

“L'air est **essentiel à chacun**  
et mérite **l'attention de tous.**”

Etude 2007- 2008

**Qualité de l'air intérieur en  
milieu scolaire à Rennes  
Métropole – J. Moulin, J. Zay,  
R. Doisneau, Groupe scolaire  
des Landes**

**Décembre 2007 et Juin 2008**



ORGANISME  
DE MESURE, D'ÉTUDE  
ET D'INFORMATION SUR  
LA QUALITÉ DE L'AIR  
EN BRETAGNE



**Air Breizh**  
28 rue des Veyettes - 35000 Rennes  
Tél. 02 23 20 90 90 - Fax 02 23 20 90 95

[www.airbreizh.asso.fr](http://www.airbreizh.asso.fr)

## GLOSSAIRE

AASQA	Association Agréée pour la Surveillance de la Qualité de l'Air
AFSSET	Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail
ASPA	Association pour la Surveillance et l'Etude de la Pollution Atmosphérique en Alsace
ASTDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
CIRC	Centre International de Recherche sur le cancer
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone
COV	Composés Organiques Volatils
Exposition aiguë	Exposition unique à une substance toxique risquant de provoquer des troubles biologiques graves ou la mort. L'exposition aiguë a pour caractéristique de ne pas durer plus d'une journée, par opposition à l'exposition continue, plus longue, pendant un laps de temps déterminé
Exposition chronique	Exposition persistante, continue ou discontinue, qui se produit sur une longue période comprise entre plusieurs années et la vie entière
Exposition subchronique	Exposition de durée intermédiaire entre une exposition aiguë et une exposition chronique (se rapporte à une période de vie comprise entre quelques jours et quelques années)
HPLC	Chromatographie en phase liquide à haute performance
INERIS	Institut National de l'environnement industriel et des risques
ISAAC	International study of asthma and allergies in childhood
LCSQA	Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air
MRL	Minimal Risk Level. Valeurs limites d'exposition
O <sub>2</sub>	Dioxygène
OMS	Organisation Mondiale pour la Santé
OQAI	Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur
ppm	partie par million (unité de mesure des concentrations des polluants)
RSD	Règlement Sanitaire Départemental
U.V.	Ultra-violet
USEPA	Agence Américaine pour la protection de l'environnement
VLE	Valeur limite indicative d'exposition à court terme (15 min.)
VMC	Ventilation Mécanique Contrôlée
VME :	Valeur limite indicative de moyenne d'exposition pondérée (8h/j. soit 40h/sem.)
VTR :	Valeur Toxicologique de Référence est un indice qui est établi à partir de la relation entre une dose externe d'exposition à une substance dangereuse et la survenue d'un effet néfaste.

<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>II. POLLUANTS</b>	<b>4</b>
II.1. LES ALDEHYDES	4
II.2. DIOXYDE DE CARBONE	7
<b>III. MATERIEL ET METHODE</b>	<b>8</b>
III.1. METROLOGIE	8
III.2. LOCALISATION DES PRELEVEMENTS	8
III.3. DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE	9
<b>IV. RESULTATS</b>	<b>10</b>
IV.1. CONTEXTE METEOROLOGIQUE	10
IV.2. LES CONCENTRATIONS EN ALDEHYDES	10
IV.3. LES MESURES DE DIOXYDE DE CARBONE	13
IV.3. LES NIVEAUX DE MONOXYDE DE CARBONE	16
IV.4. EVALUATION DU CONFINEMENT A PARTIR DES CONCENTRATIONS EN DIOXYDE DE CARBONE	17
<b>CONCLUSIONS - PERSPECTIVES</b>	<b>20</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>21</b>
<b>ANNEXE</b>	<b>22</b>

## Introduction

Nous passons 80 à 90% de notre temps dans des lieux clos : habitations, lieux de travail, moyens de transport, écoles, garages et sous-sols dans lesquels nous respirons un air différent de l'air extérieur. A la pollution provenant de l'extérieur s'ajoutent des polluants issus de trois principales sources : les appareils à combustion (monoxyde de carbone, dioxyde d'azote), les constituants du bâtiment, incluant les équipements et mobilier (plomb des peintures, formaldéhyde, composés organiques volatils, fibres de toutes sortes) et l'activité humaine (produits ménagers, bricolage, acariens, moisissures, etc...).

Dans les classes, les concentrations de certains polluants peuvent être plus élevées que dans d'autres espaces clos (habitats, bureaux,...) du fait, par exemple, de la présence de plus de mobilier ou bien de l'utilisation quotidienne de fournitures scolaires (colles, feutres, peintures...) et de produits d'entretien. Par ailleurs, à surface égale, on estime que les écoles présentent, en général, quatre fois plus d'occupants que les bureaux, ce qui influence nécessairement l'environnement intérieur, ne serait ce que par l'augmentation de l'humidité relative. Ces éléments structurels et conjoncturels particuliers sont associés à une population particulièrement sensible. En effet, de nombreuses études montrent une augmentation des allergies et des affections respiratoires chez les enfants. En France, la manifestation de troubles non spécifiques (maux de tête, nausées, vertiges...) dans des écoles ces dernières années a conduit à s'interroger sur la possible contribution de la qualité de l'air intérieur.

Cette étude s'inscrit comme une **étude de faisabilité** préalable à une étude régionale de la qualité de l'air dans les écoles bretonnes. **L'objectif** est de **caractériser la qualité de l'air** dans différentes **écoles primaires de Rennes Métropole** et d'en étudier **la variabilité**.

La réalisation de cet objectif passe par :

- l'approfondissement des connaissances sur les **niveaux de concentration en formaldéhyde** (polluant recommandé par l'OQAI),
- la **détermination d'un indicateur de confinement** à partir des concentrations de CO<sub>2</sub>.

## II. Polluants

### II.1. Les aldéhydes

Les aldéhydes font partie de la famille des composés organiques volatils (COV).

Dans l'atmosphère, les aldéhydes proviennent principalement de la combustion de la biomasse (feux de forêt), de la circulation automobile et des réactions photochimiques entre les hydrocarbures et les oxydants atmosphériques.

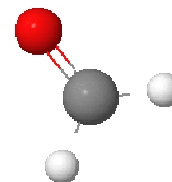


Fig 1 : Molécule de formaldéhyde

#### a. Les sources à l'intérieur des bâtiments [1]

A l'intérieur des locaux et dans les espaces confinés, les aldéhydes constituent des polluants prépondérants avec des sources spécifiques.

Nom usuel	Nom IUPAC	Formule brute	N° CAS	Sources
Formaldéhyde	Méthanal	CH <sub>2</sub> O	50-00-0	Panneaux de particules Panneaux de fibres Panneaux de bois brut Livres et magazines neufs Peintures à phase solvant Cosmétiques Parfums Cigarettes Photocopieurs
Acétaldéhyde	Ethanal	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	75-07-0	Cigarettes Photocopieurs Panneaux de bois brut Panneaux de particules
Acroléine	Propènal	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	107-02-8	Parfums Cosmétiques
Propion-aldéhyde	Propanal	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	123-38-6	Peintures à phase solvant
Isobutyraldéhyde butyraldéhyde	Butanal	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	123-72-8	Photocopieurs
Isovéraldéhyde	Isopentanal	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	590-86-3	Panneaux de particules Parquet traité
Valéraldéhyde	Pentanal	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	110-62-3	Panneaux de particules Livres et magazines neufs Peintures à phase solvant
Héxaldéhyde	hexanal	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	66-25-1	Panneaux de particules Panneaux de bois brut Livres et magazines neufs Peintures à phase solvant Produits de traitement du bois
Benzaldéhyde	Aldéhyde benzoïque	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	100-52-7	Peintures Photocopieurs Parquet traité

Tab 1 : Sources d'émissions des aldéhydes dans l'air à l'intérieur des locaux

Selon l'AFSSET [2], l'exposition au formaldéhyde en milieu intérieur représente environ 98% de l'exposition aérienne de la population.

**b. Les impacts**

Les aldéhydes, acroléine et formaldéhyde principalement, présentent une forte toxicité à concentration atmosphérique peu élevée. Irritants des yeux et des poumons, ils peuvent engendrer des bronchites lors d'intoxications chroniques, surtout chez les personnes présentant des affections respiratoires et chez les enfants.

Par ailleurs, le formaldéhyde et l'acétaldéhyde sont classés respectivement en catégorie 1 (substance cancérigène) et en catégorie 2B (cancérigène possible), par le CIRC.

Il est enfin de plus en plus suggéré que de faibles expositions au formaldéhyde pourraient accroître, à long terme, le risque de développer des pathologies asthmatiques et des sensibilisations allergiques.

