'incertitude, un facteur explicatif de l'évolution des crises de Syndrome des Bâtiments Malsains» *Bulletin de psychologie*. Numéro spécial sur l'Environnement.

Marchand D, Chaventré F, Ramalho O, Laffitte JD, Collignan B, Weiss K (2013). De l'évaluation du risque à la gestion de la crise: le cas du syndrome des bâtiments malsains. *Environnement, Risques et Santé* 2013; 12: 325-9. doi: 10.1684/ers.2013.0632

Demillac R, Kermarec F, Esvan M, Marchand D (2012). «Prise en charge interdisciplinaire d'un syndrome collectif inexplicable dans une école du centre-ville de Rennes (Ille-et-Vilaine)» *BEH*, n° 48, décembre 2012, p 552-555.

<http://www.invs.sante.fr/Publications-et-outils/BEH-Bulletin-epidemiologique-hebdomadaire/Derniers-numeros-et-archives/Archives/2012/BEH-n-48-2012>

Rivière M, Laffitte J, Gayral JC, Chaventré F, Brachet D, Ramalho O, Jeannel D (2012). «Syndrome collectif inexplicable dans un bâtiment administratif en Eure-et-Loir» *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 73(5), 728.

Marchand D, Weiss K, Laffitte JD (2010). «Syndrome des bâtiments malsains ou syndrome psychogène collectif? La raison face aux croyances» *Environnement, Risques et Santé*; septembre-octobre 2010, p. 401-407.

Formation

Étant donné l'absence de méthode dans l'appréhension des SBM, **le CSTB pourrait proposer une formation sur les différentes dimensions du modèle** (ARS, collectivités) **contribuant à la formation des conseillers en santé-environnement**. Cette formation pourrait être complétée par un **guide synthétique**, utilisable et appropriable par les acteurs de terrain.

PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DU PROGRAMME PRIMEQUAL

Gouvernance du programme

Le programme PRIMEQUAL est doté d'un comité d'orientation (CO) et d'un conseil scientifique (CS).

Le comité d'orientation est composé de représentants des parties prenantes concernées par le programme : ministères, agences et organismes, associations, milieux professionnels. Il exprime les besoins et contribue à la construction de la pertinence stratégique du programme. Le comité d'orientation est une interface entre le monde de la recherche, les gestionnaires, les décideurs politiques et administratifs, et le monde associatif. Il assure également les interfaces et la complémentarité avec d'autres programmes de recherche et veille à la valorisation des activités de PRIMEQUAL.

Le conseil scientifique est le garant de l'excellence scientifique du programme. Il est composé de personnes désignées *intuitu personae*, choisies pour leurs compétences scientifiques représentant la palette de disciplines du programme. Il est chargé de la formulation des questions scientifiques, en assurant notamment la rédaction des appels à propositions de recherche à partir des demandes et orientation données par le comité d'orientation. Il statue sur la pertinence et la qualité scientifique des propositions de recherche et assure le suivi du déroulement des projets. Il contribue, par ailleurs, à la valorisation des résultats.

À la gestion scientifique et technique de PRIMEQUAL assurée par le MEDDE et l'ADEME est associée une animation scientifique. Actuellement, cette fonction est assurée par l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS).

Mise en valeur des connaissances produites dans PRIMEQUAL

- Les rapports et les synthèses de recherches, les textes des appels à propositions ainsi que les différents documents de valorisation (actes de colloque, plaquettes, etc.) sont mis en ligne sur le site Internet du programme : <http://www.primequal.fr>. Citons notamment :
 - *La qualité de l'air dans nos environnements de proximité* (2012) ;
 - *Pollution atmosphérique et santé : le rôle de la perception ?* (2011) ;
 - *Qualité de l'air et particules : Impacts sur environnement et santé. Que préconiser pour demain ?* (2009).
- Huit ouvrages thématiques de synthèse ont été publiés entre 2000 et 2012, informations disponibles sur <http://www.ladocumentationfrancaise.fr>, collection *Transports, recherche innovation* :
 - *Pollution de l'air et transports terrestres : 10 ans de recherche* (2012) ;
 - *Évaluation et perception de l'exposition à la pollution atmosphérique* (2007) ;
 - *Pollution par les particules atmosphériques : état des connaissances et perspectives de la recherche* (2005) ;
 - *Que sait-on de la pollution photochimique urbaine ?* (2002) ;
 - *Quels sont les impacts de la pollution atmosphérique sur la santé ?* (2002) ;
 - *Quelles sont les techniques pour surveiller la qualité de l'air ?* (2002) ;
 - *Quels sont les facteurs influençant les émissions des véhicules ?* (2002) ;
 - *Quelles sont les expositions humaines à la pollution atmosphérique ?* (2001).

Comité d'orientation

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Commissariat général au développement durable – Direction pour la recherche et l'innovation

Service de la recherche – Présidence du CO

Conseil général de l'environnement et développement durable

Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature

Direction générale de l'énergie et du climat

Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer

Direction générale de la prévention des risques

ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie – Pilotage conjoint du programme

ANSES – Agence nationale chargée de la sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

CNA – Conseil national de l'air

CNRS/INSU – Centre national de la recherche scientifique/Institut national des sciences de l'univers

CSTB – Centre scientifique et technique du bâtiment

Fédération ATMO – Fédération nationale des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air

FNE – France Nature Environnement

InVS – Institut de veille sanitaire

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire

Direction générale des politiques agricoles, agroalimentaires et des territoires

Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Santé – Direction générale de la santé

