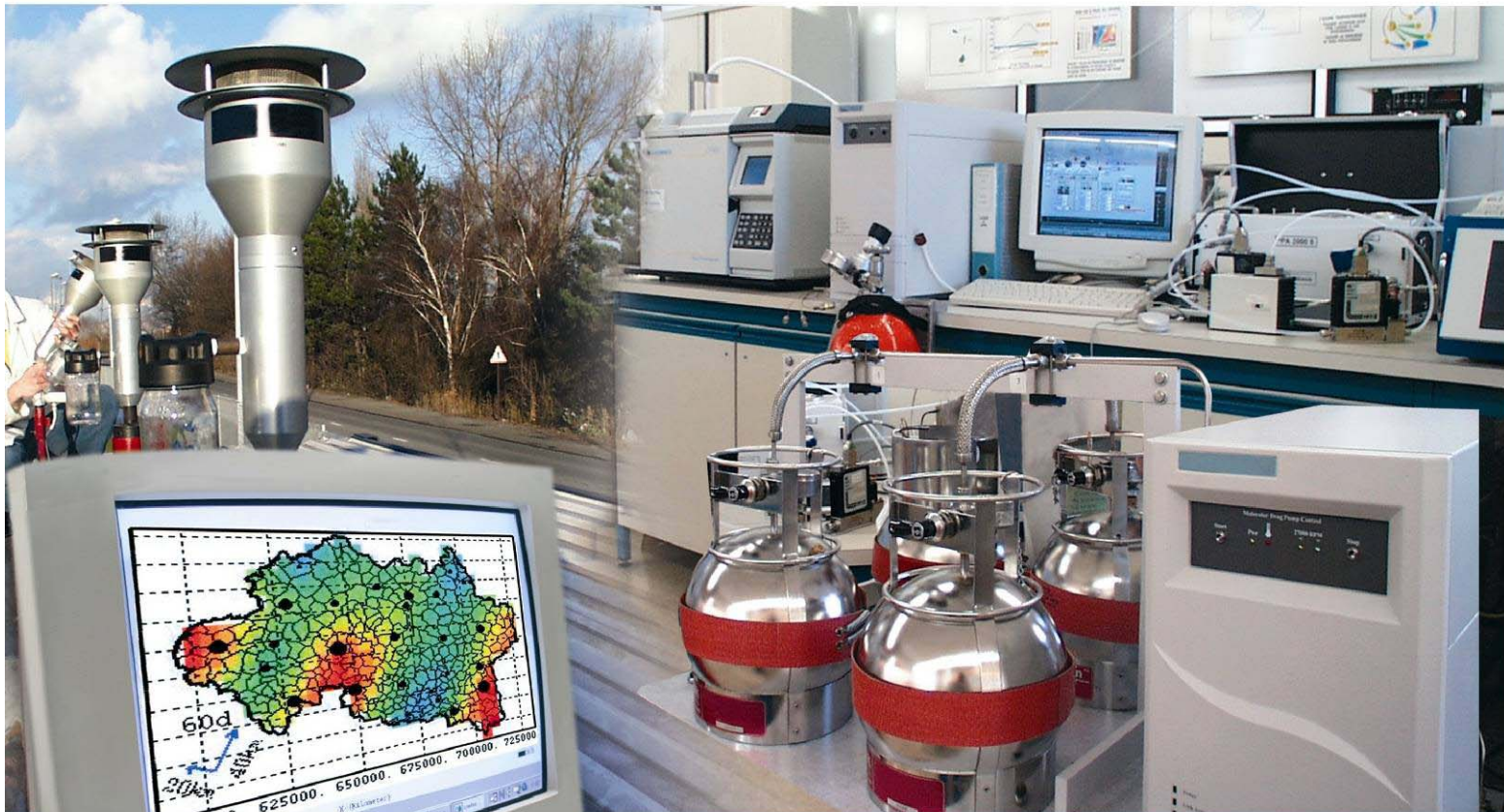




Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Investigations complémentaires dans certains établissements de la campagne pilote : Poursuite des essais de l'échantillonneur passif pour la mesure in-situ des taux d'émission en formaldéhyde des surfaces et matériaux présents dans des établissements scolaires ou d'accueil de la petite enfance

Programme 2012

Sabine CRUNAIRE (LCSQA – Mines Douai)
Sébastien DUSANTER (LCSQA – Mines Douai)
Guillaume POULHET (LCSQA – Mines Douai)





PREAMBULE

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué de laboratoires de l'Ecole des Mines de Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches finalisées à la demande du Ministère chargé de l'environnement, en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de qualité de l'air intérieur, axe prioritaire du 2^e Plan national Santé Environnement, sont supportés financièrement par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE), et sont réalisés avec le souci constant d'améliorer la qualité de l'air intérieur en France en apportant un appui scientifique et technique aux acteurs de la surveillance.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air intérieur, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.



Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

ECOLE DES MINES DE DOUAI

DEPARTEMENT CHIMIE ET ENVIRONNEMENT

**Programme financé par la
Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR)**

2012

**Investigations complémentaires dans certains
établissements de la campagne pilote :
Poursuite des essais de l'échantillonneur
passif pour la mesure in-situ des taux
d'émission en formaldéhyde des surfaces et
matériaux présents dans des établissements
scolaires ou d'accueil de la petite enfance**

**Sabine CRUNAIRE, Sébastien DUSANTER, Guillaume POULHET
Avec la collaboration technique de : Cécilia MERLEN et Vincent
GAUDION**

Convention : 2200677483

Programme 2012

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	5
2	RESULTATS DES CAMPAGNES DE MESURE	6
2.1	QUALIFICATION DU PRELEVEUR PASSIF SUR LE TERRAIN.....	6
2.1.1	<i>Valeurs des blancs et limites de détection « terrain »</i>	6
2.1.2	<i>Répétabilité sur site des mesures de taux d'émission en formaldéhyde d'un matériau</i>	7
2.2	CAMPAGNE DE SAINT JUNIEN.....	8
2.2.1	<i>Site d'étude</i>	8
2.2.2	<i>Caractéristiques de la campagne</i>	10
2.2.3	<i>Résultats et interprétations</i>	10
2.2.3.1	Taux de renouvellement et concentrations ambiantes.....	10
2.2.3.2	Emissions des surfaces identifiées.....	11
2.2.3.3	Interprétation des résultats.....	13
2.3	CAMPAGNE DE MONT-PRES-CHAMBORD.....	14
2.3.1	<i>Site d'étude</i>	14
2.3.2	<i>Caractéristiques de la campagne</i>	16
2.3.3	<i>Résultats</i>	17
2.3.3.1	Taux de renouvellement et concentrations ambiantes.....	17
2.3.3.2	Emissions des surfaces identifiées.....	18
2.3.3.3	Interprétation des résultats.....	19
2.4	CAMPAGNE DE BESANÇON - 1.....	20
2.4.1	<i>Site d'étude</i>	20
2.4.2	<i>Caractéristiques de la campagne</i>	22
2.4.3	<i>Résultats</i>	23
2.4.3.1	Taux de renouvellement et concentrations ambiantes.....	23
2.4.3.2	Emissions des surfaces identifiées.....	24
2.4.3.3	Interprétation des résultats.....	25
2.5	CAMPAGNE DE BESANÇON - 2.....	26
2.5.1	<i>Site d'étude</i>	26
2.5.2	<i>Caractéristiques de la campagne</i>	28
2.5.3	<i>Résultats</i>	29
2.5.3.1	Taux de renouvellement et concentrations ambiantes.....	29
2.5.3.2	Emissions des surfaces identifiées.....	29
2.5.3.3	Interprétation des résultats.....	31
3	SYNTHESE DES RESULTATS DES CAMPAGNES DE 2011 ET 2012	32
3.1	COMPARAISON DES CONTRIBUTIONS RELATIVES DU BATI ET DE L'AMENAGEMENT ...	32
3.2	COMPARAISON MODELE-MESURE	33
3.3	APPLICATION DE SCERANIOS D'AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'AIR.....	34
4	CONCLUSION GENERALE	36
5	REMERCIEMENTS	37

1 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 [1]. Afin de définir les modalités de cette surveillance, une campagne pilote a été conduite au niveau national sur la période 2009-2011. Cette étude s'inscrit dans ce contexte national et dans la continuité de la première phase de la campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches [2].

Le formaldéhyde, composé classé dans le groupe 1 des substances cancérigènes certains pour l'homme par le Centre International de la Recherche sur le Cancer [3], est l'un des aldéhydes les plus abondants dans l'air intérieur des établissements scolaires avec des teneurs de 5 à 50 fois supérieures à celles mesurées en atmosphère extérieure [4-5]. Les résultats des deux phases de la campagne pilote ont révélé que les moyennes « annuelles » des concentrations en formaldéhyde, à l'échelle de l'établissement, établies sur la base de 2 campagnes de prélèvement par tube à diffusion passive de 4,5 jours (une en été et l'autre en hiver), sont inférieures à $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ dans 89 % des 310 établissements investigués [6]. Cette valeur de $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ est considérée comme satisfaisante par le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP) et ne requiert pas d'action spécifique dans l'état des connaissances actuelles [7]. En revanche, parmi les autres établissements quelques situations nécessitent des diagnostics complémentaires et des mesures correctives. Des moyens d'expertise pour tenter d'identifier les sources principales de pollution et mettre en place les actions nécessaires ont été proposés aux maires et responsables d'établissement concernés.

Ainsi, ce travail à l'instar des actions menées en 2011 [8] a pour objectif principal de réaliser un diagnostic approfondi des sources de formaldéhyde dans des salles de classe. Celles-ci ont été sélectionnées au regard des concentrations moyennes « annuelles » en formaldéhyde mesurées au cours de la seconde phase de la campagne pilote. Quatre établissements scolaires ou d'accueil de la petite enfance ont ainsi été retenus car ils comportaient au moins une salle dans laquelle cette concentration était supérieure à $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ([min – max] = [43,3 – 52,4] $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). La recherche des principales sources diffuses intérieures se fait au moyen de préleveurs passifs qui sont déployés pour la mesure *in-situ* des taux d'émission en formaldéhyde des matériaux de construction et d'aménagement présents dans la salle de classe la plus contaminée. Ceci permet d'établir un bilan quantifié des contributions des différentes sources. En complément, l'utilisation du modèle d'équilibre des masses tel que décrit dans le rapport d'étude de 2011 permet d'évaluer l'impact de différentes stratégies d'amélioration de la qualité de l'air intérieur (diminution des émissions, amélioration du renouvellement d'air) [8].

N. B. : Les lecteurs intéressés par l'établissement du modèle d'équilibre des masses, par les moyens de mesure des taux d'émission des matériaux disponibles pour les mesures en laboratoire ou sur le terrain ou encore par une description de l'échantillonneur passif utilisé dans cette étude sont invités à se reporter au chapitre 2 du rapport d'étude de 2011 [8].

2 RESULTATS DES CAMPAGNES DE MESURE

Pour faciliter la mise en place des interventions sur site, l'intégralité des campagnes de terrain s'est déroulée du 23 avril au 4 mai 2012 (période de congés scolaires). Les 4 établissements qui ont fait l'objet de cette campagne d'investigation de recherche des sources d'émission en formaldéhyde sont situés sur les communes de Saint-Junien (87), de Mont-près-Chambord (41) et de Besançon (25). Une description détaillée des établissements et des résultats obtenus pour chacun d'entre eux, sont détaillés dans les 2.2 à 2.5 suivants. Le paragraphe 2.1 synthétise les résultats de qualification du préleveur passif sur l'ensemble des campagnes de terrain menées en 2011 et 2012, soit dans 8 établissements.

2.1 QUALIFICATION DU PRELEVEUR PASSIF SUR LE TERRAIN

2.1.1 Valeurs des blancs et limites de détection « terrain »

Les blancs correspondent à des préleveurs préparés mais non exposés. Toutefois, ce sont des préleveurs fermés qui ont été placés à la même température dans les salles de classe en même temps que les préleveurs passifs utilisés pour la détermination des taux d'émission des différents matériaux. Ces préleveurs fermés permettent d'évaluer les niveaux de contamination au cours des phases de préparation et de prélèvement ainsi que la pureté de la solution de DNPH.

La masse moyenne de formaldéhyde dans les blancs a été calculée à partir de l'extraction et de l'analyse de 4 à 7 filtres par école (Tableau 1). Ces valeurs moyennes étant toutes significatives, elles ont été soustraites des masses de formaldéhyde mesurées lors des prélèvements.

La limite de détection correspond à trois fois l'écart-type mesuré sur les blancs et convertie en taux d'émission pour 6 heures d'exposition (Tableau 1).

Tableau 14 : Masse moyenne de formaldéhyde des blancs de terrain, écarts-types et limites de détection associés pour les 8 établissements scolaires investigués en 2011 et 2012.

	Abbeville 1	Abbeville 2	Mouans-Sartoux	La Seyne-sur-Mer	Donges	Saint-Junien	Mont-près-Chambord	Besançon 1	Besançon 2
Nombre de préleveur	4	4	4	5	7	6	5	6	6
Moyenne des blancs (ng)	59,3	39,4	168,6	99,8	165,7	42,2	52,7	44,7	28,6
Ecart-type (ng)	29,7	10,5	7,0	13,3	11,4	11,7	22,2	9,5	5,7
LD préleveur ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	3,0	1,1	0,7	1,3	1,2	1,2	2,3	1,0	0,6

Compte tenu de taux d'émission déterminés sur les différents matériaux au cours de différentes campagnes (taux d'émission moyen = $19,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; taux d'émission médian = $11,2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), la limite de détection moyenne déterminée sur l'ensemble des établissements apparaît satisfaisante ($\text{LD}_{\text{moyen}} = 1,4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$).

Cette limite de détection du formaldéhyde en condition terrain est proche de celle établie en laboratoire par Blondel et qui était égale à $1,2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ dans des conditions d'exposition du préleveur similaires [8]. Par ailleurs, il semble que la masse moyenne de formaldéhyde soit dans la plupart des cas directement liée à la concentration ambiante en formaldéhyde dans la pièce (Figure 1).

