



ENSP

ÉCOLE NATIONALE DE
LA SANTÉ PUBLIQUE

RENNES

Ingénieur du Génie Sanitaire

Promotion 2005

**Qualité de l'air intérieur dans les
écoles maternelles et primaires :
Spécificités de la problématique et
implications en terme d'évaluation et
de gestion des risques sanitaires**

Présenté par :

Béatrice JÉDOR

Ingénieur ENSIL

Eau et Environnement

Référent professionnel :

Corinne MANDIN, INERIS

Référent pédagogique :

Michel CLÉMENT, ENSP

Lieu du stage :

INERIS, Verneuil-en-Halatte

Remerciements

Je remercie en premier lieu, Monsieur André CICOLELLA, responsable de l'unité Evaluation des Risques Sanitaires, de m'avoir accueillie au sein de son unité à l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques afin d'effectuer mon mémoire de fin d'études.

Je tiens à remercier tout particulièrement Madame Corinne MANDIN, ingénieur à l'unité Evaluation des Risques Sanitaires, pour son encadrement. Je lui suis reconnaissante de sa disponibilité, de ses conseils et encouragements.

Je remercie mon référent pédagogique, Monsieur Michel CLÉMENT, professeur à l'École Nationale de Santé Publique.

Mes remerciements vont également à Madame Séverine KIRCHNER du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, coordinatrice scientifique de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, pour son écoute, ses remarques et ses conseils avisés.

Merci enfin à l'ensemble du personnel des unités Evaluation des Risques Sanitaires et Modélisation Economique pour leur accueil et à tous ceux qui m'ont apporté leur soutien et qui ont contribué au bon déroulement de ce mémoire.

Abstract

Air pollution is not just about air in the cities. It exists in indoor environments. Nowadays, indoor air quality has become a major public health matter, so much so that one action in the PNSE (National Plan for Health and Environment) is devoted to it. Apart from the home, nursery schools and primary schools are the most important indoor environments for children. Children are particularly sensitive to pollutants, because they inhale more air than adults proportionally to their weight and because they are growing.

Studies dealing with indoor air quality in schools were analysed and some specificities have been underlined.

The pollutants analysed in schools are also analysed at home/in houses. However, concentrations are different and are linked to high population density and to classroom furnishing. The more frequent use of products in schools for teaching (chalk, pens, felts, glue, painting,...) and for cleaning (chemical products) have effects on indoor air quality. So, the concentrations of VOC, formaldehyde, CO₂, particles and allergens are higher than at home/in houses. Besides, ventilation systems are less common in schools than in offices. Bad indoor air quality in schools can result in adverse health effects and can reduce students' school performance. In foreign countries, guides or tools for improving indoor air quality in schools were published. At present time, such a guide is not available in France.

The collection of data about characteristics of French school buildings and about activities are essential for a better knowledge of children exposure. A detailed study of some French representative schools could help to identify precisely the behaviours and the determinants of the exposure in these microenvironments. A guide dedicated to this issue could state a set of possible preventive actions. These actions can be undertaken during the design, the construction and the use of the school. This guide would also help the people in charge of nursery and primary schools if indoor air quality problems occurred.

Keywords:

Indoor Air Quality, children, nursery and primary schools, pollutants, state of the art, guide, prospects for studies.

Sommaire

INTRODUCTION	1
1 SPÉCIFICITÉS DES POLLUANTS DE L’AIR INTÉRIEUR DES ÉCOLES	3
1.1 POLLUANTS INORGANIQUES.....	3
1.1.1 Dioxyde de carbone.....	3
1.1.2 Monoxyde de carbone.....	4
1.1.3 Oxydes d’azote	6
1.1.4 Ozone	7
1.1.5 Particules inertes.....	8
1.1.6 Amiante.....	11
1.1.7 Fibres minérales artificielles.....	12
1.2 POLLUANTS ORGANIQUES.....	12
1.2.1 Composés organiques volatils.....	12
1.2.1.1 COV	14
1.2.1.2 Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes (BTEX).....	16
1.2.2 Aldéhydes.....	17
1.2.2.1 Formaldéhyde.....	17
1.2.2.2 Autres aldéhydes.....	19
1.2.3 Composés organiques semi-volatils.....	19
1.2.3.1 Phtalates	19
1.2.3.2 Polychlorobiphényles	20
1.2.4 Ethers de glycol.....	21
1.3 BIOCONTAMINANTS.....	22
1.3.1 Allergènes.....	23
1.3.1.1 allergènes d’acariens	23
1.3.1.2 allergènes d’animaux domestiques	24
1.3.1.3 allergènes de blattes	25
1.3.2 Champignons et moisissures.....	25
1.3.3 Bactéries.....	29
1.3.4 Études globales des biocontaminants.....	30
1.4 AUTRES ETUDES « MULTIPOLLUANTS».....	33
1.5 POLLUANTS DE L’AIR PEU OU PAS ETUDIÉS DANS LES ECOLES.....	34
1.5.1 Polluants rarement étudiés.....	34
1.5.2 Polluants non étudiés.....	35
1.6 SYNTHÈSE.....	36
2 SPÉCIFICITÉS DES ÉCOLES EN TERME DE BÂTI, D’ÉQUIPEMENTS ET D’ACTIVITÉS	38
2.1 DENSITÉ D’OCCUPATION.....	38
2.2 TYPOLOGIE DU BATI.....	38

2.3	ÉQUIPEMENTS SPECIFIQUES.....	39
2.3.1	<i>Systèmes de ventilation</i>	39
2.3.2	<i>Mobilier</i>	40
2.4	ACTIVITES PARTICULIERES.....	40
2.5	SYNTHESE.....	41
3	GUIDES DE GESTION DE LA QUALITÉ DE L’AIR INTÉRIEUR DANS LES ÉCOLES	43
3.1	EUROPE.....	43
3.1.1	<i>France</i>	43
3.1.2	<i>Suède</i>	43
3.1.3	<i>Allemagne</i>	44
3.1.4	<i>Italie et Hongrie</i>	45
3.1.5	<i>European Federation of Allergy and Airway Disease Patients Associations</i>	45
3.2	AMERIQUE DU NORD.....	45
3.2.1	<i>États-Unis</i>	45
3.2.2	<i>Canada</i>	48
3.3	INTERNATIONAL SOCIETY OF INDOOR AIR QUALITY, TASK FORCE XII.....	49
3.4	SYNTHESE.....	50
4	PERSPECTIVES	51
4.1	DONNEES A COLLECTER P OUR UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DE LA QUALITE DE L ’AIR INTERIEUR DANS LES ECOLES FRANÇAISES	51
4.1.1	<i>Données sur les écoles en elles-mêmes</i>	51
4.1.2	<i>Données sur les niveaux d’exposition aux polluants</i>	53
4.1.3	<i>Données sur les déterminants de l’exposition dans les écoles</i>	53
4.2	PROPOSITION D’ACTIONS POUR LA PREVENTION ET LA GESTION DE LA QUALITE DE L ’AIR INTERIEUR DANS LES ECOLES MATERNELLES ET PRIMAIRES EN FRANCE.....	54
4.2.1	<i>Durant la conception et la construction de l’école</i>	54
4.2.2	<i>Actions de prévention durant la « vie » de l’école</i>	54
4.2.3	<i>En cas de survenue de problèmes de qualité de l’air intérieur</i>	55
	CONCLUSION	57
	Bibliographie	59
	Glossaire.....	65
	Liste des annexes	I

Liste des sigles utilisés

ASPA : Association pour la Surveillance et l'Étude de la Pollution Atmosphérique en Alsace

BTEX : Benzène, Toluène, Éthylbenzène, Xylènes

CETIAT : Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques

C_{int}/C_{ext} : concentration intérieure / concentration extérieure

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

CO : monoxyde de carbone

CO₂ : dioxyde de carbone

COV : Composé Organique Volatil

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

EFA : European Federation of Allergy and Airway Diseases Patients Association

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

IAQ : Indoor Air Quality

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

ISAAC : International Study Asthma and Allergies in Childhood

ISIAQ : International Society of Indoor Air Quality

LEPTAB : Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transport Appliqués au Bâtiment (Université de La Rochelle)

LHVP : Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris

NO : monoxyde d'azote

NO₂ : dioxyde d'azote

NO_x : oxydes d'azote

O₃ : ozone

OQAI : Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur

PCB : Polychlorobiphényles

PM_{2,5} ou PM₁₀ (Particulate Matter) : particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 2,5 ou 10 µm

PNSE : Plan National Santé Environnement

QAI : Qualité de l'Air Intérieur

SBM : Syndrôme des Bâtiments Malsains* (ou SBS Sick Building Syndrome)

SO₂ : dioxyde de soufre

Ufc : Unité Formant Colonie

US-EPA : United States Environmental Protection Agency

VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée

INTRODUCTION

La pollution de l'air ne concerne pas uniquement l'air des villes, elle existe dans tous les milieux clos (habitats, bureaux, écoles, lieux publics, transports,...) où nous passons entre 80 et 90% de notre temps.

La qualité de l'air intérieur est devenue aujourd'hui une préoccupation sanitaire réelle et occupe une place importante au sein du Plan National Santé-Environnement (PNSE) publié en juin 2004 [1].

Au cours des dernières années, le nombre des plaintes concernant la qualité de l'air intérieur dans les logements, les bureaux mais aussi dans les écoles a augmenté, au fur et à mesure que les mesures de conservation de l'énergie réduisant l'apport d'air de l'extérieur étaient mises en application. Les problèmes de pollution intérieure sont complexes car l'environnement intérieur est un lieu d'interaction entre le site, l'air extérieur, le bâtiment, les potentielles sources intérieures de contaminants et les occupants du bâtiment. De plus, ces problèmes peuvent être liés à des éléments structurels (implantation, conception, isolation, chauffage, nature du mobilier) et des éléments conjoncturels (conditions d'hygiène, d'entretien, d'isolation, présence humaine et animale, activités).

Les enfants, dont l'organisme est en pleine croissance, respirent un volume d'air plus important que les adultes relativement à leur poids et leur capacité d'élimination et de lutte contre les substances toxiques est plus faible. Ainsi sont-ils plus sensibles aux polluants de l'air et les effets sanitaires engendrés plus prononcés. En dehors de leur domicile, les enfants passent plus de temps à l'école que dans n'importe quel autre environnement intérieur. C'est pourquoi il est indispensable de mieux connaître la qualité de l'air à l'intérieur de ces locaux, les déterminants de celle-ci et les moyens pour la préserver ou l'améliorer.

Le champ de l'étude se limitera aux écoles maternelles et primaires. En effet, les crèches et garderies ont des modes de fonctionnement très variés (privé, municipal, associatif) qui rendent difficiles la réalisation de prélèvements d'air et la mise en place d'un guide de gestion de la qualité de l'air intérieur. Par ailleurs, la pollution électromagnétique et les nuisances, comme les odeurs et le bruit, ne sont pas examinées dans cette étude car elles ne sont généralement pas considérées comme faisant partie, *stricto sensu*, de la qualité de l'air intérieur.

En France, à la rentrée 2003, 18 147 écoles maternelles accueillent 2 598 700 enfants et 3 899 900 élèves étaient scolarisés dans 39 040 écoles primaires. Il est important de noter que ces effectifs sont en légère hausse par rapport aux années précédentes et que les plus jeunes sont fortement scolarisés avant l'âge obligatoire, avec une moyenne de 83,5% d'enfants de 2 à 5 ans scolarisés [2] (Annexe 1).

Dans le premier chapitre, après un rappel des généralités concernant les polluants (sources et effets sanitaires), les études relatives à la qualité de l'air intérieur dans les écoles seront exposées et les spécificités dégagées. Ces données sont regroupées par polluants ou groupe de polluants. Ensuite, les spécificités des écoles en terme de bâti, d'équipements et d'activités seront dégagées. Les guides existants de gestion (prévention, intervention) concernant la qualité de l'air dans les écoles seront présentés dans le troisième chapitre. Enfin, des perspectives d'études, de collecte de données et d'actions à mener dans les écoles maternelles et primaires françaises seront proposées dans le dernier chapitre.

Nota : Les astérisques renvoient aux termes du glossaire, en fin de document.

1 SPÉCIFICITÉS DES POLLUANTS DE L'AIR INTÉRIEUR DES ÉCOLES

Depuis quelques années, la Qualité de l'Air Intérieur (QAI) dans les écoles fait l'objet d'études de plus en plus nombreuses. Ce premier chapitre fait la synthèse de ces différentes études en les regroupant par type de polluant étudié. Ces études ont été collectées à partir des bases de données *PubMed* et *Current Contents* en utilisant, en particulier, les mots clés « schools » et « Indoor Air Quality ». Des généralités sur les sources et les effets sanitaires de chaque polluant ou groupe de polluants sont brièvement présentées en début de chaque partie (l'Annexe 2 regroupe les sources des polluants de l'air intérieur). Sont ensuite exposées les études spécifiques aux écoles concernant le polluant en question. Enfin, les résultats propres à la substance étudiée obtenus dans le cadre de larges campagnes de détermination de la qualité de l'air intérieur dans les écoles (études dites « multipolluants ») sont rapportés. Une description plus complète de ces études multipolluants se trouve en Annexe 3.

Il faut noter que ne sont pas présentées ici les études pour lesquelles seul un résumé très succinct ne donnant pas de résultat exploitable est disponible.

1.1 Polluants inorganiques

1.1.1 Dioxyde de carbone

Sources et effets sanitaires

Le dioxyde de carbone, CO₂, est un gaz inodore et incolore. Il provient principalement de la respiration mais il peut également être produit par une combustion incomplète (sans évacuation extérieure).

Différents symptômes ont été associés à une concentration en CO₂ élevée. Des maux de tête et une baisse de la concentration ont été signalés à partir de 1000 ppm environ dans l'air [3].

Le CO₂ est couramment utilisé comme **traceur de présence** dans les bâtiments. En l'absence de source de combustion, une teneur en CO₂ supérieure à 1000 ppm est considérée comme une valeur indicatrice de confinement et de ventilation inadéquate. Les pics de CO₂ sont plus élevés dans les classes avec air conditionné [4].

Etudes spécifiques au CO₂ dans les écoles

La relation entre **concentration en CO₂** (différentiel concentration intérieure-extérieure) et **absentéisme** a été explorée dans 436 classes primaires américaines. La quasi-totalité de ces classes (434) est équipée de ventilation mécanique. Le différentiel de CO₂ est mesuré à la hauteur des élèves et à l'arrivée du système de ventilation ; l'absentéisme est relevé dans chaque classe. Il ressort des travaux que 45 % des classes ont un différentiel de concentration en CO₂ supérieur à 1000 ppm. Cette augmentation de 1000 ppm est significativement associée à une augmentation de 10 à 20 % du taux

d'absentéisme. Trois facteurs liés au taux de présence ont également été pris en compte : le type de bâtiment (taux d'absentéisme plus élevé dans les bâtiments préfabriqués que dans les bâtiments traditionnels), le pourcentage d'élèves bénéficiant de repas gratuits (taux d'absentéisme plus fort si ce pourcentage est élevé) et le pourcentage d'enfants d'origine hispanique (moins d'absentéisme si ce pourcentage est élevé). Malgré les systèmes de ventilation mécanique, les taux de renouvellement de l'air sont faibles (moins de 7,5 L/s/personne). Il faut également noter une association positive entre absentéisme et concentration en CO₂ en faveur de la transmission des infections respiratoires dans les locaux mal ventilés [5].

Etudes multipolluants (Annexe 3)

Dans le cadre de l'**étude pilote de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur** (OQAI), réalisée au printemps 2001, les teneurs en CO₂ ont été mesurées dans les neuf écoles investiguées. Les concentrations intérieures moyennes varient entre 517 ppm (930 mg/m³) et 1935 ppm (3480 mg/m³). Durant les heures de cours, le CO₂ est lié positivement et significativement à l'effectif, tandis que sur la période totale de l'enquête, il est lié significativement au type de fenêtres (concentrations plus fortes avec des fenêtres double vitrage qu'avec des fenêtres anciennes simple vitrage) [6-8].

Les teneurs en CO₂ mesurées lors de l'**étude de la qualité de l'air dans les locaux d'enseignement** par le **Centre Scientifique et Technique du Bâtiment** (CSTB) sont variables d'une école à l'autre et même d'une classe à l'autre. Les variations saisonnières sont beaucoup moins marquées (1200 ppm en été et 1400 ppm en hiver au maximum). Toutefois, la durée passée au-dessus des 1300 ppm est variable : 10% du temps en été et jusqu'à 30% en hiver. Les concentrations moyennes en CO₂ sont beaucoup plus faibles dans l'école équipée de VMC [9, 10].

1.1.2 Monoxyde de carbone

Sources et effets sanitaires

Le monoxyde de carbone, CO, est un gaz toxique, incolore, inodore et insipide, donc indétectable par l'homme avant l'apparition des premiers symptômes. Il provient de la combustion incomplète de matériaux contenant du carbone (papier, bois, charbon, mazout, essence) dans des appareils et installations de chauffage, de production d'eau chaude ou de cuisson, non ou mal raccordés à un conduit d'évacuation. Il provient également de la fumée de cigarette. Cette dernière source est ici négligeable puisque le tabagisme est interdit dans ces établissements scolaires. Le niveau de pollution extérieure de fond fluctue entre 0,06 mg/m³ et 0,14 mg/m³ ; il peut atteindre des pics de 60 mg/m³ en zone de fort trafic. Dans les maisons avec des installations au gaz, des teneurs supérieures à 115 mg/m³ ont été mesurées [11].

80 à 90 % du CO agit sur l'organisme en se liant rapidement à l'hémoglobine par compétition avec l'oxygène (affinité 200 à 250 fois plus forte) pour former la carboxyhémoglobine (HbCO). Les capacités de transport de l'oxygène dans l'organisme sont réduites et conduisent ainsi à l'asphyxie des organes pouvant mener au décès. La

gravité de l'intoxication au CO dépend de la quantité de CO fixée sur l'hémoglobine, donc de la concentration de CO dans l'air, de la durée d'exposition et du volume d'air respiré. Les enfants, qui ont une respiration plus brève, présenteront plus rapidement un taux de carboxyhémoglobine élevé.

Les symptômes d'une intoxication légère sont des maux de tête, des nausées, une vision floue, des malaises légers et des palpitations. Une hypoxie* sévère cause des dommages neurologiques réversibles ou sévères. Les effets sur le comportement neurologique tels que perte de l'équilibre, mauvaise coordination des mouvements, baisse de la vigilance et altération des fonctions cognitives, apparaissent dès 5,1 à 8,2 % de HbCO dans le sang [11].

Il a été montré qu'une augmentation de 10 ppm ($12,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de la concentration intérieure en CO entraîne une augmentation du risque de crise d'asthme (OR = 1,12 ; IC_{95%} = 1,02-1,28) chez les enfants asthmatiques coréens [12].

Etudes spécifiques au CO dans les écoles

Les niveaux de **CO à l'extérieur et à l'intérieur** d'un établissement scolaire proche d'une **rue à fort trafic** ont été mesurés à Athènes en été et en hiver (1999). Cette étude avait pour but d'évaluer le modèle d'atténuation de la pollution de l'air extérieur à l'intérieur du bâtiment. Les mesures montrent que les concentrations intérieures sont plus faibles que les concentrations extérieures. En semaine, deux pics de concentrations en CO sont mesurés, un le matin (8-9h, déplacements pour aller travailler) et l'autre le soir (22-23h à la fermeture des supermarchés) ; ces pics se retrouvent à l'intérieur avec un décalage d'environ une heure et une intensité moindre. Le week-end, les niveaux de pollution, à l'intérieur et à l'extérieur, sont plus faibles car le trafic est moindre et les portes et fenêtres de l'école sont fermées. Les teneurs sont plus fortes en hiver qu'en été car l'utilisation des véhicules est plus fréquente et car les conditions météorologiques sur la ville favorisent l'accumulation de polluants. Le ratio concentration intérieure sur concentration extérieure ($C_{\text{int}}/C_{\text{ext}}$) augmente légèrement à l'ouverture des portes et fenêtres. Les valeurs de concentrations intérieures, calculées par le modèle à partir des concentrations extérieures et du taux de renouvellement de l'air sont, en accord avec les valeurs mesurées (le ratio mesure/prévision varie entre 0,88 et 1,23) [13].

Etudes multipolluants (Annexe 3)

L'étude menée par le **Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris** (LHVP) dans 10 établissements scolaires montre que les concentrations journalières moyennes sont moins élevées à l'intérieur (<1-2 ppm soit <1,2-2,4mg/m³) qu'à l'extérieur (<1-4 ppm soit <1,2-4,8 mg/m³). Les différences entre écoles sont dues au trafic automobile plus ou moins proche (maximum horaire : 10 ppm soit 12 mg/m³ à l'intérieur et 16 ppm soit 19,2 mg/m³ à l'extérieur) [14].

Les concentrations en CO ont été mesurées dans le cadre de l'**étude d'une école maternelle de Marseille**. En période de chauffage, 90% des mesures intérieures sont inférieures à 2 ppm (soit 2,4 mg/m³) et seulement 1,1% sont supérieures à 20 ppm (24

mg/m³). On observe une légère production de CO dans la classe, en relation avec le chauffage au gaz naturel, mais le système d'évacuation et l'aération sont efficaces [14].

1.1.3 Oxydes d'azote

Sources et effets sanitaires

Les oxydes d'azote, NO_x, sont essentiellement émis lors de combustions à haute température par combinaison de l'oxygène et de l'azote (industries, transports routiers). Les sources intérieures des oxydes d'azote, NO_x, sont les appareils de combustion et, dans une moindre mesure pour les établissements scolaires, le tabagisme. De manière générale, il existe une corrélation entre pollution extérieure de fond et pollution intérieure. De plus, les niveaux de concentration dépendent de la proximité du trafic automobile, de l'utilisation d'appareils de combustion et du taux de renouvellement de l'air intérieur [15]. La demi-vie du NO₂ est de l'ordre de 30 à 50 minutes, compte tenu de sa réactivité vis-à-vis des différentes surfaces et revêtements [14].

L'exposition aiguë au NO₂, gaz ubiquitaire à l'odeur âcre, entraîne une augmentation de la réactivité bronchique (sensibilité des voies aériennes) aux bronchoconstricteurs* chez tous les sujets, les asthmatiques étant plus susceptibles. Quelques études montrent une augmentation de la sensibilité aux bronchoconstricteurs* dès 376-560 µg/m³ de NO₂. Cependant, l'évaluation complète des conséquences de l'augmentation de cette sensibilité n'est pas possible à l'heure actuelle car les mécanismes d'interactions ne sont pas entièrement connus [11]. Aucune étude épidémiologique des effets chroniques n'a été conduite pour estimer les concentrations et la durée d'exposition associées à l'induction de risques inacceptables pour les adultes et les enfants. Toutefois, chez les enfants âgés de 5 à 12 ans, on estime que le risque de maladies ou de symptômes respiratoires augmente de 20 % pour chaque augmentation de 28,3 µg/m³ alors que le niveau hebdomadaire est compris entre 15 et 128 µg/m³. Cependant, les effets observés ne peuvent être clairement attribués à l'exposition aiguë aux pics de concentration ou à l'exposition chronique à des niveaux hebdomadaires (ou bien aux deux) [11].

Etudes spécifiques au NO_x dans les écoles

Une étude menée en Australie consistait à étudier les **effets de l'exposition au NO₂** chez les enfants. 388 enfants répartis dans 8 écoles (4 équipées de chauffage au gaz et 4 de chauffage électrique) ont été suivis ; des mesures ont également été réalisées chez les enfants dont le domicile était chauffé au gaz. Les concentrations en NO₂ sont largement plus élevées dans les écoles équipées de chauffage au gaz (5 à 47 µg/m³ contre 7 à 247 µg/m³). Les élèves ont été classés par gamme d'exposition et un questionnaire a permis de recenser les symptômes et l'absentéisme, jour après jour. Une relation dose-réponse a alors été établie. En effet, il apparaît que, plus l'exposition au NO₂ est élevée, plus la proportion d'élèves absents est grande. De même, une exposition à des pics de concentration supérieurs à 144 µg/m³ (alors que le niveau de fond est de 36 µg/m³) est associée à une augmentation significative du nombre d'angines et de rhumes [16].

Etudes multipolluants (Annexe 3)

Le NO₂ a été étudié durant l'**étude française des six villes** (Marseille, Créteil, Bordeaux, Strasbourg, Reims et Clermont-Ferrand) menée dans le cadre de la phase II de l'*International Study Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC II)*. Quelle que soit la ville, les ratios C_{int}/C_{ext} sont toujours inférieurs à 1 (0,45 à 0,85). La concentration intérieure moyenne en NO₂ est de 29 µg/m³, les concentrations dans les classes ne diffèrent pas significativement entre les villes. Néanmoins, les plus faibles expositions sont enregistrées dans les deux plus petites villes de l'étude (Clermont-Ferrand : 23,9 µg/m³ et Reims : 22,4 µg/m³) [17, 18].

Le **Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris** a mesuré les teneurs en NO₂ dans dix établissements scolaires de la région parisienne [14]. Les teneurs en NO₂ sont, de manière générale, plus faibles à l'intérieur (9 à 33 ppb soit 17 à 63 µg/m³) qu'à l'extérieur (20 à 42 ppb soit 38 à 80 µg/m³). En l'absence de source de pollution intérieure, les ratios C_{int}/C_{ext} du NO₂ varient entre 0,43 et 0,84. Les différences relevées entre les écoles sont dues essentiellement à la proximité du trafic automobile (maximum horaire 73 ppb soit 140 µg/m³ à l'intérieur et 78 ppb soit 150 µg/m³ à l'extérieur). Ces travaux montrent également que le niveau de pollution est influencé par le taux de renouvellement de l'air, l'âge du bâti et les matériaux utilisés.

Les résultats de l'**étude d'Atmosph'air Bourgogne**¹ indiquent que les concentrations en NO₂ mesurées à l'intérieur des trois écoles sont dépendantes des concentrations extérieures. Les teneurs mesurées dans les salles de classe des trois écoles varient entre 17,6 et 28,3 µg/m³ [18-20].

L'étude du **Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transport Appliqués au Bâtiment (LEPTAB)** [21, 22], menée dans 8 écoles maternelles ou primaires de La Rochelle, a montré que, pour NO₂ et NO, les profils des concentrations intérieures et extérieures sont similaires. Les ratios sont inférieurs à 1 en période hivernale comme en période estivale sauf dans deux écoles où la présence d'une source endogène peut être avancée : chaudière à proximité dont les fumées peuvent entrer facilement dans la classe ou connexion défectueuse entre la chaudière et son conduit d'évacuation. Lorsque les fenêtres sont ouvertes, les ratios de NO₂ sont légèrement plus élevés mais dans des proportions modestes (+ 0,1 au maximum). Ceci pourrait être expliqué par le fait que le taux de pénétration de NO₂ est déjà quasiment maximum quand les fenêtres sont fermées.

1.1.4 Ozone

Sources et effets sanitaires

L'ozone, O₃, est un gaz naturel de la stratosphère mais c'est également un polluant secondaire provenant de la transformation de polluants atmosphériques (NO₂ et

¹ Association agréé pour la surveillance de la qualité de l'air en Bourgogne

CO) sous l'effet du rayonnement solaire. Il existe des sources intérieures spécifiques : ordinateurs, imprimantes laser, photocopieurs. La concentration intérieure est rarement très élevée car l'ozone, très réactif, disparaît rapidement.

