Bilan des sources d'émission de formaldéhyde au sein d'établissements scolaires

Assessment of formaldehyde sources in French schools

Guillaume Poulhet[1,2], Sébastien Dusanter[1,3], Sabine Crunaire[1], Patrice Coddeville[1], Hervé Plaisance[1], Laurence Pépin[2], Pascal Kaluzny[2]

Résumé

Le décret 2011-1728 rendra obligatoire la surveillance de la qualité de l'air dans les bâtiments publics français en 2015. Afin de mettre en place les modalités de cette surveillance, une campagne pilote a été initiée en 2009 et a consisté à mesurer les concentrations de formaldéhyde, de benzène et le confinement au sein de 300 écoles primaires et crèches. La première phase de cette campagne a révélé quatre salles de classe présentant des concentrations en formaldéhyde proches de la valeur d'information et de recommandation actuelle égale à 50 µg/m³. Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) a été missionné pour effectuer un diagnostic des sources d'émission de formaldéhyde au sein de ces écoles. Les taux d'émission des matériaux de construction et d'ameublement ont été mesurés sur site avec un préleveur passif développé à l'École des Mines de Douai. Plus de 30 sources d'émission différentes ont été mesurées dans chaque salle de classe, avec des taux d'émission compris entre 8 et 255 µg/m²/h. Le plafond a été identifié comme la source d'émission principale dans chacune des écoles (34 à 70 % des émissions totales). Les taux d'émission mesurés ont ensuite été utilisés pour contraindre un modèle d'équilibre des masses qui a permis de tester l'efficacité de différentes stratégies de réduction des concentrations en formaldéhyde.

Mots-clés

air intérieur, formaldéhyde, établissement scolaire, prélèvement passif, taux d'émission

Abstract

Monitoring of indoor air quality in French public buildings has been enacted by the 2011-1728 decree and will be compulsory by 2015. A national pilot study has been initiated in 2009 to assess the needs for air quality monitoring in buildings receiving children. Concentrations of formaldehyde and benzene, as well as confinement parameters, were measured in 300 preschools and nurseries. This study pointed out 4 schools exhibiting formaldehyde concentrations that are close to the actual recommendation and information value of 50 µg/m³. The French laboratory for air quality monitoring (LCSQA) was committed to carry out a diagnostic of formaldehyde sources in these polluted schools. Emission rates of construction and furnishing materials were measured on-site with a passive sampler developed at the École des Mines de Douai. More than 30 different sources were identified in each school, with emission rates in the range 8-255 µg/m²/h. The ceiling was an important source of formaldehyde in each school (34-70% of the total emission). These emission rates were used to constrain a mass balance model to evaluate the impact of formaldehyde reduction strategies.

Keywords

indoor air, formaldehyde, school, passive sampling, emission rate

(1) Université de Lille, 59000, Lille, France
École des Mines de Douai, Chimie et Environnement, 59508, Douai, France
(2) Tera Environnement, 38926, Crolles, France
(3) School of Public and Environmental Affairs, Indiana University, Bloomington, IN, USA

https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.2004

1. Introduction

L'évolution du mode de vie conduit les Occidentaux à passer en moyenne 80 à 90 % de leur temps dans des bâtiments [1], dont plus de 16 heures dans leur logement [2]. La qualité de l'air intérieur est donc devenue un véritable enjeu de santé publique puisque l'exposition chronique à la pollution, même à faibles doses, est une cause probable de l'augmentation des allergies, de l'asthme [3] et des cancers [4, 5]. Les atmosphères intérieures sont riches en composés organiques ayant un impact direct sur la santé. Par exemple, le formaldéhyde (H_2CO) est l'un des produits majoritairement rencontrés en air intérieur. En 2004, il a été classé cancérigène certain par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), classement qui a été reconduit en 2012 [4]. Bien qu'au niveau européen le formaldéhyde ne soit pas classé parmi les substances cancérigènes, il a été classé dans le groupe des substances préoccupantes pour l'homme. Ce classement est actuellement réexaminé par le comité d'évaluation des risques de l'ECHA (*European CHemicals Agency*) suite à un dossier soumis par l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) [5].