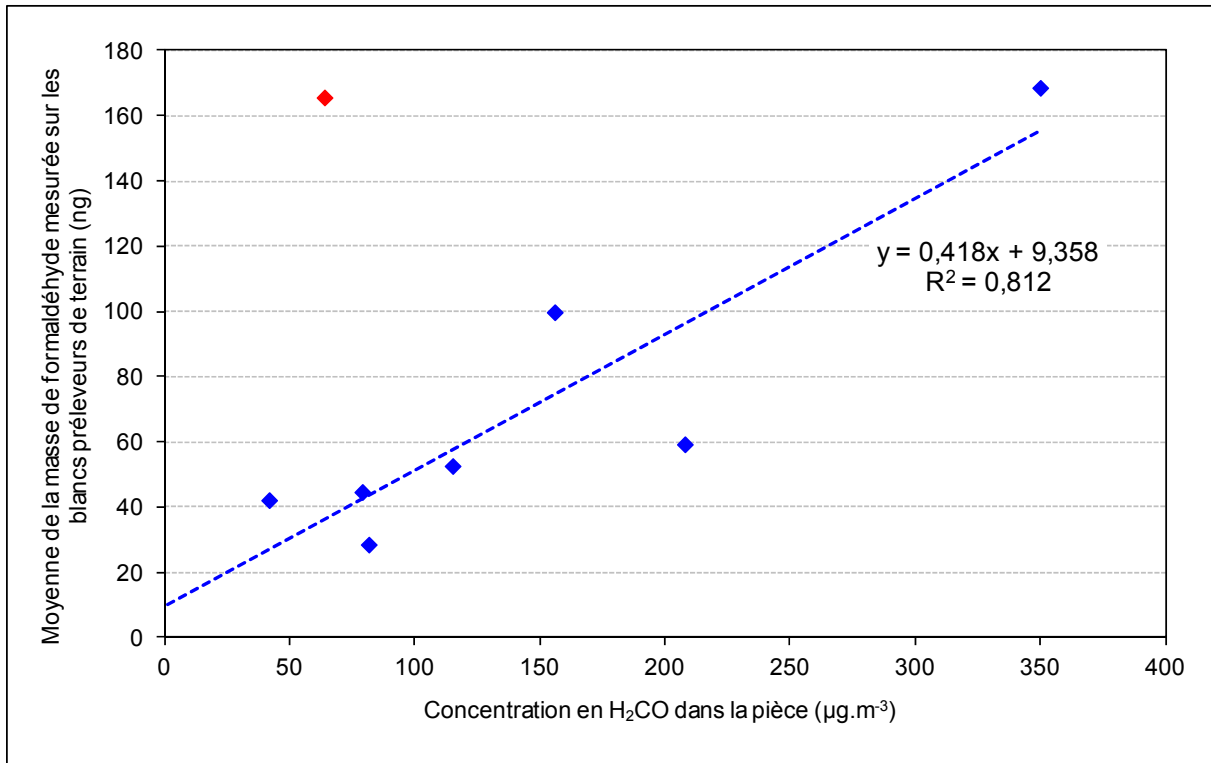


Figure 1 : Graphique représentant la masse moyenne de formaldéhyde déterminée à partir de l'analyse des blancs préleveurs en fonction de la concentration ambiante en formaldéhyde dans la pièce investiguée. La droite en pointillée bleue représente la droite de corrélation, seule le point en rouge sur le graphique n'a pas été pris en compte (outlier).

D'après le graphique de la Figure 1, il semble donc que la contamination majeure des préleveurs soit due à une contamination par du formaldéhyde présent dans l'air ambiant et il semble donc qu'il soit important de réaliser des blancs sur le terrain dont la masse moyenne sera soustraite de celle des préleveurs ayant servi à l'échantillonnage des surfaces. Compte-tenu que le coefficient de variation sur une série de blancs peut atteindre 50%, il semble nécessaire de réaliser à minima 3 blancs.

2.1.2 Répétabilité sur site des mesures de taux d'émission en formaldéhyde d'un matériau

Des mesures de répétabilité sur site ont été effectuées. Des doublons ont été réalisés sur plusieurs matériaux présents dans les 8 établissements scolaires des campagnes de 2011 et 2012. Les résultats sont présentés sur la Figure 2 ci-dessous.

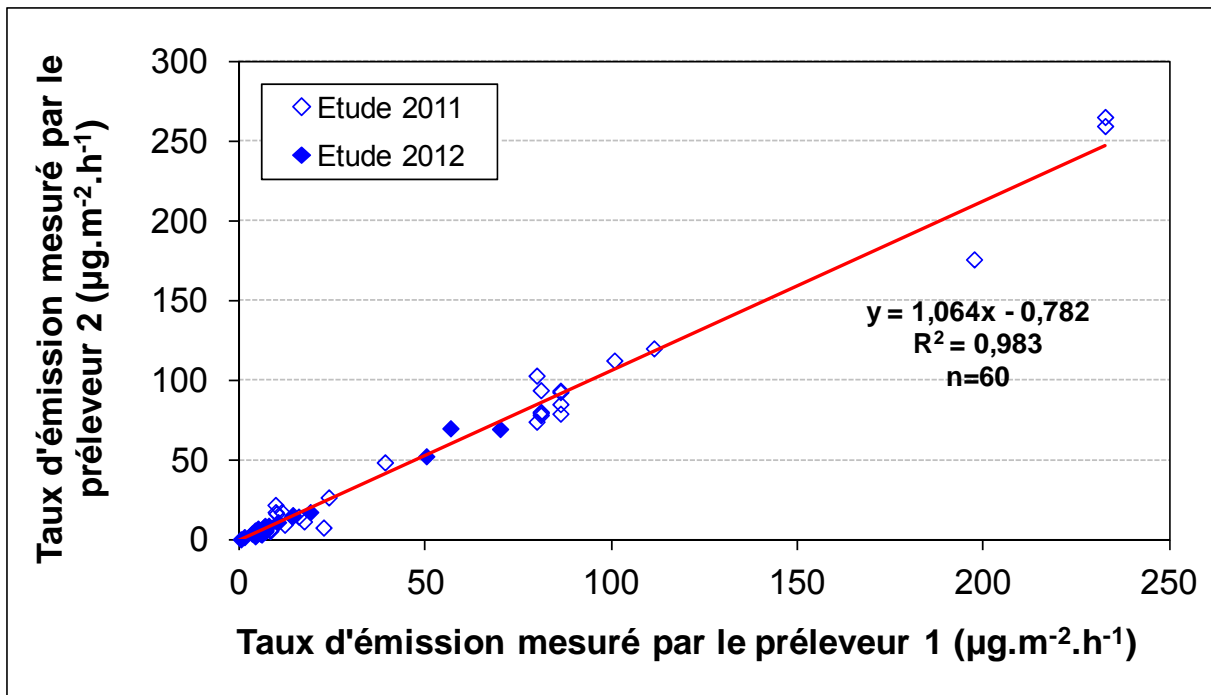


Figure 2 : Taux d'émission ($\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$) du formaldéhyde mesurés deux fois, simultanément, sur le même matériau dans des environnements réels (8 établissements scolaires distincts).

Les mesures faites en doublon sur les différents matériaux sont en bon accord : pente de la droite égale à 1,06 et coefficient de corrélation égal à 0,98. La répétabilité intra-méthode est égale à $6,8 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. D'après ces résultats, il est possible d'en déduire que les mesures de formaldéhyde effectuées avec le préleveur passif dans un environnement réel sont répétables et que les taux d'émission déterminés sur la base d'un préleveur unique sont pertinents.

2.2 CAMPAGNE DE SAINT JUNIEN

2.2.1 Site d'étude

Le site d'étude est une école maternelle comportant un bâtiment à 3 niveaux. Cette école est située au centre ville de la commune de Saint-Junien en Haute-Vienne (Limousin - voir Figure 8).



Figure 8 : (a) Emplacement de l'école de Saint-Junien. (b) Photographie de l'établissement.

Cette école a été construite au début du siècle dernier et a subi de nombreux aménagements. Elle compte 4 salles de classe ainsi que plusieurs autres pièces

(bureaux, sanitaires, salles de gymnastique, etc.) pour une superficie totale de 880 m². Des travaux de rénovation ont été réalisés durant l'été 2010 sur l'une des 2 parties du bâtiment pour remplacer les fenêtres et refaire les peintures.

Durant la seconde phase de la campagne pilote, les mesures ont été réalisées dans deux salles de classe situées chacune dans l'une des parties du bâtiment. La concentration moyenne en formaldéhyde de l'établissement mesurée par prélèvement passif (Radiello 165) d'une durée de 4,5 jours (soit 2x2 cartouches – 2 salles – une campagne été et une campagne hiver) était de 40,5 µg.m⁻³. La salle de classe située dans la partie la plus ancienne du bâtiment était la pièce dans laquelle les concentrations moyennes étaient les plus élevées (43,5 µg.m⁻³). C'est dans cette pièce que la recherche des sources d'émission a été effectuée.

La surface au sol de la pièce investiguée est d'environ 80 m². Les murs sont recouverts de papier peint sur la partie haute et de moquette murale sur la partie basse. Le plafond est constitué par des dalles de plafond en fibres. Le sol est recouvert d'un revêtement plastique. Cette pièce comporte 6 grandes fenêtres en PVC. Cette salle comporte une porte d'accès en bois massif donnant sur un petit corridor qui sert également au stockage de matériel, une autre porte de service en PVC donne directement sur l'extérieur. Le mobilier est très présent et de diverses origines : meubles commerciaux surtout en bois aggloméré surfacé (mélamine, papier, etc.) et meubles « faits maison » surtout en bois aggloméré ou contre-plaqué peint ou vernis (voir Figure 9).

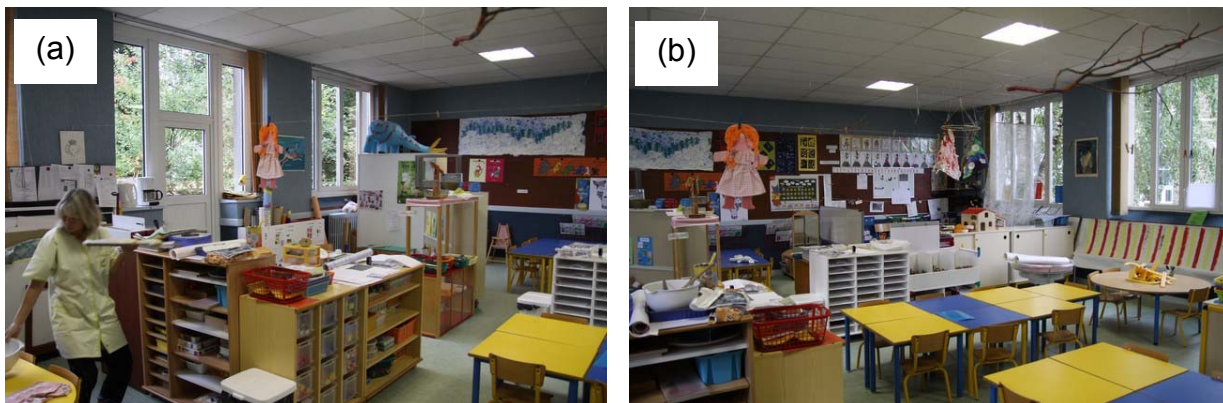


Figure 3 : (a) - (b) Photographies de l'aménagement intérieur de la salle de classe investiguée de l'école maternelle de Saint-Junien.

Des trappes d'aération situées au-dessus des fenêtres assurent une aération passive de la pièce par de l'air en provenance de l'extérieur.

D'après le Tableau 2, le ratio des surfaces des éléments du mobilier sur celles du bâti est proche de 1. Dans le cas présent, on s'attend donc à ce que les contributions des éléments du mobilier soient modérées.

Tableau 2 : Superficie, volume, rapport entre la surface des éléments mobilier et de décoration et la surface du bâti et rapport entre la totalité des surfaces et le volume de la salle de classe investiguée dans l'école de Saint-Junien.

Surface au sol (m ²)	Volume de la pièce (m ³)	Surfaces bâties (m ²)	Surfaces mobilier et décoration (m ²)	Rapport mobilier/bâti	Rapport surfaces/volume (m ⁻¹)
80	303,6	258,0	317,4	1,2	1,9

2.2.2 Caractéristiques de la campagne

La campagne de mesure de Saint-Junien s'est déroulée les 24 et 25 avril 2012. La première journée a été dédiée à l'identification et au métrage des différentes surfaces ainsi qu'à la pose des préleveurs et aux mesures des concentrations ambiantes en formaldéhyde à l'intérieur et à l'extérieur de la pièce. Durant la seconde journée, la mesure du taux de renouvellement de l'air a été effectuée dans différentes conditions d'aération de la pièce : renouvellement de l'air uniquement par de l'air extérieur de la pièce (porte d'accès calfeutrée), renouvellement de l'air de la pièce par air extérieur et air en provenance de la pièce contigüe et renouvellement de l'air de la pièce avec porte et 2 fenêtres ouvertes. Durant cette campagne, une représentante du personnel de l'Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) de Lim'Air a été initiée à la méthodologie de mesure afin d'appliquer un protocole réduit dans d'autres établissements scolaires de la région.

Le Tableau 3 rassemble les données environnementales et techniques de ces 2 journées de mesures.

Tableau 3 : Données environnementales et techniques concernant les mesures réalisées dans la salle de classe de l'école de Saint-Junien.

	Jour 1	Jour 2
Date	24/04/2012	25/04/2012
Actions menées	- Identification des surfaces - Métrage des surfaces - Pose des préleveurs DNPH - Mesure des concentrations ambiantes en formaldéhyde à l'intérieur et à l'extérieur de la salle de classe	- Mesure du taux de renouvellement de l'air dans 3 situations d'aération différentes
Température extérieure moyenne [min - max]	8,1°C [6,0 - 9,4]	11,4°C [10,0 - 12,4]
Humidité relative extérieure moyenne [min - max]	79,8% [67,0 - 86,0]	65,3% [60,0 - 68,0]
Température intérieure moyenne [min - max]	18,6°C [17,8 - 20,3]	18,1°C [17,8 - 18,4]
Humidité relative intérieure moyenne [min - max]	50,0% [45,6 - 52,2]	50,5% [49,1 - 52,0]
Nombre de surface identifiées	>60	-
Nombre de mesure du taux de renouvellement de l'air	-	3 (dans des conditions différentes)
Nombre de préleveurs DNPH posés	45	-
Nombre de surface avec répliqués	6	-
Nombre de prélèvement actif à l'intérieur	2	-
Nombre de prélèvement actif à l'extérieur	1	-

^a Données issues des relevés météorologiques de la station de Limoges (Longitude : 1°E 11' ; Latitude : 45°N 52' et hauteur : 396m).