L'ozone est un oxydant fort. L'exposition à des concentrations élevées provoque des effets aigus se traduisant par des symptômes respiratoires, des modifications de la fonction pulmonaire, une augmentation des inflammations respiratoires (difficultés respiratoires, toux, asthme*, douleurs thoraciques, irritation de la muqueuse membranaire [23]). Ces effets sont statistiquement significatifs lors d'expositions à $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durant 6,6 heures. L'exposition d'enfants à $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'ozone pendant 2 heures conduit à une décroissance de la fonction pulmonaire. Des études chez les enfants, les adolescents et les jeunes adultes montrent que la diminution des fonctions respiratoires apparaît pour des expositions de courte durée à des concentrations en ozone de 120 à $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Plus la durée d'exposition est longue ou plus le niveau d'activité durant l'exposition est élevé, plus les effets sont sévères [11].

Etudes multipolluants (Annexe 3)

Les mesures effectuées dans le cadre de l'étude **ISAAC II** montrent que les concentrations intérieures à Marseille ($18,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Clermont-Ferrand ($17,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont plus élevées que dans les autres villes (moyenne = $11,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Toutefois, les niveaux moyens dans les classes sont souvent très faibles comparativement aux teneurs extérieures ; ceci peut être dû à la forte réactivité de l'ozone sur les surfaces intérieures [17, 18].

Il ressort des travaux du **LEPTAB** que la perméabilité du bâtiment et les concentrations extérieures en ozone influencent fortement la concentration intérieure en O_3 . Les ratios $C_{\text{int}}/C_{\text{ext}}$ sont toujours inférieurs à 0,5 ce qui indique que le transport de l'ozone depuis l'extérieur est le phénomène le plus probable. Pour les bâtiments les plus étanches, quelle que soit la concentration extérieure, les concentrations intérieures sont proches de zéro [21, 22].

1.1.5 Particules inertes

Sources et effets sanitaires

Les particules transportées par l'air ont des compositions chimiques et des tailles extrêmement variables. Les sources endogènes primaires sont, en particulier, la combustion de biomasse pour la cuisine et le chauffage, les photocopieurs, la fumée de cigarette et l'encens dans une moindre mesure. Les gaz d'échappement des automobiles, les phénomènes de combustion, les émissions industrielles contribuent également à la pollution intérieure via la ventilation (naturelle ou mécanique). Comme pour de nombreux autres polluants intérieurs, cette contribution dépend de la proximité de la prise d'air avec la source d'émission et du taux de renouvellement d'air.

Les particules sont classées selon leur diamètre aérodynamique moyen, pour les études de la qualité de l'air intérieur, on considère généralement deux types de particules : les PM_{2,5} et les PM₁₀ (de l'anglais Particulate Matter)

- les PM_{2,5} ou particules fines sont formées par la condensation de gaz et de vapeurs et sont émises lors de combustions incomplètes. Elles sont constituées de sulfates, nitrates, ammoniac, fonctions carbonées, ions métalliques ou composés organiques. Leur distribution spatiale est homogène, elles peuvent être transportées sur de longues distances (100 à 1000 kilomètres [14]) et peuvent pénétrer dans les locaux grâce à la ventilation (naturelle ou mécanique).
- les PM₁₀ de l'air intérieur proviennent de la remise en suspension de la poussière du sol, de l'abrasion de surfaces, de la combustion de charbon et d'huile, de la manipulation de textiles et des activités de bricolage. Leur dispersion est beaucoup plus réduite, car plus lourdes, elles sédimentent plus vite. Leur transfert de l'air extérieur vers l'air intérieur est donc plus faible.

La taille des particules détermine ainsi le transfert de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments mais également le degré de pénétration et de rétention dans les poumons. Les particules de diamètre supérieur à 10 µm, plus lourdes, sont précipitées dans l'oropharynx et dégluties ; celles de diamètre inférieur se déposent dans l'arbre respiratoire (trachée, bronches). Les plus fines (< 2,5 µm) atteignent les bronches secondaires et les alvéoles. A fortes concentrations, ces fractions fines sont la cause principale des effets sanitaires liés aux particules : maladies cardiovasculaires, aggravation des maladies respiratoires, mortalité prématurée [23].

Etudes spécifiques des particules dans les écoles

Afin de définir des **valeurs repères** de concentration en particules totales dans l'air et d'établir la distribution de la taille de ces particules, une équipe suédoise a réalisé une étude dans deux écoles, considérées comme étant des « bâtiments sains » (pas de plainte liée à la QAI, bon niveau de maintenance), en automne, en hiver et au printemps. La concentration moyenne en particules dans ces établissements scolaires est de 20 µg/m³ (± 10 µg/m³) ; cette valeur sera considérée comme une valeur normale dans les prochaines investigations. Aucune variation saisonnière n'est observée, alors que la forte différence d'humidité relative à l'intérieur des bâtiments en Suède, entre l'hiver (20 %) et les autres saisons (40 %) aurait pu faire croire l'inverse. Les particules de petites tailles (0,3 à 0,5 µm) sont les plus nombreuses [24].

Vingt enfants de 7 à 11 ans, asthmatiques reconnus ou supposés, ont été suivis durant 8 saisons (2000-2001) dans le but de caractériser leur **exposition aux PM₁₀**. Pour cela, les teneurs en particules ont été mesurées dans les logements, les salles de classes et à l'extérieur des deux écoles élémentaires de Détroit (Michigan, États-Unis). Les prélèvements sont réalisés à la hauteur de la tête des enfants (1,5 m) sur 24 heures la première année, puis sur 8 heures dans les classes, la deuxième année (sur 16 heures dans les logements). Les enfants sont également équipés de préleveurs portatifs. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont comparables. L'analyse des recueils du

budget espace-temps-activité montre que les enfants passent 70 % de la journée chez eux et 20% à l'école² soit 22,4h à l'intérieur ($\pm 3,2h$) dont 7,6h à l'école ($\pm 1,6h$). L'exposition personnelle des enfants aux PM_{10} ($63 \mu g/m^3$) est plus élevée que les concentrations mesurées à l'extérieur ($25 \mu g/m^3$) et dans les salles de classes (21 et $37,5 \mu g/m^3$ pour des prélèvements sur 24 et 8 heures). La corrélation observée entre les concentrations personnelles et celles de l'air ambiant et de l'air intérieur des écoles est faible ; il se peut que les enfants soient exposés à des concentrations variables sur de courtes périodes en dehors de l'école et de la maison notamment dans les transports [25].

Aux États-Unis, une équipe de l'université de Tulsa (Oklahoma) a comparé les niveaux de particules dans l'air de **salles de classes avec et sans moquette**. Les seize écoles étudiées ont chacune une salle avec de la moquette et une salle avec du sol lisse. Les $PM_{2,5}$ et les particules de diamètre supérieur à $0,5 \mu m$ ont été mesurées à l'intérieur et à l'extérieur des salles. L'âge moyen de la moquette des salles étudiées est de 8 ans. L'aspirateur est passé tous les soirs après la fin des cours quel que soit le type de revêtement. Pour une même école, la concentration en particules dans l'air est plus élevée dans la salle de classe avec moquette ($PM_{2,5} = 18 \mu g/m^3$) que dans la salle avec un sol lisse. De plus, la moquette retient plus la poussière qu'un sol lisse ($PM_{2,5} = 11 \mu g/m^3$). Une analyse comparative des résultats suggère que la présence de moquette pourrait augmenter le risque d'exposition des enfants aux particules. La concentration en particules dans l'air intérieur n'est pas fortement affectée par la concentration extérieure ($PM_{2,5} = 11 \mu g/m^3$) mais dépend de l'activité des occupants [26].

Les différentes études montrent une grande variation des concentrations en particules dans l'air, ceci s'explique notamment par des situations de mesurages différentes : nombres de personnes, type d'activités, systèmes de ventilation, localisation du bâtiment [24].

Études multipolluants (Annexe 3)

Les teneurs en particules fines ($PM_{2,5}$) à l'intérieur des classes de l'**étude ISAAC II** sont très proches des niveaux mesurés à l'extérieur [17, 18]. Les niveaux moyens à l'intérieur sont de l'ordre de 10 à $22 \mu g/m^3$. A Marseille, Reims, Créteil et Clermont-Ferrand les ratios sont supérieurs à un. A Bordeaux, les niveaux d'exposition aux $PM_{2,5}$ dans les classes sont plus élevés que dans les autres villes ($22,08 \mu g/m^3$ contre $15,93 \mu g/m^3$ en moyenne).

Dans le cadre de l'étude menée par le **LEPTAB**, quinze fractions granulométriques comprises entre $0,3$ et $15 \mu m$ ont été mesurées. De manière générale, les teneurs en particules dans l'air sont plus élevées à l'intérieur qu'à l'extérieur et le nombre de particules dans l'air décroît avec l'augmentation de la taille des particules : les particules sub-microniques représentent plus de 95% des particules de l'air. Les concentrations intérieures les plus élevées sont mesurées durant l'occupation des pièces ce qui confirme l'influence majeure des phénomènes de remise en suspension lors

² Et, en moyenne, 5% dans un autre environnement intérieur, 4% dehors, 1% dans les transports

d'activités. Les teneurs intérieures dépendent principalement des transferts de pollution depuis l'extérieur pour les faibles fractions granulométriques. Les plus grosses fractions granulométriques se déposent rapidement et la remise en suspension lors d'activités devient alors le principal déterminant des teneurs intérieures [21, 22].

Les mesures réalisées dans l'**école maternelle de Marseille** montrent que les ratios $C_{\text{int}}/C_{\text{ext}}$ sont toujours supérieurs à 1,5. Les teneurs intérieures relevées la nuit sont 1,5 à 2 fois inférieures à celles relevées en journée. Cela pourrait s'expliquer par l'introduction de poussières déposées sur les vêtements et les chaussures des enfants. Cette origine essentiellement extérieure expliquerait, en raison des fortes concentrations particulières extérieures, les valeurs élevées observées dans cette école maternelle [14].

Dans le cadre de l'**étude du LHVP**, les teneurs en fumées noires et en particules totales ont été mesurées. Les concentrations moyennes horaires en fumées noires sont du même ordre de grandeur à l'intérieur (24 à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et à l'extérieur (19 à 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) des bâtiments. Les teneurs moyennes en particules totales sont plus faibles à l'intérieur (53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) qu'à l'extérieur (60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). La composition métallique des particules présente quelques différences significatives entre l'air intérieur et l'air extérieur : on constate un enrichissement en Ca et une diminution de la fraction massique en Na à l'intérieur des salles [14].

1.1.6 Amiante

Sources et effets sanitaires

L'amiante est un matériau résistant, isolant, ignifuge et durable. À cause de ses propriétés, elle a été abondamment utilisée dans les matériaux de construction tels que les panneaux d'isolation, l'amiante-ciment et les carreaux de plafond et de sol. Les concentrations en amiante dans l'air intérieur sont à peu près les mêmes que dans l'air extérieur. Elles peuvent être beaucoup plus élevées si l'on bouge ou endommage des matériaux en amiante.

L'amiante ne constitue un risque pour la santé que si les fibres se retrouvent dans l'air respiré. Inspirées en grande quantité et de façon répétée, les fibres d'amiante peuvent causer une amiantose*, un mésothéliome* ou un cancer du poumon. L'amiante est classée cancérigène certain (classe 1) par le Centre International de Recherche sur la Cancer (CIRC).

Etude spécifique à l'amiante dans les écoles

Une seule étude concernant les **fibres d'amiante dans l'air des écoles** a été recensée. Cinquante-neuf écoles italiennes ont été étudiées entre 1992 et 2002. La présence d'amiante a été détectée dans différents matériaux : revêtements du sol, produits en amiante-ciment (toitures, murs, conduits d'air). La concentration en fibres d'amiante a ensuite été mesurée durant les activités normales de la classe. La plupart des résultats ne mettent pas en évidence une présence significative d'amiante même si des

teneurs plus élevées sont trouvées dans quelques écoles qui n'avaient pas de programme de surveillance durant les années précédentes [27].

1.1.7 Fibres minérales artificielles

Sources et effets sanitaires

On appelle fibres minérales artificielles, les fibres contenues dans les laines isolantes (laine de verre, de roche,...) ainsi que les fibres céramiques réfractaires. Cependant, l'usage de ces dernières reste limité au domaine industriel pour la protection contre les hautes températures. Seules les laines de verre sont donc susceptibles de se trouver dans les bâtiments scolaires et de dégager des fibres lors de leur manipulation (mise en place ou enlèvement). Peu de données sur la concentration en fibres minérales artificielles dans l'air intérieur sont disponibles. Les études menées sur l'air extérieur rapportent des concentrations variant de 2 fibres/m³ en milieu rural à 1,7.10³ fibres/m³ en zone urbaine [11].

Les fibres minérales artificielles de diamètre supérieur à 3 µm peuvent causer des irritations ou des inflammations passagères de la peau, des yeux et des voies aériennes supérieures. La pénétration des fibres dans les poumons dépend fortement du diamètre nominal des fibres. Le potentiel de pénétration le plus élevé est celui des fibres céramiques réfractaires et des microfibrilles de verre utilisées principalement dans le domaine industriel [11].

Les fibres de laines isolantes (laines minérales, laines de roche, laines de verre) sont considérées par le CIRC comme cancérigènes possibles chez l'homme (groupe 2B). La diminution de la biopersistance des nouvelles fibres mises sur le marché leur permet de ne plus être classées comme cancérigènes.

Etude multipolluant (Annexe 3)

Seule l'**étude pilote de l'OQAI** a mesuré la teneur en fibres minérales artificielles dans les salles de classes investiguées pour l'étude pilote. Les valeurs mesurées sont de l'ordre de 10⁻⁴ fibres par litre sans différence entre l'extérieur et l'intérieur pour les 9 écoles. En présence de faux plafond, la teneur en fibres de surface atteint 21,02 unité/cm² contre 1,42 unité/cm² [6-8].

1.2 Polluants organiques

1.2.1 Composés organiques volatils

Sources et effets sanitaires

Les Composés Organiques Volatils (COV) correspondent à plusieurs familles chimiques : alcanes, alcènes, aldéhydes, cétones, esters, alcools, terpènes,... Ces composés sont ubiquitaires. En 1989, plus de 900 COV différents étaient identifiés et classés par l'Organisation Mondiale de la Santé en fonction de leur point d'ébullition :

Catégorie	Description	Abréviation	Point d'ébullition
1	Composés organiques très volatils (gazeux)	VVOC	< 0 à 50-100°C
2	Composés organiques volatils	VOC	50-100 à 240-260°C
3	Composés organiques semi-volatils	SVOC	240-260 à 380-400°C
4	Composés organiques associés aux particules	POM	> 380 °C

VVOC : Very-Volatile Organic Compound

VOC : Volatile Organic Compound

SVOC : Semi-Volatile Organic Compound

POM : Particulate Organic Matter

Tableau 1 : Dénomination des Composés Organiques Volatils en fonction de leur point d'ébullition

50 à 100 COV peuvent être présents dans l'air intérieur à des concentrations de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à plusieurs dizaines de mg/m^3 [14].

L'apport de l'air extérieur est plus ou moins important selon la localisation du bâtiment (proximité de stations-service, voies de circulation, parkings,...). La source des COV est surtout endogène, liée aux activités des occupants (tabagisme, entretien,...), aux matériaux de construction et aux équipements (meubles, imprimantes, photocopieurs,...).

Les COV sont en grande partie émis par :

- les meubles en bois aggloméré : les émissions provenant des colles, résines ou adhésifs utilisés pour l'assemblage, sont élevées durant les mois suivant la fabrication. Elles diminuent rapidement par la suite.
- les revêtements (sols, moquettes,...) : les émissions de COV par les produits adhésifs, notamment à base d'urée-formaldéhyde et de polyuréthane, sont importantes lors de la pose et durant les jours suivants. Ensuite, les quantités émises sont plus faibles mais durent au minimum deux semaines.
- les produits d'ameublement (traitement du bois aggloméré, apprêts de tissu, ...) d'entretien ou de nettoyage (désodorisants, solvants, cires,...)
- les peintures fraîches, vernis, enduits.
- le matériel de bureau : ordinateurs, imprimantes, photocopieurs, fax.
- Les produits cosmétiques : désodorisants, laques,...

Certaines surfaces peuvent absorber les COV émis par d'autres sources. Ces éléments deviennent alors des sources secondaires qui affectent la qualité de l'air intérieur sous certaines conditions. Des températures élevées favorisent l'émission et la formation de COV.

La multiplicité des sources et la variabilité des émissions dans le temps et l'espace rendent l'estimation de la pollution par les COV difficile.

Les COV provoquent des effets aigus et chroniques tels qu'irritation des yeux, des voies respiratoires et de la peau, maux de tête, fatigue, étourdissement, troubles de la vision, nausées... typiques du Syndrome des Bâtiments Malsains* (SBM). Chaque

personne réagit différemment aux COV. A de fortes concentrations (milieu professionnel), certains de ces composés peuvent potentiellement avoir un effet narcotique, causer une dépression du système nerveux central ou des dommages au niveau des reins et du foie.

Certains COV sont classés comme cancérigène certain (benzène), probable (trichloroéthylène, tétrachloroéthylène) ou possible (styrène) par le CIRC.

1.2.1.1 COV

Études spécifiques aux COV dans les écoles

Seules quelques études américaines et chinoises (Hong Kong) mesurent uniquement les niveaux de concentrations en COV à l'intérieur des salles de classes.

Une étude conduite en 2000 dans deux écoles du centre de Minneapolis a permis de comparer l'**exposition aux COV** dans les **salles de classe** et dans les **logements**. Quinze COV ont été mesurés en hiver et au printemps après les cours (benzène, toluène, éthylbenzène, m,p-xylènes, o-xylènes, styrène, d-limonène, a-pinène, β-pinène, tétrachlorure de carbone, chloroforme, trichloroéthylène, tétrachloroéthylène, p-dichlorobenzène, chlorure de méthylène). Les résultats ne mettent pas en évidence de différence notable entre les salles de classe et les logements. Les moyennes géométriques des concentrations de chaque COV sont quasi identiques en hiver et au printemps. Elles sont du même ordre de grandeur, voire supérieures dans les habitats pour le limonène (4,6 vs. 28,6 µg/m³ en hiver), les pinènes (0,2 vs. 2,4 µg/m³) et le toluène (2,9 vs. 8,2 µg/m³) [28].

Le même type d'étude a été mené à Hong Kong dans une salle de classe avec air conditionné. Sept COV ont été mesurés (1,1-dichloroéthylène, trichloroéthylène, tétrachloroéthylène, chlorure de méthylène, chloroforme, benzène, styrène). Il ressort de ces travaux que les concentrations dans la salle de classe sont similaires à celles des logements, voire légèrement inférieures, notamment pour le chlorure de méthylène (1,3 µg/m³ dans le salon contre 0,11 µg/m³ dans la classe). Parmi les COV mesurés, seul le trichloroéthylène a une concentration supérieure dans la salle de classe (1,28 µg/m³ vs. 0,23) [29].

Une étude a comparé les niveaux de pollution par les **COV** et les **aldéhydes** dans 7 classes dites traditionnelles et dans 13 classes construites en éléments préfabriqués dans l'État de Los Angeles. Les mesures ont été réalisées en été et en hiver. Comparées aux valeurs issues de la campagne pilote de l'OQAI, les concentrations mesurées sont du même ordre de grandeur. Les COV les plus présents sont le toluène, les m,p-xylènes, l'a-pinène et le d-limonène. Les auteurs expliquent les concentrations en formaldéhyde par la présence de mobilier scolaire en bois aggloméré et celles des terpènes par l'usage de produits de nettoyage [30].

En Californie, un tiers des écoliers fréquente des **écoles préfabriquées**. En 2001, une étude s'est plus particulièrement penchée sur la qualité de l'air dans quatre écoles de ce type et sur la comparaison de **matériaux d'intérieur standards et alternatifs**. Quinze COV et aldéhydes ont été mesurés. Les différences entre l'intérieur et l'extérieur sont faibles lorsque le système de ventilation fonctionne, seule la concentration en

formaldéhyde dépasse 5 ppb (soit 6,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Les émissions de 17 matériaux (revêtement de sol, pans de murs, isolants phoniques,...) ont été suivies grâce à de chambres de mesures. Les concentrations en COV prédites en fonction des facteurs d'émission ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$), des quantités de matériel et du taux de ventilation, ont été comparées aux mesures réalisées dans les pièces occupées : les valeurs varient d'un facteur 2. Les matériaux dits alternatifs émettent suffisamment peu de COV pour que, associés à une ventilation efficace, ils permettent une bonne QAI. Toutefois, le choix des matériaux reste important du fait de taux de ventilation généralement réduits [31].

L'Institut Fédéral allemand pour la recherche et le contrôle des matériaux a étudié les émissions de **COV de différents types de revêtements du sol** rencontrés dans les écoles. Les mesures ont été réalisées en chambres et cellules tests pendant au moins 28 jours. Les composants du sol (couche primaire, chape, adhésif, couverture) sont testés seuls puis comparés aux émissions de trois structures complètes dont seule la couverture change (PVC ou moquette ou linoléum). L'étude présente les taux d'émission des matériaux à différentes dates pour les principaux composants émis. Pris séparément, ce sont les émissions des adhésifs qui diminuent le plus vite et celles du PVC le plus lentement. L'adsorption dans la chape en béton modifie les émissions des structures complètes. Les structures avec du linoléum ou du PVC ont les mêmes émissions et les mêmes taux que le revêtement seul. Les émissions de la structure avec moquette proviennent principalement des couches inférieures. Pour deux des adhésifs testés, des émissions secondaires apparaissent après les 28 jours [32].

Etudes multipolluants (Annexe 3)

Dans les neuf écoles maternelles et primaires investiguées pour l'**étude pilote de l'OQAI** [6-8], la teneur moyenne en COV totaux est de 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (25 à 315 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Le toluène est le plus abondant (8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) devant le décane (8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), l'alpha-pinène (7,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), le limonène (7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), le undécane (6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et le 2-butoxyéthanol (4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Les teneurs des autres COV sont inférieures à 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le benzène n'a jamais été mesuré à plus de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et son ratio $C_{\text{int}}/C_{\text{ext}}$ est égal à 1. Pour 19 autres COV, les ratios sont significativement supérieurs à 1. La plupart des COV sont liés à des indicateurs témoins d'un renouvellement d'air insuffisant : teneurs en CO_2 élevées, double vitrage, salle de petit volume ou sans accès direct sur l'extérieur, absence d'amenée d'air, ouverture insuffisante des fenêtres. Les teneurs en COV peuvent être également influencées par d'autres facteurs : revêtement en peinture (éthers de glycol : 4 vs 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, terpènes : 13 vs 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), présence d'une autoroute à moins de 500 mètres (hydrocarbures aliphatiques : 42 vs 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, autres COV : 9 vs 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), présence d'une gare routière à moins de 500m (hydrocarbures aliphatiques : 74 vs 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Il ressort de l'**étude du LHVP** que les alcanes, les hydrocarbures aromatiques et chlorés et les aldéhydes représentent plus de 90 % des COV totaux identifiés à l'intérieur des salles. Le formaldéhyde est le composé majeur des aldéhydes (50 à 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) quelle que soit la durée de prélèvement. Dans les bâtiments, les niveaux de contamination en alcanes et en hydrocarbures aromatiques dépendent fortement des concentrations extérieures. Les concentrations moyennes en COV sont plus faibles à l'intérieur qu'à l'extérieur, contrairement aux hydrocarbures chlorés. Les plus fortes valeurs de

formaldéhyde ont été mesurées dans une école où des panneaux en agglomérés venaient d'être mis en place ($140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne). Grâce à des durées de prélèvements plus ou moins longues, cette étude montre l'existence de sources de polluants permanentes (formaldéhyde) ou épisodiques (hydrocarbures chlorés, esters, ...) liés à la manipulation de certains produits dans les écoles [14].

L'étude de la qualité de l'air dans les locaux d'enseignement conduite par le **CSTB** mis en évidence que la charge globale en COV en nettement supérieure à l'intérieur (200 à $620 \mu\text{g}/\text{m}^3$) qu'à l'extérieur (25 à $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$). C'est le cas notamment pour le décane, le undécane, le 2-éthylhexanol, l'hexanol et le nonanal dont les concentrations intérieures sont plus fortes sans pour autant qu'il y ait de différence entre période d'occupation et d'inoccupation. Plusieurs facteurs peuvent être avancés pour expliquer cette différence : la présence humaine, l'émission par les matériaux de construction et le mobilier, les activités scolaires et de nettoyage. Les opérations d'entretien peuvent être ponctuellement à l'origine de pics de pollution par les COV en dehors des heures de cours. Cependant, les teneurs fortes en fin de journée après le ménage redescendent à des niveaux nettement plus bas le lendemain matin. Les activités scolaires sont également à l'origine de concentrations importantes de certains COV durant la journée. Ainsi, les teneurs de certains COV sont faibles le matin et augmentent significativement à partir de 10 heures. Des émissions de 2-méthoxyéthanol (25 à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et de 1-butoxy-2-propanol ($470 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ont été observées durant les activités de dessin. Ces émissions ont été mises en évidence de façon ponctuelle et sont certainement extrêmement dépendantes de la nature des peintures, feutres et colles utilisés [9, 10].

Une des écoles suivies lors de l'**étude d'Atmosphère Bourgogne** présente des teneurs intérieures en COV totales très élevées ($1640 \mu\text{g}/\text{m}^3$ contre 82 et $155,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les deux autres écoles). Dans cette école, on retrouve du n-décane, n-nonadécane, n-nonane (et leurs isomères), du 1,2,4-triméthylbenzène, de l'heptane et ses isomères. Ces résultats semblent indiquer que le cirage des sols ou autres meubles peut être à l'origine de niveaux en COV élevés. En plus de ces substances, on relève la présence dans les salles de trichloroéthylène, de n-heptane et de 1,4-dichloroéthylène, probablement liée à l'utilisation de certains produits d'entretien courant. Le trichloroéthylène est également utilisé pour retirer les chewing-gums [18-20].

1.2.1.2 Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes (BTEX)

Le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et les xylènes, regroupés sous le sigle BTEX, sont les COV les plus abondants et les plus fréquents dans l'air intérieur des écoles. Ces hydrocarbures aromatiques ont donc fait l'objet de nombreuses études dans les écoles.

Etudes spécifiques des BTEX dans les écoles

A Hong Kong, une étude menée dans six écoles et d'autres lieux (logements, centres commerciaux, restaurants, bureaux) a permis de caractériser les sources de BTEX. Dans les écoles, les COV les plus abondants et les plus fréquemment trouvés sont les **BTEX** dont l'origine principale est le milieu extérieur. En effet, les ratios $C_{\text{int}}/C_{\text{ext}}$ sont

inférieurs à 1 mais les coefficients de corrélation entre les concentrations de l'air extérieur et celles de l'air intérieur étant très élevés (0,962 à 0,997), la qualité de l'air intérieur est donc déterminée par la qualité de l'air extérieur. Les concentrations dans l'air intérieur en benzène ($3,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en toluène ($17,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en éthylbenzène ($4,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en m,p-xylène ($3,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et en o-xylène ($1,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont plus faibles dans les écoles que dans les autres lieux investigués (respectivement 4,99 ; 59,13 ; 2,72 ; 5,27 et $3,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les logements). Cependant, durant la période de prélèvements, les fenêtres et les portes sont restées fermées, la contribution de l'air extérieur est donc fortement diminuée. L'analyse en composante principale des résultats montre que 78% de la variance des concentrations intérieures est expliquée par la situation de l'école (zone rurale ou urbaine, proximité d'une route), l'étage de la salle et le nombre d'occupant. Contrairement aux autres BTEX, la teneur en o-xylène est fortement déterminée pour le seul facteur « localisation de l'école ». Pour les concentrations extérieures, la localisation de l'école explique 88% de la variance [33].