Le tableau ci-dessous reprend quelques valeurs toxicologiques pour les aldéhydes étudiés.

Polluants	Lieux de vie	Concentration	Durée d'exposition	Organisme ressource
Formaldéhyde	Air ambiant	100 µg/m <sup>3</sup>	30 min.	OMS (2000)
	Locaux de travail	625 µg/m <sup>3</sup> 1 250 µg/m <sup>3</sup>	8h (VME) 15 min (VLE)	Ministère du Travail (1993)
	Air intérieur	50 µg/m <sup>3</sup> 10 µg/m <sup>3</sup>	2 h Chronique	AFSSET (VGAI 2007)
	Air ambiant	50 µg/m <sup>3</sup> 38 µg/m <sup>3</sup> 10 µg/m <sup>3</sup>	< 14j. > 14j et < 1an > 1 an	ASTDR (MRLs 1999)
Acétaldéhyde	Locaux de travail	180 000 µg/m <sup>3</sup>	8h (VME)	Ministère du Travail (1987)
	Air ambiant	9 µg/m <sup>3</sup>	> 14j et < 1an	USEPA (IRIS Rfc 1986)
Acroléine	Locaux de travail	250 µg/m <sup>3</sup>	15 min. (VLE)	Ministère du Travail (1982)
	Air ambiant	7 µg/m <sup>3</sup> 0,1 µg/m <sup>3</sup>	< 14j. > 14j et < 1an	ASTDR (MRLs 2005)
Valéraldéhyde	Locaux de travail	175 000 µg/m <sup>3</sup>	8h (VME)	Ministère du travail
Propanal	Non documenté			
Isobutyraldéhyde				
butyraldéhyde				
Isovéraldéhyde				
Héxaldéhyde				
Benzaldéhyde				

Tab 2 : Quelques valeurs toxicologiques

**c. Les niveaux d'expositions**

D'après l'étude du LCSQA [3] sur l'exposition de la population urbaine aux aldéhydes réalisée en 2000, les concentrations en aldéhyde dans l'air sont fortement variables en fonction des lieux de vie. Elles sont résumées dans le tableau ci-dessous

Polluants	Concentrations $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Site de fond	Site de proximité	Bureau	Chambre
Formaldéhyde	0,7-1,9	1,3-2,6	5,8-24	6,4-127
Acétaldéhyde	2,0-3,7	2,5-6,7	12,9-24	6,7-85
Acroléine	0,0			
Butyraldéhyde (butanal)	0,0-5,5	1,5-5,8	7,0-53	0,0-76
Valéraldéhyde (pentanal)	0,0-2,0	0,0-2,1	0,0-8,3	0,6-17
Héxaldéhyde (hexanal)	0,0-1,6	0,0-1,2	5,9-25	2,6-92
Benzaldéhyde	0,0-0,0	0,0-0,1	0,0-2,6	0,0-9,0

Tab 3 : Concentrations en aldéhydes dans différents microenvironnements

Pour compléter, les résultats de la campagne nationale menée par l'OQAI dans les logements français entre 2003 et 2005 sont repris dans le tableau ci-dessous

Milieu	Air extérieur	Air intérieur (chambre)
Formaldéhyde	-	19,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Acétaldéhyde	1,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	11,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Acroléine	< 0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Héxaldéhyde	0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	13,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tab 4 : Concentrations en aldéhydes dans différents microenvironnements

Dans le cadre de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, un inventaire des données françaises a été réalisé en 2004 [4]. Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air [5] a réalisé en 2005 une synthèse des niveaux de formaldéhyde mesurés dans les différents environnements. Les données relatives aux écoles sont présentées ci-dessous.

- L'INERIS a mené une étude dans **une école primaire** suite à l'apparition de symptômes tels que l'irritation des yeux et des voies respiratoires. Le prélèvement a été fait à l'aide d'échantillonneurs passifs sur des durées de 5 jours en janvier, mars et mai 2002. Les niveaux de formaldéhyde observés dans les classes étaient compris entre **20 et 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** .
- Par ailleurs, l'étude épidémiologique ISAAC a été réalisée dans environ **110 écoles primaires** de 6 villes françaises. Les mesures ont été réalisées à l'aide de capteurs passifs sur des périodes de 5 jours du lundi au vendredi. Le niveau moyen de formaldéhyde dans les salles (toutes villes confondues) était de **26,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , le maximum observé de 107,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- L'ASPA, l'association de surveillance de la qualité de l'air alsacienne a effectué une étude dans plus de cent établissements (lieux d'accueil petite enfance, écoles maternelles et primaires) [6]. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'échantillonneurs passifs sur des durées de 48 h pendant la semaine. Les 2

campagnes se sont déroulées pendant la période hivernale (du 17/11/04 au 16/12/04 et du 04/01/05 au 27/01/05). La concentration moyenne de formaldéhyde observée était de **27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les écoles maternelles** et de  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les lieux d'accueil petite enfance. La concentration maximale de formaldéhyde mesurée était de  $123 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur 48h dans une halte-garderie.

- Les réseaux de surveillance de la qualité de l'air de la région Rhône Alpes ont publié une étude menée en 2006 et 2007 sur **50 établissements** (28 écoles maternelles et 22 crèches) [7]. Les résultats moyens font apparaître des concentrations en formaldéhyde de **18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dans les crèches et de 24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dans les écoles maternelles**. Cette étude a permis de mettre en évidence une forte saisonnalité des niveaux en formaldéhyde avec une concentration moyenne mesurée (tous établissements pris en compte) comprise entre  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en hiver et  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en été.

### II.2. Dioxyde de carbone

Dans les bâtiments, les émissions de dioxyde de carbone sont dues à la respiration des occupants. Lors de l'inspiration, l'air pénètre dans les poumons ; le dioxygène ( $\text{O}_2$ ) passe au travers des parois des alvéoles et se fixe sur les hématies (globules rouges). Le sang oxygéné est transporté par les artères grâce à l'action du cœur (circulation sanguine) et est acheminé vers les différents organes où se produit la respiration cellulaire. Le dioxygène est utilisé pour une réaction d'oxydo-réduction visant à fournir de l'énergie à la cellule. Cette réaction produit du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) qui, dissout dans le plasma, est acheminé vers les poumons via les veines puis expulsé à l'expiration.

Contrairement aux aldéhydes, le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ne présente pas de toxicité pour l'homme aux concentrations observées dans les atmosphères intérieur et extérieur. Il est utilisé comme un indicateur du confinement des bâtiments. Plus l'air est confiné, plus le niveau de  $\text{CO}_2$  est élevé et moins bonne devrait être la qualité de l'air dans la pièce. En 2001, une étude du Laboratoire d'Hygiène et de Santé Publique de la faculté de Pharmacie de Paris V et du Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris [4] a permis de montrer que les concentrations augmentent significativement avec le niveau moyen de  $\text{CO}_2$  (à l'exception du formaldéhyde).

Concernant le  $\text{CO}_2$ , le règlement sanitaire départemental type (RSD) impose de ne pas dépasser la concentration de 1000 ppm avec tolérance de 1300 ppm dans les locaux où il est interdit de fumer.



### III. Matériel et Méthode

D'un point de vue opérationnel, les méthodes de mesure du formaldéhyde et d'estimation du taux de renouvellement d'air ont été testées sur 4 écoles primaires de Rennes Métropole en décembre 2007. Une seconde campagne de mesure s'est déroulée au printemps 2008.

#### III.1. Métrologie

##### a. Aldéhydes

La technique de l'échantillonnage passif est utilisée lors des prélèvements par tube à diffusion. L'air ambiant diffuse à travers la membrane du corps diffusif fixé sur un support et les aldéhydes sont piégés chimiquement sur la surface absorbante de la cartouche (Florasil greffé avec du 2,4DNPH) introduite à l'intérieur du corps diffusif. La cartouche est ensuite envoyée pour analyse dans un laboratoire de mesure (HPLC en phase inversée couplée à un détecteur UV 360nm).

Cette technique de prélèvement ponctuel fournit une concentration moyenne sur l'ensemble de la période d'exposition.

Afin d'être le plus proche possible des conditions d'exposition des élèves et d'assurer une durée de prélèvement suffisante, les tubes sont installés le jour J avant l'arrivée des élèves et retirés le jour J+2 (du lundi au mercredi par exemple).



Fig 2 : Prélèvement passif dans une école (ASPA)

La méthodologie proposée s'appuie sur les préconisations de la norme NF ISO 16000-2 relative à la stratégie d'échantillonnage pour l'analyse du formaldéhyde dans l'air intérieur.