2.2.3 Résultats et interprétations

2.2.3.1 Taux de renouvellement et concentrations ambiantes

La valeur du taux de renouvellement de l'air de la salle de classe mesurée dans les conditions de prélèvement pour la mesure de la concentration ambiante en

formaldéhyde est de $0,04 \text{ h}^{-1}$ ($n=1$). Les concentrations ambiantes en formaldéhyde à l'intérieur de la salle de classe et à l'extérieur du bâtiment sont respectivement égales à $41,8 \mu\text{g.m}^{-3}$ ($n=2$) et $1,3 \mu\text{g.m}^{-3}$. Nous rappelons qu'à part la concentration extérieure, **les valeurs annoncées ici ne sont en rien représentatives d'une situation normale et habituelle d'utilisation de la salle de classe.** En effet, pour les besoins de l'étude, la porte donnant sur le corridor attenant a été calfeutrée. Cette situation particulière a été conservée pendant plusieurs heures avant l'échantillonnage afin d'atteindre un état d'équilibre entre les émissions des matériaux et la concentration intérieure (d'où un niveau relativement élevé pour cette concentration). La valeur du taux de renouvellement de l'air mesurée lorsque les ouvertures de la salle de classe sont closes mais non-calfeutrées (situation d'utilisation normale de la salle de classe en présence des élèves) est égale à $0,12 \text{ h}^{-1}$ ce qui traduit une aération insuffisante. Pour finir, la valeur du taux de renouvellement de l'air mesurée avec la porte d'accès et 2 fenêtres ouvertes (situation d'aération en l'absence des élèves) est égale $2,1 \text{ h}^{-1}$. **Pour parvenir à une situation d'aération acceptable pour cette salle de classe il faudrait par conséquent ouvrir a minima 2 fenêtres pendant 30 minutes à chacune des pauses de la journée (récréations et midi). Il est notamment très important d'ouvrir les fenêtres le matin avant l'arrivée des enfants afin d'éliminer au mieux les polluants qui se seront accumulés pendant la nuit.**

2.2.3.2 Emissions des surfaces identifiées

Comme le montre le Tableau 4, les taux d'émission des surfaces et matériaux échantillonnés dans la salle de classe de l'école de Saint-Junien sont compris entre la limite de détection ($=1,2 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$) et $16 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. Les taux d'émission de 5 surfaces sont en dessous de la limite de détection. Le moyenne des taux d'émission est de $5,8 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ avec une valeur médiane à $3,2 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. Il n'y a donc pas de source d'émission importante dans cette salle de classe.

Tableau 4 : Taux d'émission en formaldéhyde (TE_i) des différentes surfaces intérieures échantillonnées dans la salle de classe de l'école de Saint-Junien et émissions totales correspondantes (Q_i).

Emplacement - Désignation	Taux d'émission ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	Emission totale ($\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$)
Poufs	<LD	0,9
Dessus bac à sable	1,8	1,7
Meuble ordinateur	1,9	3,2
Évier	3,6	3,6
Table demie-lune	3,7	4,2
Casier rouleau à papier	1,2	4,2
Tableau magnétique	1,9	4,5
Étagère musique + étagère évier	<LD	5,7
Bureau mélaminé	2,3	6,4
Meuble papier côté bureau		7,7
Chaises		9,9
Table ovale		11,1
Menuiserie PVC		11,8
Tapis route		12,0
Bois portes entrée + placard horloge + p		12,0
Armoire		15,0
Coin salon		16,2
Sol PVC*		16,7
Montants portes*		21,6
Armoire range livres et cahiers		22,1
Meuble puzzle	4,9	22,6
Coin cuisine	2,4	24,8
Bureau	5,5	25,5
Meubles à serrure	2,7	27,7
Table ronde coin peinture	14,0	31,7
Meubles en pin	1,5	32,3
Armoire range crayons	4,1	32,9
Bancs	8,9	34,9
Tables bleu et jaune	2,7	38,5
Chevalet peinture	6,6	44,1
Contre-plaqué pour affichagi		75,0
Meuble médium		78,5
Mur béton + papier peint*		95,3
Dos des meubles		132,3
Meuble jouets		152,2
Coin poupées	15,3	154,6
Mur béton + moquette murale*	7,2	169,8
Casier prénoms	12,8	201,6
Plafond*	14,3	1143,6

AUTRES SURFACES

PLUS FORTS CONTRIBUTEURS

Surfaces pour lesquelles des répliquats ont été effectués. La valeur du taux d'émission donné dans ce cas est une valeur moyenne.

En se focalisant sur les dix principaux contributeurs (dix dernières lignes du Tableau 4), on peut tracer un histogramme comme celui de la Figure 4).

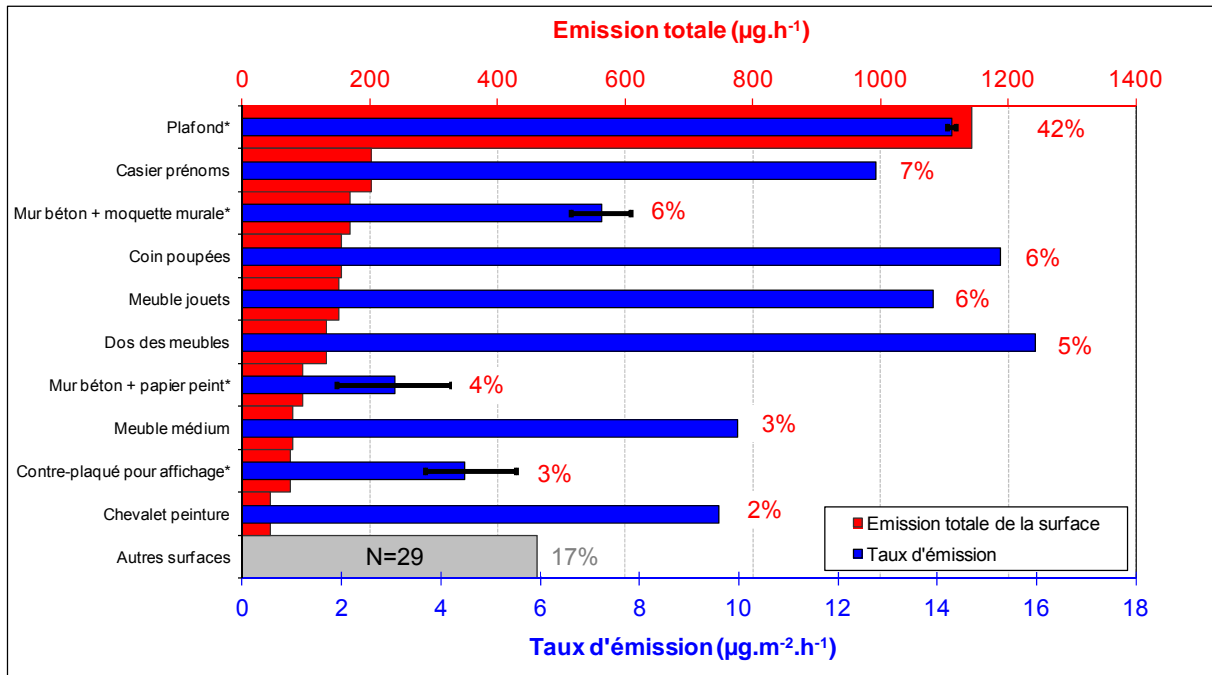


Figure 4 : Barres oranges : Emission totale de chacune des 10 surfaces identifiées comme les plus contributrices dans la salle de classe de Saint-Junien, les valeurs correspondent au pourcentage des contributions relatives individuelles – Barre grise : Emission totale cumulée des 29 autres surfaces - Barres bleues : Taux d'émission associés de chacune de ces 10 surfaces. * Surfaces pour lesquelles des répliquats ont été effectués. La barre noire représente les valeurs minimale et maximale mesurées pour le taux d'émission.

Dans le cas de la salle de classe de Saint-Junien, aucune source n'a un taux d'émission supérieur à $20 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. Les deux sources qui présentent les taux d'émission les plus importants contribuent pour environ 11% au total des émissions alors qu'elles représentent moins de 4% des surfaces échantillonnées. En revanche, le plafond qui présente un taux d'émission de l'ordre de $14 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ et a une étendue de l'ordre de 80 m^2 , est la source d'émission principale.

2.2.3.3 Interprétation des résultats

Les différents matériaux échantillonnés ont été réunis en six catégories : sol, murs, plafond, mobiliers (tables, chaises, armoires, etc.), menuiseries (fenêtres, portes, plinthes, etc.) et éléments de décoration ou d'aménagement (tableaux, radiateurs, livres, etc.). Les contributions relatives de chacune de ces catégories sont représentées sur la Figure 5.

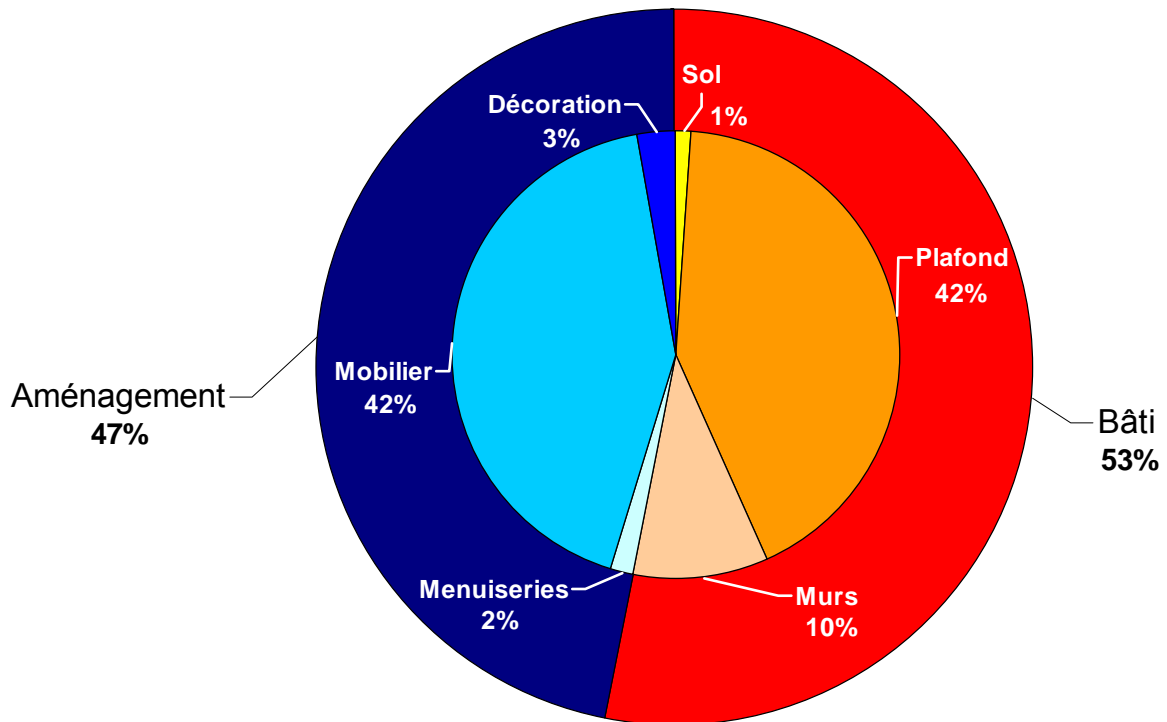


Figure 5 : Graphique représentant les contributions relatives des 6 catégories de surfaces présentes dans la salle de classe de Saint-Junien et qui appartiennent soit au bâti soit à l'ameublement.

Selon la Figure 5, les émissions en formaldéhyde de la salle de classe de Saint-Junien proviennent presque à part égale des éléments du bâti et de ceux de l'aménagement. Ce résultat est en accord avec le rapport entre les surfaces du mobilier et du bâti de 1,2 (Tableau 2).

La concentration ambiante en formaldéhyde mesurée dans la salle de classe en comparaison de la valeur obtenue par l'application du modèle d'équilibre des masses, nous indique une différence relative de 10%. Compte tenu des approximations faites et des incertitudes de mesure sur les valeurs du taux de renouvellement (α) ou de la vitesse de disparition du formaldéhyde (v), on peut conclure que cet écart n'est pas significatif et que l'échantillonnage des sources a été exhaustif (pas d'oubli de source majeure). Ceci permet de conclure que les éléments qui n'ont été ni échantillonnés, ni sortis de la salle de classe n'étaient pas des contributeurs importants et par conséquent, la méthodologie d'utilisation des préleveurs peut être allégée. **Ainsi, il ne semble plus nécessaire de retirer de la pièce le matériel scolaire tel que papier, livres, dessin, etc. De même si des armoires sont présentes dans la pièce, il n'apparaît pas nécessaire de les vider mais juste de bien fermer les portes de celles-ci.**

2.3 CAMPAGNE DE MONT-PRES-CHAMBORD

2.3.1 Site d'étude

Le deuxième site d'étude est une école maternelle comportant un bâtiment unique avec une partie ancienne et une extension plus récente. Cette école est située au centre ville de la commune de Mont-Près-Chambord dans le Loir-et-Cher en région Centre (voir Figure 6).



Figure 6 : (a) Emplacement de l'école de Mont-Près-Chambord. (b) Photographie de l'établissement.

Cette école a été construite dans les années 50 et une extension dans les années 70. Elle compte 5 salles de classe plus de nombreuses autres salles destinées au repos des enfants, à la motricité, laverie, etc. pour une superficie totale de 1650 m². Durant la seconde phase de la campagne pilote, les mesures ont été réalisées dans deux salles de classe situées chacune dans une des parties du bâtiment. La concentration moyenne en formaldéhyde de l'établissement mesurée par prélèvement passif (Radiello 165) d'une durée de 4,5 jours (soit 4x2 cartouches – 2 salles – une campagne été et une campagne hiver) était de 34,2 µg.m⁻³. La salle de classe de la partie la plus ancienne du bâtiment était la pièce dans laquelle les concentrations moyennes étaient les plus élevées. La concentration moyenne maximale était de 52,4 µg.m⁻³. C'est dans cette pièce que la recherche des sources d'émission a été effectuée.

La surface au sol de la pièce investiguée est d'environ 51,2 m². Les murs sont en béton recouverts de différents revêtements : tapisserie, lambris, fibre de verre. Le plafond est en partie recouvert de dalles de plafond en fibres et une autre partie est recouverte de moquette. Le sol est recouvert de dalle PVC. Cette pièce comporte 2 grandes fenêtres en PVC qui donne sur l'extérieur et des petites fenêtres en bois qui donnent sur le couloir attenant et qui sont condamnées. Cette salle comporte 2 portes d'accès vers le couloir commun du bâtiment. On note également dans cette pièce la présence d'une grande mezzanine en bois massif, bois contrecollé et bois aggloméré qui couvre environ la moitié de la surface de la pièce. Le mobilier se compose de tables et chaises pour les enfants, de bureaux pour le personnel, d'une armoire encastrée pour le rangement du matériel des professeurs et de plusieurs étagères « faites maison » (voir Figure7). On note aussi dans cette pièce la présence d'une photocopieuse.