Etudes multipolluants (Annexe 3)

Dans la plupart des écoles investiguées dans le cadre de l'étude de la qualité de l'air dans les locaux d'enseignement du **CSTB**, on retrouve du benzène, du toluène, des xylènes, de l'éthylbenzène en quantités équivalentes à celles de l'extérieur [9, 10].

L'une des trois écoles de l'étude d'**Atmosf'air Bourgogne** [18-20] présente des teneurs en toluène, éthylbenzène, m,p-xylène et o-xylène (respectivement 11,1 ; 9,3 ; 36,8 et $20,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) beaucoup plus élevées par rapport aux deux autres écoles (2,9 ; 9,2 ; 2,6 ; 7,5 et $3,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

1.2.2 Aldéhydes

1.2.2.1 Formaldéhyde

Sources et effets sanitaires

Le formaldéhyde est un gaz incolore à odeur forte. Il est utilisé dans la fabrication de résine, de panneaux de particules, de mousse polyuréthane, dans l'industrie du textile, des colorants, du papier (magazines et livres), des cosmétiques pour ses propriétés désinfectante, germicide, insecticide et fongicide. Ainsi les matériaux neufs en bois aggloméré contiennent de faibles quantités de formaldéhyde émises tout au long de la vie du matériau. Les peintures fraîches émettent également du formaldéhyde. Les émanations lentes de gaz s'échappant de ces matériaux peuvent donner lieu à des concentrations intérieures en formaldéhyde non négligeables, notamment dans les pièces neuves ou rénovées, dont l'ordre de grandeur peut être beaucoup plus grand que celui des concentrations extérieures [11]. Le formaldéhyde est également dégagé par les revêtements du sol, la fumée de tabac, les photocopieurs,...

La voie majeure d'exposition au formaldéhyde est l'inhalation. Les symptômes prédominants sont des irritations des yeux, du nez, de la gorge (concentration supérieure à $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ pour des sujets sains). Au-dessus de $1,2 \text{ mg}/\text{m}^3$, les symptômes s'aggravent : sensations d'inconfort, larmoiements, éternuements, maux de tête, nausées,

dyspnées, œdèmes pulmonaires ($37-60 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Le décès survient pour des concentrations de $60-125 \text{ mg}/\text{m}^3$ [11].

Le formaldéhyde est classé comme cancérigène certain (groupe 1) du nasopharynx et des fosses nasales par le CIRC depuis juin 2004 (groupe B1 de l'US-EPA). Afin de prévenir toute sensation d'irritation dans la population générale, l'Organisation Mondiale de la Santé recommande une valeur guide de la concentration en formaldéhyde dans l'air ambiant de $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ pour une exposition de 30 minutes [11].

Etudes spécifiques au formaldéhyde dans les écoles

L'**Association pour la Surveillance et l'Étude de la Pollution Atmosphérique en Alsace** (ASPA) a conduit une étude en 2004 et 2005 dans les écoles maternelles et primaires strasbourgeoises. Les concentrations moyennes en formaldéhyde varient de 9 à $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (maximum à $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dans les écoles maternelles et entre 9 et $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les écoles primaires. Dans certains établissements, les concentrations présentent des **disparités importantes** d'une salle à l'autre (écart de $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ces teneurs sont pour la plupart plus élevées que celles relevées dans les logements ($24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne dans le cadre de l'étude pilote de l'OQAI). Des relations positives ont été mises en évidence entre les teneurs élevées en formaldéhyde et la présence de mobilier âgé de plus de 10 ans, de boiserie sur les plafonds et les murs, de revêtements de sol en lino-plastique. Toutefois, les coefficients de corrélation sont faibles et la petite taille de l'échantillon peut constituer un biais important. L'étude insiste sur le fait qu'au vu de ces résultats, une vigilance permanente doit s'imposer depuis le choix des matériaux de construction (ou de rénovation) et du mobilier, jusqu'à la mise en place de systèmes de ventilation efficaces afin de réduire les teneurs en formaldéhyde [34].

Etudes multipolluants (Annexe 3)

Dans les écoles de toutes les villes de l'étude **ISAAC II** les concentrations intérieures en formaldéhyde ($24 \pm 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sont très supérieures aux concentrations extérieures ($3 \pm 1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Dans certaines classes, on relève même des concentrations maximales supérieures à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les teneurs maximales en formaldéhyde sont mesurées dans les classes de Strasbourg ($32,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [17, 18].

Le formaldéhyde est l'aldéhyde le plus abondant ($38,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne) dans les écoles de l'**étude pilote de l'OQAI**. Les ratios $C_{\text{int}}/C_{\text{ext}}$ sont significativement supérieurs à 1. Les concentrations sont liées à des facteurs de confinement. Elles sont plus élevées dans les salles de petit volume ($88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs 70), en l'absence d'accès direct sur l'extérieur ($83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs 51) ou si le temps d'ouverture des fenêtres est inférieur à 4 heures par jour ($97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs 67) [6-8].

L'étude de l'**école maternelle marseillaise** montre que le ratio $C_{\text{int}}/C_{\text{ext}}$ est toujours supérieur à 1 ce qui montre l'existence de sources intérieures. Ce ratio est plus élevé le matin avant l'ouverture de la classe que l'après-midi ; ceci pourrait être expliqué par un relarguage de formaldéhyde par divers matériaux et par la concentration du composé durant la nuit favorisée par une ventilation quasi-nulle. Les mesures réalisées à diverses hauteurs dans une crèche montrent que le formaldéhyde (ainsi que le butanal et

l'hexanal) est plus concentré la hauteur des enfants que sous le plafond. Les teneurs les plus fortes ont été mesurées en hiver (hygrométrie maximale), l'humidité relative pourrait avoir une influence sur les émissions de formaldéhyde [14].

1.2.2.2 Autres aldéhydes

Les sources intérieures en aldéhydes, autres que le formaldéhyde, sont multiples. On y retrouve notamment les panneaux en bois brut ou de particules, la fumée de tabac, les peintures et solvants, les désodorisants, les photocopieurs et les magazines ou livres neufs.

Etudes spécifiques dans les écoles

L'étude de l'ASPA a également porté sur d'autres aldéhydes. L'**acétaldéhyde** et le **butyraldéhyde** sont présents dans les écoles à des teneurs moyennes de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations en **propionaldéhyde** sont de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, celles du **valéraldéhyde** de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations sont proches de la limite de détection ($0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pour l'**isovaléraldéhyde** et le **benzaldéhyde**. En ce qui concerne l'acétaldéhyde, une relation positive apparaît entre les teneurs et la présence d'un mobilier neuf et d'éléments en bois massif ou aggloméré, la réalisation récente de travaux de rénovation voire la présence de sol en lino-plastique [34].

Etudes multipolluants (Annexe 3)

Comme pour le formaldéhyde, les teneurs intérieures en acétaldéhyde ($8 \pm 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dans les écoles de l'étude **ISAAC II** sont plus élevées que les teneurs extérieures. Les classes de Strasbourg enregistrent les teneurs moyennes les plus élevées en acétaldéhyde ($12,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [17, 18].

Les aldéhydes sont retrouvés dans toutes les salles de l'**étude pilote de l'OQAI** [6-8].

Dans l'école maternelle suivie à **Marseille**, la concentration en aldéhyde est moyenne ($55,5$ et $71,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) voire basse ($31,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Avec le formaldéhyde, l'acétaldéhyde est le composé majoritaire. Les teneurs en acétaldéhyde dans l'école maternelle de Marseille sont 2 à 3 fois supérieures à l'intérieur qu'à l'extérieur en hiver. En revanche, en été, lorsque la ventilation est plus importante, les teneurs sont équivalentes [14].

1.2.3 Composés organiques semi-volatils

1.2.3.1 Phtalates

Sources et effets sanitaires

Le di(2-éthylhexyl)phtalate (DEHP) est le plastifiant principal des produits en PVC. Il est suspecté d'être un perturbateur endocrinien et d'avoir des effets possibles sur la reproduction et le développement [35]. Il est important de noter que les enfants sont plus sensibles à ces effets endocriniens. Le DEHP est dégradé par l'organisme en plusieurs

métabolites, dont le mono(2-éthylhexyl)phtalate (MEHP), le mono(2-éthyl-5-hydroxyhexyl)phtalate (5OH-MEHP) et le mono(2-éthyl-5-oxo-hexyl)phtalate (5oxo-MEHP). A l'heure actuelle, aucune donnée sur l'activité biologique et la toxicité de ces métabolites n'est disponible [35].

Etudes spécifiques aux phtalates dans les écoles

Une étude menée dans une école maternelle du sud de l'Allemagne compare l'**exposition des enfants** (2 à 6 ans) à celle de leurs parents et enseignants en mesurant la **teneur en métabolites** (MEHP, 5OH-MEHP et 5oxo-MEHP) dans les urines. Les valeurs ajustées en fonction du taux de créatinine reflètent mieux la dose interne en tenant compte du poids des personnes. La somme des trois métabolites est alors respectivement de 98,8 µg/L chez les enfants et de 50,9 µg/L chez les adultes. Les concentrations en 5OH-MEHP (55,8 vs. 28,1 µg/L) et en 5oxo-MEHP (38,3 vs. 17,2 µg/L) sont significativement plus élevées chez les adultes. La concentration en MEHP est plus faible : 8,7 µg/L chez les enfants et 8,6 µg/L chez les adultes. Le taux de 5OH-MEHP et 5oxo-MEHP dans les urines est de l'ordre de 12 fois le taux de MEHP chez les enfants et 5,5 fois chez les adultes. Ce ratio, plus faible chez les adultes, indique que la voie oxydative dans le métabolisme du DEHP est favorisée chez les enfants. La dose interne en DEHP (somme des métabolites) est deux fois plus grande chez les enfants que chez les adultes mais ne varie pas en fonction du comportement des enfants (mise à la bouche ou non d'objets en plastique). Afin de réduire l'exposition au DEHP, d'autres recherches devront déterminer plus précisément les sources d'exposition au DEHP [35].

1.2.3.2 Polychlorobiphényles

Sources et effets sanitaires

Les Polychlorobiphényles (PCB) sont des composés organiques persistants, utilisés notamment pour le calfeutrage, le colmatage et l'étanchéité des bâtiments. Les niveaux de PCB dans l'air intérieur sont plus importants qu'à l'extérieur et ils peuvent varier de 3 ng/m³ dans un bâtiment non contaminé à 300 ng/m³ dans un bâtiment contaminé. En général, la contribution de l'inhalation correspond à 1% de la dose journalière mais dans des situations extrêmes (pièce contaminée sans aération), cette contribution peut être beaucoup plus forte [11].

Les PCB sont considérés comme cancérogènes probables chez l'homme (groupe 2A) par le CIRC [11] à cause de leurs effets toxiques sur le système immunitaire, reproductif, nerveux et endocrinien. L'Union Européenne a interdit leur production et leur commerce en 1985.

Du fait de l'importance potentielle de la contribution indirecte de l'air à l'exposition aux PCB, il est important de contrôler les sources de PCB connues et d'identifier les nouvelles sources [11].

Etudes spécifiques aux PCB dans les écoles

Une étude menée dans la région de Boston révèle qu'un tiers des bâtiments investigués (8/24) contient du calfeutrage dont la concentration en **PCB** dépasse 50 ppm

par unité de poids (limite au-delà de laquelle les matériaux doivent faire l'objet d'une décontamination selon l'US-EPA). Les prélèvements réalisés dans l'unique école élémentaire investiguée montre une concentration en PCB de 7740 ppm. Sur l'ensemble des bâtiments, les ratios C_{int}/C_{ext} varient de 1,8 à 180 suggérant la présence de **sources intérieures**. Le potentiel de l'exposition par inhalation, ingestion de poussières contaminées, inhalation de vapeur au contact cutané avec des PCB n'est pas totalement caractérisé mais l'impact est sans doute modeste comparé à l'exposition *via* des aliments contaminés [36].

En Allemagne, l'**exposition externe et interne à six congénères de PCB** (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180) d'**enfants** fréquentant une **école contaminée** par des PCB a été comparée à un groupe d'enfants témoins. La teneur totale en PCB dans l'école contaminée est en moyenne de 2 044 ng/m³ (690 à 20 800 ng/m³). Les PCB faiblement chlorés (PCB 28, 52, 101) sont majoritaires (respectivement 33, 293 et 66 ng/m³). Au moins un de ces trois PCB est détecté dans 95 % des prélèvements sanguins des enfants. La concentration en PCB total dans le sang est de 22 ng/L pour les élèves de l'école contaminée alors qu'elle est inférieure à 1 ng/L chez les enfants « témoins ». En revanche, en ce qui concerne la concentration dans le sang des PCB plus fortement chlorés (PCB 138, 153, 180), il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes d'enfants mais son ordre de grandeur est deux fois plus élevé que celui de la concentration en PCB faiblement chlorés (1070 ng/L de sang chez les enfants de l'école contaminée et 1010 ng/L chez les enfants témoins). Cette étude montre que l'exposition des enfants aux PCB dans l'air intérieur d'une école contaminée entraîne une augmentation de la concentration dans le sang des congénères faiblement chlorés. Cette teneur dans le sang est également liée au nombre d'années passées dans l'école contaminée. Toutefois, comparés aux expositions de fond dues à l'alimentation, les niveaux causés par l'inhalation sont très faibles et non associés à des plaintes spécifiques [37].

Une étude similaire menée en Allemagne sur **18 professeurs** d'une école contaminée confirme ces résultats. Les PCB faiblement chlorés sont majoritaires dans l'air et la concentration sanguine est plus élevée parmi les professeurs exposés. Les teneurs dans le sang en PCB fortement chlorés (PCB 101, 138, 153 et 180) sont similaires chez les deux groupes de personnes. Cette étude montre, elle aussi, que l'exposition aux PCB peu chlorés dans l'air entraîne une augmentation des taux de ces mêmes PCB dans le sang [38].

1.2.4 Ethers de glycol

Sources et effets sanitaires

Ce groupe chimique est divisé en deux familles : les dérivés de l'éthylène glycol (série E) et les dérivés du propylène glycol (série P) qui regroupent une quarantaine d'espèces chimiques. On peut les retrouver dans les laques, les peintures et les vernis, dans les produits de nettoyage (dégraissants, produits pour les vitres), les herbicides et les fongicides, les feutres et les marqueurs ainsi que dans certains savons liquides et cosmétiques [20]. Ces composés sont irritants. Selon l'Union Européenne, ils sont

toxiques pour la reproduction, de façon probable (catégorie 2) pour les composés de la série E et de façon possible (catégorie 3) pour ceux de la série P.

Etudes multipolluants (Annexe 3)

Il n'a pas été trouvé d'étude spécifique portant sur la recherche des éthers de glycol dans les écoles.

L'étude pilote de l'**OQAI** a mis en évidence des éthers de glycol dans 50 à 100% des classes. Les concentrations du 1-méthoxy-2-propanol varient de 1 à 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, celles du 2-butoxyéthanol de 1 à 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et celles du 2-éthoxyéthanol de 2 à 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [6-8].

L'étude menée par le **CSTB** dans les locaux d'enseignement a montré que les opérations d'entretien peuvent être ponctuellement à l'origine de pics de pollution en dehors des heures de classe. On retrouve alors des éthers de glycol (2-méthoxy-1-propanol, 2-butoxyéthanol, 1-butoxy-2-propanol), largement utilisés dans la formulation des produits d'entretien, ainsi que des COV et du limonène [9, 10].

1.3 Biocontaminants

La microflore intérieure (allergènes, champignons, moisissures, bactéries et virus) est considérée comme responsable de problèmes de santé, particulièrement chez les enfants. L'école peut être un réservoir pour de nombreuses variétés d'agents biologiques. Les biocontaminants proviennent de l'homme, des animaux, des plantes, du système d'air conditionné, des matériaux de construction, des particules du sol, des poussières, de l'air extérieur... Les activités et les équipements sont les principaux facteurs de dispersion de la contamination microbiologique [39].

20% de la population française souffre d'allergies* respiratoires. De nombreux facteurs peuvent être à l'origine de ces manifestations³ :

- les facteurs environnementaux intérieurs : allergènes principalement respirés avec l'air dans les bâtiments (acariens, chats, chiens, blattes, moisissures, ...)
- les facteurs environnementaux extérieurs : allergènes principalement respirés avec l'air extérieur (pollens, moisissures)
- les facteurs de pollution atmosphérique : la pollution peut à la fois agir sur les pollens, en modifiant leur structure biochimique extérieure et par conséquent leur allergénicité, et sur les muqueuses respiratoires de l'homme en modifiant sa sensibilité immunologique.

³ Réseau National français de Surveillance Aérobiologique (RNSA) www.rnsa.asso.fr

Quelques études portent simultanément sur différents biocontaminants, elles sont présentées dans la partie 1.3.4.

1.3.1 Allergènes

L'exposition chronique aux allergènes a été associée au développement d'asthme*, de dermatite atopique, de rhinites allergiques chez les enfants [40].

Les allergènes les plus étudiés dans le milieu scolaire sont les allergènes de chats.

1.3.1.1 allergènes d'acariens

Les acariens se nourrissent essentiellement de moisissures, de squames humaines et animales, de débris kératinisés (poils, ongles, plumes) et de débris alimentaires. La présence de moisissures (*Aspergillus*, *Penicillium*,...) est indispensable à leur survie car elles prédisposent les squames humains et leur fournissent un apport vitaminique. Les conditions optimales de croissance des acariens sont une température de 25°C et un degré hygrométrique compris entre 75 et 80% [14].

Les moquettes constituent un milieu favorable au développement des acariens car l'aspirateur n'élimine pas tous les résidus nutritifs ni les acariens eux-mêmes. On les retrouve également dans la literie, les tapis, les fauteuils et les peluches. Les allergènes d'acariens sont principalement associés aux particules d'un diamètre supérieur à 10 µm (à 80 % environ). C'est pour cela, qu'en dehors de toute agitation, les allergènes d'acariens ne sont pas retrouvés dans les prélèvements d'air [14].

Leur pouvoir allergisant provient de protéines spécifiques, Der p 1 (*Dermatophagoïdes pteronyssinus*) et Der f 1 (*Dermatophagoïdes farinae*), que l'on retrouve dans les excréments et les débris de corps d'acariens morts.

De nombreuses études montrent une relation entre l'exposition aux acariens et l'acquisition d'une sensibilisation et le développement d'hyperréactivité* bronchique non spécifique chez les sujets génétiquement prédisposés [41]. La réaction allergique se traduit de différentes manières : asthme*, rhume des foins, rhinite allergique*, dermatite ou eczéma, Syndrome des Bâtiments Malsains* [42]. La population sensibilisée aux allergènes d'acariens représenterait 10 à 20% de la population française totale et plus de 50% des asthmatiques⁴.

Dans les écoles, les allergènes d'acariens sont étudiés en même temps que d'autres allergènes. Ces études sont présentées à la partie 1.3.4.

Il faut noter que des seuils ont pu être établis : une concentration supérieure à 2 µg de Der p 1 par gramme de poussière fine (soit environ 100 acariens/g) est considérée comme un facteur de risque pour la sensibilisation et le développement de l'asthme* [43].

⁴ www.abcallergie.com

Une concentration de 10 µg d'allergènes d'acariens par gramme de poussière augmente le risque de crise d'asthme grave chez les enfants allergiques aux acariens [23, 43].

1.3.1.2 allergènes d'animaux domestiques

Les principaux allergènes d'animaux domestiques proviennent des chiens mais surtout des chats. Les rongeurs (souris, rat, hamster, cobaye) produisent également des allergènes mais aucune étude les concernant n'a été menée dans les écoles. Les allergènes de chats sont la deuxième cause d'allergie* aux allergènes d'intérieurs après les acariens : 15 à 25 % de la population seraient sensibles aux allergènes de chats. Cette sensibilité se traduit principalement par de l'asthme*, de la conjonctivite ou de la rhinite*.

L'allergène majeur du **chat**, **Fel d I** (*Felis domesticus*), est produit par la peau, à la base des poils, au niveau des glandes sébacées et par la salive. Cette production semble être plus importante chez les males que chez les femelles et varie selon les chats et pour un même chat selon les moments. 30 à 40 % des allergènes seraient associés à des particules de diamètre inférieur à 5 µm ; ainsi cet allergène reste longtemps dans l'air après sa production. Les teneurs dans l'air augmentent lors d'activités, les grosses particules étant remises en suspension [14].

L'allergène majeur du **chien**, **Can f I** (*Canis familiaris*), est produit au niveau du pelage mais il est également retrouvé dans la salive et sur la peau. La quantité produite varie d'une espèce à l'autre. L'allergène est porté par des particules de diamètres différents dont 20 % ont moins de 5 µm [14].

Les canapés, moquettes, tapis et peluches constituent les réservoirs les plus importants pour les allergènes de chats et de chiens. Il n'y a pas de fluctuation saisonnière des taux intérieurs [14].

Le suivi médical de 1893 élèves en Allemagne (dosage du sérum IgE) a permis d'établir que le risque de présenter un **test positif aux allergènes de chats** (Fel d 1) pour un enfant sans contact avec des chats, est deux fois plus élevé lorsque la **proportion d'élèves de la classe en contact avec des chats** est grande (44% des élèves ayant un chat : OR = 2,08 ; IC_{95%} = 1,07-4,05). Une telle relation n'est pas observée chez les enfants ayant un contact régulier avec des chats. Cette étude suggère que les allergènes dans l'environnement scolaire contribuent à la **sensibilisation allergique** et aux maladies atopiques* (asthme*). Le niveau d'allergène Fel d 1 dans un lieu sans chat est bien sûr plus faible que celui mesuré dans une maison avec chat, mais le fait que de nombreuses personnes deviennent sensibles aux allergènes de chat alors qu'elles n'ont jamais vécu avec des chats montre que les niveaux environnementaux peuvent être suffisamment élevés pour sensibiliser ces personnes. D'autre part, la plupart des enfants sensibles aux allergènes de chats le sont aussi pour au moins un autre allergène (pollen, acariens, moisissures) [44].

Une étude menée en Suède corrobore ces résultats en montrant que les salles de classes investiguées contiennent significativement plus d'allergènes de chats dans l'air (14 pg/m³ de Fel d1) qu'une maison sans chat (1,2 pg/m³), alors que les niveaux dans les poussières sont similaires (respectivement 346 ng/g et 250 ng/g). Pour comparaison, les

concentrations sont égales à 250 000 ng de Fel d1/g de poussière et 3 333 pg/m³ d'air dans les maisons avec chats. Les allergènes de chats sont donc présents partout même dans les endroits sans chat. D'un jour à l'autre et au cours d'une même journée, la **variation des concentrations en allergènes de chat est forte dans l'air** (de 14 à 43%) et plus faible dans les poussières. Cette variation peut être expliquée par la remise en suspension des particules sédimentées lors d'activités ou par le passage près du capteur de personnes propriétaires de chats. En effet, les allergènes de chats et de chiens peuvent être transportés par les vêtements, même après lavage. Ainsi, dans les écoles, les allergènes d'animaux domestiques sont apportés par les vêtements des enfants (et du personnel) qui ont un chat ou un chien à la maison [45].

1.3.1.3 allergènes de blattes

Les blattes ou cafards colonisent les cuisines, les réserves alimentaires et les vide-ordures. Le jour, elles se cachent dans les placards, les fentes murales, sous les tapisseries ou dans les moquettes.

Les principaux allergènes proviennent de l'exosquelette, des déjections et de l'appareil digestif de la blatte germanique (Bla g 1 et 2 : *Blattella germanica*). En l'absence de perturbation, d'activité, ces allergènes ne sont pas retrouvés dans l'air car ils sont associés aux particules de diamètre supérieur à 10 µm.

En France, la prévalence de la sensibilisation est de 4,5 à 22 % en population générale [41]. Le pouvoir allergisant peut entraîner des manifestations asthmatiques sévères notamment chez les enfants.

Une étude a été menée dans quatre écoles primaires urbaines de Baltimore (États-Unis), alors infestées par des blattes et où des traitements étaient en cours (insecticide une fois par an et appâts renouvelés toutes les deux semaines). Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les concentrations en allergènes de blattes selon les étages. Le niveau d'allergènes est différent d'une école à l'autre et d'une pièce à l'autre au sein d'une même école. L'allergène Bla g 1 est retrouvé dans 70% des prélèvements dans les salles de classes (en moyenne 2,4 U/mg) et dans 100% des prélèvements réalisés dans les cuisines (591 U/mg, valeur maximale mesurée sur l'ensemble des écoles). Alors que la moquette est généralement considérée comme un réservoir important pour les allergènes d'intérieur, ici les niveaux de concentration dans les pièces avec et sans moquette sont comparables. La présence d'air conditionné pourrait être déterminante (baisse du niveau d'humidité), ainsi que le taux d'occupation des salles et la taille des écoles. Ces deux derniers paramètres n'ont toutefois pas été étudiés [46].

1.3.2 Champignons et moisissures

Sources et effets sanitaires

Le développement des moisissures et des champignons est lié à l'humidité. L'humidité résulte de dégâts des eaux ou d'infiltrations au niveau de la toiture ou des

menuiseries extérieures (sources ponctuelles), de remontées d'eau du sol par capillarité ou de condensation.

Les moisissures provoquent maux de tête, difficultés respiratoires, irritation de la peau, réactions allergiques, aggravation des symptômes de l'asthme* [39]. 5 à 10% de la population française et 10 à 13 % des enfants seraient sensibilisés aux allergènes de moisissures⁵.

Etudes des champignons et des moisissures dans les écoles

Les champignons et les moisissures sont les biocontaminants les plus étudiés dans le domaine de la qualité de l'air dans les écoles. Les études ont été conduites majoritairement en Finlande. Ces études se penchent fréquemment sur la possible relation avec la structure (bois ou brique/béton) du bâtiment investigué.

Afin d'estimer le niveau de risque, il faut déterminer la **concentration en champignons** et en divers groupes de **bactéries** dans l'air intérieur. Une étude a été menée à Varsovie dans une école maternelle, une école primaire (vestiaire, couloir, classe) et un laboratoire du secondaire (les résultats ne seront pas rapportés ici). Les concentrations (en ufc/m³) varient entre 340 et 7530 pour les bactéries mésophiles, 10 et 35 pour les bactéries hémolytiques, 25 et 190 pour les Staphylocoques, 0 et 8 pour les Coliformes et entre 30 et 785 pour les champignons. Les niveaux de contaminations les plus élevés sont détectés dans les couloirs et dans les salles durant les cours pour les bactéries (6500 vs 340 ufc/m³ pour les bactéries mésophiles et 8 vs 0 pour les Coliformes) et dans les couloirs et vestiaires pour les champignons. Les moisissures les plus fréquentes dans ces écoles sont du genre *Aspergillus* et *Penicillium* [39].