##### b. Le taux de renouvellement d'air

L'utilisation d'analyseurs de type Q-Trak permet le suivi en continu de 4 paramètres : la température, l'humidité, le CO et le CO<sub>2</sub> (mesure toutes les 2 minutes).

L'estimation du renouvellement d'air est basée sur le suivi des concentrations en CO<sub>2</sub> d'origine métabolique, c'est-à-dire dû à la présence des enfants et des adultes dans la classe.



Fig 3 : Analyseur Q-Trak

Afin d'assurer une bonne représentativité des mesures, une période d'échantillonnage de 5 jours a été envisagée (installation d'un analyseur le lundi matin et récupération vendredi après le départ des élèves).

#### III.2. Localisation des prélèvements

##### a. Choix des sites pour la campagne pilote

Dans le cadre de cette étude, 4 d'établissements scolaires ont fait l'objet de prélèvements. Le choix des écoles s'est porté principalement sur le lieu d'implantation (3 à Rennes et 1 en périphérie), sur l'âge des bâtiments (écoles récentes de moins de 5 ans et écoles anciennes de plus de 20 ans) et sur le système de ventilation (écoles équipées de Ventilation Mécanique Contrôlée et écoles non équipée).

Il s'agit de :

- Ecole Jean Moulin (Villejean - Rennes) sans VMC,
- Ecole Jean Zay (Centre - Rennes) sans VMC,
- Ecole Robert Doisneau (Poterie – Rennes) avec VMC,
- Groupe scolaire des Landes (Chantepie) avec VMC.

Un recueil des éléments descriptifs sur les sites de mesure (mur, sol, plafond, âge des matériaux et du mobilier, rénovation...) a été réalisé une fois les sites choisis sous forme d'un questionnaire associé à chacun des sites de prélèvements.

### b. Choix de l'emplacement du prélèvement dans la salle

Le point de prélèvement doit être représentatif de la concentration d'exposition. La norme NF ISO 16000-2 (stratégie d'échantillonnage du formaldéhyde) précise que l'appareil d'échantillonnage doit être placé à au moins 1 m ou 2 m d'un mur et à une hauteur 1 m à 1,2 m, dans le cas des écoles. Il est recommandé par ailleurs d'éviter les endroits exposés au soleil, à proximité des systèmes de chauffage, dans un courant d'air marqué ou à proximité des conduits de ventilation.

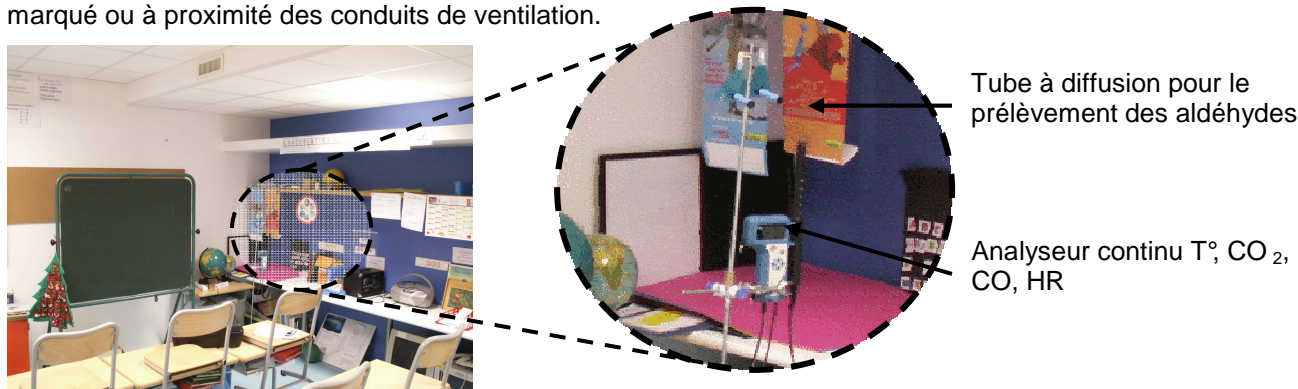


Fig 4 : Dispositif de mesure GS des Landes à Chantepie

### c. Prélèvement en extérieur

Afin d'étudier l'influence de l'air extérieur sur la qualité de l'air intérieur, des mesures de formaldéhyde ont été réalisées à proximité des classes étudiées, tout en respectant les critères d'implantation des sites de mesure en air extérieur.

Conformément aux préconisations de l'OQAI, la concentration extérieure en CO<sub>2</sub> sera estimée à partir de la valeur minimale de CO<sub>2</sub> enregistrée lors d'une longue période d'inoccupation de la pièce (nuit, week-end).

### III.3. Déroulement de la campagne

Après une première phase de concertation avec les différents acteurs du monde scolaire (inspection d'académie, chefs et personnels des établissements scolaires, élèves,...), 2 campagnes de mesure ont été menées :

- Campagne hivernale du 10 au 14 décembre 2007,
- Campagne estivale du 9 au 13 juin 2008.

Chaque école est équipée :

- de 2 tubes à diffusion passive par classe,
- de 2 tubes à diffusion passive à l'extérieur des classes,
- d'un analyseur Q-track permettant le suivi en continu des concentrations en CO<sub>2</sub> (+ CO, T°, Humidité,...).

Un cahier de suivi a été renseigné par les différentes personnes fréquentant les salles de classes appareillées. Ces derniers ont indiqué :

- la durée de fréquentation de la salle,
- le nombre de personnes présentes dans la salle ainsi que leur âge respectif,
- les activités pratiquées par les élèves et le personnel technique,
- les heures et les durées d'ouverture des portes et des fenêtres.

## IV. Résultats

### IV.1. Contexte météorologique

La semaine du 10 au 14 décembre 2007 est marquée par la mise en place progressive d'un anticyclone hivernal s'accompagnant d'une chute des températures, d'un temps ensoleillé et sec.

La période du 9 au 13 juin 2008 a connu des conditions météorologiques particulièrement clémentes (peu de pluie et forte insolation) avec des températures modérés sous un flux de nord.

### IV.2. Les concentrations en aldéhydes

#### a. Qualité des mesures

Les résultats sont donnés pour une température de 20°C et une pression de 1013 hPa. Les concentrations obtenues sont exprimées en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Les prélèvements ont tous été effectués en doublon, afin de valider les résultats et de vérifier la répétabilité des échantillonnages. Les écarts absolus entre doublon sont tous inférieurs à  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (écart absolu moyen de  $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le formaldéhyde sur les 2 campagnes).

Des blancs de terrain ont suivi le même parcours que les tubes exposés, à l'exception du prélèvement et sont donc témoins de l'éventuelle contamination environnante durant le stockage et le transport. Les valeurs des blancs (faibles par rapport aux quantités prélevées dans les échantillons) ont été retranchées aux échantillons.

#### b. le formaldéhyde

Les concentrations en formaldéhyde retrouvées dans les classes et à l'extérieur sont relativement homogène d'une école à l'autre, à l'exception des niveaux enregistrés au sein du groupe scolaire des Landes du 9 au 10 juin qui sont environ 2 fois plus élevés que ceux enregistrés dans les autres écoles de l'agglomération.

Il n'apparaît pas de corrélation entre les niveaux extérieur et intérieur confirmant ainsi que les niveaux de pollution rencontrés dans les locaux sont imputables à des sources internes.