Predit – Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres

UIC – Union des industries chimiques

Conseil scientifique

NOMS	ORGANISMES
Séverine KIRCHNER	Présidente du Conseil scientifique PRIMEQUAL Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Anne-Pauline BELLANGER	Laboratoire de parasitologie-mycologie – CHU Jean Minjot de Besançon
Patrice BLONDEAU	Laboratoire des Sciences pour l'Ingénieur en Environnement (LaSIE) - Université de La Rochelle
Nathalie BONVALLOT	École des hautes études en santé publique (EHESP)
Dave CAMPAGNA	Cellule d'épidémiologie de la RATP
Pierre CELLIER	Institut national de la recherche agronomique (INRA) – AgroParisTech
Lionel CHARLES	FRACTAL
Patrice CODDEVILLE	École des mines de Douai
Isabelle COLL	Laboratoire interuniversitaire des Systèmes atmosphériques (LISA) – Université Paris 12/ Université Paris 7
Eméric FREJAFON	Institut national de l'Environnement industriel et des risques (INERIS)
Evelyne GEHIN	Centre d'Études et de la Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes (CERTES) – Université Paris 12
Christian GEORGE	Institut de recherche sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IRCELyon) – Université Lyon 1
Philippe GLORENNEC	École des hautes études en santé publique (EHESP)
Valérie GROS	Laboratoires des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) – CEA
Walter HECQ	Centre d'études économiques et sociales de l'environnement (CEESE) – Université libre de Bruxelles
Paolo LAJ	Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'environnement (LGGE) – Université Joseph Fournier Grenoble
Stéphane LE CALVE	Laboratoire de physicochimie de l'Atmosphère (LPCA) – Centre de Géochimie de la Surface (CGS)
Cécile MALLET	Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS) – Université Paris 6
Isabelle MOMAS	Laboratoire d'épidémiologie environnementale : impact sanitaire des pollutions atmosphériques – Faculté des Sciences pharmaceutiques et biologiques, Université Paris V
Jean-Ulrich MULLOT	Institut de Médecine Aérospatiale du Service de Santé des Armées (IMASSA)
Hervé PLAISANCE	École des mines d'Alès (Pau)
Anne PROBST	Laboratoire d'écologie fonctionnelle (ÉcoLab) – Université Paul Sabatier Toulouse III
Olivier RAMALHO	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Christian SEIGNEUR	Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement atmosphérique (CEREA) – École des Ponts ParisTech
Chloé VLASSOPOULO	Centre universitaire de Recherches sur l'Action publique et le Politique (CURAPP) – Université de Picardie
Karine WEISS	Université de Nîmes

APPEL À PROPOSITIONS DE RECHERCHE PRIMEQUAL

LA QUALITÉ DE L'AIR À L'INTÉRIEUR DES BÂTIMENTS ET DES TRANSPORTS : EFFETS, CAUSES, PRÉVENTION ET GESTION

Date de clôture : 29 mai 2009.

Nombre de projets soumis : 27

Nombre de projets retenus : 9

CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'APPEL À PROPOSITIONS DE RECHERCHE (APR)

La qualité de l'air intérieur s'impose, en ce début de siècle, comme une nouvelle préoccupation importante pour les populations et les pouvoirs publics.

Il incombe à ces derniers de mettre en place des stratégies efficaces, permettant d'assurer une meilleure protection dans le contexte particulier d'espaces pour une part privés et face à des questionnement liés aux initiatives en matière de construction (renforcement de l'isolation de façon à répondre aux contraintes énergétiques).

Les espaces intérieurs mobiles (habitacles de voitures individuelles, par exemple) sont également des lieux où l'on peut enregistrer des niveaux de pollution particulièrement élevés, liés à l'environnement immédiat et la proximité au trafic, ces expositions venant s'ajouter à celles rencontrées dans les espaces fixes.

La contribution des espaces intérieurs à l'exposition des individus est très significative dans la mesure où chacun y passe de 80 à 100% de son temps. De manière générale, on rencontre des concentrations de polluants plus élevées à l'intérieur qu'à l'extérieur.

Un grand nombre d'incidents, dont un certain nombre de crises de santé publique liées à l'amiante, aux éthers de glycol ou au radon, a été constaté ces dernières années, dans lesquels des problèmes de santé et de confort des occupants se sont avérés associés aux bâtiments. Considéré comme un

abri et une protection contre les aléas extérieurs, le bâtiment devient aujourd'hui une source possible de stress environnemental pour les gens qui y vivent.

Du fait de la diversité en nature et en intensité des sources de contaminations qui y ont été identifiées, de nombreux effets sur la santé, associés à la pollution intérieure, ont pu être documentés. Aux problèmes plus anciens, relatifs à des phénomènes cliniques spécifiques tels que les intoxications par le monoxyde de carbone ou la tuberculose, liée pour partie à la promiscuité ou à l'insalubrité, a succédé une vision plus générale de la pollution de l'air intérieur, considérée globalement comme l'émergence d'un nouveau questionnement de santé publique. Les problèmes de santé associés à l'amiante, au radon, au formaldéhyde ou aux moisissures, ainsi que les symptômes non spécifiques du type irritations, le syndrome des bâtiments malsains, sont observés à grande échelle dans les environnements intérieurs. On constate également une augmentation des allergies et autres réactions d'hypersensibilité dont la cause est la détérioration de l'environnement intérieur; par exemple la présence plus importante d'agents irritants, d'allergènes en lien avec les acariens, les animaux domestiques ou nuisibles (chats, chiens, blattes, etc.) ou les moisissures. Enfin, les risques microbiologiques associés à la prolifération de bactéries ou de virus dans les bâtiments sont aujourd'hui sur le devant de la scène, avec, notamment, la menace de pandémie grippale.