Les **concentrations aériennes en bactéries** et en **champignons** dans les salles de classes, les cuisines et les cantines ont été comparées dans six écoles endommagées par l'humidité et deux écoles témoins. La moyenne des concentrations en champignons et en bactéries viables est plus faible dans les écoles témoins pour les trois types d'espaces investigués. Toutefois, la différence est plus significative dans les autres locaux. Les concentrations sont toujours plus faibles dans les cuisines du fait de lavages fréquents devant assurer une bonne hygiène générale, d'une densité d'occupation plus faible et d'une ventilation plus efficace. Cette étude montre par ailleurs que la **diversité de la flore fongique** est fortement influencée par le nombre de prélèvements réalisés. Les mêmes genres ou groupes fongiques sont retrouvés dans l'ensemble des pièces : *Penicillium*, levures, *Cladosporium*, *Aspergillus* [47].

Les concentrations en **bactéries** et en **champignons** dans l'air du **domicile** et de **l'école** ont été comparées aux expositions individuelles de 81 professeurs d'écoles élémentaires finlandaises. L'exposition personnelle aux champignons est significativement corrélée aux teneurs dans les habitations (coefficient de corrélation de Spearman $r = 0,6$; $P < 0,001$) mais pas à celles dans les écoles ($r = 0,2$; $P = 0,006-0,012$).

⁵ www.abcallergie.com

Quant aux concentrations personnelles en bactéries, elles sont corrélées aux concentrations des deux micro-environnements [48].

Les **écoles à structure en bois** diffèrent des **écoles en briques/béton** par la structure des planchers, les matériaux de façade, la couverture du toit et le système de ventilation. Les zones d'humidité sont situées majoritairement au niveau des sols et des plafonds, dans les 15 écoles en briques/béton, et sur les murs extérieurs dans les 16 écoles en bois étudiées. Toutefois, l'étude ne met pas en évidence une association claire entre les caractéristiques de la structure des bâtiments et la présence d'humidité [49].

Les effets de la **structure des bâtiments** et de la **présence de moisissures** sur la qualité microbiologique de l'air intérieur ont été caractérisés dans 17 écoles en bois et 15 écoles en béton ou en briques en Finlande. Dans chaque groupe, 12 écoles ont subi des dégâts des eaux. Les campagnes d'échantillonnage sont réalisées en hiver (couverture neigeuse) quand la contamination mycélienne est minimale afin de réduire la contribution des champignons extérieurs. La concentration en champignons est supérieure dans les écoles en bois (57 ufc/m^3 vs. 16 ufc/m^3), il est en de même pour la concentration bactérienne (844 ufc/m^3 vs. 447 ufc/m^3). Par contre, la présence de dommages dus à l'humidité entraîne une augmentation des concentrations fongiques dans les écoles en béton ou en briques mais pas dans les écoles en bois. L'étude de la distribution de la taille des champignons montre que les champignons de diamètre compris entre 1,1 et $4,7 \mu\text{m}$ sont les plus nombreux dans les écoles en bois et en béton. De manière générale, le diamètre moyen des champignons viables dans l'air est plus petit dans les écoles en bois que dans les écoles en béton et est plus petit dans les écoles ayant subi des dégâts des eaux que dans les écoles témoins pour les deux types de construction. Les espèces *Aspergillus versicolor*, *Stachybotris* et *Acremonium* sont détectés uniquement dans les écoles présentant des traces d'humidité. De plus, la présence de *Oidiodendron*, de *Cladosporium* et d'Actinobactère en concentrations élevées est associée à des problèmes d'humidité dans les écoles en béton [50, 51].

Vingt-quatre écoles finlandaises avec des problèmes de **moisissures** visibles et huit sans problème ont été inspectées. Les écoles étaient aussi bien en **bois** qu'en **briques/béton**. Les résultats montrent que les dommages d'humidité augmentent la concentration en champignons de manière significative dans les écoles en briques/béton (19 ufc/m^3) alors que ce n'est pas le cas dans les écoles en bois (57 ufc/m^3). Cependant, les concentrations fongiques de fond sont plus élevées dans les constructions en bois (58 ufc/m^3 contre 9 ufc/m^3 dans les écoles en briques). La présence de moisissures augmente significativement la **prévalence des symptômes respiratoires** chez les enfants, sauf dans les classes à structure en bois. Cette différence de prévalence est encore plus marquée au printemps après une période d'exposition plus longue [52].

Le lien entre l'incidence des **infections respiratoires** et la présence de **moisissures** dans différents types de construction a été étudié dans 32 écoles finlandaises (17 écoles en bois construites entre 1896 et 1994 ; 15 en briques/béton datant de 1923 à 1994). L'incidence des rhumes de cerveaux est significativement plus élevée dans les bâtiments ayant des problèmes d'humidité que dans les bâtiments n'ayant pas ce type de problème. La prévalence d'autres infections, telles que sinusites, otites, bronchites, est plus élevée dans les écoles en béton, mais il n'y a pas de différence

entre les écoles endommagées et les écoles de référence. Au moins deux tiers des enfants scolarisés dans les écoles les plus anciennes ont au moins une infection respiratoire par an. Les infections respiratoires sont plus fréquentes dans les écoles en briques/béton que dans les écoles à structure en bois. Cela pourrait être dû en partie à une taille et un nombre d'élèves plus importants dans ces écoles et à une propagation plus rapide des infections [53].

Aux États-Unis, 48 écoles ont été étudiées afin d'examiner **le rôle des champignons** dans la survenue du **Syndrome des Bâtiments Malsains*** (SBM) parmi les employés. Cinq genres fongiques sont systématiquement retrouvés dans l'air intérieur : *Cladosporium* (81,5%), *Penicillium* (5,2%), *Chrysosporium* (4,9%), *Alternaria* (2,8%), *Aspergillus* (1,1%). *Penicillium* et *Aspergillus* sont significativement plus présents dans l'air des zones associées au SBM que dans l'air extérieur ou des autres pièces. *Stachybotrys atra* est isolé sous les tapis et tapisseries humides de 11 écoles. La moitié des employés se plaint de l'augmentation du nombre d'infections respiratoires (amygdalite, bronchites...). Cette étude montre qu'après la mise en place de mesures correctives contre la contamination fongique, le nombre de plaintes diminue fortement ; *Penicillium* et *Stachybotrys* pourraient donc être fortement associées au SBM* [54].

Une étude menée en Finlande montre les **effets bénéfiques** sur l'exposition et la santé des élèves de la **rénovation** d'une école en béton ayant des problèmes d'**humidité** et de **moisissures** (aération, rénovation, installation d'une ventilation mécanique, nettoyage complet). Suite à ces travaux, la concentration ambiante et le nombre de genres de champignons ont diminué (de 22,6 ufc/m³ à 6,3 ufc/m³ ; de 25 à 16 genres différents) atteignant ainsi les niveaux relevés dans l'école de référence (7,9 ufc/m³ et 16 genres). Il en est de même pour la flore bactérienne (diminution de 888 ufc/m³ à 210 ufc/m³). Une diminution significative de la prévalence des symptômes respiratoires a été rapportée après cette rénovation. Ces résultats montrent que les symptômes sont associés aux problèmes d'humidité et que la prévalence de ces symptômes peut être diminuée grâce à des mesures de réparation adaptées [55].

Le **β -1,3-glucane**, composant non-allergisant de la paroi cellulaire des moisissures, peut être associé à des symptômes respiratoires. Une synthèse bibliographique réalisée en 2005 rassemble les données disponibles concernant les effets sanitaires [56]. Ces études suggèrent des associations entre l'exposition au β -1,3-glucane et les symptômes ou inflammations respiratoires, même si les mécanismes inflammatoires ne sont pas identifiés. Cette revue bibliographique recense une étude suédoise ayant porté sur l'exposition d'élèves âgés de 6 à 13 ans au β -1,3-glucane.

Au cours de cette étude, deux écoles ont été suivies, l'une ayant été contaminée par des moisissures par le passé (école-cas). Les concentrations en β -1,3-glucane dans l'air sont significativement plus élevées dans l'école-cas (15,3 ng/m³) que dans l'école-témoin (2,9 ng/m³). L'atopie* des enfants a été diagnostiquée par des tests cutanés. La proportion d'élèves atopiques est similaire dans les deux écoles. Cependant, les élèves atopiques de l'école-cas ont plus de symptômes (toux sèche, ...) que ceux de l'école-témoin alors qu'il n'y a pas de différence entre les enfants non-atopiques* des deux écoles. Les enfants atopiques constituent donc un groupe à risque vis-à-vis des moisissures ou du β -1,3-glucane. Ces résultats suggèrent que le β -1,3-glucane, en lui-

même ou en tant qu'indicateur de présence de moisissures, est un facteur de risque pour les inflammations respiratoires [57].

Des **dosages sériques d'anticorps IgG** dirigés contre 24 espèces fongiques ont été réalisés chez les enfants asthmatiques de deux écoles primaires finlandaises, l'une contaminée par des moisissures, l'autre non. Les concentrations en anticorps sont similaires dans les deux écoles (plus élevées dans l'école-témoin pour *Stachybotrys chartarum* et *Rhodotorula glutinis*). La seule corrélation positive mise en évidence lors de cette étude concerne les niveaux d'anticorps IgG et la présence de *Penicillium notatum* ou *Eurotium amstelodami* dans l'école. Le dosage sérique d'anticorps IgG ne serait donc pas une bonne méthode de routine pour évaluer l'exposition des enfants aux moisissures [58].

L'**hyperréactivité* nasale** d'un groupe d'enseignements ayant travaillé pendant plus de 5 ans dans une école présentant des problèmes d'humidité a été testée **avant et après** (2 ans) la **réhabilitation** réussie de l'école et comparée à celle d'un groupe-témoin de professeurs. Les plaintes concernant la qualité de l'air intérieur sont plus nombreuses chez les professeurs de l'école réhabilitée que dans le groupe-témoin. Cette étude conclut qu'une longue exposition à l'humidité dans les écoles peut augmenter le risque d'hyperréactivité* de la muqueuse des voies respiratoires supérieures. Cette hyperréactivité* peut persister des années même après la réalisation des travaux. Une explication possible à cette lente diminution pourrait être un processus de changement physiologique de la muqueuse nasale [59, 60, 61].

1.3.3 Bactéries

Sources et effets sanitaires

Les principales sources de bactéries dans l'air intérieur sont les hommes, les animaux, les poussières et les systèmes de ventilation, chauffage, air conditionné. Les concentrations intérieures dépendent essentiellement des concentrations extérieures, des activités humaines, de la présence d'animaux, du taux d'occupation de la pièce,...

Les systèmes de ventilation, chauffage, air conditionné peuvent favoriser le passage des bactéries de l'extérieur vers l'intérieur s'il n'y a pas de protection de la prise d'air neuf contre l'incursion de feuilles et si la filtration est inefficace ou si l'entretien de l'installation est insuffisant. Ces systèmes favorisent également la dispersion de la contamination entre différents locaux. Lorsque ces systèmes sont correctement conçus et entretenus, la quantité de microorganismes présents dans l'air est moins grande que dans les atmosphères non ventilées mécaniquement.

Les bactéries peuvent causer de nombreux problèmes de santé de nature infectieuse, toxique, allergique ou irritative.

Etudes sur les bactéries dans les écoles

Il faut noter que les techniques d'échantillonnage et d'analyse des bactéries ne donnent qu'une valeur approchée de la contamination bactérienne réelle car elles ne

mettent en évidence que les micro-organismes viables et cultivables (soit moins de 30% de la teneur totale en bactéries). Les bactéries non viables ou viables non cultivables ne sont pas prises en compte, alors qu'elles sont susceptibles d'engendrer des effets sanitaires.

Une étude menée dans 39 écoles canadiennes a eu pour objectif d'évaluer les concentrations bactériennes intérieures et d'examiner les caractéristiques environnementales, de construction et d'occupation qui pourraient influencer ces concentrations. Le taux de **bactéries** est significativement plus élevé dans les classes à **ventilation** naturelle (moyenne géométrique = 325 ufc/m³) que dans les classes à ventilation mécanique (166 ufc/m³). Les concentrations bactériennes sont inversement corrélées au taux d'extraction et de renouvellement de l'air, au pourcentage de temps que les occupants passent assis à leur place. Dans un modèle de régression linéaire multiple, 60% de la variance des taux de bactéries à l'intérieur est expliqué par l'association de la concentration intérieure en CO₂, du faible taux de renouvellement d'air, de l'âge du bâtiment, des signes d'humidité, du volume de la pièce, de l'humidité relative et de l'activité des occupants ; les 40% restant sont expliqués par la ventilation [62].

Les **composants des enveloppes cellulaires bactériennes**, agents inflammatoires, ont été mesurés dans l'air de deux écoles. L'acide muramique est le marqueur des peptidoglycanes des bactéries et les acides gras hydroxylés (3-OH FAs) ceux des bactéries Gram négatif. Cette méthode, basée sur les fragments de parois, permet de dénombrer les bactéries cultivables et non viables. Dans les deux écoles, les concentrations en acide muramique (1,42 vs. 2,84 ng/m³) et en 3-OH Fas (2,96 vs. 4,57 ng/m³) dans l'air intérieur sont significativement différentes. Ces concentrations sont corrélées à la teneur totale en particules dans l'air et à la concentration en CO₂. Le CO₂ étant lié au nombre d'occupants et au taux de ventilation, ces résultats corroborent l'hypothèse que les élèves et enseignants sont des sources de contamination bactérienne [63].

Des marqueurs chimiques ont été utilisés dans le but de déterminer les concentrations en **champignons** (ergostérol), en **bactéries** (acide muramique) et en bactéries gram négatif (acides gras hydroxylés) dans les poussières aériennes de six écoles de **différents pays** (Suède, Pologne et Jordanie). Dans chaque pays, les prélèvements ont été réalisés dans une école rurale et une école urbaine, en hiver et en été. Les mesures montrent que l'exposition aux microorganismes diffère fortement selon les pays, les saisons et la localisation de l'école (urbaine/rurale). L'acide muramique est l'indicateur le moins variable [64].

1.3.4 Études globales des biocontaminants

La plupart des études multipolluants françaises (Annexe 3) ont analysé la présence de biocontaminants dans les écoles investiguées.

Les concentrations en allergènes (chats, chiens et acariens), en moisissures et en endotoxines ont été mesurées dans le cadre de l'étude pilote de l'**OQAI** [6-8]. Le dosage des **allergènes de chats** est supérieur au seuil de détection dans une seule salle de

classe (0,18 ng Fel d1/m³). Les concentrations en allergènes de **chiens** varient de 0,5 ng/m³ à 18 ng/m³. Les teneurs en allergènes d'**acariens** (Der p I et Der f I) dans les matelas des deux dortoirs enquêtés sont inférieurs au seuil de détection. En ce qui concerne les **moisissures**, *Cladosporium* et *Penicillium* sont les deux espèces retrouvées systématiquement avec la plus grande concentration dans les neuf écoles. Viennent ensuite *Aspergillus* et *Alternaria*. 78% des salles de classe présentent une teneur totale en moisissures élevée (supérieure à 200 ufc/m³). Dans les écoles investiguées, il n'y a pas de différence significative entre l'intérieur et l'extérieur. La contamination est liée au taux d'humidité relative et au type de fenêtres (teneur plus élevée dans les salles avec double vitrage que dans les pièces avec vitrage simple ou fenêtres anciennes). Les **endotoxines** sont présentes dans toutes les salles de classe. Leurs teneurs, entre 0,11 et 2,19 ng/m³, sont non négligeables. Elles sont liées à des indices de confinement (humidité relative, types de fenêtres) et à la présence de moquette (2,19 vs 0,35 ng/m³).

Le **LHVP** a mesuré la contamination aérienne bactérienne et fongique dans 10 établissements scolaires. La **flore bactérienne** est plus importante à l'intérieur des bâtiments, elle varie entre 200 et 19 500 ufc/m³. D'une heure à l'autre, cette contamination varie dans des proportions importantes. *Staphylococcus aureus* (indicateur d'une contamination humaine) est retrouvé dans 32,7% des échantillons. Les Streptocoques thermotolérants (indicateurs d'une pollution fécale ou hydrotellurique) ont été identifiés dans 50,6% des prélèvements. Cette étude met en évidence un parallélisme entre l'évolution de la flore bactérienne et les teneurs en CO₂ à l'intérieur des salles de classes. La contamination bactérienne dépend de la présence des enfants et de leurs activités. Contrairement à ce qui a été observé pour les bactéries, la **contamination fongique** à l'intérieur des bâtiments est moins importante qu'à l'extérieur et s'élève à environ 100 ufc/m³. Au cours d'une même journée, les teneurs varient largement de quelques unités à plus de 1000 ufc/m³. L'espèce la plus fréquemment rencontrée est *Penicillium species* mais la flore fongique est très polymorphe (*Aspergillus*, *Alternaria*, *Cladosporium*, ...). De plus, les forts niveaux de contamination sont associés à des taux d'humidité élevés [14].

Dans l'ensemble des classes investiguées lors de l'étude de la qualité de l'air dans les locaux d'enseignement du **CSTB**, les concentrations totales en **bactéries** sont en nette augmentation après l'occupation des salles. Globalement, la concentration augmente de moins de 1000 ufc/m³ à plus de 3000 ufc/m³ sauf dans l'école équipée de ventilation mécanique où la charge bactérienne n'excède pas 1000 ufc/m³. Les concentrations les plus importantes sont associées aux valeurs de pointe en CO₂ (> 1300 ppm). Les ratios C_{int}/C_{ext} de la flore bactérienne sont plus élevés en fin de journée, ce qui confirme l'hypothèse selon laquelle une partie de la contamination intérieure est amenée par les occupants des classes. Les effets des techniques de nettoyage (durée, nettoyage à sec ou humide,...) sur les concentrations biologiques n'ont pas pu être étudiés vu le faible nombre de mesures [9, 10].

De nombreuses autres études se sont penchées sur la présence de biocontaminants dans les écoles maternelles et primaires, notamment dans les pays scandinaves.

Une étude conduite à Uppsala (Suède) et à Shanghai (Chine), a permis de **comparer les niveaux de concentration en allergènes** et la prévalence des allergies* et de l'asthme* parmi les élèves des écoles primaires. Les allergènes d'**acariens**, de

blattes et de **moisissures** n'ont été détectés dans aucune des écoles. L'allergène de cheval n'a été retrouvé que dans les écoles suédoises (2500 U/g). A Shanghai, les concentrations en allergènes de **chats** et de **chiens** sont beaucoup plus faibles qu'à Uppsala (respectivement 400 ng/g et 750 ng/g – teneur maximale – contre 1200 ng/g et 1525 ng/g – teneur moyenne). Il en est de même pour le nombre d'allergies* aux animaux. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces différences. D'une part, peu d'élèves de Shanghai ont un animal chez eux (taxe annuelle sur les animaux domestiques, zone urbaine) contrairement aux élèves d'Uppsala. D'autre part, l'apport d'allergènes par les vêtements des enfants (source principale de contamination des classes) est fortement réduit en Chine puisque les enfants portent un uniforme [65].

Les **niveaux d'allergènes d'acariens, de blattes, de chats, de chiens et le taux d'endotoxines** ont été comparés dans quatre lieux d'accueil d'enfants (jardins d'enfants, garderies, écoles maternelles et élémentaires) à Sao Paulo au Brésil. Il n'y a pas de différence significative entre les niveaux mesurés le matin (avant l'arrivée des enfants) et ceux mesurés le soir (après le ménage) pour les allergènes d'acariens (0,07 µg/g dans les maternelles et 0,5 µg/g dans les écoles élémentaires), de blattes (3,4 U/g dans les écoles élémentaires), d'endotoxines (10,1 EU/mg de poussière dans les écoles élémentaires). Cela laisse penser que les techniques de nettoyage ne sont pas suffisantes pour réduire la teneur en allergènes ou en endotoxines, et que la présence des enfants n'affecte pas les niveaux d'allergènes. Dans cette étude, les écoles élémentaires sont une source importante d'exposition aux allergènes de blattes comparativement aux autres lieux investigués. Les taux d'allergènes de chats et de chiens dans les écoles primaires et secondaires sont similaires ou plus faibles que ceux trouvés dans les maisons sans animaux domestiques alors que l'inverse avait été démontré dans d'autres études. Ce résultat est sans doute le reflet des différences de climat intérieur, de ventilation, d'habitude de vie, d'un nombre plus faible de propriétaires d'animaux domestiques... [66]

Une étude américaine compare les niveaux d'**endotoxines**, d'**allergènes** (acariens, chats et blattes), de **champignons**, de **β-1,3-glucane** et de **poussières** (PM_{2,5}) dans deux écoles, l'une avec de la **moquette** au sol, l'autre avec du **carrelage**. Aucune de ces deux écoles n'a connu des problèmes liés à la QAI. Les concentrations aériennes sont plus élevées dans les classes carrelées pour tous les biocontaminants suivis ; la différence est significative pour les concentrations en champignons, en endotoxines, en β-1,3-glucane et en PM_{2,5} (8 µg/m³ contre 14). *A contrario*, la charge surfacique est plus importante dans les salles avec moquettes (1000 µg de poussières/m² contre 40 dans les classes carrelées). Ces résultats suggèrent que le type de revêtement au sol influence peu les niveaux de biocontamination aériens dans les écoles exemptes de problème lié à la QAI [67].

1.4 Autres études « multipolluants »

Des études multipolluants réalisées à l'étranger, autres que celles déjà mentionnées, sont également intéressantes à rapporter.

Les relations entre les niveaux de pollution et différents facteurs (caractéristiques du bâtiment, type de ventilation, habitudes de nettoyage,...) ont été étudiées en Suède dans 48 écoles de la région d'Uppsala de 1993 à 1995. Le principal déterminant des expositions dans les écoles est le **taux de renouvellement** de l'air. Malgré cela, le taux de renouvellement est faible dans la majorité des écoles investiguées (<8L/sec/personne) et les concentrations en CO₂ dépassent 1000 ppm dans 60% d'entre elles. Les classes avec des tableaux noirs (craie) ont des teneurs en **poussières** plus élevées que les salles avec un tableau à feutres. Les concentrations en **formaldéhyde** et en *Cladosporium* sont plus fortes dans les pièces ayant des étagères. Les salles de classe, principalement nettoyées par des méthodes humides, ont plus de **bactéries** viables dans l'air mais moins de poussières que les salles de classe principalement nettoyées par des méthodes sèches. Dans les salles dont les bureaux et les rideaux sont plus souvent nettoyés, les teneurs en **allergènes de chats et de chiens** sont plus faibles. L'ameublement et les textiles de la salle de classe sont donc des réservoirs significatifs pour les allergènes. Ainsi, les **méthodes et la fréquence de nettoyage** influencent l'exposition [68, 69].

Une étude réalisée pendant un an dans 24 écoles néerlandaises a permis d'évaluer l'**influence d'axes à fort trafic routier situés à moins de 400 mètres des écoles** [70]. Le NO₂, les PM_{2,5} et le **benzène** ont été mesurés à l'intérieur et à l'extérieur. Le trafic routier a été suivi en parallèle (densité, composition). Les mesures, d'une durée d'une semaine, ont été répétées 5 à 10 fois pour chaque école, entre avril 1997 et mai 1998. Cette étude montre que les concentrations en polluants dans l'air à l'extérieur et à l'intérieur des écoles situées à proximité d'une autoroute sont significativement associées :

- à la distance : PM_{2,5}
- à la densité du trafic : benzène
- au trafic de voiture : NO₂
- au trafic de poids lourds : benzène, PM_{2,5}
- au pourcentage de temps passé sous les vents dominants : NO₂ ; PM_{2,5} et benzène (corrélations plus faibles)

Les teneurs en NO₂ ne diminuent pas avec la distance contrairement à d'autres études ; cette association est sans doute masquée par le trafic local. Cette étude met une nouvelle fois en évidence l'influence notable de la qualité de l'air extérieur sur celle de l'intérieur et la prise en compte indispensable de la présence d'axes routiers dans le voisinage des écoles.

La **qualité de l'air intérieur** a été suivie dans 28 salles de classe de **Varsovie** (Pologne) entre février et mars 2000. Dans toutes les salles, la concentration en CO₂ dépasse 1000 ppm et la teneur en **formaldéhyde** est supérieure à 50 µg/m³ dans cinq d'entre elles. Les **COV** les plus souvent identifiés sont : toluène, xylènes, décane, undécane, pentane, acétone, hexane, heptane. Le taux de renouvellement de l'air varie entre 1,2 et 9,6 m³/h/personne. Cette étude montre que les règlements polonais imposant

un taux de renouvellement de 20 m³/h/personne ne sont généralement pas respectés [71].

Les paramètres de la QAI de deux écoles urbaines de **Minneapolis** (États-Unis) ont été comparés. Une école est récente (1997), construite pour minimiser les problèmes liés à la qualité de l'air ; l'autre, plus ancienne (1968), est de construction traditionnelle. Le CO₂, le CO, la température, l'humidité relative, les teneurs fongiques dans l'air et les moquettes, les allergènes (chats, blattes, acariens) dans les moquettes ont été mesurés en automne, en hiver et au printemps. Les mesures de **CO** sont toutes inférieures à la limite de détection (3 ppm). Il n'y a pas de différence significative entre l'ancienne et la nouvelle école pour le taux de **CO₂** (445 ppm vs. 450 ppm). Les concentrations nocturnes sont légèrement plus faibles. Les **températures** intérieures sont constantes tout au long de l'année et sont en moyenne de 22°C pour l'ancienne école et 21,2°C pour la plus récente. L'**humidité relative** varie d'une saison à l'autre et au sein de la même école (ancienne école : 37,5% et école récente : 39,1%). A l'automne, les **concentrations fongiques** extérieures (600-900 ufc/m³) sont comparables à celles de l'intérieur de l'ancienne école mais plus fortes que celles de la nouvelle école. En hiver, les concentrations sont inférieures au seuil de détection (12 ufc/m³). Les espèces les plus fréquemment retrouvées sont *Cladosporium*, *Acremonium*, *Alternaria*, *Epicoccum nigrum*, *Penicillium* et *Tritirachium*. Les teneurs en champignons et en **allergènes** dans les moquettes sont identiques dans les deux écoles. Ces résultats montrent que les deux écoles sont entretenues pour avoir un air intérieur relativement confortable [72].

1.5 Polluants de l'air peu ou pas étudiés dans les écoles

1.5.1 Polluants rarement étudiés

Les **biocides** regroupent les pesticides à usage non agricole et les produits de lutte contre les animaux nuisibles. Les teneurs en biocides dans l'air des écoles peuvent être ponctuellement élevées en cas de traitement de désinsectisation. De manière générale, les pesticides sont peu utilisés à l'intérieur comme à l'extérieur des écoles. Une unique étude, publiée en juillet 2005, a porté sur les effets aigus de l'exposition aux pesticides dans les écoles américaines. La majorité des symptômes sont associés à l'utilisation à l'intérieur et à l'extérieur de l'école de pesticides (insecticides, désinfectants, répulsifs, herbicides) mais l'utilisation de pesticides à proximité de l'école (utilisation agricole) peut également avoir des répercussions. Dans 89% des cas, la sévérité des effets est faible (irritation des yeux, de la peau, des voies respiratoires), dans 11% des cas, un traitement médical est nécessaire [73].

Les **métaux lourds** dans les écoles ne sont étudiés que dans des cas très spécifiques, notamment lorsque les établissements scolaires se trouvent à proximité de sites industriels polluants ou pollués. Une unique publication relative à la pollution par le manganèse d'écoles en Afrique du Sud a été recensée [74].