Figure 7 : (a) - (b) Photographies de l'aménagement intérieur de la salle de classe de l'école maternelle de Mont-Près-Chambord.

Le renouvellement de l'air semble se faire d'une part par les ouvertures situées sous les portes d'accès et d'autre part par une grille d'aération située à proximité du plafond mais dont l'entrée semble être en communication avec un local technique. Il ne semble pas y avoir d'entrée d'air en contact direct avec de l'air extérieur.

D'après le Tableau 5, le ratio des surfaces des éléments du mobilier sur celles du bâti est égal à 0,5. Dans le cas présent, on s'attend à ce que les contributions des éléments du mobilier soient relativement importantes.

Tableau 5 : Superficie, volume, rapport entre la surface des éléments mobilier et de décoration et la surface du bâti et rapport entre la totalité des surfaces et le volume de la salle de classe de l'école de Mont-Près-Chambord.

Surface au sol (m ²)	Volume de la pièce (m ³)	Surfaces bâties (m ²)	Surfaces mobilier et décoration (m ²)	Rapport mobilier/bâti	Rapport surfaces/volume (m ⁻¹)
51,2	177,8	215,3	356,0	1,7	3,2

2.3.2 Caractéristiques de la campagne

La campagne de mesure de Mont-Près-Chambord s'est déroulée les 26 et 27 avril 2012. La matinée de la première journée a été dédiée à l'identification des différentes surfaces et à leurs métrages. L'après-midi, les préleveurs DNPH ont été posés et les mesures de concentrations ambiantes à l'intérieur et à l'extérieur de la pièce ont été réalisées. Durant la matinée de la seconde journée, la mesure du taux de renouvellement de l'air de la salle de classe a été effectuée dans 3 situations distinctes (portes d'accès au couloir calfeutrées, portes et fenêtres closes, une porte et une fenêtre ouverte). Durant cette campagne, une représentante du personnel de l'Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) Lig'Air ainsi que personne de la Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), ont été initiées à la méthodologie de mesure afin d'appliquer un protocole réduit dans d'autres établissements scolaires de la région.

Le Tableau 6 rassemble les données environnementales de cette campagne.

Tableau 6 : Données environnementales et techniques concernant les mesures réalisées dans la salle de classe de l'école de Mont-Près-Chambord.

	Jour 1	Jour 2
Date	26/04/2012	27/04/2012
Actions menées	- Identification des surfaces - Métrage des surfaces - Pose des préleveurs DNPH - Mesure des concentrations ambiantes en formaldéhyde à l'intérieur et à l'extérieur de la salle de classe	- Mesure du taux de renouvellement de l'air dans 3 situations d'aération différentes
Température extérieure moyenne [min - max]	10,1°C [7,1 - 12,5]	13,6°C [11,1 - 16,0]
Humidité relative extérieure moyenne [min - max]	84,9% [73,0 - 91,0]	67,0% [53,0 - 77,0]
Température intérieure moyenne [min - max]	21,2°C [20,6 - 21,8]	18,9°C [18,6 - 19,6]
Humidité relative intérieure moyenne [min - max]	47,6% [46,4 - 49,8]	49,8% [48,3 - 51,8]
Nombre de surface identifiées	>60	-
Nombre de mesure du taux de renouvellement de l'air	-	3 (dans des conditions différentes)
Nombre de préleveurs DNPH posés	46	-
Nombre de surface avec répliqués	6	-
Nombre de prélèvement actif à l'intérieur	2	-
Nombre de prélèvement actif à l'extérieur	1	-

^a Données issues des relevés météorologiques de la station de Blois (Latitude : 47°68 ; Longitude : 1°21 et Hauteur : 121m).

2.3.3 Résultats

2.3.3.1 Taux de renouvellement et concentrations ambiantes

La valeur du taux de renouvellement de l'air de la salle de classe mesurée dans les conditions de prélèvement pour la mesure de la concentration ambiante en formaldéhyde est de $0,03 \text{ h}^{-1}$ ($n=1$). Les concentrations ambiantes en formaldéhyde à l'intérieur de la salle de classe et à l'extérieur du bâtiment sont respectivement égales à $115,1 \mu\text{g.m}^{-3}$ ($n=2$) et $1,2 \mu\text{g.m}^{-3}$. Nous rappelons qu'à part la concentration extérieure, **les valeurs annoncées ici ne sont en rien représentatives d'une situation normale et habituelle d'utilisation de la salle de classe**. En effet, pour les besoins de l'étude, les portes donnant sur le couloir ont été calfeutrées. Cette situation particulière a été conservée pendant plusieurs heures avant l'échantillonnage afin d'atteindre un état d'équilibre entre les émissions des matériaux et la concentration intérieure (d'où un niveau relativement élevé pour cette concentration). La valeur du taux de renouvellement de l'air mesurée lorsque les ouvertures de la salle de classe sont closes mais non-calfeutrées (situation d'utilisation normale de la salle de classe en présence des élèves) est égale à $0,04 \text{ h}^{-1}$.

¹ ce qui traduit une aération insuffisante. Pour finir, la valeur du taux de renouvellement de l'air mesurée avec une porte d'accès et une fenêtre grande ouverte (situation d'aération en l'absence des élèves) est égale 6,2 h⁻¹. **Pour parvenir à une situation d'aération acceptable pour cette salle de classe il faudrait par conséquent ouvrir a minima une fenêtre et une porte pendant 10 minutes à chacune des pauses de la journée (récréations et midi). Il est notamment très important d'ouvrir les fenêtres le matin avant l'arrivée des enfants afin d'éliminer au mieux les polluants qui se seront accumulés pendant la nuit.**

2.3.3.2 Emissions des surfaces identifiées

Comme le montre le Tableau 7, les taux d'émission des surfaces et matériaux échantillonnés dans la salle de classe de Mont-Près-Chambord sont compris entre la limite de détection (2,3 µg.m⁻².h⁻¹) et 69,6 µg.m⁻².h⁻¹. Un seul des taux d'émission mesurés est en dessous de la limite de détection. La valeur moyenne des taux d'émission est de 13,4 µg.m⁻².h⁻¹ avec une valeur médiane à 6,4 µg.m⁻².h⁻¹. Il n'y a donc que peu de sources d'émission importantes dans cette salle de classe.

Tableau 7 : Taux d'émission en formaldéhyde (TE_i) des différentes surfaces intérieures échantillonnées dans la salle de classe de Mont-Près-Chambord et émissions totales correspondantes (Q_i).

Emplacement - Désignation	Taux d'émission (µg.m ⁻² .h ⁻¹)	Emission totale (µg.h ⁻¹)
Etagère radiateur contreplaqué	3,6	4,7
Bancs	3,1	6,5
Photocopieur+ mat info	<LD	6,8
Porte placard tapisserie	7,7	8,1
Tableau affichage +tapisserie	6,6	8,1
Etagère grise	6,5	9,8
Table bois	5,1	10,2
Porte entrée bois	5,5	16,6
Etagère mélaminé	3,8	18,1
Menuiseries PVC		20,6
Chevalet jaune		23,3
Table mélaminé		24,5
Bois massif (mezzanine :pin)		30,1
Mur béton fibres de verre		32,7
Bureau mélaminé		39,7
Tapis lino		42,9
Tableau noir		46,2
Encadrement radiateur		46,7
2 tables		48,9
Chevalet bois		49,5
Mobilier agglo	10,7	62,9
Cache néon contreplaqué	8,7	64,2
Banc bois +étagère+bureau	9,7	70,0
Etagère mélaminé	7,3	75,2
Placard bois+étagère +porte	6,2	76,5
Coussin sol (tissu)	50,4	89,6
Lambris*	5,4	109,2
Dessus mezzanine+esescalier*	5,3	138,3
Chaises mousses	49,0	140,9
Sol mezzanine	6,6	143,3
Poutres	6,4	208,1
Meubles jouet bois massif	15,9	215,2
Chaises	39,0	275,0
Mur + tapisserie	5,7	276,4
Sol*	5,9	300,9
Plafond moquette*	18,1	516,1
Meubles cuisine + cloison	21,1	572,1
Plafond dalles*	51,2	1082,5
Plafond sous mezzanine*	69,6	1590,5

AUTRES SURFACES

PLUS FORTS CONTRIBUTEURS

Surfaces pour lesquelles des répliquats ont été effectués. La valeur du taux d'émission est une valeur moyenne.

En se focalisant sur les dix principaux contributeurs (dix dernières lignes du Tableau 7), on peut tracer un histogramme comme celui de la Figure 8).

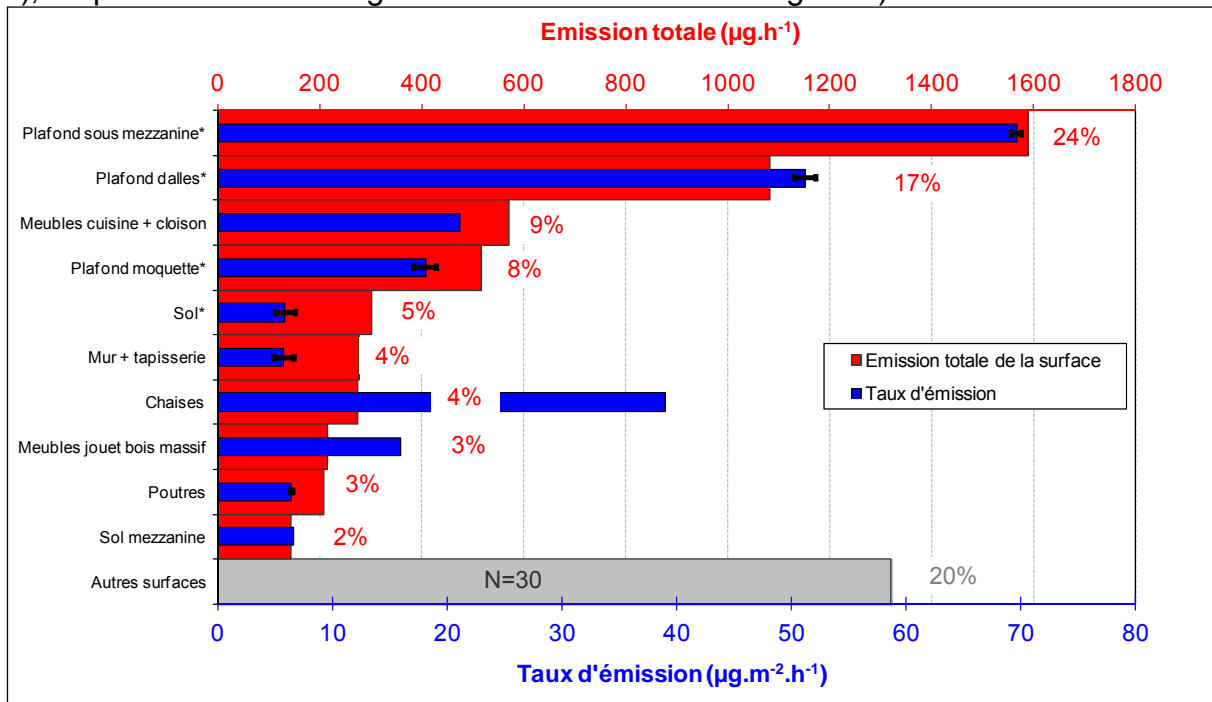


Figure 8 : Barres oranges : Émission totale de chacune des 10 surfaces identifiées comme les plus contributrices dans la salle de classe de Mont-Près-Chambord, les valeurs correspondent au pourcentage des contributions relatives individuelles – Barre grise : Émission totale cumulée des 29 autres surfaces - Barres bleues : Taux d'émission associés de chacune de ces 10 surfaces. * Surfaces pour lesquelles des répliquats ont été effectués. La barre noire représente les valeurs minimale et maximale mesurées pour le taux d'émission.

Dans le cas de la salle de classe de Mont-Près-Chambord, les 2 sources ayant les taux d'émission les plus élevés sont aussi celles qui contribuent le plus au total des émissions (41%). En effet, un effet cumulatif du taux d'émission et des grandes surfaces occupées par ces matériaux donne une contribution très significative. Il est à noter que l'ajout d'une mezzanine à l'aménagement de la salle de classe a créé un apport de plus de 30% de sources en formaldéhyde.

2.3.3.3 Interprétation des résultats

Les différents matériaux échantillonnés ont été réunis en six catégories : sol, murs, plafond, mobiliers (tables, chaises, armoires, etc.), menuiseries (fenêtres, portes, plinthes, etc.) et éléments de décoration ou d'aménagement (tableaux, radiateurs, livres, etc.). Les contributions relatives de chacune de ces catégories sont représentées sur la Figure 9.

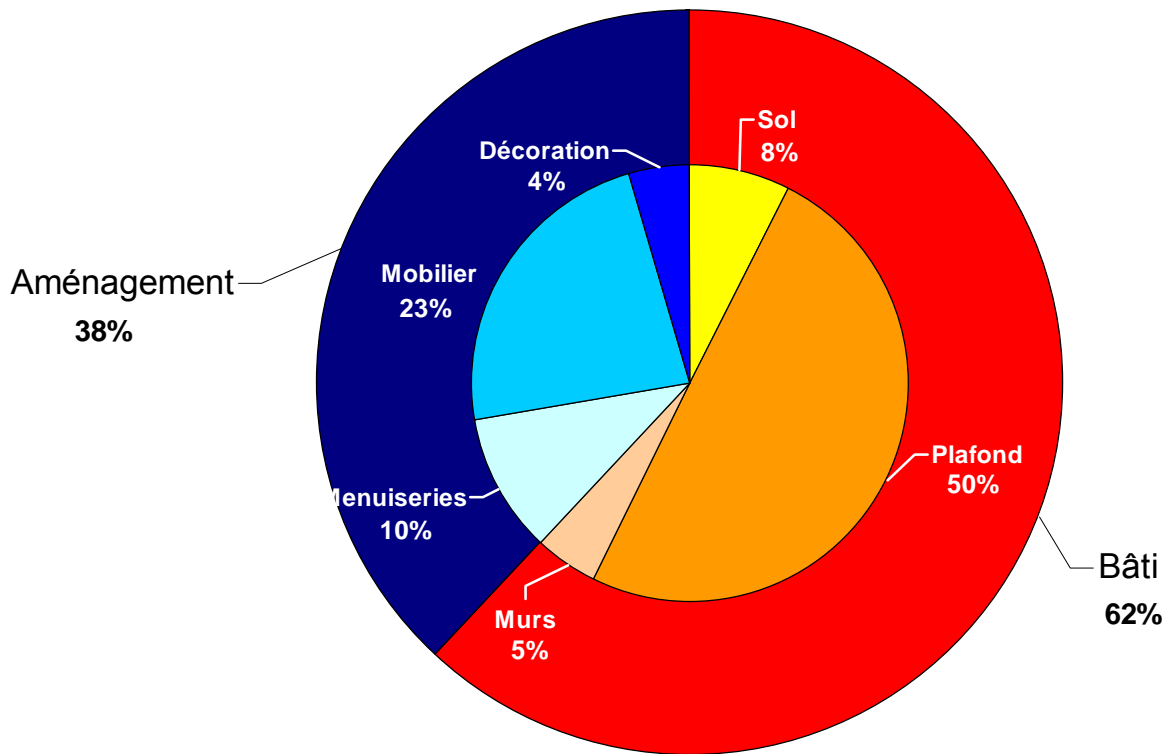


Figure 9 : Graphique représentant les contributions relatives des 6 catégories de surfaces présentes dans la salle de classe de Mont-Près-Chambord et qui appartiennent soit au bâti soit à l'ameublement.

