

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Juillet 2013

Édition scientifique



anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé

Avis de l'Anses

Rapport d'expertise collective

Juillet 2013

Édition scientifique

AVIS

de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif aux « Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé »

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont rendus publics.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Le dioxyde de carbone (CO₂) est une molécule produite par l'organisme humain au cours de la respiration. Sa concentration dans l'air intérieur des bâtiments est habituellement comprise entre 350 et 2500 ppm environ. Elle est liée à l'occupation humaine et au renouvellement d'air.

La concentration en CO₂ dans l'air intérieur est l'un des critères qui fondent la réglementation en matière d'aération des locaux. Le titre III des Règlements sanitaires départementaux (RSD) fixe ainsi, pour les bâtiments non résidentiels, un seuil en CO₂ de 1000 ppm dans des conditions normales d'occupation, avec une tolérance à 1300 ppm dans les locaux où il est interdit de fumer, sans fondement sanitaire explicite de ces deux valeurs. Le décret du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants réalisées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public, prévoit le calcul d'un indice de confinement à partir d'une mesure en continu de la concentration de CO₂ dans l'air (indice ICONÉ). Plus généralement, la concentration en CO₂ est, avec le taux d'humidité, l'un des paramètres des modélisations qui ont conduit à définir les valeurs de débits de ventilation ou de dimensionnement réglementaires, tant pour les logements¹ que pour les bâtiments non résidentiels².

Dans le cadre d'une mise à jour de cette réglementation, la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Direction générale de la santé (DGS) ont saisi l'agence le 1^{er} mars 2012 afin de disposer de valeurs de concentration en CO₂ dans l'air intérieur associées à des effets sanitaires, tenant compte des publications les plus récentes sur ce sujet.

¹ Arrêtés du 14 novembre 1958, du 22 octobre 1969 et du 24 mars 1982

² Règlements Sanitaires Départementaux – Titre III

Il était plus particulièrement demandé de réaliser :

1. une évaluation de la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur (VGAI) pour le CO₂ selon la méthode proposée par l'Anses ;
2. une détermination, sous réserve de faisabilité, de valeur(s) de concentration en CO₂ dans l'air intérieur en tant qu'indicateur d'effets sanitaires, pour différents types de locaux : logements, hébergements collectifs comme les centres de vacances, structures d'accueil de personnes âgées, et autres établissements recevant du public ;
3. une identification des éventuelles corrélations entre le CO₂ et d'autres polluants de l'air intérieur en considérant les concentrations et les effets sanitaires des autres polluants.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du Comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens ». L'instruction des travaux d'expertise a été conduite par l'Anses avec l'appui de quatre experts rapporteurs externes. Les travaux ont été présentés au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre le 13 décembre 2012 et le 14 mai 2013. Ils ont été adoptés par le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » réuni le 25 juin 2013. Pour information et discussion, la saisine a également été présentée au CES « Évaluation des risques liés aux substances chimiques » le 19 janvier 2012 et au groupe de travail « Valeurs guides de qualité d'air intérieur » le 20 septembre 2012, le 5 mars et le 16 avril 2013.

La démarche de l'expertise suit les étapes suivantes :

1. Afin d'évaluer la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur (VGAI) pour le CO₂ selon la méthode proposée par l'Anses (Anses, 2011), une synthèse des effets sanitaires intrinsèques du CO₂, en particulier aux faibles concentrations d'exposition, a été réalisée.
2. Afin de déterminer des valeurs de concentration en CO₂ en tant qu'indicateur de confinement, dans l'air intérieur pour différents types de locaux, une analyse des études épidémiologiques investiguant la relation entre concentrations de CO₂ et effets sur la santé, sur la performance et sur la perception de confort, a été réalisée. Ces effets sont donc à relier aux nuisances induites par le niveau de confinement, et non intrinsèquement au CO₂.
3. Les relations entre les concentrations de CO₂ et d'autres polluants de l'air intérieur ont été recherchées à partir de campagnes de mesures françaises dans les logements, les écoles, les crèches et les bureaux³.
4. Enfin, les concentrations de CO₂ issues des études épidémiologiques et toxicologiques (étapes 1. et 2.) ont été mises en perspective avec celles utilisées par la norme NF EN 13779⁴ pour le classement de la qualité de l'air intérieur, et avec celles utilisées comme valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP).

³ Quatre campagnes menées respectivement :

- dans 567 logements (campagne nationale de l'OQAI ; Kirchner *et al.*, 2007),
- dans 310 crèches, écoles maternelles et élémentaires avec 896 salles instrumentées entre septembre 2009 et décembre 2011 (MEDDTL, 2012 ; Michelot *et al.*, 2011),
- dans 17 écoles maternelles et élémentaires de Clermont-Ferrand avec 51 salles de classes instrumentées en 2010 (campagne pilote de l'OQAI, Derbez et Dassonville, 2011),
- dans 9 immeubles de bureaux en France par le CSTB avec 36 points de mesures distincts.

⁴ Norme NF EN 13779 « Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air » s'appliquant aux bâtiments non résidentiels sujets à occupation humaine, non industriels et non-fumeurs.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

■ RÉSULTAT DE L'EXPERTISE COLLECTIVE

1. Evaluation de la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur pour le CO₂ selon la méthode proposée par l'Anses

En l'état actuel des connaissances, il n'apparaît pas pertinent de construire une VGAI pour le CO₂ fondée sur ses effets propres selon la méthode proposée par l'Anses.

En effet, plusieurs études rapportent des concentrations associées à des effets sanitaires intrinsèques du CO₂ (seuil à environ 10000 ppm correspondant à l'apparition d'une acidose respiratoire, premier effet critique du CO₂). Ces concentrations seuil sont supérieures aux valeurs limites réglementaire et/ou normative de qualité du renouvellement d'air en France et au niveau international, qui varient usuellement entre 1000 et 1500 ppm de CO₂. Par ailleurs, elles sont supérieures aux concentrations de CO₂ en tant qu'indicateur de confinement pour lesquelles des effets sont associés et à relier aux nuisances induites par le confinement.

2. Détermination de valeurs de concentration en CO₂ en tant qu'indicateur du confinement, dans l'air intérieur pour différents types de locaux, à partir d'une analyse des études épidémiologiques investiguant la relation entre concentration de CO₂ et des effets sur la santé, la performance et la perception de confort

L'analyse montre que des effets sur la santé, la perception de confort ou la performance sont observés pour des augmentations de concentration dans l'air intérieur de 100 ppm de CO₂ pris en tant qu'indicateur du confinement d'air. Ces effets sont imputables aux nuisances induites par le confinement.

Il convient de préciser que :

- les études analysées comparent le plus souvent les effets pour seulement deux niveaux de CO₂, et/ou décrivent la relation concentration de CO₂ (variable continue)-effet mais en faisant l'hypothèse d'une relation linéaire *a priori*. Elles ne modélisent donc pas la forme de la relation dose-réponse qui permettrait de détecter un éventuel seuil ;
- il n'existe pas d'étude épidémiologique représentative du parc français des logements, écoles, crèches ou bureaux, visant à investiguer la relation entre concentration de CO₂ et des effets sur la santé, la performance ou la perception de confort. Les études concernent des parcs de bâtiments existants présentant des caractéristiques typologiques potentiellement très différentes. Leurs résultats doivent donc être considérés avec précaution dans le cadre d'une transposition à des bâtiments appliquant les récentes réglementations thermiques françaises RT 2005 et 2012.

En conséquence, les données actuelles ne permettent pas d'établir une concentration seuil de CO₂ en air intérieur protégeant de ces effets.

3. Recherche des relations entre les concentrations de CO₂ et d'autres polluants de l'air intérieur à partir de campagnes de mesures françaises dans les logements, les écoles et crèches, et les bureaux

L'analyse montre que la mesure du CO₂ ne peut être considérée seule comme un indicateur de pollution chimique de l'air intérieur. La mesure du CO₂ ne peut donc être définie comme un outil unique de contrôle de la qualité sanitaire de l'air intérieur.

L'évolution des concentrations de CO₂ et des polluants en air intérieur dépend notamment du renouvellement d'air.

A partir des données de mesure disponibles, il existe des corrélations positives significatives entre le CO₂ et certains polluants, en particulier le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, l'acroléine (dans les logements, pas dans les bureaux) et les particules (fractions PM_{2,5} et PM₁₀, données disponibles pour la campagne nationale logement et la campagne pilote école). Ces corrélations sont faibles cependant. A l'inverse la corrélation est très faible ou nulle pour le benzène et le 1,4-dichlorobenzène (mesuré uniquement dans le cadre de la campagne nationale logements).

Plus la concentration moyenne de CO₂ est élevée, plus la proportion de situations où un polluant dépasse une valeur cible sanitaire (VGAI, valeur toxicologique de référence (VTR) ou valeur guide OMS selon le polluant) augmente. Toutefois, le CO₂ ne permet pas de détecter avec suffisamment de fiabilité les dépassements de ces valeurs cibles, et la probabilité de dépasser une valeur cible n'est pas nulle dans les situations où la concentration de CO₂ est la plus réduite.

Par ailleurs, des limites inhérentes aux données disponibles ont été identifiées, notamment le faible nombre de polluants étudiés et l'impossibilité de discriminer les périodes d'occupation et d'inoccupation des locaux pour les concentrations des polluants cibles autres que les PM_{2,5} et PM₁₀.

4. Mise en perspective

L'analyse des études épidémiologiques et toxicologiques disponibles a conduit à identifier plusieurs éléments intéressants, même si ceux-ci ne sont pas suffisants pour définir des seuils garantissant une protection contre des effets sur la santé, la perception de confort ou la performance.

Concernant les effets à relier aux nuisances induites par le confinement, et non les effets intrinsèques du CO₂, il est ainsi observé que :

- dans les écoles, une augmentation de la fréquence de symptômes liés à l'asthme chez l'enfant peut être associée à des concentrations de CO₂ supérieures à 1000 ppm en moyenne sur une journée d'école, d'après une étude multicentrique européenne (Simoni *et al.*, 2010) jugée de bonne qualité et la plus pertinente au regard de la situation des écoles en France. Cette valeur de 1000 ppm a été retenue *a priori* par les auteurs lors de la formation de classes de concentration et ne résulte pas spécifiquement de la recherche d'un seuil sans effet ;
- dans les bureaux, une augmentation de la fréquence de symptômes du syndrome des bâtiments malsains (ou SBS) peut être associée à des concentrations de CO₂ supérieures à 850 ppm en moyenne sur une journée de travail, d'après l'étude américaine BASE (Erdmann et Apte, 2004) jugée de bonne qualité et la plus pertinente dans ce contexte. Cette étude transversale sur un échantillon représentatif d'immeubles aux Etats-Unis et dont les résultats sont corroborés par ceux d'une étude expérimentale (Wargocki *et al.*, 2000) a montré des relations concentration-risque significatives. Le seul Odd-Ratio significatif était celui comparant le dernier décile (>844 ppm) au premier décile (<410 ppm). Une des réserves est que les immeubles sont tous (sauf un) équipés d'une ventilation avec air conditionné, à la différence du parc français de bâtiments de bureaux.

Concernant les effets intrinsèques du CO₂, il est observé que :

- l'apparition d'une acidose respiratoire, premier effet critique du CO₂, peut être admise à partir d'un niveau d'exposition de 1% (10000 ppm) pendant au moins 30 minutes chez un adulte en bonne santé avec une charge physique modérée ;
- une récente étude expérimentale sur 22 sujets humains adultes suggère un effet propre du CO₂ sur la performance psychomotrice (prise de décision, résolution de problèmes) à partir de 1000 ppm (Satish *et al.*, 2012), cette étude n'étant pas suffisante pour élaborer une VGAI en l'absence de convergence avec d'autres études et de consensus international sur la nature des effets et le mode d'action associé (Anses, 2011).

A titre indicatif, le tableau suivant propose une mise en perspective des concentrations de CO₂ utilisées par la norme NF EN 13779 pour le classement de la qualité de l'air intérieur avec celles issues des études épidémiologiques ou toxicologiques.

Les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) sont également présentées dans le tableau. En France, une valeur limite réglementaire indicative d'exposition moyenne sur 8 heures (VLEP 8 heures) de 5000 ppm a été fixée pour le CO₂ par l'arrêté du 30 juin 2004 modifié, et il n'existe pas de valeur limite court terme.

Des VLEP existent dans 19 autres pays (Gestis, 2013) et sont toutes égales à 5000 ppm en moyenne sur 8 heures. Les valeurs limites court terme se situent entre 10000 et 30000 ppm.

**Avis de l'Anses
Saisine n° « 2012-SA-0093 »**

Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur – Mise en perspective, à titre indicatif, de valeurs de classement de la qualité de l'air intérieur avec des valeurs associées à des effets sur la santé dans la littérature scientifique et des valeurs limites d'exposition professionnelle

Différentiel de concentrations de CO ₂ entre l'air intérieur et l'air extérieur utilisé pour le classement de la qualité de l'air intérieur selon la norme NF EN 13779	Mise en perspectives avec :	
	les concentrations de CO ₂ ou différentiels de concentrations de CO ₂ entre l'air intérieur et l'air extérieur issues des études épidémiologiques ou toxicologiques	les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP)
d [CO₂] ≤ 400 ppm Qualité de l'air intérieur excellente		
d [CO₂] entre 400 et 600 ppm Qualité de l'air intérieur moyenne	[CO₂] ≥ 850 ppm ou d [CO₂] ≥ 450 ppm Plage correspondant en moyenne sur une journée de travail à une augmentation de symptômes du SBS* dans des bureaux	
d [CO₂] entre 600 et 1000 ppm Qualité de l'air intérieur modérée	[CO₂] ≥ 1000 ppm ou d [CO₂] ≥ 600 ppm** Plage correspondant à : - une augmentation de symptômes liés à l'asthme chez l'enfant, en moyenne sur une journée d'école - une altération suspectée de la performance psychomotrice due au CO ₂ seul chez l'adulte, en moyenne sur quelques heures (une seule étude)	
d [CO₂] > 1000 ppm Qualité de l'air intérieur basse		[CO₂] égale à 5000 ppm Concentration moyenne sur 8 heures (VLEP 8h) utilisée comme valeur limite d'exposition professionnelle en France et à l'étranger [CO₂] égale à 10000 ppm Concentration correspondant sur au moins 30 minutes à l'apparition d'acidose respiratoire due au CO ₂ seul (un des premiers effets critiques) chez l'adulte sain avec une charge physique modérée [CO₂] comprise entre 10000 et 30000 ppm Intervalle des concentrations court terme (VLCT ou VLE) utilisées comme valeurs limites d'exposition professionnelle à l'étranger (aucune valeur pour la France)

* SBS : syndrome du bâtiment malsain (ou en anglais : "Sick Building Syndrome")

** Différentiel entre CO₂ de l'air intérieur et de l'air extérieur calculé à partir d'un niveau intérieur ≥ 1000 ppm et d'un niveau extérieur pris par défaut de 400 ppm

■ RECOMMANDATIONS DE L'EXPERTISE COLLECTIVE

❖ En appui à la gestion :

- Le CES rappelle que le CO₂ peut être utilisé comme un indicateur du confinement de l'air. Il recommande de s'appuyer sur la norme NF EN ISO 16000-26⁵ pour la stratégie d'échantillonnage du CO₂ dans les environnements intérieurs.
- Le CES recommande de ne pas élaborer de VGAI pour le CO₂, que ce soit pour ses effets propres ou pour les effets du confinement sur la santé. Il insiste sur le fait que la seule mesure du CO₂ ne peut être considérée comme un indicateur de qualité sanitaire de l'air intérieur au vu des résultats de ces travaux qui montrent que :
 - les données épidémiologiques disponibles ne permettent pas de construire de valeur seuil du CO₂ protégeant des effets du confinement sur la santé, sur la perception de confort ou sur la performance,
 - la probabilité de dépassement de valeurs cibles sanitaires (VGAI, VTR ou VG_{OMS}) pour les polluants chimiques de l'air intérieur n'est pas nulle même pour des concentrations de CO₂ réduites.
- Compte tenu des éléments ci-dessus, le CES recommande de réduire à la source les émissions de polluants dans l'air intérieur, en complément de l'amélioration de la ventilation.
- Le CES recommande d'évaluer la pertinence de réviser la VLEP 8h du CO₂, et notamment la pertinence d'élaborer une VLEP court terme.

❖ En termes de recherche, le CES recommande d'améliorer les connaissances concernant les éventuels effets propres au CO₂ :

- sur la performance psychomotrice (prise de décision, résolution de problèmes) aux faibles doses incluant des concentrations d'exposition inférieures ou égales à 1000 ppm, par exemple en répliquant l'étude de Satish *et al.* (2012) et en documentant le mécanisme d'action ;
- sur la santé des populations plus sensibles ou plus exposées telles que les enfants, les femmes enceintes et les personnes présentant des affections pulmonaires ou cardiaques.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions et recommandations du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » présentées ci-dessus.

⁵ Norme ISO 16000-26:2012 Air intérieur -- Partie 26: Stratégie d'échantillonnage du dioxyde de carbone (CO₂)

Les données disponibles mettent en évidence des concentrations de CO₂ mesurées dans l'air des salles de classes d'écoles plus élevées que dans d'autres environnements intérieurs étudiés (logements, bureaux, crèches), et dans certaines études, une association entre ces concentrations et des effets sur la santé des élèves (symptômes de l'asthme), la performance et la perception de confort.

L'Agence souligne donc l'importance de sensibiliser les services techniques des mairies, les responsables des établissements scolaires et les enseignants sur les mesures qui peuvent permettre de réduire efficacement les effets du confinement sur la santé, la performance et la perception de confort, telles que l'aération par l'ouverture des fenêtres et des portes. La stratégie d'aération doit tenir compte de certains paramètres dont les nuisances sonores, le transfert de la pollution extérieure, le confort thermique, etc.

Cette stratégie d'aération doit être complémentaire de la maîtrise des sources de pollution, notamment le choix des produits de construction, de décoration, d'ameublement, des produits d'entretien, des fournitures scolaires, etc.

Le directeur général

Marc Mortureux

MOTS-CLÉS

dioxyde de carbone, renouvellement, ventilation, air intérieur, effet santé, population générale, école, logement, bureau, établissement recevant du public

BIBLIOGRAPHIE

- ANSES (2011) Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur, Évolution de la méthode d'élaboration des valeurs guides de qualité d'air intérieur. Rapport et avis, 79 p. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.
En ligne : <http://www.anses.fr/Documents/AIR2010sa0307Ra.pdf>
- Derbez M et Dassonville C (2011) Etude pilote de la campagne nationale de connaissance des expositions des enfants dans les écoles. Rapport final non publié, Programme d'études et de recherche de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur, 142 p.
- Erdmann CA et Apte MG (2004) Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset, *Indoor Air*, 14(s8), 127-134.
- Gestis (2013) Base de données sur les substances dangereuses pour l'Assurance sociale allemande des accidents. Consultée en avril 2013 sur le site en ligne : <http://www.dguv.de/ifa/en/gestis/stoffdb/index.jsp#>
- Kirchner S, Cochet C, *et al.* (2007) Etat de la qualité de l'air dans les logements français. *Environnement Risques & Santé*, 6, 259-269.
- MEDDTL (2012) Mesures pour améliorer la qualité de l'air intérieur. Dossier de presse du 6 janvier 2012, 15 p. Ministère de l'écologie, du développement durable, et de l'énergie. En ligne : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DP_Etiquette_COV_et_qualite_de_l_air_interieur.pdf
- Michelot N, Mandin C, *et al.* (2011) Campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches en France. Résultats de la première phase. *Pollution Atmosphérique*, 53, 267-279.
- Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, Fisk WB (2012). Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*, Sep 20.
- Simoni M, Annesi-Maesano I, Sigsgaard T, Norbäck D, Wieslander G, Nystad W, Canciani M, Sestini P, Viegi G (2010) School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children, *European Respiratory Journal*, 35:742-749.
- Wargocki P, Wyon DP, Sundell J, Clausen G. et Fanger PO (2000) The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity, *Indoor Air*, 10, 222-236.



Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé

RAPPORT d'expertise collective

Comité d'experts spécialisé «Evaluation des risques liés aux milieux aériens »

Juin 2013

Mots clés

dioxyde de carbone, renouvellement, ventilation, air intérieur, effet santé, population générale, école, logement, bureau, établissement recevant du public

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

RAPPORTEURS

M. Patrice BLONDEAU – enseignant-chercheur à l'Université de La Rochelle - qualité de l'air intérieur - ventilation - épuration - modélisation

M. Pierre-André CABANES – adjoint au directeur (Service des études médicales d'EDF) – médecine - évaluation des risques sanitaires

Mme Nathalie LECLERC – responsable projet air intérieur (Association pour la surveillance et l'étude de la pollution atmosphérique en Alsace) – métrologie - qualité de l'air intérieur

M. Jean-Ulrich MULLOT – pharmacien du service de santé des Armées – chimie analytique - évaluation des risques environnementaux et professionnels

COMITE D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- Evaluation des risques liés aux milieux aériens – les 1^{er} décembre 2011, 13 décembre 2012, 7 février 2013, 26 mars 2013 et 14 mai 2013

Président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Lorraine – Centre hospitalier universitaire de Nancy – Institut national de la santé et de la recherche médicale). Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles.

Vice-présidente

Mme Séverine KIRCHNER – Responsable du pôle Expologie des environnements intérieurs (Centre scientifique et technique du bâtiment), coordinatrice de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur – Spécialités : chimie et pollution de l'atmosphère, air intérieur, expologie.

Membres

Mme Armelle BAEZA – Maître de conférence, Habilitation à diriger des recherches Toxicologie (Université Paris Diderot) – Spécialités : toxicologie.

M. Olivier BLANCHARD – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : évaluation des risques sanitaires, pollution atmosphérique, qualité de l'air intérieur.

Mme Céline BOUDET-DEVIDAL – Docteur en sciences (Institut national de l'environnement industriel et des risques) – Spécialités : évaluation des risques sanitaires, pollution atmosphérique, agents polluants, toxicologie.

M. Patrick BROCHARD – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université Bordeaux II – Centre hospitalier universitaire de Bordeaux) – Spécialités : médecine du travail, évaluation des risques sanitaires, agents polluants.

Mme Christine BUGAJNY – Responsable du groupe Air (Centre d'études techniques de l'équipement de Nord-Picardie) – Spécialités : pollution atmosphérique et transports, métrologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Denis CHARPIN – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de la Méditerranée) – Spécialités : médecine, agents polluants et allergènes, épidémiologie des risques liés à l'environnement.

M. Christophe DECLERCQ – Coordonnateur du Programme de surveillance air et santé (Institut de veille sanitaire) – Spécialités : médecine (santé publique et travail), épidémiologie, statistique, évaluation des risques.