La question des espaces intérieurs mobiles soulève également de multiples interrogations. Outre les émissions liées aux matériaux utilisés pour leur construction, leur aménagement ou leur décoration, ils sont aussi directement exposés aux pollutions extérieures parfois importantes des espaces

qu'ils parcourent ou traversent, dont les niveaux sont très rapidement répercutés dans l'atmosphère intérieure.

En même temps, les informations et les mises en garde face à ce type d'exposition n'ont pas fait l'objet d'une diffusion aussi massive que pour d'autres espaces intérieurs, logement, espaces de travail ou lieux accueillant du public, de telle sorte que cette réalité reste mal appréhendée par les populations.

Un certain nombre de travaux font ressortir la part importante de l'exposition dans les transports par rapport à l'ensemble de l'exposition individuelle. La logique qui s'impose ici est bien celle du cumul des expositions dans les différents espaces traversés ou occupés au fil du temps.

L'attente de plus en plus forte de la population en termes de protection et de sécurité sanitaire, ainsi que le manque de connaissance sur l'exposition des populations aux nombreuses substances présentes, ont incité les pouvoirs publics à mettre en place des actions d'envergure pour améliorer la connaissance et engager une démarche globale de prévention sanitaire avec, notamment :

- La mise en place, en 2001, de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI, www.air-interieur.org) sous la tutelle des ministères en charge de la construction, du logement, de l'écologie, de la santé, en lien avec les agences de l'Environnement (ADEME), de la sécurité sanitaire (AFSSET), de l'habitat (ANAH) et le CSTB (opérateur du programme), avec pour mission de mieux connaître la pollution intérieure des différents environnements intérieurs (logements, bureaux, lieux d'enseignement et de loisirs, etc.) et de proposer des pistes de prévention et de remédiation. Une veille documentaire régulière sur le sujet ainsi que plusieurs campagnes de mesures sont actuellement en cours sur les logements, les lieux de vie fréquentés par les enfants et les bureaux, afin d'établir des états de la pollution et identifier les déterminants responsables des situations de pollution. L'élaboration d'outils d'aide à la décision (indices de qualité d'air) est également en cours.
- L'engagement des travaux de l'AFSSET et du CSTB sur l'élaboration de valeurs guide Air Intérieur et la mise en place de protocoles d'évaluation des émissions de composés organiques volatils par les produits et les équipements devant conduire à l'étiquetage des produits de construction, d'entretien, de mobilier... (www.afsset.fr)
- Le rapport de madame Marie-Christine Blandin, sénateur, « Les risques et les dangers pour la santé humaine de substances chimiques d'usage courant : éthers de glycol et polluants de l'air intérieur » (www.assemblee-nationale.fr), rendu public le 31 janvier 2008. Celui-ci préconise de passer de la simple prévention à la précaution : en évaluant les risques, grâce à la prise en compte des expositions particulières, des cumuls d'exposition et des personnes

sensibles, en étant à l'écoute des alertes, y compris celles lancées par les consommateurs ou les professionnels, en développant une approche de la précaution, favorisant la pluridisciplinarité des recherches et expertises, disposant d'indicateurs de l'état de santé de la population et de la qualité de l'environnement et s'inspirant des expériences étrangères concluantes (nomenclatures, substitutions vertueuses, ambulances vertes en Belgique...).

Sujet identifié comme prioritaire du Grenelle de l'Environnement, la question de l'air intérieur reste, cependant, une question encore partiellement connue et comprise, dont on ne saurait sous-estimer la complexité, même si l'on a considérablement progressé ces dernières années, et cela indépendamment des évolutions et des mises en œuvre dont elle sera amenée à faire l'objet dans les années à venir pour satisfaire aux exigences énergétiques répondant aux implications croissantes du changement climatique.

Le Grenelle de l'Environnement a opté pour des objectifs ambitieux dans le domaine du bâtiment, en mettant en particulier le cap sur des Bâtiments Basse Consommation à 50 kilowatts heure d'énergie primaire par mètre carré et par an. Cet objectif sera généralisé par la réglementation pour tous les bâtiments neufs dès 2012. Ainsi, les mutations dans le domaine de la construction seront profondes et porteront notamment sur la conception architecturale, l'isolation de l'enveloppe et les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation avec, en particulier, une incitation forte pour le recours à la biomasse comme combustible.

Si l'analyse de la littérature effectuée par le réseau Recherche Santé Environnement INTérieur (RSEIN, www.rsein.ineris.fr) montre que l'on comprend de mieux en mieux les problèmes de pollution intérieure et l'interaction complexe entre le bâtiment, son utilisation et les individus qui y vivent ou y travaillent, des difficultés demeurent pour évaluer les risques liés à l'environnement intérieur. L'impact sur la santé publique d'un nombre de plus en plus important de mélanges polluants complexes, qui sont souvent de faible concentration, n'est pas encore évalué et la gestion des contaminations encore peu développée.

Par ailleurs, la question de l'air intérieur s'ancre très largement dans les comportements individuels et collectifs, les modes de vie, voire la(es) culture(s). Elle n'échappe pas à l'indétermination environnementale, que l'on retrouve dans tous les champs de l'environnement et qui en constitue la spécificité. Une telle situation, et les incertitudes qu'elle recouvre, ne saurait constituer un frein radical à l'action. Elle conduit seulement à interroger les modèles – étroitement, voire excessivement, déterministes, ne prenant en considération qu'un nombre restreint de critères – et à envisager les conditions de façon plus large, non sans lien avec la notion d'une transformation collective face à un ensemble de préoccupations émergentes.

La question de la perception et de la latitude laissées aux individus peut être profondément différente en fonction du

type de vision que l'on adopte, renvoyant également à des conceptions très différentes du fonctionnement collectif, et aux problématiques sociales qu'elles recouvrent.