Une étude menée de 2003 à 2005 par l'OQAI (Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur) a permis de mettre en évidence la présence, dans des logements français, de certaines substances qui étaient soit absentes de l'air extérieur, soit présentes mais avec des niveaux de concentration nettement plus faibles qu'en air intérieur [6]. C'est le cas du formaldéhyde dont la concentration moyenne relevée sur un échantillon de 567 logements est environ 10 fois supérieure à la concentration moyenne mesurée dans l'air extérieur de ces mêmes logements. Ces concentrations élevées sont principalement liées au nombre important de sources présentes dans un espace réduit et à la réduction du renouvellement de l'air au profit des économies d'énergie. Pour le formaldéhyde, les sources d'émission intérieures sont multiples et comprennent par exemple les mousses isolantes à base de résines urée-formol, les produits dérivés du bois (agglomérés, contreplaqués…), les colles et enduits, ainsi que certains revêtements (peinture, moquette…). Certains de ces matériaux présentent généralement des émissions sur des temps très longs après leur mise en œuvre et sont l'une des causes principales des concentrations élevées en formaldéhyde observées dans les environnements intérieurs [7]. Le décret 2011-1728 vise à instaurer une surveillance obligatoire de la qualité de l'air intérieur à partir de 2015 dans les établissements recevant du public, à commencer par les établissements recevant des populations sensibles (crèches, écoles, maisons de retraite, etc.). Une exposition prolongée à l'air intérieur de ces établissements pourrait accroître les risques d'allergie et d'asthme, notamment chez les jeunes enfants [3].

Pour définir les modalités de cette surveillance de la qualité de l'air intérieur, une campagne pilote a été lancée en 2009 par le MEDDTL (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement) en partenariat avec les ministères chargés de la Santé, de l'Éducation nationale et de la Famille [8]. La première phase de cette campagne (2009-2010) a été menée au sein de 160 écoles et crèches réparties dans 13 régions. Elle a été réalisée avec l'appui technique et organisationnel, au niveau national, de l'INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques), dans le cadre de ses missions au sein du LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air) et du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), dans le cadre de ses missions au sein de l'OQAI.

Les mesures, réalisées par les AASQA (Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air), ont porté sur les niveaux de concentrations en benzène et en formaldéhyde (concentrations moyennes sur deux prélèvements de 4,5 jours en été et en hiver), et sur le confinement des salles par la mesure des concentrations en CO_2. Les médianes des concentrations mesurées en formaldéhyde (15,9 µg/m^3) et en benzène (2,2 µg/m^3) sont similaires aux valeurs observées durant l'étude « logements » de l'OQAI [6]. Ces résultats montrent que les concentrations en formaldéhyde sont acceptables dans 85 % des établissements et sont inférieures à la valeur guide actuelle de 30 µg/m^3 parue dans le décret n° 2011-1727 pour une exposition de longue durée [9].

Cependant, cette première phase de la campagne pilote a aussi permis d'identifier plusieurs établissements scolaires présentant des concentrations en formaldéhyde entre quatre et six fois supérieures à la valeur guide de 10 µg/m^3 recommandée pour une exposition à long terme par l'ANSES et définie comme valeur cible à atteindre en 2023 par le décret n° 2011-1727 [9].

Suite à ces résultats, et après confirmation des niveaux de concentration lors de la seconde phase de la campagne pilote, le LCSQA et l'École des Mines de Douai (EMD) ont procédé à des études complémentaires pour identifier les différentes sources d'émission en formaldéhyde dans les écoles présentant des concentrations en formaldéhyde supérieures à 40 µg/m^3. Cet article présente les éléments clés de la méthodologie de mesure mise en œuvre pour l'identification des émetteurs majoritaires et pour l'évaluation de stratégies de réduction des concentrations en formaldéhyde.

2. Description des sites et méthodologie de mesure retenue

2.1 Description des sites

Les mesures se sont déroulées du 21 juin au 21 juillet 2011 dans quatre établissements situés à Abbeville (Somme, site périurbain), Mouans-Sartoux (Alpes-Maritimes, site périurbain-rural), La Seyne-sur-Mer (Var, site périurbain) et Donges (Loire-Atlantique, site industriel). Les conditions environnementales à l'intérieur des salles échantillonnées (1 salle par site) se sont avérées être assez variables d'un site à l'autre avec des températures variant de 20 à 30 °C et des humidités relatives comprises entre 58 et 72 %.

Le nombre de matériaux identifiés dans les salles sélectionnées étant élevé (> 30), il n'a pas été possible d'effectuer un échantillonnage exhaustif de toutes les surfaces. Il a donc été nécessaire d'enlever la plupart des accessoires (jeux, livres, matériel de peinture ou de dessin…). Pour cette même raison, il n'a pas été possible de multiplier les mesures sur une même surface, et il était impératif de limiter les réplicats aux matériaux évalués comme étant potentiellement les plus émetteurs (panneaux de particules, bois aggloméré…).

2.2 Description de la méthodologie d'action

La méthodologie employée a impliqué les actions suivantes :

- identifier les différents matériaux potentiellement émetteurs et métrer les surfaces couvertes ;
- mesurer le taux de renouvellement de l'air dans la pièce échantillonnée ;
- mesurer les concentrations en formaldéhyde à l'intérieur de la pièce et à l'extérieur du bâtiment ;
- mesurer les taux d'émission en formaldéhyde des différents matériaux identifiés en (i) ;
- chiffrer les contributions des différents émetteurs à l'émission totale en formaldéhyde et évaluer des stratégies de réduction des concentrations en formaldéhyde.

