

# ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR, QUALITÉ DE L'AIR ET SANTÉ

## Article

### Campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches en France Résultats de la première phase

### Monitoring indoor air quality in French schools and day-care centres Results from the first phase of the pilot survey

Nicolas MICHELOT<sup>1</sup>, Corinne MANDIN<sup>2</sup>, Olivier RAMALHO<sup>2</sup>, Jacques RIBERON<sup>2</sup>,  
Caroline MARCHAND<sup>3</sup>, Laure MALHERBE<sup>3</sup>, Martine RAMEL<sup>3</sup>, Marie-Blanche PERSONNAZ<sup>4</sup>,  
Véronique DELMAS<sup>5</sup>, Soizic URBAN<sup>6</sup>, Marie CARREGA<sup>7</sup>

#### Résumé

En préparation de la surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches décidée à l'occasion du Grenelle Environnement, une campagne pilote a été engagée en septembre 2009. Une première phase s'est terminée à l'été 2010. Elle a porté sur 160 écoles et crèches réparties dans 13 régions. Les autres régions françaises font l'objet d'une deuxième phase de mesures depuis septembre 2010. Durant cette phase pilote, plusieurs paramètres ont été mesurés : deux polluants chimiques (le benzène et le formaldéhyde) et le confinement des salles de classe ou d'activités. En complément, un diagnostic simple de chaque bâtiment a été réalisé. Les résultats montrent, si l'on se réfère aux valeurs de gestion proposées par le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP), que la qualité de l'air est acceptable dans la plupart des écoles et crèches expérimentées pour ces paramètres. Néanmoins, quelques situations nécessitent des diagnostics complémentaires et des mesures correctives. En outre, 16 % des salles instrumentées sont insuffisamment ventilées (25 % dans les écoles élémentaires). Les maires et chefs d'établissement ont été informés des résultats et bénéficient, le cas échéant, de moyens d'expertise pour tenter d'identifier les sources principales de pollution et mettre en place les actions nécessaires.

#### Mots-clés

Pollution air intérieur. Surveillance. Écoles. Crèches. Confinement. Formaldéhyde. Benzène.

1. MEDDTL/DGEC/Bureau de la qualité de l'air – Arche nord – 92055 La Défense Cedex  
[nicolas.michelot@developpement-durable.gouv.fr](mailto:nicolas.michelot@developpement-durable.gouv.fr)

2. Université Paris-Est – Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) – 84, avenue Jean Jaurès – B.P. 2 – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-La-Vallée Cedex 2 – [corinne.mandin@cstb.fr](mailto:corinne.mandin@cstb.fr) – [olivier.ramalho@cstb.fr](mailto:olivier.ramalho@cstb.fr) – [jacques.riberon@cstb.fr](mailto:jacques.riberon@cstb.fr)

3. Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) – Parc technologique ALATA – B.P. 2 – 60550 Verneuil-en-Halatte – [caroline.marchand@ineris.fr](mailto:caroline.marchand@ineris.fr) – [laure.malherbe@ineris.fr](mailto:laure.malherbe@ineris.fr) – [martine.ramel@ineris.fr](mailto:martine.ramel@ineris.fr)

4. ATMO Rhône-Alpes – [mbpersonnaz@atmo-rhonealpes.org](mailto:mbpersonnaz@atmo-rhonealpes.org)

5. ATMO France/Air Normand – 3, place de la Pomme d'Or – 76000 Rouen – [veronique.delmas@airnormand.fr](mailto:veronique.delmas@airnormand.fr)

6. Ministère de la santé/DGS/Bureau de l'environnement intérieur – milieux du travail et accidents de la vie courante – 14, avenue Duquesne – 75350 Paris 07 SP – [soizic.urban@sante.gouv.fr](mailto:soizic.urban@sante.gouv.fr)

7. MEDDTL/DGPR/Bureau de la prospective, de l'évaluation et des données – Arche nord – 92055 La Défense Cedex  
[marie.carrega@developpement-durable.gouv.fr](mailto:marie.carrega@developpement-durable.gouv.fr)

## Abstract

A nationwide monitoring system of indoor air quality in public premises, especially with vulnerable populations such as children, has been decided in the frame of the "Grenelle Environnement". The first phase of a pilot study took place from September 2009 to June 2010, and involved 160 schools and day-care centres across 13 regions. The other French regions are taking part in a second wave, begun in September 2010. This campaign has focused on several parameters: two chemical pollutants (benzene and formaldehyde), the air stuffiness. In addition, a simple audit of each building was carried out. The results show, with respect to the management values put forward by the French committee for public health (HCSP), that air quality is overall acceptable in most schools and day-care centres which have taken part in this study. Nonetheless, a few cases require additional diagnoses or corrective measures. Furthermore, 16% of classrooms were found to be insufficiently ventilated (25% in elementary schools). The Mayors and School Principals were notified, and were provided means to identify the main sources of pollution as well as to implement remediation measures.

## Keywords

Indoor air pollution. Monitoring. Schools. Day-care centres. Air stuffiness. Formaldehyde. Benzene.

## Introduction

Le principe d'une surveillance obligatoire de la qualité de l'air intérieur dans les lieux clos recevant du public a été introduit lors du Grenelle Environnement et acté dans le second plan national santé-environnement (PNSE2) et dans la loi de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle Environnement, dite Grenelle 1, du 3 août 2009. Afin de définir les modalités de cette surveillance, une campagne pilote est conduite au niveau national sur la période 2009-2011. La première phase a débuté en septembre 2009 pour se terminer à l'été 2010. Elle a concerné 160 écoles et crèches réparties dans 13 régions françaises. Une seconde phase portant sur environ 150 établissements supplémentaires situés dans les autres régions françaises a commencé à la rentrée 2010. Au total, plus de 300 établissements auront été expérimentés sur la période d'étude. Ces établissements, volontaires pour participer, sont de configuration variée (petits ou grands bâtiments) et localisés dans des environnements contrastés (proche d'une route ou en zone rurale par exemple). Cependant, l'échantillon expérimenté ne prétend pas être représentatif du parc français d'écoles et crèches.

Diligentée et financée par le ministère chargé de l'environnement, en lien avec les ministères chargés de la santé et de l'éducation nationale, cette campagne est menée avec l'appui technique et organisationnel, au niveau national, de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), dans le cadre de ses missions au sein du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), et du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Les mesures ont été réalisées par les Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Des spécialistes en audit technique des bâtiments sont également intervenus pour le diagnostic des établissements. L'objectif de cette campagne est de valider les protocoles de surveillance et les modalités de gestion qui devront être mis en œuvre : polluants recherchés, nombre de prélèvements selon la configuration des locaux, recherche des causes de pollution, mesures correctives, etc.

La campagne de mesures a porté sur deux polluants, choisis du fait de leur classement comme prioritaires par l'Agence nationale de sécurité sanitaire (ANSES, anciennement AFSSET) :

- le formaldéhyde, substance irritante pour le nez et les voies respiratoires, émise par certains matériaux de construction, le mobilier, certaines colles, les produits d'entretien en tant qu'agent désinfectant... Ce composé a été reclassé en 2004 comme cancérigène certain pour l'homme (groupe 1) par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) sur la base des données observées sur les cancers du nasopharynx ;
- le benzène, substance issue principalement de combustions (gaz d'échappement automobile notamment). Ce composé est classé par le CIRC comme cancérigène certain pour l'homme (groupe 1) sur la base d'excès de leucémies observés lors d'expositions professionnelles et est également classé cancérigène de catégorie 1 par l'Union européenne.

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), produit par la respiration des occupants et les activités de combustion, a également été mesuré. Il permet de déterminer le niveau de confinement de l'air des locaux. Bien que le CO<sub>2</sub> ne présente pas lui-même d'effet notable sur la santé aux niveaux rencontrés dans l'environnement, un confinement élevé semble associé à une prévalence des symptômes respiratoires [1].