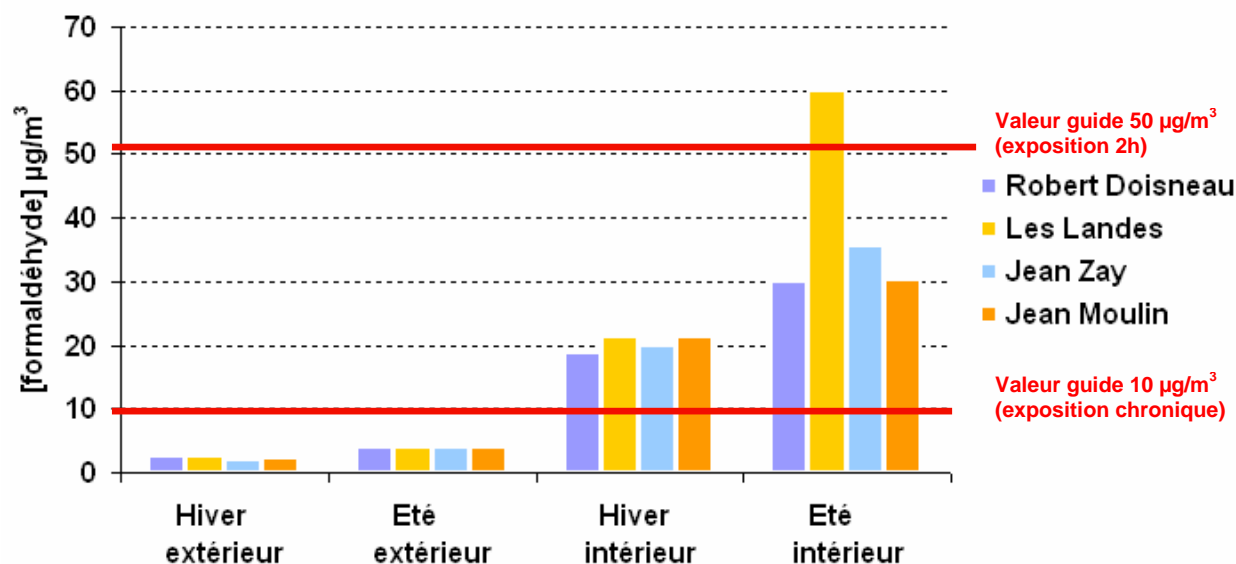


Fig 5 : Concentrations moyennes en formaldéhyde au niveau des écoles

Les concentrations extérieures ( $C_e$ ) s'échelonnent entre  $2,0$  et  $2,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  l'hiver et  $3,7$  à  $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  l'été.

Les concentrations intérieures ( $C_i$ ) sont plus élevées, de  $18,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $21,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  l'hiver et de  $29,3$  à  $60,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  l'été.

Le formaldéhyde présente un comportement atypique pour un polluant de l'air intérieur. Les concentrations de formaldéhyde sont plus élevées en période estivale qu'en période hivernale, alors que « classiquement » les autres polluants de l'air intérieur sont plus élevés en période hivernale, notamment à cause du confinement (périodes d'ouverture des fenêtres plus rares et plus courtes).

Ce constat rejoint les conclusions de l'étude menée par les AASQA de la région Rhône Alpes en 2006 et 2007 [7]. Les variations de concentrations pourraient être liées d'une part à la hausse des températures dans les salles qui favorisent les émissions de formaldéhyde et d'autre part aux interactions avec l'ozone, polluant secondaire dont les concentrations sont plus élevées l'été que l'hiver.

- ➔ Les mesures réalisées sur Rennes Métropole font apparaître :
- Des niveaux de pollution dans les classes du même ordre de grandeur que ceux relevés dans les autres établissements français du même type,
  - Une forte variabilité des polluants en fonction de la saison,
  - Des concentrations systématiquement supérieures à la valeur guide pour une exposition à long terme fixée à  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  par l'AFSSET, et même supérieures à la valeur guide 2h dans le groupe scolaire des landes.

### c. les aldéhydes totaux

L'évolution des techniques de mesure employées par le laboratoire d'analyse a permis la quantification de 8 aldéhydes supplémentaires lors de la campagne estivale.

Les résultats d'analyse montrent que le formaldéhyde est bien le composé majoritaire parmi les aldéhydes étudiés car il représente en moyenne 49% du mélange des 9 substances mesurées. Il figure ensuite par ordre décroissant d'abondance :

Formaldéhyde (49%) > Hexanal (20%) > Butanal (11%) > Acétaldéhyde (9%) > Propanal / Pentanal (4%) > Isopentanal / Benzaldéhyde (1%) > Acroléine (<1%)

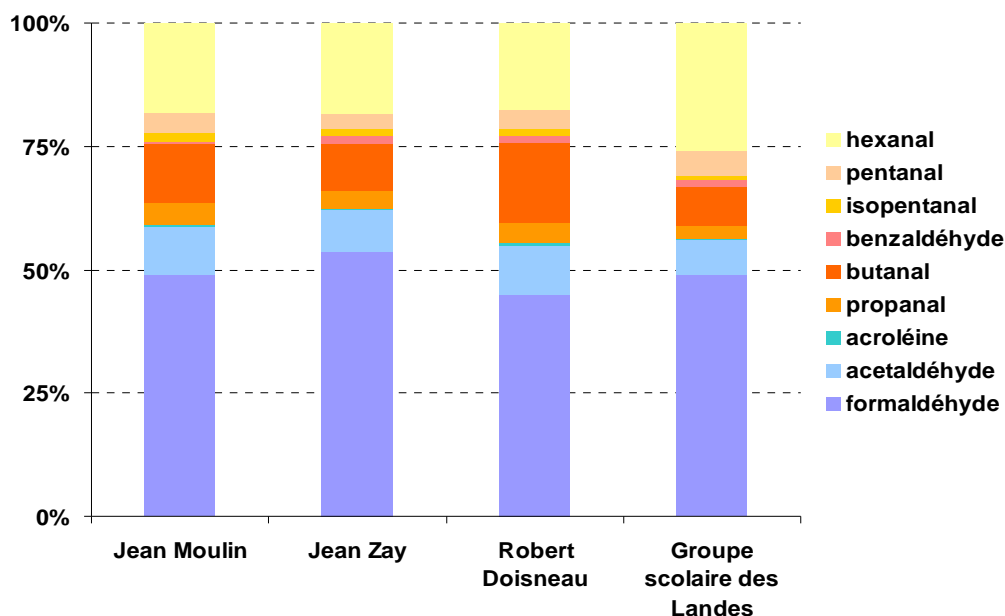


Fig 6 : Contributions des différents aldéhydes dans l'air des classes étudiés du 9 au 11 juin 2008

Comme pour le formaldéhyde, les concentrations des autres aldéhydes dans l'air extérieur sont inférieures à celles retrouvées en air intérieur. Les rapports  $C_i/C_e$  sont de l'ordre de 10 pour le formaldéhyde, 4 pour le butanal, 3 pour le propanal et 2 pour l'acétaldéhyde.

Les composés tels que l'hexanal, le pentanal, l'isopentanal, le benzaldéhyde et l'acroléine n'ont pas été détectés en air extérieur.

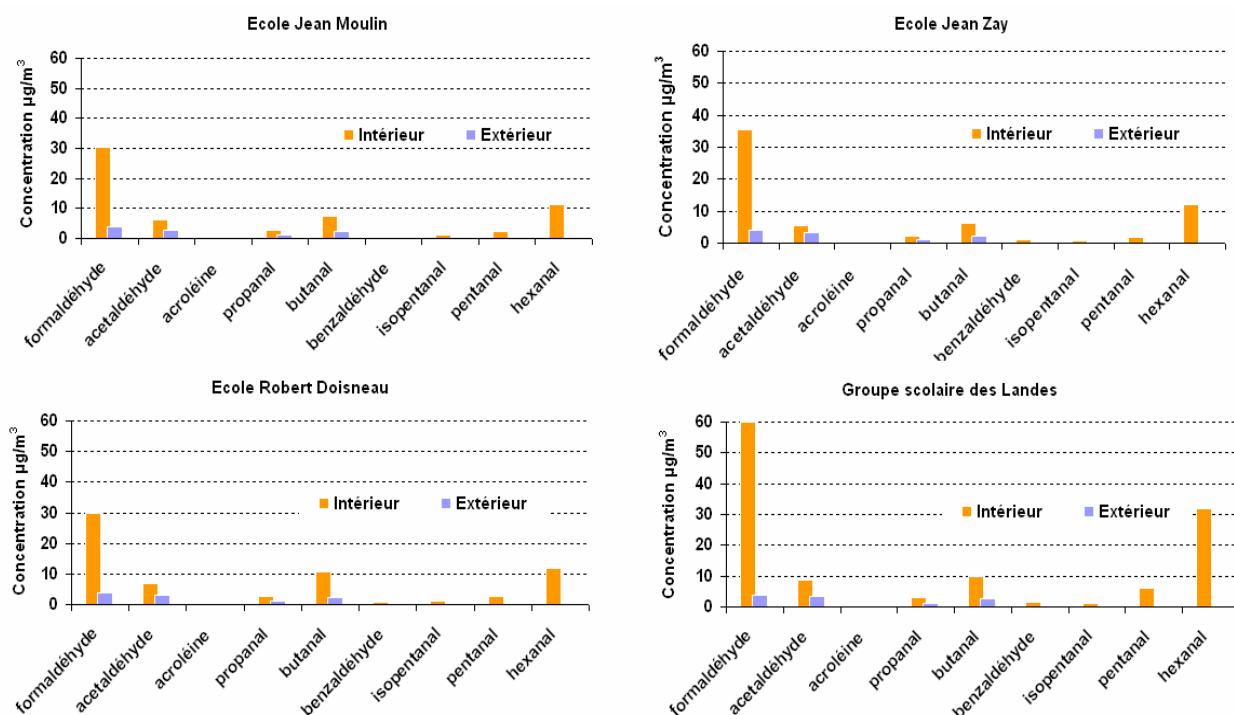


Fig 7 : Mesure des aldéhydes dans les écoles du 9 au 10 juin 2008

A l'instar du formaldéhyde, les concentrations des différents aldéhydes sont homogènes dans l'air des écoles étudiées. Seules les concentrations en hexanal diffèrent avec une concentration moyenne de 32 µg/m<sup>3</sup> au niveau du groupe scolaire des Landes, de 12 µg/m<sup>3</sup> à Robert Doisneau et Jean Zay et de 11 µg/m<sup>3</sup> à Jean Moulin. Les niveaux plus élevés de formaldéhyde au groupe scolaire des Landes semblent corrélés avec des niveaux élevés d'hexanal. Il est donc probable que la source de pollution soit la même.