Les mesures de taux de renouvellement de l'air ont été effectuées selon la norme ASTM E 741-00 [10]. Du CO_2 a été injecté au centre de la pièce et sa décroissance temporelle a été enregistrée à l'aide d'une sonde infrarouge (réf. : Testo, Datalogger Term 400).

Les mesures de concentration en formaldéhyde ont été effectuées par échantillonnage actif sur des cartouches imprégnées de 2,4-DiNitroPhénylHydrazine (DNPH) (Waters, WAT037500) et selon le protocole défini dans la norme NF ISO 16000-3 [11]. Une limite de détection de 0,03 µg/m³ (3 sigmas) a été obtenue en utilisant un débit de pompage ajusté à 1 L/min et une durée de prélèvement de 5 à 6 heures. Deux mesures ont été effectuées au centre de la salle de classe échantillonnée sur chaque site. Les cartouches ont ensuite été analysées à l'EMD par chromatographie haute performance en phase liquide (HPLC).

Les taux d'émission des différents matériaux ont été mesurés à l'aide d'un préleveur passif développé et validé par A. Blondel et H. Plaisance à l'EMD en 2010 [12]. Ce préleveur est constitué d'une boîte de Pétri de 35,4 mm de diamètre interne et de 20 mm de hauteur. Un filtre en fibre de quartz est placé au fond du préleveur et est imbibé avec une solution de DNPH pour piéger le formaldéhyde. L'exposition des préleveurs a été réalisée en parallèle des mesures de concentrations ambiantes sur une durée d'environ 6 heures. En laboratoire, ce dispositif présente une limite de détection de 1,2 µg/m²/h et une répétabilité d'environ 8 % pour un taux d'émission de 100 µg/m²/h. Les limites de détection observées sur site lors de cette étude se situent entre 1,2 et 7,0 µg/m²/h. Après exposition, les filtres imbibés ont été conservés au congélateur à -20 °C et les analyses HPLC ont été effectuées dans les quatre semaines suivant l'échantillonnage.

La contribution à l'émission totale de chaque matériau échantillonné (CS_i) a été calculée à partir des taux d'émission mesurés (T_i en µg/m²/h) et des surfaces métrées (S_i en m²) pour les N matériaux identifiés :

$$CS_i = \frac{T_i \times S_i}{\sum_i^N T_i \times S_i} \quad \text{Eq.1}$$

Il est important de noter que pour cette étude, les mesures des taux de renouvellement de l'air et des concentrations en COV ne sont pas représentatives d'une utilisation normale des salles de classe, car seules les entrées d'air en provenance de l'extérieur ont été rendues possibles, les issues en communication (portes, fenêtres…) avec des pièces adjacentes ayant été isolées. Ces conditions opératoires ont été retenues pour simplifier l'emploi d'un modèle d'équilibre des masses qui a été utilisé pour évaluer l'efficacité de stratégies de réduction des concentrations en formaldéhyde. Si les communications entre pièces n'avaient pas été isolées, l'emploi du modèle aurait alors nécessité des mesures de concentration en formaldéhyde dans la totalité des pièces adjacentes, ainsi que la mesure des contributions de toutes ces pièces au renouvellement de l'air de la salle échantillonnée.

Le modèle d'équilibre des masses mis en œuvre a été préalablement employé pour une étude de diagnostic de sources d'émission en formaldéhyde dans des résidences étudiantes [13]. Celui-ci permet le calcul de la concentration intérieure en for-

maldéhyde lorsque l'équation 2 est contrainte avec les valeurs des paramètres mesurés dans les écoles ($[H_2CO]_{ext}$, Q, a, S_{bati}, $S_{meubles}$, V) :

$$[H_2CO]_{int} = \left[[H_2CO]_{ext} \cdot \frac{a \cdot P}{a + v \cdot \frac{S_{bati} + S_{meubles}}{V}} \right] + \left[\frac{\frac{Q}{V}}{a + v \cdot \frac{S_{bati} + S_{meubles}}{V}} \right]$$

Eq.2

$[H_2CO]_{int}$ et $[H_2CO]_{ext}$ sont les concentrations en formaldéhyde à l'intérieur de la pièce et à l'extérieur du bâtiment (en µg/m³) ; P est le taux de pénétration du formaldéhyde lors de son transfert de l'extérieur vers l'intérieur de la pièce (valeur de 0 à 1, égale à 1 dans le cas du formaldéhyde) ; a est le taux de renouvellement de l'air (en h^{-1}) ; Q est la somme des émissions en formaldéhyde de l'ensemble des matériaux présents dans la pièce pondérées par leur surface (en µg/h) ; V est le volume de la pièce (en m³) ; S_{bati} et $S_{meubles}$ sont les surfaces de l'ensemble des éléments bâtis et des éléments du mobilier/aménagement (en m²) ; v est la vitesse de dépôt du formaldéhyde dans la pièce (en m/h, calculée à 0,105 m/h à partir de la littérature [13]).