Selon la Figure 9, plus de 60% des émissions en formaldéhyde de la salle de classe de Mont-Près-Chambord proviennent des éléments du bâti (plafond, murs et sol). Ce résultat est en désaccord avec le rapport entre les surfaces du mobilier et du bâti de 1,7 (Tableau 5).

La concentration ambiante en formaldéhyde mesurée dans la salle de classe en comparaison de la valeur obtenue par l'application du modèle d'équilibre des masses, nous indique une différence relative de 14%. Compte tenu des approximations faites et des incertitudes de mesure sur les valeurs du taux de renouvellement (α) ou de la vitesse de disparition du formaldéhyde (ν), on peut conclure que cet écart n'est pas significatif et que l'échantillonnage des sources a été exhaustif (pas d'oubli de source majeure).

2.4 CAMPAGNE DE BESANÇON - 1

2.4.1 Site d'étude

Le troisième site d'étude est une crèche à bâtiment unique à 3 niveaux. Cette crèche est située au centre ville de Besançon dans le Doubs en région Franche-Comté (voir Figure 10).



Figure 10 : (a) Emplacement de la crèche de Besançon. (b) Photographie de l'établissement.

Cette crèche a été construite en 1984 et n'a pas depuis fait l'objet de travaux de rénovation d'envergure. Elle compte 10 pièces de vie pour une superficie totale approximative de 1500 m².

Durant la seconde phase de la campagne pilote, les mesures ont été réalisées dans 4 des 10 pièces du bâtiment. La concentration moyenne en formaldéhyde de l'établissement mesurée par prélèvement passif (Radiello 165) d'une durée de 4,5 jours (soit 8x2 cartouches – 8 salles – une campagne été et une campagne hiver) était de 30,5 µg.m⁻³. La concentration moyenne maximale était de 46,5 µg.m⁻³. C'est dans cette pièce qui sert de salle de jeux et de dortoir que la recherche des sources d'émission a été effectuée.

La surface au sol de la pièce investiguée est de 49,4 m². Les murs donnant sur l'extérieur sont en béton recouvert de papier-peint, les cloisons et le plafond sont en Placoplatre recouvert de papier-peint pour les cloisons et d'enduit peint pour le plafond. Un revêtement acoustique constitué par des plaques de mousse recouvre en partie le plafond. Le sol est recouvert d'un revêtement plastique. Cette pièce comporte 2 grandes fenêtres coulissantes à double-vitrage, 3 vélux et 2 petites fenêtres coulissantes. Cette pièce comporte deux portes d'accès l'une donnant sur la nurserie et l'autre sur une autre pièce de vie ainsi qu'une porte donnant directement sur un grand balcon servant de salle de jeux extérieure pour les enfants. Le mobilier se compose de tables et chaises pour les enfants, de matelas pour la sieste, de grands placards servant au stockage des jouets et de matériel pour les travaux manuels ou pour les repas (voir Figure 11).



Figure 11 : (a) - (b) Photographies de l'aménagement intérieur de la pièce de vie de la crèche de Besançon.

L'aération passive doit être assurée par les entrées d'air situées au niveau des Velux.

D'après le Tableau 8, le ratio des surfaces des éléments du mobilier sur celles du bâti est égal à 1,2. Dans le cas présent, on s'attend à ce que les contributions des éléments du mobilier soient relativement moyennes.

Tableau 8 : Superficie, volume, rapport entre la surface des éléments mobilier et de décoration et la surface du bâti et rapport entre la totalité des surfaces et le volume de la pièce de vie de la crèche de Besançon.

Surface au sol (m ²)	Volume de la pièce (m ³)	Surfaces bâties (m ²)	Surfaces mobilier et décoration (m ²)	Rapport mobilier/bâti	Rapport surfaces/volume (m ⁻¹)
49,4	234,2	177,6	209,4	1,2	1,7

2.4.2 Caractéristiques de la campagne

La première campagne de mesure de Besançon s'est déroulée les 2 et 3 mai 2012. L'après-midi de la première journée a été dédiée à l'identification des différentes surfaces, à la pose des préleveurs et à la mesure des concentrations ambiantes à l'intérieur et à l'extérieur de la pièce. Durant la seconde journée, la mesure du taux de renouvellement de l'air de la pièce de vie ainsi que le métrage des surfaces ont été réalisés. Durant cette campagne, trois membres du personnel de l'Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) ATMO Franche-Comté ont été initiés à la méthodologie de mesure afin d'appliquer un protocole réduit dans d'autres établissements scolaires de la région.

Le Tableau 9 rassemble les données environnementales et techniques de cette campagne.

Tableau 9 : Données environnementales et techniques concernant les mesures réalisées dans la salle de la pièce de vie de la crèche de Besançon.

	Jour 1	Jour 2
Date	02/05/2012	03/05/2012
Actions menées	- Identification des surfaces - Pose des préleveurs DNPH - Mesure des concentrations ambiantes en formaldéhyde à l'intérieur et à l'extérieur de la salle de classe	- Mesure du taux de renouvellement de l'air avec entrées air en provenance des pièces attenantes calfeutrées - Métrage des surfaces
Température extérieure moyenne [min - max]	11,3°C [9,8 - 13,6]	11,8°C [5,0 - 17,1]
Humidité relative extérieure moyenne [min - max]	84,8% [66,0 - 99,0]	78,4% [62,0 - 100,0]
Température intérieure moyenne [min - max]	22,5°C [21,0 - 24,0]	19,6°C [18,7 - 20,9]
Humidité relative intérieure moyenne [min - max]	53,6% [52,4 - 55,7]	51,7% [48,8 - 54,2]
Nombre de surface identifiées	>50	-
Nombre de mesure du taux de renouvellement de l'air	-	1
Nombre de préleveurs DNPH posés	35	-
Nombre de surface avec répliqués	5	-
Nombre de prélèvement actif à l'intérieur	2	-
Nombre de prélèvement actif à l'extérieur	1	-

^a Données issues des relevés météorologiques de la station de Besançon - Thise (Latitude : 47°25 ; Longitude : 5°99 et Hauteur : 307m).

2.4.3 Résultats

2.4.3.1 Taux de renouvellement et concentrations ambiantes

La valeur du taux de renouvellement de l'air de la pièce de vie est de 0,13 h⁻¹. Les concentrations ambiantes moyennes en formaldéhyde à l'intérieur de cette pièce et à l'extérieur du bâtiment sont respectivement égales à 79,0 µg.m⁻³ (n=2) et 1,7 µg.m⁻³. Nous rappelons qu'à part la concentration extérieure, **les valeurs annoncées ici ne sont en rien représentatives d'une situation normale et habituelle d'utilisation de la pièce de vie.** En effet, pour les besoins de l'étude, la porte entre la pièce de vie et la nurserie et la porte entre la pièce de vie et une autre salle contigüe ont été calfeutrées. Cette situation particulière a été conservée pendant plusieurs heures avant l'échantillonnage afin d'atteindre un état d'équilibre entre les émissions des matériaux et la concentration intérieure (d'où un niveau relativement élevée pour cette concentration).

2.4.3.2 Emissions des surfaces identifiées

Comme le montre le Tableau 10, les taux d'émission des surfaces et matériaux échantillonnés dans la pièce de vie de la crèche Besançon sont compris entre 1,0 et 63,2 $\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. La moyenne des taux d'émission est de 8,8 $\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ avec une valeur médiane à 4,5 $\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. Aucune des surfaces échantillonnées n'a de taux d'émission inférieur à la limite de détection qui est égale à 1,0 $\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ pour cet établissement.

Tableau 10 : Taux d'émission en formaldéhyde (TE_i) des différentes surfaces intérieures échantillonnées dans la pièce de vie de la crèche de Besançon et émissions totales correspondantes (Q_i).

Emplacement - Désignation	Taux d'émission ($\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$)	Emission totale ($\mu\text{g.h}^{-1}$)
Peinture	8,0	0,0
Plâtre sans peinture	14,0	0,0
Tables carrés	1,2	0,3
Table blanche	2,4	1,3
Dessus fenêtre	4,1	2,1
Dessus porte	3,2	2,5
Radiateur métal	1,6	3,2
Matelas	2,5	4,5
Encadrement velux pin	2,2	4,5
Porte entrée bois		4,8
Cuisine		9,6
Encadrement porte bois		13,0
Encadrement porte métallique	4,5	16,1
Chaises	2,6	20,2
Meubles angles colorés	1,0	21,2
Coffre	10,3	21,2
Tapis sol	6,9	23,8
Etagère placard mélaminé	2,4	24,4
Porte placard	6,2	48,6
Portes placard + étagères + portes	6,3	56,8
Armoire jouets	3,6	91,5
Rideaux	10,4	112,4
Plafond*	8,2	132,2
Cloisons papier peint*	5,9	187,3
Etagères contreplaqué	47,6	200,7
Couvertures	19,5	242,9
Sol*	5,0	248,7
Mur papier peint (béton)*	5,5	288,3
Mousse acoustique*	63,2	2140,0

Surfaces pour lesquelles des répliquats ont été effectués. La valeur du taux d'émission est une valeur moyenne.

En se focalisant sur les dix principaux contributeurs (dix dernières lignes du Tableau 10), on peut tracer un histogramme comme celui de la Figure 12).

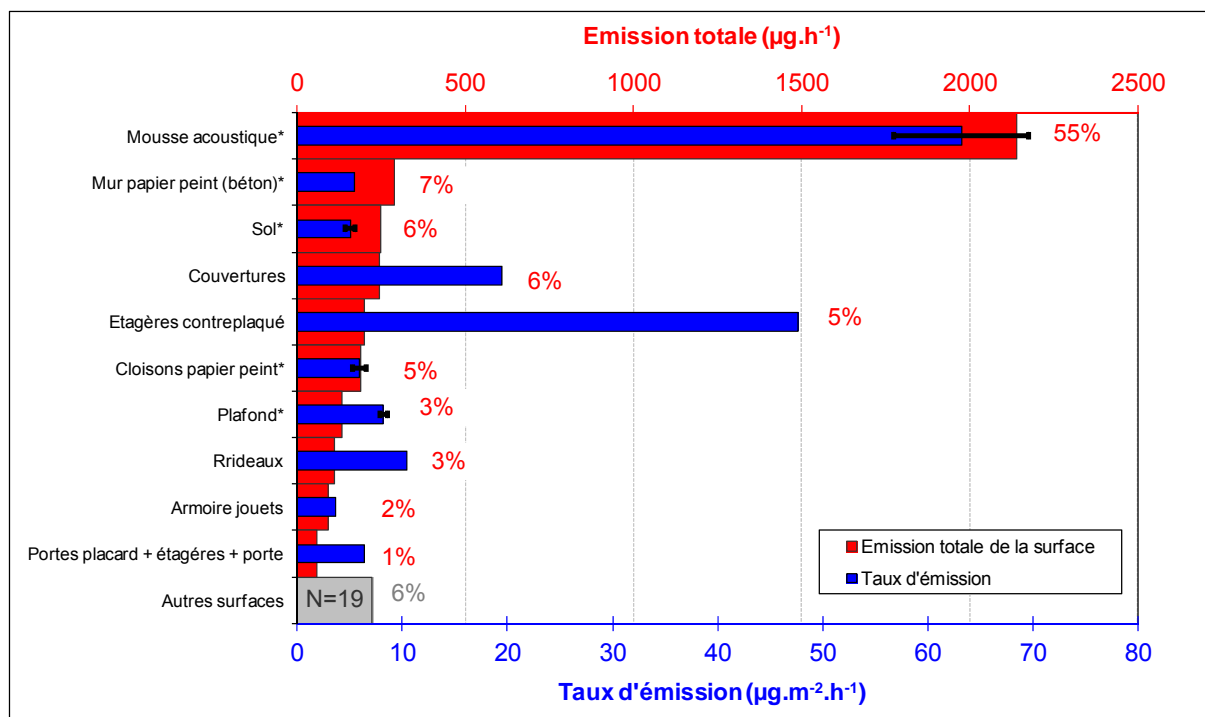


Figure 12 : Barres rouges : Emission totale de chacune des 10 surfaces identifiées comme les plus contributrices dans la pièce de vie de Besançon, les valeurs correspondent au pourcentage des contributions relatives individuelles – Barre grise : Emission totale cumulée des 19 autres surfaces - Barres bleues : Taux d'émission associés de chacune de ces 10 surfaces. * Surfaces pour lesquelles des répliquats ont été effectués. La barre noire représente les valeurs minimale et maximale mesurées pour le taux d'émission.

Dans le cas de la pièce de vie de la crèche de Besançon, les deux sources qui ont les taux d'émission les plus élevés (i.e. mousse acoustique et étagères contreplaqué) contribuent respectivement pour 55 et 5% (soit 60%) au total des émissions pourtant ces surfaces représentent moins de 10% du total des surfaces.

2.4.3.3 Interprétation des résultats

Les différents matériaux échantillonnés ont été réunis en six catégories : sol, murs, plafond, mobiliers (tables, chaises, armoires, etc.), menuiseries (fenêtres, portes, plinthes, etc.) et éléments de décoration ou d'aménagement (tableaux, radiateurs, livres, etc.). Les contributions relatives de chacune de ces catégories sont représentées sur la Figure 13.