Afin d'être les plus représentatives possible de l'exposition à long terme des enfants, les mesures ont duré de une à deux semaines, en présence des enfants. Les concentrations en formaldéhyde peuvent varier fortement d'une saison à l'autre, c'est pourquoi ce polluant ainsi que le benzène ont été mesurés à deux saisons différentes.

À la campagne de mesures proprement dite, a été associée la réalisation, par des professionnels du bâtiment, d'un diagnostic technique du bâtiment sur une demi-journée. L'objectif de ce diagnostic est de décrire de façon générale le bâtiment et son environnement proche, de faire l'inventaire de l'état du système de chauffage et de ventilation, ainsi que ses usages (activités, produits) eu égard à des impacts

possibles sur la qualité de l'air intérieur. Il a parfois permis d'orienter l'investigation vers de premières pistes d'explication lorsque des niveaux de concentration ou de confinement élevés étaient mesurés.

Cet article présente en premier lieu les méthodes et matériels mis en place durant cette campagne, y compris les valeurs de gestion proposées pour le benzène et le formaldéhyde par l'ANSES et le HCSP utilisées pour l'interprétation des résultats de cette phase pilote. Puis, sont présentés les résultats de la première phase pour les deux indicateurs chimiques et le confinement de l'air intérieur, ainsi que pour les diagnostics des bâtiments.

## 1. Matériels et méthodes

### 1.1. Indicateurs chimiques : formaldéhyde et benzène

Les protocoles mis en œuvre dans le cadre de cette campagne pilote, pour le suivi du formaldéhyde et du benzène, sont basés sur ceux élaborés dans le cadre des travaux du LCSQA en 2008 [2].

Le formaldéhyde et le benzène ont été mesurés à l'aide de tubes passifs à diffusion radiale (respectivement cartouches code 165/corps diffusifs code 120-1 et cartouches code 145/corps diffusifs code 120-2) [3], avec un échantillonnage du lundi au vendredi, soit sur 4,5 jours afin d'être plus représentatif de l'exposition des occupants au regard de la métrologie mise en œuvre.

L'analyse du formaldéhyde est réalisée par désorption chimique, suivie d'une analyse par chromatographie liquide haute performance (HPLC) couplée à un détecteur ultraviolet. Celle du benzène est réalisée par désorption thermique, suivie d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse (GC) couplée à une détection par ionisation de flamme (FID) et/ou spectrométrie de masse (MS). Le détail des méthodes analytiques est fourni dans les protocoles LCSQA [2].

La température moyenne sur la durée de prélèvement a également été consignée et prise en compte pour corriger le débit d'échantillonnage.

#### *Stratégie d'échantillonnage temporel*

Afin de prendre en compte la variabilité temporelle des concentrations de ces deux composés en air intérieur, deux périodes de mesures ont été définies, visant des conditions climatiques contrastées tout en étant compatibles avec les contraintes logistiques. Elles sont, par la suite, appelées « été » et « hiver » pour simplification :

- « été » : 14 septembre 2009-16 octobre 2009 et 29 mars 2010-28 mai 2010 ;
- « hiver » : 9 novembre 2009-26 février 2010.

Les mesures ont eu lieu uniquement en période d'occupation des locaux, en dehors des vacances scolaires. Les mêmes salles ont été instrumentées à deux reprises, en « été » et en « hiver », sur une période de 4,5 jours à chaque fois. Les salles d'un établissement sont suivies simultanément pour une même période.

#### *Étude de la représentativité temporelle du formaldéhyde*

Concernant le formaldéhyde, douze établissements, répartis dans des régions distinctes, ont fait l'objet de suivis temporels, avec un suivi continu du formaldéhyde pendant quatre mois<sup>8</sup>, pour évaluer la pertinence de l'échantillonnage temporel proposé dans les protocoles LCSQA [2] et l'incertitude associée. Pour chaque établissement, ces « quatre mois » couvraient à la fois une partie de la période dite « été » et une partie de la période dite « hiver ». Le reste des établissements a été étudié comme pour le benzène, à savoir un prélèvement de 4,5 jours, au choix durant la période dite « été » et durant la période dite « hiver ».

#### *Stratégie d'échantillonnage spatial*

Pour chaque établissement, une à deux salles ont été suivies par niveau<sup>9</sup>, selon la règle suivante : si le niveau comprenait jusqu'à trois salles, une seule était instrumentée, au-delà, deux salles l'étaient. On entend par salle, toute salle de classe ou pièce de vie occupée par les enseignants et les élèves dans le cadre de l'enseignement scolaire, hors activités spécifiques (ateliers de peinture, bibliothèque, ...). Ainsi, tout logement ou bureau de fonction ou encore les locaux techniques n'ont pas été pris en compte. Concernant les crèches, les dortoirs n'ont pas été investigués.

Pour le benzène, un point extérieur a également été réalisé pour chaque période. Si une seule salle était instrumentée, le point extérieur a été réalisé du même côté que la salle suivie. Si plusieurs salles étaient instrumentées, le point extérieur était réalisé du côté considéré comme le plus « pollué » (côté rue par exemple).

#### *Assurance qualité*

Des blancs de lot et de site ont également été réalisés afin de vérifier l'absence de contamination initiale sur les cartouches utilisées ainsi que celle potentiellement liée au transport et à la mise en œuvre sur site. Par ailleurs, dans chaque établissement, une des salles a été instrumentée avec deux tubes en parallèle afin d'avoir un contrôle sur la répétabilité de la mesure. Les critères de validation des blancs et des répliqués sont détaillés dans les protocoles LCSQA [2].

8. Semaines « consécutives » mais hors vacances scolaires ou semaines de cours/garde incomplètes.

9. Est considéré comme niveau à instrumenter un étage appartenant à un bloc « bâtimentaire » homogène (bâtiment ou partie de bâtiment présentant des caractéristiques de construction similaires (année de construction ou de rénovation, structure du bâti)).

## 1.2. Confinement de l'air intérieur

Le confinement de l'air à l'intérieur d'une pièce d'un bâtiment fait appel à deux notions facilement perceptibles : l'espace disponible à l'intérieur de cette pièce (spaciosité ou exiguïté) et le renouvellement de l'air (ou l'aération) de cette pièce.

Un air confiné est un air insuffisamment renouvelé, compte tenu des polluants qu'il contient, polluants notamment d'origine métabolique liés à la présence humaine. Moins la pièce est spacieuse, c'est-à-dire plus la densité d'occupation est forte, plus la pièce doit être aérée, pour éviter le confinement.

*Indicateur de confinement de l'air dans les écoles (ICONE)*

Un bon indicateur du confinement de l'air intérieur est la mesure du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Le CO<sub>2</sub> est émis par la respiration des personnes présentes (production métabolique). Un indice de confinement, appelé ICONE (Indice de CONfinement d'air dans les Ecoles), a été développé en 2008 par le CSTB [4]. L'indice est calculé à partir de la fréquence et de l'intensité des niveaux élevés de CO<sub>2</sub> autour des valeurs seuils de 1 000 et 1 700 ppm en tenant compte uniquement des périodes d'occupation de la salle. Une salle est dite occupée à partir du moment où au moins la moitié de l'effectif habituel des enfants est présent. Le niveau de confinement de la pièce est alors exprimé par une note sur une échelle de 0 à 5. La note 0 correspond au confinement nul (niveau de CO<sub>2</sub> toujours inférieur à 1 000 ppm), c'est la situation la plus favorable. La note 5 correspond au confinement extrême, c'est la situation la plus défavorable (niveau de CO<sub>2</sub> toujours supérieur à 1 700 ppm pendant l'occupation). Les notes intermédiaires correspondent à un gradient de situation de dépassement du niveau de CO<sub>2</sub> autour de ces deux valeurs.

L'indice ICONE est calculé sur la base d'une semaine de cinq jours ouvrés sur la période de mesure définie de 12 jours. Le résultat final est la moyenne des deux notes hebdomadaires arrondie à l'entier le plus proche pour représenter une des six catégories de confinement. Ce mode de calcul permet de représenter au mieux et de manière solide le confinement en minimisant les aléas de sous-occupation des locaux ou d'événements particuliers pouvant avoir lieu durant la semaine.