3. Résultats/discussion

3.1 Mesures de taux de renouvellement de l'air, de taux d'émission et de concentrations en formaldéhyde

Comme le montre le tableau I, les concentrations en formaldéhyde mesurées dans les salles de classe sont comprises entre 64 et 350 µg/m³ et sont 22 à 116 fois supérieures à celles mesurées à l'extérieur du bâtiment. Bien que ces concentrations élevées soient en partie dues à un renouvellement de l'air très faible (0,12-0,22 h^{-1}), ces mesures confirment la présence d'importantes sources d'émission. Cependant, il est important de rappeler que les valeurs présentées dans le tableau I ne sont pas représentatives d'une utilisation habituelle des salles de classe puisque les communications entre pièces adjacentes ont été isolées afin de simplifier l'emploi du modèle d'équilibre des masses. Les valeurs de concentration et de taux de renouvellement de l'air présentées dans le tableau I doivent donc être interprétées avec précaution et ne représentent en aucun cas l'exposition individuelle dans des conditions d'utilisation normales des salles.

Les taux d'émission mesurés sont compris entre 8 et 252 µg/m²/h (tableaux II à V) et indiquent la présence de matériaux très émetteurs (T_i > 50 µg/m²/h) qui sont généralement constitués de bois ou de mousses alvéolaires (mélamine-formol, polyuréthane). La proportion de matériaux dont les taux d'émission sont en dessous de la limite de détection du préleveur est inférieure à 2 % pour Abbeville, Mouans-Sartoux et La Seyne-sur-Mer. En revanche, environ 30 % des mesures réalisées à Donges sont inférieures à la limite de détection.

Bien que les valeurs médianes des taux d'émission mesurés dans ces quatre établissements soient proches (11 à 23 µg/m²/h), l'émission totale en formaldéhyde varie fortement d'un site à l'autre : 8,0 mg/h à Abbeville ; 21,2 mg/h à Mouans-Sartoux ; 11,4 mg/h à La Seyne-sur-Mer et 4,2 mg/h à Donges. Les sources d'émission en formaldéhyde ont été clairement identifiées dans chacune des écoles et sont détaillées ci-dessous dans les tableaux II à V (sept sources principales).

Tableau I. Température, humidité relative, taux de renouvellement de l'air et concentrations en formaldéhyde mesurés dans les établissements d'Abbeville, Mouans-Sartoux, La Seyne-sur-Mer et Donges.
Temperature, relative humidity, air exchange rate and formaldehyde concentrations measured at Abbeville, Mouans-Sartoux, La Seyne-sur-Mer and Donges.

Lieu	Température moyenne (°C)	Humidité relative moyenne (%)	Taux de renouvellement de l'air* (h^{-1})	Concentration en formaldéhyde à l'intérieur* (µg/m³)	Concentration en formaldéhyde à l'extérieur (µg/m³)
Abbeville	21,4	70,6	0,14	220,7	1,9
Mouans-Sartoux	29, 6	63,6	0,22	349,9	6,7
La Seyne-sur-Mer	28,0	53,9	0,19	155,9	7,1
Donges	24,2	57,5	0,12	63,9	1,4

* Valeurs à interpréter avec précaution car non représentatives de l'utilisation normale d'une salle de classe (voir texte pour plus de détails).

Émission des principaux émetteurs à Abbeville - Comme le montre le tableau II, une partie du plafond (plafond #1 composé de plâtre, d'enduit, de fibre de verre et de peinture) contribue pour 52 % de l'émission totale en formaldéhyde et représente la source principale d'émission dans cette pièce. Cette partie du plafond, qui a fait l'objet d'un ajout récent de fibre de verre, présente un taux d'émission élevé de 114 µg/m²/h et couvre une surface d'environ 37 m². En revanche, le reste du plafond (≈ 25 m²) présente un taux d'émission plus faible de 10 µg/m²/h et contribue pour moins de 3 % au total des émissions. La seconde source d'émission (i.e. le sol) a une contribution nettement plus faible qui est inférieure à 10 %. La somme des émissions des 36 sources les moins importantes représente une contribution inférieure à 23 % de l'émission totale. Il est intéressant de noter que des mesures supplémentaires réalisées à l'EMD sur des échantillons du plafond #1 ont confirmé le caractère émissif de celui-ci. Ces résultats révèlent que le remplacement du plafond #1 par un matériau moins émissif conduirait à une baisse significative de la concentration intérieure en formaldéhyde.