M. Guillaume GARÇON – Maître de conférences, Habilitation à diriger des recherches (Université du Littoral-Côte d'Opale) – Spécialité : toxicologie.

M. Michel GIROUX – Docteur en pharmacie (Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Spécialités : toxicologie, épidémiologie, santé publique, environnement et travail.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail – Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Spécialités : expologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Horacio HERRERA – Chef de département (Institut universitaire romand de santé au travail) – Spécialités : santé travail (hygiéniste), surveillance des ambiances de travail (métrologie, chimie analytique).

M. Eddy LANGLOIS – Ingénieur, responsable de laboratoire (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : métrologie des polluants, air des lieux de travail (santé travail), surveillance et méthode d'analyse.

M. Loïc PAILLAT – Ingénieur, responsable technique (Laboratoire central de la préfecture de police) – Spécialités : pollution de l'air intérieur, de l'air ambiant et de l'air des lieux de travail, métrologie des polluants.

M. Christian SEIGNEUR – Directeur du Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique (Ecole nationale des ponts et chaussées) – Spécialités : modélisation environnementale, chimie atmosphérique, évaluation et caractérisation des expositions.

M. Fabien SQUINAZI – Médecin biologiste, directeur (Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris) – Spécialités : air intérieur, microbiologie, pathologies professionnelles induites par la qualité de l'air.

Il a été adopté par le CES le 25 juin 2013.

- Ces travaux d'expertise ont également fait l'objet de présentations au groupe de travail « Valeur guide de qualité d'air intérieur » (VGAI) les 20 septembre 2012, 5 mars et 16 avril 2013 et d'une présentation au CES « Evaluation des risques liés aux substances chimiques » le 19 janvier 2012.

PARTICIPATION ANSES

Coordination et contribution scientifique

M. Matteo REDAELLI – Chef de projet, unité évaluation des risques liés à l'air – Anses

Contribution scientifique

M. Guillaume BOULANGER – Adjoint au chef de l'unité évaluation des risques liés à l'air – Anses

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – Anses

CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES

« Recherche de corrélations entre niveaux de dioxyde de carbone et niveaux de polluants cibles dans l'air des environnements intérieurs » (**Centre Scientifique et Technique du Bâtiment**, Rapport de mars 2013)

« Analyse des études épidémiologiques en vue de déterminer des valeurs de concentration en CO₂ dans les environnements intérieurs » (**Sépia-Santé**, Rapport de mars 2013)

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions	8
Sigles et abréviations	16
Liste des tableaux	17
Liste des figures	17
Liste des annexes	17
1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine	18
1.1 Contexte	18
1.2 Objet de la saisine	19
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation	19
2 Introduction	20
3 Informations générales sur le CO ₂	21
3.1 Introduction	21
3.2 Identification de la substance	21
3.3 Propriétés physico-chimiques	21
3.4 Méthodes de détection et de détermination dans l'air	22
3.5 Valeurs limites d'exposition professionnelle	22
3.6 Valeurs normatives et réglementaires de la qualité du renouvellement d'air intérieur	22
4 Synthèse des effets intrinsèques du CO ₂ sur la santé	26
4.1 Objectifs et méthode	26
4.2 Résultats	26
4.2.1 Introduction	26
4.2.2 Perturbation de l'équilibre acido-basique	27
4.2.3 Toxicité pulmonaire	28
4.2.4 Effets sur la fonction cardiovasculaire	29
4.2.5 Effets sur le système nerveux central et la fonction neuroendocrine	29
4.2.6 Effets sur la reproduction	31
4.2.7 Tératogénicité	31
4.2.8 Cancérogénicité	32
4.3 Conclusions	33
5 Effets sur la santé, la perception de confort et la performance associés aux concentrations de CO ₂ indicateur de confinement	35
5.1 Objectifs et méthode	35
5.2 Résultats	38
5.2.1 Dans les environnements intérieurs globalement	38

5.2.2 Dans les écoles	42
5.2.3 Dans les bureaux.....	43
5.2.4 Dans les logements	43
6 Relations entre les concentrations de CO ₂ et de polluants cibles mesurées dans des écoles, crèches, bureaux et logements en France	44
6.1 Objectifs et méthode	44
6.2 Résultats	47
6.2.1 Dans les environnements intérieurs globalement.....	47
6.2.2 Dans les écoles et crèches.....	49
6.2.3 Dans les logements	49
6.2.4 Dans les bureaux.....	50
7 Conclusions.....	51
7.1 Evaluation de la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur pour le CO₂.....	51
7.2 Détermination de valeurs de concentration en CO₂ protégeant des effets du confinement sur la santé, la performance et la perception de confort	51
7.3 Recherche des relations entre les concentrations en air intérieur de CO₂ et les concentrations d'autres polluants mesurées en France dans des logements, écoles/crèches et bureaux.....	51
7.4 Mise en perspective de valeurs de concentrations de CO₂ dans l'air intérieur associées à des effets sur la santé, avec des valeurs de classement de la qualité de l'air intérieur et des valeurs limites d'exposition professionnelle	52
8 Recommandations	55
9 Bibliographie.....	56
ANNEXES.....	59
Annexe 1 : Lettre de saisine	60
Annexe 2 : Analyse des études épidémiologiques en vue de déterminer des valeurs de concentration en CO ₂ dans les environnements intérieurs (Sépia-Santé, 2013).....	62
Annexe 3 : Recherche de corrélations entre niveaux de dioxyde de carbone et niveaux de polluants cibles dans l'air des environnements intérieurs (CSTB, 2013).....	150
Annexe 4 : Liens mentionnés dans les déclarations publiques d'intérêts des experts	265

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Relatives aux « Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé »

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts spécialisé, des rapporteurs et de l'Anses.

Présentation de la question posée

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a été saisie le 1^{er} mars 2012 par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Direction générale de la santé (DGS) afin de réaliser :

1. une évaluation de la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur (VGAI) pour le dioxyde de carbone (CO₂) selon la méthode proposée par l'Anses ;
2. une détermination, sous réserve de faisabilité, de valeur(s) de concentration en CO₂ dans l'air intérieur en tant qu'indicateur d'effets sanitaires, pour différents types de locaux : logements, hébergements collectifs comme les centres de vacances, structures d'accueil de personnes âgées, et autres établissements recevant du public ;
3. une identification des éventuelles corrélations entre le CO₂ et d'autres polluants de l'air intérieur en considérant les concentrations et les effets sanitaires des autres polluants.

Contexte scientifique

Le CO₂ est une molécule endogène produite par la respiration. Sa concentration dans l'air intérieur des bâtiments est habituellement comprise entre 350 et 2500 ppm environ. Elle est liée à l'occupation humaine et au renouvellement d'air.

La concentration en CO₂ dans l'air intérieur est l'un des critères qui fondent la réglementation en matière d'aération des locaux. Le titre III des Règlements sanitaires départementaux (RSD) fixe ainsi, pour les bâtiments non résidentiels, un seuil en CO₂ de 1000 ppm dans des conditions normales d'occupation, avec une tolérance à 1300 ppm dans les locaux où il est interdit de fumer, sans fondement sanitaire explicite de ces deux valeurs. Le décret du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants réalisées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public, prévoit le calcul d'un indice de confinement à partir d'une mesure en continu de la concentration de CO₂ dans l'air (indice ICONE). Plus généralement, la concentration en CO₂ est, avec le taux d'humidité, l'un des paramètres des modélisations qui ont conduit à définir les valeurs de débits de ventilation ou de dimensionnement réglementaires, tant pour les logements¹ que pour les bâtiments non résidentiels².

Dans le cadre d'une mise à jour de cette réglementation, la DGPR et la DGS ont saisi l'agence afin de disposer de valeurs de concentration en CO₂ dans l'air intérieur associées à des effets sanitaires, tenant compte des publications les plus récentes sur ce sujet.

¹ Arrêtés du 14 novembre 1958, du 22 octobre 1969 et du 24 mars 1982

² Règlements Sanitaires Départementaux – Titre III

Organisation de l'expertise

L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine. Les travaux d'expertise ont été réalisés par quatre experts rapporteurs et l'Anses. Ils ont été soumis régulièrement au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport final tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES. Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

La saisine a également été présentée au CES « Évaluation des risques liés aux substances chimiques » le 19 janvier 2012 et au groupe de travail « Valeurs guides de qualité d'air intérieur » le 20 septembre 2012, le 5 mars et le 16 avril 2013.

L'expertise est réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

Description de la méthode

1. Afin d'évaluer la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur pour le CO₂ (VGAI) selon la méthode proposée par l'Anses (Anses, 2011), une synthèse des effets sanitaires intrinsèques du CO₂, en particulier aux faibles concentrations d'exposition, a été réalisée.
2. Afin de déterminer des valeurs de concentration en CO₂ en tant qu'indicateur de confinement, dans l'air intérieur pour différents types de locaux, une analyse des études épidémiologiques investiguant la relation entre concentrations de CO₂ et effets sur la santé, sur la performance et sur la perception de confort, a été réalisée. Ces effets sont donc à relier aux nuisances induites par le niveau de confinement, et non intrinsèquement au CO₂.
3. Les relations entre les concentrations de CO₂ et d'autres polluants de l'air intérieur ont été recherchées à partir de campagnes de mesures françaises dans les logements, les écoles, les crèches, et les bureaux³.
4. Enfin, les concentrations de CO₂ issues des études épidémiologiques et toxicologiques (étapes 1. et 2.) ont été mises en perspective avec celles utilisées par la norme NF EN 13779⁴ pour le classement de la qualité de l'air intérieur, et avec celles utilisées comme valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP).

Résultats et conclusions de l'expertise collective

Le comité d'experts spécialisé « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations lors de sa séance du 25 juin 2013 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

³ Quatre campagnes menées respectivement :

- dans 567 logements (campagne nationale de l'OQAI ; Kirchner *et al.*, 2007),
- dans 310 crèches, écoles maternelles et élémentaires avec 896 salles instrumentées entre septembre 2009 et décembre 2011 (MEDDTL, 2012 ; Michelot *et al.*, 2011),
- dans 17 écoles maternelles et élémentaires de Clermont-Ferrand avec 51 salles de classes instrumentées en 2010 (campagne pilote de l'OQAI, Derbez et Dassonville, 2011),
- dans 9 immeubles de bureaux en France par le CSTB avec 36 points de mesures distincts.

⁴ Norme NF EN 13779 « Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air » s'appliquant aux bâtiments non résidentiels sujets à occupation humaine, non industriels et non-fumeurs.

1. Evaluation de la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur pour le CO₂ selon la méthode proposée par l'Anses

Il n'apparaît pas pertinent de construire une VGAI pour le CO₂ fondée sur ses effets propres selon la méthode proposée par l'Anses.

En effet, plusieurs études rapportent des concentrations associées à des effets sanitaires intrinsèques du CO₂ (seuil à environ 10000 ppm correspondant à l'apparition d'une acidose respiratoire, premier effet critique du CO₂). Ces concentrations seuil sont supérieures aux valeurs limites réglementaire et/ou normative de qualité du renouvellement d'air en France et au niveau international qui varient usuellement entre 1000 et 1500 ppm de CO₂. Par ailleurs, ces concentrations associées à des effets intrinsèques du CO₂ sont supérieures aux concentrations de CO₂ en tant qu'indicateur de confinement pour lesquelles des effets sont associés et à relier aux nuisances induites par le confinement.

2. Détermination de valeurs de concentration en CO₂ en tant qu'indicateur du confinement, dans l'air intérieur pour différents types de locaux, à partir d'une analyse des études épidémiologiques investiguant la relation entre concentration de CO₂ et des effets sur la santé, la performance et la perception de confort

L'analyse montre que des effets sur la santé, la perception de confort ou la performance sont observés pour des augmentations de concentration dans l'air intérieur de 100 ppm de CO₂ pris en tant qu'indicateur du confinement d'air. Ces effets sont imputables aux nuisances induites par le confinement.

Il convient de préciser que :

- les études analysées comparent le plus souvent les effets pour seulement deux niveaux de CO₂, et/ou décrivent la relation concentration de CO₂ (variable continue)-effet mais en faisant l'hypothèse d'une relation linéaire *a priori*. Elles ne modélisent donc pas la forme de la relation dose-réponse qui permettrait de détecter un éventuel seuil ;
- il n'existe pas d'étude épidémiologique représentative du parc français des logements, écoles, crèches ou bureaux, visant à investiguer la relation entre concentration de CO₂ et des effets sur la santé, la performance ou la perception de confort. Les études concernent des parcs de bâtiments existants présentant des caractéristiques typologiques potentiellement très différentes. Leurs résultats doivent donc être considérés avec précaution dans le cadre d'une transposition à des bâtiments appliquant les récentes réglementations thermiques françaises RT 2005 et 2012.

En conséquence, les données actuelles ne permettent pas d'établir une concentration seuil de CO₂ en air intérieur protégeant de ces effets.

3. Recherche des relations entre les concentrations de CO₂ et d'autres polluants de l'air intérieur à partir de campagnes de mesures françaises dans les logements, les écoles et crèches, et les bureaux

L'analyse montre que la mesure du CO₂ ne peut être considérée seule comme un indicateur de pollution chimique de l'air intérieur. La mesure du CO₂ ne peut donc être définie comme un outil unique de contrôle de la qualité sanitaire de l'air intérieur.

L'évolution des concentrations de CO₂ et des polluants en air intérieur dépend notamment du renouvellement d'air.

A partir des données de mesure disponibles, il existe des corrélations positives significatives entre le CO₂ et certains polluants, en particulier le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, l'acroléine (dans les logements, pas dans les bureaux) et les particules (fractions PM_{2,5} et PM₁₀, données disponibles pour la campagne nationale logement et la campagne pilote école). Ces corrélations sont faibles cependant. A l'inverse la corrélation est très faible ou nulle pour le benzène et le 1,4-dichlorobenzène (mesuré uniquement dans le cadre de la campagne nationale logements).

Plus la concentration moyenne de CO₂ est élevée, plus la proportion de situations où un polluant dépasse une valeur cible sanitaire (VGAI, VTR ou valeur guide OMS selon le polluant) augmente. Toutefois, le CO₂ ne permet pas de détecter avec suffisamment de fiabilité les dépassements de ces valeurs cibles, et la probabilité de dépasser une valeur cible n'est pas nulle dans les situations où la concentration de CO₂ est la plus réduite.

Par ailleurs, des limites inhérentes aux données disponibles ont été identifiées, notamment le faible nombre de polluants étudiés et l'impossibilité de discriminer les périodes d'occupation et d'inoccupation des locaux pour les concentrations des polluants cibles autres que les PM_{2,5} et PM₁₀.

4. Mise en perspective

L'analyse des études épidémiologiques et toxicologiques disponibles a conduit à identifier plusieurs éléments intéressants, même si ceux-ci ne sont pas suffisants pour définir des seuils garantissant une protection contre des effets sur la santé, la perception de confort ou la performance.

Concernant les effets à relier aux nuisances induites par le confinement, et non les effets intrinsèques du CO₂, il est ainsi observé que :

- dans les écoles, une augmentation de la fréquence de symptômes de l'asthme chez l'enfant peut être associée à des concentrations de CO₂ supérieures à 1000 ppm en moyenne sur une journée d'école, d'après une étude multicentrique européenne (Simoni *et al.*, 2010) jugée de bonne qualité et la plus pertinente au regard de la situation des écoles en France. Cette valeur de 1000 ppm a été retenue *a priori* par les auteurs lors de la formation de classes de concentration et ne résulte pas spécifiquement de la recherche d'un seuil sans effet ;
- dans les bureaux, une augmentation de la fréquence de symptômes du syndrome des bâtiments malsains (ou SBS) peut être associée à des concentrations de CO₂ supérieures à 850 ppm en moyenne sur une journée de travail, d'après l'étude américaine BASE (Erdmann et Apte, 2004) jugée de bonne qualité et la plus pertinente dans ce contexte. Cette étude transversale sur un échantillon représentatif d'immeubles aux Etats-Unis et dont les résultats sont corroborés par ceux d'une étude expérimentale (Wargocki *et al.*, 2000) a montré des relations concentration-risque significatives. Le seul Odd-Ratio significatif était celui comparant le dernier décile (>844 ppm) au premier décile (<410 ppm). Une des réserves est que les immeubles sont tous (sauf un) équipés d'une ventilation avec air conditionné, à la différence du parc français de bâtiments de bureaux.

Concernant les effets intrinsèques du CO₂, il est observé que :

- l'apparition d'une acidose respiratoire, premier effet critique du CO₂, peut être admise à partir d'un niveau d'exposition de 1% (10000 ppm) pendant au moins 30 minutes chez un adulte en bonne santé avec une charge physique modérée ;
- une récente étude expérimentale sur 22 sujets humains adultes suggère un effet propre du CO₂ sur la performance psychomotrice (prise de décision, résolution de problèmes) à partir de 1000 ppm (Satish *et al.*, 2012), cette étude n'étant pas suffisante pour élaborer une VGAI en l'absence de convergence avec d'autres études et de consensus international sur la nature des effets et le mode d'action associé (Anses, 2011).

A titre indicatif, le tableau suivant propose une mise en perspective des concentrations de CO₂ utilisées par la norme NF EN 13779 pour le classement de la qualité de l'air intérieur avec celles issues des études épidémiologiques ou toxicologiques.

Les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) sont également présentées dans le tableau. En France, une valeur limite réglementaire indicative d'exposition moyenne sur 8 heures (VLEP 8 heures) de 5000 ppm a été fixée pour le CO₂ par l'arrêté du 30 juin 2004 modifié, et il n'existe pas de valeur limite court terme.

Des VLEP existent dans 19 autres pays (Gestis, 2013) et sont toutes égales à 5000 ppm en moyenne sur 8 heures. Les valeurs limites court terme se situent entre 10000 et 30000 ppm.

Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur – Mise en perspective à titre indicatif de :
valeurs de classement de la qualité de l'air intérieur, valeurs associées à des effets sur la santé dans la littérature scientifique, et valeurs limites d'exposition professionnelle

Différentiel de concentrations de CO ₂ de l'air intérieur et de l'air extérieur utilisé pour le classement de la qualité de l'air intérieur selon la norme NF EN 13779	Mise en perspectives avec :	
	les concentrations de CO ₂ ou différentiels de concentrations de CO ₂ entre l'air intérieur et l'air extérieur issues des études épidémiologiques ou toxicologiques	les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP)
d [CO₂] ≤ 400 ppm Qualité de l'air intérieur excellente		
d [CO₂] entre 400 et 600 ppm Qualité de l'air intérieur moyenne	[CO₂] ≥ 850 ppm ou d [CO₂] ≥ 450 ppm Plage correspondant en moyenne sur une journée de travail à une augmentation de symptômes du SBS dans des bureaux	
d [CO₂] entre 600 et 1000 ppm Qualité de l'air intérieur modérée	[CO₂] ≥ 1000 ppm ou d [CO₂] ≥ 600 ppm* Plage correspondant à : - une augmentation de symptômes de l'asthme chez l'enfant, en moyenne sur une journée d'école - une altération suspectée de la performance psychomotrice due au CO ₂ seul chez l'adulte, en moyenne sur quelques heures (une seule étude)	
d [CO₂] > 1000 ppm Qualité de l'air intérieure basse	[CO₂] égale à 10000 ppm Concentration correspondant sur au moins 30 minutes à l'apparition d'acidose respiratoire due au CO ₂ seul (un des premiers effets critiques) chez l'adulte sain avec une charge physique modérée	[CO₂] égale à 5000 ppm Concentration moyenne sur 8 heures (VLEP 8h) utilisée comme valeur limite d'exposition professionnelle en France et à l'étranger [CO₂] comprise entre 10000 et 30000 ppm Intervalle des concentrations court terme (VLCT ou VLE) utilisées comme valeurs limites d'exposition professionnelle à l'étranger (aucune valeur pour la France)

*Différentiel entre CO₂ de l'air intérieur et de l'air extérieur calculé à partir d'un niveau intérieur ≥ 1000 ppm et d'un niveau extérieur pris par défaut de 400 ppm

Recommandations

❖ En appui à la gestion :

- Le CES rappelle que le CO₂ peut être utilisé comme un indicateur du confinement de l'air. Il recommande de s'appuyer sur la norme NF EN ISO 16000-26⁵ pour la stratégie d'échantillonnage du CO₂ dans les environnements intérieurs.
- Le CES recommande de ne pas élaborer de VGAI pour le CO₂, que ce soit pour ses effets propres ou pour les effets du confinement sur la santé. Il insiste sur le fait que la seule mesure du CO₂ ne peut être considérée comme un indicateur de qualité sanitaire de l'air intérieur au vu des résultats de ces travaux qui montrent que :
 - les données épidémiologiques disponibles ne permettent pas de construire de valeur seuil du CO₂ protégeant des effets du confinement sur la santé, sur la perception de confort ou sur la performance,
 - la probabilité de dépassement de valeurs cibles sanitaires (VGAI, VTR ou VG_{OMS}) pour les polluants chimiques de l'air intérieur n'est pas nulle même pour des concentrations de CO₂ réduites.
- Compte tenu des éléments ci-dessus, le CES recommande de réduire à la source les émissions de polluants dans l'air intérieur, en complément de l'amélioration de la ventilation.
- Le CES recommande d'évaluer la pertinence de réviser la valeur limite d'exposition professionnelle VLEP 8 heures du CO₂, et notamment la pertinence d'élaborer une VLEP court terme.

❖ En termes de recherche, le CES recommande d'améliorer les connaissances concernant les éventuels effets propres au CO₂ :

- sur la performance psychomotrice (prise de décision, résolution de problèmes) aux faibles doses incluant des concentrations d'exposition inférieures ou égales à 1000 ppm, par exemple en répliquant l'étude de Satish *et al.* (2012) et en documentant le mécanisme d'action ;
- sur la santé des populations plus sensibles ou plus exposées telles que les enfants, les femmes enceintes et les personnes présentant des affections pulmonaires ou cardiaques.