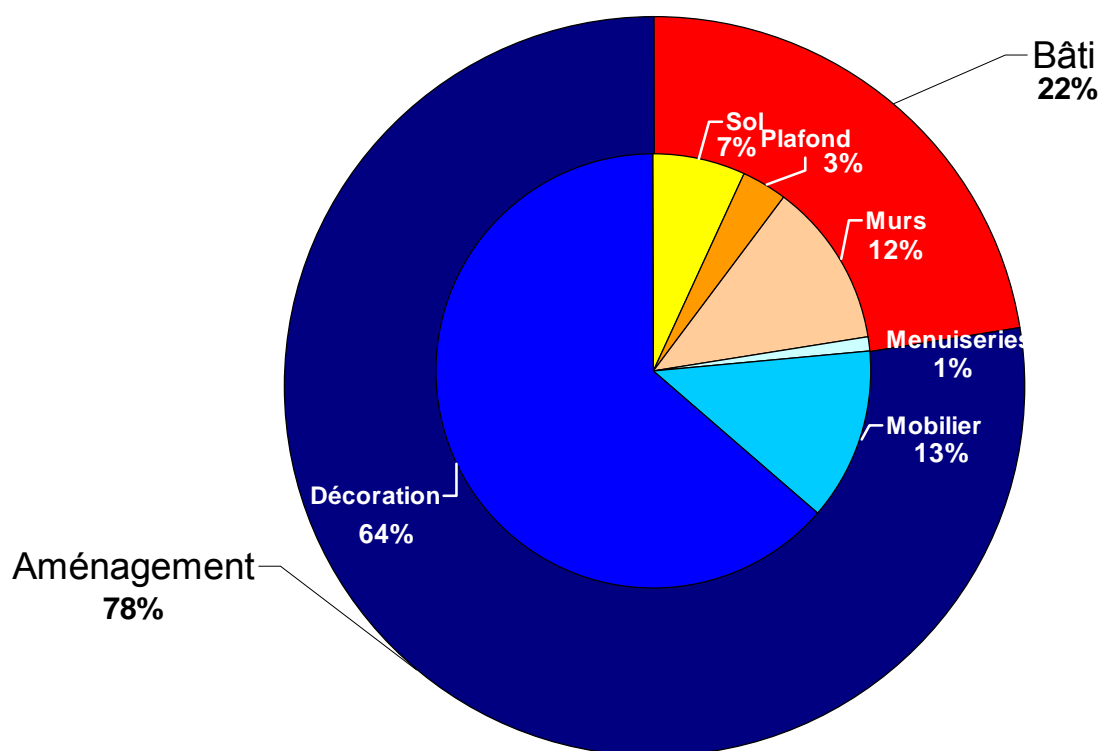


Figure 13 : Graphique représentant les contributions relatives des 6 catégories de surfaces présentes dans la pièce de vie de la crèche de Besançon et qui appartiennent soit au bâti soit à l'ameublement.

Le rapport entre les surfaces du mobilier et du bâti de 1,2 (Tableau 8) laissait présager que la contribution des éléments autres que le bâti serait modérée. Or, selon la Figure 13, ces éléments représentent un peu moins de 80% des émissions en formaldéhyde de la pièce de vie de la crèche de Besançon. La contribution principale de ces éléments (64%) étant apportée par des éléments d'aménagement intérieur (mousse acoustique).

La concentration ambiante en formaldéhyde mesurée dans la pièce de vie en comparaison de la valeur obtenue par l'application du modèle d'équilibre des masses, nous indique une différence relative de 29%. Il semblerait donc que les « petites » sources qui n'ont pas été échantillonnées telles que les jeux, jouets avaient une contribution non-négligeables. C'est peut-être plus encore le contenu du placard « matériel pour les arts plastiques et les travaux manuels » qui doit être mis en cause.

2.5 CAMPAGNE DE BESANÇON - 2

2.5.1 Site d'étude

Le quatrième site d'étude est une école primaire comportant un bâtiment unique à trois niveaux. Cette école est située à la périphérie de la ville de Besançon dans le Doubs en région Franche-Comté. Cette école est également située à moins de 500 m de l'incinérateur de Planoise et d'une chaufferie bois de 6MW (voir Figure 14).

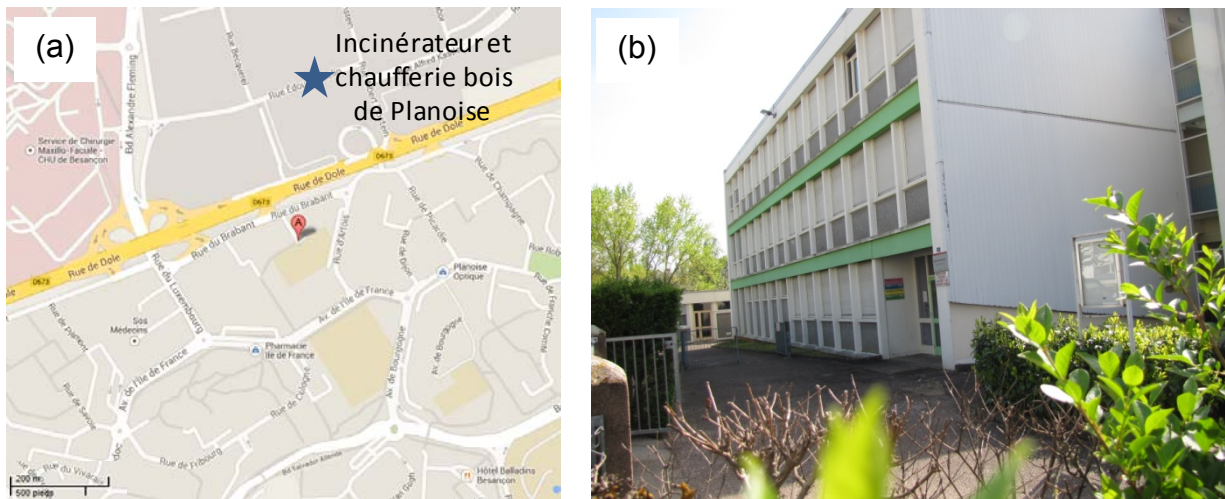


Figure 14 : (a) Emplacement de l'école de Besançon. (b) Photographie de l'établissement.

Le bâtiment a été construit en 1972. Il compte 17 salles de classe pour une superficie totale approximative de 3050 m².

Durant la seconde phase de la campagne pilote, les mesures ont été réalisées dans l'ensemble des 17 salles de classe du bâtiment. La concentration moyenne en formaldéhyde de l'établissement mesurée par prélèvement passif (Radiello 165) d'une durée de 4,5 jours (soit 17x2 cartouches – 17 salles – une campagne été et une campagne hiver) était de 26,0 µg.m⁻³. La concentration la plus élevée relevée dans une salle de classe était de 43,3 µg.m⁻³. C'est dans cette pièce que la recherche des sources d'émission a été effectuée.

La surface au sol de la pièce investiguée est d'environ 56 m². Les murs extérieurs sont en béton recouverts de panneaux non-identifiés, il en est d'ailleurs de même pour les cloisons intérieures. Le plafond est recouvert de dalles de faux-plafond en fibres. Le sol est recouvert par des dalles de sol. Cette pièce comporte 4 fenêtres basculantes à simple vitrage, une porte d'accès vers le couloir et une seconde porte en communication avec une autre salle de classe. On note aussi la présence de 2 placards encastrés destinés au stockage de matériel. Le mobilier se compose de tables et chaises pour les enfants, de deux bureaux pour les enseignants, de plusieurs étagères et de matériel informatique (voir Figure 15).

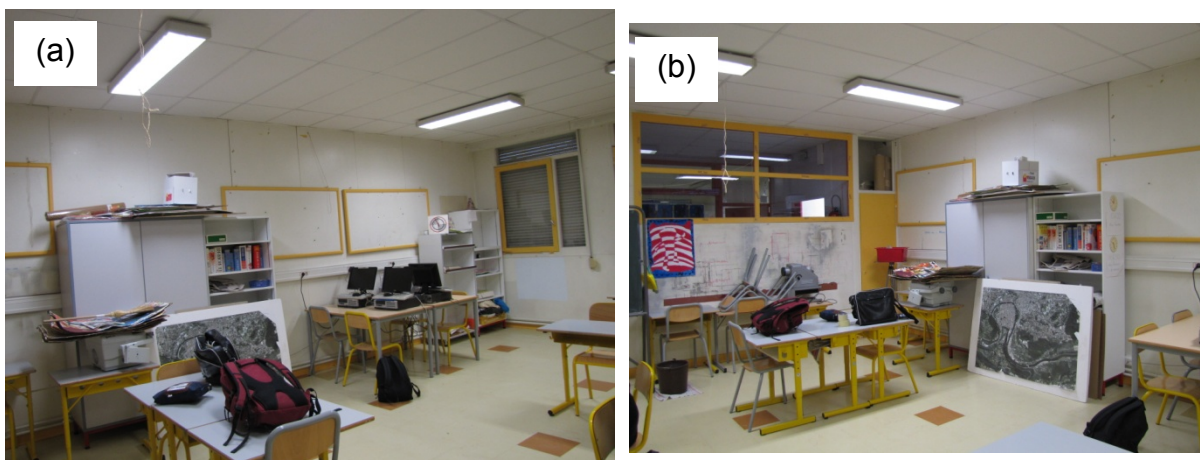


Figure 15 : (a) - (b) Photographies de l'aménagement intérieur de la salle de classe de l'école primaire de Besançon.

Aucune grille d'aération n'est présente dans la pièce, l'aération passive n'est assurée que par l'air passant sous les portes ou les interstices des fenêtres.

D'après le Tableau 11, le ratio des surfaces des éléments du mobilier sur celles du bâti est égal à 0,8. Dans le cas présent, on s'attend à ce que les contributions des éléments du mobilier soient relativement faibles.

Tableau 11 : Superficie, volume, rapport entre la surface des éléments mobilier et de décoration et la surface du bâti et rapport entre la totalité des surfaces et le volume de la salle de classe de l'école de Besançon.

Surface au sol (m ²)	Volume de la pièce (m ³)	Surfaces bâties (m ²)	Surfaces mobilier et décoration (m ²)	Rapport mobilier/bâti	Rapport surfaces/volume (m ⁻¹)
55,6	157,9	183,3	143,4	0,8	2,1

2.5.2 Caractéristiques de la campagne

La seconde campagne de mesure de Besançon s'est déroulée les 3 et 4 mai 2012. La première journée a été dédiée à l'identification des différentes surfaces, à leurs métrages et à la mesure du taux de renouvellement de l'air de la salle de classe. Durant la seconde journée, les préleveurs DNPH ont été posés et les mesures de concentrations ambiantes à l'intérieur et à l'extérieur de la pièce ont été réalisées. Durant cette campagne, 3 membres du personnel de l'Association Agrée de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) d'ATMO Franche-Comté, ont été initiés à la méthodologie de mesure afin d'appliquer un protocole réduit dans d'autres établissements scolaires de la région.

Le Tableau 12 rassemble les données environnementales et techniques de cette campagne.

Tableau 12 : Données environnementales et techniques concernant les mesures réalisées dans la salle de classe de l'école de Besançon.

	Jour 1	Jour 2
Date	03/05/2012	04/05/2012
Actions menées	- Identification des surfaces - Mesure du taux de renouvellement de l'air avec entrées air en provenance des pièces attenantes calfeutrées - Métrage des surfaces	- Pose des préleveurs DNPH - Mesure des concentrations ambiantes en formaldéhyde à l'intérieur et à l'extérieur de la salle de classe
Température extérieure moyenne [min - max]	18,9°C [15,6 - 19,8]	19,4°C [14,2 - 22,2]
Humidité relative extérieure moyenne [min - max]	44,4% [35,0 - 57,0]	45,6% [42,0 - 53,0]
Température intérieure moyenne [min - max]	19,8°C [19,4 - 21,4]	18,9°C [18,5- 19,9]
Humidité relative intérieure moyenne [min - max]	48,0% [43,2 - 51,0]	47,3% [46,4 - 47,9]
Nombre de surface identifiées	-	>50
Nombre de mesure du taux de renouvellement de l'air	1	-
Nombre de préleveurs DNPH posés	-	36
Nombre de surface avec répliquats	-	5
Nombre de prélèvement actif à l'intérieur	-	2
Nombre de prélèvement actif à l'extérieur	-	1

^a Données issues des relevés météorologiques de la station de Besançon - Thise (Latitude : 47°25 ; Longitude : 5°99 et Hauteur : 307m).

2.5.3 Résultats

2.5.3.1 Taux de renouvellement et concentrations ambiantes

La valeur du taux de renouvellement de l'air de la salle de classe est de $0,14 \text{ h}^{-1}$. Les concentrations ambiantes moyennes en formaldéhyde à l'intérieur du dortoir et à l'extérieur du bâtiment sont respectivement égales à $42,2 \mu\text{g.m}^{-3}$ (n=2) et $4,5 \mu\text{g.m}^{-3}$. Nous rappelons qu'à part la concentration extérieure, **les valeurs annoncées ici ne sont en rien représentatives d'une situation normale et habituelle d'utilisation de la salle de classe.** En effet, pour les besoins de l'étude, la porte entre la salle de classe et le couloir et la porte entre les deux salles de classe ont été calfeutrées. Cette situation particulière a été conservée pendant plusieurs heures avant l'échantillonnage afin d'atteindre un état d'équilibre entre les émissions des matériaux et la concentration intérieure (d'où un niveau très élevée pour cette concentration).

2.5.3.2 Emissions des surfaces identifiées

Comme le montre le Tableau 13, les taux d'émission des surfaces et matériaux échantillonnés dans la salle de classe de Besançon-2 sont compris entre 0,7 et $18,4 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. Aucun taux d'émission n'est inférieur à la limite de détection de $0,6 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$.

$^2.h^{-1}$. La moyenne des taux d'émission est de $5,3 \mu g.m^{-2}.h^{-1}$ avec une valeur médiane à $3,8 \mu g.m^{-2}.h^{-1}$.

Tableau 13 : Taux d'émission en formaldéhyde (TE_i) des différentes surfaces intérieures échantillonnées dans la salle de classe de Besançon et émissions totales correspondantes (Q_i).

Emplacement - Désignation	Taux d'émission ($\mu g.m^{-2}.h^{-1}$)	Emission totale ($\mu g.h^{-1}$)
Médium brut	18,4	0,0
Poutres béton	3,4	2,1
Matériel informatique	1,2	4,5
Dessus radiateur	3,8	4,8
Coffrage volets	4,1	6,6
Encadrement fenêtres	1,4	8,0
Tables informatiques	2,4	9,7
Cloison couloir	4,1	11,1
Caisson musique	16,6	12,0
Fenêtres		12,3
Tableau affichage		14,4
Tableaux ardoise		15,5
Etagère intérieure	4,6	17,6
Porte	2,9	18,5
Méla miné étagère	2,7	19,0
Etagère porte coulissante	4,7	19,6
Cases métalliques + pieds mobilier	0,7	19,6
Tables	2,4	20,7
Meuble méla miné	3,2	21,0
Chaises	2,8	26,8
Bureau	9,4	31,1
Panneau mousse	2,6	42,2
Mur coté fenêtre	4,9	46,6
Chauffeuse	15,2	52,8
Plaque médium compressé	10,6	73,9
Sol*	1,3	74,9
Panneau médium*	4,5	81,0
Mur aggloméré*	3,9	123,7
Dalles de plafond*	14,8	821,0

* Surface pour laquelle des répliquats ont été effectués. La valeur du taux d'émission est une valeur moyenne.