En ce qui concerne le **plomb**, la voie d'exposition principale des enfants est l'ingestion (poussières de peintures au plomb, eau de distribution ayant circulée dans des canalisations en plomb). Les teneurs en plomb des poussières sont mesurées lors de

l'étude de la composition chimique des poussières ; ce genre d'analyse est rarement réalisé en dehors de la présence avérée de peintures au plomb dégradées.

1.5.2 Polluants non étudiés

La recherche bibliographique n'a pas permis de trouver d'études dans les écoles de certains polluants pourtant recherchés dans les logements. C'est le cas notamment pour le dioxyde de soufre, la fumée de tabac environnementale, les biocides, les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), les retardateurs de flamme, les pollens et les virus.

Pour la **fumée de tabac environnementale**, l'absence de recherche peut s'expliquer par le fait qu'il est interdit de fumer dans les écoles et que par conséquent ce polluant est très peu présent. Toutefois, aucune donnée sur le contact indirect avec les composés de la fumée de tabac via les résidus de fumée transportés par les vêtements des fumeurs n'est disponible [23].

Les **retardateurs de flamme** sont présents dans de nombreux matériaux comme les textiles, les plastiques, les meubles, l'informatique. Ce sont des polluants émergents qui font désormais l'objet d'études dans les logements. Il serait donc intéressant de savoir si ces composés organiques semi-volatils sont également présents dans les écoles en quantités non négligeables.

L'exposition aux **Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques** se fait majoritairement par l'alimentation (formation durant la cuisson, dépôts atmosphériques sur les fruits, légumes,...). On retrouve des HAP dans l'air intérieur suite à des combustions incomplètes (essence, gaz, bois, charbon) ou sous l'influence du trafic routier. Cependant, les sources de combustion propres aux salles de classe sont rares et la contribution extérieure du trafic routier peut être suivie par d'autres indicateurs comme le NO₂ par exemple.

Les **pollens** proviennent en majorité de l'extérieur. Certaines plantes vertes d'intérieur, comme les ficus, le papyrus ou les gypsophiles sont des sources potentielles de pollens. Toutefois, ces plantes sont rarement présentes dans les salles de classe. De plus, les teneurs en allergènes de pollens sont plus faibles à l'intérieur qu'à l'extérieur, même si l'on retrouve des allergènes dans les poussières d'intérieur après la période de pollinisation [75]. Les pollens ne sont donc pas des polluants à rechercher prioritairement dans les écoles.

Les **virus** sont retrouvés de façon ponctuelle dans l'air intérieur des écoles en particulier lors d'épidémie. De plus, leur survie est limitée dans l'air. Dans le cadre d'une hiérarchisation des études à mener, les recherches sur les virus ne seraient pas prioritaires.

Le **dioxyde de soufre**, SO₂, ne fait pas l'objet de mesure dans l'air intérieur des écoles. Très peu de publications rapportent la mesure des concentrations intérieures de ce composé et les quelques milieux investigués sont très spécifiques (patinoires, pièces avec combustion d'encens en Chine,...).

1.6 Synthèse

La majorité des études portant sur un nombre réduit d'écoles, les résultats doivent être extrapolés avec précaution. Les études de la QAI dans les écoles ont des provenances géographiques très marquées : globalement, un tiers des études vient d'Amérique du Nord et un tiers de Scandinavie. Environ la moitié des publications portent sur les biocontaminants et un tiers de ces études se sont déroulées en Scandinavie.

Les études montrent qu'une augmentation de 1000 ppm en **CO₂** (indicateur de présence humaine et de confinement) entraînerait une augmentation de 10 à 20% du taux d'absentéisme. De même, une exposition à des teneurs fortes en **NO₂** semble entraîner un absentéisme plus important. En général, les teneurs en **NOx** et en **CO** sont plus faibles à l'intérieur mais sont fortement influencées par la proximité du trafic routier. On peut observer une légère production de CO dans les classes en cas de chauffage au gaz naturel. Quant à l'**ozone**, composé très réactif, il disparaît rapidement à l'intérieur des salles.

Le ratio C_{int}/C_{ext} des **particules** est la plupart du temps supérieur à 1. Les concentrations intérieures sont maximales durant l'occupation des salles de classe et les concentrations dans l'air diminuent quand la taille des particules augmente. Les concentrations en particules fines sont liées aux transferts depuis l'extérieur. Le déterminant principal des concentrations dans l'air en particules plus grosses est le phénomène de remise en suspension d'où des teneurs diurnes plus élevées que les teneurs nocturnes. L'exposition personnelle (tous milieux confondus) des enfants aux PM₁₀ serait inférieure aux concentrations mesurées à l'intérieur (classes et habitat), ce qui traduirait une exposition à des concentrations plus fortes sur de courtes périodes en dehors de l'école. La présence de moquette pourrait augmenter l'exposition des enfants aux particules. Cependant, il faut noter que les concentrations mesurées sont très variables d'une étude à l'autre.

Les teneurs en **COV** présentent une grande variabilité entre écoles et au sein d'une même école.

L'ensemble des études relève que le **formaldéhyde** est le composé majeur des aldéhydes mesurés dans l'air intérieur des écoles. Il existe des sources permanentes (panneaux de bois aggloméré pour le formaldéhyde) et des sources épisodiques (produits d'entretien ou autres pour les hydrocarbures chlorés et les esters). Les concentrations en formaldéhyde sont plus élevées dans les écoles que dans les logements ce qui peut s'expliquer par le fait qu'il y a plus de mobilier dans les écoles et que les sources potentielles sont donc plus nombreuses.

Les teneurs en **BTEX** seraient plus faibles dans les écoles que dans d'autres lieux intérieurs. Elles seraient influencées par la situation de l'école, l'étage de la salle de classe et par le nombre d'occupants.

Une exposition aux phtalates dans une école a été corrélée avec des concentrations en biomarqueurs urinaires plus élevées.

L'exposition des enfants aux **PCB** dans l'air intérieur d'une école contaminée est associée à une augmentation de la concentration dans le sang des congénères faiblement chlorés.

L'analyse des études montre que le mode de ventilation, les problèmes d'humidité, la saison, ainsi que le taux d'occupation et l'activité des occupants sont les principaux déterminants de la **qualité microbiologique** de l'air à l'intérieur des écoles. Bien que l'impact réel des expositions scolaires aux biocontaminants sur la santé des élèves soit encore peu documenté, les impacts sur la santé respiratoire sont non négligeables notamment chez les élèves asthmatiques et/ou allergiques.

Les **champignons** et les **moisissures** sont les biocontaminants les plus étudiés. Leur présence pourrait favoriser l'apparition du Syndrome des Bâtiments Malsains*. *Cladosporium*, *Penicillium*, *Aspergillus* et *Alternaria* sont les espèces quasi inévitables dans l'air des écoles. En ce qui concerne les **allergènes**, ceux des chats sont les plus suivis dans les écoles maternelles et primaires. Les allergènes sont transportés par les vêtements des personnes ayant un chat à leur domicile, ainsi, les teneurs en allergènes de chat dans l'air sont en moyenne plus élevées dans les salles de classe que dans les logements sans chat. La **flore bactérienne** totale mesurée dans l'air des écoles est plus élevée que celle retrouvée dans les logements.

Certains polluants étudiés dans les logements le sont très peu dans les écoles, c'est le cas de l'amiante, des fibres minérales artificielles ou des éthers de glycol. D'autres comme la fumée de tabac environnementale, les biocides, les HAP, les retardateurs de flamme, les pollens ou les virus ne sont pas étudiés dans le cadre de la qualité de l'air intérieur des écoles.

2 SPÉCIFICITÉS DES ÉCOLES EN TERME DE BÂTI, D'ÉQUIPEMENTS ET D'ACTIVITÉS

Les études mettent en évidence des différences plus ou moins fortes au niveau des concentrations en polluants dans les écoles. Il est donc nécessaire d'examiner les spécificités du bâti, des équipements et des activités se déroulant dans les écoles et d'identifier leur rôle (positif ou négatif) potentiel sur la qualité de l'air intérieur.

2.1 Densité d'occupation

Les écoles se différencient des logements et des bureaux par leur **densité d'occupation élevée**. En général, on estime qu'à surface égale, les écoles accueillent quatre fois plus d'occupants que les bureaux. Ce nombre important de personnes dans un espace limité et clos entraîne une augmentation rapide du taux de CO₂ et un dégagement important de vapeur d'eau. Le nombre de personnes ayant un animal domestique étant statistiquement plus élevé, les concentrations en allergènes sont donc plus importantes provoquant ainsi une sensibilisation allergique des enfants. La contamination bactérienne est, elle aussi, non négligeable puisque la présence humaine en est le premier facteur.

2.2 Typologie du bâti

Les locaux scolaires doivent s'adapter aux fluctuations du nombre d'élèves et, par conséquent, subissent des **modifications de structures rapides**. Ces changements peuvent nuire à la qualité de l'air intérieur, en modifiant notamment l'efficacité des systèmes de ventilation lorsqu'ils existent [76]. Les professeurs sont parfois amenés à utiliser des salles non conçues initialement pour servir de salle de classe.

D'un point de vue typologique, mis à part un nombre plus important de structures préfabriquées, il n'y a pas de différences particulières entre écoles et logements ou bureaux. La fréquence de renouvellement des écoles traditionnelles est de l'ordre de celle des logements (environ 100 ans).

En France, les données sur l'implantation et les types de structures (traditionnelle ou préfabriquée) des écoles sont parcellaires et très dispersées.

2.3 Équipements spécifiques

2.3.1 Systèmes de ventilation

Suite à la multiplication des accidents (défenestrations notamment), l'**amplitude de l'ouverture des fenêtres** des écoles est désormais limitée. Cela réduit donc l'efficacité de la ventilation par l'ouverture des fenêtres et renforce l'utilité d'une ventilation mécanique. Cette dernière peut, soit insuffler l'air extérieur dans les pièces, soit extraire l'air vicié (ventilation simple flux). Les systèmes de ventilation double flux allient ces deux techniques (Annexe 4).

Les effets de la ventilation sur la QAI sont complexes. La ventilation est nécessaire pour limiter ou tout au moins réduire la concentration en polluants dans l'air intérieur à des niveaux acceptables. En revanche, si le système de ventilation est mal choisi, mal installé ou mal entretenu, il peut avoir des effets néfastes sur la santé (augmentation du SBM*, dispersion de bactéries ou virus aéroportés,...) [77].

Le CSTB a entrepris plusieurs études de l'**influence de la ventilation sur la qualité de l'air intérieur** dans des écoles maternelles et primaires. L'une d'elles a été conduite dans trois écoles de la région parisienne. Au vu des résultats des mesures du CO₂, des COV totaux et de la contamination bactérienne, la qualité de l'air est meilleure dans l'école équipée d'extracteurs mécaniques que dans les deux autres. En l'absence de Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC), les concentrations sont tributaires de l'ouverture des fenêtres [9, 10].

Dans le cadre de la campagne de l'OQAI, les renouvellements d'air ont été calculés dans les 9 écoles investiguées, aucune ne disposant de système de ventilation mécanique. Les taux se situent entre quasiment 0 m³/h/pers et 7,7 m³/h/pers. Ces valeurs sont très faibles comparativement au taux préconisé par le **Règlement Sanitaire Départemental Type** (au minimum 15 m³/h/pers) [78]. Il faut noter que ces résultats ont été obtenus en Mai et Juin 2001 et qu'ils seraient différents en période hivernale [6, 8].

L'INERIS a élaboré un **indice** pour évaluer le **caractère irritant de l'air intérieur**. Cet indice a été utilisé dans plusieurs écoles françaises où les enfants présentaient divers symptômes (maux de tête, difficultés respiratoires, saignements de nez). La somme des rapports des concentrations sur les valeurs toxicologiques de référence (ou valeurs guides) permet d'évaluer globalement la QAI. Si l'indice est supérieur à 1, le potentiel irritant de l'air est non négligeable [79]. Dans l'une des écoles investiguées, les concentrations en aldéhydes, cétones et COV mesurées sont dans les gammes de concentrations habituellement rencontrées dans l'air intérieur. Au début de l'étude, l'école n'était pas équipée de système de ventilation et l'indice était évalué à 2,05. Suite à l'installation de grilles de ventilation (ventilation passive), l'indice n'était plus que de 0,78. La mise en place d'une ventilation mécanique a permis de réduire l'indice à 0,32. Parallèlement à ces installations, les plaintes ont cessé. L'évolution de cet indice montre que, lorsque les sources de pollution ne peuvent pas être clairement identifiées ou immédiatement supprimées, les systèmes de ventilation sont des moyens efficaces pour améliorer la QAI [80].

Des revues de littérature ont été réalisées afin de regrouper les données concernant la ventilation dans les écoles. Dans une grande majorité des classes américaines et européennes, la ventilation est inadéquate et le taux de renouvellement insuffisant (0,2 à 9,1 L/sec/personne) [81]. La situation semble encore plus préoccupante dans les **salles préfabriquées** : une étude pilote menée dans 7 salles de classe de ce type à Los Angeles trouve des taux de renouvellement d'air de 2,9 volumes/heure au maximum [82].

2.3.2 Mobilier

Le **mobilier** est très présent dans les salles de classe. Le nombre de bureaux, tables ou armoires y est beaucoup plus élevé, comparativement aux bureaux et aux logements. Les émanations de COV, d'aldéhydes et de formaldéhyde en particulier, peuvent donc être élevées.

Les **tableaux** des salles de classe ont un impact sur la qualité de l'air. Les **craies** provoquent la dispersion d'un grand nombre de particules, tandis que les **feutres** entraînent une augmentation de la teneur en COV dans l'air.

2.4 Activités particulières

Les **activités manuelles** nécessitent l'utilisation de nombreux produits : colles, feutres, peintures,... Ces produits sont également susceptibles de dégager des composés chimiques dans l'air de la salle. Dans certaines écoles, des salles sont exclusivement réservées à ce type d'activité et font l'objet d'une ventilation particulière.

Les **objets confectionnés par les enfants** sont couramment conservés dans certaines salles de classe. Les colles, feutres, peintures utilisés relarguent alors lentement leurs composés dans l'air de la classe.

La fréquence de **nettoyage des locaux scolaires** est normalement plus élevée que celle des logements. L'entretien des locaux peut avoir plusieurs effets sur la qualité de l'air intérieur. Si le nettoyage est trop fréquent, des composés chimiques peuvent être émis de façon non négligeable. Ces composés diffèrent d'un produit à l'autre. Les rares études qui ont été menées sur la composition des produits d'entretien montrent qu'il s'agit entre autres de COV, d'aldéhydes ou d'hydrocarbures [19]. Après le nettoyage, des teneurs en éthers de glycol plus élevées ont été mesurées, ce composé étant utilisé comme solvant dans certains produits [9, 10]. Au contraire, si le nettoyage n'est pas régulier, les poussières et les allergènes s'accumulent dégradant ainsi la QAI et exposant les enfants à des problèmes respiratoires. La technique de nettoyage pourrait, elle aussi, avoir des répercussions sur la QAI et la santé des enfants. En effet, les produits pour le sol ne nécessitent plus de rinçage mais, les produits chimiques eux restent sur le sol et s'évaporent petit à petit. Les jeunes enfants jouant par terre sont certainement plus exposés à ces composés.

On peut penser que les **sources de combustion** (cuisine, chaudière) ne se trouvent pas à proximité des salles de classe, ce qui limite la contribution de ces sources dans les teneurs en CO, CO₂, NOx, particules dans l'air intérieur des pièces. De plus, les écoles primaires et maternelles ne possèdent pas toujours une **cantine**. Contrairement aux logements, les cuisines sont généralement bien ventilées grâce à leur propre système de ventilation.

2.5 Synthèse

Les écoles se distinguent des logements et des bureaux par une **densité** d'occupation élevée et un **mobilier** important. Les **systèmes de ventilation** sont beaucoup moins généralisés dans les écoles françaises que dans les bureaux. Dans les écoles équipées de systèmes de ventilation, le taux de renouvellement de l'air est très faible voire quasi-nul.

Les produits utilisés, tant pour **l'enseignement** (craies, feutres) et les **activités scolaires** (colles, peintures,...) que pour **l'entretien** des salles de classe, ont un impact sur la qualité de l'air intérieur. Ces spécificités engendrent donc une exposition des élèves à des concentrations plus fortes en polluants intérieurs (COV, poussières en particulier). De plus en plus d'études montrent que la qualité de l'air intérieur peut avoir des impacts autres que les impacts sanitaires habituellement identifiés (SBM, inflammation, infections, asthme*, allergies*). En effet, une mauvaise QAI perturbe certainement la concentration, l'apprentissage et les **performances scolaires des élèves**. Les professeurs voient une association entre l'acceptabilité de l'environnement intérieur et les performances de leurs élèves [83, 84]. La Figure 1 montre l'influence probable de l'air intérieur sur les performances des élèves [85].

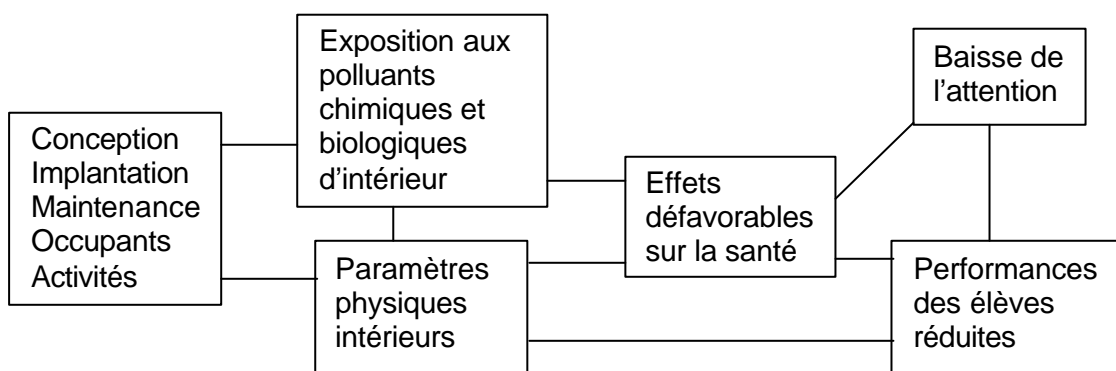


Figure 1 : Influence possible de la QAI sur les performances scolaires des élèves

L'exposition aux polluants et les paramètres physiques intérieurs (température, humidité,...) ont des conséquences sur la santé. Ces effets ont alors des répercussions sur les performances soit directement soit *via* la réduction de la concentration. Les conditions physiques peuvent jouer directement sur les performances.

Le suivi des performances montre que la productivité des élèves et des professeurs diminue avec le taux de ventilation [86]. Les résultats préliminaires d'études danoises confirment les effets des conditions ambiantes sur le travail scolaire. L'augmentation de la température ambiante ainsi que la diminution du taux de

renouvellement d'air correspondent à une diminution de la performance des élèves, estimée à partir de tests standardisés. Les résultats finaux de cette étude sont attendus courant 2006 [87].

Les performances des élèves s'améliorent rapidement après la réalisation de travaux et la mise en place de programmes de maintenance. C'est ce qu'a montré une étude menée dans une école américaine ayant subi d'importants dégâts des eaux. Avant la réhabilitation en 1997, le niveau en mathématique et en lecture de la moitié des enfants était inférieur à la moyenne nationale. En 2000, les trois quarts des élèves avaient un niveau égal ou supérieur à la moyenne nationale [88].

3 GUIDES DE GESTION DE LA QUALITÉ DE L’AIR INTÉRIEUR DANS LES ÉCOLES

Maintenir un environnement scolaire sain est indispensable pour l'apprentissage des enfants et l'efficacité des professeurs. C'est pourquoi, de plus en plus de pays élaborent des guides de bonnes pratiques et de gestion (prévention et/ou intervention) visant à offrir une meilleure qualité de l'air intérieur dans les écoles maternelles et primaires.

Certains des guides décrits dans ce chapitre indiquent des valeurs guides ou réglementaires applicables dans les écoles maternelles et primaires. Cependant, ces valeurs ne seront pas mentionnées ici car elles ne sont pas élaborées spécifiquement pour ces microenvironnements. En France, l'unique réglementation spécifique aux écoles primaires et maternelles, concerne le taux de renouvellement de l'air : le Règlement Sanitaire Départemental Type fixe à 15 m³/heure/personne le débit minimal d'air neuf pour les salles de classe des écoles maternelles ou primaires et des collèges [78].

3.1 Europe

3.1.1 France

Le **Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques (CETIAT)** a élaboré un **guide de conception**⁶ pour la « *Ventilation performante dans les écoles* » [89]. Ce guide a pour objectif d'aider à la conception d'installations de ventilation performantes tant pour la qualité de l'air que pour maîtrise de l'énergie. Il est destiné aux maîtres d'ouvrages, architectes, bureaux d'études, installateurs, sociétés de maintenance et gestionnaires des établissements scolaires, de la maternelle au lycée. La première partie présente les principaux **critères à prendre à compte** pour la conception : qualité de l'air et hygiène, confort hygrothermique et acoustique, efficacité de la ventilation, maîtrise de l'énergie. Puis les **principaux systèmes de ventilation** sont décrits : ventilation simple flux par extraction ou par insufflation, ventilation mécanique double flux (voir Annexe 4). Des **critères de choix** permettent d'orienter la réflexion vers la solution la mieux adaptée à l'ensemble de l'école. Enfin, quelques **conseils** de mise en œuvre, de réception et de suivi des installations sont donnés.

3.1.2 Suède

En 1995, l'**Institut National de la Santé Publique** suédois (National Institute of Public Health) a lancé une vaste campagne médiatique sur le thème de la QAI dans les écoles.

Un guide regroupant des lignes directrices assurant des "écoles saines" a été publié par cet institut à destination de tous les acteurs impliqués dans cette

⁶ disponible sur simple demande sur le site Internet du CETIAT : www.cetiat.fr

problématique : « **The six steps towards allergy free day care centers and schools** » [90]. Ce document énonce les objectifs qu'il convient de se fixer pour un environnement intérieur sain et les démarches à suivre pour vérifier qu'ils sont bien atteints ou pour les atteindre lors de la conception du bâtiment, la rénovation ou la maintenance. Cette démarche se décompose en six étapes :

1. création d'un groupe de travail
2. analyse de la situation : base de l'action à venir
3. définition d'objectifs pour maintenir un environnement intérieur sain
4. mise en place d'un schéma d'assurance qualité
5. contrôle de la qualité de l'air dans les bâtiments
6. contrôle de la qualité de l'air lors de l'occupation du bâtiment

Pour chaque situation, les différents acteurs concernés sont clairement identifiés. Tous les éléments utiles de la littérature, ainsi que tous les intervenants potentiels sont listés.

En outre, l'*Asthma and Allergy Association* en collaboration avec l'Institut National de la Santé Publique suédois, a élaboré en Avril 1996 un document intitulé « **Allergy Inspection in Schools** » [91]. Ce document propose une check-list relativement complète et synthétique pour l'inspection annuelle des sources d'allergies*. Les questions sont regroupées par thème : santé, environnement intérieur et moisissures, ventilation, tabagisme, animaux, parfums, plantes, allergies alimentaires, services d'entretien. A chaque item, des conseils sont donnés. Selon les réponses fournies, il est demandé d'indiquer ce qui doit être fait, par qui et dans quels délais.

3.1.3 Allemagne

Le **Umweltbundesamt**, ministère de l'Environnement allemand, a élaboré un Guide pour l'hygiène de l'air intérieur dans les bâtiments scolaires (« **Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden**⁷ ») [92]. Ce guide a pour objectif d'aider les responsables et les utilisateurs des écoles à mieux connaître et estimer les problèmes de qualité de l'air intérieur et mettre en place de stratégies de prévention. Il s'adresse aux responsables, aux professeurs, aux élèves et à leurs parents, mais aussi aux organismes financeurs, aux architectes, aux inspecteurs d'Académie et aux services de l'hygiène et de l'environnement. Ce guide se décompose en cinq parties. La première décrit les exigences sanitaires dans l'enseignement (opérations de nettoyage, exigence en terme de ventilation, mesures de construction et de rénovation), la situation dans les ateliers et les laboratoires et ainsi que l'influence du matériel informatique et bureautique sur la QAI. La deuxième partie décrit les polluants physiques, chimiques et biologiques influents : gaz inorganiques, formaldéhyde, composés organiques volatils et semi-volatils, poussières, fibres, microorganismes, allergènes,... Cette partie donne les informations fondamentales (sources, effets sanitaires) pour une meilleure compréhension des conséquences sanitaires de chaque polluant ou groupe de polluants. La partie suivante expose les exigences de construction et de ventilation pour les bâtiments scolaires. La quatrième partie traite de la façon d'agir en cas de plainte liée à la qualité de l'air intérieur ; elle

⁷ téléchargeable en allemand sur le site Internet du Ministère de l'Environnement Allemand : www.umweltbundesamt.de

donne des recommandations en s'appuyant sur des exemples concrets. Enfin, la dernière partie donne des indications sur les directives sanitaires générales concernant l'amiante, les PCB et le pentachlorophénol. Ces directives s'adressent à tous les types de bâtiments et donc aux bâtiments scolaires. Des actions sont proposées en cas de pollution de l'air par ces composés.

3.1.4 Italie et Hongrie

La coopération entre le Ministère de l'Environnement italien et le bureau hongrois du Centre environnemental régional de l'Europe Centrale et de l'Est a débouché sur la publication d'un guide intitulé « *Improving indoor air quality in schools* » [93]. Il comprend deux grandes parties, l'une portant sur les polluants, l'autre sur le nettoyage dans les écoles. Chaque partie est suivie d'exercices destinés aux responsables et professeurs d'écoles primaires (et secondaires). Ces exercices, réalisés par groupe, doivent conduire à l'élaboration d'actions visant à améliorer la qualité de l'air dans les établissements scolaires.

3.1.5 European Federation of Allergy and Airway Disease Patients Associations

L'EFA⁸ est une fédération de 41 associations européennes de patients réparties dans 23 pays fondée en 1991. Elle a récemment publié un livre intitulé « *Indoor Air Pollution in Schools* ». Après avoir détaillé les sources des polluants d'intérieur et décrit les effets sanitaires de la qualité de l'air, le guide donne une vue d'ensemble des études et initiatives concernant la qualité de l'air intérieur dans les écoles en Europe et outre-atlantique. Des recommandations pour un programme européen de recherche sont proposées. Enfin le guide reprend les grandes lignes du guide réalisé par le groupe de travail du bureau de l'International Society of Indoor Air Quality (voir partie 3.3).

3.2 Amérique du Nord

3.2.1 États-Unis

L'**US Environmental Protection Agency** (US-EPA) développe depuis le début des années 90 une stratégie de sensibilisation et de communication autour de la qualité de l'air intérieur en général et dans les écoles en particulier. On retrouve sur le site Internet de l'US-EPA⁹ de nombreuses rubriques et informations relatives à cette thématique. Afin de limiter les problèmes de qualité de l'air dans les écoles, de nombreux conseils et actions sont proposés, notamment pour la conception de l'école, le contrôle des sources de polluants, le choix et l'installation des systèmes de ventilation/chauffage/climatisation, la maintenance et la rénovation.