Date de validation de la synthèse par le comité d'experts spécialisé : 25 juin 2013

⁵ Norme ISO 16000-26:2012 Air intérieur -- Partie 26: Stratégie d'échantillonnage du dioxyde de carbone (CO₂)

Références

- ANSES (2011) Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur, Évolution de la méthode d'élaboration des valeurs guides de qualité d'air intérieur. Rapport et avis, 79 p. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.
En ligne : <http://www.anses.fr/Documents/AIR2010sa0307Ra.pdf>
- Kirchner S, Cochet C, *et al.* (2007) Etat de la qualité de l'air dans les logements français. *Environnement Risques & Santé*, 6, 259-269.
- MEDDTL (2012) Mesures pour améliorer la qualité de l'air intérieur. Dossier de presse du 6 janvier 2012, 15 p. Ministère de l'écologie, du développement durable, et de l'énergie. En ligne :
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DP_Etiquette_COV_et_qualite_de_l_air_interieur.pdf
- Michelot N, Mandin C, *et al.* (2011) Campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches en France. Résultats de la première phase. *Pollution Atmosphérique*, 53, 267-279.
- Derbez M et Dassonville C (2011) Etude pilote de la campagne nationale de connaissance des expositions des enfants dans les écoles. Rapport final non publié, Programme d'études et de recherche de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur, 142 p.
- Simoni M, Annesi-Maesano I, Sigsgaard T, Norbäck D, Wieslander G, Nystad W, Canciani M, Sestini P, Viegi G (2010) School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children, *European Respiratory Journal*, 35:742-749.
- Erdmann CA et Apte MG (2004) Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset, *Indoor Air*, 14(s8), 127-134.
- Wargocki P, Wyon DP, Sundell J, Clausen G. et Fanger PO (2000) The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity, *Indoor Air*, 10, 222–236.
- Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, Fisk WB (2012). Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*, Sep 20.
- Gestis (2013) Base de données sur les substances dangereuses pour l'Assurance sociale allemande des accidents. Consultée en avril 2013 sur le site en ligne : <http://www.dguv.de/ifa/en/gestis/stoffdb/index.jsp#>

Sigles et abréviations

ACP : Analyse par composantes principales normée

AIVC : Air Infiltration and Ventilation Centre

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

ATSDR : Agency for Toxic Substances and Disease Registry

AUC : Area under the curve (ou aire sous la courbe)

CES : Comité d'experts spécialisé

CO₂ : Dioxyde de carbone

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

dCO₂ : Différentiel entre la concentration en dioxyde de carbone de l'air intérieur et le niveau de dioxyde de carbone de l'air extérieur

DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques

DGS : Direction Générale de la Santé

DHUP : Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages

ERI : Excès de risque individuel

FT n° : Numéro de la fiche toxicologique de l'Institut national de recherche et de sécurité

GD : Gestation day (ou jour de gestation)

IFA : Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (ou Institut de sécurité et santé au travail pour l'Assurance sociale allemande des accidents)

LCR : Liquide céphalorachidien

OEHHA : California Office of Environmental Health Hazard Assessment

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OR : Odds-Ratios

PaCO₂ : Pression de dioxyde de carbone dans le sang artériel

pCO₂ : Pression partielle en dioxyde de carbone

PNSE : Plan National Santé Environnement

RSD : Règlement sanitaire départemental

SBM : Syndrome des bâtiments malsains

SBS : Sick building syndrome

TMP n° : Numéro de tableau des maladies professionnelles

VC : Valeur cible

VGAI_{Anses} : Valeur guide de qualité de l'air intérieur proposée par l'Anses

VLCT : Valeur limite de court terme en milieu professionnel

VME : Valeur limite réglementaire indicative d'exposition moyenne sur 8 heures en milieu professionnel

VTR : Valeur toxicologique de référence

Liste des tableaux

Tableau I : Identification du dioxyde de carbone.....	21
Tableau II : Principales propriétés physico-chimiques (INRS, 2005).....	21
Tableau III : Valeurs limites d'exposition professionnelle en France (INRS, 2008).....	22
Tableau IV : Valeurs de CO2 utilisées pour le classement de la qualité de l'air intérieur selon la norme NF EN 13779 (CSTB, 2011).....	23
Tableau V : Récapitulatif des valeurs réglementaires ou recommandées pour les bâtiments résidentiels (CSTB, 2011).....	23
Tableau VI : Récapitulatif des valeurs réglementaires ou recommandées pour les bâtiments scolaires (CSTB, 2011).....	24
Tableau VII : Récapitulatif des valeurs réglementaires ou recommandées pour les bureaux (CSTB, 2011).....	24
Tableau VIII : Liste des polluants cibles mesurés selon les campagnes.....	44
Tableau IX : Liste des valeurs cibles des polluants.....	46
Tableau X : Récapitulatif des coefficients de corrélation de Pearson r entre les concentrations de dioxyde de carbone et des polluants cibles (concentrations en moyenne intégrée sur une semaine).....	48

Liste des figures

Figure 1 : Description de la sélection des publications d'épidémiologie.....	37
Figure 2 : Description des études épidémiologiques par lieu et par effet.....	37

Liste des annexes

Annexe 1 : Lettre de saisine.....	60
Annexe 2 : Analyse des études épidémiologiques en vue de déterminer des valeurs de concentration en CO2 dans les environnements intérieurs (Sépia-Santé, 2013).....	62
Annexe 3 : Recherche de corrélations entre niveaux de dioxyde de carbone et niveaux de polluants cibles dans l'air des environnements intérieurs (CSTB, 2013).....	150
Annexe 4 : Liens mentionnés dans les déclarations publiques d'intérêts des experts.....	265

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

En France, la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments constitue une préoccupation de santé publique puisque chaque individu passe en moyenne, en climat tempéré, 85 % de son temps dans des environnements clos dont une majorité de ce temps dans l'habitat. L'environnement intérieur présente une grande diversité de situations de pollutions par de nombreux agents physiques et contaminants chimiques ou microbiologiques, liées notamment à la nature des matériaux de construction, aux équipements, à l'environnement extérieur immédiat et aux activités des occupants. Or, les pollutions peuvent avoir des conséquences importantes sur l'état de santé des individus, même si elles ne sont pas toutes quantifiables avec précision et s'il est souvent difficile de s'accorder sur la part des déterminants génétiques, sociaux et environnementaux dans l'apparition et le développement des pathologies observées : irritations, maladies allergiques, pathologies dermatologiques d'origine immunitaire, affections broncho-pulmonaires, intoxications aiguës, cancers, syndrome des bâtiments malsains (SBM ou sick building syndrome (SBS)), etc.

En France, une volonté d'approfondissement des connaissances dans le domaine la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments a été spécifiée dans le cadre du premier Plan National Santé Environnement (PNSE, 2004-2008). En effet, l'une des douze actions prioritaires visant à répondre à l'un des trois objectifs majeurs du plan, « garantir un air et une eau de bonne qualité », était de « mieux connaître les déterminants de la qualité de l'air intérieur » (Action 14).

En juillet 2007, le Grenelle de l'environnement a été engagé afin de réunir différents collègues (État, collectivités locales, entreprises, syndicats et organisations non gouvernementales) afin de définir une feuille de route en faveur de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables. Plusieurs propositions concernant la qualité de l'air intérieur ont été émises et reprises dans le PNSE II. Cette volonté constitue à présent l'une des priorités des lois 2009-967 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'Environnement (article 37 et 40) et 2010-788 portant engagement national pour l'environnement (article 180).

Le dioxyde de carbone (CO₂) est une molécule endogène produite par la respiration. Sa concentration dans l'air intérieur des bâtiments est liée à l'occupation humaine et au renouvellement d'air. Elle est l'un des critères qui fondent la réglementation en matière d'aération des locaux. Le titre III des Règlements sanitaires départementaux (RSD) fixe ainsi, pour les bâtiments non résidentiels, un seuil en CO₂ de 1000 ppm dans des conditions normales d'occupation, avec une tolérance à 1300 ppm dans les locaux où il est interdit de fumer, sans fondement sanitaire explicite de ces deux valeurs. Le décret du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants réalisées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public prévoit le calcul d'un indice de confinement à partir d'une mesure en continu de la concentration de CO₂ dans l'air (indice ICONE). Plus généralement, la concentration en CO₂ est, avec le taux d'humidité, l'un des fondements des modélisations qui ont conduit à définir les valeurs de débits de ventilation ou de dimensionnement réglementaires, tant pour les logements⁶ que pour les bâtiments non résidentiels⁷.

⁶ Arrêtés du 14 novembre 1958, du 22 octobre 1969 et du 24 mars 1982

⁷ Règlements Sanitaires Départementaux – Titre III

Dans le cadre d'une mise à jour de cette réglementation, la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Direction générale de la santé (DGS) ont saisi l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) afin de disposer de valeurs de concentration en CO₂ dans l'air intérieur associées à des effets sanitaires, tenant compte des publications les plus récentes sur ce sujet. Les environnements intérieurs à considérer en priorité sont les logements, les hébergements collectifs (centres de vacances, structures d'accueil de personnes âgées...), puis les autres établissements recevant du public (notamment bureaux, crèches, écoles...).

En 2011, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) a réalisé une étude descriptive des associations entre niveau de CO₂ intérieur et santé, confort ou performance issues de la littérature internationale. Cette étude a été réalisée à la demande de la DGS (Convention 2010, Action 7 : étude ventilation liée à la saisine sur le projet de décret RSD), et dans le cadre d'un groupe de travail créé par la Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages (DHUP) afin d'élaborer et de formuler des exigences réglementaires de lutte contre le confinement de l'air basées sur le CO₂.

1.2 Objet de la saisine

La DGPR et la DGS ont saisi l'Anses le 1^{er} mars 2012 afin que l'agence réalise :

1. **une évaluation de la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur pour le CO₂ selon la méthode proposée par l'Anses ;**
2. **une détermination, sous réserve de sa faisabilité, de valeur(s) de concentration en CO₂ dans l'air intérieur en tant qu'indicateur d'effets sanitaires, pour différents types de locaux : logements, hébergements collectifs (centres de vacances, structures d'accueil de personnes âgées...) et autres établissements recevant du public (notamment bureaux, crèches, écoles...) ;**
3. **une identification des éventuelles corrélations entre le CO₂ et d'autres polluants de l'air intérieur en considérant les concentrations et les effets sanitaires des autres polluants.**

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'agence a confié au comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine. Les travaux d'expertise ont été réalisés par quatre experts rapporteurs et l'Anses. Ils ont été soumis régulièrement au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport final tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES. Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

La saisine a également été présentée au CES « Évaluation des risques liés aux substances chimiques » le 19 janvier 2012 et au groupe de travail « Valeurs guides de qualité d'air intérieur » le 20 septembre 2012, le 5 mars et le 16 avril 2013.

L'expertise est réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

La démarche de l'expertise comprend trois étapes :

- 1. Afin d'évaluer la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur pour le CO₂ (VGAI) selon la méthode proposée par l'Anses**, une synthèse des effets sanitaires intrinsèques du CO₂, en particulier aux faibles concentrations d'exposition, a été réalisée.
- 2. Afin de déterminer des valeurs de concentration en CO₂ protégeant des effets du confinement pour différents types de locaux**, une analyse des études épidémiologiques investiguant la relation entre concentrations de CO₂ et effets sur la santé, sur la performance et sur la perception de confort, a été réalisée. Ces effets sont donc à relier aux nuisances induites par le niveau de confinement, et non intrinsèquement au CO₂. Cette étape s'appuie sur une étude de Sepia-Santé réalisée dans le cadre d'une convention de Recherche et Développement avec l'Anses.
- 3. Afin de rechercher les relations entre les concentrations de CO₂ et d'autres polluants de l'air intérieur**, les données issues de campagnes de mesures françaises dans les logements, les écoles, les crèches, et les bureaux ont été analysées. Cette étape s'appuie sur une étude réalisée par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment dans le cadre d'une convention de Recherche et Développement avec l'Anses.

A partir des résultats de ces trois étapes, des conclusions ont été tirées, incluant à titre indicatif une mise en perspective des concentrations de CO₂ issues des études épidémiologiques et toxicologiques (étapes 1. et 2.) avec celles utilisées par la norme NF EN 13779⁸ pour le classement de la qualité de l'air intérieur, et avec celles utilisées comme valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP).

Des recommandations sont finalement formulées en appui à la gestion et en termes de recherche.

2 Introduction

Un premier chapitre apporte des informations générales sur l'identification et les propriétés physicochimiques de la substance avant d'introduire le contexte réglementaire et normatif du CO₂. Afin de répondre à l'objet de la saisine, les chapitres suivants présentent le produit des travaux réalisés dans le cadre de l'expertise, soit :

- une synthèse de la toxicité intrinsèque du CO₂, en particulier aux faibles concentrations d'exposition,
- une analyse des études épidémiologiques investiguant la relation entre des concentrations de CO₂ en tant qu'indicateur de confinement de l'air dans des écoles, bureaux ou logements, et des effets sur la santé, la perception ou la performance (détaillée dans le rapport d'étude en annexe 2),
- une analyse des relations entre les concentrations de CO₂ et les concentrations de polluants cibles à partir des données issues de campagnes de mesures françaises dans les écoles/crèches, les bureaux et les logements réalisées entre 2003 et 2012 (détaillée dans le rapport d'étude en annexe 3).

Ces parties sont suivies des conclusions et des recommandations de l'expertise.

⁸ Norme NF EN 13779 « Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air » s'appliquant aux bâtiments non résidentiels sujets à occupation humaine, non industriels et non-fumeurs.

3 Informations générales sur le CO₂

3.1 Introduction

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un constituant naturel de l'atmosphère où sa concentration varie de 0,03 à 0,06 % environ (vol/vol soit 300 à 600 ppm ou 0,2 à 0,4 mmHg). Sa concentration régulièrement croissante contribue à l'effet de serre (Bertoni et al, 2004) et à l'accélération du réchauffement climatique (Cox et al., 2000).

Le CO₂ est une substance endogène synthétisée par l'organisme via la respiration cellulaire. Cette substance est largement utilisée dans l'industrie, notamment dans la production agricole pour la conservation, le refroidissement, ainsi que pour certaines applications médicales. Il est par ailleurs un produit connu de combustion, putréfaction et fermentation.

3.2 Identification de la substance

Tableau I : Identification du dioxyde de carbone

Numéro CAS, EINEICS	CAS : 124-38-9 EINECS : 204-696-9 INDEX : ---
Nom	dioxyde de carbone
Synonymes	anhydride carbonique, bioxyde de carbone
Formule brute	CO ₂
Formule développée	

3.3 Propriétés physico-chimiques

A température ambiante et pression normale, le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz incolore, inodore, à saveur piquante. Le CO₂ est un composé ininflammable.

Tableau II : Principales propriétés physico-chimiques (INRS, 2005)

Forme physique	gaz incolore
Poids moléculaire	44,01 g.mol ⁻¹
Point de sublimation	- 78,5°C
Point de fusion	- 56,6°C à 526 kPa
Pression de vapeur	5860 kPa à 21°C
Densité du gaz	1,53 (par rapport à l'air = 1)
Facteurs de conversion	1 ppm = 1,8 mg/m ³ à 25°C et 101 kPa dans l'air
Solubilité dans l'eau	0,88 vol/vol à 20°C avec formation d'acide carbonique H ₂ CO ₃
Point critique	31,1°C à 7478 kPa

3.4 Méthodes de détection et de détermination dans l'air

La partie 26 de la norme NF EN ISO 16000-26 (octobre 2012) décrit la stratégie d'échantillonnage du CO₂ dans l'air intérieur. Par ailleurs, un rapport du CSTB (2012) définit le protocole de surveillance pour la mesure du confinement de l'air dans les établissements d'enseignement, d'accueil de la petite enfance et de loisirs.

Dans sa fiche toxicologique, les méthodes identifiées par l'INRS de détection et de détermination du CO₂ dans l'air sont les suivantes (INRS, 2005) :

- tubes détecteurs colorimétriques Draeger, MSA, Gastec couvrant des concentrations en CO₂ de 100 ppm à 25°C ;
- appareil à lecture directe : analyseurs infrarouges non dispersifs, capteurs électrochimiques ou à semi-conducteurs ;
- prélèvement par pompage de l'atmosphère en sac type TEDLAR, dosage par chromatographie en phase gazeuse, détection par conductivité thermique ou ionisation de flamme associée à un méthaneur.

3.5 Valeurs limites d'exposition professionnelle

En France, une valeur limite réglementaire indicative d'exposition moyenne sur 8 heures (VLEP 8 heures) de 5000 ppm (9000 mg.m⁻³) a été fixée pour le CO₂ par l'arrêté du 30 juin 2004 modifié, et il n'existe pas de valeur limite court terme (Tableau III).

Tableau III : Valeurs limites d'exposition professionnelle en France (INRS, 2012)

VME		VLCT (ou VLE)		TMP n°	FT n°	Année	Observations
ppm	mg.m ⁻³	ppm	mg.m ⁻³				
5000	9000	-	-	-	238	2007	Non classé CMR. Aucune indication de risque d'allergie ou de pénétration percutanée.

Des valeurs limites d'exposition professionnelle existent dans 19 autres pays, les valeurs en moyenne sur 8 heures étant toutes égales à 5000 ppm et les valeurs limites court terme se situant entre 10000 et 30000 ppm (Gestis, 2013).

Par ailleurs, au point de vue médical, il est recommandé (INRS, 2005) :

- d'éviter d'affecter à un poste comportant un risque d'exposition à de fortes concentrations (supérieures à 10000-20000 ppm de CO₂ des sujets présentant des affections cardiaques ou pulmonaires mal équilibrées) ;
- de rechercher des signes cliniques traduisant une forte exposition lors des examens périodiques.

3.6 Valeurs normatives et réglementaires de la qualité du renouvellement d'air intérieur

Une recherche bibliographique a été réalisée par le CSTB (2011) dont les principaux résultats sont repris ici, ainsi que les valeurs utilisées plus récemment dans le décret n°2012-14 du 5 janvier 2012.

L'inventaire réalisé par le CSTB se limite au CO₂ utilisé comme traceur de présence humaine dans les bâtiments en l'absence de sources de combustion. Cet inventaire a permis de recenser une norme internationale ISO 16814 ainsi que deux normes européennes EN 13779 et EN 15251, et a par ailleurs montré que des normes ou textes réglementaires fixant des limites de concentration de CO₂ (émis par le métabolisme humain) dans les espaces intérieurs existent dans 17 pays européens, américains, asiatiques et océaniques : France, Portugal, Royaume-Uni, Pays-Bas, Danemark, Norvège, Finlande, Belgique, Allemagne, Autriche, Etats-Unis, Canada, Brésil, Chine, Corée, Japon, Nouvelle-Zélande.

La norme NF EN 13779 « Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air » datée de 2007 et s'appliquant à la conception de systèmes de ventilation et de conditionnement de l'air dans les bâtiments non résidentiels sujets à occupation humaine, non industriels et non-fumeurs, fixe des lignes directrices concernant les systèmes de ventilation, de conditionnement de l'air et de climatisation afin d'assurer un environnement intérieur confortable et sain en toutes saisons moyennant des coûts d'installation et de fonctionnement raisonnables. Elle propose ainsi de classer la qualité de l'air intérieur par catégories en fonction de la concentration en CO₂ au-dessus du niveau de CO₂ de l'air extérieur (dCO₂) (Tableau IV).

Tableau IV : Valeurs de CO₂ utilisées pour le classement de la qualité de l'air intérieur selon la norme NF EN 13779 (CSTB, 2011)

Niveaux de CO ₂ au dessus de l'air extérieur (ppm)		
Catégorie	Plage type	Valeur par défaut au sein de cette plage
Qualité de l'air intérieur excellente	≤400 ppm	350 ppm
Qualité de l'air intérieur moyenne	400-600 ppm	500 ppm
Qualité de l'air intérieur modérée	600-1000 ppm	800 ppm
Qualité de l'air intérieur basse	>1000 ppm	1200 ppm

Ces valeurs sont reprises de manière informative dans la norme internationale NF ISO 16814 « Méthodes d'expression de la qualité de l'air intérieur pour une occupation humaine » datée de 2010, et recommandées par défaut dans la norme EN 15251 « Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique » datée de 2007.

Aux Etats-Unis, la norme ASHRAE 62.1 « Ventilation for acceptable indoor air quality » datée de 2007, également reprise dans la norme internationale NF ISO 16814, recommande d'y maintenir un différentiel de concentration en CO₂ inférieur à 700 ppm par rapport au niveau de CO₂ de l'air extérieur (dCO₂).

A titre de synthèse, les tableaux V, VI et VII suivants récapitulent les niveaux de CO₂ réglementaires ou recommandés, pour les bâtiments résidentiels, les bâtiments scolaires et les bureaux.

Tableau V : Récapitulatif des valeurs réglementaires ou recommandées pour les bâtiments résidentiels (CSTB, 2011)

Pays	Textes	Concentration limite en CO ₂
Belgique (région flamande) (2004)	Arrêté du gouvernement flamand	500 ppm
Hollande (1981)	Norme NEN 1087	1000 - 1500 ppm
Finlande (2003)	D2 National building code	1200 ppm
Chine continentale (2002)	Norme GB/T18883	1000 ppm (valeur moyenne journalière)
Corée (2006)	Réglementation KMOCT	1000 ppm

Tableau VI : Récapitulatif des valeurs réglementaires ou recommandées pour les bâtiments scolaires (CSTB, 2011)

Pays	Textes	Concentration limite en CO ₂
France (1978)	Circulaire du 9 août 1978	1000 ppm
Royaume-Uni (2006)	Building Bulletin 101	1500 ppm (moyenne sur une journée d'enseignement) 5000 ppm (maximum)
Belgique (région flamande) (2004)	Arrêté du gouvernement flamand	500 ppm
Allemagne (1983)	Norme DIN 1946	1500 ppm
Autriche (non précisée)	AIVC 2000	1000 ou 1500 ppm (sous discussion)
Hollande (1986)	Norme NEN 1089	1200 ppm
Danemark (non précisée)	AIVC 2000	1000 ppm avec une limite supérieure de 2000 ppm
Norvège (2003)	Regulations for environmental health protection in schools	1000 ppm
Finlande (2003)	D2 National Building code	1200 ppm
Portugal (2006)	Règlement RSECE	1000 ppm
Canada (1989)	Norme ASHRAE 62.1989	1000 ppm
Etats-Unis (2007)	Norme ASHRAE 62.1 2007	700 ppm au dessus du niveau extérieur
Brésil (2000)	Resolução n°176	1000 ppm
Chine continentale (2002)	Norme GB/T18883	1000 ppm comme valeur moyenne journalière
Japon (non précisée)	Building standard law	1000 ppm
Corée (non précisée)	Health act in school	1000 ppm
Nouvelle Zélande (non précisée)	Mechanical ventilation standard	1000 ppm

Tableau VII : Récapitulatif des valeurs réglementaires ou recommandées pour les bureaux (CSTB, 2011)

Pays	Textes	Concentration limite en CO ₂
France (1978)	Circulaire du 9 août 1978	1000 ppm
Belgique (Région flamande) (2004)	Arrêté du gouvernement flamand	500 ppm
Finlande (2003)	D2 National Building code	1200 ppm
Portugal (2006)	Règlement RSECE	1000 ppm
Etats-Unis (2007)	Norme ASHRAE 62.1 2007	700 ppm au dessus de la concentration extérieure
Brésil (2000)	Resolução n°176	1000 ppm
Chine continentale (2002)	Norme GB/T18883	1000 ppm comme valeur moyenne journalière
Japon (non précisée)	Building standard law	1000 ppm
Corée (2003)	Ministry of Labor	Moyenne de 1000 ppm sur 8 heures

Plus d'une quinzaine de pays présentent des textes réglementaires ou des normes fixant des limites de concentrations en CO₂ dans les espaces intérieurs, ces dernières variant majoritairement de 1000 à 1500 ppm. Une évolution est constatée sur ces dix dernières années puisque une revue de l'Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC) en 2000 [Daniels 2000] ne recensait que 9 pays présentant des valeurs limites de CO₂ : pays de l'Europe (Allemagne, Autriche, Danemark, Finlande, France et Norvège), USA, Canada, Japon et Nouvelle Zélande. Aujourd'hui, les nouveaux pays sont essentiellement européens (Royaume-Uni, Belgique, Hollande, Portugal) et asiatiques (Corée, Chine continentale). Il est à noter l'émergence de pays d'Amérique du Sud comme le Brésil. Ces valeurs s'appliquent toutefois majoritairement aux bâtiments scolaires et moins aux bureaux et logements.