Tableau 1.  
État du confinement suivant la valeur de l'indice ICONE.  
*Air stuffiness according to the ICONE index.*

| ICONE | État du confinement    |
|-------|------------------------|
| 0     | Confinement nul        |
| 1     | Confinement faible     |
| 2     | Confinement moyen      |
| 3     | Confinement élevé      |
| 4     | Confinement très élevé |
| 5     | Confinement extrême    |

Pour les suivis temporels poussés, la note finale de la salle représente la moyenne des notes hebdomadaires sur la seule période hivernale (de novembre 2009 à février 2010), de manière à être comparable aux autres établissements instrumentés uniquement en hiver pour ce paramètre.

### Valeur de référence

L'indice de confinement reflète la qualité du renouvellement de l'air du local pour une occupation donnée. Par conséquent, une atmosphère très confinée associée à la présence d'une source significative de polluants, augmente significativement le risque d'observer des niveaux de concentrations très élevées. Il n'y a pas à ce jour de valeurs de référence pour le confinement. Dans cette attente, il est proposé d'être tout particulièrement attentif aux situations de confinement très élevées (ICONE = 4) ou extrêmes (ICONE = 5).

### Stratégie d'échantillonnage

Le CO<sub>2</sub> a été mesuré en continu avec un pas de temps de 10 minutes pendant deux semaines successives à l'aide d'un appareil développé au CSTB basé sur un capteur à infrarouge non dispersif (Lum'Air) [8]. La mesure a été réalisée uniquement sur la période hivernale dans les pièces déjà instrumentées pour la mesure des polluants chimiques.

Dans le même temps, les plages d'occupation des enfants étaient renseignées par les enquêteurs à l'aide d'un logiciel embarqué permettant le recueil de l'ensemble des données des différentes équipes locales vers une base de données commune. L'occupation et le niveau de CO<sub>2</sub> permettent alors de calculer pour chaque salle l'indice de confinement. Les deux semaines d'enregistrement permettent de s'assurer de la robustesse du calcul de l'indice indépendamment des aléas d'occupation. Ainsi, l'indice traduit la qualité du renouvellement de l'air des salles durant l'occupation mais ne fournit pas d'information sur les périodes inoccupées. La mise en perspective des résultats de confinement avec ceux de benzène et de formaldéhyde doit être faite avec précaution dans la mesure où ces dernières données intègrent à la fois des périodes d'occupation et d'inoccupation (nuits notamment).

Le résultat pour chaque salle instrumentée est une valeur de l'indice correspondant à un état de confinement. À l'échelle de l'établissement, un confinement moyen n'a pas de sens. Le critère d'agrégation retenu à l'échelle de l'établissement est donc l'indice maximal observé parmi les salles instrumentées.

## 1.3. Déroulement opérationnel des mesures

Les interventions au sein des écoles et crèches sélectionnées se déroulent selon les protocoles de mesure du formaldéhyde et benzène du LCSQA [2].

Après une première visite de l'établissement en présence d'une personne de la direction, ainsi que du service technique de la collectivité, les salles de classe sont sélectionnées selon la typologie du bâtiment, définie dans la partie « Échantillonnage spatial » du document.

Suite à cette première prise de connaissance du lieu, deux périodes (« été » et « hiver ») de deux semaines ( $2 \times 4,5$  jours) sont planifiées avec la direction et la mairie afin d'instrumenter les différentes classes sélectionnées. L'intervention s'effectue avant l'arrivée des enfants le lundi matin, généralement avant 8 h 30, afin d'éviter de perturber le bon déroulement des cours. L'intervention consiste à suspendre au plafond deux types de tubes à diffusion passifs (Photo 1), l'un pour le benzène et l'autre le formaldéhyde. Des répliqués de mesures, des blancs de lot, ainsi que des blancs de site sont également installés afin de servir de critère de validation des concentrations intérieures et extérieures. La dépose des tubes a lieu lorsque les enfants ont quitté la salle de classe, le vendredi suivant généralement vers 16 h 45. Ces prélèvements sont ensuite envoyés dans deux laboratoires d'AASQA : le GIE-LIC pour les analyses des tubes de formaldéhyde, et ATMO-Picardie pour celles des tubes benzène.

Les mesures de confinement, de température et d'humidité relative sont réalisées sur une durée de 11,5 jours respectivement à l'aide de l'appareil



Photo 1.

Disposition de tubes passifs en hauteur (formaldéhyde et benzène) et de l'appareil Lum'air en fond de classe.

Passive samplers of formaldehyde and benzene near the ceiling and the Lum'air sensor at the back of the room [Source : Air Normand].

Lum'air [8] et de sondes de température et d'hygrométrie (Enregistreur Ebro Ebi 20). Installés en même temps que les tubes à diffusion, ces appareils sont récupérés le vendredi suivant le retrait des tubes à diffusion (fin de la seconde semaine). La lecture des données pour ces paramètres s'effectue directement des logiciels de téléchargement de données.

Toutes les données (résultats des analyses et fichiers déchargés) sont ensuite sauvegardées *via* Internet dans la base de données AUDE créée par le CSTB à cet effet.

Cette visite initiale permet aussi d'inviter les différents responsables au comité de pilotage (COPIL) mis en place localement pour assurer le suivi de l'étude et présenter les résultats.

En outre, un COPIL national pilote le déroulement de la campagne. Il analyse plus particulièrement les cas difficiles, pour proposer des solutions de gestion aux ministères et aux acteurs locaux.

## 1.4. Diagnostic du bâtiment

Le diagnostic technique du bâtiment correspond à une grille de questions structurée selon une approche bâtiment, c'est-à-dire établissement/bloc homogène/pièce, et organisée autour des éléments suivants :

- à l'échelle de l'établissement :
  - description générale de l'établissement,
  - description de l'environnement proche de l'établissement,
  - ménage/nettoyage usuel des locaux,
  - activités et produits d'activités dans les locaux, équipements,
  - produits de désinfection, d'assainissement ou d'épuration de l'air ;
- pour chaque bloc homogène identifié :
  - description du bloc homogène (âge, type de construction, etc.),
  - système de chauffage et de climatisation,
  - mode d'aération et système de ventilation ;
- pour chaque pièce instrumentée :
  - réalisation de travaux récents,
  - descriptif des ouvrants,
  - descriptif des revêtements intérieurs et du mobilier,
  - activités spécifiques,
  - descriptif des éléments permettant la ventilation de la pièce ;
- commentaires généraux de l'expert relatifs à l'ambiance et au confort ;
- conclusion de l'expert.

Le questionnaire est renseigné par l'expert qui s'appuie sur ses observations, mais également sur les éléments fournis par le directeur de l'établissement, le personnel travaillant dans la pièce, le personnel technique ou le personnel d'entretien selon la nature des questions.

Les diagnostics ont été réalisés durant la période de chauffe afin d'observer les systèmes de chauffage en fonctionnement (entre novembre 2009 et février 2010). Le diagnostic n'inclut aucune mesure.

Outre le rapport descriptif des éléments relevés dans l'établissement, une classification du bâtiment au regard de plusieurs critères est proposée. Cette classification permet d'identifier, à partir des réponses aux questions du diagnostic :

- des points d'alertes, sur lesquels l'attention du gestionnaire est tout particulièrement attirée et qui peuvent nécessiter une action : il s'agit par exemple de la présence de traces visibles de moisissures ;
- des points de vigilance : ces éléments sont moins critiques, mais nécessitent de faire quelques vérifications ; par exemple, si l'établissement est déclaré comme étant sur un ancien site industriel, il convient de se documenter sur la possible pollution passée. Autre exemple : si une climatisation est installée dans le bâtiment, l'attention du gestionnaire est attirée vers l'entretien régulier du système ;
- les points faibles ou « points noirs » du bâtiment au regard de quatre critères :
  - l'environnement extérieur,
  - les produits d'entretien utilisés,
  - les activités dans le bâtiment,
  - les systèmes de ventilation.