Le programme national PRIMEQUAL2-PREDIT, financé par le MEEDDAT et par l'ADEME, vise à développer des outils opérationnels et des connaissances utiles aux gestionnaires, acteurs et décideurs en matière de pollution atmosphérique.

Suite à une première réflexion menée conjointement par le Conseil scientifique et le Comité d'orientation du programme, le thème de la pollution de l'air à l'intérieur des espaces clos est apparu comme un thème d'actualité et prioritaire dans le cadre de ce programme, en termes d'élaboration des connaissances sur les effets sanitaires en lien avec les expositions aux pollutions observées et le recueil d'éléments utiles à la définition des politiques publiques sur la gestion des sources et des situations de pollution, tant dans les bâtiments que les environnements intérieurs mobiles.

Le présent appel à propositions de recherche reprend notamment des actions identifiées comme prioritaires dans le cadre des discussions du Grenelle de l'Environnement, en complément des programmes de recherche menés par l'OQAI. Les recherches proposées auront ainsi pour objectif d'apporter les éclairages permettant d'atteindre ces objectifs de façon à améliorer la sécurité sanitaire dans les espaces clos.

Dans ce contexte, un certain nombre de thématiques et de questions prioritaires ont été identifiées et sont présentées ci-après.

Les environnements intérieurs concernés par l'APR sont l'ensemble des bâtiments à pollution non spécifique : logements individuels et collectifs, lieux accueillant du public (théâtres, restaurants, postes, banques, garages, hôpitaux et cliniques, prisons, musées, gymnases, piscines, gares, aéroports, etc.), bureaux, maisons de retraite, accueil des enfants (crèches, lieux de loisirs), lieux d'enseignement (écoles primaires, collèges et lycées, universités). Les environnements intérieurs mobiles liés au transport (automobile, train, avion, bateau...) entrent également dans le champ de l'APR.

L'appel à propositions favorisera des projets « intégrés » et débouchant sur des outils accessibles aux praticiens de l'action publique. Des équipes étrangères peuvent apporter leurs compétences à des projets dont la responsabilité est française.

L'APR se déroulera en une seule étape : soumission de projets détaillés.

La date de clôture de l'APR est fixée au 29 mai 2009. Les modalités de réponse sont explicitées à la fin du document. Les travaux interdisciplinaires sont fortement encouragés.

THÈMES SPÉCIFIQUES DE L'APR

Thème 1 : Mieux connaître les effets des expositions aux polluants en lien avec les pathologies à fort impact sur la santé (cancers, maladies cardiovasculaires, pathologies respiratoires...) ou la qualité de vie (syndromes psychogènes collectifs)

Plusieurs polluants ont déjà fait l'objet d'actions publiques importantes afin de corriger diverses situations à risques (amiante, plomb, radon, etc.). Cependant, les effets sanitaires de bon nombre de composés présents dans les locaux sont encore mal connus et doivent faire l'objet de recherches afin de pouvoir déterminer leur contribution aux expositions des individus. La question posée est ici de mieux caractériser les effets des expositions chroniques et aiguës aux polluants sur la santé des populations.

Les recherches s'attacheront ainsi à mieux connaître la spécificité des dangers des substances liées aux pathologies à fort impact sur la santé :

- développer la recherche et les études sur les effets des CMR de catégorie 3, ainsi que les autres agents et expositions cancérigènes classés par le CIRC (ex : perchloroéthylène) ou actuellement débattus (pesticides, retardateurs de flamme, phtalates, etc.) ;
- développer la connaissance du lien entre l'exposition particulière en association ou non avec des bactéries, moisissures, virus, et les problèmes de santé aigus d'allergies, d'asthme, etc. ;
- améliorer les connaissances sur l'impact sanitaire des particules (toxicologie, épidémiologie) en fonction des données disponibles sur leur composition physicochimique ;
- améliorer la connaissance sur la sensibilité multiple aux polluants chimiques (MCS)
- identifier la part de la pollution de l'air intérieur dans les syndromes psychogènes collectifs ;
- identifier la part de l'air intérieur sur l'exposition globale des personnes, pas uniquement par rapport à l'exposition par voie respiratoire qui est classiquement entre 80 et 100% en raison du temps passé dans des milieux intérieurs, mais aussi la part de l'air intérieur dans l'exposition toutes voies pour les polluants qui ont d'autres origines (phtalates, pesticides) ;

- rechercher des biomarqueurs ;
- mettre au point des capteurs (si possible individuels) mesurant un effet toxique global plutôt que celui d'un polluant ou d'une famille de polluants comme, par exemple : génotoxicité, cytotoxicité, perturbation hormonale, irritation/inflammation, perturbation du transport de l'oxygène, etc. ;
- estimer la part de la qualité de l'air intérieur dans l'exposition globale au regard de l'effet toxique et non plus du polluant ;
- mieux identifier les risques sanitaires des personnes vulnérables, tant au plan individuel que collectif en termes de niveau ou de conjonction de polluants dans les espaces intérieurs fixes et mobiles, en relation aux modes et aux conditions de vie.

Thème 2 : Mieux appréhender les sources et prédire les situations de pollution de l'air intérieur

La maîtrise des sources d'émission et des situations de pollution est au cœur des actions d'amélioration de la qualité de l'air. L'environnement intérieur d'un bâtiment relève de très nombreux paramètres qui peuvent avoir un impact sur la santé et le confort des occupants. On comprend de mieux en mieux la complexité des interactions entre les espaces clos, les usages auxquels ils sont soumis et les personnes qui y séjournent, vivent ou travaillent. C'est un fait que les facteurs de risque identifiés par les études épidémiologiques sur l'environnement intérieur sont associés à des conditions structurelles, telles que le choix de la conception du bâtiment, des matériaux de construction, des équipements et du mobilier, ou la façon dont le bâtiment est exploité et entretenu, les activités pratiquées dans le bâtiment et la nature de l'environnement psychosociologique.