Le mode d'expression de la valeur limite de CO₂ a également évolué au cours des dernières années en passant d'une valeur absolue à une valeur relative par rapport à l'air extérieur. En effet, depuis une trentaine d'années, la teneur de l'air extérieur en CO₂ a sensiblement augmenté. Exprimer la concentration en CO₂ intérieur par rapport au niveau extérieur plutôt que de fixer une valeur absolue, permet ainsi de tenir compte de l'augmentation de ces niveaux extérieurs. Par exemple, la norme ASHRAE 62 [ASHRAE 2007] en vigueur aux Etats-Unis ne recommande plus une valeur absolue de CO₂ de 1000 ppm, celle-ci étant basée sur une concentration extérieure en CO₂ de 300 ppm, mais une concentration de 700 ppm au-dessus du niveau de CO₂ de l'air extérieur (environ 380 ppm).

Contrairement à la récente norme NF ISO 16000-26, dans la plupart des textes, les informations concernant la période de temps de mesure en CO₂ ne sont pas précisées, alors que les teneurs en CO₂ d'un espace intérieur sont très variables dans le temps selon le taux d'occupation et l'aération. Le texte anglais «Building bulletin 101» [ODPM 2006] est une autre exception puisqu'il recommande une valeur limite moyennée de 1500 ppm sur 8h et une valeur limite ponctuelle à ne jamais dépasser de 5000 ppm.

En France, la valeur de CO₂ de 1000 ppm exigée par le RSDT est cohérente avec les valeurs limites des autres pays. Son mode de formulation correspond à une valeur ponctuelle à ne jamais dépasser, sans explicitation scientifique.

Plus récemment, cette valeur de 1000 ppm et une valeur dérivée de 1700 ppm ont été utilisées pour calculer l'indice de confinement selon la méthode décrite dans le décret n°2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public, entré en vigueur le 1er juillet 2012. L'indice de confinement est calculé à partir d'une mesure en continu de la concentration de CO₂ avec un pas de temps d'enregistrement de dix minutes. La mesure en continu s'effectue pendant les seules périodes au cours desquelles le nombre d'élèves ou d'enfants effectivement présents dans la pièce est supérieur à 0,5 fois l'effectif théorique de la salle de classe ou d'activité et inférieur à 1,5 fois l'effectif théorique de la pièce. Les concentrations de CO₂ correspondant aux périodes retenues sont ensuite séparées en trois classes en fonction du nombre de valeurs inférieures à 1000 ppm, comprises entre 1000 et 1700 ppm et supérieures à 1700 ppm. L'indice de confinement est alors calculé suivant la formule :

$$I = \left(\frac{2,5}{\log_{10}(2)} \right) \log_{10}(1 + f_1 + 3f_2)$$

f₁ : proportion de valeurs comprises entre 1000 et 1700 ppm

f₂ : proportion de valeurs supérieures à 1700 ppm

L'indice de confinement est calculé pour chaque pièce investiguée et arrondi au nombre entier le plus proche. Un indice de 5 correspond à une valeur de confinement pour laquelle des investigations complémentaires doivent être menées, et pour laquelle le préfet de département du lieu d'implantation de l'établissement doit être informé, selon le chapitre III de l'article R. 221-30 du code de l'environnement.

L'ensemble de ces normes et réglementations n'a pas nécessairement été établi sur la base de critères sanitaires, leur construction étant opaque pour la majorité d'entre elles.

4 Synthèse des effets intrinsèques du CO₂ sur la santé

4.1 Objectifs et méthode

Ce chapitre constitue une synthèse des effets propres du CO₂ documentés et potentiellement néfastes pour la santé, en se focalisant sur des concentrations d'exposition relativement faibles afin de les considérer au regard des valeurs limites réglementaire ou normative de qualité du renouvellement d'air pour les environnements intérieurs.

Cette synthèse s'appuie principalement sur la fiche toxicologique de l'INRS FT 238 (INRS, 2005) et sur une revue plus récente de la toxicité du CO₂ publiée dans un journal à comité de lecture (Guais et al., 2011), complétées par des informations issues d'études publiées récemment et identifiées :

- par les rapporteurs de la présente expertise,
- et par une recherche sous les moteurs de recherche Scopus et Medline avec les mots-clés combinés comme suit : « carbon dioxide » [dans l'intitulé] ET « adverse effect » [dans l'intitulé, le résumé ou les mots-clés] OU « health effect » [dans l'intitulé, le résumé ou les mots-clés] OU « toxicity » [dans l'intitulé, le résumé ou les mots-clés] ET une date de publication de 2004 à avril 2013.

Les concentrations de CO₂ dans l'air sont exprimées en % (vol/vol, soit 1% = 10000ppm). Les « expositions aiguës » se réfèrent le plus souvent à des expositions à de fortes concentrations sur des durées de quelques minutes. Les « expositions chroniques ou prolongées » se réfèrent le plus souvent à des expositions sur des durées de quelques heures à quelques semaines.

4.2 Résultats

4.2.1 Introduction

Le dioxyde de carbone (CO₂) est naturellement présent dans l'atmosphère à une concentration variant de 0,03 à 0,06 % environ (vol/vol soit 300 à 600 ppm ou 0,2 à 0,4 mmHg), et dans l'air intérieur des bâtiments habituellement entre 0,035 et 0,25 % (350 à 2500 ppm) selon l'occupation humaine et le renouvellement d'air. Les valeurs limites réglementaire ou normative de qualité du renouvellement d'air varient usuellement entre 0,1 et 0,15 % (1000 et 1500 ppm) pour les bâtiments scolaires, les bâtiments résidentiels et les bureaux, en France et au niveau international.

Le CO₂ pénètre dans l'organisme par inhalation et est éliminé par expiration. Il diffuse librement à travers la membrane alvéolaire en fonction du gradient de concentration entre le sang et l'air alvéolaire, une augmentation de la pression partielle en dioxyde de carbone (pCO₂) dans l'air inspiré entraînant une augmentation de la pCO₂ dans les alvéoles et se traduisant par un accroissement immédiat de la pCO₂ dans le sang. En conditions normales chez l'Homme, la pCO₂ sanguine est maintenue à une valeur stable par la ventilation alvéolaire, sous le contrôle des centres respiratoires ainsi que par des impulsions venant du cortex cérébral (INRS, 2005). Des variations légères de la concentration en CO₂ inhalée s'accompagnent de modifications correspondantes de la ventilation alvéolaire, qui aboutissent à une régulation de la pCO₂ sanguine.

Le CO₂ est synthétisé par l'organisme via la respiration cellulaire et diffuse des cellules dans les capillaires environnant. La pression partielle dans le sang capillaire pulmonaire (46 mmHg) est supérieure à celle dans l'air alvéolaire (40 mmHg) en conditions normales.

Le CO₂ est transporté par le sang soit lié à l'hémoglobine soit dissous sous forme de dioxyde de carbone, acide carbonique (minoritaire) ou ion bicarbonate (Guais et al., 2011). Le CO₂ dissous dans l'eau subit une hydratation suivant la réaction : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ qui peut agir sur la balance acido-basique : $\text{pH} = \text{pK} + \log [\text{HCO}_3^- / \text{CO}_2]$ (équation d'Henderson-Hasselbach). Une quantité mineure de CO₂ peut également être liée aux protéines plasmatiques et former des composés carbaminés.

Sa diffusion passive à travers les membranes cellulaires lipidiques en fait un des principaux régulateurs du pH intracellulaire agissant comme stimulant ou frein dans de nombreux processus cellulaires. Du fait de sa diffusion passive à travers les membranes tissulaires, les premiers effets du CO₂ apparaissent très rapidement et sont principalement observés au niveau du pH sanguin et des fonctions respiratoire, cardiaque et du système nerveux central.

L'importance des effets observés dépend de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et de nombreux facteurs physiologiques (âge du sujet, état cardiovasculaire, état respiratoire, ...) ou climatiques (température extérieure, pression en oxygène, ...).

4.2.2 Perturbation de l'équilibre acido-basique

Une augmentation de la pression partielle pCO₂ dans l'air inhalé induit une augmentation de pCO₂ dans les alvéoles, et par diffusion une augmentation de la pression de CO₂ dans le sang artériel (PaCO₂) aussi appelée hypercapnie. Cette hypercapnie induit à son tour une acidose respiratoire (baisse du pH sanguin) aiguë ou chronique, due à un déséquilibre acido-basique.

4.2.2.1 Acidose respiratoire aiguë

Lors d'une acidose respiratoire, la PaCO₂ est élevée au-delà d'un niveau (>6,75% ou 45 mmHg environ) entraînant l'acidose (pH<7,35) (Guais et al, 2011). Cette hypercapnie aiguë peut être compensée en deux étapes. Dans les minutes suivant l'augmentation de la pCO₂, la concentration plasmatique en bicarbonates augmente légèrement grâce au pouvoir tampon intracellulaire et à la perte cellulaire de bicarbonates. Dans un deuxième temps, les protons acides sont éliminés principalement par une augmentation du volume et de la fréquence respiratoire. Dans les heures qui suivent, le rein compense à son tour l'accumulation d'acide en augmentant la réabsorption de bicarbonates et la sécrétion de protons.

Chez des volontaires avec une charge physique modérée, l'acidose devenait distincte pour des expositions à 1% (10000 ppm) pendant 30 minutes (DFG, 2002). Cependant, en l'absence de charge physique, un adulte en bonne santé peut compenser ce niveau de concentration, une faible diminution du pH sanguin de 7,40 à 7,37 étant rapportée dans ce cas (DFG, 2002).

4.2.2.2 Acidose respiratoire chronique

Lors d'une acidose respiratoire chronique, la valeur du pH sanguin est en dehors de l'intervalle considéré comme physiologique (pH<7,35) après compensation rénale et augmentation en bicarbonates plasmatiques. La pCO₂ du liquide céphalorachidien (LCR) se modifie rapidement pour égaler la pCO₂ artérielle. L'hypercapnie, persistant plusieurs heures, induit pour restaurer partiellement le pH du LCR, une augmentation de la concentration en bicarbonates. Une hypercapnie prolongée stimule également au niveau du rein la sécrétion d'acide et intensifie l'excrétion d'ions ammonium (NH₄⁺), jusqu'à un nouvel état d'équilibre atteint après 3 à 5 jours (INRS 2005). Guais et al (2011) estiment qu'une exposition prolongée à de fortes concentrations de CO₂ cause une augmentation de l'acidité extracellulaire qui peut être compensée en quelques jours (PaCO₂ constant à 10-15%) ou quelques semaines (PaCO₂ constant à 1,5-3%). Cependant une exposition intermittente à de fortes concentrations de CO₂ ne permet pas aux mécanismes de compensation d'être actifs.

4.2.3 Toxicité pulmonaire

La majorité des études sur la toxicité du CO₂ se sont concentrées sur les altérations respiratoires. Dans des conditions normales, la respiration spontanée nécessite des rétrocontrôles parmi lesquels la détection des niveaux des gaz du sang et le pH sont critiques. Des chémorécepteurs centraux sont très sensibles au CO₂, une faible augmentation de 0,015% (1 mmHg) de la PaCO₂ entraînant une modification évidente de la ventilation (Guais et al, 2011).

4.2.3.1.1 Exposition aiguë

A forte concentration, ce gaz asphyxiant peut rapidement entraîner une dépression respiratoire pouvant conduire au coma et/ou à la mort à des niveaux voisins de 20% (INRS, 2005).

Les effets de l'hypercapnie sur la fonction respiratoire apparaissent immédiatement et à partir de concentrations relativement faibles (1% ou 10000 ppm) (Guais et al, 2011). A 4%, la fréquence respiratoire s'accélère et la respiration peut devenir pénible chez certains sujets (INRS, 2005).

A noter que Abolhassani et al. (2009), cité dans Guais et al. (2011), ont récemment montré que l'inhalation de concentrations de CO₂ supérieures à 5% sur 1 heure induisait une inflammation pulmonaire via l'augmentation de cytokines pro-inflammatoires TNF α , IL-8, IL-6, MIP-1- α , ainsi que de mucin 5AC, une glycoprotéine majeure du mucus pulmonaire surexprimée durant l'inflammation. Plus récemment encore, une étude de la même équipe (Schwartz et al, 2010) a observé une implication du CO₂ dans l'inflammation aiguë pulmonaire induite par la fumée de tabac, indépendamment de l'hypoxie et de la quantité de particules.

4.2.3.1.2 Exposition chronique ou prolongée

Les effets d'une exposition prolongée au CO₂ ont principalement été étudiés pour évaluer la tolérance des sujets à des séjours en espace confiné (sous-marins, par exemple). Les données existantes concernent des expositions expérimentales de volontaires à des concentrations relativement élevées : 0,5 à 4 % avec une pression partielle de l'oxygène normale. Selon l'INRS (2005) :

- Pour des concentrations inférieures à 1% les variations sub-chroniques des paramètres biologiques ne sont pas considérées comme significatives.
- A partir de 1%, on note une légère augmentation de la pression de CO₂ artérielle ainsi que de la pression partielle en oxygène en raison d'une hyperventilation.
- A partir de 2%, l'augmentation de la pression partielle de CO₂ dans le sang artériel et l'air expiré s'accroît ; elle est associée à une faible diminution du pH, sans autre anomalie notable.
- A partir de 3%, l'hyperventilation est marquée ainsi que la baisse du pH artériel (acidose respiratoire).
- Au-delà de 4%, le seuil de tolérance est clairement dépassé.

Le développement d'une tolérance a été observé en conditions expérimentales lors d'expositions prolongées ; celle-ci se manifeste par une amplification de l'efficacité respiratoire, qui aboutit à une meilleure absorption d'oxygène et une excrétion de CO₂ plus efficace, ainsi qu'à une normalisation de la fréquence cardiaque après une tachycardie initiale (INRS, 2005).

Concernant une exposition professionnelle répétée à des niveaux de 1% environ, une seule étude épidémiologique a déterminé des modifications métaboliques mineures (augmentation non significative de bicarbonate dans le sang de brasseurs exposés) comme le seul effet marquant (DFG, 2002).

A noter aussi que Ryu et al. (2010) (cité dans Guais et al., 2011) ont comparé les conséquences de l'exposition de souris à la naissance par rapport à des souris adultes, à 8% de CO₂ pendant 2 semaines. Ils ont montré chez les souriceaux que l'exposition au CO₂ avait induit une diminution de l'épaisseur de la paroi alvéolaire et du poids des poumons, et avait altéré la composition protéinique de la matrice pulmonaire incluant une diminution du collagène interstitiel. En comparaison, les poumons des souris adultes n'ont pas été affectés, soulignant la sensibilité accrue des jeunes individus.

4.2.4 Effets sur la fonction cardiovasculaire

4.2.4.1.1 Exposition aiguë

A partir de 5%, les premiers effets cardiovasculaires et vasomoteurs (augmentation de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle, vasodilatation périphérique) apparaissent (INRS, 2005 ; Guais et al., 2011). A 10 %, une hypertension artérielle peut être observée chez certains sujets si l'exposition dure une dizaine de minutes (INRS, 2005).

Une étude chez le chien montre que la détérioration hémodynamique cardiaque observée était causée principalement par le pH et non par la PaCO₂ (Wexels et Mjøs, 1987 ; cité dans Guais et al, 2011). Une autre étude chez le cochon d'Inde n'a pas mis en évidence de détérioration permanente du myocarde suite à une analyse histopathologique du coeur pendant ou après (1 ou 7 jours après exposition) l'acidose aiguë consécutive à une exposition à 1,5, 3 ou 15% de CO₂ (Schaefer et al., 1971).

A noter que selon les résultats d'une étude chez des volontaires rapportés par l'institut allemand de santé au travail (IFA⁹), une forte activation d'apport sanguin dans les reins et le cerveau a été montrée pour une exposition de 5% sur 30 minutes, et des modifications de l'électrocardiogramme (plus prononcées pour les personnes âgées supérieures à 60 ans) pour une exposition de 6% sur 6-8 minutes (DFG, 2002).

4.2.4.1.2 Exposition chronique ou prolongée

Pour une exposition prolongée à 4%, une apparition d'extrasystoles à l'effort peut être constatée (INRS, 2005). Une augmentation du nombre d'hématies est également notée, peut être en relation avec une hémococoncentration liée à une polyurie hydrique au cours des 24 premières heures d'exposition (INRS, 2005).

4.2.5 Effets sur le système nerveux central et la fonction neuroendocrine

Le CO₂ est un facteur clé dans le contrôle de la respiration et de la circulation cérébrale. Il agit de manière périphérique, à la fois comme vasodilatateur et comme vasoconstricteur, et est un puissant vasodilatateur cérébral.

4.2.5.1.1 Exposition aiguë

A partir de 5%, des céphalées, une sensation de vertige ainsi que des premiers effets vasomoteurs apparaissent (vasodilatation périphérique) (INRS, 2005). Une excitation psychique (telle que l'état d'excitation de la narcose) et des étourdissements sont également rapportés à 4-6% sans information sur la durée d'exposition (Marquardt et Schäfer, 1994).

A partir de 10%, des troubles visuels (parfois associés à une dégénérescence rétinienne), des tremblements, une hypersudation et une hypertension artérielle peuvent être observés (INRS, 2005). A 10% durant 1,5 minute environ, des signes neurologiques incluant clignement des yeux, excitation psychomotrice et contractions musculaires incontrôlées sont observés.

⁹ Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

Aux fortes concentrations, le CO₂ entraîne rapidement une dépression respiratoire, des convulsions, le coma et/ou la mort à des niveaux voisins de 20% (INRS, 2005). La perte de conscience peut se produire à 30% durant 1 minute ou à 10% durant 5 à 10 minutes (NRC, 2008).

4.2.5.1.2 Exposition chronique ou prolongée

Pour rappel, les effets d'une exposition prolongée au CO₂ ont principalement été étudiés pour évaluer la tolérance des sujets à des séjours en espace confiné (sous-marins, par exemple), avec des expositions étudiées à des concentrations relativement élevées : 0,5 à 4 % (INRS, 2005).

A 1-2%, la majorité des études a rapporté des effets faibles à modérés induits par une exposition prolongée à des concentrations de CO₂ : altération de la vision à 1% et maux de tête signalés les premiers jours d'exposition supérieure à 2% (Jiang et al, 2005 ; cité dans Guais et al, 2011).

Jusqu'à des niveaux de 4% sur une durée d'exposition jusqu'à 2 semaines, aucune modification neurocomportementale anormale ni aucun effet adverse n'ont été rapportés. Cependant, des études plus récentes ont montré une diminution de l'acuité stéréoscopique et une diminution de la capacité à détecter les mouvements à des niveaux supérieurs à 2,5% (Sun et al, 1996 ; Yang et al, 1997 ; cités dans Guais et al, 2011).

A 4%, l'apparition de céphalées (et de gastralgie) au repos, et d'asthénie à l'effort, est constatée (INRS, 2005).

Des observations anciennes d'exposition dans des sous-marins de la Seconde Guerre mondiale dans lesquels la concentration en CO₂ était de 3% environ, associée à un taux d'oxygène de 15 à 17%, faisaient état de phases d'excitation et de dépression, d'une augmentation du flux sanguin cutané ainsi que d'une diminution de la température centrale et de la pression artérielle. Ces signes pouvaient s'associer à un ralentissement de la fréquence respiratoire et à des anomalies des fonctions mentales. Ces résultats, peut être en relation avec d'autres polluants atmosphériques, n'ont pas été rapportés ultérieurement.

Le CO₂ induit également des modifications de sécrétions hormonales. Chez des cochons d'Inde, une exposition continue à de fortes doses (15% sur 7 jours) stimule la glande surrénale (Schaefer et al, 1968 ; cité dans Guais et al, 2011). Cependant, lorsque les animaux sont exposés par intermittence à la même concentration (8 heures par jour pendant 7 jours), la réponse sympatho-adrénergique n'est pas modifiée.

Jusqu'à récemment, aucune modification des performances psychomotrices n'avait été mise en évidence après exposition au CO₂ (tests psychomoteurs, résolution de problèmes, etc.), excepté l'excitabilité (Guais et al, 2011 ; INRS, 2005). Cependant, une étude récente a montré un effet propre du CO₂ sur la performance démarrant à environ 0,1% (1000 ppm) par rapport à 0,06% (air extérieur et respiration des sujets) et s'accroissant à 0,25% (Satish et al, 2012). Cette étude réalisée en double aveugle a exposé 22 volontaires en ambiance contrôlée (0,06, 0,1 et 0,25%) pendant 3 sessions de 2,5 heures sur un même jour, et a mesuré les effets sur la performance à partir d'un test informatisé de prise de décision.

Une seule autre étude a investigué des effets sur la performance en ambiance contrôlée, en se basant sur un test de lecture comportant deux indicateurs (quantité de lignes lues, pourcentage d'erreurs identifiées), mais a seulement été publiée dans un acte de congrès (Kajtar et al., 2003). D'après leurs résultats, le nombre de lignes lues ne serait pas lié au niveau de CO₂, un biais d'apprentissage ne pouvant être exclu. Le pourcentage d'erreurs identifiées en revanche serait influencé par le niveau de CO₂ au bout de 140 minutes, et accentué au bout de 210 min, la différence étant significative à 0,4% par rapport à 0,06%.

A noter également que selon les résultats d'une étude rapportés par l'institut allemand de santé au travail (IFA), l'inhalation d'une concentration relativement faible de 0,1% de CO₂, chez des personnes sensibles restant dans des pièces fermées et artificiellement conditionnées, avait produit des sensations de pression intracrânienne et des maux de tête. Cette étude en allemand référencée n'était cependant pas disponible (Marquardt et Schäfer, 1994).