D'après l'étude de De Blay [8], l'analyse des paramètres du logement influençant les concentrations d'aldéhydes au domicile a mis en évidence la présence de revêtements neufs (peinture et/ou papier peint et/ou parquet stratifié) comme source potentielle d'hexanal. Par ailleurs, l'hexanal et le formaldéhyde sont répandus dans les produits d'entretien.

#### d. Comparaison avec d'autres études réalisées dans des établissements scolaires français

Etude	Période	Nombre et type de classe	Polluants	Concentrations µg/m <sup>3</sup>			
				moyenne	min	médiane	max
Campagne pilote OQAI 2001	mai - juin 01	12 écoles primaires 4 classes maternelles 2 dortoirs	Formaldéhyde		13,6	<b>38,4</b>	66,8
			Acétaldéhyde		6,0	9,7	16,2
			Hexaldéhyde		6,4	18,1	44,2
Campagne ASPA Strasbourg 2004 -2005	Nov-déc 04 Janv 05	222 classes primaires	Formaldéhyde	22	4	19	<b>80</b>
			Acétaldéhyde	7	2	7	26
			Propanal	3	< 0,4	2	19
			Butanal	8	1	7	30
			Benzaldéhyde	1	< 0,4	1	6
			Isopentanal	1	< 0,5	1	2
			Pentanal	2	1	2	19

Etude	Période	Nombre et type de classe	Polluants	Concentrations $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
				moyenne	min	médiane	max
Campagne GIERSA Rhône-Alpes 2006 – 2007	Juin 06 Oct 06 Déc 06 Mars 07	28 maternelles 22 crèches	Formaldéhyde	24,1	8,6	23,1	49,2
			maternelle crèches	18,6	7,3	16,4	40,5
Campagne Air Breizh Agglomération de Rennes 2007-2008	Déc 07 Juin 08	4 écoles primaires	Formaldéhyde	<b>29,6</b>	<b>18,6</b>	25,5	60,6
			Acétaldéhyde	6,8	5,6	6,5	8,7
			Acroléine	0,3	0,2	0,3	0,4
			Propanal	2,7	2,3	2,7	3,2
			Butanal	8,6	6,2	8,6	10,9
			Benzaldéhyde	1,0	0,4	1,0	1,6
			Isopentanal	1,0	0,9	1,0	1,2
			Hexanal	16,7	11,1	11,8	32,2

Tab 5 : Concentrations en aldéhydes dans différents établissements scolaires en France

### IV.3. Les mesures de dioxyde de carbone

Les concentrations en dioxyde de carbone sont particulièrement bien corrélées avec le degré d'occupation des salles. Les fluctuations des concentrations correspondent au temps de présence des élèves dans les classes (augmentation brusque à l'arrivée des élèves le matin puis après les récréations et les pauses déjeuner et diminution lors des départs en récréation et le soir).

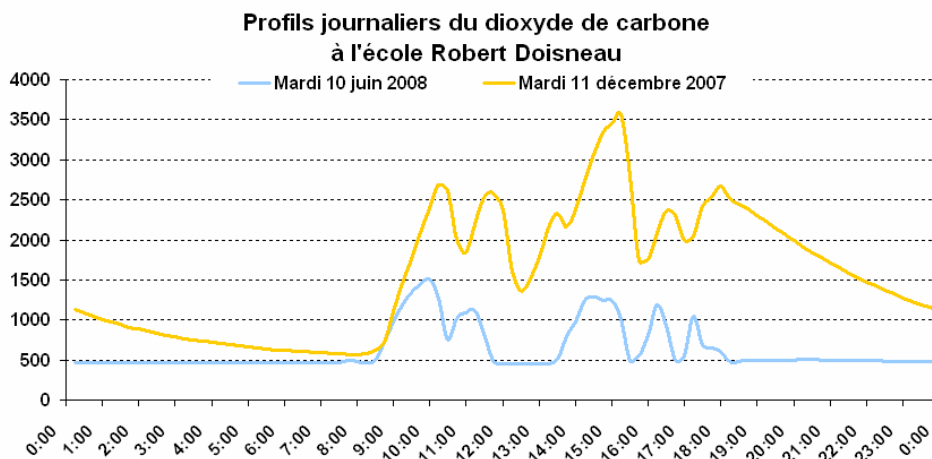


Fig 8 : Evolution des concentrations en dioxyde de carbone à l'école Robert Doisneau pour les journées du mardi

En dehors de la présence des enfants, les niveaux sont extrêmement stables et se situent entre 400 et 500 ppm (concentration atmosphérique).

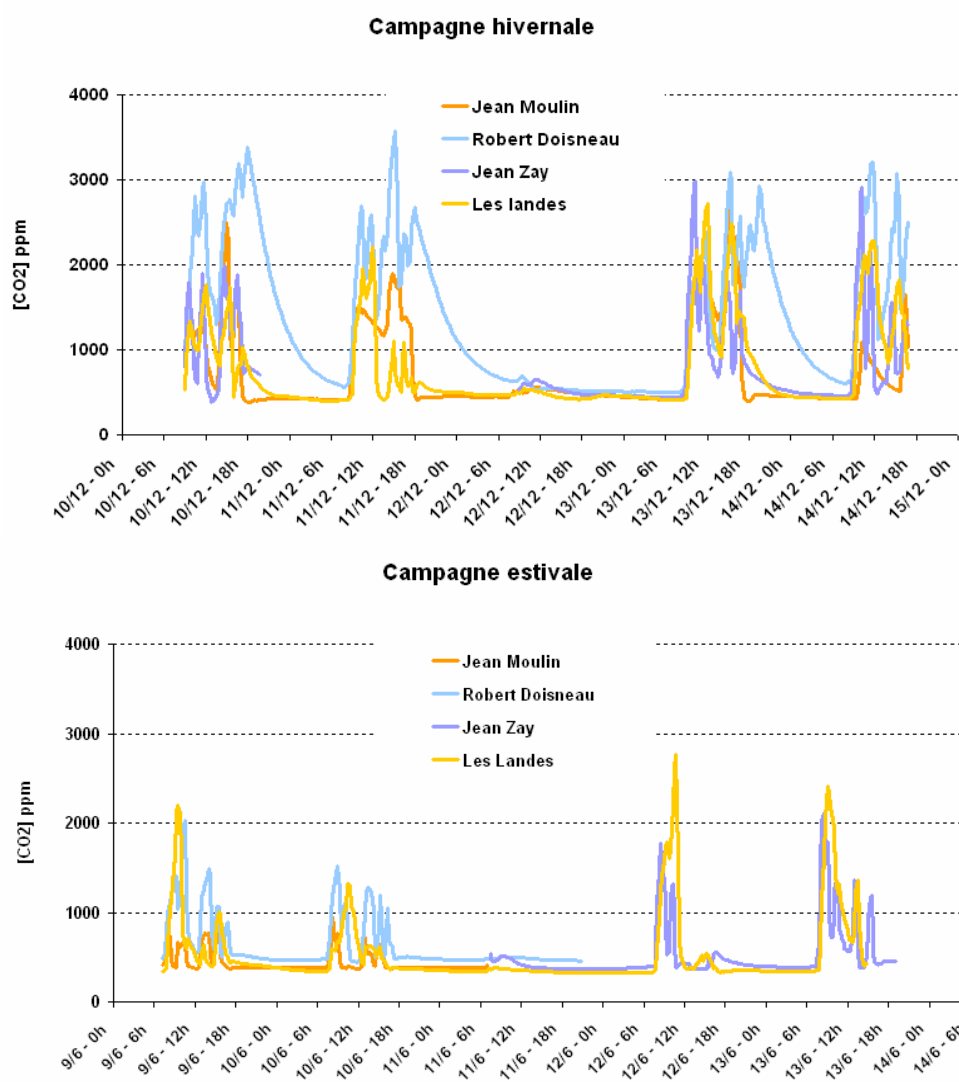


Fig 9 : Evolution des concentrations moyennes en dioxyde de carbone dans les classes établies

Les concentrations de dioxyde de carbone sont plus élevées en période hivernale qu'en période estivale, notamment à cause du confinement (les périodes d'aération des locaux sont réduites en hiver afin d'éviter une chute importante des températures dans les locaux).