⁸ Site Internet de l'EFA www.efanet.org

⁹ www.epa.gov/iaq/schools/index.html

Par ailleurs, l'US-EPA met à la disposition des enseignants et du personnel des écoles un kit appelé **IAQ Tool's for Schools** regroupant des outils de prévention et de gestion des problèmes de QAI. Ce kit est constitué d'un ensemble de questionnaires et d'informations (sur supports papier et vidéo) permettant l'évaluation et la prévention des problèmes de QAI. Ce kit est basé sur une démarche en plusieurs étapes permettant la détection et la correction des problèmes de QAI les plus courants par le personnel enseignant lui-même. Avec le concours de diverses associations éducatives et sanitaires¹⁰, l'US-EPA encourage à l'utilisation de ce kit. Cela se traduit par l'attribution d'un prix (label de bonne QAI) aux établissements engagés dans la démarche et veillant ainsi à la bonne QAI.

L'US-EPA a également élaboré un **guide d'aide à la résolution des problèmes de moisissures** dans les écoles et les immeubles commerciaux¹¹ [94]. Ce guide, à l'origine conçu pour les professionnels en charge de l'entretien de ces bâtiments, peut servir de référentiel pour les professionnels de l'éradication de l'humidité et des moisissures. Un protocole détaillé d'intervention est proposé, en particulier en ce qui concerne l'évaluation de la situation, les méthodes de nettoyage et les actions correctives, les dispositifs pour la protection des occupants et des intervenants.

L'association des employés de l'éducation nationale américaine, la *National Education Association*, créée dans le milieu des années 90, regroupe 2,7 millions de professionnels. Elle a publié deux guides destinés aux gardiens : « **Take a deep breath and thank your custodian**¹² » [95]. Le premier, intitulé « *Develop a local Association IAQ Action Plan* », a pour but d'aider à la création de plans d'actions sur la QAI. Le second, « *Tips and Tools for Improving IAQ in Schools* », propose des outils, des moyens simples mais importants pour protéger et améliorer la qualité de l'air dans les écoles. Ce guide met l'accent sur :

- la prévention du développement des moisissures : détection précoce des moisissures ;
- la réduction des poussières et des allergènes : paillasons à l'entrée de l'école pour retenir les poussières transportées par les chaussures, utilisation d'aspirateurs équipés de microfiltres, ...
- le traitement des autres sources de polluants tels que le plomb, l'amiante et les COV. La *National Education Association* préconise de réduire l'utilisation de produits chimiques toxiques et d'utiliser les produits d'entretien dans les conditions fixées par le producteur et quand l'école est inoccupée.

Le **Département de la Santé de l'État de Washington** a élaboré en 1994 (révisé en 2003) un Manuel des Bonnes Pratiques pour la QAI dans les écoles¹³ (« **School Indoor Air Quality, Best Management Practices Manual** ») [96]. Ce manuel, à

¹⁰ American Federation of Teachers, Association of School Business Officials, Council of American Private Education, National Education Association, National Parent Teachers Association, American Lung Association

¹¹ téléchargeable sur le site de l'US-EPA : www.epa.gov/iaq/molds/images/moldremediation.pdf

¹² téléchargeables à l'adresse : <http://neahin.org/programs/environmental/IAQ.custodian.guide.pdf>

¹³ disponible à l'adresse : www.doh.wa.gov/ehp/ts/iaq.htm

destination de l'ensemble du personnel des écoles, des architectes et ingénieurs, des autorités locales, a pour objectif l'obtention d'une bonne QAI dans les écoles de l'État. Il met l'accent sur les pratiques à suivre tout au long de la vie de l'école de son élaboration à sa rénovation. Des protocoles et des documents de référence sont proposés pour l'investigation et le traitement des plaintes et des problèmes qui pourraient apparaître. Ce guide se décompose en plusieurs chapitres. Le chapitre 2 discute de l'importance du management de la QAI et des conséquences d'une mauvaise QAI dans les écoles. Le troisième chapitre présente les facteurs influençant la QAI. Les chapitres 4 à 11 présentent les pratiques recommandées dans le cadre de l'implantation, de la conception, de la construction, des travaux, de la maintenance et du contrôle des sources de pollutions. Enfin, le chapitre 12 fournit les contacts utiles et des références sur le sujet.

L'**État du Minnesota** a publié en novembre 2001 un **guide pour l'éradication des pollutions microbiologiques dans les écoles**¹⁴ [97]. Destiné aux gestionnaires d'établissements scolaires, ce guide conçu en 6 étapes va de la détection d'un problème sanitaire lié à la présence de moisissures à son éradication :

- 1) contact avec le coordinateur de la QAI de l'école (chaque école publique du Minnesota doit en avoir un) ;
- 2) évaluation du fond du problème en suivant le Plan de Management de la QAI pour apprécier la situation et formuler les premières hypothèses ;
- 3) investigation ;
- 4) élimination des moisissures (le guide note qu'il n'existe pas de consensus dans la communauté scientifique sur l'éradication des moisissures) ;
- 5) recours à un professionnel pour l'investigation des sources d'humidité (si la source du problème n'a pas pu être identifiée ou éliminée par le personnel du district) ;
- 6) recours à un professionnel pour l'investigation des moisissures ;

Un second guide (même intitulé) réalisé en 2003, met plus particulièrement l'accent sur différentes méthodes d'élimination pratiques, efficaces et rentables. Après un point sur la communication, paramètre essentiel dans la gestion du problème, les parties suivantes expliquent comment évaluer et utiliser les résultats de l'investigation, déterminer l'étendue du problème, choisir les pratiques correctives et évaluer l'efficacité du projet de retenu.

L'**État du Maine** a également élaboré un document sur les bonnes pratiques pour la QAI dans les écoles [98]. Il fait des recommandations sur la ventilation, sur le contrôle des moisissures, des polluants et de leurs sources (poussières, produits d'entretien, animaux, tabagisme) et sur la maintenance préventive des écoles.

Le **Département de la Santé de Californie** a publié des **recommandations pour la réduction du taux de formaldéhyde dans les écoles** [99]. Ces recommandations sont applicables lorsque la teneur en formaldéhyde est élevée (>27 ppb). La première étape est de réduire les sources en évitant les produits en bois aggloméré et les produits d'entretien toxiques, tout en s'assurant que les appareils de combustion sont

¹⁴ téléchargeable sur www.health.state.mn.us/divs/eh/indoorair/schools/index.html

correctement reliés à l'extérieur. Il faut que la ventilation soit suffisante. Pour cela il convient de vérifier le taux de renouvellement de l'air et le fonctionnement du système de ventilation pendant les heures de cours, de laisser les fenêtres et portes ouvertes le plus souvent possible, de s'assurer que la température et l'humidité relative soient correctes (environ 22°C et 30 à 50 %) afin de limiter les émissions de formaldéhyde.

3.2.2 Canada

La Centrale de l'Enseignement du Québec et la Fédération des Commissions Scolaires du Québec ont conçu, en collaboration avec le Centre de Santé Publique du Québec, un « *Guide de prévention et d'intervention sur la qualité de l'air en milieu scolaire*¹⁵ » [76]. Ce guide, remis à jour en 2000, vise à rendre les équipes de prévention et d'intervention chargées de la santé et la sécurité du travail de chaque commission scolaire, ainsi que le personnel et la direction de chaque établissement, aptes à :

- percevoir l'importance de maintenir une bonne QAI afin d'assurer la qualité du milieu de travail ;
- connaître les moyens de conserver une bonne qualité de l'air intérieur en milieu scolaire ;
- dépister rapidement des situations problématiques, en matière de santé ou d'environnement de travail, liées à la qualité de l'air intérieur ;
- savoir identifier un problème de QAI sérieux et urgent dans le milieu scolaire et avoir recours à une expertise adéquate ;
- élaborer des stratégies d'intervention pour prévenir ou corriger certaines situations néfastes pour la santé et la sécurité des occupants.

Ce guide est inspiré de la démarche proposée par le guide méthodologique *IAQ tool's for schools* de l'US-EPA. Il a été adapté à la situation canadienne, plus particulièrement à celle du Québec. La formation d'une équipe de prévention et d'intervention y est également proposée. Cette équipe doit privilégier deux approches distinctes mais complémentaires : prévention et intervention. La prévention doit viser prioritairement la mise en place d'un programme d'entretien préventif des équipements de chauffage, de ventilation et de conditionnement de l'air lorsqu'ils existent. Le rôle d'intervention, quant à lui, peut se baser sur les 6 étapes suivantes, chacune étant détaillée et étayée par différents questionnaires et guides :

1. La vérification de la plainte et l'analyse des solutions retenues,
2. La réalisation du diagnostic environnemental,
3. L'étude des plaintes déjà enregistrées,
4. L'investigation systématique des symptômes,
5. Le suivi de la mise en œuvre de solutions,
6. Le recours à des sources expertes.

Le **Comité consultatif fédéral-provincial de l'hygiène du milieu et du travail** canadien a élaboré un « **Guide de l'employé concernant la qualité de l'air dans les**

¹⁵ www.csq.qc.net/travail/secusoc/qualair.htm

bureaux, les écoles et les hôpitaux¹⁶ » [100]. Le document expose tout d'abord les effets d'une mauvaise QAI, les facteurs qui influent sur l'air ambiant et insiste sur la nécessité d'une bonne communication pour résoudre les problèmes de QAI. La deuxième partie présente une façon simplifiée d'effectuer une enquête sur la qualité de l'air en répondant à un certain nombre de questions. Les réponses données permettront ainsi d'avoir une idée de la ou des causes probables des plaintes. Ces hypothèses peuvent ensuite être vérifiées grâce aux renseignements plus détaillés donnés sur les causes probables. Pour le cas où la cause reste introuvable, il faudra probablement faire appel à un expert ; la dernière partie contient certains conseils pratiques sur la manière de choisir un expert-conseil.

A l'instar de l'outil américain *Tools for Schools*, un guide adapté aux écoles canadiennes est proposé depuis Mars 2003 par **Santé Canada** [101]. Cette « **Trousse d'action pour les écoles canadiennes**¹⁷ » est un guide méthodologique d'intervention, complet et pratique, destiné aux commissions scolaires, aux directeurs et leurs équipes d'administration, aux employés. Cette trousse fournit une méthode et des outils pour aider les écoles à prévenir, identifier, évaluer et répondre à la majorité des problèmes d'air intérieur. Après une présentation générale de la problématique et des stratégies de contrôles de base, l'intégralité de la démarche à suivre en fonction du problème identifié est précisément explicitée (qui informer ? de quelle manière ? quel groupe d'intervention constituer ? comment coordonner les actions ?). Des fiches décrivant les protocoles à suivre, ou des « listes de contrôle » concernant le traitement de l'air, la salle de classe, la salle de classe en préfabriqué, le service d'entretien, la surveillance, le service alimentaire et la gestion des déchets sont proposées.

3.3 International Society of Indoor Air Quality, Task Force XII

Pour faire suite à une demande du bureau de l'International Society of Indoor Air Quality (ISIAQ) en 1995, un groupe de travail (Task Force XII) s'est constitué dans l'objectif de préserver la santé des enfants et d'assurer une ambiance intérieure saine garantissant de bonnes conditions d'apprentissage.

Les travaux du groupe ont notamment débouché sur la publication du rapport « **Creation of healthy indoor environment in schools** » en juin 2001 [102]. Ce document décrit comment l'environnement intérieur affecte la santé des enfants dans les écoles. Ce rapport rappelle les exigences de base pour une bonne QAI :

- contrôle de la pollution : éviter le tabagisme, moisissures, champignons, sources d'allergènes, utiliser de préférence les matériaux ayant de faibles taux d'émission ;
- contrôle de la température et de l'humidité relative ;
- ventilation suffisante ;

¹⁶ www.hc-sc.gc.ca/hecs-sesc/qualite_air/publicationsgen.htm

¹⁷ téléchargeable sur www.hc-sc.gc.ca/hecs-sesc/qualite_air/publications/outils_ecole/tdm.htm

- exigences techniques : éviter la présence d'animaux, éviter les sols en moquette, utiliser un vestiaire voire des chaussures d'intérieur, suivre les procédures de nettoyage adaptées, avoir des systèmes de ventilation efficaces,...
- exigences organisationnelles.

L'un des chapitres décrit comment des environnements sains peuvent être créés grâce à la maintenance. Il reprend largement le document suédois « *The six steps towards allergy free day care centers and school* ». Différents niveaux d'intervention sont proposés : prévention ou actions correctives, sachant qu'une inspection des lieux et un questionnaire précèdent toute mesure ou intervention.

3.4 Synthèse

Les **guides de gestion de la qualité de l'air intérieur dans les écoles** sont de plus en plus nombreux depuis le début des années 90, date d'apparition des premiers. Ces guides peuvent concerner le maintien d'une bonne QAI dans les écoles exclusivement ou dans plusieurs types de locaux (écoles, collèges, lycées, bureaux, immeubles commerciaux,...). Ils s'adressent à un **large public**, allant des architectes aux professeurs en passant par les directeurs, le personnel d'entretien, les élèves et leurs parents.

La plupart des guides traite de la QAI dans sa globalité, c'est-à-dire de l'**ensemble des polluants** organiques, inorganiques, biologiques (sources et effets sanitaires, solutions pour les diminuer voire les supprimer). Certains guides sont **plus spécifiques** et se concentrent sur un polluant en particulier (moisissures, allergènes ou formaldéhyde, par exemple). Des **polluants** pour lesquels parallèlement on trouve dans la littérature scientifique **peu de travaux spécifiques aux écoles**, peuvent faire l'objet de recommandations. C'est le cas notamment pour les pesticides pour lesquels l'US-EPA recommande un usage réduit au strict minimum dans des pièces inoccupées et ventilées.

Ces guides abordent en général **toutes les étapes de la vie du bâtiment scolaire** car le maintien d'une bonne qualité de l'air intérieur doit être pris en compte dès la conception et la construction de l'école. Généralement, ils proposent à la fois des actions de **prévention**, d'**intervention** et une méthodologie d'**investigation** à suivre en cas de survenue d'un problème de qualité d'air intérieur.

La **quasi-totalité des pays**, où la qualité de l'air intérieur fait l'objet de travaux de recherche, ont élaboré des guides de gestion par l'intermédiaire, soit des ministères concernés, soit des associations impliquées dans ce domaine. La **France**, quant à elle, ne dispose pas d'un tel guide de gestion de la qualité de l'air intérieur dans les écoles. Pourtant, celle-ci fait de plus en plus souvent l'objet de plaintes dans les écoles maternelles et primaires françaises. Il apparaît donc urgent de rédiger un guide offrant, aux directeurs et gestionnaires des écoles notamment, des solutions efficaces, faciles à mettre en œuvre et rentables pour maintenir ou retrouver une qualité de l'air intérieur acceptable dans leurs établissements.

4 PERSPECTIVES

4.1 Données à collecter pour une meilleure connaissance de la qualité de l'air intérieur dans les écoles françaises

Deux domaines peuvent faire l'objet d'une meilleure connaissance dans les écoles maternelles et primaires françaises :

- les niveaux d'exposition des élèves ;
- les déterminants de l'exposition des élèves.

Selon l'objectif retenu, les données à recueillir et, par conséquent, les études à mener seront différentes.

Si l'on désire améliorer la connaissance sur les niveaux d'exposition des élèves dans les écoles françaises, une enquête de grande envergure doit être menée ; de nombreuses mesures de polluants pertinents devront être réalisées dans un grand nombre d'écoles afin d'obtenir des résultats représentatifs.

Dans le deuxième cas, un nombre restreint d'écoles doit être investigué de manière la plus complète possible, dans l'objectif de cerner les sources de pollution : mesures des taux d'émission du mobilier et des produits utilisés pour l'entretien et les activités scolaires

Avant d'effectuer l'une ou l'autre de ces études, il convient de mieux connaître la nature du parc des écoles maternelles et primaires françaises et les activités spécifiques.

4.1.1 Données sur les écoles en elles-mêmes

Les données concernant les écoles pourront être recueillies par questionnaires. Ceux-ci seront envoyés soit aux services techniques des villes pour ce qui concerne la partie « description du parc » soit au directeur de l'école pour la partie sur les activités et pratiques intrinsèques à l'école.

Les questionnaires permettront de collecter les renseignements suivants :

→ Questionnaire « Description du parc »

- localisation de l'école
- statut de l'école : publique/privée, communale/intercommunale, ...
- environnement : urbain/rural/résidentiel/industriel, proche d'une route à fort trafic, un parking ou d'une gare routière (à moins de 500m)
- date de construction, surface au sol
- type de construction : traditionnelle, préfabriquée, nombre d'étages, type de fenêtres (double ou simple vitrage, PVC, ...)

- rénovations éventuelles : date, causes, nature (peinture, moquette, tapisserie, mobilier, agrandissement) ...
- équipements : ventilation (ventilation mécanique contrôlée, ventilation naturelle, bouches d'extraction et/ou d'insufflation), climatisation, source de chauffage (énergie : gaz ou électricité ; type de chauffage : radiateurs, chauffage central)...
- présence d'un internat, d'une cantine
- nombre de classes de maternelles et de primaires
- nombre d'élèves par classe
- autres données

Le recueil de ces informations permettra d'obtenir des données nationales afin de constituer un échantillon représentatif des écoles françaises. En effet, si pour les logements il existe des données détaillées et fiables décrivant les bâtiments et les ménages à l'échelle nationale (recensement INSEE de 1999, fichier FILOCOM¹⁸ 2001) il n'en est pas de même pour les établissements scolaires.

→ Questionnaire « Eléments complémentaires sur les activités et les pratiques au sein de l'école »

Ce questionnaire devra permettre de récolter les informations suivantes :

- présence d'animaux, de plantes vertes dans les salles de classe
- activités manuelles des élèves : fréquence, produits utilisés, lieu de déroulement des activités (salle de classe ou salle réservée à ces activités)
- entretien : technique (balayage à sec, aspirateur, rinçage ou non,...), fréquence, durée et produits utilisés
- mobilier : âge, type (bois, contreplaqué, PVC,...)
- sol : linoléum, carrelage, moquette
- murs, rideaux
- décoration de la salle de classe : affichage des dessins, collages ou objets confectionnés par les élèves ?
- les différents produits (activités scolaires et entretien) sont-ils achetés *via* une centrale d'achat ?

Cette enquête permettra de mieux connaître les pratiques et l'aménagement des écoles françaises et d'orienter les recherches sur les déterminants de la pollution.

¹⁸ Fichier fiscal constitué par la Direction Générale des Impôts pour le Ministère chargé de l'Équipement recensant tous les logements français soumis à la taxe d'habitation et regroupant des informations sur le logement (superficie, durée d'occupation,...) et sur les occupants (propriétaire/locataire, résidence principale ou secondaire,...).

4.1.2 Données sur les niveaux d'exposition aux polluants

Afin de connaître les niveaux d'exposition des écoliers français, une campagne à grande échelle pourra être menée. Les données sur les polluants pourront alors être interprétées et extrapolées tout en réduisant les biais.

Au regard de la littérature, il serait intéressant de mesurer un certain nombre de polluants :

- NO₂ ou NO_x : indicateurs de pollution extérieures
- COV (benzène, formaldéhyde, éthers de glycol) : plus concentrés à l'intérieur qu'à l'extérieur
- allergènes : chats, chiens, acariens, rongeurs,...
- moisissures
- charges bactérienne et fongique : plus élevées que dans les logements
- particules (PM_{2,5} et PM₁₀) : plus élevées que dans les logements
- Fibres Minérales Artificielles
- Biocides, retardateurs de flamme : présents mais peu étudiés

En plus de ces polluants, la qualité de l'ambiance intérieure pourra être estimée par la mesure :

- du CO₂ en tant qu'indicateur de confinement
- de l'humidité relative
- de la température

4.1.3 Données sur les déterminants de l'exposition dans les écoles

Dans le cadre de l'identification des déterminants de l'exposition des enfants dans les écoles, les mêmes mesures préconisées précédemment peuvent être réalisées dans un nombre réduit d'écoles. A ces mesures s'ajouteront :

- une étude détaillée des activités au sein de la salle de classe (budget espace-temps-activités) pour pouvoir mettre en relation les variations des concentrations des polluants mesurés et les activités du moment ;
- une étude approfondie des produits d'entretien utilisés : composition, substances émises,... (les résultats de cette étude pourront rendre nécessaire la mesure de polluants spécifiques dans l'air des salles de classe) ;
- une étude approfondie du mobilier, du revêtement des murs et des sols : type, mesures d'émission...

4.2 Proposition d'actions pour la prévention et la gestion de la qualité de l'air intérieur dans les écoles maternelles et primaires en France

A l'instar de nombreux pays, la France doit élaborer rapidement un guide de gestion pour la qualité de l'air intérieur dans les écoles maternelles et primaires françaises. Ce guide regroupera des bonnes pratiques pour la qualité de l'air intérieur dans les écoles. Ces mesures de gestion et de prévention des risques sanitaires peuvent être appliquées lors dès l'élaboration, la construction et l'aménagement de l'école et lors de son utilisation. Des démarches d'investigation et d'intervention en cas de survenue d'un problème de qualité d'air intérieur pourront également être proposées. Il est important de rappeler que la prévention de la QAI concerne de nombreuses personnes : architectes, direction, professeurs, personnel encadrant et d'entretien...

4.2.1 Durant la conception et la construction de l'école

La prévention du maintien d'une bonne qualité de l'air intérieur dans l'école commence dès son élaboration du bâtiment. Ainsi plusieurs aspects peuvent être considérés :

- choix du lieu d'implantation
- choix de matériaux, de mobiliers ayant de faibles taux d'émissions de composés chimiques
- suivi d'une démarche Haute Qualité Environnementale
- prévoir une aération du bâtiment efficace
- conception de l'école :
 - adaptée aux activités (pièces réservées aux activités manuelles avec une ventilation plus spécifique, par exemple)
 - visant à réduire l'humidité (toit en pente, protection des ouvrants, inclinaison du terrain entourant l'école permettant l'évacuation des eaux de pluie vers l'extérieur,...)

4.2.2 Actions de prévention durant la « vie » de l'école

Quelques actions de prévention peuvent être menées durant la « vie » de l'école, c'est-à-dire dès sa mise en service. Cette liste d'action n'est pas exhaustive.

- Sensibilisation du personnel enseignant, d'encadrement et d'entretien ;
- Choix et utilisation de produits respectueux de la QAI (mobiliers, travaux manuels, entretien) : cahier des charges plus exigeant dans ce domaine ;
- Réception de la qualité de l'air intérieur et des systèmes de ventilation après la construction ou la réalisation de travaux et avant l'ouverture de l'école aux élèves ;
- Audit de la qualité de l'air intérieur dans les écoles de façon régulière selon un référentiel (une Norme AFNOR « Audit de la qualité de l'air dans les locaux non-

industriels – Bâtiments à usage d'enseignement » est actuellement en cours d'élaboration) ;

- Entretien préventif régulier des systèmes de ventilation et suivi de cet entretien ;
- Nettoyage des salles de classes lorsque la ventilation fonctionne ou avec les fenêtres ouvertes, en l'absence des élèves, de préférence le soir ; les teneurs en composés chimiques dans l'air éventuellement élevées suite au nettoyage doivent avoir le temps de redescendre à un niveau acceptable avant l'arrivée des enfants, ceci grâce à la ventilation (mécanique ou naturelle) ;
- Emploi limité et raisonné des biocides ;
- Mesures visant à réduire l'apport de poussières : larges paillasons à l'entrée de l'école, utilisation de vestiaires,...
- Mieux identifier les interlocuteurs (nommer un coordinateur de la QAI au niveau de l'école ou de la commune)

4.2.3 En cas de survenue de problèmes de qualité de l'air intérieur

Lors de la survenue d'un problème de qualité d'air dans l'école, un audit doit être mené afin d'identifier la ou les pièces où les symptômes apparaissent, les polluants et les sources potentielles incriminés. Pour cela, un examen visuel approfondi est nécessaire. Si les causes du problème n'ont pas pu être identifiées de cette manière, un protocole de prélèvements et d'analyses à l'intérieur et à l'extérieur de la pièce devra être établi. La norme AFNOR en préparation (« Audit de la qualité de l'air dans les locaux non-industriels – Bâtiments à usage d'enseignement ») guidera cette investigation.

L'intervention d'un Conseiller en Environnement Intérieur ou d'experts peut aider les responsables des écoles maternelles et primaires dans la résolution du problème de qualité d'air intérieur.

CONCLUSION

L'analyse approfondie des études portant sur la qualité de l'air dans les écoles a permis de dégager certaines spécificités concernant les polluants. De manière générale, les polluants recherchés dans les écoles le sont aussi dans les logements et les bureaux. Toutefois, les niveaux d'exposition diffèrent. Les teneurs en COV, en formaldéhyde et celles des composés influencés par l'occupation humaine (CO₂, particules, charge bactérienne, allergènes ...) sont plus élevées dans les écoles. On peut distinguer deux groupes de polluants : ceux dont la concentration est généralement plus élevée à l'intérieur (particules, COV, aldéhydes, allergènes d'animaux,...) et ceux dont la concentration intérieure est plus faible (NOx, CO,...). Il est important de souligner que l'environnement extérieur de l'école (proximité d'une zone à fort trafic routier, zone industrielle) influence fortement les concentrations intérieures. Il a été constaté que certains polluants d'intérêt, mesurés dans les logements, ne sont que peu ou pas étudiés dans les établissements scolaires ; c'est le cas notamment des éthers de glycol et des retardateurs de flamme.

Sur le plan occupationnel et structurel, les écoles se distinguent des logements et des bureaux par une densité d'occupation et de mobilier importante. Contrairement aux bureaux, les systèmes de ventilation sont peu répandus dans les écoles maternelles et primaires françaises. Le nettoyage est beaucoup plus fréquent que dans les logements et les bureaux. Tout comme celui-ci, les activités scolaires nécessitent l'utilisation, parfois en quantité élevée, de produits particuliers (craies, feutres, colles, peintures,...). Ces produits dégagent dans l'air des composés néfastes pour la santé des élèves mais aussi pour leur concentration et leurs performances scolaires.

Afin de maintenir un environnement sain indispensable pour l'apprentissage des élèves, de très nombreux pays ont élaboré des guides destinés soit à la gestion soit à l'expertise de la qualité de l'air et de ses problèmes dans les écoles. De manière générale, ces guides s'adressent à tous les acteurs impliqués dans la vie de l'école, en tant que bâtiment (architectes, ingénieurs,...) et lieu d'enseignement (direction, professeurs, élèves, parents,...). Bien que les plaintes pour mauvaise qualité de l'air intérieur se multiplient dans les écoles du territoire, la France ne dispose pas d'un tel outil.

Dans le but de mieux connaître l'exposition des enfants dans les écoles maternelles et primaires françaises, le recueil de données sur la typologie des écoles et sur les activités est indispensable. L'étude approfondie de quelques écoles représentatives du parc devrait permettre de mieux cerner les déterminants de l'exposition dans les écoles. Ces études permettraient de mieux évaluer les risques sanitaires pouvant être encourus par les enfants dans ces microenvironnements. Enfin, l'élaboration d'un guide permettrait la mise en place d'actions de prévention, aussi bien lors de l'élaboration que pendant l'utilisation de l'école. Ce guide permettrait également aux responsables de mieux déceler et gérer un problème de qualité de l'air dans leur établissement.

Une action prioritaire du Plan National Santé-Environnement porte sur la « connaissance des déterminants de la QAI » (action 14). L'action 29, quant à elle concerne la « Qualité des bâtiments accueillant des enfants ». Un groupe de travail animé par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable est chargé de la mise en œuvre de cette action. De plus, un groupe de travail piloté par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur doit prochainement se pencher sur "les lieux fréquentés par les enfants". Le programme d'actions sera défini pour fin 2005 – début 2006. A ce titre, la présente étude bibliographique et ses conclusions sont un point de départ pour la réflexion future et la définition d'objectifs précis.