Ces niveaux autour de 0,1 % sont inférieurs au niveau critique généralement considéré de 1% (10000 ppm) auquel l'acidose respiratoire apparaît.

4.2.6 Effets sur la reproduction

Il n'existe pas d'étude chez l'Homme des effets du CO₂ sur la reproduction. D'après les études expérimentales chez l'animal, toutes anciennes, le CO₂ peut induire, chez le mâle, des modifications testiculaires sans effet sur la fertilité.

Chez le rat, le CO₂ induit, à la fois en fonction de la concentration (2,5-5-10% CO₂ + 20% O₂ + N₂ qsp 100%) et de la durée d'exposition (1 à 8 heures), des modifications dégénératives des testicules (Vandemark et al, 1972 ; cité dans INRS, 2005, Guais et al, 2011 et Ema et al, 2010). Ces modifications sont caractéristiques à partir de 2,5% pour 4 heures d'exposition. Les effets histologiques majeurs incluent des perturbations tubulaires telles que la desquamation et la perte de netteté luminale (5% sur 4h), des sillons et une vacuolisation (10% sur 4h). Ces modifications sont réversibles 36 heures après l'arrêt de l'exposition. Ces effets pourraient être entièrement indirects car dus à des modifications du débit sanguin ou à l'acidose (Ema et al, 2010). Chez la souris (35 %, 3 fois 2 heures), il affecte la maturation des spermatozoïdes en diminuant la surface de la tête ; il n'y a pas de corrélation établie avec la fertilité (INRS, 2005).

Une exposition chronique à 15% de CO₂ affecte la spermatogénèse des cochons d'Inde et des rats (Schaefer et al, 1971 ; cité dans Guais et al, 2011). Les premières modifications de la spermatogénèse sont détectées après 48 heures avec une diminution marquée du nombre de spermatozoïdes matures, puis après 3-7 jours avec des cellules géantes multinucléées. Cependant une exposition prolongée à des niveaux relativement faibles (1,5% et 3%) ne produit aucun blocage de la spermatogénèse.

4.2.7 Tératogénicité

L'hypercapnie est tératogène. Néanmoins, il n'existe pas d'étude chez l'Homme des effets du CO₂ sur la tératogénicité. D'après les études expérimentales chez l'animal, le CO₂ peut induire des modifications cardiaques et squelettiques chez le fœtus.

Le CO₂ induit des malformations fœtales chez le rat (6% CO₂ + 20% O₂ + 74% N₂ pendant 24 heures entre le 5^{ème} et le 21^{ème} jour de gestation (GD5-GD21)) et le lapin (10-13% CO₂, 4 à 10 heures, pendant 2 ou 3 jours, entre GD7 et GD12). Chez le rat, il augmente la mortalité postnatale, les malformations cardiaques et celles du squelette (Haring, 1960 ; cité dans Guais et al, 2011, INRS, 2005 et Ema et al, 2010). La plus forte incidence est observée après exposition des mères pendant le 10^{ème} jour de gestation. Chez le lapin, il induit des malformations squelettiques assez diversifiées (Grote, 1965 ; cité dans Guais et al, 2011, INRS, 2005 et Ema et al, 2010). Chez des souris, une augmentation d'ectrodactylie a été induite (20% CO₂ pendant 8 heures à GD10), fortement corrélée au niveau de CO₂ dans le sang maternel, mais uniquement sur la souche C57BL/6 hautement sensible et pas sur la souche SWV (Weaver et Scott, 1984 ; cité dans Guais et al, 2011 et Ema et al, 2010).

4.2.8 Cancérogénicité

Il n'existe pas d'étude chez l'Homme des effets du CO₂ sur la cancérogénèse, et les quelques études *in vivo* chez l'animal ont utilisées des concentrations extrêmement élevées (45-100%).

Des études *in vitro* suggèrent l'hypothèse que de fortes pressions partielles de CO₂ pourraient promouvoir le développement de cancers (Guais et al. (2011). De récents travaux sur des bactéries *E. Coli* montrent en effet que le CO₂ (de 0,004% à 0,1%) exacerbe la toxicité du H₂O₂ et accentue les altérations de l'ADN et la fréquence des mutations causées par l'exposition à des espèces réactives de l'oxygène (Ezraty et al, 2011 ; cité dans Guais et al, 2011).

4.3 Conclusions

La toxicité par inhalation du CO₂ a été largement documentée depuis maintenant près d'un siècle, que ce soit chez l'Homme ou chez l'animal. Ce gaz, principalement asphyxiant aux très fortes concentrations voisines à 20%, fait en effet l'objet de nombreuses circonstances d'intoxications et de surexpositions professionnelles (comparativement à l'air intérieur) : sous-marins, aérospatial, aéronefs, altitude, manipulation de carboglace, gaz de combustion, port de masques, préservation de l'alimentation et des végétaux. **Sauf exception, les concentrations d'exposition étudiées sont supérieures aux valeurs limites réglementaire ou normative de qualité du renouvellement d'air dans les bâtiments scolaires, les bâtiments résidentiels et les bureaux, en France et au niveau international (usuellement entre 0,1 à 0,15%).** Elles sont également supérieures aux concentrations habituellement mesurées dans ces environnements intérieurs (entre 0,035 et 0,25 % environ).

Les premiers effets toxiques du CO₂ apparaissent très rapidement et sont principalement une acidose respiratoire (baisse du pH sanguin) et une altération des fonctions respiratoire, cardiaque et du système nerveux central. Ces effets sont réversibles après l'arrêt de l'exposition et, pour les plus faibles concentrations, constituent des mécanismes régulateurs décrits. Ils sont par ailleurs sensibles à de nombreux facteurs physiologiques : âge du sujet, état cardiovasculaire, état respiratoire, etc.

Pour une exposition aiguë, considérant les concentrations les plus faibles auxquelles des effets sont observés :

- **à partir de 1% (10000 ppm) environ, les effets d'une augmentation de la pression de CO₂ dans le sang artériel apparaissent immédiatement sur la fonction respiratoire. Une acidose respiratoire est observée à cette concentration pour une exposition de 30 minutes chez des individus avec une charge physique modérée ;**
- **à 4%, la fréquence respiratoire s'accélère et la respiration peut devenir pénible chez certains sujets ;**
- **à partir de 5%, s'y ajoutent des céphalées, une sensation de vertige, et les premiers effets cardiovasculaires et vasomoteurs (augmentation de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle, vasodilatation périphérique). Une inflammation pulmonaire a récemment été montrée à cette concentration pour une exposition d'1 heure.**

Pour une exposition chronique ou prolongée, considérant les concentrations les plus faibles auxquelles des effets sont observés :

- **à partir de 0,1% (1000 ppm) pour une exposition de quelques heures répétées sur une journée, un effet sur la performance psychomotrice (prise de décision, résolution de problèmes) est suspecté. Ce niveau est inférieur au niveau critique généralement considéré de 1% auquel l'acidose respiratoire apparaît ;**
- **à partir de 1%, on note une légère augmentation de la pression de CO₂ artérielle ainsi que de la pression partielle en oxygène en raison d'une hyperventilation. Une tolérance a été observée lors d'expositions prolongées, se manifestant par une amplification de l'efficacité respiratoire ;**
- **à 1-2%, la majorité des études rapporte des effets faibles à modérés : altération de la vision à 1% et maux de tête signalés les premiers jours d'exposition supérieure à 2%.**

Selon des résultats d'une étude rapportés, une exposition de 0,1% de CO₂ avait produit des sensations de pression intracrânienne et des maux de tête chez des personnes sensibles restant dans une pièce fermée et artificiellement conditionnée.

Il n'existe pas d'étude chez l'Homme des effets du CO₂ sur la reproduction. D'après les études expérimentales (rat, souris, cochon d'Inde), toutes anciennes, le CO₂ peut induire chez le rat mâle des modifications testiculaires observées à partir de 2,5% avec des effets histologiques marqués (perturbations tubulaires) à partir de 5%, pour une exposition de 4 heures. Ces effets étaient réversibles et sans effet sur la fertilité.

Il n'existe pas d'étude chez l'Homme des effets du CO₂ sur le développement ou la tératogénéité. D'après les études expérimentales (rat, souris, lapin, hamster), le CO₂ peut induire des modifications cardiaques et squelettiques chez le fœtus. Les malformations étaient observées chez le rat exposé à 6% pendant 24 heures entre le 5^{ème} et le 21^{ème} jour de gestation (GD5-GD21), et chez le lapin exposé à 10-13% sur 4 à 10 heures, pendant 2 ou 3 jours, entre GD7 et GD12.

L'extrapolation de ces effets du CO₂ sur la reproduction et le développement à des doses plus faibles et chez l'Homme pourrait susciter des investigations complémentaires, bien que ce ne soit pas considéré comme une priorité de santé publique.

Il n'existe pas d'étude chez l'Homme des effets du CO₂ sur la cancérogénèse, et les quelques études *in vivo* chez l'animal ont utilisées des concentrations extrêmement élevées (45-100%). Des études *in vitro*, et notamment de récents travaux sur des bactéries, suggèrent l'hypothèse d'un effet promoteur de cancers à de fortes concentrations.

Compte tenu des effets observés et des facteurs physiologiques, les populations plus sensibles aux effets propres du CO₂ sont très vastes et incluent les enfants, les femmes enceintes, les personnes âgées (plus de 60 ans), les personnes atteintes d'apnée du sommeil, les personnes atteintes d'affections pulmonaires (par exemples : broncho-pneumopathie chronique obstructive, asthme, emphysème, et bronchites chroniques), les personnes atteintes d'affections cardiaques, hématologiques ou vasculaires, ainsi que les fumeurs.

En conclusion, l'apparition d'un premier effet critique (acidose respiratoire) peut être admise à partir d'un niveau d'exposition de 1% (10000 ppm) pendant au moins 30 minutes chez un adulte en bonne santé avec une charge physique modérée. Cet effet critique pourrait apparaître à un niveau inférieur chez les populations sensibles.

5 Effets sur la santé, la perception de confort et la performance associés aux concentrations de CO₂ indicateur de confinement

5.1 Objectifs et méthode

Ce chapitre constitue une analyse des études épidémiologiques investiguant la relation entre concentrations de CO₂ et effets sur la santé, sur la performance et sur la perception de confort, en vue de déterminer des valeurs de concentration en CO₂ protégeant des effets du confinement pour différents types de locaux. Les effets documentés dans ce chapitre sont donc à relier aux nuisances induites par le confinement, et non intrinsèquement au CO₂.

Une étude détaillée dans le rapport en annexe 2 a été réalisée par Sépia-Santé dans le cadre d'une convention de recherche et développement avec l'Anses. La réalisation de cette étude a été suivie par les rapporteurs et l'Anses. Cette étude avait pour objectifs de :

- actualiser la recherche bibliographique sur les liens entre concentrations de CO₂ et effets sanitaires suite au rapport CSTB (2011) à partir de la littérature scientifique ;
- analyser les publications en termes de validité (adéquation des méthodes épidémiologiques et statistiques à la question posée, mesures pertinentes des concentrations de CO₂ et des effets sur la santé, puissance statistique, prise en compte des principaux facteurs de confusion,...), et sélectionner les publications à retenir ;
- réaliser une analyse-critique des publications retenues et rédiger une synthèse des principaux résultats.

Les publications épidémiologiques ont été analysées et incluent toutes une mesure directe du CO₂ dans l'air intérieur. Elles ont été répertoriées à l'aide, d'une part des grandes revues de littérature et des travaux réalisés par le CSTB sur le thème, et d'autre part grâce à de nouvelles recherches bibliographiques ayant notamment permis d'identifier les publications les plus récentes.

Les grandes revues et les travaux du CSTB utilisés sont les suivants :

- Seppänen Oa, Fisk Wj & Mendell Mj (1999), Association of ventilation rates and CO₂-concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings, *Indoor Air*, 9, 226-252,
- Wargocki P, Sundell J, Bischof W, Brundrett G, Fanger PO, Gyntelberg F, Hanssen SO, Harrison P, Pickering A, Seppänen O & Wouters P (2002), Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN), *Indoor Air*, 12, 113-128,
- Rapport du CSTB (2004) (avec la participation de SEPIA-santé) : « Impact de la ventilation sur la qualité de l'air intérieur (1) Etude des liens directs entre la ventilation et l'impact sanitaire sur les occupants »,
- Rapport du CSTB (2011) : « Evolution de la réglementation sanitaire des bâtiments : Ventilation et CO₂ »,
- Sundell J. & Levin H. (2007), Ventilation Rates and Health: Report of an Interdisciplinary Review of the Scientific Literature, ASHRAE URP1443, Final report, 48 p. : (Revue publiée en 2011 dans *Indoor Air* : Sundell J., Levin H., Nazaroff W., Cain W. S., Fisk W., Grimsrud D., Gyntelberg F., Li Y., Persily A., Pickering A., Samet J., Spengler J., Taylor S., Weschler C. (2011), Ventilation Rates and Health: multidisciplinary review of the scientific literature, *Indoor Air*, 21, 191-204).

A noter que ces revues s'intéressaient en premier lieu aux relations santé-ventilation. Certaines publications citées dans ces travaux, mais pour lesquelles aucune mesure de concentration en CO₂ n'a été réalisée, n'ont donc pas été intégrées dans ce travail.

Les nouvelles recherches bibliographiques ont inclus les publications issues de recherches avec Pubmed et Google pour la période 2000 à 2012, et avec les mots clé suivants utilisés selon plusieurs combinaisons :

- CO₂, carbon dioxide, indoor air,
- health, symptoms, sickening building, building related illness, disease
- building, office, school, home, dwelling, residence, house.

Les publications à retenir pour l'analyse critique ont été sélectionnées selon une démarche composée des étapes suivantes :

1. Onze des 21 articles retenus par la revue de Seppänen n'ont pas été publiés dans des journaux à comité de lecture et, en accord avec les autres grandes revues, n'ont pas été retenus ;
2. Une analyse croisée des articles retenus par les revues de Seppänen, Euroven et Sundell a été menée, soit un pool de 22 articles. A partir de ce pool, les articles classés « non concluants » par les revues Euroven et/ou Sundell n'ont pas été retenus, soit 9 articles correspondant à des études transversales réalisées entre 1988 et 1997. Les 13 articles restant classés « concluants » ont été présélectionnés ;
3. Les 13 articles présélectionnés provenant des revues de littérature et 27 nouveaux articles identifiés via l'actualisation bibliographique, soit 40 publications au total, ont fait l'objet d'une démarche de sélection. Celle-ci porte à la fois sur la pertinence des études pour la problématique CO₂-effets et la validité des études. Les publications ont été classées en trois groupes :
 - Groupe 1 : non adéquation par rapport au sujet (ou études de cas)
 - Groupe 2 : articles exclus du fait d'insuffisances :
 - o critères d'exclusion:
 - données de CO₂ insuffisantes ou CO₂ non étudié en tant que variable explicative des modèles
 - effet chez l'Homme non étudié
 - analyses statistiques insuffisantes
 - Groupe 3 : adéquation par rapport au sujet, bonne méthodologie et résultats concluants
4. Sur les 40 publications soumis à la démarche de sélection ci-dessus :
 - 10 publications n'ont pas été retenues : 7 n'ayant pas étudié de liens entre CO₂ et effets, et 3 présentant seulement des résultats descriptifs ou des données/analyses insuffisantes pour exploiter les résultats vis à vis des concentrations en CO₂ ;
 - 30 publications ont au final été retenues pour l'analyse critique des liens entre CO₂ et effets sur la santé, la perception (ou confort perçu) et la performance (Figure 1), représentant 43 études¹⁰ par lieu et par type d'effet (Figure 2)

¹⁰ Le terme « étude » (ou « travail » dans le rapport Sésia-Santé en annexe 1) se rapporte à l'investigation d'une relation entre le CO₂ et un type d'effet donné (santé, perception ou performance) dans un type de milieu donné (écoles, bureaux, logements ou chambre expérimentale), et pas strictement à une « publication » (ou « article »). Ainsi, une « publication » peut parfois comporter plusieurs « études ».

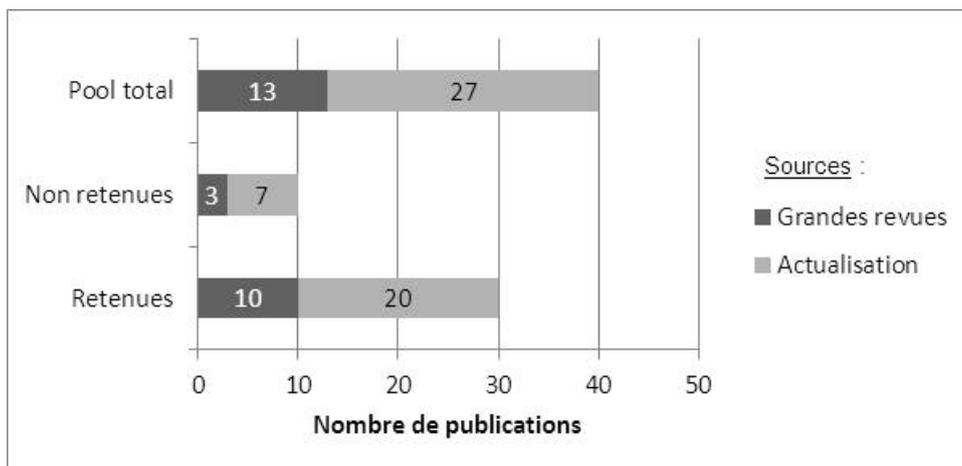


Figure 1 : Description de la sélection des publications d'épidémiologie

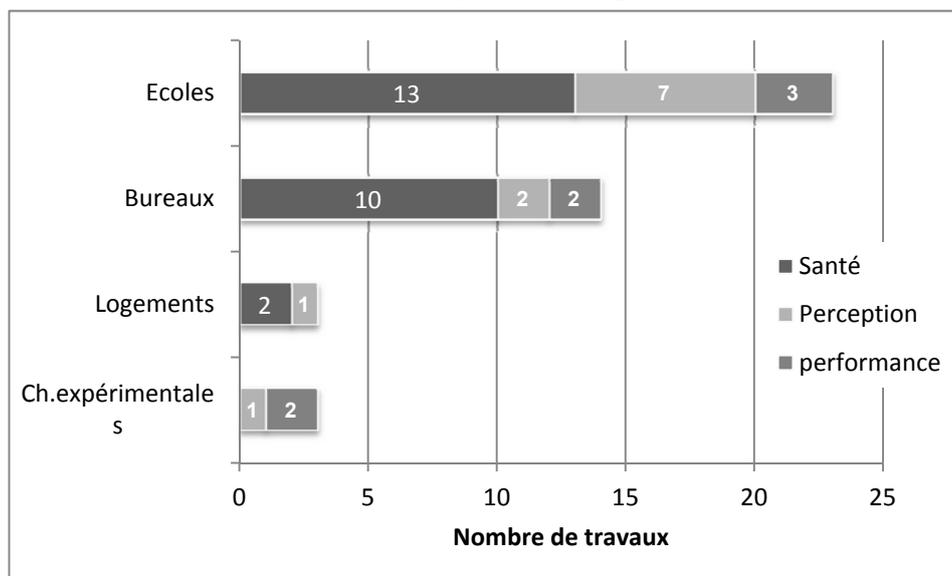


Figure 2 : Description des études épidémiologiques par lieu et par effet

Les résultats ci-après s'appuient sur l'analyse critique de 40 des 43 études retenues par Sépia-Santé. En effet, les 3 études en chambre expérimentale portent sur les effets intrinsèques du CO₂ sur la santé ou la performance, et non sur les effets associés aux concentrations de CO₂ en tant que traceur de la qualité du renouvellement d'air.

5.2 Résultats

5.2.1 Dans les environnements intérieurs globalement

Dans les études identifiées sur la relation entre concentrations de CO₂ et effets sur la santé, la perception de confort ou la performance, les niveaux de CO₂ dans l'air intérieur sont utilisés comme traceur de la qualité du renouvellement d'air avant tout.

Il n'existe pas d'étude ayant investigué cette relation et qui soit représentative du parc français des logements, écoles, crèches ou bureaux. Néanmoins, plusieurs études à l'étranger ou internationales (40 études retenues) ont recherché les associations indirectes entre d'une part, le niveau de CO₂ pris comme traceur de la qualité du renouvellement d'air avant tout, et d'autre part :

- des effets sur la santé (25 études sur les 40 retenues) :
 - symptômes liés au syndrome des bâtiments malsains ou sick building syndrome (SBS) regroupant tout ou partie des symptômes suivants : irritations des muqueuses, irritations de la peau, atteintes des voies respiratoires supérieures, atteintes des voies respiratoires inférieures et symptômes généraux (encore appelés non spécifiques) ;
 - symptômes liés à l'asthme regroupant tout ou partie des symptômes et indicateurs suivants : symptômes respiratoires, crise d'asthme, prise de médicaments antiasthmatique, asthme actuel¹¹ ;
 - et d'autres effets moins documentés : absentéisme (potentiellement lié aux infections ORL et respiratoires contagieuses), rhinite, éruptions cutanées d'origine allergique, symptômes généraux de type fatigue et maux de tête ;
- des effets sur le confort perçu par les occupants d'une ambiance (ou « perception ») (10 études sur les 40 retenues) évalués par tout ou partie de ses composantes suivantes : acceptabilité de la qualité de l'air, perception d'humidité, de fraîcheur, de luminosité, de bruit, de propreté, des odeurs et du confort thermique ;
- des effets sur la performance (5 études sur les 40 retenues) évalués par des tests : saisie de texte, additions, corrections d'épreuves, test d'imagination, analyse du temps de parole (chez des opérateurs d'un centre d'appel), test de rapidité, taux d'erreur et niveau de concentration.

La majorité de ces études concernent les écoles (23 études retenues) et les bureaux (14 études retenues), les logements étant beaucoup moins documentés (3 études retenues, issues de 2 publications suédoises).

Toutes ces études, à l'exception de 3 études longitudinales et 1 étude écologique, sont soit des études transversales ayant le plus souvent pour objectif de mesurer la relation entre des effets et des concentrations de CO₂, soit des études expérimentales ayant pour principal objectif de tester l'influence des conditions de ventilation sur les effets chez l'Homme. Rappelons qu'il est classiquement admis que la capacité à montrer que les associations mises en évidence en épidémiologie sont de nature causale, est meilleure dans les études expérimentales (et quasi-expérimentales) que dans les études d'observation et parmi ces dernières, cette capacité est meilleure dans les études de cohorte que dans les études cas-témoins et plus faible dans les études transversales. Notons cependant que dans la problématique CO₂-effets chez l'Homme, aucune étude de type cohorte, ni cas-témoins n'a été identifiée, et que d'autres critères de validité des études sont à prendre en compte, le CO₂ étant pris ici comme traceur de la qualité du renouvellement d'air et non comme polluant causant les effets.