## 2. Gestion des résultats : utilisation des valeurs préconisées par le HCSP et l'ANSES

Il n'existe pas, à ce jour, de valeurs réglementaires dans l'air intérieur pour les deux indicateurs chimiques retenus. Des valeurs guides de qualité d'air intérieur basées exclusivement sur des critères sanitaires ont été proposées par l'ANSES pour le formaldéhyde et le benzène [5-6]. En deçà de ces valeurs, le risque sanitaire est considéré comme négligeable ou acceptable, le dépassement de ces seuils n'impliquant pas pour autant nécessairement l'apparition d'effets sur la santé. Sur la base des valeurs de l'ANSES, le HCSP a défini des valeurs dites « de gestion » pour prendre en compte ces critères sanitaires, tout en les mettant en perspective avec les concentrations techniquement atteignables actuellement. Le HCSP a rendu ses conclusions en octobre 2009 [7] pour le formaldéhyde et pour le benzène en juin 2010 [8]. L'ensemble de ces valeurs a été considéré pour cette campagne pilote en cours.

Pour le formaldéhyde, les résultats obtenus issus de la moyenne des concentrations mesurées lors des deux campagnes (été et hiver) de mesure ont ainsi été comparés aux valeurs préconisées par le HCSP :

- en dessous de 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , les valeurs atteintes sont considérées comme satisfaisantes et ne justifient pas d'action spécifique ;

- entre 30 et 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , les actions d'amélioration de la situation et de sensibilisation du personnel à la problématique de la qualité de l'air intérieur sont laissées à l'initiative du maire et du directeur d'établissement ;
- entre 50 et 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , il est fortement recommandé que soient menées des investigations complémentaires, permettant l'identification des sources de pollution, et d'engager les actions appropriées en vue d'améliorer la situation, et ce dans un délai de quelques mois ;
- au-delà de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , un diagnostic approfondi des sources et facteurs de pollution est conduit à la demande du ministère chargé de l'environnement. Ce diagnostic peut conduire à des préconisations de travaux et/ou de réorganisation des activités afin de diminuer sensiblement l'exposition des enfants et des personnels.

Pour le benzène, les résultats obtenus issus de la moyenne des concentrations mesurées lors des deux campagnes (été et hiver) de mesure ont été comparés aux valeurs préconisées par l'ANSES pour cette phase 1 (2009-2010), et à celles préconisées par le HCSP pour la phase 2 en cours (2010-2011). Les valeurs du HCSP sont cohérentes avec celles de l'ANSES, mais les modalités de gestion des résultats sont désormais précisées :

- en dessous de 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  : les teneurs mesurées témoignent d'une bonne qualité d'air vis-à-vis de ce polluant, mais il convient de garder à l'esprit que le benzène est considéré comme un cancérogène sans seuil d'effet et que l'objectif doit être de toujours réduire les concentrations à un niveau aussi bas que raisonnablement possible (principe ALARA) ;
- entre 2 et 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  : aucune action corrective spécifique n'est préconisée aujourd'hui par le HCSP. À partir de 2012, cette valeur repère évoluera avec une pente de décroissance de 1,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  par an jusqu'à la valeur cible qui devrait être atteinte en 2015. Dans le cadre de la campagne de surveillance dans les écoles et crèches, les actions d'amélioration de la situation et de sensibilisation du personnel à la problématique de la qualité de l'air intérieur sont laissées à l'initiative du maire et du directeur d'établissement. Toutefois, lorsque la concentration extérieure dépasse celle mesurée à l'intérieur et se situe au-delà de l'objectif de qualité en air extérieur de 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , les ministères chargés de l'environnement et de la santé ont recommandé que soient menées par les autorités compétentes et l'AASQA locale des investigations complémentaires permettant l'identification des sources de pollution extérieures, en vue d'améliorer la situation, sans que cette action ne revête un caractère obligatoire et d'urgence ;
- au-delà de 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , le HCSP considère qu'il est nécessaire d'identifier les sources intérieures en cause afin d'engager si possible des actions appropriées de réduction des émissions (notamment, dans l'habitat, les sources de combustion et le tabagisme) ou, à défaut, d'instaurer des procédures de ventilation des locaux de nature à diminuer les niveaux inté-

rieurs. Par ailleurs, lorsque la concentration extérieure dépasse celle mesurée à l'intérieur et se situe au-delà de la valeur limite en air extérieur de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , il est recommandé que soient menées par les autorités compétentes et l'AASQA locale des investigations complémentaires permettant l'identification des sources de pollution extérieures, en vue d'améliorer rapidement la situation. Dans le cadre de la campagne de surveillance, les ministères chargés de l'environnement et de la santé ont distingué deux situations :

- entre 5 et  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , il est fortement recommandé que soient menées des investigations complémentaires, permettant l'identification des sources de pollution, et d'engager les actions appropriées en vue d'améliorer la situation, et ce dans un délai de quelques mois.
- au-delà de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , un diagnostic approfondi des sources et facteurs de pollution est conduit à la demande du ministère chargé de l'environnement. Ce diagnostic peut conduire à des préconisations de travaux et/ou de réorganisation des activités afin de diminuer sensiblement l'exposition des enfants et des personnels.

## 3. Résultats

### 3.1. Descriptif des écoles et crèches

Les 160 écoles et crèches sélectionnées pour cette première phase présentent des caractéristiques et situations très différentes, au regard de leur situation géographique (Tableau 2) et de leur année de construction (Tableau 3). La majorité des établissements instrumentés est située en zone urbaine. Aucun bâtiment récent (*i.e.* construit après 2008) n'a été sélectionné. 56 % des bâtiments instrumentés ont été construits après 1969 (78 % pour les crèches). 64 % des écoles élémentaires sélectionnées datent d'avant 1970.

### 3.2 Indicateurs chimiques : formaldéhyde et benzène

#### Expression des résultats

Les résultats relatifs au formaldéhyde et au benzène sont exprimés en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les débits de diffusion ont été corrigés en fonction de la température. En

Tableau 2.  
Situation géographique  
des écoles et crèches de la phase 1.

Geographical situation  
of schools and day-care centres types from phase 1.

| Situation de l'établissement | Global | Crèches | Maternelles | Élémentaires |
|------------------------------|--------|---------|-------------|--------------|
| Zone périurbaine             | 28     | 12      | 11          | 5            |
| Zone rurale                  | 20     | 1       | 12          | 7            |
| Zone urbaine                 | 112    | 33      | 38          | 41           |
| Effectif total               | 160    | 46      | 61          | 53           |

Tableau 3.  
Répartition (%) des blocs bâtimementaires  
selon l'année de construction.

Distribution of buildings  
according to the year of construction (%).

| Année de construction | Global<br>(N = 255) | Crèches<br>(N = 53) | Maternelles<br>(N = 100) | Élémentaires<br>(N = 102) |
|-----------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|
| Avant 1900            | 12                  | 7                   | 6                        | 20                        |
| De 1900 à 1945        | 9                   | 6                   | 10                       | 10                        |
| De 1946 à 1960        | 15                  | 6                   | 10                       | 22                        |
| De 1961 à 1969        | 9                   | 4                   | 12                       | 11                        |
| De 1970 à 1979        | 22                  | 25                  | 28                       | 14                        |
| De 1980 à 1989        | 13                  | 9                   | 17                       | 11                        |
| De 1990 à 1999        | 6                   | 7                   | 9                        | 2                         |
| De 2000 à 2008        | 14                  | 36                  | 8                        | 10                        |
| 2009 +                | 0                   | 0                   | 0                        | 0                         |

revanche, les concentrations n'ont pas été normalisées par rapport à une température et une pression de référence étant donné que les valeurs de référence en air intérieur ne sont pas exprimées pour une température (et une pression) définie et que cela est plus représentatif en termes d'exposition.

Dans un souci de représentativité par rapport à une exposition annuelle, la moyenne de la mesure dite « été » et de la mesure dite « hiver » a été considérée afin de positionner les résultats par rapport aux valeurs de référence.