Émission des principaux émetteurs à Mouans-Sartoux – D'après le tableau III, la source d'émission principale est facilement identifiable puisque le plafond contribue à hauteur de 69 % de l'émission totale en formaldéhyde. Ce matériau en bois aggloméré, soumis à une température élevée lorsque la toiture est exposée au soleil, présente un taux d'émission très élevé (252 µg/m²/h) et couvre une large surface (≈ 58 m²). Des mesures complémentaires réalisées à l'EMD sur des échantillons du plafond ont confirmé le caractère émissif de ces panneaux de particules de bois. L'ensemble des 39 autres sources d'émission contribuent à environ 30 % de l'émission totale et chacune de ces sources prises indépendamment contribue pour moins de 4 % de l'émission totale. La première priorité pour réduire la concentration intérieure en formaldéhyde dans cette salle de classe serait de remplacer le plafond très émissif.

Émission des principaux émetteurs à La Seyne-sur-Mer – Le tableau IV indique que les sources de formaldéhyde sont plus variées, avec 32 % des émissions générées par le plafond (en béton et en crépis peint, 44 µg/m²/h) et 31 % des émissions provenant de cubes (187 µg/m²/h) et de rectangles (116 µg/m²/h) décoratifs fixés au plafond pour améliorer le confort acoustique des salles. Ces éléments sont composés de mousses alvéolaires en mélanine, de tissus et de bois. Retirer ces éléments devrait conduire à une baisse significative de la concentration en formaldéhyde. Des mesures complémentaires réalisées à l'EMD ont confirmé le caractère émissif des mousses. Il est probable que les émissions du plafond soient dues à une contamination par les éléments acoustiques. Il serait donc intéressant de surveiller l'évolution des émissions du plafond après le retrait de ces éléments.

Émission des principaux émetteurs à Donges – Comme le montre le tableau V, un tiers de l'émission totale en formaldéhyde provient du plafond (25 µg/m²/h), qui est composé de panneaux de fibres minérales compressées. Ce matériau est cependant moins émissif que celui utilisé dans les autres écoles. D'autres sources d'émission sont par exemple les placards, les casiers et les tables, mais leurs contributions sont trop faibles pour qu'un remplacement individuel permette une baisse significative de la concentration en formaldéhyde dans la classe.

Tableau II. Abbeville – taux d'émission en formaldéhyde (T_i), valeurs des surfaces métrées (S_i), calcul de l'émission totale ($T_i \times S_i$) et de la contribution de chaque matériau à l'émission totale dans la pièce (Eq. 1).

Abbeville – Formaldehyde emission rate (T_i), surfaces (S_i), total emission ($T_i \times S_i$) and contribution of each material to the emissions (Eq. 1).

Support	Taux d'émission en formaldéhyde (T_i en µg/m²/h)	Surface (S_i en m²)	Émission totale en formaldéhyde ($S_i \times T_i$ en µg/h)	Contribution à l'émission totale (CS_i, Eq. 1)
Limite de détection	3,0			
Plafond #1	114	36,9	4207	52 %
Sol	14	49,8	697	9 %
Radiateur	12	31,5	378	5 %
Mur communiquant avec l'extérieur #1	23	10,8	248	3 %
Plafond #2	10	25,3	253	3 %
Mur communiquant avec l'extérieur #2	19	11,6	220	3 %
Mur #1	28	7,4	207	3 %
Reste des sources (36/43)	N/A	N/A	1847	23 %

Tableau III. Mouans-Sartoux – Taux d'émission en formaldéhyde (T_i), valeurs des surfaces métrées (S_i), calcul de l'émission totale ($T_i \times S_i$) et de la contribution de chaque matériau à l'émission totale dans la pièce (Eq. 1).

Mouans-Sartoux – Formaldehyde emission rate (T_i), surfaces (S_i), total emission ($T_i \times S_i$) and contribution of each material to the emissions (Eq. 1).

Support	**Taux d'émission en formaldéhyde** (T_i en µg/m²/h)	**Surface** (S_i en m²)	**Émission totale en formaldéhyde** ($S_i \times T_i$ en µg/h)	**Contribution à l'émission totale** (CS_i, Eq. 1)
Limite de détection	1,2			
Plafond	252	58,3	14692	69 %
Meuble bois #1	45	18,7	842	4 %
Sol	16	47,3	757	3 %
Mur cloison	13	53,1	690	3 %
Chaises	66	6,6	436	2 %
Meuble bois #2	38	8,9	338	1 %
Bibliothèque	43	7,1	305	1 %
Reste des sources (33/40)	N/A	N/A	3189	15 %

Tableau IV. La Seyne-sur-Mer – Taux d'émission en formaldéhyde (T_i), valeurs des surfaces métrées (S_i), calcul de l'émission totale ($T_i \times S_i$) et de la contribution de chaque matériau à l'émission totale dans la pièce (Eq. 1).

La Seyne-sur-mer – Formaldehyde emission rate (T_i), surfaces (S_i), total emission ($T_i \times S_i$) and contribution of each material to the emissions (Eq. 1).