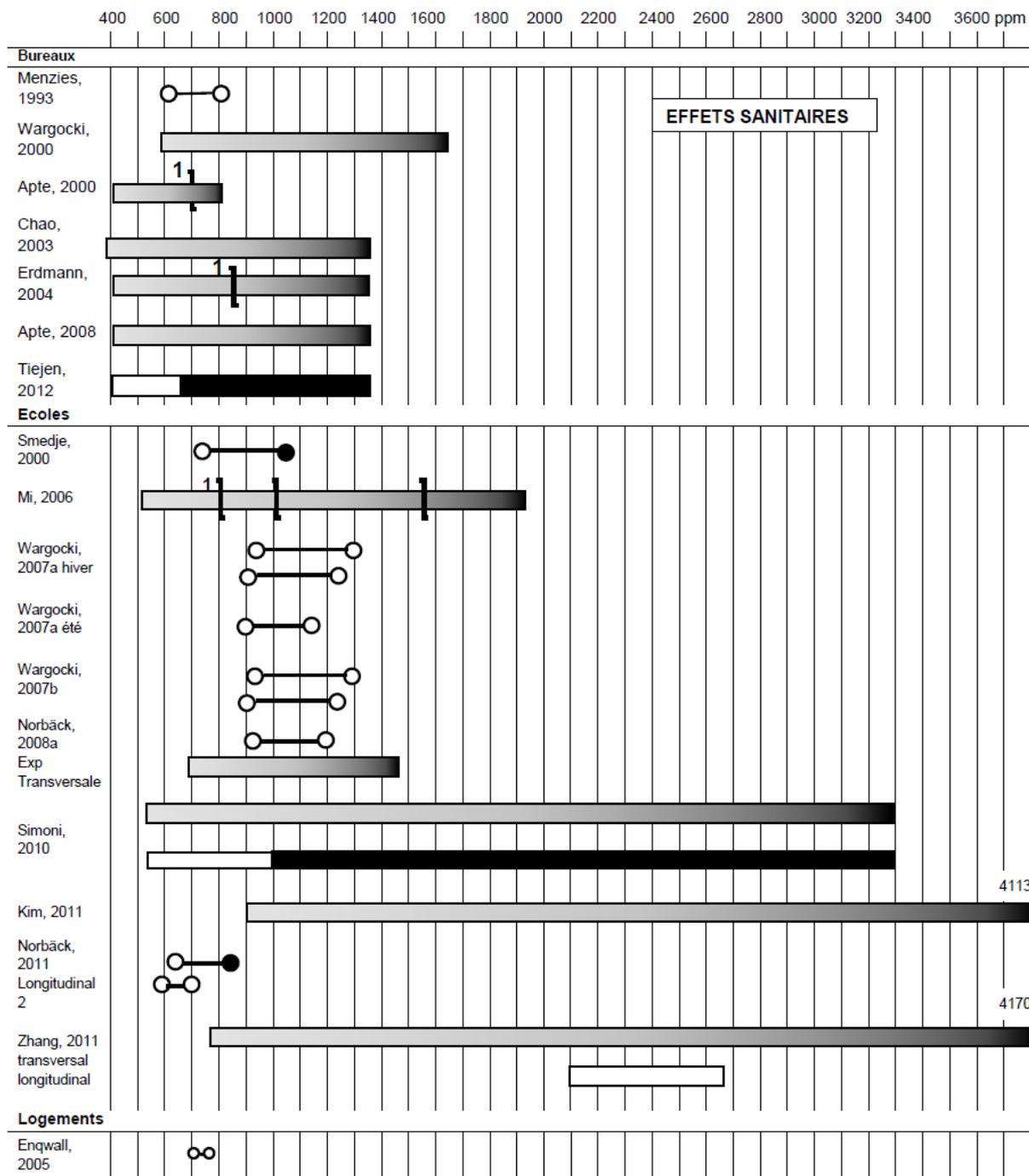
¹¹ L'« asthme actuel » est indicateur d'asthme communément défini par la déclaration d'une crise d'asthme au cours des douze derniers mois et/ou par un traitement actuel pour l'asthme.

Toutes ces études utilisent des méthodes pouvant être diverses pour :

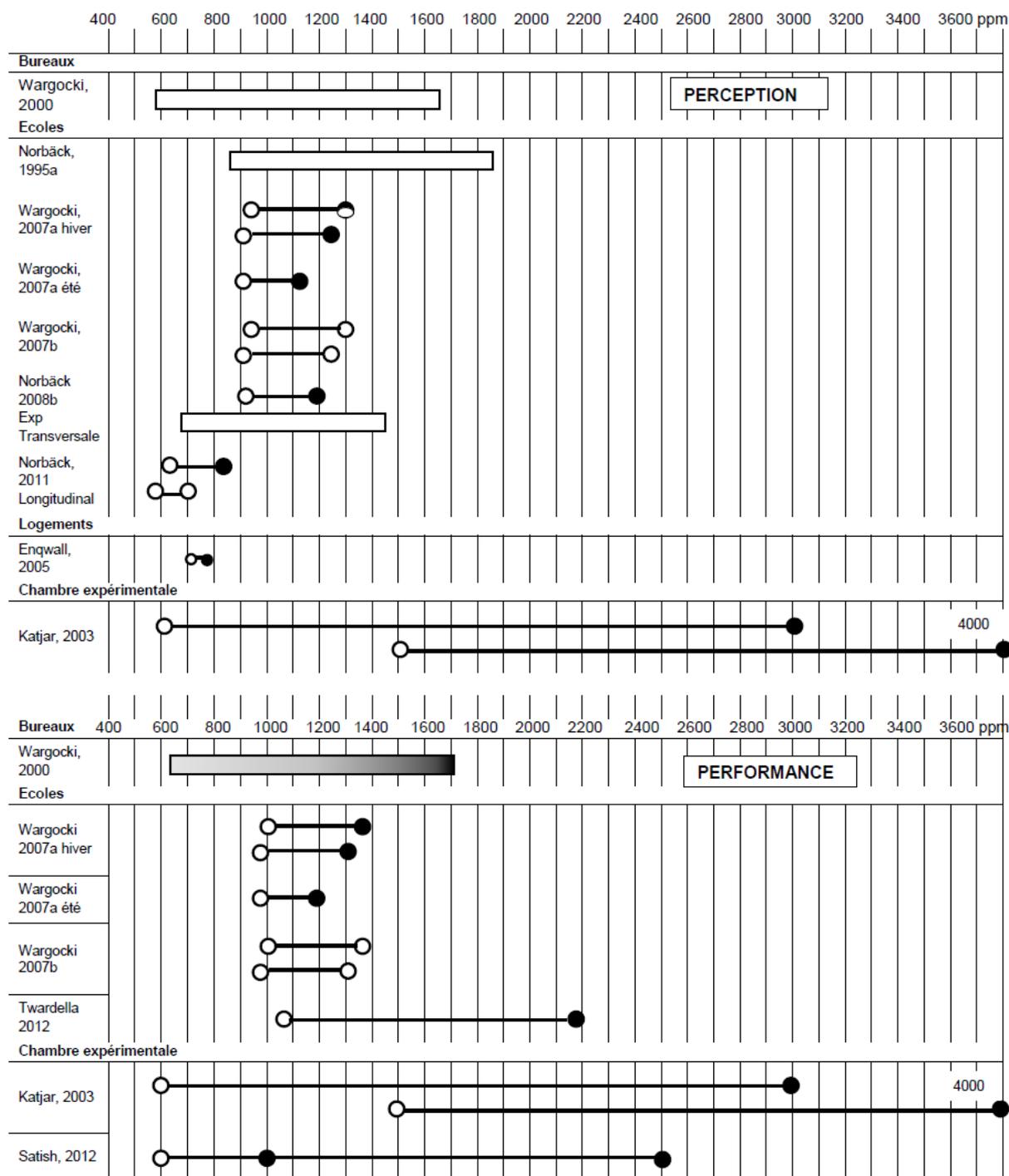
- la mesure des niveaux de CO₂, avec un nombre variable de mesures dont la représentativité peut être questionnée, et à des moments et des pas de temps non standardisés d'une étude à l'autre,
- la mesure des effets et la signification des types d'effets, les questionnaires ou outils de mesure de la performance n'étant pas toujours standardisés, et certains symptômes peu spécifiques étant inégalement regroupés sous le terme « syndrome des bâtiments malsains » ;
- les analyses de la relation CO₂-effet, relativement hétérogènes d'une étude à l'autre, en particulier les facteurs d'ajustement employés (à l'exception de facteurs tels que l'âge ou le sexe) : tabagisme, antécédents personnels d'allergie/asthme, antécédents familiaux d'allergie/asthme, niveau d'éducation des parents, niveau socio-économique, ethnie, facteurs liés à l'environnement de travail (études dans les bureaux), température et humidité, chauffage, prise en compte de la structure hiérarchique de l'étude, etc. Dans certaines études, des sur-ajustements sont observés, comme le nombre de personnes et le taux de renouvellement d'air, dans la mesure où ces variables sont liées au niveau de CO₂. De même l'ajustement sur des polluants intérieurs (par exemple les moisissures, le formaldéhyde) réalisé dans quelques études apparaît inopportun dans le cadre de la présente expertise sur les liens CO₂-effets chez l'Homme, dans la mesure où le CO₂ peut être considéré comme un « proxi » des polluants intérieurs. L'ajustement sur des polluants ayant principalement des sources extérieures (NO₂, SO₂) est lui complexe, bien qu'en théorie leurs concentrations peuvent aller de pair avec une baisse des concentrations en CO₂ compte tenu de leur introduction via le renouvellement d'air. En revanche pour l'ozone, il est décrit que la corrélation entre ozone à l'extérieur et l'ozone à l'intérieur est faible.

Les résultats des études analysées ont été synthétisés par Sépia-Santé sur le schéma ci-dessous, inspiré de la revue de Seppänen et al (1999), et dont les clés de lecture sont les suivantes :

- les barres délimitent les niveaux de CO₂ étudiés. Une barre en dégradé de noir traduit une dose réponse significative (OR). Une barre scindée en deux, correspond à une analyse entre deux niveaux de CO₂, une partie noire montre un effet significatif ;
- deux ronds traduisent une étude à deux concentrations de CO₂. Des ronds blancs correspondent à une absence d'effet ;
- les traits verticaux symbolisent les bornes de concentrations des classes de CO₂ utilisées dans les tests de tendance ;
- les niveaux de CO₂ ont été harmonisés en prenant comme référence un niveau extérieur de 400 ppm si le niveau extérieur n'était pas renseigné dans l'étude source.



1 : résultats des tests de tendance (le seul OR significatif est celui contrastant le dernier décile de CO₂ (>700 ppm pour Apte en 2000, et >844 ppm pour Erdmann en 2004) au premier décile.



La majorité des études rapportent leurs résultats sous la forme d'Odds-Ratios (OR) pour une augmentation de 100 ppm de CO₂ ou comparent les effets pour deux niveaux contrastés de CO₂.

Au final, il apparaît qu'il est difficile, vu le petit nombre d'études et leurs limites, de tirer des conclusions quant aux effets chez l'Homme de type perception (ou confort perçu) et performance en lien avec le CO₂ par type de lieu.

En revanche, les études sur les effets sur la santé dans les bureaux (N=10) d'une part, et dans les écoles (N=13) d'autre part, apportent des informations pertinentes sur l'existence de ce type d'effets en relation avec les concentrations de CO₂. Il reste néanmoins difficile de connaître à quels niveaux de CO₂ ces effets apparaissent.

L'analyse de ces études montre qu'au moins un symptôme ou indicateur d'effets sur la santé, de type SBS ou symptômes de l'asthme, sur la perception, ou sur la performance, est souvent associé de manière significative à une augmentation de 100 ppm de CO₂ (variable continue). Ces effets sont imputables aux nuisances induites par le confinement.

Il convient de préciser que :

- les études analysées comparent le plus souvent les effets pour seulement deux niveaux de CO₂, et/ou décrivent la relation concentration de CO₂ (variable continue)-effet mais en faisant l'hypothèse d'une relation linéaire *a priori*. Elles ne modélisent donc pas la forme de la relation dose-réponse qui permettrait de détecter un éventuel seuil ;
- il n'existe pas d'étude épidémiologique représentative du parc français des logements, écoles, crèches ou bureaux, visant à investiguer la relation entre concentration de CO₂ et des effets sur la santé, la performance ou la perception de confort. Les études concernent des parcs de bâtiments existants présentant des caractéristiques typologiques potentiellement très différentes. Leurs résultats doivent donc être considérés avec précaution dans le cadre d'une transposition à des bâtiments appliquant les récentes réglementations thermiques françaises RT 2005 et 2012.

En conséquence, les données actuelles ne permettent pas d'établir une concentration seuil de CO₂ en air intérieur protégeant de ces effets.

5.2.2 Dans les écoles

Les niveaux de CO₂ dans les études observationnelles étaient souvent relativement élevés et parfois très élevés (au-delà de 4000 ppm).

Les 5 études retenues ayant investigué des symptômes liés à l'asthme sont toutes positives (avec donc une aggravation des symptômes chez les enfants les plus sensibles), alors que les résultats des 12 études retenues ayant investigué les symptômes de type SBS sont beaucoup plus contrastés avec 7 études négatives pour tous les symptômes et parfois des résultats contradictoires au sein d'une même étude.

Une augmentation de la fréquence de symptômes liés à l'asthme chez l'enfant peut être associée à des concentrations de CO₂ supérieures à 1000 ppm en moyenne sur une journée d'école, d'après l'étude multicentrique européenne de Simoni et al. (2012) jugée de bonne qualité et la plus pertinente au regard de la situation des écoles en France. Cette valeur de 1000 ppm a été retenue *a priori* par les auteurs lors de la formation de classes de concentration et ne résulte pas spécifiquement de la recherche d'un seuil sans effet. D'autres études sont proches d'un point de vue méthodologique et résultats, mais il s'agit de deux études asiatiques, dans des contextes de pollution extérieure moins favorables.

Une baisse des symptômes asthmatiques peut être attendue suite à l'amélioration de la qualité du renouvellement d'air se traduisant par une baisse des niveaux de CO₂, une étude ayant montré une baisse de ces symptômes associée à une baisse de 270 ppm de CO₂ suite à l'installation de nouveaux systèmes de ventilation (Smedge, 2000).

Seules 1 étude transversale et 6 études expérimentales ont exploré la relation entre CO₂/ventilation et la perception de confort dans les écoles, 4 de ces 7 études ayant été réalisées par la même équipe, et toutes en Scandinavie. Les résultats de ces études sont de plus contrastés, bien qu'il ressorte que plus le niveau de CO₂ baisse, meilleure est la qualité de l'air perçue (ou plus acceptable), même pour des niveaux de CO₂ déjà proches ou inférieurs à 1000 ppm (en moyenne sur la période d'occupation).

Seules 3 publications, dont 2 du même auteur, ont exploré la relation entre CO₂/ventilation et la performance dans les écoles. Ces études expérimentales montrent certains effets pour des niveaux de CO₂ les plus faibles variant de 900 ppm à 1100 ppm (en moyenne sur la période d'occupation).

5.2.3 Dans les bureaux

Les niveaux de CO₂ dans les études analysées étaient relativement homogènes, inférieurs à 1700 ppm.

Les 10 études retenues, soit 5 études transversales, 2 études longitudinales et 3 études expérimentales, ont toutes investigué les symptômes de type SBS et sont toutes positives (à part l'étude la plus ancienne), les symptômes les plus souvent en cause étant les irritations des muqueuses et/ou les symptômes des voies respiratoires supérieures, puis les symptômes généraux et ceux touchant les voies respiratoires inférieures.

Une augmentation de la fréquence de symptômes du SBS peut être associée à des concentrations de CO₂ supérieures à 850 ppm exprimés en moyenne sur une journée de travail, d'après l'étude américaine BASE (Erdmann et al., 2004), jugée de bonne qualité et la plus pertinente dans ce contexte. Cette étude transversale se base sur un échantillon représentatif d'immeubles aux Etats-Unis et dont les résultats sont corroborés par ceux de l'étude expérimentale de Wargocki, 2000.

Cette valeur de 850 ppm est considérée à partir de cette étude montrant des relations concentration-risque significatives à partir des tests de tendance, le seul OR significatif étant celui contrastant le dernier décile des concentrations de CO₂ (>844 ppm correspondant à dCO₂>444 ppm) au premier décile (<410 ppm correspondant à dCO₂< 110 ppm) parmi les cinq classes de concentrations dCO₂ étudiées : <110 ppm, 110-188 ppm, 188-273 ppm, 273-444 ppm et >444 ppm. Une des réserves est que les immeubles sont tous (sauf un) équipés de systèmes mécaniques de ventilation avec air conditionné, à la différence du parc français où la proportion de bâtiments de bureaux bénéficiant de l'air conditionné est plus faible.

Aucune conclusion ne peut être émise en ce qui concerne la perception du confort dans les bureaux, une seule étude expérimentale négative ayant pu être retenue.

Une seule étude retenue a exploré la relation entre CO₂/ventilation et performance dans les bureaux. Cette étude expérimentale est positive pour les tests de saisie et les tâches d'imagination à des niveaux de dCO₂ (différence des concentrations de CO₂ à l'intérieur et à l'extérieur) variant de 195 à 1266 ppm (en moyenne sur la dernière heure d'occupation).

5.2.4 Dans les logements

Seules 2 études suédoises sur des sujets adultes, une étude transversale et une étude expérimentale, ont été identifiées et apportent peu d'informations ; une relation significative entre CO₂ et des symptômes respiratoires nocturnes potentiellement liés à l'asthme peut néanmoins être relevée dans l'étude transversale.

6 Relations entre les concentrations de CO₂ et de polluants cibles mesurées dans des écoles, crèches, bureaux et logements en France

6.1 Objectifs et méthode

Afin de rechercher les relations entre les concentrations de CO₂ et d'autres polluants de l'air intérieur, les données issues de campagnes de mesures françaises dans les logements, les écoles, les crèches, et les bureaux ont été analysées.

Une étude détaillée dans le rapport en annexe 3 a été réalisée par le CSTB dans le cadre d'une convention de recherche et développement avec l'Anses. La réalisation de cette étude a été suivie par les rapporteurs et l'Anses. Cette étude avait pour objectif de rechercher les éventuelles corrélations entre d'une part le niveau de CO₂ et d'autre part le niveau de polluants cibles. Les polluants cibles ont été définis au travers d'une précédente hiérarchisation sanitaire pour différents environnements intérieurs (ANSES, 2011) : formaldéhyde, acétaldéhyde, acroléine, benzène, 1,4-dichlorobenzène, PM_{2.5} et PM₁₀. Les données de concentrations des polluants cibles et de CO₂ sont issues de quatre jeux de données disponibles, produits respectivement par les quatre campagnes de mesures suivantes :

- une campagne menée dans 567 logements en France (campagne nationale de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) ; Kirchner et al., 2007),
- une campagne menée dans 310 crèches, écoles maternelles et élémentaires en France (MEDDTL, 2012 ; Michelot et al., 2011) avec 896 salles instrumentées entre septembre 2009 et décembre 2011,
- une campagne pilote menée dans 17 écoles maternelles et élémentaires de Clermont-Ferrand avec 51 salles de classes instrumentées en 2010 (OQAI, Derbez et Dassonville, 2011),
- une campagne menée dans 9 immeubles de bureaux en France par le CSTB avec 36 points de mesures distincts.

Le Tableau VIII présente la liste des polluants ciblés dans le cadre de la présente expertise, en fonction des différentes campagnes de mesure.

Tableau VIII : Liste des polluants cibles mesurés selon les campagnes

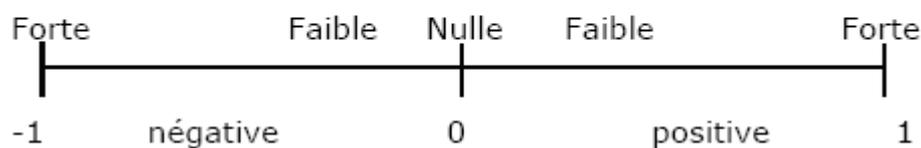
Polluant cible	Campagne de mesure			
	Logements	Ecoles et crèches	Ecoles	Bureaux
	2003-2005	2009-2011	2010	2012-2013
Formaldéhyde	X	X	X	X
Benzène	X	X	X	X
Acétaldéhyde	X		X	X
Acroléine	X			X
1,4-Dichlorobenzène	X			
PM _{2.5}	X		X	X*
PM ₁₀	X			

* ensemble des données invalidé

Pour chacun de ces 4 jeux de données, la relation entre les deux variables quantitatives que sont la concentration de CO₂ et celle d'un polluant cible a été exprimée par un coefficient de corrélation linéaire : le coefficient r de Pearson. La corrélation avec d'autres variables pouvant être reliées à la concentration de CO₂ et/ou à celle d'un polluant cible a également été étudiée, telles que la température, le nombre d'occupants, la durée d'occupation, l'ouverture des fenêtres, le fonctionnement du chauffage, la présence de sources de combustion ou la présence de fumeurs, etc.

La mesure de la corrélation correspond à la mesure de la dépendance linéaire de deux variables quelconques, deux variables pouvant être corrélées sans aucun lien de causalité. Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson, aussi noté $r_{(x,y)}$, est ainsi défini comme la covariance des variables standardisées x^s et y^s , soit $r_{(x,y)} = (s_{xy} / s_x s_y)$. Ses valeurs varient de -1 à $+1$, tel que :

Association



$r_{(x,y)} = \pm 1 \leftrightarrow$ relation linéaire parfaite entre les deux variables : $y = ax + b$

$r_{(x,y)} < 0 \leftrightarrow$ les deux variables évoluent en sens contraires

$r_{(x,y)} > 0 \leftrightarrow$ les deux variables évoluent dans le même sens

$r_{(x,y)} = 0 \leftrightarrow$ les deux variables ne sont pas corrélées

De façon à avoir une vision plus globale que ces corrélations recherchées en regardant chaque polluant cible et chaque autre facteur (température, ouverture des fenêtres, etc.) de manière individuelle, une analyse par composantes principales normée (ACP) couplée à une classification ascendante hiérarchique a été réalisée.

La recherche de corrélations a été complétée en déterminant la proportion de situations dépassant ou non une valeur cible définie pour un polluant donné, selon le niveau moyen de CO₂ en période d'occupation défini dans différentes classes de concentration ou comme variable continue.