Le diagramme des fréquences cumulées permet de représenter graphiquement pour chaque école étudiée, la durée (en %) pour laquelle la concentration en CO<sub>2</sub> est supérieure à 1300 ppm (niveau de référence du Règlement Sanitaire Départemental).

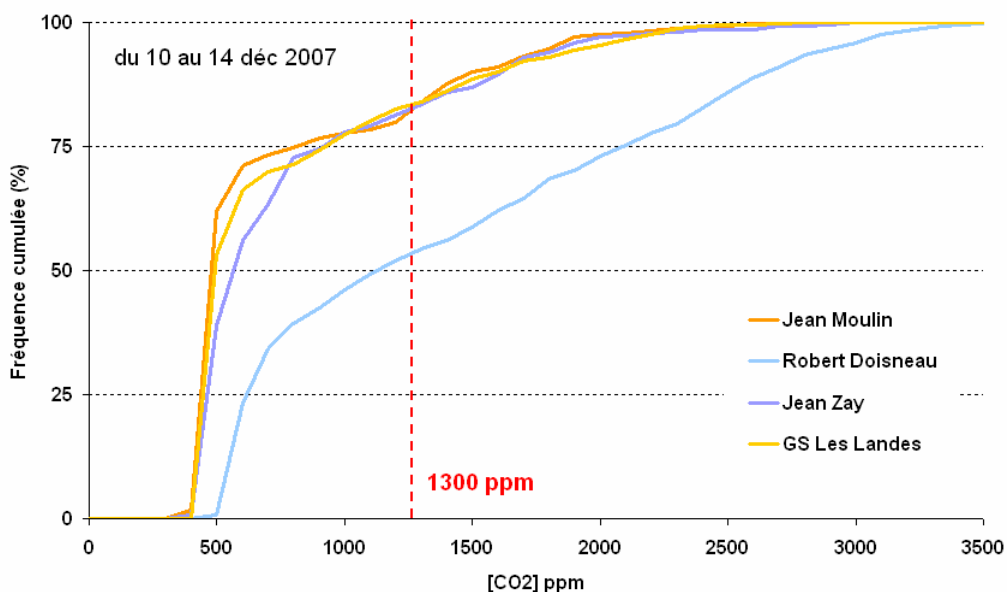


Fig 10 : Diagramme des fréquences cumulées des concentrations en dioxyde de carbone campagne hivernale

Durant la période de mesure hivernale, les concentrations en CO<sub>2</sub> dépassent 1300 ppm :

- 12% du temps à l'école Jean Moulin,
- 14% du temps à l'école Jean Zay et au groupe scolaire les Landes,
- 44% du temps à Robert Doisneau.

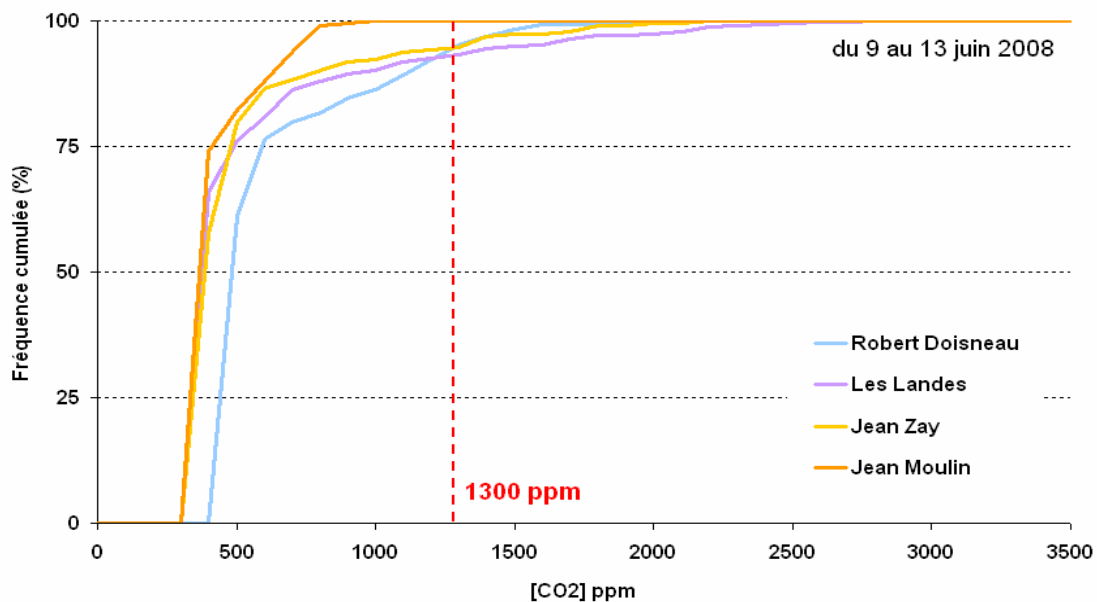


Fig 11 : Diagramme des fréquences cumulées des concentrations en dioxyde de carbone campagne estivale

Durant la période de mesure estivale, les concentrations en CO<sub>2</sub> sont plus faibles et dépassent 1300 ppm :

- 5% du temps à l'école Jean Zay et à Robert Doisneau,
- 7% du temps au groupe scolaire les Landes.

Aucun dépassement n'est observé pour l'école Jean Moulin



En admettant que les élèves soient présents en classe tous les jours (mercredi excepté) de 8h30 à 16h30, la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de la classe durant leur présence excède les 1300 ppm pour la période hivernale dans :

- 42 % des cas pour l'école Jean Zay,
- 47% des cas pour l'école Jean Moulin et le groupe scolaire des Landes,
- 82% des cas pour l'école Robert Doisneau.

Ces pourcentages s'établissent pour la période estivale à

- 15% des cas pour l'école Jean Zay,
- 18% des cas pour l'école Robert Doisneau,
- 22% des cas pour le groupe scolaire des Landes.

### IV.3. Les niveaux de monoxyde de carbone

Les mesures de monoxyde de carbone réalisées en continu dans les classes révèlent des niveaux moyens compris entre 0,64 mg/m<sup>3</sup> et 1,58 mg/m<sup>3</sup> pour la période hivernale et entre 0,28 mg/m<sup>3</sup> et 0,45 mg/m<sup>3</sup> pour la période estivale.

Ecoles		moyenne	médiane	Max	Min
Jean Moulin	Décembre 07	0,64	0,49	3,32	0,31
	Juin 08	0,35	0,35	0,57	0,23
Jean Zay	Décembre 07	0,86	0,83	2,01	0,40
	Juin 08	0,45	0,37	1,42	0,25
Robert Doisneau	Décembre 07	1,17	0,64	25,87	0,24
	Juin 08	0,28	0,26	0,43	0,23
GS des Landes	Décembre 07	1,58	1,48	2,69	1,00
	Juin 08	0,30	0,29	0,63	0,21

Tab 6 : Synthèse des résultats

La valeur maximale quart-horaire de la campagne est de 25,87 mg/m<sup>3</sup> (école Robert Doisneau le mardi 11 décembre à 8h45). Cette dernière bien qu'élevée par rapport aux autres valeurs reste inférieure à la valeur guide de 100 mg/m<sup>3</sup> édictée par l'AFSSET. Les autres valeurs guides sont également respectées durant les 2 campagnes.

L'enquête réalisée par la DRASS Ile de France et le Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris sur les niveaux d'exposition au CO à l'intérieur des crèches de la région francilienne a permis de documenter environ 50 crèches. Les concentrations moyennes enregistrées sur un pas de temps de 5 minutes en hiver 2000-2001 sont comprises entre 0,1 et 2 ppm (0,17 mg/m<sup>3</sup> et 2,30 mg/m<sup>3</sup>). Deux pics ponctuels de l'ordre de 35 mg/m<sup>3</sup> ont été observés.



Les mesures réalisées sur Rennes Métropole font apparaître :

- Des niveaux de pollution dans les classes du même ordre de grandeur que ceux relevés dans les crèches parisiennes,
- Des concentrations systématiquement inférieures aux valeurs guides fixées par l'AFSSET,
- Des niveaux plus faibles l'été que l'hiver.