Support	Taux d'émission en formaldéhyde (T_i en µg/m²/h)	Surface (S_i en m²)	Émission totale en formaldéhyde ($S_i \times T_i$ en µg/h)	Contribution à l'émission totale (CS_i, Eq. 1)
Limite de détection	1,4			
Plafond	44	83,4	3670	32 %
Rectangles décoratifs	116	21,1	2448	21 %
Cubes décoratifs	187	6,0	1122	10 %
Sol	13	60,4	785	7 %
Mur #1	14	34,0	476	4 %
Mur #2	18	20,7	373	3 %
Baguette pour affichage	82	3,4	279	2 %
Reste des sources (31/38)	N/A	N/A	2264	20 %

Tableau V. Donges – Taux d'émission en formaldéhyde (T_i), valeurs des surfaces métrées (S_i), calcul de l'émission totale ($T_i \times S_i$) et de la contribution de chaque matériau à l'émission totale dans la pièce (Eq. 1).

Donges – Formaldehyde emission rate (T_i), surfaces (S_i), total emission ($T_i \times S_i$) and contribution of each material to the emissions (Eq. 1).

Support	**Taux d'émission en formaldéhyde** (T_i en µg/m²/h)	**Surface** (S_i en m²)	**Émission totale en formaldéhyde** ($S_i \times T_i$ en µg/h)	**Contribution à l'émission totale** (CS_i, Eq. 1)
Limite de détection	7,0			
Plafond	25	56,8	1420	34 %
Dessus de placard	40	8,5	340	8 %
Casier à livres	78	2,4	187	4 %
Mur #1	6	31,8	191	4 %
Tables	16	11,0	176	4 %
Cloison mobile	93	1,8	167	4 %
Mur #2	11	14,2	156	4 %
Reste des sources (39/46)	N/A	N/A	1612	38 %

3.2 Évaluation de stratégies de réduction des concentrations en formaldéhyde

Les concentrations calculées par le modèle (Eq. 2) sont en bon accord avec celles mesurées (figure 1). Les différences observées (< 36 %) sont concordantes avec les erreurs associées à la mesure (5-10 %, 1 σ) et les erreurs associées aux valeurs calculées (15-20 %, 1 σ). Ces résultats permettent de valider l'emploi du modèle d'équilibre des masses (Eq. 2) pour des environnements présentant des émissions en formaldéhyde élevées et un faible taux de renouvellement de l'air.

En modifiant les valeurs de certains paramètres du modèle (Eq. 2), tels que le taux de renouvellement de l'air ou l'émission totale des matériaux, il est possible d'évaluer l'impact de stratégies d'amélioration de la qualité de l'air intérieur. Les deux scénarios testés sont une augmentation du taux de renouvellement de l'air jusqu'à 1 h^{-1} (scenario I) et le remplacement de la source d'émission la plus importante par un matériau moins émetteur (scenario II, taux d'émission abaissé à 12,5 µg/m^2/h). Le scénario I peut représenter l'installation d'une ventilation mécanique contrôlée, ou une bonne gestion de l'aération par l'ouverture des fenêtres et l'utilisation de ventilateurs [14].

Comme il a été mentionné plus haut, les taux de renouvellement de l'air mesurés dans les salles de classe ne sont pas représentatifs d'une utilisation normale de ces pièces. Pour effectuer les calculs d'abattement des concentrations en formaldéhyde, une valeur de référence de 0,5 h^{-1} a été utilisée pour le taux de renouvellement de l'air, celle-ci étant plus représentative de l'aération habituelle des salles de classe. Les résultats présentés sur la figure 2 montrent qu'une réduction d'environ 60 % de la concentration en formaldéhyde pourrait être obtenue en atteignant un taux de renouvellement de l'air de 1 h^{-1} (scenario I). Le remplacement de l'émetteur le plus important (scenario II) aura également un impact significatif pour les écoles d'Abbeville, Mouans-Sartoux et La Seyne-sur-Mer, avec une réduction de 43 à 63 % de la concentration en formaldéhyde. Il est important de noter que dans le cas de la Seyne-sur-Mer, ce n'est pas un scénario de remplacement du plafond mais de retrait des éléments acoustiques qui a été appliqué, conformément aux remarques données en 3.1. Une réduction plus modeste d'environ 7 % est calculée pour l'école de Donges qui ne présente pas de source d'émission prépondérante. La combinaison des deux scénarios proposés (scenarios I+II) permettrait de réduire la concentration en formaldéhyde dans ces écoles d'environ 65 à 80 %.