Les principales sources de contamination sont les occupants eux-mêmes et leurs activités (ex : bio-effluents, fumée de tabac, cuisine, etc.), les matériaux et fournitures de construction (ex : revêtements de murs et de sols, peintures, matériaux d'isolation, etc.), ainsi que les équipements et systèmes du bâtiment (ex : chauffage, systèmes de ventilation et de traitement d'air, photocopieurs). Des agents de contamination extérieurs viennent s'ajouter à cette pollution endogène.

Les recherches apporteront des éléments utiles pour :

– En termes de sources de pollution,

- caractériser/modéliser les émissions des différentes sources et situations de pollution rencontrées dans l'air intérieur et, en particulier, des produits innovants ;
- caractériser les émissions des matériaux et produits à partir de la connaissance de leur composition ;

- quantifier les facteurs qui influencent les émissions de polluants (température, hygrométrie, phénomènes d'adsorption/désorption, etc.) ;
- estimer la contribution (part attribuable) des différentes sources (matériaux, équipements, mobiliers, produits de consommation, air ambiant extérieur...) dans un environnement donné : élaboration de traceurs de pollution, modélisations. On s'intéressera, en particulier, à estimer l'incidence de l'utilisation des énergies renouvelables solaire, biomasse, stockage d'énergie sur la pollution de l'air intérieur ;
- estimer la part des polluants secondaires issus de la réactivité chimique sur la qualité de l'air intérieur ;
- caractériser l'évolution des émissions de polluants durant la vie des produits et matériaux ;
- identifier des produits et/ou techniques de substitution à des substances identifiées comme nuisibles pour la santé ;
- développer des outils permettant la traçabilité des matériaux, des produits et des modalités d'utilisation mis en œuvre dans les espaces clos : dispositions méthodologiques, constitution de mémoires, identification, archivages.

– En termes d'exposition,

- prédire les expositions à la pollution à partir des données d'émission ;
- caractériser les expositions aux polluants les moins renseignés : composés semi-volatils (notamment pesticides, polluants organiques persistants, phtalates, retardateurs de flamme), aux agents biologiques (virus, bactéries, moisissures). Élaborer des protocoles de prélèvement et d'analyse pour la mesure de ces polluants permettant de caractériser à grande échelle les situations de pollution ;
- développer et harmoniser des méthodes de caractérisation physicochimique des particules et leur granulométrie, et améliorer les connaissances sur la composition physicochimique des particules intérieures et leur granulométrie, en vue d'études toxicologiques et épidémiologiques. Rechercher les déterminants de la composition chimique des particules (pour les différentes fractions granulométriques). Caractériser les typologies chimiques des particules rencontrées dans les atmosphères intérieures et rechercher leur spécificité (différences, similitudes) avec la typologie chimique des particules rencontrées à l'extérieur ;
- élaborer les techniques de mesures adaptées et facilement « disséminables » pour le suivi

de la qualité de l'air intérieur (kit de mesure rapide, capteurs, échantillonneur personnel pour les particules, échantillonneurs passifs, etc.) ;

- caractériser la contamination microbiologique de l'air intérieur, notamment en lien avec risques de pandémie : caractérisation et survie des biocontaminants dans les espaces clos ;
- élaborer des stratégies pour qualifier les expositions à long terme et à court terme à partir de stratégies d'échantillonnage opérationnelles.

Thème 3 : Aérer, ventiler et climatiser sainement

La maîtrise des mouvements d'air va prendre une importance croissante. L'air sera à la fois vecteur thermique et source d'air neuf. La gestion de l'air à l'intérieur des bâtiments va ainsi devenir un élément central de la réduction des consommations d'énergie.

Les consommations induites pour réchauffer ou rafraîchir l'air entrant pourront, en proportion de l'énergie totale nécessaire au bâtiment, représenter jusqu'à 40 % des consommations dans les bâtiments les mieux isolés. Seront privilégiées pour atteindre les objectifs énergétiques : la récupération de chaleur de l'air extrait et la régulation fine des débits de renouvellement d'air en fonction de l'occupation des bâtiments et d'indicateurs suivis par des capteurs.

En parallèle, on assistera à l'incorporation croissante, dans les dispositifs de gestion de l'air, de systèmes de traitement (filtration, épuration, décontamination) ayant pour objectif de diminuer les expositions aux différents contaminants, qu'ils soient apportés par l'air extérieur, générés par les produits ou activités présentes dans les bâtiments ou résultant de la présence humaine.

Ces orientations devraient favoriser d'importantes innovations technologiques dans les années à venir, dont il conviendra d'évaluer l'efficacité et l'innocuité.

Les recherches proposées s'attacheront à :

- estimer les modes de défaillances des systèmes de gestion d'air en situation ;
- élaborer des critères d'évaluation intégrés des performances des systèmes de gestion de l'air (ventilation, climatisation, traitement d'air) en situation ou en lien avec la rénovation, tenant compte de critères sanitaires et de performance énergétique des bâtiments ;
- élaborer des outils d'aide à la décision pour aider les prescripteurs, maîtres d'ouvrages,

maîtres d'œuvre, à évaluer l'impact des choix technologiques sur la qualité d'air intérieur ;

- développer des outils et méthodes permettant de vérifier les performances et l'innocuité des options technologiques actuelles ou nouvelles (systèmes de ventilation et de traitements d'air, voire épuration par les plantes), tenant compte des conditions d'utilisation dans les espaces clos ;
- développer des indicateurs de qualité d'air utiles à la gestion de l'air ;
- estimer/modéliser l'impact des conditions d'aération et de ventilation dans le transfert de la pollution de l'air extérieur sur l'air intérieur ;
- étudier les dynamiques socio-économiques associées à ces évolutions, information des consommateurs/ usagers, évolution des professions et des marchés, usages et extension des usages, *setbacks*, etc.