Bibliographie

1. *Plan National Santé Environnement*, 2004. Ministère de la Santé et de la Protection sociale, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Ministère de l'Emploi, du Travail et de la Cohésion, sociale Ministère délégué à la Recherche.
2. Education Nationale Française, *Repères et Références Statistiques sur les enseignements, la formation et la recherche - Edition 2004*, 2004. 361p.
3. Fédération des Commissions scolaires au Québec Régie Régionale de la santé et des services sociaux de Québec Direction de la Santé Publique, *Guide de prévention et d'intervention sur la qualité de l'air en milieu scolaire*, 2000. 40p.
4. Corsi R. L., Torres V. M., Sanders M., et al. Carbon dioxide levels and dynamics in elementary schools : Results of the TESIAs study. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.74-79
5. Shendell D. G., Prill R., Fisk W. J., et al. Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, October 2004, vol.14, n°5, pp.333-341
6. Kirchner S., Pasquier N., Gauvin S., et al., *Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, Rapport Exécutif "De la phase préparatoire aux premiers résultats de l'étude pilote"*, 2002. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
7. Segala C., Guillam M.-T. and Nedellec V. Polluants mesurés, niveaux de concentrations et enseignement de la campagne pilote de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur: Apport d'une ré-analyse des données. *Journée Scientifique Qualité de l'Air Intérieur dans les Ecoles*, 4 Juillet 2005, Paris,
8. Collignan B. and Ribéron J., *Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur - Rapport d'actions - Chapitre I: Exploitation des données de la campagne pilote - Titre 5: "Méthodologie d'analyse des données pour l'évaluation du renouvellement d'air et des risques de condensation"*, 2002. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
9. Ribéron J., Derangère D., Kirchner S., et al., *Etude de la qualité de l'air dans les locaux d'enseignement - Rapport final*, 2000. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
10. Ribéron J., O'Kelly P., Maupetit F., et al. Indoor air quality in schools: the impact of ventilation conditions and indoor activities. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis),
11. World Health Organization Regional Office for Europe, *Air Quality Guidelines for Europe*, 2000. Copenhagen.
12. Kim C., Lim Y., Yang J., et al. Effect of indoor CO₂ concentrations on wheezing attacks in children. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.492-497
13. Chaloulakou A. and Mavroidis I. Comparison of indoor and outdoor concentrations of CO at a public school. Evaluation of an indoor air quality model. *Atmospheric Environment*, 2002, vol.36, n°11, pp.1769-1781
14. Mosqueron L. and Nedellec V., *Inventaire des données françaises sur la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments*, 2001. Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur. 173p.
15. Mosqueron L., Kirchner S. and Nedellec V. Bilan des études françaises sur la mesure de la qualité de l'air intérieur des bâtiments (1990-2001). *Environnement, Risques & Santé*, Mars-Avril 2002, vol.1, pp.31-41
16. Pilotto L. S., Douglas R. M., Attewell R. G., et al. Respiratory effects associated with indoor nitrogen dioxide exposure in children. *International Journal of Epidemiology*, August 1997, vol.26, n°4, pp.788-796
17. Annesi-Maesano I., *Etude de l'impact de la pollution de l'air à l'intérieur et à l'extérieur des locaux sur la santé respiratoire et allergique de l'enfant dans des*

- zones contrastées de la France. *L'Etude des six villes. Premiers résultats*, Groupe ISAAC II - France.
18. Mosqueron L. and Nedellec V., *Inventaire des données françaises sur la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments : actualisation sur la période 2001-2004*, 2004. Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur. 61p.
 19. Atmos'air Bourgogne, *Qualité de l'air intérieur : mesures, analyses et recherches sur l'origine et la toxicité des polluants*, 2003. Atmos'air Bourgogne.
 20. Ravel D., *Evaluation de la qualité de l'air intérieur dans quelques lieux publics en Bourgogne*, 2002. Ecole Nationale de Santé Publique et Atmos'air Bourgogne. 87p.
 21. Blondeau P., Iordache V., Poupard O., et al. Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools. *Indoor Air*, Januar 2005, vol.15, n°1, pp.2-12
 22. Poupard O., Blondeau P., Iordache V., et al. Statistical analysis of parameters influencing the relationship between outdoor and indoor air quality in schools. *Atmospheric Environment*, April 2005, vol.39, n°11, pp.2071-2080
 23. European Federation of Asthma and Allergy Associations EFA, *Indoor Air Pollution in Schools*, 2001.
 24. Stridh G., Andersson H., Linder B., et al. Total dust exposure and size distribution of airborne particles in day-care centers, schools and offices. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.97-102
 25. Yip F. Y., Keeler G., Dvonch J. T., et al. Personal exposures to particulate matter among children with asthma in Detroit, Michigan. *Atmospheric Environment*, 2004, vol.38, pp.5227-5236
 26. Shaughnessy R., Turk B., Evans S., et al. Preliminary study of flooring in school in the U.S.: airborne particulate exposures in carpeted vs. uncarpeted classrooms. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.974-979
 27. Campopiano A., Casciardi S., Fioravanti F., et al. Airborne asbestos levels in school buildings in Italy. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, April 2004, vol.1, n°4, pp.256-261
 28. Adgate J. L., Church T. R., Ryan A. D., et al. Outdoor, indoor, and personal exposure to VOCs in children. *Environmental Health Perspectives*, October 2004, vol.112, n°14, pp.1386-1392
 29. Guo H., Lee S. C., Chan L. Y., et al. Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments. *Environmental Research*, 2004, vol.94, pp.57-66
 30. Shendell D. G., Winer A. M., Stock T. H., et al. Air concentrations of VOCs in portable and traditional classrooms: Results of a pilot study in Los Angeles County. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2004, vol.14, pp.44-59
 31. Hodgson A. T., Shendell D. G., Fisk W. J., et al. Comparison of predicted and derived measures of volatile organic compounds inside four new relocatable classrooms. *Indoor Air*, 2004, vol.14, pp.135-144
 32. Wilke O., Jann O. and Brodner. VOC-and SVOC-emissions from adhesives, floor coverings and complete floor structures. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.963-967
 33. Guo H., Lee S. C., Li W. M., et al. Source characterization of BTEX in indoor microenvironments in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 2003, vol.37, pp.73-82
 34. Association pour la Surveillance et l'Etude de la Pollution Atmosphérique en Alsace (ASPA), *Campagne de mesure du formaldéhyde dans les établissements scolaires et d'accueil de la petite enfance de la ville de Strasbourg : bilan des niveaux mesurés*, 2005.
 35. Koch H. M., Drexler H. and Angerer J. Internal exposure of nursery-school children and their parents and teachers to di(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP). *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, September 2004, vol.207, pp.15-22

36. Herrick R. F., McClean M. D., Meeker J. D., et al. An unrecognized source of PCB contamination in schools and other buildings. *Environmental Health Perspectives*, July 2004, vol.112, n°10, pp.1051-1053
37. Liebl B., Schettgen T., Kersch G., et al. Evidence for increased internal exposure to lower chlorinated polychlorinated biphenyls (PCB) in pupils attending a contaminated school. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, September 2004, vol.207, n°4, pp.315-324
38. Schwenk M., Gabrio T., Pöpke O., et al. Human biomonitoring of polychlorinated biphenyls and polychlorinated dibenzodioxins and dibenzofuranes in teachers working in a PCB-contaminated school. *Chemosphere*, 2002, vol.47, n°2, pp.229-233
39. Karwowska E. Microbiological Air Contamination in Some Educational Settings. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2003, vol.12, n°2, pp.181-185
40. Scheff P. A., Paulius V. K., Huang S. W., et al. Indoor air quality in a middle school, Part I: Use of CO₂ as a tracer for effective ventilation. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, November 2000, vol.15, n°11, pp.824-834
41. Comité régional d'éducation pour la santé Languedoc Roussillon and Observatoire régional de la santé Languedoc Roussillon, *Analyse et synthèse bibliographiques "Habitat - Mode de vie - Santé respiratoire"*, 2001. 31p.
42. Environment Australia, *State of Knowledge Report : Air Toxics and Indoor Air Quality in Australia*, 2001.
43. Bardana E. J. J. Indoor pollution and its impact on respiratory health. *Annals of Allergy Asthma & Immunology*, December 2001, vol.87, pp.33-40
44. Ritz B. R., Hoelscher B., Frye C., et al. Allergic sensitization owing to 'second-hand' cat exposure in schools. *Allergy*, 2002, vol.57, n°4, pp.357-361
45. Munir A. K., Einarsson R. and Dreborg S. Variability of airborne cat allergen, Fel d1, in a public place. *Indoor Air*, December 2003, vol.13, n°4, pp.353-358
46. Sarpong S. B., Wood R. A., Karrison T., et al. Cockroach allergen (Bla g 1) in school dust. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, April 1997, vol.99, n°4, pp.486-492
47. Kalliokoski P., Lignell U., Meklin T., et al. Comparison of airborne microbial levels in school kitchen facilities and other school areas. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.444-448
48. Toivola M., Nevalainen A. and Alm S. Personal exposures to particles and microbes in relation to microenvironmental concentrations. *Indoor Air 2004*, 2004, pp.351-359
49. Koivisto J., Haverinen U., Meklin T., et al. Occurrence and characteristics of moisture damage in school buildings. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.473-476
50. Meklin T., Hyvarinen A., Toivola M., et al. Effect of building frame and moisture damage on microbiological indoor air quality in school buildings. *Aiha Journal*, Januar-Februar 2003, vol.64, n°1, pp.108-116
51. Meklin T., Reponen T., Toivola M., et al. Size distributions of airborne microbes in moisture-damaged and reference school buildings of two construction types. *Atmospheric Environment*, December 2002, vol.36, n°39-40, pp.6031-6039
52. Meklin T., Husman T., Vepsäläinen A., et al. Indoor air microbes and respiratory symptoms of children in moisture damaged and reference schools. *Indoor Air*, September 2002, vol.12, n°3, pp.175-183
53. Husman T., Meklin T., Vahteristo M., et al. Respiratory infections among children in moisture damaged schools. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.484-487
54. Cooley J., Wong W., Jumper C., et al. Correlation between the prevalence of certain fungi and Sick Building Syndrom. *Occup Environ Med*, 1998, vol.55, pp.579-584
55. Meklin T., Husman T., Pekkanen J., et al. Effects of moisture damage repair on microbial exposure and health effects in schools. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.416-420

56. Douwes J. (1->3)- β -D-glucans and respiratory health: a review of the scientific evidence. *Indoor Air 2005*, 2005, vol.15, pp.160-169
57. Rylander R., Norrhall M., Engdahl U., et al. Airways Inflammation, Atopy, and (1-3)-beta-D-Glucan Exposures in Two Schools. *American Journal of Respiratory and Critical Care*, 1998, vol.158, pp.1685-1687
58. Hyvarinen A., Husman T., Laitinen S., et al. Microbial exposure and mold-specific serum IgG levels among children with respiratory symptoms in 2 school buildings. *Archives of Environmental Health*, May 2003, vol.58, n°5, pp.275-283
59. Rudblad S., Andersson K., Stridh G., et al. Persistent increased sensitivity of the nasal mucous membranes several years after exposure to an indoor environment with moisture problems. *Indoor Air 99 - The 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 1999, Edinburg (Scotland), vol.5, pp.489-494
60. Rudblad S., Andersson K., Stridh G., et al. Slowly decreasing mucosal hyperreactivity years after working in a school with moisture problems. *Indoor Air*, 2002, vol.12, n°2, pp.138-144
61. Rudblad S., Andersson K., Bodin L., et al. Nasal mucosal histamine reactivity among teachers six years after working in a moisture-damaged school. *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*, Februar 2005, vol.31, n°1, pp.52-58
62. Bartlett K. H., Kennedy S. M., Brauer M., et al. Evaluation and determinants of airborne bacterial concentrations in school classrooms. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, October 2004, vol.1, n°10, pp.639-647
63. Liu L.-J. S., Krahmer M., Fox A., et al. Investigation of the Concentration of Bacteria and Their Cell Envelope Components in Indoor Air in Two Elementary Schools. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, vol.50, pp.1957-1967
64. Wady L., Shehabi A., Szponar B., et al. Heterogeneity in microbial exposure in schools in Sweden, Poland and Jordan revealed by analysis of chemical markers. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, July 2004, vol.14, n°4, pp.293-299
65. Mi Y., Elfman L., Eriksson S., et al. Indoor allergens in schools: a comparison between Sweden and China. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.449-454
66. Rullo V. E., Rizzo M. C., Arruda L. K., et al. Daycare centers and schools as sources of exposure to mites, cockroach, and endotoxin in the city of Sao Paulo, Brazil. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, October 2002, vol.110, n°4, pp.582-588
67. Foarde K. and Berry M. Comparison of biocontaminant levels associated with hard vs. carpet floors in nonproblem schools: Results of a year long study. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, April 2004, vol.14, pp.S41-S48
68. Smedje G. and Norbäck D. Factors affecting the concentration of pollutants in school buildings. *Indoor Air 99 - The 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 1999, Edinburgh (Scotland), vol.1, pp.267-271
69. Smedje G. and Norbäck D. Irritants and Allergens at School in Relation to Furnishing and Cleaning. *Indoor Air*, 2001, vol.11, pp.127-133
70. Janssen N. A. H., Van Vliet P. H. N., Aarts F., et al. Assessment of exposure to traffic related air pollution of children attending schools near motorways. *Atmospheric Environment*, 2001, vol.35, n°22, pp.3875-3884
71. Sowa J. Air quality and ventilation rates in schools in Poland - requirements, reality and possible improvements. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis),
72. Ramachandran G., Adgate J. L., Church T. R., et al. Indoor air quality in two urban elementary schools : comfort parameters and microbial concentrations in air and carpets. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.461-466
73. Alarcon W., Calvert G., Blondell J., et al. Acute Illnesses Associated with Pesticide Exposure at Schools. *Journal of the American Medical Association*, July 2005, vol.294, n°4, pp.455-465

74. Rollin H., Mathee A., Levin J., et al. Blood manganese concentrations among first-grade schoolchildren in two South African cities. *Environmental Research*, Janvier 2005, vol.97, n°1, pp.93-99
75. Kvernes M., Gusten J., Dahl A., et al. Pollen allergen concentrations in a pre-school. *Indoor Air 99 - The 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 1999, Edinbourg (Scotland), vol.1, pp.279-284
76. Centrale de l'Enseignement du Québec Fédération des Commissions scolaires du Québec Centre de Santé Publique du Québec, *Guide de prévention et d'intervention sur la qualité de l'air en milieu scolaire*, 2000. 40p.
77. Seppänen O. and Fisk W. J. Summary of human responses to ventilation. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.102-118
78. *Règlement Sanitaire Départemental Type (Circulaire du 9 Août 1978 modifiée)*.
79. Meininghaus R., Kouniali A., Mandin C., et al. Risk assessment of sensory irritants in indoor air - a case study in a French school. *Environment International*, Janvier 2003, vol.28, n°7, pp.553-557
80. Mandin C., Meininghaus R. and Cicoella A. Use of sensory irritation potential index to characterize improvement of indoor air quality in French schools by ventilation. *Healthy Buildings*, 2003, pp.388-391
81. Daisey J. M., Angell W. J. and Apte M. G. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor Air*, March 2003, vol.13, n°1, pp.53-64
82. Shendell D. G., Winer A. M., Weker R., et al. Evidence of inadequate ventilation in portable classrooms: results of a pilot study in Los Angeles County. *Indoor Air*, June 2004, vol.14, n°3, pp.154-158
83. Woods J. E., PENNEY B., FREITAG P., et al. Health, Energy and Productivity in Schools : Overview of the research program. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.56-61
84. Freitag P., Woods J., Hemler B., et al. Health, energy and productivity in schools: measures of occupant performance. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis),
85. Heath G. and Mendell M. Do indoor environments in schools influence student performance? A review of the literature. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis),
86. Wargocki P., Sundell J., Bischof W., et al. Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN). *Indoor Air*, 2002, vol.12, pp.113-128
87. Wargocki P. Indoor environmental effects on the performance of schoolwork by children December 2003-Décembre 2005 *Etude en cours*.
88. Berry M. The contribution of restoration and effective operation and maintenance programs on indoor environmental quality and educational performance in schools. *Indoor Air 2002*, 2002, Monterey (Etats-Unis), pp.840-845
89. Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques (CETIAT), *Ventilation performante dans les écoles Guide de Conception*,
90. National Institute of Public Health of Sweden, *The six steps towards allergy free day care centers and schools*, 1996.
91. Asthma and Allergy Association in Stockholm County and National Institute of Public Health of Sweden, *Allergy Inspection in Schools*, 1996.
92. Umweltbundesamt - Innenraumlufthygiene Kommission, *Leitfaden für die Innenraumlufthygiene iin Schulgebäuden*. 2000 Juni: Berlin.
93. Csobod E., Heszlenyi J. and Schroth A., *Improving indoor air quality in schools, Training program*. 2004, The Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe, Country Office Hungary.
94. US-EPA, *Mold Remediation in Schools and Commercial Buildings*, 2001. 54p.
95. National Education Association (USA), *Take a Deep Breath and Thank Your Custodian*, 2004.
96. Washington State Department of Health, *School Indoor Air Quality Best Management Practices Manual*, 2003. Washington State Department of Health Office of Environmental Health and Safety. 100p.

97. Minnesota Department of Health Environment Health Division Indoor Air Unit, *Recommended best practices for mold remediation in Minnesota schools*, novembre 2001 et juin 2003.
98. Maine Indoor Air Quality Council, *Recommendations for school air quality, Consensus Best practice Principles to Achieve and Maintain Healthy Indoor Air*, 2001.
99. California Air Resources Board and Department of Health Services, *Remedies for reducing formaldehyde in schools*, 2002.
100. Clarke D. and Nikkel D., *L'air dans les bureaux : Guide de l'employé concernant la qualité de l'air dans les bureaux, les écoles et les hôpitaux*, 1995. Comité Consultatif fédéral-provincial de l'hygiène du milieu et du travail. 29p.
101. Santé Canada, *Qualité de l'air intérieur : Trousse d'action pour les écoles canadiennes*, 2003.
102. ISIAQ Task Force on schools, *Creation of healthy indoor environment in schools*, 2001. National Institute of Public Health of Sweden.

Glossaire

Allergie : réaction du système immunitaire spécifique, inhabituelle et excessive, par inhalation d'une substance chimique ou biologique étrangère appelée allergène. Ce comportement est précédé d'un premier contact entre le système immunitaire et l'allergène, nommé sensibilisation.

Amiantose ou asbestose : formation dans les poumons de tissus cicatriciels qui gênent la respiration.

Asthme : affection inflammatoire chronique des voies aériennes. Chez certains individus prédisposés, cette inflammation est responsable de symptômes (toux, sifflements dans la poitrine, gêne respiratoire, crise d'asthme, réversibles spontanément ou en réponse au traitement) et d'une augmentation de l'hyperréactivité* bronchique à divers stimuli.

Atopie : caractéristique génétique d'un sujet à développer des allergies immédiates. Les malades atopiques produisent des immunoglobulines E (IgE) spécifiques (anticorps de l'allergène) vis à vis d'un allergène qui n'induirait pas la production d'anticorps chez un individu « normal » (non atopique).

Bronchoconstricteur : se dit d'une substance qui a la propriété de contracter les bronches.

Hyperréactivité : réaction excessive des bronches, de la muqueuse nasale ou de la muqueuse des voies respiratoires supérieures qui se contractent lorsqu'elles sont exposées à des agresseurs non spécifiques (agents pharmacologiques, air froid, hyperventilation, etc.) ou spécifiques (allergènes communs ou agents professionnels sensibilisants).

Hypoxie : diminution de la quantité d'oxygène dans le sang et les tissus

Mésothéliome : forme rare de cancer de la paroi thoracique ou de la cavité abdominale.

Rhinite allergique : inflammation allergique, périodique ou apériodique, de la muqueuse nasale qui se traduit par un ou plusieurs symptômes comprenant des éternuements, de l'obstruction nasale, de la rhinorrhée abondante et du prurit nasal.

Syndrome des Bâtiments Malsains (ou Sick Building Syndrome) : l'ensemble des effets apparemment liés à la présence dans le bâtiment non spécifiques et dont la cause est non identifiée. Il se caractérise par des sensations d'inconfort et des réactions physiologiques et sensorielles : irritations des yeux, du nez, de la gorge ou de la peau, toux, oppression thoracique, fatigue, maux de tête,... Les symptômes disparaissent généralement quand la personne quitte la pièce incriminée.

Liste des annexes

Annexe 1 : Extraits du rapport de l'Education Nationale " <i>Repères et Références Statistiques sur les enseignements, la formation et la recherche</i> " Edition 2004 [2]	I
Annexe 2 : Tableau de synthèse des différentes sources des polluants de l'air intérieur ...	V
Annexe 3 : Description des études multipolluants	VII
Annexe 4 : Description des différents systèmes de ventilation mécanique	XI

Annexe 1 : Extraits du rapport de l'Education Nationale "Repères et Références Statistiques sur les enseignements, la formation et la recherche"

Edition 2004 [2]

Disponible à l'adresse Internet www.education.gouv.fr/stateval/rers/repere.htm

Écoles et classes : évolution

21

1 Évolution du nombre d'écoles (France métropolitaine + DOM)

	1980-1981	1990-1991	1993-1994	1994-1995	1995-1996 (2)	1996-1997 (2)	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001 (2)	2001-2002	2002-2003	2003-2004
Public :													
Écoles maternelles	15 996	18 829	19 071	19 062	...	...	18 880	18 773	18 702	...	18 448	18 238	17 948
Écoles élémentaires	45 664	39 009	36 741	36 385	...	...	35 457	35 211	34 804	...	34 279	33 981	33 716
dont à classe unique	11 449	7 667	6 530	6 381	...	...	6 042	5 883	5 616	...	...	...	...
Écoles spéciales (1)	133												
Total	61 793	57 838	55 812	55 447	...	...	54 337	53 984	53 506	...	52 727	52 219	51 664
Privé :													
Écoles maternelles	363	419	376	352	330	314	309	286	284	...	245	222	199
Écoles élémentaires	6 663	5 966	5 744	5 691	5 640	5 588	5 550	5 495	5 452	...	5 395	5 348	5 324
dont à classe unique	347	215	197	199	183	185	195	180	170	...	...	...	...
Écoles spéciales (1)	20												
Total	7 046	6 385	6 120	6 043	5 970	5 902	5 859	5 781	5 736	...	5 640	5 570	5 523
Total Public + Privé	68 839	64 223	61 932	61 490	...	...	60 196	59 765	59 242	...	58 367	57 789	57 187

(1) À partir de 1989-1990, les écoles spéciales sont comptabilisées avec les écoles élémentaires.
(2) Pour ces années, les données pour les DOM ne sont pas disponibles.

2 Évolution du nombre de classes (1) (France métropolitaine + DOM)

	1980-1981	1990-1991	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997	1997-1998	1998-1999	1999-2000
Public :											
Écoles maternelles	59 758	70 538	71 058	71 368	71 683	71 871	...	...	71 128	70 936	71 087
Écoles élémentaires	194 113	179 177	177 476	175 781	174 391	174 085	...	...	173 872	173 985	172 906
dont classes uniques	11 449	7 667	7 185	6 756	6 530	6 381	...	...	6 024	5 883	5 616
Écoles spéciales (2)	749										
Total Public	254 620	249 715	248 534	247 149	246 074	245 956	...	...	245 000	244 921	243 993
Privé :											
Écoles maternelles	1 081	1 380	1 384	1 366	1 286	1 216	1 148	1 096	1 065	987	973
Écoles élémentaires	37 141	37 037	36 934	36 805	36 671	36 616	36 563	36 395	36 286	36 306	36 202
dont classes uniques	347	215	206	203	197	199	183	185	195	180	-
Écoles spéciales (1)	60										
Total Privé	38 282	38 417	38 318	38 171	37 957	37 832	37 711	37 491	37 351	37 293	37 175
Total Public + Privé	292 902	288 132	286 852	285 320	284 031	283 788	-	-	282 351	282 214	281 168

(1) Données non disponibles pour les années 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003 et 2003-2004.
(2) À partir de 1989-1990, ces écoles sont comptabilisées avec les écoles élémentaires.

3 Évolution du nombre moyen d'élèves par classe (1) (France métropolitaine + DOM)

	1980-1981	1990-1991	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997	1997-1998	1998-1999	1999-2000	
Public :												
Écoles maternelles		30,1	27,9	27,7	27,5	27,4	27,1	...	...	25,7	25,5	25,5
Écoles élémentaires		23,6	22,5	22,6	22,6	22,5	22,6	...	...	22,5	22,4	22,3
Écoles d'enseignement spécial (2)												
Privé :												
Écoles maternelles		29,9	27,1	27,4	27,3	26,9	26,6	26,2	25,7	25,7	25,5	25,9
Écoles élémentaires		26,2	24,5	24,5	24,4	24,3	24,2	24,1	24,1	24,0	23,9	
Écoles spéciales (2)												

(1) Données non disponibles pour les années 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003 et 2003-2004.
(2) À partir de 1989-1990, ces écoles sont comptabilisées avec les écoles élémentaires.

Le premier degré : évolution

3²

1 Évolution des effectifs du premier degré

(France métropolitaine, France métropolitaine + DOM à partir de 1990-1991)

	1980-1981	1990-1991	1994-1995	1997-1998	1998-1999	1999-2000 (1)	2000-2001 (2)	2001-2002	2002-2003	2003-2004
(milliers)										
Préélémentaire :										
Public	2 137,2	2 322,9	2 307,2	2 192,4	2 180,8	2 200,3	2 225,2	2 238,2	2 248,4	2 273,4
Privé	319,2	321,3	320,6	307,4	308,3	312,7	315,1	316,2	317,6	325,3
Total	2 456,4	2 644,2	2 627,8	2 499,8	2 489,1	2 513,0	2 540,3	2 554,4	2 566,0	2 598,7
Part du Public (%)	87,0	87,8	87,8	87,7	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,5
CP-CM2 :										
Public	4 128,7	3 599,1	3 511,5	3 498,1	3 470,5	3 424,5	3 384,8	3 360,3	3 347,4	3 333,7
Privé	681,3	618,9	594,7	588,1	583,8	574,3	568,2	563,8	561,5	566,2
Total	4 810,0	4 218,0	4 106,2	4 086,2	4 054,3	3 998,8	3 953,0	3 924,1	3 908,9	3 900,0
Part du Public (%)	85,8	85,3	85,5	85,6	85,6	85,6	85,6	85,6	85,6	85,5
Initiation, adaptation :										
Public	28,5	20,5	15,1	11,8	11,1	9,8				
Privé	2,1	1,6	2,1	2,2	2,1	2,1				
Total	30,6	22,1	17,2	14,0	13,2	11,9				
Part du Public (%)	93,1	92,8	87,8	84,3	84,1	82,4				
Élémentaire :										
Public	4 157,2	3 619,6	3 526,6	3 509,9	3 481,6	3 434,3				
Privé	683,4	620,5	596,8	590,3	585,9	576,4				
Total	4 840,6	4 240,1	4 123,4	4 100,2	4 067,5	4 010,7				
Part du Public (%)	85,9	85,4	85,5	85,6	85,6	85,6				
CLIS :										
Public	93,8	65,1	48,4	47,3	47,5	45,4				
Privé	5,5	4,0	2,8	2,6	2,6	2,7				
Total	95,5	69,1	51,2	49,9	50,1	48,1				
Part du Public (%)	98,2	94,2	94,5	94,8	94,8	94,4				
Total premier degré :										
sans CLIS :										
Public	6 294,4	5 942,5	5 833,8	5 702,3	5 662,4	5 634,6				
Privé	1 002,6	941,8	917,4	897,7	894,2	889,1				
Total	7 297,0	6 884,3	6 751,2	6 600,0	6 556,6	6 523,7				
Part du Public (%)	86,0	86,3	86,4	86,4	86,4	86,4				
avec CLIS :										
Public	6 388,2	6 007,6	5 882,2	5 749,6	5 709,9	5 680,0	5 663,9	5 650,4	5 645,6	5 656,2
Privé	1 008,1	945,8	920,2	900,3	896,8	891,8	888,1	884,6	883,6	895,8
Total	7 396,3	6 953,4	6 802,4	6 649,9	6 606,7	6 571,8	6 552,0	6 535,0	6 529,2	6 552,0
Part du Public (%)	86,4	86,4	86,5	86,5	86,4	86,4	86,4	86,5	86,5	86,3

(1) Estimations réalisées pour les départements manquants du secteur public et du secteur privé à partir de 1999-2000.