En se focalisant sur les dix principaux contributeurs (dix dernières lignes du Tableau 7), on peut tracer un histogramme comme celui de la Figure 16).

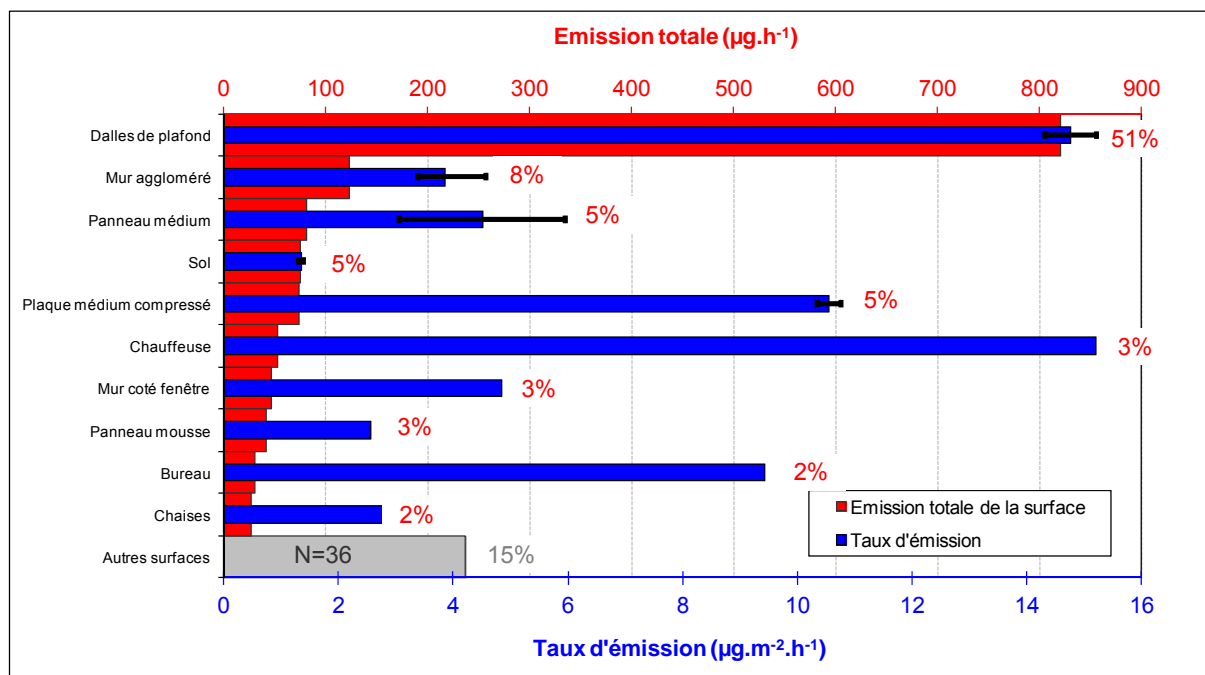


Figure 16 : Barres rouges : Emission totale de chacune des 10 surfaces identifiées comme les plus contributrices dans la salle de classe de Besançon, les valeurs correspondent au pourcentage des contributions relatives individuelles – Barre grise : Emission totale cumulée des 19 autres surfaces - Barres bleues : Taux d'émission associés de chacune des ces 10 surfaces. * Surface pour laquelle des répliquats ont été effectués. La barre noire représente les valeurs minimale et maximale mesurées pour le taux d'émission.

Dans le cas de la salle de classe de Besançon-2, aucune source n'a un taux d'émission supérieur à $20 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. Les deux sources qui présentent les taux d'émission les plus importants contribuent pour environ 4% au total des émissions alors qu'elles représentent moins de 1% des surfaces. En revanche, le plafond qui présente un taux d'émission de l'ordre de $15 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ et a une étendue de l'ordre de 56 m^2 , est la source d'émission principale.

2.5.3.3 Interprétation des résultats

Les différents matériaux échantillonnés ont été réunis en six catégories : sol, murs, plafond, mobiliers (tables, chaises, armoires, etc.), menuiseries (fenêtres, portes, plinthes, etc.) et éléments de décoration ou d'aménagement (tableaux, radiateurs, livres, etc.). Les contributions relatives de chacune de ces catégories sont représentées sur la Figure 17.

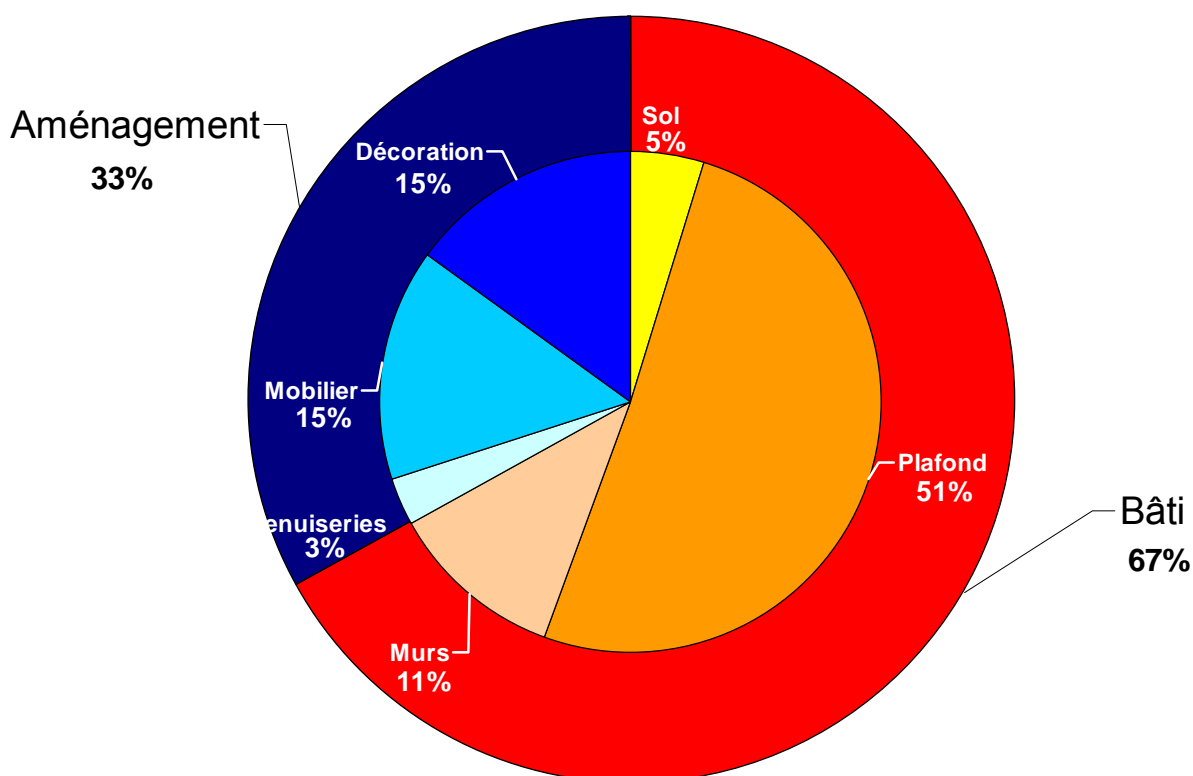


Figure 17 : Graphique représentant les contributions relatives des 6 catégories de surfaces présentes dans la pièce de vie de la crèche de Besançon et qui appartiennent soit au bâti soit à l'ameublement.

Selon la Figure 17, plus des deux tiers des émissions en formaldéhyde de la salle de classe de Besançon-2 proviennent des éléments du bâti (plafond, murs et sol). Ce résultat est en bon accord avec le rapport entre les surfaces du mobilier et du bâti de 0,8 (Tableau 11).

La concentration ambiante en formaldéhyde mesurée dans la salle de classe en comparaison de la valeur obtenue par l'application du modèle d'équilibre des masses, nous indique une différence relative de 28,7%. Il semblerait donc que les « petites » sources qui n'ont pas été échantillonnées telles que les jeux, travaux manuels en cours de séchage, etc. avaient une contribution non-négligeables. C'est peut-être plus encore le contenu du placard « matériel pour les arts plastiques et les travaux manuels » qui doit être mis en cause.

3 SYNTHÈSE DES RESULTATS DES CAMPAGNES DE 2011 ET 2012

3.1 COMPARAISON DES CONTRIBUTIONS RELATIVES DU BATI ET DE L'AMENAGEMENT

Pour chacune des campagnes réalisées en 2011 et en 2012, le plafond ou une partie de celui-ci était toujours la source d'émission de formaldéhyde principale. Par ailleurs, si on classe l'ensemble des sources d'émission en six catégories : sol, plafond, murs, menuiseries, mobilier et éléments de décoration ou d'aménagement, le plafond reste la source principale pour 5 des 8 établissements. En revanche, pour les établissements de La Seyne-sur-Mer et de Besançon – 1, c'est la

décoration/aménagement qui représente la catégorie principale d'émission de formaldéhyde notamment parce qu'entrent dans cette catégorie les mousses acoustiques très émettrices qui sont accrochées au plafond. Pour les établissements de Donges et de Saint-Junien c'est la catégorie de l'ameublement qui représente la part la plus importante des émissions (à égale part avec le plafond pour Saint-Junien). De la même façon, si on classe les différentes sources d'émission en deux catégories principales : éléments du bâti et éléments d'aménagement, les établissements d'Abbeville, Mouans-Sartoux, Mont-près-Chambord et Besançon 2 présentent des émissions qui proviennent à plus de 70% du bâti alors que les établissements de La Seyne-sur-Mer, Donges et Saint-Junien le bâti représente approximativement 50% des émissions totales de formaldéhyde (voir Tableau 15). Pour finir, la crèche de Besançon (Besançon 1) est le seul établissement pour lequel l'aménagement représente plus des $\frac{3}{4}$ des émissions en formaldéhyde de la pièce.

Tableau 15 : Contribution moyenne de chaque catégorie de sources du bâti et de l'aménagement à l'émission totale en formaldéhyde pour les 8 établissements investigués en 2011 et 2012.

	2011				2012			
	Abbeville	Mouans-Sartoux	La Seyne-sur-Mer	Donges	Saint-Junien	Mont-Près-Chambord	Besançon 1	Besançon 2
Sol(s)	9%	3%	7%	5%	1%	8%	7%	5%
Plafond(s)	56%	70%	31%	33%	42%	50%	3%	51%
Murs	15%	4%	8%	8%	10%	5%	12%	11%
Menuiseries (fenêtres, portes, plinthes)	4%	4%	2%	3%	2%	10%	1%	3%
Contribution du "bâti"	84%	82%	48%	49%	55%	73%	23%	70%
Ameublement (tables, chaises, bureaux, étagères, etc.)	6%	18%	15%	40%	42%	23%	13%	15%
Aménagement et Décoration	9%	0%	38%	12%	3%	4%	64%	15%
Contribution de "l'aménagement intérieur"	16%	18%	52%	51%	45%	27%	77%	30%

Il faut cependant rester vigilant concernant l'émission globale des éléments comme le plafond qui sont assez rarement constitués par un matériau unique. On est souvent en présence de matériaux « multicouches » qui peuvent avoir des taux d'émission différents [8].

3.2 COMPARAISON MODELE-MESURE

La concentration intérieure de formaldéhyde a été calculée à l'aide du modèle d'équilibre des masses décrit dans le rapport d'étude de 2011 [8] et comparée à la concentration mesurée pour les 8 salles de classe échantillonnées en 2011 et 2012 (voir Figure 18).

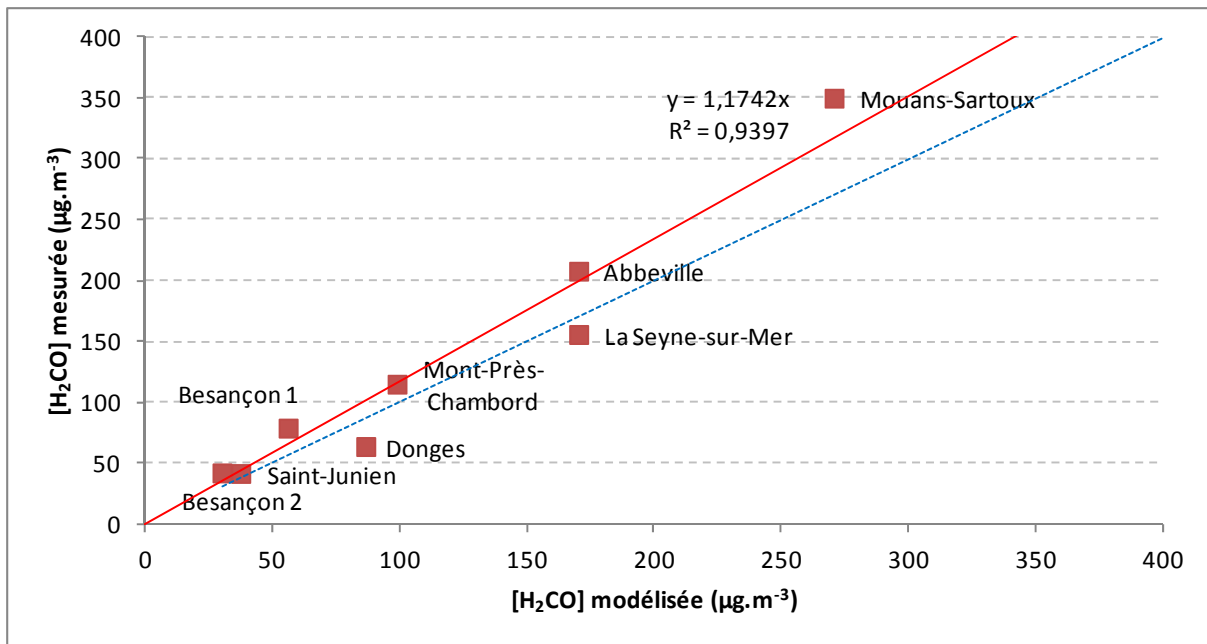


Figure 18 : Comparaison des concentrations en formaldéhyde mesurées et calculées à l'aide du modèle d'équilibre des masses à l'intérieur des pièces investiguées en 2011 et 2012. La courbe en pointillé représente la droite 1:1.