Thème 4 : Mieux appréhender la part et le rôle des espaces intérieurs mobiles dans les expositions

Intuitivement, les espaces intérieurs mobiles (véhicules individuels, transports en commun, avion, bateau) ne sont pas directement associés aux espaces intérieurs fixes et se situent dans des discontinuités par rapport à ceux-ci. Mais, d'un autre côté, ils participent très directement des continuités à travers lesquelles peuvent s'appréhender les expositions. Deux modalités différentes d'investigation peuvent correspondre à cette problématique :

- des approches quantitatives, qui s'efforcent d'appréhender les spécificités de ces environnements et d'en évaluer les caractéristiques, dans l'appréhension des sources endogènes et extérieures, évidemment très variables selon le type de transport, individuel ou collectif, etc., et notamment :
 - la caractérisation de l'impact des environnements traversés sur la pollution à l'intérieur de ces espaces ;
 - la part attribuable des sources (intérieures, extérieures) ou des situations de pollution (réactivité chimique) sur la pollution des espaces intérieurs mobiles ;
 - l'efficacité des systèmes de ventilation et de traitements d'air en lien avec la pollution observée ;
- des approches qualitatives qui s'efforcent de saisir les spécificités, mais aussi les continuités, des perceptions de ces espaces en termes de qualité de l'air par rapport aux autres espaces intérieurs, publics ou privés.

Thème 5 : Mener des stratégies de prévention efficaces

La prévention ne constitue guère une stratégie d'intervention à part entière en France et reste souvent cantonnée aux discours. Dans de nombreux domaines, le curatif tend à être privilégié au détriment du préventif. Le plus souvent, la prévention est envisagée en termes d'actions de communication, ou encore de façon normative par la promotion de règles ou de normes comportementales et sociales à faible fondement dans les pratiques des individus, de telle sorte que les résultats de ces initiatives sont probablement très limités, même s'il est très difficile de les évaluer, comme d'en affirmer les bienfaits, tant les évaluations à ce sujet sont rares. Les investissements en ce sens sont pour le moment faibles. Il est probable que les actions d'information et de communication très générales ont d'abord pour effet d'accroître les inquiétudes des populations, plutôt que de leur permettre d'élaborer des réponses concrètes à des situations qui sont ainsi perçues comme d'autant plus stressantes. D'un autre côté, les questions de l'air intérieur concernent très largement des espaces privés, objets de la part de leurs occupants d'investissement très spécifiques, et qui appellent donc une attention particulière sur les enjeux liés à ce type de situation. On se situe ici au plus près des dimensions subjectives, voire inconscientes, inhérentes à l'environnement. Par ailleurs, cette question interpelle aussi la responsabilité qui incombe à tout un chacun dans son quotidien. Dans le domaine de l'environnement en général et de sa relation avec la santé, comme dans celui de la qualité de l'air, de celle de l'air intérieur et de leur dimension sanitaire, la prévention constitue une ressource importante, voire cruciale, face à des situations de risques majeurs comme de pandémie grippale ; mais elle appelle également une réflexion approfondie quant aux conditions de sa mise en œuvre, ainsi que du passage à la précaution.

Les recherches attendues dans ce cadre concerneront les conditions pour mettre en place une prévention efficace. Le sens de la prévention est de mettre les individus concernés en position d'agir, et de leur offrir des ressources pour l'action, c'est-à-dire de les reconnaître comme acteurs, donc comme autonomes et capables d'élaborer des points de vue et des stratégies pertinentes, à partir du moment où un certain nombre de conditions sont réunies.

La question de la quantification en termes d'impact économique de la qualité de l'air intérieur (coût sanitaire, impact sur la productivité, indicateurs de qualité de vie, etc.) est également posée dans le but de dresser un bilan quantifié des détriments liés à la pollution intérieure et d'estimer la relation coûts/bénéfices de politiques publiques qu'il serait possible d'envisager et de mettre sur pied. Une compréhension fine de ces processus d'action devra fournir aux acteurs et institutions impliqués dans la gestion de la qualité de l'air intérieur des éclairages et des outils d'action pertinents, afin d'élaborer des stratégies de prévention plus efficaces. C'est

dans cette finalité que sont encouragées les recherches sur les questions suivantes.

5.1 - Améliorer la compréhension des comportements et des pratiques individuelles

Les espaces intérieurs sont des lieux de vie, d'activité et de travail, de relation et de communication, de diverses pratiques, objets d'investissements et chargés d'imaginaires importants, marqués par de multiples ajustements et de nombreuses habitudes en lien avec l'expérience quotidienne :

- Comment accompagner la prise de conscience des occupants des bâtiments sur les situations et les activités qui contribuent à émettre des substances toxiques dans l'air intérieur (fumée de cigarettes, cuisine, utilisation d'aérosols, de peintures, etc.), celles qui contribuent à les contenir en milieu clos (calfeutrage pour réduire les consommations énergétiques, etc.), celles qui contribuent au contraire à réduire ces émissions (changement des pratiques concernant les usages de produits toxiques, etc.) et celles qui contribuent à les évacuer (aération, etc.) ?
- Comment intégrer les préoccupations des différents acteurs sur la qualité de l'air intérieur au regard d'un ensemble d'autres préoccupations et pratiques (confort thermique, odeur, acte d'achat, préoccupations pour les autres membres de la famille, etc.) pour permettre l'action ?