#### IV.4. Evaluation du confinement à partir des concentrations en dioxyde de carbone

##### a. Méthodologie

A partir des enregistrements des concentrations en dioxyde de carbone, il est possible, sous certaines conditions, d'évaluer le taux de renouvellement d'air dans les classes. 2 méthodes d'estimation du renouvellement d'air sont décrites dans la littérature [9] :

- Méthode de croissance de CO<sub>2</sub>

On applique l'équation de conservation de la masse de CO<sub>2</sub> dans un local donné. Si on suppose que, sur une période donnée, la concentration en CO<sub>2</sub> à l'extérieur C<sub>ext</sub>, la production de CO<sub>2</sub> dans le local (P) ainsi que son taux de renouvellement d'air N ne varient pas au cours du temps, la résolution de l'équation différentielle conduit à l'expression suivante (cf. annexe):

$$C_{int(t)} = C_{ext} + [C_{int(0)} - C_{ext} - (P/NV)] \times e^{(-Nt)} + P/NV \quad (1)$$

Avec : C<sub>int(t)</sub> est la concentration intérieure de polluant à l'instant t  
 C<sub>ext</sub> est la concentration de CO<sub>2</sub> à l'extérieur  
 P est la production de CO<sub>2</sub> due à la présence humaine (m<sup>3</sup>/h)  
 V est le volume du local (m<sup>3</sup>)  
 N est le taux de renouvellement d'air du local (vol/h).

- Méthode de décroissance

En l'absence de production de CO<sub>2</sub>, c'est à dire lorsque la salle de classe est inoccupée, l'équation (1) se simplifie et caractérise la loi de décroissance en fonction du temps :

$$(C_{int(t)} - C_{ext}) / (C_{int(0)} - C_{ext}) = e^{(-Nt)} \quad (2)$$

##### b. Résultats

Le graphique ci-dessous présente l'évolution des concentrations en CO<sub>2</sub>, le degré d'occupation de la classe ainsi que les durées d'ouverture des fenêtres et de la porte.

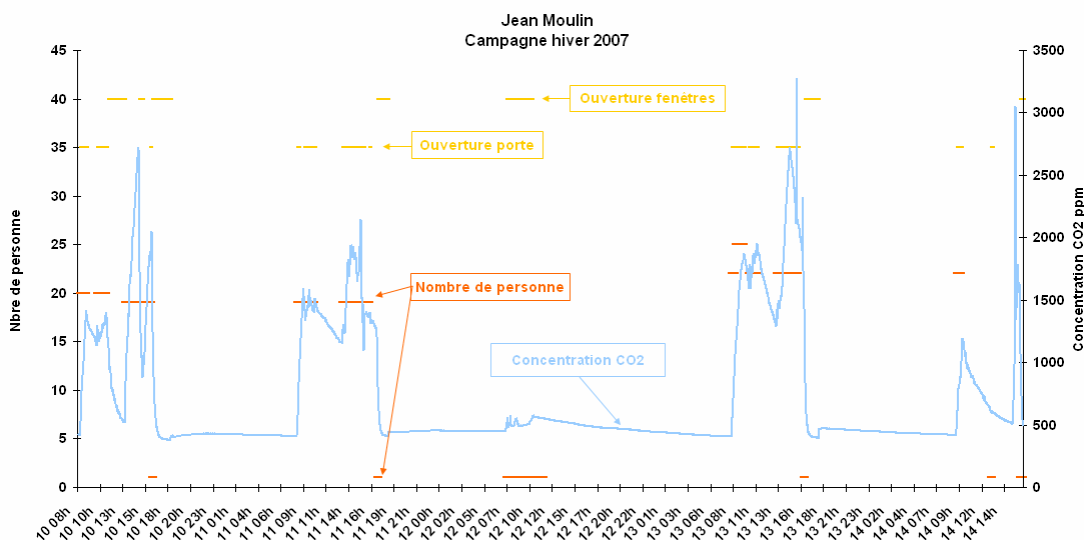


Fig 12 : Corrélation entre les niveaux de CO<sub>2</sub> et ouverture des fenêtres dans les classes

L'étude des phases de décroissance permet de distinguer 2 types de phase en fonction de l'ouverture ou non des fenêtres.

Le premier type correspond à une décroissance « lente » (d-cl) durant les périodes de récréation ou de pauses, sans ouverture de fenêtre. Le second type correspond à une diminution des concentrations beaucoup plus rapide (dcr) lorsque la classe est inoccupée et les fenêtres ouvertes.

Pour chacune des phases de décroissance, le renouvellement d'air est calculé à partir de l'équation 2. Les résultats sont reportés sur le graphique ci-dessous (en rouge dc-r et en violet dc-l).

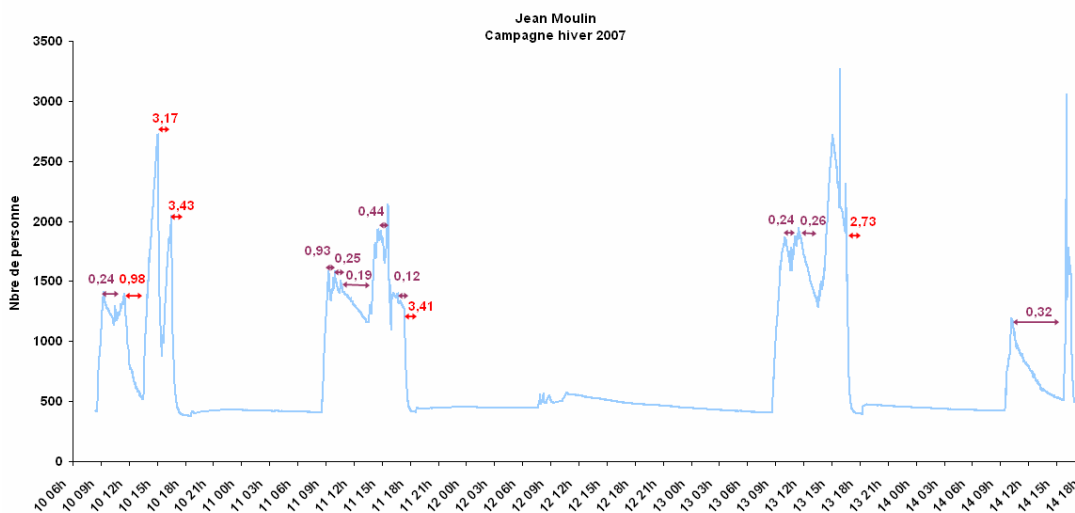


Fig 13 : Evaluation du confinement par la méthode de décroissance pour l'école Jean Moulin

La même méthode est appliquée aux 4 classes et aux 2 campagnes de mesure. Les résultats sont repris dans le tableau ci-dessous.

Jour	Jean Moulin			Robert Doisneau			Jean Zay			GS des Landes		
	Heure du début	Durée (h)	N vol/h	Heure du début	Durée (h)	N vol/h	Heure du début	Durée (h)	N vol/h	Créneau	Durée (h)	N vol/h
10/12/2007	09h18	1,3	0,24	10h30	0,3	1,88	9h30	1,2	1,96	9h30	1,3	0,47
	11h30	2,0	0,98	11h33	1,9	0,62	11h32	1,1	5,16	11h53	2,0	0,69
	15h06	0,5	3,17	18h01	14,0	0,25	14h32	1,1	0,81	15h28	0,5	9,02
	16h34	1,2	3,43				16h30	0,9	2,02	17h09	4,7	0,53
11/12/2007	09h20	0,2	0,93	10h20	0,5	1,53				10h33	0,4	0,83
	10h00	0,6	0,25	11h39	0,6	1,76				11h50	1,0	4,01
	10h37	1,9	0,19	15h18	0,4	2,61				14h57	0,4	4,17
	14h53	0,5	0,44	18h00	14,6	0,18				16h30	0,4	4,06
	16h15	1,2	0,12									
13/12/2007	10h01	0,7	0,24	9h33	1,2	0,26	10h13	0,4	3,28	10h27	0,5	0,94
	11h30-	2,1	0,26	11h34	1,9	0,77	11h18	2,2	0,91	11h53	2,1	0,77
	16h32	1,7	2,73	15h20	0,2	4,94	14h56	0,7	2,19	15h21	0,7	1,51
				19h31	12,9	0,23	16h35	0,5	2,10	16h22	5,7	0,44
14/12/2007	10h11	5,6	0,32	10h32	0,2	1,79	10h13	0,4	6,23	10h34	0,4	0,68
				11h32	0,9	1,99	11h31	0,7	4,31	11h52	2,2	0,75
				15h09	0,5	3,16	14h29	0,7	2,00	15h28	1,3	1,20