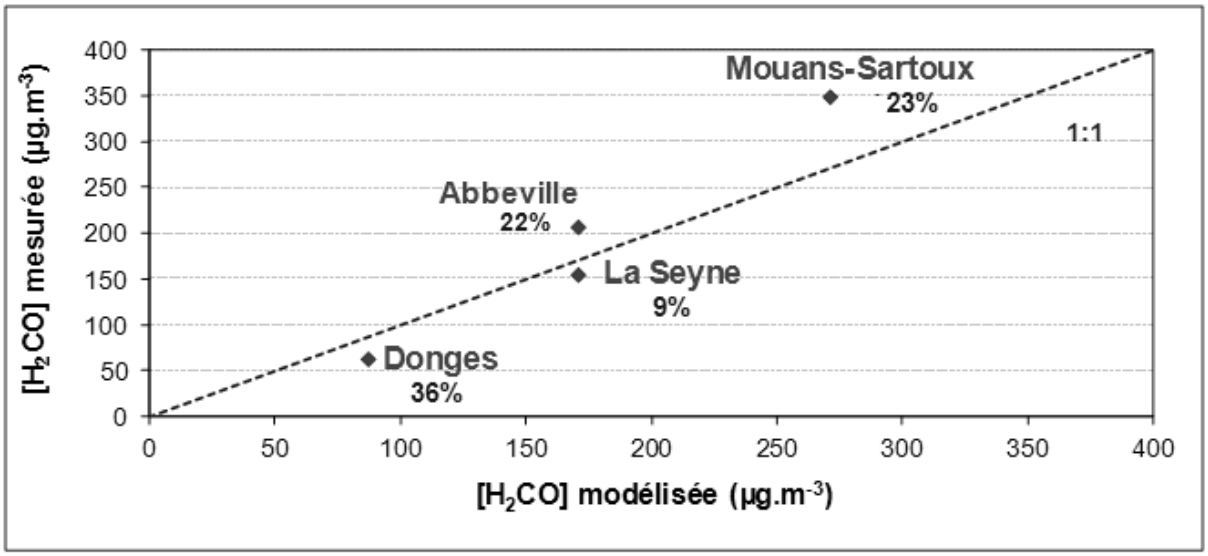

Figure 1. Comparaison des concentrations en formaldéhyde mesurées et calculées (Eq. 2) à l'intérieur de quatre salles de classe. La courbe en pointillé représente la droite 1 :1. Les différences observées entre les valeurs mesurées et calculées sont indiquées en dessous de chaque point. Valeurs de concentration à interpréter avec précaution car non représentatives de l'utilisation normale d'une salle de classe (voir texte).

Scatter plot of measured and calculated formaldehyde concentrations (Eq. 2). The dotted curve represents the 1:1 line. Relative differences observed between measured and calculated values are indicated for each classroom. These values must be interpreted with caution as they are not representative of a conventional use of the classrooms.

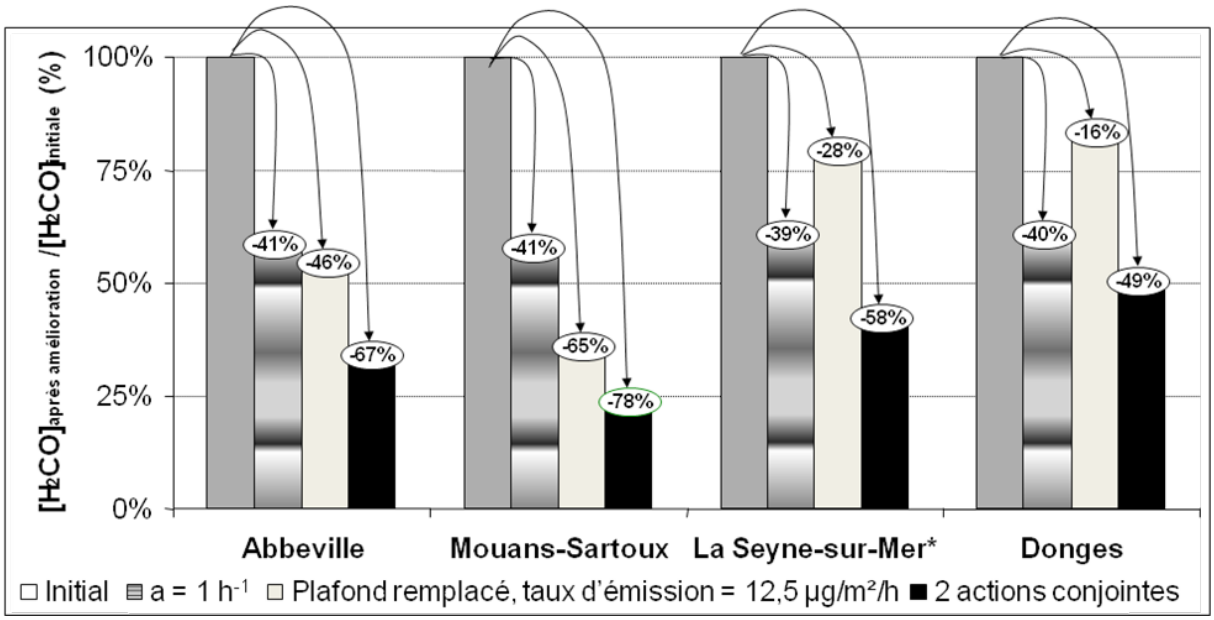

Figure 2. Impact de différentes stratégies de réduction des concentrations en formaldéhyde.
* Le scénario II consiste dans le retrait des éléments acoustiques en mousse.