Des observations sur l'évolution éventuelle des comportements individuels seront appréciées :

- Comment faire évoluer le degré d'attention qu'accordent les individus selon les contextes, privés ou professionnels (catégories à construire et à définir), à la qualité de l'air intérieur et aux activités qui permettent de l'améliorer ?
- Comment identifier les éléments empiriques concrets (relations avec les proches dans le cadre familial, relations sociales informelles, échanges dans le cadre professionnel, expérience d'une pathologie, relations avec les professionnels de santé, engagement associatif, etc.), dans le réseau de relations des individus, qui participent d'un changement de pratiques pour une amélioration de la qualité de l'air ?

Pour cela, seront encouragés des projets qui se baseront sur des travaux empiriques solides, si possible comparatifs, prenant en considération les activités concrètes des populations étudiées.

5.2 – Mieux comprendre les modalités de l'action collective pour décider

La problématique de la qualité de l'air intérieur concerne un très large éventail de domaines (logement, travail, transports, loisirs) et d'acteurs de l'action collective, privés ou publics, depuis les médecins en passant par de nombreuses industries et organisations professionnelles jusqu'aux instances institutionnelles et administratives en matière de santé environnementale aux différentes échelles – nationale, régionale ou locale.

- Quels acteurs sont susceptibles d'intervenir de manière utile pour gérer les problématiques de pollution de l'air intérieur ?

La pollution atmosphérique a été décrite comme étant l'objet de faibles mobilisations locales et n'a cessé d'éprouver des difficultés à s'afficher en tant que risque sanitaire dans l'agenda politique.

- Comment mobiliser de manière active les populations et les gestionnaires de risques à l'échelle locale sur ces questions ?
- Peut-on valoriser les connaissances sur les systèmes d'actions qui ont fait leurs preuves dans l'air extérieur ?

Cette interrogation sur les mobilisations peut, dans une certaine mesure, renvoyer aux interrogations quant aux processus d'alerte et de crise ayant concerné des problématiques comme l'amiante ou des éthers de glycol :

- Comment prévenir les situations de crise ou améliorer le traitement (politique, scientifique) des processus d'alerte et de crise ?
- Quels acteurs spécifiques peuvent jouer un rôle décisif dans la survenue de ces crises sanitaires ?

Les transformations professionnelles liées aux nouvelles exigences qui affectent le secteur du bâtiment soulèvent des interrogations nouvelles. L'évolution des matériaux et des manières de construire, en alliant notamment préoccupation énergétique et sanitaire, amène d'importantes mutations dans les corps de métiers concernés.

- Comment favoriser les capacités à innover et améliorer les bâtiments au regard des critères sanitaires et énergétiques ?
- Comment améliorer les voies de formation et d'apprentissage ?
- Comment réorganiser et faire évoluer les différentes filières impliquées ?

Des approches en sociologie des professions peuvent, à ce titre, apporter des éclairages utiles.

Enfin, en termes d'analyse des politiques publiques, au moins deux processus méritent que l'on y prête attention : l'élabo-

ration, et la mise en œuvre des politiques (communautaires, nationales, locales) de la qualité de l'air intérieur. Une des spécificités, mais aussi des difficultés, de l'action publique dans ce domaine est de se situer à l'interface avec des univers professionnels ou privés, qui impliquent donc des modalités, des entrées tout à fait spécifiques et adaptées. Dans les processus d'élaboration de ces politiques, une attention particulière pourra être accordée aux activités réglementaires, aux processus de construction de normes, et en particulier aux relations qui s'établissent dans ce cadre entre le scientifique et le politique. Par exemple, l'élaboration des valeurs guides servant de base *in fine* à l'étiquetage des produits de construction, d'entretien ou de mobilier, résultent *a priori* de négociations faisant interagir des démarches scientifiques, juridiques, économiques et politiques. Des projets de recherche développant des approches juridiques et socio-politiques, quant à l'élaboration mais aussi la réception de normes par les publics concernés, seront particulièrement bienvenus pour apporter des éclairages sur ces aspects.

Toujours en termes d'élaboration des politiques publiques, le récent processus d'élaboration du deuxième Plan National de Santé-Environnement (PNSE2) permet de soulever légitimement quelques interrogations concernant la manière dont est problématisée, ou « cadrée », la question de la qualité de l'air. Le PNSE2 opère, par exemple, un lien entre inégalités environnementales et inégalités sociales (paragraphe 2.4), ou encore entre l'insalubrité des logements et la pollution (paragraphe 2.3). Ces constats ne vont pourtant pas de soi :

- Les logements les plus insalubres sont-ils les plus pollués ?
- À l'inverse, les logements les plus confortables sont-ils les plus sains ?
- Comment se construisent alors les cadres cognitifs de la qualité de l'air et comment ces effets de *framing* induisent-ils la manière de répondre aux problèmes, de qualifier les acteurs compétents pour y répondre ?

Des analyses des controverses sociotechniques à l'œuvre au sein de ces processus de définition du problème public pourront vraisemblablement apporter des éclairages pertinents sur ces questions.

Concernant les activités de mise en œuvre des politiques publiques, le choix des terrains par les proposant sera déterminant quant à la définition de la problématique et sera à justifier. Il sera, par exemple, intéressant d'observer et d'analyser la réalité des pratiques au sein des actes d'achat et de vente immobilière suite à l'obligation d'états et de diagnostics techniques (cf. ordonnance du 8 juin 2005), des effets des mesures de défiscalisation, ou de la réalisation des étiquetages et des actes de consommation qu'y s'y rapportent.