Une bonne adéquation a été trouvée entre les concentrations calculées et mesurées (Figure 18). A l'exception d'un cas (Donges), l'écart entre les concentrations calculées et mesurées ne dépasse pas 30 %. Les différences observées peuvent provenir des erreurs associées aux mesures (5-10%, 1 sigma) et/ou des erreurs associées aux valeurs calculées (15-20%, 1 sigma).

Comme montré par la pente de la droite proche de 1, il n'y a pas de biais systématique entre ces deux concentrations. Les taux d'émission mesurés sont donc représentatifs des émissions de la pièce et le modèle d'équilibre des masses utilisé donne des estimations satisfaisantes des concentrations intérieures en formaldéhyde dans ces pièces.

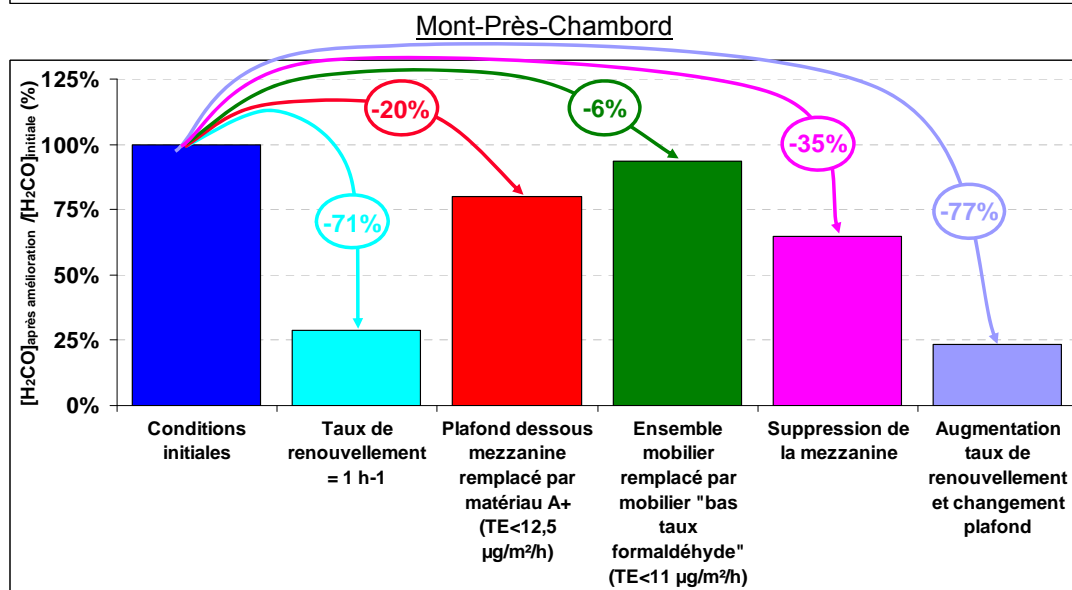
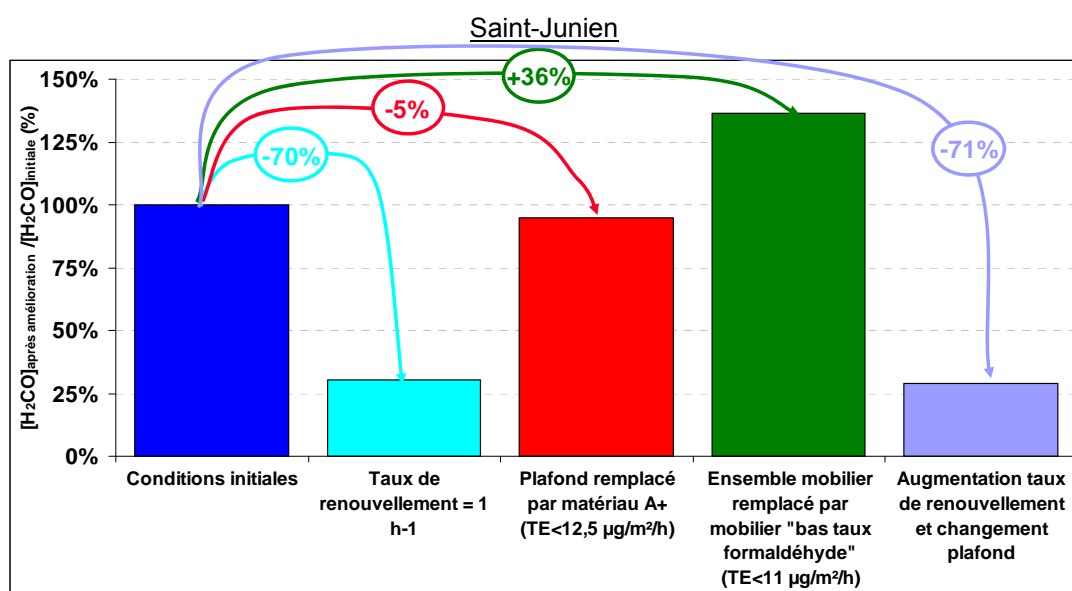
Ces résultats permettent donc de valider l'emploi du modèle d'équilibre des masses pour des **environnements présentant des sources d'émission importantes et un faible taux de renouvellement de l'air**.

3.3 APPLICATION DE SCERANIOS D'AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'AIR

En modifiant certains paramètres du modèle d'équilibre des masses, tels que le taux de renouvellement de l'air ou les émissions totales ou individuelles des matériaux, il est possible d'évaluer l'impact de stratégies d'amélioration de la qualité de l'air intérieur. Les trois scénarios testés sont une augmentation du taux de renouvellement de l'air jusqu'à 1 h⁻¹ en prenant un taux de renouvellement initial égal à 0,5 h⁻¹ qui est plus représentatif de la ventilation « normale » des salles de classe (Scenario I) ; le remplacement de la source d'émission la plus importante, c'est-à-dire le plafond par un matériau moins émetteur (Scenario II, taux d'émission abaissé à 12,5 µg.m⁻².h⁻¹, ce qui correspond à un matériau classé A ou A+ selon le journal officiel de la république française n°0111 du 13 mai 2011, texte 15). A noter que dans le cas de la crèche de Besançon, ce n'est pas un scénario de remplacement du

plafond qui a été utilisé mais un scénario de retrait des éléments acoustiques en mousse car c'est un scénario qui est plus simple, rapide et moins coûteux à mettre en place et pour finir le remplacement de la totalité des éléments d'ameublement par des éléments d'ameublement à bas taux d'émission en formaldéhyde (i.e. émission inférieure à $11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$).

Les résultats présentés sur la Figure 19 montrent qu'une réduction de plus de 50% de la concentration en formaldéhyde pourrait être obtenue par l'installation d'un système de ventilation permettant d'atteindre un taux de renouvellement de l'air de 1 h^{-1} . Le remplacement de l'émetteur le plus important (Scénario II) aura également un impact significatif pour Besançon-1 avec une réduction d'environ 50 % de la concentration en formaldéhyde. Des réductions nettement plus modestes (entre 5 et 20 %) sont calculées pour les autres établissements. Combiner ces deux solutions permettrait de réduire la concentration en formaldéhyde dans ces écoles d'environ 53 à 81 %. A noter que le scénario de remplacement de l'intégralité du mobilier n'est pas conseillé étant donné que pour 3 des établissements cela reviendrait à augmenter les sources en formaldéhyde et que pour le quatrième, cela ne diminuerait que de 5 % les émissions en formaldéhyde.



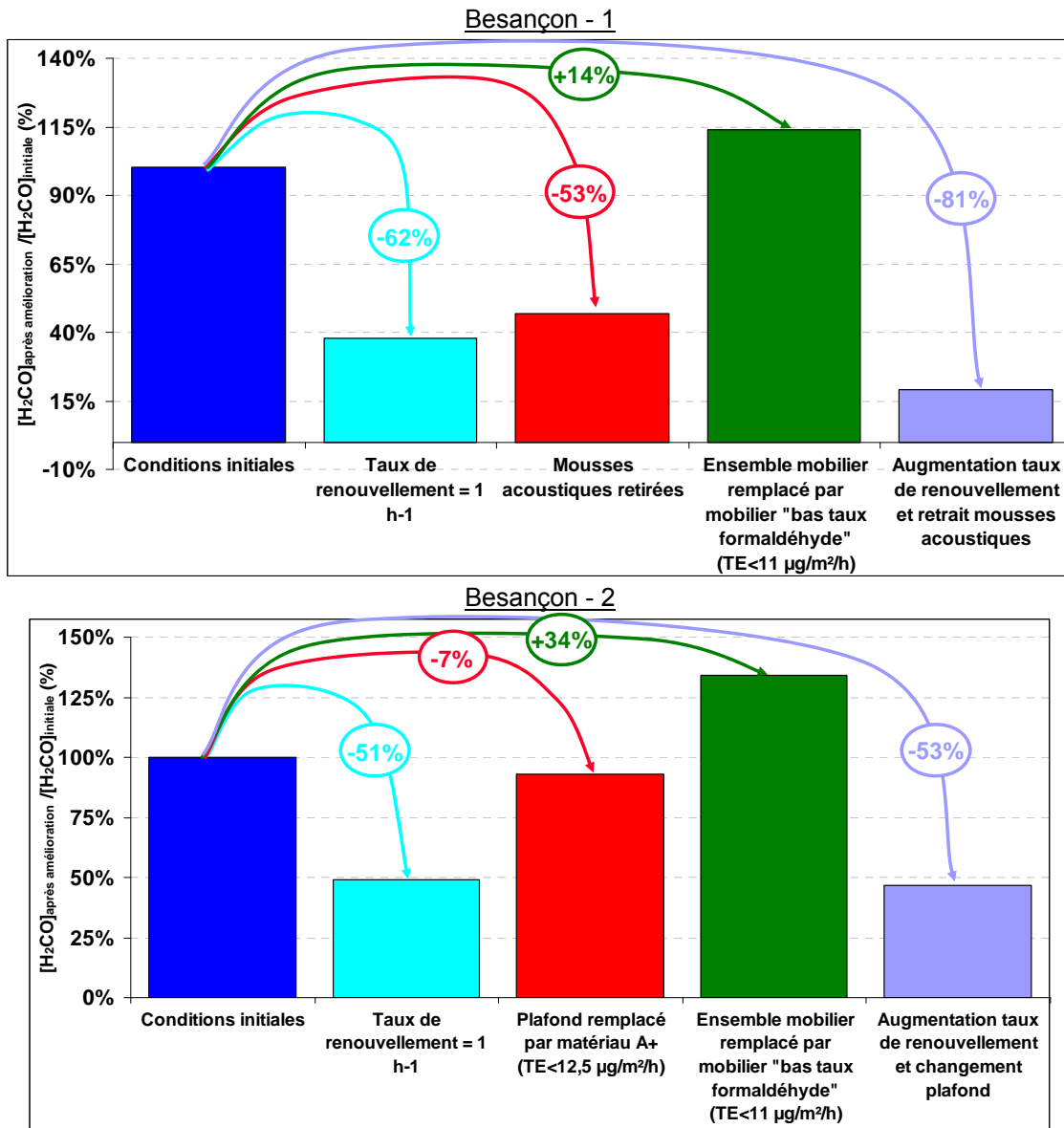


Figure 19 : Impact de différentes stratégies de réduction des concentrations en formaldéhyde.

4 CONCLUSION GENERALE

Le but de cette étude était d'identifier les sources intérieures de formaldéhyde dans 4 établissements recevant des enfants et d'examiner leur contribution respective à la concentration intérieure.

Ainsi, la méthodologie basée sur l'utilisation d'un préleveur passif pour la mesure des taux d'émission en formaldéhyde des matériaux permet de compléter les moyens existant en matière de qualité de l'air intérieur et de réaliser un diagnostic des sources intérieures conduisant à la définition de mesures pour réduire efficacement les concentrations intérieures.

Par ailleurs, un modèle d'équilibre des masses, utilisant les taux d'émission, les concentrations extérieures à la pièce ainsi que le taux de renouvellement d'air, a été appliqué afin de calculer les concentrations dans les pièces.

5 REMERCIEMENTS

Le LCSQA remercie les Associations Agrées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air : Lig'Air, LimAir et ATMO Franche-Comté pour leur contribution à cette étude ainsi pour leur aide dans l'organisation et la mise en place des différentes campagnes de mesure. Le LCSQA est également très reconnaissant envers les gestionnaires des établissements et les services municipaux des Mairies de Saint-Junien, De Mont-Près-Chambord et de Besançon pour leur disponibilité et leur intérêt à cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.
- [2] Michelot N., C. Mandin, O. Ramalho, J. Riberon, C. Marchand, L. Malherbe, M. Ramel, M.-B. Personnaz, V. Delmas, S. Urban et M. Carrega "Campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches en France : Résultats de la première phase", *Pollution Atmosphérique*, **vol. 211**, pp. 267-280, 2011.
- [3] "Formaldehyde", *IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*, **vol. 88**, pp. 39-324, 2006.
- [4] ASPA "Campagne de mesure du formaldéhyde dans les établissements scolaires et d'accueil de petite enfance de la ville de Strasbourg : bilan des niveaux mesurés", Réf. ASPA 05061301-I-D, 33 p., 2005.
- [5] AIR-APS, AMPASEL, ATMO Drôme-Ardèche, ASCOPARG, COPARLY "Mesure des aldéhydes dans l'air intérieur des écoles maternelles et des crèches de la région Rhône-Alpes", Convention DRASS, 44 p., 2007.
- [6] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement "Mesures pour améliorer la qualité de l'air intérieur", Dossier de presse du 6 janvier 2012, 15 p., 2012.
- [7] HCSP "Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos : le formaldéhyde", 41 p., 2009.
- [8] Crunaire S., S. Dusanter, H. Plaisance et G. Poulhet "Mesure du formaldéhyde Volet 2.B. : Test d'un échantillonneur passif pour la mesure in situ des taux d'émission en formaldéhyde des surfaces et matériaux présents dans les environnements intérieurs", Etude LCSQA-EMD, 64 p., 2011, disponible sur : <http://www.lcsqa.org/rapport/2011/emd/mesure-formaldehyde-volet-2b-test-echantillonneur-passif-mesure-in-situ-taux-emissi>.
- [9] Dockery D. W. and J. D. Spengler "Indoor-outdoor relationships of respirable sulfates and particles", *Atmospheric Environment*, **vol. 15**, pp. 335-343, 1981.
- [10] Blondel A. "Identification des sources intérieures de composés organiques volatils et estimation de leur contribution aux teneurs observées dans les logements français", Thèse de l'Université des Sciences et Technologie de Lille, 165 p., 2010.
- [11] ANSI/BIFMA X7.1 Standard for Formaldehyde and TVOC Emissions , 2011.