Tableau 4.  
Concentrations moyennes annuelles à l'échelle de l'établissement ; effectif = 160 établissements.  
Annual mean concentrations of formaldehyde and benzene (n = 160 schools and day-care centres).

| Concentration moyenne en formaldéhyde<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Répartition (%) | Concentration moyenne en benzène<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Répartition (%) |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 0 à 30                                                                | 89,4            | 0 à 2                                                            | 44,7            |
| 30 à 50                                                               | 8,8             | 2 à 5                                                            | 52,8            |
| 50 à 100                                                              | 1,8             | 5 à 10                                                           | 2,5             |
| Supérieure à 100                                                      | 0,0             | Supérieure à 10                                                  | 0,0             |

Tableau 5.  
Concentrations moyennes annuelles à l'échelle des salles instrumentées ; effectif = 431 salles.  
Annual mean concentrations of formaldehyde and benzene (n=431 classrooms or activity rooms).

| Concentration moyenne en <b>formaldéhyde</b> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Répartition (%) | Concentration moyenne en <b>benzène</b> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Répartition (%) |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 0 à 30                                                                    | 85,6            | 0 à 2                                                                | 39,7            |
| 30 à 50                                                                   | 11,9            | 2 à 5                                                                | 58,6            |
| 50 à 100                                                                  | 2,5             | 5 à 10                                                               | 1,4             |
| Supérieure à 100                                                          | 0,0             | Supérieure à 10                                                      | 0,3             |

## Concentrations moyennes « annuelles » en formaldéhyde et benzène

Les concentrations moyennes mesurées sont détaillées dans les tableaux 4 et 5. Le tableau 4 donne la répartition des concentrations moyennes à l'échelle de chaque établissement, alors que le tableau 5 fournit la répartition des concentrations à l'échelle de chaque salle instrumentée.

Les médianes des concentrations en formaldéhyde et benzène se situent respectivement à  $15,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur la base de l'échantillon composé des 431 salles instrumentées.

Concernant le formaldéhyde, plus de 85 % des établissements présentent des concentrations  $\leq 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En revanche, pour le benzène, plus de la moitié des établissements présente des concentrations strictement supérieures à  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mais dans 75 % des cas, la concentration intérieure est équivalente à la concentration extérieure aux incertitudes de mesures près<sup>10</sup>. Parmi les établissements ayant des concentrations entre 2 et  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 75 % d'entre eux ont des concentrations  $\leq 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## Répartition des concentrations moyennes « annuelles » selon le type d'établissement

La mise en perspective des données relatives aux crèches, écoles maternelles et écoles élémentaires montre que les moyennes « annuelles » en formaldéhyde sont  $\leq 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans 98 % des crèches, dans 96 % des écoles élémentaires, mais dans seulement 77 % des écoles maternelles pour lesquelles 18 % des établissements présentent des concentrations moyennes « annuelles » entre 30 et  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Concernant le benzène, les moyennes « annuelles » sont  $\leq 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans 54 % des écoles maternelles, dans 47 % des écoles élémentaires, mais dans seulement 30 % des crèches pour lesquelles 65 % des établissements présentent des concentrations moyennes « annuelles » entre 2 et  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Il n'existe pas de lien apparent entre les concentrations de formaldéhyde et de benzène selon le type d'établissement.

## Variabilité saisonnière

Chaque établissement ayant été instrumenté à deux reprises, une fois en période dite « été » et une fois en période dite « hiver », l'écart entre les moyennes obtenues à l'échelle de l'établissement entre les deux mesures est présenté sur les figures 1 et 2 pour le formaldéhyde et le benzène respectivement<sup>11</sup>.

Concernant le formaldéhyde, les écarts entre la mesure « été » et la mesure « hiver » sont compris entre  $-8,8$  (moyenne « hiver » > moyenne « été ») et  $39,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , avec un écart moyen de  $4,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,

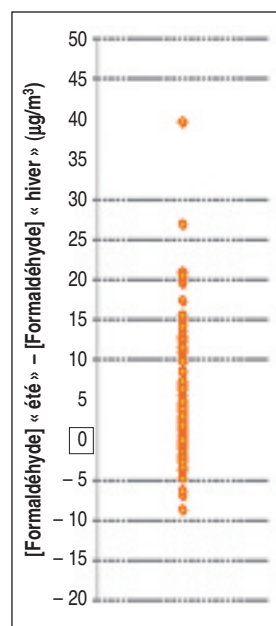


Figure 1.  
Distribution des écarts, pour chaque établissement, entre la concentration moyenne « été » et la concentration moyenne « hiver » de formaldéhyde.  
Distribution of differences between summer and winter formaldehyde mean concentration for each building.

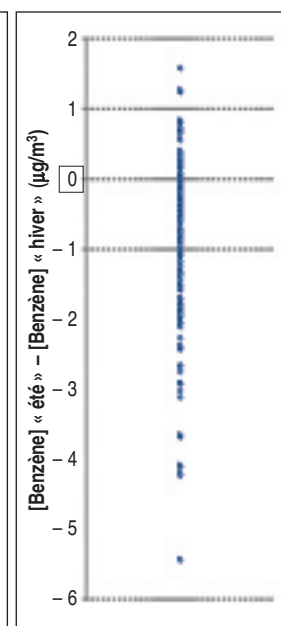


Figure 2.  
Distribution des écarts, pour chaque établissement, entre la concentration moyenne « été » et la concentration moyenne « hiver » de benzène.  
Distribution of differences between summer and winter benzene mean concentration for each building.

10. Une incertitude de 30 % a été considérée pour la mesure par tubes passifs.

11. Les DOM représentant des situations particulières en termes de saison, les données relatives à ces établissements ne sont pas prises en compte dans cette comparaison.

impliquant que les concentrations « estivales » sont en moyenne supérieures aux concentrations « hivernales ». Pour le benzène, les écarts entre la mesure « été » et la mesure « hiver » sont compris entre  $-5,5$  et  $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , avec un écart moyen de  $-0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , impliquant que les concentrations « hivernales » sont en moyenne supérieures aux concentrations « estivales ».

## Variabilité spatiale intra-établissement

Pour 108 des 160 établissements échantillonnés, deux à huit pièces ont été instrumentées. Les coefficients de variation intra-établissement ( $C_{\text{Vintra-ETAB}}$ ) concernant les moyennes « annuelles » pour le formaldéhyde et le benzène ont été étudiés.

Concernant le formaldéhyde, 50 % des établissements ont un coefficient de variation inférieur ou égal à 20 %, 75 % un coefficient de variation inférieur ou égal à 29 % (gamme des  $C_{\text{Vintra-ETAB}}$  : 1 à 76 %).

Concernant le benzène, 50 % des établissements ont un coefficient de variation inférieur ou égal à 8 %, 75 % un coefficient de variation inférieur ou égal à 12 % (gamme des  $C_{\text{Vintra-ETAB}}$  : 1 à 87 %).

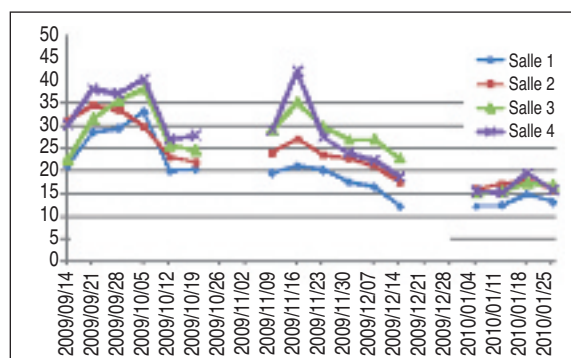


Figure 3.

Exemple de suivi temporel du formaldéhyde, pour quatre salles de classe d'un établissement.

Example of temporal monitoring of formaldehyde concentration in four classrooms from the same school.