Enfin, la question se pose de savoir comment articuler les actions publiques en matière de qualité de l'air intérieur avec les politiques publiques qui lui sont connexes, notamment

celle de la construction et de l'énergie? L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur se traduisent vraisemblablement par des activités et pratiques parfois antagoniques: comment accompagner les acteurs et les institutions qui portent ces différentes préoccupations afin qu'ils articulent les dispositifs qu'ils mettent en œuvre pour répondre à chacun de ces problèmes, qu'il s'agisse de dispositifs techniques, juridiques, de communication et d'information, ou autres?

Des recherches construites sur des démarches comparatives (internationales, interrégionales, intersectorielles, etc.) pourront apporter une véritable valeur ajoutée à la compréhension des logiques à l'œuvre dans la gestion et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur; elles sont particulièrement encouragées. Cela s'inscrit, notamment, dans l'esprit du rapport du sénateur M.-C. Blandin, qui incite aux approches comparées avec des démarches de pays étrangers.

5.3 - Évaluer les coûts et les bénéfices des actions préventives

Des études économiques sont menées depuis des années pour chiffrer l'impact des pollutions de l'air sur la santé humaine, les bâtiments, l'agriculture et les écosystèmes; elles ont renforcé les connaissances sur des relations entre les émissions, la concentration de gaz et particules et la valeur des dommages.

Cependant, dans ce cadre, les études économiques restent encore assez peu nombreuses, intégrées dans quelques programmes (NEEDS, ExternE, etc.) et l'analyse des méthodologies développées montre que leurs résultats sont souvent dépassés, dispersés ou inutilisables dans des contextes spécifiques. Beaucoup d'études omettent de prendre en considération la pollution de l'air intérieur. Les impacts de la pollution intérieure ciblent essentiellement les dommages à la santé humaine, et plus particulièrement les atteintes à la fonction respiratoire et cardiovasculaire. S'y ajoute la dégradation prématurée de matériaux de construction, peintures et œuvres d'art.

Le coût économique de cet impact de la pollution de l'air intérieur reste largement méconnu, les études se focalisant sur la pollution extérieure. Par ailleurs, des questions plus spécifiques sont aujourd'hui posées en termes économiques, dont les réponses permettraient d'engager de manière plus rationnelle les politiques de gestion:

- Peut-on affecter un coût au retour à la salubrité pour les logements anciens?
- Quel surcoût pour la construction d'un nouveau logement dont la QAI serait satisfaisante?
- Quelles solutions économiques peut-on proposer pour que le traitement des locaux anciens ou la conception des locaux à construire soient techniquement fiables

et durables, énergétiquement et sanitairelement optimaux tout en étant socialement acceptables?

- Quelle prise en charge économique de ces améliorations bâtementaires proposées (quel partage de rôles entre l'État, bailleurs de fonds et propriétaires/locataires)?

Identifier les lacunes dans la connaissance et dans les données pour calculer convenablement les coûts reste une tâche préalable essentielle. Dans ce cadre, des synergies avec les études (épidémiologiques, notamment) des autres volets de cet appel sont importantes.

Trois types de coûts peuvent être différenciés – les coûts directs, indirects et intangibles:

- les coûts directs ont trait aux soins de santé (coût de la maladie) et à la mortalité précoce: dans ce domaine, la distinction entre ceux couverts et non couverts par les assurances est utile.
- les coûts indirects concernent les conséquences de la maladie: pertes de productivité, absentéisme, coûts de garde d'enfants malades, etc.
- les coûts intangibles portent sur la perte de qualité de vie, comme la gêne et la souffrance, la non-opportunité de pratiquer une activité récréative. Ils sont souvent oubliés, et pourtant considérés comme critiques. Les rares études publiées dans la littérature mentionnent qu'ils sont loin d'être négligeables (50% des coûts totaux).

Il s'agit d'identifier les connaissances sur les composants de coûts (certains sont souvent ignorés), d'affiner les méthodologies (méthodes des préférences révélées et établies, de transférabilité, d'actualisation) pour les évaluer, mais aussi de délimiter leur étendue en précisant des échelles de temps. La méthodologie est complexe et, compte tenu des moyens nécessaires, il est utile de mettre en balance le degré de détail et la portée des estimations, tout en considérant les incertitudes sur la monétarisation des dommages.

L'objectif final sera d'apporter des éléments utiles pour l'aide à la décision en matière de santé publique, tout en apportant des arguments pour dégager des priorités. Dans ce domaine, une distinction entre coûts évitables et non évitables est la bienvenue.

Responsables du programme

MEDDE

Ministère de l'Écologie, du Développement durable
et de l'Énergie

Commissariat Général au Développement durable
Direction de la Recherche et de l'Innovation
Service de la Recherche

www.developpement-durable.gouv.fr
lionel.moulin@developpement-durable.gouv.fr

ADEME

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
Direction Villes et Territoires durables
Service Évaluation de la Qualité de l'Air

www.ademe.fr
nathalie.poisson@ademe.fr

Animation scientifique du programme

INERIS

Institut National de l'Environnement industriel
et des Risques

Direction des Risques Chroniques

www.ineris.fr
caroline.marchand@ineris.fr

Pour actualiser vos connaissances sur la qualité de l'air,
accédez à plus d'informations scientifiques sur le site
du programme PRIMEQUAL:
www.primequal.fr



Réf. ADEME 7884
Novembre 2013
ISBN 978-2-35838-445-2