Impact of different formaldehyde reduction scenarios
****Scénario II consists in removing sound absorbing pads from the ceiling.***

4. Conclusion

Une méthodologie d'action développée pour identifier les sources d'émission en formaldéhyde dans des environnements intérieurs a été testée dans quatre établissements scolaires présentant des concentrations intérieures en formaldéhyde élevées (proches de 50 µg/m³). Cette nouvelle méthodologie a permis d'identifier les sources d'émission principales, de quantifier leur contribution à l'émission totale en formaldéhyde et de chiffrer l'impact de stratégies d'amélioration de la qualité de l'air.

Le plafond est apparu comme l'émetteur le plus important pour chacune des écoles. Ce résultat indique que les matériaux destinés à recouvrir de larges surfaces doivent être choisis avec précaution et que les efforts de réduction d'émissions doivent se concentrer sur ces grandes surfaces. Une part importante des émissions observées dans l'école de La Seyne-sur-Mer provient d'éléments acoustiques installés pour réduire le niveau sonore d'ambiance des salles. Ce cas d'étude montre clairement qu'une amélioration de la qualité acoustique des salles a conduit à une dégradation de la qualité de l'air. Il apparaît donc important de vérifier si l'amélioration d'un paramètre de la qualité des environnements intérieurs peut avoir un effet contraire sur la qualité de l'air intérieur. Par exemple, une diminution du taux de renouvellement de l'air peut permettre d'améliorer le rendement énergétique d'un bâtiment, mais cette modification peut conduire à une accumulation de polluants dans l'air.

Le modèle d'équilibre des masses utilisé dans cette étude est apparu comme un outil de diagnostic utile pour évaluer l'impact de stratégies d'amélioration de la qualité de l'air. Une réduction d'environ 65 à 80 % de la concentration en formaldéhyde peut être obtenue en éliminant la source principale d'émission et en doublant le taux de renouvellement de l'air dans les salles de classe.

5. Remerciements

Ces travaux ont été financés par Tera Environnement (Thèse de G. Poulhet) et par le ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement via les travaux du LCSQA. Les auteurs remercient I. Fronval et V. Gaudion pour leur contribution à cette étude (mesures sur site et analyses de laboratoire). Les auteurs sont aussi très reconnaissants envers les Mairies d'Abbeville, de La Seyne-sur-Mer, de Mouans-Sartoux et de Donges ainsi qu'envers les Associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air : ATMO PACA, ATMO Picardie et Air Pays de la Loire pour leur aide dans la mise en place des différentes campagnes de mesures et pour leur disponibilité.

Références bibliographiques

[1] Schriver-Mazzuoli L. La pollution de l'air intérieur, Dunod 2009.

[2] OQAI, Description du budget espace temps et estimation de l'exposition de la population française dans son logement, 2009, 40 p.

[3] Annesi-Maesano I, Hulin M, Lavaud F *et al*. Poor air quality in classrooms related to asthma and rhinitis in primary schoolchildren of the French 6 Cities Study, *Thorax 1* 2012, 7 p.

[4] IARC. A review of human carcinogens: chemical agents and related occupations, monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. 2012, vol. 100F, 36 p.

[5] ANSES, CLH report for formaldehyde, 2011, 194 p.

[6] OQAI. Campagne nationale logements : état de la qualité de l'air dans les logements français, Rapport final, 2006, 183 p.

[7] Hun DE, Corsi RL, Morandi MT, Siegel JA. Formaldehyde in residences: long-term indoor concentrations and influencing factors. *Indoor Air* 2010 ; 20 : 196-203.

[8] Michelot N, Mandin C, Ramalho O. *et al*., Campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches en France. Résultats de la première phase. *Pollution Atmosphérique* 2011 ; 211 : 267-79.

[9] Journal officiel de la république française n° 0111 du 13 mai 2011, texte 15.

[10] ASTM. E 741-00. Standard test method for determining air change in a single zone by means of tracer gas dilution, 2006.

[11] ISO 16000-3, AIR INTÉRIEUR, Partie 3 : dosage du formaldéhyde et d'autres composés carbonylés – Méthode par échantillonnage actif, Janvier 2002.

[12] Blondel A, Plaisance H. Validation of a passive flux sampler for on-site measurement of formaldehyde emission rates from building and furnishing materials. *Analytical Methods 2* 2010; 12: 2032-38.

[13] Blondel A, Plaisance H. Screening of formaldehyde indoor sources and quantification of their emission using a passive sampler. *Building and Environment* 2011; 46: 1284-91.

[14] Guo H, Morawska L, He C, Gilbert D. Impact of ventilation scenario on air exchange rates and on indoor particle number concentrations in an air-conditioned classroom. *Atmospheric Environment* 2008 ; 42 : 757-68.