## Incertitude liée à la stratégie d'échantillonnage

### Étude de la représentativité temporelle du formaldéhyde<sup>12</sup>

Afin d'affiner l'étude de l'incertitude liée à la stratégie d'échantillonnage temporel, douze établissements ont fait l'objet de suivis temporels dans une ou plusieurs pièces, comme illustré sur la figure 4, avec un suivi permanent du formaldéhyde pendant quatre mois, couvrant à la fois une partie de la période « estivale », une partie de la période « hivernale » et une partie de la période de « transition » entre les deux saisons. Ainsi, chaque série de mesure (16 semaines de mesure pour chaque salle instrumentée, soit 21 séries de mesure) peut être découpée selon trois strates temporelles (« estivale », « hivernale » et « transition »). Ces strates sont considérées comme une partition complète de l'année. En effet, par simplification, à défaut de données sur une année complète, l'hypothèse est faite que chaque série de mesure représente exhaustivement l'année et qu'elle restitue correctement la variabilité temporelle de la concentration de formaldéhyde tout au long de cette année.

Sur la base des 21 séries de mesure exploitables pour cette étude, l'incertitude théorique associée à différents plans d'échantillonnage a été calculée selon la théorie des sondages, en fonction de la variance des concentrations à l'intérieur de chaque strate temporelle et du nombre de mesures tiré dans chaque strate [9, 10]. Une synthèse des résultats est présentée dans le tableau 6.

La ligne grisée correspond à la stratégie d'échantillonnage mise en œuvre dans le cadre de la campagne pilote. Il en ressort que l'incertitude sur l'estimation de la moyenne annuelle liée à la stratégie d'échantillonnage est de 26 %. On constate également que pour un même nombre de mesures par an, la division de l'année en strates temporelles permet de diminuer l'incertitude d'environ 5 %. En effet, si trois mesures sont réalisées dans l'année, l'incertitude est de 21 % si ces mesures sont réparties dans l'année en fonction de la saison, avec une mesure en période « été », une autre en période « hiver » et la dernière en période de « transition », alors qu'elle est de 25 % si les trois

12. Lors de la seconde phase de cette campagne pilote (2010-2011), six autres établissements font l'objet d'un suivi temporel, selon la même méthode, ce qui permettra d'afficher les données présentées ici.

Tableau 6.

Incertitude théorique liée à l'échantillonnage temporel sur la base de 21 séries de mesure.

Theoretical uncertainty due to the temporal sampling strategy, based on 21 measurement series.

| Échantillonnages temporels                                                                                 | Incertitude Moyenne (%) | Écart-type (%) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------|
| L'année est divisée en <b>3 strates</b> (E, H, T) 1 mesure par strate, soit <b>3 mesures/an</b>            | <b>21</b>               | 7              |
| L'année est divisée en <b>2 strates</b> (E, H)* 1 mesure dans les strates E et H, soit <b>2 mesures/an</b> | <b>26</b>               | 8              |
| L'année correspond à <b>1 strate</b> , <b>3 mesures/an</b>                                                 | <b>25</b>               | 6              |
| L'année correspond à <b>1 strate</b> , <b>2 mesures/an</b>                                                 | <b>32</b>               | 8              |
| L'année correspond à <b>1 strate</b> , <b>1 mesure/an</b>                                                  | <b>46</b>               | 12             |

E = été, H = hiver, T = transition.

\*période de transition répartie entre la strate « estivale » et la strate « hivernale ».

Tableau 7.  
Répartition de l'indice de confinement  
des pièces instrumentées.

Distribution of the air stuffiness index  
(n = 431 classrooms or activity rooms).

| ICONE | Confinement à l'échelle des pièces<br>Répartition (%) |                   |                        |                         |
|-------|-------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
|       | Global<br>N = 431                                     | Crèches<br>N = 73 | Maternelles<br>N = 145 | Élémentaires<br>N = 213 |
| 0     | 13,9                                                  | 26,0              | 15,9                   | 8,5                     |
| 1     | 12,8                                                  | 20,5              | 16,65                  | 7,5                     |
| 2     | 24,1                                                  | 24,7              | 28,3                   | 21,1                    |
| 3     | 31,1                                                  | 24,7              | 28,3                   | 35,2                    |
| 4     | 15,8                                                  | 1,4               | 9,7                    | 24,9                    |
| 5     | 0,2                                                   | 0,0               | 0,0                    | 0,5                     |
| INV*  | 2,1                                                   | 2,7               | 1,43                   | 2,3                     |

\*INV : données invalides ne permettant pas le calcul du confinement.

Tableau 8.  
Indice de confinement maximum  
des établissements.

Distribution of the air stuffiness index  
(n = 160 schools and day-care centres).

| ICONE | Confinement à l'échelle des établissements<br>Répartition (%) |                   |                       |                        |
|-------|---------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
|       | Global<br>N = 160                                             | Crèches<br>N = 46 | Maternelles<br>N = 61 | Élémentaires<br>N = 53 |
| 0     | 9,3                                                           | 15,2              | 11,5                  | 1,9                    |
| 1     | 14,4                                                          | 23,9              | 16,4                  | 3,8                    |
| 2     | 18,8                                                          | 23,9              | 21,3                  | 11,3                   |
| 3     | 33,8                                                          | 34,8              | 31,2                  | 35,8                   |
| 4     | 22,5                                                          | 2,2               | 18,0                  | 45,3                   |
| 5     | 0,6                                                           | 0,0               | 0,0                   | 1,9                    |
| INV*  | 0,6                                                           | 0                 | 1,6                   | 0                      |

\*INV : données invalides ne permettant pas le calcul du confinement.

Tableau 9.  
Distribution des écarts de confinement  
entre les pièces d'un même établissement (en %).

Distribution of intra-school differences  
in air stuffiness indexes.

| Écart de<br>confinement<br>maximum | Global<br>N = 104 | Crèches<br>N = 19 | Maternelles<br>N = 37 | Élémentaires<br>N = 48 |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| 0                                  | 26                | 37                | 32                    | 17                     |
| 1                                  | 42                | 47                | 39                    | 42                     |
| 2                                  | 26                | 11                | 24                    | 33                     |
| 3                                  | 5                 | 0                 | 5                     | 8                      |
| 4                                  | 1                 | 5                 | 0                     | 0                      |
| 5                                  | 0                 | 0                 | 0                     | 0                      |

mesures sont réalisées aléatoirement dans l'année. Si l'on passe à deux mesures par an, l'incertitude est de 32 % si ces mesures sont réalisées aléatoirement dans l'année alors qu'elle est de 26 % si chaque mesure est effectuée dans une strate temporelle distincte. Enfin, si une seule mesure est réalisée aléatoirement dans l'année, l'incertitude liée à la variabilité temporelle sur l'estimation de la concentration annuelle en formaldéhyde est de 46 %.

## Étude de la représentativité spatiale

Lors de la seconde phase également, six établissements font l'objet d'un suivi spatial complet, ce qui permettra d'étudier l'incertitude liée à la stratégie d'échantillonnage spatial proposée dans les protocoles mis en œuvre [2].

## 3.3. Confinement de l'air intérieur

Les résultats en terme de confinement pour l'ensemble des salles instrumentées sont présentés dans le tableau 7. 16 % des pièces instrumentées lors de la première phase pilote présentent un indice de confinement égal à 4 ou 5, considéré comme très élevé (1 % des crèches, 10 % des maternelles et 25 % des élémentaires). Ces résultats intègrent les écoles instrumentées à l'île de La Réunion, au climat très différent de celui de la métropole. En considérant uniquement la France métropolitaine, 17 % des pièces instrumentées lors de la phase pilote présentent un confinement très élevé (0 % des crèches, 10 % des maternelles et 28 % des élémentaires).

À l'échelle de l'établissement, l'indice de confinement maximum observé a été retenu comme critère d'agrégation entre les différentes pièces. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 8. 23 % des établissements instrumentés lors de la phase pilote présentent au moins une pièce dont le confinement est très élevé (2 % au niveau crèches, 18 % au niveau maternelles et 47 % au niveau élémentaires). Pour la France métropolitaine, 23 % des établissements instrumentés lors de la phase pilote présentent au moins une pièce dont le confinement est très élevé (0 % des crèches, 19 % des maternelles et 50 % des élémentaires).