La sélection de la valeur cible (VC) pour chacun des polluants présentée dans le Tableau IX a été réalisée par l'Anses selon la démarche suivante :

1. en première intention, la VC correspond à la valeur guide de qualité de l'air intérieur proposée par l'Anses ($VGAI_{Anses}$) ;
2. si aucune $VGAI_{Anses}$ n'est disponible pour le polluant cible, la VC correspond à la valeur toxicologique de référence (VTR) à seuil pour une exposition chronique par inhalation ou à la concentration équivalente à un excès de risque individuel (ERI) de 10^{-5} proposée par l'Anses (VTR_{Anses}) ;
3. si aucune VTR_{Anses} n'est disponible pour le polluant cible, la VC correspond à la VTR la plus conservatrice, soit la VTR à seuil pour une exposition chronique par inhalation ou la concentration équivalente à un excès de risque individuel (ERI) de 10^{-5} la plus faible (VTR) ;
4. si aucune VTR n'est disponible pour le polluant cible (cas des PM), la VC correspond à la valeur guide OMS en air ambiant.

Tableau IX : Liste des valeurs cibles des polluants

polluant	Valeur cible (VC) en µg/m3	Source
formaldéhyde	10	VGAI Anses
acétaldéhyde	9,8	(ERI 10 ⁻⁵) VTR la plus protectrice (OEHHA)
acroléine	0,8	VGAI Anses
benzène	2	(ERI 10 ⁻⁵) VGAI Anses <i>sans seuil</i>
	10	VGAI Anses <i>à seuil</i>
1,4-dichlorobenzène	0,9	(ERI 10 ⁻⁵) VTR la plus protectrice (OEHHA)
	60	VTR à seuil la plus protectrice (ATSDR)
PM2,5	10	VG air ambiant (OMS)
PM10	20	VG air ambiant (OMS)

Cette démarche de sélection des VC s'est donc voulue pragmatique dans la mesure où le choix a été de retenir en première intention les valeurs issues de l'expertise de l'Anses et à défaut les valeurs les plus protectrices pour la santé, sans analyse approfondie de la construction de ces valeurs (transparence de la méthode de construction, choix de l'effet critique, de l'étude clé, de la dose critique, des facteurs d'incertitude, les ajustements éventuels, etc.).

Les classes de concentrations de CO₂ (niveau moyen en période d'occupation) ont été définies avec des valeurs « seuils » de 750 ppm, 1000 ppm, 1500 ppm et 2000 ppm en tenant compte des limites réglementaire et normative les plus usuelles (CSTB, 2011) pour les deux valeurs intermédiaires, et de la distribution des valeurs de concentrations de CO₂ pour les deux valeurs extrêmes. Concernant la valeur de 750 ppm, il a également été considéré qu'un niveau inférieur à ce « seuil » correspondait à « *une qualité de l'air intérieur excellente* » selon la norme NF EN 13779 « Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air ».

La sensibilité et la spécificité des occurrences de dépassement des VC ont été déterminées pour différents seuils de concentration de CO₂ (variable test). La méthodologie générale du test est décrite dans Bouyer et al. (2010). Les calculs ont été réalisés avec le logiciel XLStat 2012 (version 2012.6.03, module XLStat-Life, Addinsoft), permettant de calculer notamment la sensibilité, la spécificité, les valeurs prédictives positives et négatives en faisant varier les seuils.

Un indice synthétique de performance du modèle de discrimination des dépassements des VC par les concentrations de CO₂ a également été calculé : l'aire sous la courbe (ou Area Under the Curve – AUC), sachant que AUC=1 pour un modèle idéal, AUC=0.5 pour un modèle aléatoire, AUC > à 0,7 pour un modèle habituellement considéré comme bon, 0.87<AUC<0.9 pour un modèle bien discriminant, et AUC>0.9 pour un excellent modèle.

En complément, le gain net apporté par l'utilisation d'un seuil de CO₂ pour discriminer les situations de dépassement de VC (900 ppm pour les écoles, 750 ppm pour les logements) a été évalué en calculant les gains diagnostiques positifs et négatifs¹².

¹² Le gain positif représente la différence entre la probabilité pré-test (prévalence) de dépassement de la VC et la probabilité post-test (valeur prédictive positive (VPP)) : gain positif = VPP – prévalence. Par exemple, un gain positif de 0,2 correspond à 20 % de chances supplémentaires de détecter une situation de dépassement pour un polluant cible lorsque le niveau de CO₂ dépasse le seuil fixé.

Le gain négatif représente la différence entre la probabilité pré-test (1–prévalence) d'être inférieur à la VC et la probabilité post-test (valeur prédictive négative) : gain négatif = VPN – (1–prévalence). Par exemple, un gain négatif de 0,1 correspond à 10 % de chances supplémentaires de détecter une situation pour laquelle la concentration d'un polluant cible ne dépasse pas la VC lorsque le niveau de CO₂ reste inférieur au seuil fixé.

6.2 Résultats

6.2.1 Dans les environnements intérieurs globalement

La recherche des éventuelles corrélations entre d'une part le niveau de CO₂ et d'autre part le niveau de polluants de l'air intérieur est affectée par plusieurs limites et incertitudes pour certaines inhérentes aux données disponibles. En effet, la sélection des polluants cibles est limitée par le peu de polluants mesurés dans les campagnes écoles et bureaux, et résulte donc d'un croisement entre cette hiérarchisation et la disponibilité des données. Ce n'est pas le cas des logements pour lesquels la campagne a inclus davantage de polluants.

Par ailleurs, les données disponibles ne permettent pas d'analyser les corrélations strictement sur les périodes d'occupation des locaux qui correspondent mieux aux périodes d'exposition. En effet, les concentrations de polluants cibles, à l'exception des particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) mesurées par prélèvement actif avec une programmation sur les périodes d'occupation, représentent des mesures intégrées sur plusieurs jours incluant les périodes d'occupation et d'inoccupation, l'enregistrement en continu du CO₂ permettant soit de se caler sur ces mêmes périodes, soit de prendre exclusivement en compte la période d'occupation.

Il convient également de préciser que les mesures des polluants cibles, à l'exception des particules (PM₁₀ et PM_{2,5}), sont basées sur des prélèvements par échantillonneur passif (diffusion) dont certaines limites métrologiques ont été soulignées dans le cadre d'évaluation des méthodes de mesure, notamment pour l'acroléine.

Considérant ces limites et incertitudes, l'analyse montre néanmoins qu'il existe des corrélations positives significatives entre le CO₂ et certains polluants, en particulier le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, l'acroléine (dans les logements, pas dans les bureaux) et les particules (fractions PM_{2,5} et PM₁₀, données disponibles pour la campagne nationale logement et la campagne pilote école). Ces corrélations sont faibles cependant (faible part de la variance expliquée).

Concernant le benzène, la concentration de CO₂ est significativement, positivement et très faiblement corrélée, uniquement dans le cadre de la campagne nationale logements et de la campagne de surveillance dans les écoles et crèches, elle n'est pas corrélée dans le cadre de la campagne pilote écoles et la campagne bureaux.

Concernant le 1,4-dichlorobenzène (mesuré uniquement dans le cadre de la campagne nationale logements), la concentration de CO₂ n'est significativement et positivement corrélée que lorsque la concentration de 1,4-dichlorobenzène est exprimée sous la forme logarithmique ou par une corrélation des rangs, afin d'éliminer l'influence de très fortes valeurs de concentration, la part de la variance expliquée restant négligeable.

Plusieurs facteurs investigués et pouvant être intriqués présentent un lien avec les concentrations de CO₂ et les concentrations de polluants cibles, et peuvent ainsi conditionner les corrélations observées : la saison, la période de chauffe (logements), le nombre moyen d'occupants, l'ouverture des fenêtres, la présence de fumeurs (logements), la présence d'une source de combustion incluant le tabagisme (logements), le type d'établissement (écoles *versus* crèches) et la zone climatique (écoles en outre-mer *versus* écoles en métropole).

Tableau X : Récapitulatif des coefficients de corrélation de Pearson r entre les concentrations de dioxyde de carbone et des polluants cibles (concentrations en moyenne intégrée sur une semaine)

	CO ₂ *			
	Campagne nationale logements (2006)	Campagne écoles et crèches (2009-2011)	Campagne pilote école (2010)	Campagne bureaux (2012-2013) **
Formaldéhyde	0.229	0.276	0.494	0.474
Acétaldéhyde	0.449	-	0.468	0.693
Acroléine	0.299	-	-	0.065
Benzène	0.166	0.141	0.130	0.007
1,4-Dichlorobenzène	0.043	-	-	-
PM10 ***	0.209	-	-	-
PM2.5 ***	0.123	-	0.509	-

* Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0.05$. «-» signifie que ce polluant n'a pas été mesuré dans la campagne ou que les mesures ont été invalidées.

** Les corrélations polluants cibles/CO₂ de la campagne dans les bureaux portent sur des concentrations de CO₂ en moyenne sur la période d'occupation programmée (9h-19h) et sur des concentrations de polluants cibles en moyenne intégrée sur une semaine.

*** Les corrélations PM/CO₂ portent sur des concentrations exprimées en moyenne sur la période d'occupation programmée, et non sur une moyenne intégrée sur une semaine comme pour les corrélations COVs/CO₂. A noter que pour les logements, le point de prélèvement des PM est dans le séjour, alors qu'il est dans la chambre pour le CO₂.

Pour chaque polluant cible, la proportion de situations qui dépasse ou non une valeur cible (VC) établie sur des critères sanitaires, a été déterminée selon le niveau moyen de CO₂ dans l'air intérieur en période d'occupation. Néanmoins, la mesure des polluants cibles couvre plus largement à la fois les périodes d'occupation et d'inoccupation, l'influence de ce biais sur les résultats n'étant pas connue.

Les résultats montrent que l'utilisation du niveau de CO₂ permet de discriminer les fréquences de dépassement des valeurs cibles de certains polluants à partir des données des deux campagnes de grande envergure (logements 2003-2005 et écoles/crèches 2009-2011), et ne fournit pas de résultats satisfaisants à partir des deux autres campagnes de moindre envergure (écoles OQAI 2010 et bureaux) compte tenu du nombre d'observations restreint.

Plus la concentration moyenne de CO₂ est élevée, plus la proportion de situations où un polluant dépasse une valeur cible sanitaire (VGAI, VTR ou valeur guide OMS selon le polluant) augmente. Toutefois la probabilité de dépasser une valeur cible n'est pas nulle dans les situations où la concentration de CO₂ est la plus réduite. La proportion de dépassement dépend également du type d'environnement intérieur considéré.

La concentration de CO₂ ne permet pas de détecter avec suffisamment de fiabilité les dépassements des valeurs cibles. A titre indicatif, le niveau de CO₂ discriminant le mieux les occurrences de dépassement des valeurs cibles se situe en général au voisinage de 750-900 ppm d'après les tests de sensibilité et de spécificité (maximum de la somme). Néanmoins, même aux niveaux de CO₂ inférieurs à 750 ppm, la probabilité diminuée de dépassement des VC reste importante pour le benzène (logements et écoles) et le formaldéhyde (logements uniquement) notamment.

6.2.2 Dans les écoles et crèches

Lorsque le niveau moyen de CO₂ en période d'occupation varie de moins de 750 ppm à plus de 2000 ppm, la proportion de situations de dépassement de la valeur cible varie :

- de 44 % à 97 % pour le formaldéhyde (mesures estivales et hivernales confondues dans les écoles et les crèches instrumentées entre 2009 et 2011),
- de 44 % à 72 % pour le benzène (avec la valeur cible de 2 µg/m³ ; la valeur cible de 10 µg/m³ n'étant dépassée qu'en de rares occasions sans lien apparent avec le niveau de CO₂) ;

Les premiers cas de dépassement de la valeur cible de l'acétaldéhyde sont observés à partir d'un niveau moyen de CO₂ en période d'occupation de 1000 ppm de CO₂ dans les écoles.

A titre indicatif, les PM_{2,5} non mesurées dans le cadre de la campagne écoles/crèches 2009-2011, dépassaient systématiquement la valeur cible quel que soit le niveau moyen de CO₂ en période d'occupation dans le cadre de la campagne écoles de moindre envergure (OQAI 2010).

Le seuil optimal de CO₂ discriminant le mieux les fréquences de dépassement de la valeur cible du formaldéhyde dans les écoles se situe à 900 ppm, d'après les tests de sensibilité et de spécificité (maximum de la somme) du dépassement de la valeur cible qui se sont avérés les plus performants pour ce polluant cible avec un indice AUC supérieur à 0,7 (0,8).

Lorsque le niveau de CO₂ est supérieur au seuil de 900 ppm, la probabilité de détecter les situations de dépassement de la valeur cible du formaldéhyde augmente de 12 % par rapport à l'ensemble des situations (gain diagnostique positif). A l'inverse lorsque le niveau de CO₂ est inférieur à 900 ppm, la probabilité de détecter les situations de respect de la valeur cible augmente de 23 % (gain diagnostique négatif). Pour le benzène, le gain par rapport à la prévalence initiale reste inférieur à 10 % dans l'ensemble des situations.

6.2.3 Dans les logements

Lorsque le niveau moyen de CO₂ en période d'occupation varie de moins de 750 ppm à plus de 2000 ppm, la proportion de situations de dépassement de la valeur cible varie :

- de 40 % à 85 % pour l'acétaldéhyde,
- de 48 % à 85 % pour l'acroléine,
- de 40 % à 69 % pour le benzène (avec la valeur cible de 2 µg/m³ ; la valeur cible de 10 µg/m³ n'étant dépassée qu'en de rares occasions sans lien apparent avec le niveau de CO₂) ;
- de 7 % à 23 % pour le 1,4-dichlorobenzène (avec la valeur cible de 60 µg/m³ ; la valeur cible de 0,9 µg/m³ étant dépassée dans 90 % des cas sans lien apparent avec le niveau de CO₂)

Concernant le formaldéhyde, la proportion de dépassements de la valeur cible est supérieure à 80 % quel que soit le niveau moyen de CO₂ en période d'occupation.

Concernant les PM_{2.5} et PM₁₀, les proportions de dépassements de la valeur cible sont respectivement supérieures à 88 % et 74 % quel que soit le niveau moyen de CO₂ en période d'occupation. Néanmoins, ces résultats concernant les particules doivent être interprétés avec beaucoup de prudence. En effet, la recherche d'une corrélation entre les particules et le CO₂ est fortement limitée par le protocole opératoire de la campagne qui a privilégié la mesure des particules dans le séjour et la mesure du CO₂ dans la chambre.

Le seuil optimal de CO₂ discriminant le mieux les fréquences de dépassement de la valeur cible de l'acétaldéhyde et de l'acroléine dans les logements se situe à 750 ppm environ (seuils optimaux à 700 ppm et 800 ppm pour respectivement l'acroléine et l'acétaldéhyde), d'après les tests de sensibilité et de spécificité (maximum de la somme) du dépassement de la valeur cible qui se sont avérés les plus performants pour ces deux polluants dans une même mesure avec des indices AUC égaux à 0,7.

Lorsque le niveau de CO₂ est supérieur au seuil de 750 ppm, la probabilité de détecter les situations de dépassement de la valeur cible de l'acétaldéhyde augmente de 15 % par rapport à l'ensemble des situations (gain diagnostique positif). A l'inverse lorsque le niveau de CO₂ est inférieur à 750 ppm, la probabilité de détecter les situations de respect de la valeur cible augmente de 21 % (gain diagnostique négatif). Pour l'acroléine, une augmentation similaire des probabilités est observée de 13 % et 19 % respectivement. Pour les autres polluants, le gain par rapport à la prévalence initiale reste inférieur à 10 % dans l'ensemble des situations.

Il convient de préciser que la différence d'échelles de temps entre la mesure des polluants sur une semaine et les valeurs cibles s'appliquant sur une période long terme (typiquement une année) peut biaiser la répartition des logements au sein des différentes classes de CO₂, notamment pour des polluants dont les niveaux varient selon les périodes de chauffe et hors-chauffe.

6.2.4 Dans les bureaux

L'utilisation du niveau de CO₂ ne fournit pas de résultats satisfaisants pour discriminer les fréquences de dépassement de valeurs cibles compte tenu du nombre d'observations restreint dans cette campagne de moindre envergure.

Les premiers cas de dépassement de la valeur cible de l'acétaldéhyde sont observés à partir d'un niveau moyen de CO₂ en période d'occupation de 750 ppm dans les bureaux.

Concernant le formaldéhyde et le benzène (VC = 2 µg/m³), la probabilité de détecter un dépassement de la valeur cible augmente respectivement de 9 % et de 7 % lorsque le niveau de CO₂ est supérieur au seuil de 750 ppm (gain diagnostique positif). A l'inverse, lorsque le niveau de CO₂ est inférieur à ce seuil, la probabilité de détecter les situations de respect de la valeur cible n'est cependant pas améliorée.

Le faible nombre d'observations ne permet pas d'avoir une estimation fine de la prévalence des situations de dépassement dans les bureaux. Les résultats observés ne sont par conséquent pas robustes pour ce type de local.

7 Conclusions

7.1 Evaluation de la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur pour le CO₂

Il n'apparaît pas pertinent de construire une VGAI pour le CO₂ fondée sur ses effets propres selon la méthode proposée par l'Anses.

En effet, plusieurs études rapportent des concentrations associées à des effets sanitaires intrinsèques du CO₂ (seuil à environ 10000 ppm correspondant à l'apparition d'une acidose respiratoire, premier effet critique du CO₂). Ces concentrations seuil sont supérieures aux valeurs limites réglementaire et/ou normative de qualité du renouvellement d'air en France et au niveau international qui varient usuellement entre 1000 et 1500 ppm de CO₂. Par ailleurs, ces concentrations associées à des effets intrinsèques du CO₂ sont supérieures aux concentrations de CO₂ en tant qu'indicateur de confinement pour lesquelles des effets sont associés et à relier aux nuisances induites par le confinement.

7.2 Détermination de valeurs de concentration en CO₂ protégeant des effets du confinement sur la santé, la performance et la perception de confort

L'analyse des études épidémiologiques investiguant la relation entre concentration de CO₂ et des effets sur la santé, la performance et la perception de confort, montre des effets pour des augmentations de concentration de 100 ppm de CO₂ dans l'air intérieur. Ces effets sont imputables aux nuisances induites par le confinement.

Il convient de préciser que :

- les études analysées comparent le plus souvent les effets pour seulement deux niveaux de CO₂, et/ou décrivent la relation concentration de CO₂ (variable continue)-effet mais en faisant l'hypothèse d'une relation linéaire *a priori*. Elles ne modélisent donc pas la forme de la relation dose-réponse qui permettrait de détecter un éventuel seuil ;
- il n'existe pas d'étude épidémiologique représentative du parc français des logements, écoles, crèches ou bureaux, visant à investiguer la relation entre concentration de CO₂ et des effets sur la santé, la performance ou la perception de confort. Les études concernent des parcs de bâtiments existants présentant des caractéristiques typologiques potentiellement très différentes. Leurs résultats doivent donc être considérés avec précaution dans le cadre d'une transposition à des bâtiments appliquant les récentes réglementations thermiques françaises RT 2005 et 2012.

En conséquence, les données actuelles ne permettent pas d'établir une concentration seuil de CO₂ en air intérieur protégeant de ces effets.

7.3 Recherche des relations entre les concentrations en air intérieur de CO₂ et les concentrations d'autres polluants mesurées en France dans des logements, écoles/crèches et bureaux

L'analyse montre que la mesure du CO₂ ne peut être considérée seule comme un indicateur de pollution chimique de l'air intérieur. La mesure du CO₂ ne peut donc être définie comme un outil unique de contrôle de la qualité sanitaire de l'air intérieur.

L'évolution des concentrations de CO₂ et des polluants en air intérieur dépend notamment du renouvellement d'air.

A partir des données de mesure disponibles, il existe des corrélations positives significatives entre le CO₂ et certains polluants, en particulier le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, l'acroléine (dans les logements, pas dans les bureaux) et les particules (fractions PM_{2,5} et PM₁₀, données disponibles pour la campagne nationale logement et la campagne pilote école). Ces corrélations sont faibles cependant. A l'inverse la corrélation est très faible ou nulle pour le benzène et le 1,4-dichlorobenzène (mesuré uniquement dans le cadre de la campagne nationale logements).

Plus la concentration moyenne de CO₂ est élevée, plus la proportion de situations où un polluant dépasse une valeur cible sanitaire (VGAI, VTR ou valeur guide OMS selon le polluant) augmente. Toutefois, le CO₂ ne permet pas de détecter avec suffisamment de fiabilité les dépassements de ces valeurs cibles, et la probabilité de dépasser une valeur cible n'est pas nulle dans les situations où la concentration de CO₂ est la plus réduite.

Par ailleurs, des limites inhérentes aux données disponibles ont été identifiées, notamment le faible nombre de polluants étudiés et l'impossibilité de discriminer les périodes d'occupation et d'inoccupation des locaux pour les concentrations des polluants cibles autres que les PM_{2,5} et PM₁₀.

7.4 Mise en perspective de valeurs de concentrations de CO₂ dans l'air intérieur associées à des effets sur la santé, avec des valeurs de classement de la qualité de l'air intérieur et des valeurs limites d'exposition professionnelle

L'analyse des études épidémiologiques et toxicologiques disponibles a conduit à identifier plusieurs éléments intéressants, même si ceux-ci ne sont pas suffisants pour définir des seuils garantissant une protection contre des effets sur la santé, la perception de confort ou la performance.

Concernant les effets à relier aux nuisances induites par le confinement, et non les effets intrinsèques du CO₂, il est ainsi observé que :

- dans les écoles, une augmentation de la fréquence de symptômes liés à l'asthme chez l'enfant peut être associée à des concentrations de CO₂ supérieures à 1000 ppm en moyenne sur une journée d'école, d'après une étude multicentrique européenne (Simoni *et al.*, 2010) jugée de bonne qualité et la plus pertinente au regard de la situation des écoles en France. Cette valeur de 1000 ppm a été retenue *a priori* par les auteurs lors de la formation de classes de concentration et ne résulte pas spécifiquement de la recherche d'un seuil sans effet ;
- dans les bureaux, une augmentation de la fréquence de symptômes du syndrome des bâtiments malsains (ou SBS) peut être associée à des concentrations de CO₂ supérieures à 850 ppm en moyenne sur une journée de travail, d'après l'étude américaine BASE (Erdmann et Apte, 2004) jugée de bonne qualité et la plus pertinente dans ce contexte. Cette étude transversale sur un échantillon représentatif d'immeubles aux Etats-Unis et dont les résultats sont corroborés par ceux d'une étude expérimentale (Wargocki *et al.*, 2000) a montré des relations concentration-risque significatives. Le seul Odd-Ratio significatif était celui comparant le dernier décile (>844 ppm) au premier décile (<410 ppm). Une des réserves est que les immeubles sont tous (sauf un) équipés d'une ventilation avec air conditionné, à la différence du parc français de bâtiments de bureaux.