(2) À partir de 2000-2001, les effectifs des CLIS ne peuvent être dissociés des effectifs des classes d'initiation et d'adaptation.

Le premier degré par département et académie

3

1 Effectifs d'élèves du premier degré par département, TOM et académie en 2003-2004

Départements et académies	Public	Privé	Pu + Pr	% Public
Alpes-de-Haute-Provence	13 974	858	14 832	94,2
Hautes-Alpes	11 853	990	12 843	92,3
Bouches-du-Rhône	180 590	21 244	201 834	89,5
Vaucluse	50 184	6 043	56 227	89,3
Aix-Marseille	256 601	29 135	285 736	89,8
Aisne	54 729	4 561	59 290	92,3
Oise (1)	83 270	5 575	88 845	93,7
Somme	49 603	8 563	58 166	85,3
Amiens	187 602	18 699	206 301	90,9
Doubs (1)	48 717	4 175	52 892	92,1
Jura (1)	23 931	2 683	26 614	89,9
Haute-Saône	22 749	1 152	23 901	95,2
Territoire de Belfort	13 078	1 229	14 307	91,4
Besançon	108 475	9 239	117 714	92,2
Dordogne	31 462	1 916	33 378	94,3
Gironde	120 782	12 054	132 836	90,9
Landes	29 800	2 684	32 484	91,7
Lot-et-Garonne	25 678	3 086	28 764	89,3
Pyrénées-Atlantiques	46 613	11 855	58 468	79,7
Bordeaux	254 335	31 595	285 930	89,0
Calvados	59 726	10 138	69 864	85,5
Manche	40 643	9 644	50 287	80,8
Orne	23 334	6 236	29 570	78,9
Caen	123 703	26 018	149 721	82,6
Allier	27 339	2 656	29 995	91,1
Cantal	10 013	1 905	11 918	84,0
Haute-Loire	14 642	7 948	22 590	64,8
Puy-de-Dôme	48 499	7 271	55 770	87,0
Clermont-Ferrand	100 493	19 780	120 273	83,6
Corse-du-Sud	11 035	747	11 782	93,7
Haute-Corse	12 308	412	12 720	96,8
Corse	23 343	1 159	24 502	95,3
Seine-et-Marne	140 795	7 518	148 313	94,9
Seine-Saint-Denis	162 863	8 941	171 804	94,8
Val-de-Marne	126 947	10 805	137 752	92,2
Créteil	430 605	27 264	457 869	94,0
Côte-d'Or (1)	45 744	4 249	49 993	91,5
Nièvre	18 444	1 243	19 687	93,7
Saône-et-Loire	47 129	4 113	51 242	92,0
Yonne	31 015	2 479	33 494	92,6
Dijon	142 332	12 084	154 416	92,2
Ardèche	21 851	8 781	30 632	71,3
Drôme	42 464	6 789	49 253	86,2
Isère	111 647	11 646	123 293	90,6
Savoie	36 197	3 845	40 042	90,4
Haute-Savoie	64 615	10 212	74 827	86,4
Grenoble	276 774	41 273	318 047	87,0
Nord	240 186	67 197	307 383	78,1
Pas-de-Calais	145 769	22 012	167 781	86,9
Lille	385 955	89 209	475 164	81,2
Corrèze	18 118	1 377	19 495	92,9
Creuse	9 535	121	9 656	98,7
Haute-Vienne	27 892	1 836	29 728	93,8
Limoges	55 545	3 334	58 879	94,3
Ain	56 986	6 825	63 811	89,3
Loire	59 426	17 658	77 084	77,1
Rhône	148 473	32 084	180 557	82,2
Lyon	264 885	56 567	321 452	82,4
Aude	29 243	2 149	31 392	93,2
Gard (2)	59 934	8 883	68 817	87,1
Hérault	88 182	11 935	100 117	88,1
Lozère	4 501	2 419	6 920	65,0
Pyrénées-Orientales	36 738	3 668	40 406	90,9
Montpellier	218 598	29 054	247 652	88,3
Meurthe-et-Moselle (1)	66 754	4 584	71 338	93,6
Meuse	18 724	1 402	20 126	93,0
Moselle (1)	96 562	4 358	100 920	95,7
Vosges	35 974	3 046	39 020	92,2
Nancy-Metz	218 014	13 390	231 404	94,2

Départements et académies	Public	Privé	Pu + Pr	% Public
Loire-Atlantique (2)	84 801	45 926	130 727	64,9
Maine-et-Loire (2)	52 548	32 599	85 147	61,7
Mayenne (2)	22 226	11 471	33 697	66,0
Sarthe (2)	49 146	9 195	58 341	84,2
Vendée	28 556	30 756	59 312	48,1
Nantes (2)	238 094	130 786	368 880	64,5
Alpes-Maritimes	90 926	9 773	100 699	90,3
Var	89 063	5 745	94 808	93,9
Nice	179 989	15 518	195 507	92,1
Cher	27 493	1 899	29 392	93,5
Eure-et-Loir	40 180	4 400	44 580	90,1
Indre	18 980	1 371	20 351	93,3
Indre-et-Loire	48 861	6 109	54 970	88,9
Loir-et-Cher	28 244	3 562	31 806	88,8
Loiret	59 748	6 036	65 784	90,8
Orléans-Tours	223 506	23 377	246 883	90,5
Paris (1)	134 405	38 907	173 312	77,6
Paris (1)	134 405	38 907	173 312	77,6
Charente	28 862	2 942	31 804	90,7
Charente-Maritime	50 043	3 739	53 782	93,0
Deux-Sèvres	28 140	7 141	35 281	79,8
Vienne	33 356	4 668	38 024	87,7
Poitiers	140 401	18 490	158 891	88,4
Ardennes	29 488	2 256	31 744	92,9
Aube	27 596	2 663	30 259	91,2
Marne	51 336	6 477	57 813	88,8
Haute-Marne	18 204	957	19 161	95,0
Reims	126 624	12 353	138 977	91,1
Côtes-d'Armor	38 768	18 152	56 920	68,1
Finistère	57 020	32 990	90 010	63,3
Ille-et-Vilaine (1)	61 933	38 438	100 371	61,7
Morbihan	36 421	34 910	71 331	51,1
Rennes	194 142	124 490	318 632	60,9
Eure	57 095	4 719	61 814	92,4
Seine-Maritime	118 151	11 944	130 095	90,8
Rouen	175 246	16 663	191 909	91,3
Bas-Rhin	103 878	4 974	108 852	95,4
Haut-Rhin	70 578	4 739	75 317	93,7
Strasbourg	174 456	9 713	184 169	94,7
Ariège	11 969	1 116	13 085	91,5
Aveyron (2)	17 922	6 450	24 372	73,5
Haute-Garonne	103 063	9 944	113 007	91,2
Gers	13 742	1 940	15 682	87,6
Lot	13 098	1 416	14 514	90,2
Hautes-Pyrénées	17 017	2 669	19 686	86,4
Tarn	27 624	5 850	33 474	82,5
Tarn-et-Garonne	19 855	2 827	22 682	87,5
Toulouse	224 290	32 212	256 502	87,4
Yvelines	148 029	13 679	161 708	91,5
Essonne	129 626	7 063	136 689	94,8
Hauts-de-Seine	141 670	16 603	158 273	89,5
Val-d'Oise	129 538	7 035	136 573	94,8
Versailles	548 863	44 380	593 243	92,5
France métropolitaine	5 407 276	874 689	6 281 965	86,1
Guadeloupe	55 839	6 458	62 297	89,6
Guyane	33 203	2 502	35 705	93,0
Martinique	47 070	3 109	50 179	93,8
La Réunion	112 804	9 024	121 828	92,6
Total DOM	248 916	21 093	270 009	92,2
France métr. + DOM	5 656 192	895 782	6 551 974	86,3
TOM :				
Mayotte	40 341	-	40 341	100,0
Nouvelle-Calédonie	27 091	9 970	37 061	73,1
Polynésie française	33 035	6 870	39 905	82,8
Saint-Pierre-et-Miquelon	368	395	763	48,2
Wallis-et-Futuna	-	2 773	2 773	0,0

(1) Ces effectifs résultent d'un constat détaillé (pour le secteur public).
(2) Ces effectifs sont des estimations réalisées par les inspections académiques.

Les élèves du premier degré

Annexe 2 : Tableau de synthèse des différentes sources des polluants de l'air intérieur

Polluants	Sources
Dioxyde de carbone	Présence humaine (respiration), combustion de combustible fossile, air extérieur
Monoxyde de carbone	Combustion incomplète : appareils et installations de chauffage, de production d'eau chaude ou de cuisson, gaz d'échappement d'automobile (air extérieur), fumée de tabac
Monoxyde d'azote	Combustion à haute température, fumée de tabac, air extérieur
Dioxyde d'azote	Combustion à haute température, fumée de tabac, trafic automobile, air extérieur
Dioxyde de soufre	Rejets industriels, air extérieur
Ozone	Ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, transformation des polluants atmosphériques
Matières particulaires	Combustion, photocopieurs, fumée de tabac, gaz d'échappement des automobiles, émissions industrielles, poussières des rues, isolants des conduits, manipulation de tapis ou tissus, abrasion de surfaces, activités de nettoyage ou de bricolage, encens,...
Amiante	Panneaux d'isolation, amiante-ciment (conduits)
Fibres Minérales artificielles	Laines isolantes (laine de verre, de roche,...), fibres céramiques réfractaires
COV (Composés Organiques Volatiles) (en général)	Ordinateurs, photocopieuses, imprimantes, tissus d'ameublement, moquettes, tapis, meubles, produits de nettoyage, fumée de tabac, colles, produits adhésifs, produits de calfeutrage, parfums, peintures, solvants, cosmétiques, fixatifs pour cheveux, désodorisants, essence, combustion.
Acétone et alcool	Peintures, solvants, décapants, revêtements, produits de calfeutrage, produits de soins personnels
Acétate de n-butyle	Tuiles acoustiques pour plafonds, linoléum, matériaux d'étanchéité
Dichlorobenzène	Tapis, cristaux antimites, assainisseurs d'air
Hydrocarbures aliphatiques (octane, décane, hexane, isodécane, mélanges etc.)	Peintures, colles, essence, sources de combustion, photocopieurs à processus liquide, tapis, linoléum, produits de calfeutrage
Hydrocarbures aromatiques (toluène, xylènes, éthylbenzène, benzène)	Sources de combustion, peintures, solvants, adhésifs, essence, linoléum, revêtements muraux, pesticides
Phényle 4 cyclohexène	Tapis, peintures
Composés chlorés (dichlorométhane ou chlorure deméthylène, trichloroéthane)	Produits de nettoyage et de protection pour meubles et tapis, vernis, peintures, décapants pour peinture, solvants industriels, liquides correcteurs, vêtements nettoyés à sec
Terpènes (limonène, -pincène)	Désodorisants, produits de nettoyage et de polissage, tissus, assouplisseurs pour tissus, bois, fumée de tabac, solvants
Styrène	Tapis, peintures
Phénols	Equipement, mobilier

Polluants	Sources
Composés organiques semi-volatils	
Phtalates	Produits en plastique, PVC
Polychlorobiphényles	Produits de calfeutrage, de colmatage et d'étanchéité
HAP	Combustions incomplètes, fumée de tabac, essence
Retardateurs de flamme	Textiles, plastiques, meubles, ordinateurs, téléviseurs...
Aldéhydes	
Formaldéhyde	Mobilier en bois aggloméré, panneaux de résine ou de particules, panneaux de fibres, panneaux de bois brut, émissions des livres et magazines neufs, peintures à phase solvant, revêtements sol et murs, fumée de tabac, photocopieurs, mousse isolante d'urée formaldéhyde, tissus, colle, tapis, nouveaux locaux, pièces rénovées, combustion incomplète, colorants, produits de désinfection, cosmétiques,...
Acétaldéhyde	Panneaux de particules, fumée de tabac, photocopieur, panneaux de bois brut, désodorisant
Benzaldéhyde	Peinture à phase solvant, photocopieur, parquet traité
Butyraldéhyde	Photocopieur
Isovaléraldéhyde	Parquet traité, panneaux de particules
Valéraldéhyde	Emissions de livres et magazines neufs, solvants, panneaux de particules
Propionaldéhyde	Fumée de tabac
Fumée de tabac environnementale	Fumeurs (enseignants, personnel, visiteurs, parents)
Biocides	Désinfectants, pesticides, produits de traitement du bois, du cuir, d'ouvrage de maçonnerie
Ethers de glycol	Peintures, vernis, laques, produits de nettoyage, herbicides, fongicides, certains savons et cosmétiques
Allergènes	Animaux domestiques (chats, chiens, hamsters), blattes, acariens, pollens
Champignons, moisissures	Présence humaine, humidité, poussières, systèmes de ventilation, de refroidissement ou de chauffage (chauffe-eau, climatiseurs, humidificateurs)
Bactéries	Présence humaine, animaux, poussières, systèmes de ventilation, de refroidissement ou de chauffage (chauffe-eau, climatiseurs, humidificateurs)

Tableau 2 : Principales sources des polluants de l'air intérieur

Annexe 3 : Description des études multipolluants

- **Étude pilote de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur [6-8]**

Neuf écoles maternelles ou primaires ont été investiguées à raison de trois dans chacune des zones géographiques : région de Strasbourg, d'Aix-Marseille, et Nord-Pas-de-Calais. L'enquête s'est déroulée de mai à juin 2001, les mesures ont été réalisées pour chaque école dans deux classes ou dortoir et à l'extérieur dans la cour de l'école. A l'intérieur, ont été mesurés : la **température**, le **CO₂**, l'**humidité** relative, les **allergènes**, les **moisissures**, l'**ergostérol**, les **endotoxines** (marqueurs des bactéries gram négatif) et les **fibres minérales artificielles**. Les **COV**, les **aldéhydes**, le **NO₂** et le **CO** ont été mesurés à l'intérieur et à l'extérieur. Les facteurs liés à ces expositions ont été étudiés par la suite.

- **Étude de la qualité de l'air dans les locaux d'enseignement par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment [9, 10]**

Le CSTB a entrepris une étude dans deux écoles maternelles et une école primaire de la région parisienne. L'une des écoles maternelles est équipée d'une Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) simple flux. Les mesures ont été effectuées en trois campagnes d'une semaine (été 1999, automne 1999 et hiver 2000). Les paramètres témoins de l'ambiance intérieure ont été suivis (**CO₂**, **température** et **humidité relative**) ainsi que la teneur en **COV** et les **charges fongique et bactérienne**.

- **Étude du Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris [14]**

Au début des années 1990, le Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris (LHVP) a mené une étude sur 10 établissements scolaires de la région parisienne présentant les caractéristiques suivantes : 6 écoles primaires et 4 crèches, 6 bâtiments anciens (plus de 50 ans) et 4 récents, un seul bâtiment équipé d'air conditionné. Les concentrations en **oxydes d'azote**, en **CO**, en **poussières** (fumées noires et particules totales), en **hydrocarbures aromatiques monocycliques** et en **composés organiques volatils** ont été estimées. Parallèlement, la **contamination aérienne fongique et bactérienne** a été évaluée. Dans une première phase, les mesures ont été faites à l'aide de dispositifs actifs pendant deux semaines à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments (6 écoles primaires et 4 crèches). Durant la seconde phase, les mesures ont été faites dans les établissements ventilés naturellement (4 écoles primaires et 4 crèches) via des dispositifs passifs pendant une semaine par mois durant 9 mois.

- **Étude d'une école maternelle de Marseille [14]**

L'exposition au **monoxyde de carbone**, aux **particules**, aux **aldéhydes totaux**, à l'**acétaldéhyde**, au **formaldéhyde** et à **certaines métaux** a été évaluée dans une salle de classe d'une école maternelle d'une zone urbaine de Marseille au début des années 1990. Les conditions de confort ont été contrôlées par l'enregistrement de la température et de l'humidité. Les campagnes de mesures ont été réalisées au cours de périodes avec chauffage et sans chauffage.

- **Étude française des six villes : ISAAC II [17, 18]**

Le but du volet français de la seconde phase de l'étude internationale ISAAC (International Study of Asthma and Allergies in Childhood) était d'évaluer l'impact à long terme de plusieurs polluants atmosphériques intérieurs et extérieurs sur la prévalence et la gravité des manifestations allergiques (asthme*, rhinite allergique*, dermatite atopique), de l'hyperréactivité* bronchique et de l'atopie*. Cette étude a également permis de connaître les niveaux d'exposition de quelques 6000 élèves fréquentant 108 écoles primaires de six grandes villes : Marseille, Créteil, Bordeaux, Strasbourg, Reims, Clermont Ferrand. Des campagnes de mesurage du **NO₂**, de l'**ozone**, des **particules** (PM_{2,5}), du **formaldéhyde** et de l'**acétaldéhyde** ont été effectuées en continu, du lundi au vendredi dans les classes et les cours de récréation d'une vingtaine d'écoles primaires de chaque ville entre mars 1999 et octobre 2000.

L'association entre indicateurs de santé allergique et respiratoire et les polluants de l'air intérieur a également été étudiée lors de cette étude. La prévalence cumulée dans la vie est évaluée à 25 % pour la dermatite atopique (eczéma), 20% pour la rhinite allergique* et 10% pour l'asthme*. 8% des enfants de l'étude présentent une hyperréactivité* bronchique, 25% une réponse positive à au moins un des dix tests d'allergènes et 11% ont de l'eczéma. L'étude des niveaux de polluants intérieurs et de la prévalence des indicateurs sanitaires a mis en évidence plusieurs liens. NO₂ et PM_{2,5} sont positivement liés aux **indicateurs sanitaires aigus** considérés : bronchospasme à l'effort et eczéma. Les PM_{2,5} sont également liés à deux **effets chroniques** : réaction à un ou plusieurs tests cutanés allergisant et asthme* dans les douze derniers mois. Les teneurs en NO₂ sont aussi liées positivement à au moins une allergie.

- **Étude d'Atmos'air Bourgogne [18-20]**

Le réseau de surveillance de la qualité de l'air en Bourgogne (Atmos'air Bourgogne) et l'École Nationale de Santé Publique (ENSP) ont réalisé en 2002 et 2003 une enquête visant à mesurer la qualité de l'air intérieur dans divers établissements publics parmi lesquels trois écoles. Une dizaine d'**aldéhydes** et de **COV**, le **NO₂** et le CO ont été analysés pendant une semaine à l'aide d'échantillonneurs passifs simultanément à l'intérieur et à l'extérieur.

Suite aux résultats obtenus, des **tests d'émission des produits d'entretien liquides** ont été réalisés. Les 11 produits ont été soumis à l'air libre dans un petit pot en

verre chacun leur tour, les capteurs de COV et aldéhydes étant situés juste au-dessus. On note qu'un certain nombre de ces produits émet du 2-butoxyéthanol et du 1-méthoxy-2-propanol, du toluène, de l'éthylbenzène, des xylènes, du camphène et du limonène, des molécules à cycles benzéniques et des hydrocarbures. Cette étude montre également que plus la saison se rafraîchit, plus les teneurs en benzène augmentent, alors que pour les teneurs en aldéhydes augmentent avec la température. La présence d'hydrocarbures en grande quantité peut être expliquée par l'usage hebdomadaire d'un produit d'entretien des sols plastiques et par l'utilisation ponctuelle de White Spirit lors des activités manuelles et de nettoyage. L'ensemble de résultats produit par produit est détaillé dans le rapport d'Atmos'Air Bourgogne.

- **Étude du Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transport Appliqués au Bâtiment [21, 22]**

Dans le cadre du programme de recherche français **PRIMEQUAL**, le Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transport Appliqués au Bâtiment (LEPTAB) de l'Université de La Rochelle et l'Association Régionale pour la qualité de l'Air en Poitou-Charentes ont étudié entre 2000 et 2001 **la relation entre la pollution extérieure et la pollution à l'intérieur** de 8 écoles maternelles ou primaires de l'agglomération de La Rochelle. Les concentrations en **NOx**, en **ozone** et en **particules** ont été enregistrées en continu sur 15 jours en hiver (fenêtres rarement ouvertes) et en printemps-été (fenêtres souvent ouvertes). Par ailleurs, le CO₂, la température, l'humidité, la pression différentielle, l'occupation des locaux, l'ouverture des fenêtres ont été mesurés simultanément.

Annexe 4 : Description des différents systèmes de ventilation mécanique

D'après le « *Guide de conception Ventilation efficace dans les écoles* » du CETIAT [89]

❖ Ventilation mécanique simple flux par extraction

Fig. 2 : ventilation simple flux par extraction avec balayage

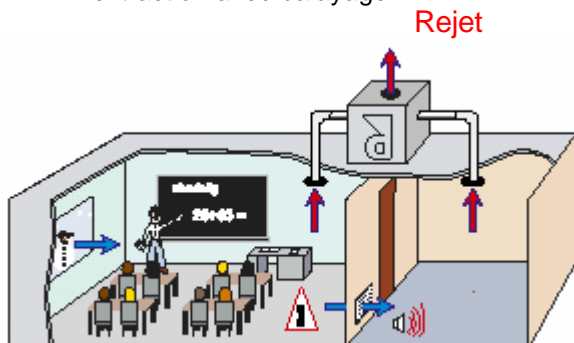
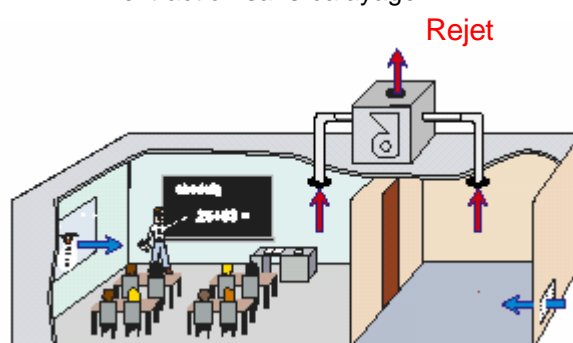


Fig. 3 : ventilation simple flux par extraction sans balayage



Avantages :

- taux de renouvellement d'air permanent
- réseau de conduits simples
- modulation possible et maîtrise des débits extraits

Inconvénients :

- application limitée si le débit devient trop élevé, en hiver : débit d'air froid trop important par les entrées d'air en façade
- difficulté d'isolation acoustique par rapport à l'extérieur

❖ Ventilation mécanique simple flux par insufflation

Fig. 4 : ventilation simple flux par insufflation avec balayage

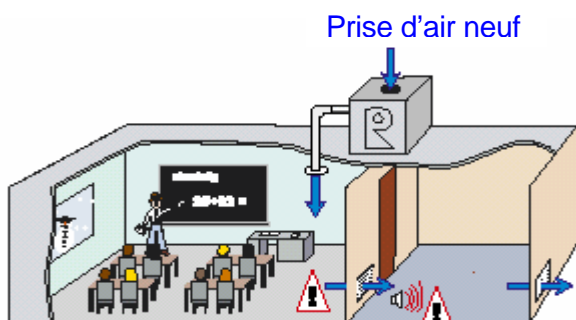
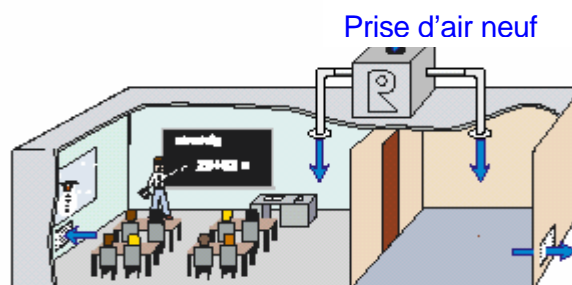


Fig. 5 : ventilation simple flux par insufflation sans balayage



Avantages :

- taux de renouvellement de l'air permanent
- maîtrise des débits insufflés et de leur répartition (gain en efficacité)
- possibilité de moduler les débits et de préchauffer l'air neuf
- meilleure isolation acoustique par rapport à l'extérieur (lorsqu'il n'y a pas d'ouverture directe)
- filtration de l'air neuf

Inconvénients :

- difficulté d'isolement acoustique par rapport aux pièces voisine (balayage) ou à l'extérieur (en cas d'ouvertures directes)
- transferts d'air et parcours de l'air difficiles à contrôler

❖ Ventilation mécanique double flux

Fig. 6 : ventilation mécanique double flux avec balayage

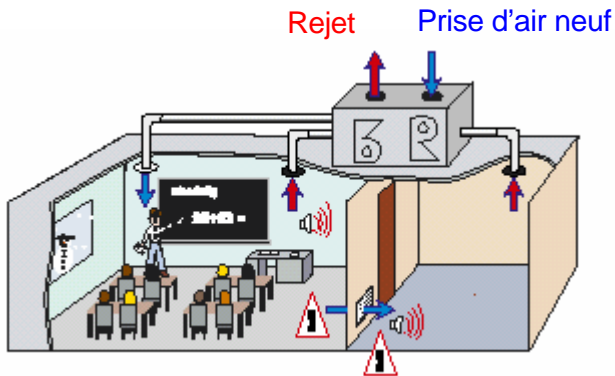
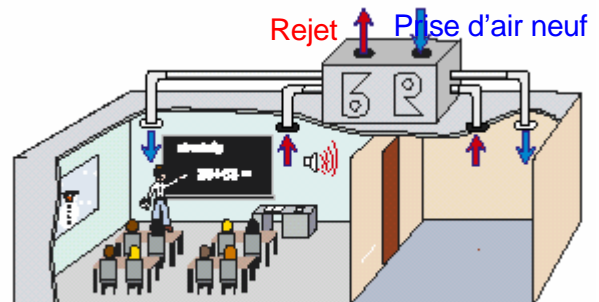


Fig. 7 : ventilation mécanique double flux sans balayage



Avantages :

- maîtrise des débits d'insufflation et d'extraction
- possibilité de traitement de l'air (filtration, préchauffage, rafraîchissement)
- possibilité de forcer le débit d'air neuf (améliorer le confort en période chaude)
- possibilité de récupérer de la chaleur sur l'air extrait (économie d'énergie)
- meilleur isolement acoustique par rapport à l'extérieur (lorsqu'il n'y a pas d'ouverture directe)

Inconvénients :

- deux réseaux de conduits
- coût global du système plus élevé
- entretien plus complexe
- consommation électrique plus importante
- bruit généré par le système