## Variabilité spatiale intra-établissement

Pour 104 des 160 établissements sélectionnés, plusieurs salles ont été instrumentées. L'écart maximum observé entre les salles est de 4 dans une crèche de l'île de La Réunion, mais il correspond à l'écart de confinement entre une salle d'activité et une salle de sommeil (normalement hors protocole). L'écart le plus fréquemment rencontré de la note ICONE est de 1, et ce, quel que soit le type d'établissement (Tableau 9). En revanche, la proportion d'établissements avec un écart supérieur à 1 est plus importante dans les écoles élémentaires (42 %) que dans les maternelles (32 %) et les crèches (16 %). De même, un écart de confinement nul entre les pièces est plus rare dans les écoles élémentaires (17 %) que dans les crèches ou maternelles (35 % et 37 % respectivement).

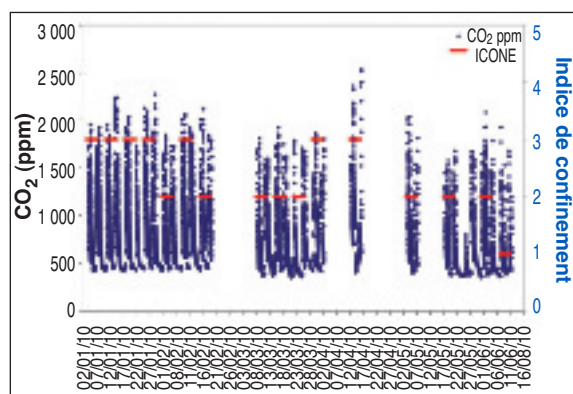


Figure 4.

Variabilité temporelle de l'indice ICONE dans une salle de classe d'école élémentaire.

Les périodes sans mesures correspondent aux vacances scolaires ou à une inoccupation de la salle.

Temporal variation of the air stuffiness index in a classroom. Blank periods are unoccupied time intervals.

## Variabilité temporelle

Douze établissements (un par région sélectionnée, pour un total de 25 pièces) ont fait l'objet d'un suivi en continu du confinement sur 16 semaines d'occupation. Un exemple de suivi temporel du confinement est représenté à la figure 4. Il montre l'évolution des niveaux de CO<sub>2</sub> exprimés en ppm (parties par million) selon l'occupation de la salle par les enfants et l'indice de confinement hebdomadaire.

Pour une même pièce, l'écart maximum de l'indice de confinement varie de 0 (dans les quatre salles d'activité d'une crèche à l'île de La Réunion) à quatre (dans deux salles soit 8 % des cas). L'écart maximum sur les 16 semaines de mesure est plus fréquemment de 1 (40 % des cas) ou de 2 (28 % des cas). Le confinement calculé sur la période hiver (entre novembre et février) est systématiquement identique ou supérieur au confinement déterminé globalement (écart maximum de 1). À une exception près, le confinement hors hiver tend à être légèrement inférieur au confinement déterminé en hiver (écart maximum de 2). En regardant plus attentivement la répartition des notes de l'indice en fonction du mois de la mesure, les

valeurs maximales sont plutôt associées à la période d'octobre à mars. La médiane des valeurs est la plus élevée pour les mois de novembre et décembre. D'avril à juin, l'indice de confinement est plus faible. Les mois de juillet à septembre n'ont pas été expérimentés.

## 3.4. Mise en perspective des résultats formaldéhyde, benzène et confinement

Un croisement macroscopique des concentrations de formaldéhyde, benzène et de l'indice de confinement a été réalisé (Figure 5). Pour cela, les concentrations moyennes « annuelles » à l'échelle de l'établissement ont été réparties en trois classes, par rapport aux valeurs de référence. Pour le formaldéhyde, les classes, 0-30 µg/m<sup>3</sup>, 30-50 µg/m<sup>3</sup> et > 50 µg/m<sup>3</sup> ont été retenues. Pour le benzène, les classes 0-2 µg/m<sup>3</sup>, 2-5 µg/m<sup>3</sup> et > 5 µg/m<sup>3</sup> ont été retenues. Concernant le confinement, les indices 0 à 5 ont été repris, avec un regroupement des indices 4 et 5, ce dernier n'étant représenté qu'une fois. Les figures 5a et 5b montrent l'évolution de la répartition des indices de confinement selon la classe de concentration en formaldéhyde ou benzène considérée.

Concernant le formaldéhyde, la répartition des indices de confinement est indépendante de la classe de concentration considérée. Pour le benzène, la proportion d'établissements présentant des niveaux supérieurs à 5 µg/m<sup>3</sup> tend à être plus importante si l'indice de confinement est supérieur ou égal à 3. Cette tendance ne traduit toutefois pas un lien significatif. Ainsi, une situation de confinement élevé ou très élevé ne suffit pas pour expliquer des niveaux de concentration de polluant très élevés lesquels nécessitent également la présence de sources d'émission spécifiques.

## 3.5 Diagnostic des bâtiments

Les résultats des diagnostics des 160 bâtiments confirment le faible pourcentage d'écoles dont les salles d'enseignement sont équipées d'un système

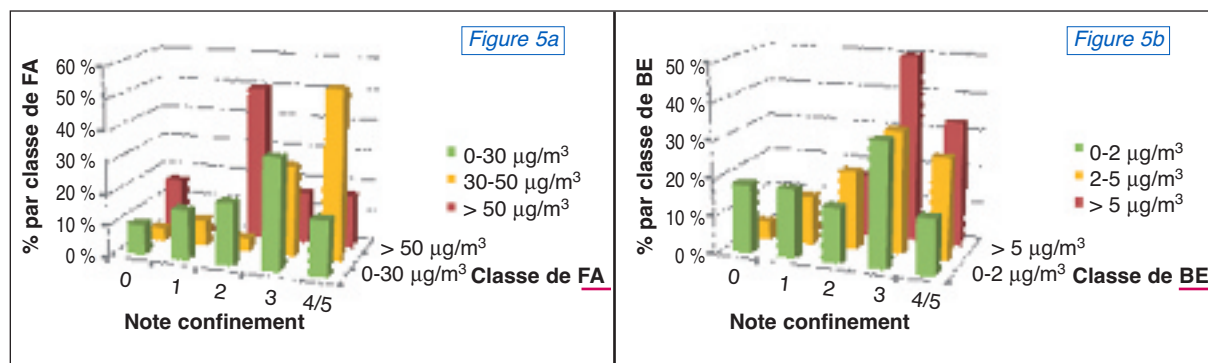


Figure 5.

Répartition des indices de confinement selon la classe de concentration en formaldéhyde (FA ; 0-30, 30-50 et > 50 µg/m<sup>3</sup>) ou en benzène (BE ; 0-2, 2-5 et > 5 µg/m<sup>3</sup>).

Distribution of air stuffiness indexes according to the different classes of formaldehyde concentrations (FA ; 0-30, 30-50 and > 50 µg/m<sup>3</sup>) or benzene concentrations (BE ; 0-2, 2-5 and > 5 µg/m<sup>3</sup>).

spécifique de ventilation (17 % en sont pourvus). En revanche, les salles d'accueil dans les crèches sont plus souvent équipées d'un système de ventilation (49 %), ainsi que d'un système de climatisation pour certaines (30 %). L'utilisation de chauffage d'appoint a été rapportée à plusieurs reprises (12 % des cas), mais il s'agissait dans tous les cas de dispositifs électriques (et non de chauffage à combustible liquide non raccordé). Des appareils d'épuration de l'air ou de désinfection ont été utilisés dans 12 établissements (8 %). Dans 34 établissements (21 %), un dégât des eaux a été rapporté et des taches de moisissures visibles ont été signalées dans 16 établissements (10 %). Compte tenu des effets sanitaires désormais reconnus liés aux expositions aux moisissures, il a été recommandé aux écoles de procéder à leur élimination. La présence d'une cuisine générant de la vapeur d'eau au sein même de certains bâtiments conduit à générer un surcroît d'humidité propice au développement de moisissures (12 % des établissements sont concernés). Des travaux intérieurs ou un changement de mobilier récent (moins de un an) ont eu lieu dans respectivement 31 et 22 établissements (soit 19 % et 14 %). Compte tenu des émissions de COV et d'aldéhydes associées, une vigilance toute particulière doit être portée à l'aération des locaux dans ces écoles et crèches.