Tab 7 : Evaluation du confinement durant la campagne hivernale

Jour	Jean Moulin			Robert Doisneau			Jean Zay			GS des Landes		
	Heure du début	Durée (h)	N vol/h	Heure du début	Durée (h)	N vol/h	Heure du début	Durée (h)	N vol/h	Heure du début	Durée (h)	N vol/h
09/06/2008	8h44	0,3	11,45	10h11	0,3	3,24				10h14	1,1	2,04
	11h26	0,4	6,40	11h19	1,9	1,51				14h02	1,0	1,57
	14h48	0,7	3,46	14h53	0,7	3,67				16h32	1,5	1,51
	16h25	0,6	3,98	16h21	0,6	5,67						
10/06/2008	09h04	0,3	2,86	11h11	0,8	5,84				11h36	2,2	1,31
	9h56	0,8	4,44	14h59	0,6	6,20				15h58	1,0	1,84
	14h55	0,5	5,29	16h20	0,6	7,30						
	16h25	0,6	4,64									
12/06/2008							9h31	1,1	2,91	11h36	1,0	4,07
							11h08	0,6	6,22			
13/06/2008							09h37	1,0	1,63	09h54	1,5	0,62
							11h22	0,8	2,13	11h37	1,8	0,61
							13h46	1,1	3,97			

Tab 8 :: Evaluation du confinement durant la campagne estivale

Les taux de renouvellement d'air, calculés à l'aide de la méthode de décroissance sont compris entre 0,12 vol/h et 9,02 vol/h l'hiver et entre 0,61 vol/h et 11,45 vol/h l'été. Le taux de renouvellement d'air est fortement dépendant de l'ouverture des fenêtres. En effet, lorsque les fenêtres sont fermées, les taux sont systématiquement inférieurs à 1 vol/h. Dans le cas contraire, les taux de renouvellement d'air sont majoritairement compris entre 1,5 et 6 vol/h.

La méthode de décroissance ne permet pas de connaître le renouvellement d'air dans les classes pendant la période d'occupation puisqu'elle fait appel à des séquences de sortie de classe pour lesquelles il n'est pas sûr que les conditions aérauliques soient les mêmes que pendant les séquences réelles d'occupation. En particulier, le changement d'état des portes intérieures (fermé/ouvert) peut significativement affecter le taux de renouvellement d'air. Le biais induit par la sortie des écoliers de la classe tend à surestimer le renouvellement d'air effectif de la salle de classe en conditions réelles d'occupation.

L'exploitation des phases de croissance est plus délicate que celle des phases de décroissance. Elle fait appel à une équation implicite, elle fait également intervenir plus d'hypothèses, notamment sur le taux de production de CO<sub>2</sub>. Dans la pratique, il est difficile de trouver des séquences de croissance de concentration suffisamment pures pour être exploitées de manière fiable. Aussi après plusieurs tests, cette méthode a été écartée.

## Conclusions - Perspectives

Cette première étude dans les écoles bretonnes a permis de tester et de valider un protocole de mesure visant à caractériser la qualité de l'air intérieur et d'offrir un premier aperçu des concentrations en aldéhydes et en dioxyde de carbone dans les classes.

Afin d'appréhender la variabilité temporelle des niveaux de pollution, deux campagnes de mesure ont été mises en place (du 10 au 14 décembre 2007 et du 9 au 13 juin 2008) dans 4 écoles de Rennes Métropole (les écoles primaires Jean Zay, Jean Moulin et Robert Doisneau à Rennes et le groupe scolaire des Landes à Chantepie).

Bien que les résultats soient proches des niveaux rencontrés dans les autres écoles françaises, ces derniers suscitent quelques interrogations :

- Les concentrations en formaldéhyde sont supérieures à la valeur guide pour une exposition à long terme fixée à  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  par l'AFSSET (de nouvelles mesures permettront d'étayer ces résultats),
- En présence des élèves, les niveaux de  $\text{CO}_2$  excèdent fréquemment la valeur de référence du Règlement Sanitaire Départemental.

L'évaluation des taux de renouvellement d'air dans les classes a démontré l'efficacité de l'ouverture des fenêtres pour réduire les concentrations des polluants dans l'air des écoles. Aussi une aération systématique des salles durant les périodes de récréations permet d'agir de manière significative sur la qualité de l'air dans les classes.

## Bibliographie

- [1] OQAI, Observatoire de la qualité de l'air intérieur, fiches polluants [en ligne], disponible sur <[www.air-interieur.org](http://www.air-interieur.org)> (consulté le 16-12-07).
- [2] AFSSET - Avis relatif à l'évaluation des risques sanitaires pour la population générale liés à la présence de formaldéhyde dans les environnements intérieurs et extérieurs - Saisine Afsset n° 2004/016 – Paris - 2008, 8p.
- [3] MEININGHAUS R., GONZALEZ-FLESCA N., CICOLELLA A. – Etude de l'exposition totale de populations urbaines aux aldéhydes – Rapport INERIS LCSQA – 2000.
- [4] MOSQUERON L., NEDELLEC V. – Inventaire des données Française sur la qualité de l'air intérieur des bâtiments - Actualisation des données sur la période 2001-2004 – Rapport OQAI - Paris – 2004 – 61 p.
- [5] MANDIN C. - Formaldéhyde : Etat des lieux des techniques analytiques et niveaux de concentration mesurés - Rapport LCSQA - 2005- 17p.
- [6] ASPA - Campagne de mesure du formaldéhyde dans les établissements scolaires et d'accueil de petite enfance de la ville de Strasbourg : bilan des niveaux mesuré – Strasbourg - 2005 – 39 p.
- [7] GIERSA – Mesure des aldéhydes dans l'air intérieur des écoles maternelles et des crèches de la région Rhône-Alpes – 2007 – 43 p.
- [8] DE BLAYE F., LE CLAVE S., HANOUNE B. – Exposition aux aldéhydes dans l'air: rôle dans l'asthme, rapport final ARP 2002 PRIMEQUAL 2 - Hôpitaux Universitaires de Strasbourg - 102 p.
- [9] ASPA - Etude exploratoire du profil temporel des niveaux de formaldéhyde dans deux établissements scolaires de la ville de Strasbourg à l'aide de prélèvements sur 30 minutes - Rapport 228-04/2 – Stasbourg – 2005 – 47 p.
- [10] RIBERON J., MILLET J.R. - Deux composants de l'air à l'intérieur des locaux : le gaz carbonique, la vapeur d'eau. Cahiers du CSTB n°2526, livraison 323 , octobre 1991.

## Annexe

### Méthode de croissance de CO<sub>2</sub>

On applique l'équation de conservation de la masse de CO<sub>2</sub> dans un local donné. Si on suppose que, sur une période donnée, la concentration en CO<sub>2</sub> à l'extérieur C<sub>ext</sub>, la production de CO<sub>2</sub> dans le local (P) ainsi que son taux de renouvellement d'air N ne varient pas au cours du temps, la résolution de l'équation différentielle conduit à l'expression suivante (cf. annexe):

$$C_{int(t)} = C_{ext} + [C_{int(0)} - C_{ext} - (P/NV)] \times e^{(-Nt)} + P/NV$$

Avec : C<sub>int(t)</sub> est la concentration intérieure de polluant à l'instant t  
 C<sub>ext</sub> est la concentration de CO<sub>2</sub> à l'extérieur  
 P est la production de CO<sub>2</sub> due à la présence humaine (m<sup>3</sup>/h)  
 V est le volume du local (m<sup>3</sup>)  
 N est le taux de renouvellement d'air du local (vol/h).

La production est estimée à partir du nombre de personnes de leur âge et de leur activité [10]. Le débit de production de CO<sub>2</sub> peut se formuler de la manière suivante :

$$P = 85.10^{-4} \times M \times A$$

M : Métabolisme exprimé en met (1 met = 58 W/m<sup>2</sup>). On a retenu deux niveaux d'activité : activité sédentaire correspondant à 1,2 met et activité remuante correspondant à 2,2 met [9]

A : est la surface corporelle de l'individu (m<sup>2</sup>) qui est déterminée à partir de la taille et du poids. Nous utilisons la formule de Boyd à partir des caractéristiques moyennes des enfants de la classe considérée.

$$A (m^2) = 0,0003207 \times (\text{Poids})^{0,7285-0,0188 \times \log(\text{Poids})} \times (\text{Taille})^{0,3}$$