Par ailleurs, les opérateurs des diagnostics ont pu souligner les problèmes d'inconfort dans un certain nombre d'établissements (bruit notamment en zone urbaine, inconfort thermique l'été comme l'hiver, éclairage non satisfaisant). Bien que non directement en lien avec la pollution intérieure, ces éléments sont des composantes essentielles de la qualité des ambiances et peuvent influencer l'apprentissage des enfants.

Enfin, le diagnostic a, dans de rares cas, permis de repérer la présence de matériaux amiantés ou contenant potentiellement du plomb.

En somme, le diagnostic permet de faire un état relativement complet du fonctionnement du bâtiment en relation avec la qualité de l'air intérieur. Il fournit une grande richesse d'informations ; il permet notamment l'identification de situations à risque (moisissures par exemple), qui ne peuvent être mises en évidence par les mesures des deux paramètres chimiques retenus. Il constitue à ce titre un véritable outil décisionnel pour les gestionnaires des bâtiments, dans la mesure où il permet d'identifier facilement différentes actions de remédiation (bouches encrassées à nettoyer, fenêtre non manœuvrable à remplacer, raccordement du système de ventilation à corriger, taches de moisissures à supprimer, produits d'entretien stockés dans la classe à transférer dans un local spécifique et aéré, par exemple). Ces actions, qui contribuent à l'amélioration de la qualité de l'air dans les bâtiments, ne requièrent pas nécessairement des ressources financières importantes. Lors de la communication des résultats, le diagnostic peut tout simplement favoriser la sensibilisation des occupants à la thématique de l'air intérieur.

## Conclusion

En synthèse des résultats obtenus, il ressort que 89 % des établissements investigués présentent, pour le formaldéhyde, une concentration moyenne annuelle inférieure à 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , valeur considérée comme satisfaisante par le HCSP dans les conditions actuelles et ne justifiant pas d'action spécifique.

Pour le benzène, 45 % des établissements expérimentés présentent une concentration moyenne annuelle inférieure à 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , valeur considérée comme ne justifiant pas d'action spécifique, tout en gardant à l'esprit que le benzène est un cancérogène sans seuil d'effet et que l'objectif doit être de toujours réduire les concentrations à un niveau aussi bas que raisonnablement possible. Pour les établissements classés dans la gamme de concentration 2-5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 75 % d'entre eux ont des concentrations comprises entre 2 et 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pour les établissements compris entre 2 et 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , la concentration intérieure est similaire à la concentration en extérieur dans 75 % des cas. Il est donc recommandé que soient menées par les autorités compétentes et l'AASQA locale des investigations complémentaires permettant l'identification et la gestion des sources de pollution extérieures. 8 % des établissements expérimentés présentent une concentration annuelle en benzène supérieure à 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et/ou une concentration annuelle en formaldéhyde supérieure à 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et sont vivement encouragés à mener rapidement des investigations complémentaires.

En ce qui concerne le confinement de l'air intérieur, 23 % des établissements expérimentés présentent un indice de confinement supérieur à 3 dans au moins une salle, valeur pouvant être assimilée à un renouvellement d'air insuffisant, compte tenu du taux d'occupation des locaux. Ces établissements seront encouragés à améliorer leurs conditions d'aération en présence des enfants et le fonctionnement des dispositifs de ventilation, s'ils en sont équipés. Par ailleurs, il convient de vérifier que les conditions d'aération sont en adéquation avec l'utilisation effective des pièces et de recourir, si nécessaire, à un dispositif d'autogestion du renouvellement d'air, qui indique par un voyant de couleur à quel moment l'air doit être renouvelé.

Finalement, pour cette première phase de la campagne pilote, 26 % des établissements expérimentés présentent une très bonne situation sur tous les paramètres (indice de confinement inférieur à 3, concentration annuelle inférieure à 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le formaldéhyde et inférieure à 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le benzène). 31 % des établissements présentent une situation médiocre sur au moins un des trois paramètres (indice de confinement supérieur à 3, concentration annuelle supérieure à 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le formaldéhyde et supérieure à 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le benzène). Les autres établissements (47 %) présentent une situation intermédiaire.

De meilleures pratiques d'aération des locaux, ainsi que des mesures de réduction des émissions à la source prévues dans le plan national santé-

environnement 2, notamment l'étiquetage obligatoire des matériaux de construction et des meubles en fonction de leurs émissions en composés organiques volatils, permettront d'améliorer progressivement la qualité de l'air dans les écoles et les crèches en France.

Les résultats définitifs relatifs aux deux phases de la campagne pilote sont attendus à l'automne 2011.

### Remerciements

Les auteurs remercient :

L'ensemble des équipes ayant réalisé les mesures : Airaq, Air C.O.M., Airfobep, Air Languedoc-Roussillon,

Air LOR, Air Normand, Airparif, Air Pays de la Loire, Atmo Auvergne, Atmo Champagne-Ardenne, Atmo Lorraine-Nord, Atmo Nord-Pas-de-Calais, Atmo PACA, Atmo Picardie, ORA La Réunion.

L'ensemble des équipes ayant réalisé les pré-diagnostic : Franck Chaventré, Pierre Barles, Dominique Chauchard, Marc Ferrier, la société Alphééis, ainsi que les CETE Sud-Ouest, Ouest, Nord-Picardie, Ile-de-France et Méditerranée.

Les laboratoires d'analyses : GIE-LIC et Atmo Picardie.

Philippe Tournié, du CSTB, pour son travail de développement de la base de données de la campagne de surveillance.

### Références

1. Sundell J., Levin H., Nazaroff W.-W., *et al.* Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature, *Indoor Air*, 2011: 21(3), 205-18.
2. LCSQA. Rapport CSTB-EMD-INERIS-DRC-08-94298-15176A : Élaboration de protocoles de surveillance du formaldéhyde, du benzène et du monoxyde de carbone dans l'air des lieux clos ouverts au public. 2008. Document accessible en ligne à l'adresse : <http://www.lcsqa.org/thematique/missions-diverses/air-interieur/elaboration-de-protocoles-de-surveillance-du-formaldehyde>).
3. [http://www.radiello.com/francais/index\\_fr.html](http://www.radiello.com/francais/index_fr.html)
4. Ribéron J., Derbez M., Lethrosne M., Kirchner S. Impact of airing behaviour on air stuffiness in schools and daycares centres: Development of a specific tool for ventilation management, 12th International conference on indoor air quality and climate, *Indoor Air*, 2011, Austin (USA), June 5-10, short communication.
5. AFSSET, 2007. Valeurs guides de qualité de l'air intérieur. Le formaldéhyde. 78 p.
6. AFSSET, 2008. Valeurs guides de qualité de l'air intérieur. Le benzène. 89 p.
7. HCSP, 2009. Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos. Le formaldéhyde. 41 p.
8. HCSP, 2009. Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos. Le benzène. 34 p.
9. Tillé Y1. Théorie des sondages. Échantillonnage et estimation en populations finies. Cours et exercices avec solutions, 2001 : 284 p. Éditions Dunod, Paris.
10. LCSQA. Groupe de Travail « Plans d'échantillonnage et reconstitution de données » : Élaboration de plans d'échantillonnage temporel et de reconstitution de données. Document édité par l'ADEME, 2008 : (collection Données et références, <http://www.librairiedialogues.fr/collection/donnees-et-references-ademe/23025/>, 2009) et accessible en ligne à l'adresse <http://www.lcsqa.org/echantillonnage-reconstitution-donnees/documentation/guide-pratique-elaboration-plans-echantillonnage>