Concernant les effets intrinsèques du CO₂, il est observé que :

- l'apparition d'une acidose respiratoire, premier effet critique du CO₂, peut être admise à partir d'un niveau d'exposition de 1% (10000 ppm) pendant au moins 30 minutes chez un adulte en bonne santé avec une charge physique modérée ;
- une récente étude expérimentale sur 22 sujets humains adultes suggère un effet propre du CO₂ sur la performance psychomotrice (prise de décision, résolution de problèmes) à partir de 1000 ppm (Satish et al., 2012), cette étude n'étant pas suffisante pour élaborer une VGAI en l'absence de convergence avec d'autres études et de consensus international sur la nature des effets et le mode d'action associé (Anses, 2011).

A titre indicatif, le tableau suivant propose une mise en perspective des concentrations de CO₂ utilisées par la norme NF EN 13779 pour le classement de la qualité de l'air intérieur avec celles issues des études épidémiologiques ou toxicologiques.

Les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) sont également présentées dans le tableau. En France, une valeur limite réglementaire indicative d'exposition moyenne sur 8 heures (VLEP 8 heures) de 5000 ppm a été fixée pour le CO₂ par l'arrêté du 30 juin 2004 modifié, et il n'existe pas de valeur limite court terme.

Des VLEP existent dans 19 autres pays (Gestis, 2013) et sont toutes égales à 5000 ppm en moyenne sur 8 heures. Les valeurs limites court terme se situent entre 10000 et 30000 ppm.

**Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur – Mise en perspective à titre indicatif de :
valeurs de classement de la qualité de l'air intérieur, valeurs associées à des effets sur la santé dans la littérature scientifique, et valeurs limites d'exposition professionnelle**

<i>Différentiel de concentrations de CO₂ de l'air intérieur et de l'air extérieur utilisé pour le classement de la qualité de l'air intérieur selon la norme NF EN 13779</i>	Mise en perspectives avec :	
	les concentrations de CO₂ ou <i>différentiels de concentrations de CO₂ entre l'air intérieur et l'air extérieur</i> issues des études épidémiologiques ou toxicologiques	les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP)
<i>d [CO₂] ≤ 400 ppm</i> Qualité de l'air intérieur excellente		
<i>d [CO₂] entre 400 et 600 ppm</i> Qualité de l'air intérieur moyenne	[CO₂] ≥ 850 ppm ou <i>d [CO₂] ≥ 450 ppm</i> Plage correspondant en moyenne sur une journée de travail à une augmentation de symptômes du SBS dans des bureaux	
<i>d [CO₂] entre 600 et 1000 ppm</i> Qualité de l'air intérieur modérée	[CO₂] ≥ 1000 ppm ou <i>d [CO₂] ≥ 600 ppm*</i> Plage correspondant à : - une augmentation de symptômes liés à l'asthme chez l'enfant, en moyenne sur une journée d'école - une altération suspectée de la performance psychomotrice due au CO ₂ seul chez l'adulte, en moyenne sur quelques heures (une seule étude)	
<i>d [CO₂] > 1000 ppm</i> Qualité de l'air intérieur basse	[CO₂] égale à 10000 ppm Concentration correspondant sur au moins 30 minutes à l'apparition d'acidose respiratoire due au CO ₂ seul (un des premiers effets critiques) chez l'adulte sain avec une charge physique modérée	[CO₂] égale à 5000 ppm Concentration moyenne sur 8 heures (VLEP 8h) utilisée comme valeur limite d'exposition professionnelle en France et à l'étranger [CO₂] comprise entre 10000 et 30000 ppm Intervalle des concentrations court terme (VLCT ou VLE) utilisées comme valeurs limites d'exposition professionnelle à l'étranger (aucune valeur pour la France)

*Différentiel entre CO₂ de l'air intérieur et de l'air extérieur calculé à partir d'un niveau intérieur ≥ 1000 ppm et d'un niveau extérieur pris par défaut de 400 ppm

8 Recommandations

❖ En appui à la gestion :

- Il est rappelé que le CO₂ peut être utilisé comme un indicateur du confinement de l'air. Il recommande de s'appuyer sur la norme NF EN ISO 16000-26¹³ pour la stratégie d'échantillonnage du CO₂ dans les environnements intérieurs.
- Il est recommandé de ne pas élaborer de VGAI pour le CO₂, que ce soit pour ses effets propres ou pour les effets du confinement sur la santé. Il est insisté sur le fait que la seule mesure du CO₂ ne peut être considérée comme un indicateur de qualité sanitaire de l'air intérieur au vu des résultats de ces travaux qui montrent que :
 - les données épidémiologiques disponibles ne permettent pas de construire de valeur seuil du CO₂ protégeant des effets du confinement sur la santé, sur la perception de confort ou sur la performance,
 - la probabilité de dépassement de valeurs cibles sanitaires (VGAI, VTR ou VG_{OMS}) pour les polluants chimiques de l'air intérieur n'est pas nulle même pour des concentrations de CO₂ réduites.
- Compte tenu des éléments ci-dessus, il est recommandé de réduire à la source les émissions de polluants dans l'air intérieur, en complément de l'amélioration de la ventilation.
- Il est recommandé d'évaluer la pertinence de réviser la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) au CO₂, et notamment la pertinence d'élaborer une VLEP court terme.

❖ En termes de recherche, il est recommandé d'améliorer les connaissances sur les éventuels effets propres au CO₂ :

- sur la performance psychomotrice (prise de décision, résolution de problèmes) aux faibles doses incluant des concentrations d'exposition inférieures ou égales à 1000 ppm, par exemple en répliquant l'étude de Satish et *al.* (2012) et en documentant le mécanisme d'action ;
- sur la santé des populations plus sensibles ou plus exposées telles que les enfants, les femmes enceintes et les personnes présentant des affections pulmonaires ou cardiaques.

Date de validation du rapport d'expertise collective par les rapporteurs : 3 mai 2013

¹³ Norme ISO 16000-26:2012 Air intérieur -- Partie 26: Stratégie d'échantillonnage du dioxyde de carbone (CO₂)

9 Bibliographie

Date de fin de la bibliographie : 3 mai 2013

Abolhassani M, Guais A, et al. (2009) Carbon dioxide inhalation causes pulmonary inflammation. *Am. J. Physiol. Lung. Cell. Mol. Physiol.* **296**, L657-665.

ANSES (2011) Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur, Évolution de la méthode d'élaboration des valeurs guides de qualité d'air intérieur. Rapport et avis, 79 p. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort. En ligne : <http://www.anses.fr/Documents/AIR2010sa0307Ra.pdf>

Apte MG, Fisk WJ et Daisey JM (2000) Associations between indoor (CO₂) concentrations and sick building syndrome symptoms in US Office Buildings: an analysis of the 1994–1996 BASE Study Data (LBNL 44385). *Indoor Air.* **10**, 246-257.

Bertoni G, Ciuchini C, et Tappa R (2004) Measurement of long-term average carbon dioxide concentrations using passive diffusion sampling. *Atmos. Environ.* **38**, 1625-1630.

Bouyer J, Hémon D, et al. (2010) Chapitre 16 : Choix et évaluation des paramètres caractérisant l'état de santé, dans *Épidémiologie - Principes et méthodes quantitatives*, Editions INSERM, Tec & Doc, EM Inter, Lavoisier, 498 p.

Cox PM, Betts RA, et al. (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* **408**, 184-187.

CSTB (2012) Guide d'application pour la surveillance du confinement de l'air dans les établissements d'enseignement, d'accueil de la petite enfance et d'accueil de loisirs. Rapport DESE/Santé N°2012-086R. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Champs-sur-Marne. En ligne :

http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Protocole_surveillance_confinement_Mai12_finale.pdf

CSTB (2011) Evolution de la réglementation sanitaire des bâtiments : Ventilation et CO₂. Rapport n°ESE/Santé-2011-098R, non publié. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Champs-sur-Marne.

CSTB (2004) Impact de la ventilation sur la qualité de l'air intérieur (1) Etude des liens directs entre la ventilation et l'impact sanitaire sur les occupants. Rapport du CSTB (avec la participation de SEPIA-santé) non publié. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Champs-sur-Marne.

Derbez M et Dassonville C (2011) Etude pilote de la campagne nationale de connaissance des expositions des enfants dans les écoles. Rapport final non publié, Programme d'études et de recherche de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur, 142 p.

DFG (2002) Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten; Verlag Chemie. The MAK Collection for Occupational Health and Safety. En ligne : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527600418.mb12438d0034/full>

Ema M, Naya M, et al. (2010) Reproductive and developmental toxicity of degradation products of refrigerants in experimental animals. *Reprod Toxicol.* **29**, 1-9.

Erdmann CA et Apte MG (2004) Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset. *Indoor Air*. **14**(s8), 127-134.

Ezraty B, Chabaliere M, et al. (2011) CO₂ exacerbates oxygen toxicity. *EMBO Reports*. **12**, 321-326.

Gestis (2013) Base de données Gestis sur les substances dangereuses pour l'Assurance sociale allemande des accidents. Consultée en avril 2013 sur le site en ligne : <http://www.dguv.de/ifa/en/gestis/stoffdb/index.jsp#>

Grote W (1965) Disturbances of embryonic development at elevated CO₂ and O₂ partial pressure at reduced atmospheric pressure. *Z. Morphol. Anthropol.* **56**, 165-94.

Guais A, Brand G, et al. (2011) Toxicity of carbon dioxide: a review. *Chem. Res. Toxicol.* **24**, 2061-2070.

Haring OM (1960) Cardiac malformation in rats induced by exposure of the mother to carbon dioxide during pregnancy. *Circ. Res.* **8**, 1218-1227.

INRS (2012) Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. Aide mémoire technique ED 984. Institut national de recherche et de sécurité, Paris. En ligne : <http://www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.html?refINRS=ED%20984>

INRS (2005) Dioxyde de carbone. Fiche toxicologique FT 238. Institut national de recherche et de sécurité, Paris. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/doc/fichetox.html?refINRS=FT%20238>

Jiang C, Rojas A, et al. (2005) CO₂ central chemosensitivity: why are there so many sensing molecules? *Respir. Physiol. Neurobiol.* **145**, 115-26.

Kajtar L, Herczeg L, et Lang E (2003) Examination of influence of CO₂ concentration by scientific methods in the laboratory. Proceedings of the Indoor Air 2003 conference, Singapore, 176-181.

Kirchner S, Cochet C, et al. (2007) Etat de la qualité de l'air dans les logements français. *Environnement Risques & Santé*. **6**, 259-269.

Marquardt H et Schäfer SG (1994) Lehrbuch der Toxikologie; BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim. En ligne : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pauz.19970260416/abstract>

MEDDTL (2012) Mesures pour améliorer la qualité de l'air intérieur. Dossier de presse du 6 janvier 2012, 15 p. Ministère de l'écologie, du développement durable, et de l'énergie. En ligne : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DP_Etiquette_COV_et_qualite_de_l_air_interieur.pdf

Michelot N, Mandin C, et al. (2011) Campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches en France. Résultats de la première phase. *Pollution Atmosphérique*. **53**, 267-279.

NRC (2008) Carbon dioxide, in spacecraft maximum allowable concentrations for selected airborne contaminants. Vol 5, 112-124. The National Research Council, Washington, DC.

- Ryu J, Heldt G, et al. (2010) Chronic hypercapnia alters lung matrix composition in mouse pups. *J. Appl. Physiol.* **109**, 203-210.
- Satish U, Mendell MJ, et al. (2012). Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives.* **120**, 1671-7.
- Schaefer KE, Niemoller H, et al. (1971) Chronic CO₂ toxicity: Species difference in physiological and histopathological effects. Rapport n°656, 1-26. US Navy Dept, Bureau of Medicine and Surgery, Naval Submarine Medical Center, Submarine Medical Research Laboratory, Groton, CT.
- Schaefer KE, McCabe N, et Withers J (1968) Stress response in chronic hypercapnia. *Am. J. Physiol.* **214**, 543-548.
- Schwartz L, Guais A, et al. (2010) Carbon dioxide is largely responsible for the acute inflammatory effects of tobacco smoke. *Inhal. Toxicol.* **22**, 543-551.
- Seppänen OA, Fisk WJ, et Mendell MJ (1999) Association of ventilation rates and CO₂-concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air.* **9**, 226-252.
- Simoni M, Annesi-Maesano I, et al. (2010) School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children. *European Respiratory Journal.* **35**, 742-749.
- Smedje G et Norbäck D (2000) New ventilation systems at select schools in Sweden – effects on asthma and exposure. *Archives of Environmental Health.* **55**, 18-25.
- Sun M, Sun C et Yang Y (1996) Effect of low-concentration CO₂ on stereoacuity and energy expenditure. *Aviat. Space Environ. Med.* **67**, 34-39.
- Sundell J, Levin H, et al. (2011) Ventilation Rates and Health: multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor Air.* **21**, 191-204.
- Sundell J et Levin H (2007) Ventilation Rates and Health: Report of an Interdisciplinary Review of the Scientific Literature. *ASHRAE URP1443*, Final report, 48 p.
- VanDemark NL, Schanbacher BD, et Gomes WR (1972) Alterations in testes of rats exposed to elevated atmospheric carbon dioxide. *J. Reprod. Fertil.* **28**, 457-459.
- Wargocki P, Sundell J, et al. (2002) Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN). *Indoor Air.* **12**, 113-128.
- Wargocki P, Wyon D.P, et al. (2000) The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity. *Indoor Air.* **10**, 222–236.
- Weaver TE et Scott Jr WJ (1984) Acetazolamide teratogenesis: interaction of maternal metabolic and respiratory acidosis in the induction of ectrodactyly in C57BL/6J mice. *Teratology.* **30**, 195-202.
- Wexels JC et Mjøs OD (1987) Effects of carbon dioxide and pH on myocardial function in dogs with acute left ventricular failure. *Crit. Care Med.* **15**, 1116-1120.
- Yang Y, Sun C, et Sun M (1997) The effect of moderately increased CO₂ concentration on perception of coherent motion. *Aviat. Space Environ. Med.* **68**, 187-191.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2012 -SA- 0 0 9 3



COURRIER ARRIVE

28 MARS 2012

DIRECTION GENERALE

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Santé

Direction générale de la prévention des risques

Direction générale de la santé

Service de la prévention des nuisances et de la qualité de
l'environnementSous direction de la prévention des risques liés à
l'environnement et à l'alimentation

01 MAR. 2012

Paris, le

Le Directeur général de la
prévention des risques

Le Directeur général de la santé

à

Monsieur le Directeur général de
l'Agence nationale de sécurité
sanitaire de l'alimentation, de
l'environnement et du travail

Objet : Elaboration de valeurs indicatives pour le dioxyde de carbone dans les environnements intérieurs

Monsieur le Directeur général,

La concentration en dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air intérieur est l'un des critères qui fondent la réglementation en matière d'aération des locaux.

Le titre III des Règlements sanitaires départementaux propose ainsi, pour les bâtiments non résidentiels, un seuil en CO₂ de 1000 ppm dans des conditions normales d'occupation, avec une tolérance à 1300 ppm dans les locaux où il est interdit de fumer. Par ailleurs, le décret du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public prévoit le calcul d'un indice de confinement à partir d'une mesure en continu de la concentration de dioxyde de carbone dans l'air (indice ICONE).

Plus généralement, la concentration en CO₂ est, avec le taux d'humidité, l'un des fondements des modélisations qui ont conduit à définir les valeurs de débits de ventilation ou de dimensionnement réglementaires, tant pour les logements¹ que pour les bâtiments non résidentiels².

¹ Arrêtés du 15 novembre 1958, du 22 octobre 1959 et du 24 mars 1982

² Règlements Sanitaires Départementaux – Titre III



Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Santé

Dans le cadre d'une mise à jour de ces réglementations anciennes, nous souhaitons connaître les valeurs de concentration en CO₂ dans l'air intérieur associées à des effets sanitaires, en tenant compte des publications les plus récentes à ce sujet. Les environnements intérieurs à considérer en priorité sont les logements puis les hébergements collectifs (centres de vacances, structures d'accueil de personnes âgées...), puis les autres établissements recevant du public (notamment bureaux, crèches, écoles...).

Aussi, nous vous demandons, à partir d'une étude de la bibliographie internationale, de

- Evaluer la pertinence de construire une valeur guide de qualité d'air intérieur pour le CO₂ selon la méthode proposée par l'Anses ;
- Déterminer, sous réserve de sa faisabilité, des valeurs de concentration en CO₂ dans l'air intérieur indicateurs d'effets sanitaires, pour les différents types de locaux considérés ;
- Identifier d'éventuelles corrélations entre le CO₂ et d'autres polluants de l'air intérieur en considérant les concentrations et les effets sanitaires associés aux autres polluants. Pour cela, vous pourrez vous rapprocher du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) afin d'exploiter les résultats des différentes études réalisées.

Nous vous remercions de bien vouloir nous indiquer dans les meilleurs délais les modalités et le calendrier de réponse à cette saisine que vous envisagez de mettre en œuvre.

Le Directeur général
de la santé

Jean-Yves GRALL

Le Directeur général
de la prévention des risques

Laurent MICHEL

Copie : Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages, Direction générale du travail, Direction générale de l'alimentation, Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

Annexe 2 : Analyse des études épidémiologiques en vue de déterminer des valeurs de concentration en CO₂ dans les environnements intérieurs (Sépia-Santé, 2013)



Analyse des études épidémiologiques en vue de déterminer des valeurs de concentration en CO₂ dans les environnements intérieurs

Marie-Thérèse Guillam

Sylvie Martin

Dr Claire Ségala

RAPPORT FINAL

12 mars 2013

SEPIA-SANTE, S.A.R.L AU CAPITAL de 8 000 € - 31, rue de Pontivy - 56150 -BAUD -
SIRET : 441 029 139 00033 - CODE NAF : 7310 Z – TVA
intracommunautaire :FR57441029139

TELEPHONE : (33) 02-97-28-80-38 - TELECOPIE : (33) 02 97 28 81 10 –

E-Mail : sepia@sepia-sante.com SITE : www.sepia-sante.com

Glossaire

Δ	Différentiel
dCO ₂	Différentiel entre les concentrations intérieures et extérieures en CO ₂
DV	Ventilation par déplacement d'air
ECRHS	European Community Respiratory Health Survey (étude multicentrique sur les prévalences d'asthme et d'allergie dans 48 centres de 23 pays à travers le monde)
exp	expérimentale
HR	Humidité relative
LD	Limites de détection
Moy (ET)	Moyenne (écartype)
MV	Système mixte de ventilation
NR	Non renseigné
NS	Non significatif (statistiquement)
NS	Non significatif
OR	Odds ratio
QAI	Qualité de l'air intérieur
Quest	Questionnaire
RA	Renouvellement d'air
RLM	Régression logistique multivariée
S	Significatif
T°	Température
TCOV	Composés organiques volatiles totaux
TMB	1,2,4 triméthylbenzène (origine extérieure, source :trafic)
Transv	transversale
COV	Composés organiques volatiles

Sommaire

1	Contexte.....	66
2	Méthodes.....	67
2.1	Recherche bibliographique.....	67
2.2	Critères de sélection des articles.....	68
2.2.1	Rappel des critères de sélection des revues de littérature utilisées.....	68
2.2.2	Sélection des publications pour la présente revue de littérature.....	69
2.2.3	Grille d'analyse des études retenues.....	71
3	Résultats.....	72
3.1	Sélection des articles.....	72
3.1.1	Articles non retenus.....	72
3.1.2	Articles retenus.....	74
3.2	Etude de la relation CO₂ et effets.....	76
3.2.1	Immeubles de bureaux.....	76
3.2.2	écoles.....	83
3.2.3	logements.....	96
3.2.4	chambres expérimentales.....	98
3.3	Synthèse des résultats.....	100
4	Références.....	104
5	ANNEXE: Analyse des travaux retenus.....	108
5.1	Bureaux.....	109
5.1.1	Effets sanitaires: symptômes de type SBS.....	109
5.1.2	Perception de la qualité de l'air.....	119
5.1.3	Performance.....	121
5.2	Ecoles.....	123
5.2.1	Effets sanitaires.....	123
5.2.2	Perception de la Qualité de l'Air.....	135
5.2.3	Performance.....	141
5.3	Logements.....	144
5.3.1	Etude Transversale.....	144
5.3.2	Etude expérimentale.....	145
5.4	Chambre expérimentale.....	147
5.4.1	Perception / Performance.....	147

Tableaux

Tableau 2.1 : Articles non retenus car non concluants pour le groupe Euroven et/ou Sundell	70
Tableau 3.1 : Etudes non retenues	73
Tableau 3.2 : Répartition des travaux selon le lieu et l'effet étudiés	75
Tableau 3.3 : Symptômes et CO ₂ (immeubles de bureaux).....	77
Tableau 3.4 : Résumé des symptômes associés au CO ₂ dans les études montrant un lien significatif CO ₂ /symptômes.....	78
Tableau 3.5 : Effets sanitaires et concentrations en CO ₂ (Immeubles de bureaux)	78
Tableau 3.6 Perception et CO ₂ (immeubles de bureaux).....	81
Tableau 3.7 : Perception et concentration en CO ₂ (immeubles de bureaux).....	81
Tableau 3.8 : Performance et CO ₂ (immeubles de bureaux)	82
Tableau 3.9 : Symptômes et CO ₂ (écoles)	84
Tableau 3.10 : Résumé des symptômes associés au CO ₂ dans les études montrant un lien significatif CO ₂ /symptômes (écoles).....	86
Tableau 3.11 : Effets sanitaires et concentration en CO ₂ (écoles).....	87
Tableau 3.12 : Perception et CO ₂ (écoles).....	92
Tableau 3.13 : perception et concentrations en CO ₂ (écoles).....	94
Tableau 3.14 : Performance et CO ₂ (écoles)	95
Tableau 3.15 : Performance et concentration en CO ₂ (écoles).....	96
Tableau 3.16 : Effets sanitaires, perception et CO ₂ (logements)	97
Tableau 3.17 : Effets sanitaires, perception et concentration en CO ₂ (logements)	97
Tableau 3.18 : Perception et CO ₂ (chambre expérimentale)	98
Tableau 3.19 : Performance et CO ₂ (chambre expérimentale).....	98
Tableau 3.20 : Effets et concentrations en CO ₂ (chambre expérimentale).....	99

Figures

Figure 3-1 : Description de la sélection des publications	74
Figure 3-2 : Description du nombre d'effets étudiés par publication	74
Figure 3-3 : Description des travaux par lieu et par effet	75

1 Contexte

A l'intérieur des locaux, le dioxyde de carbone (CO_2), dont les occupants constituent la principale source, est considéré comme un « bon marqueur » des concentrations en bio-effluents dans l'air intérieur (odeurs par exemple). Les concentrations en CO_2 dépendent du nombre d'occupants, de la durée d'occupation, du taux de ventilation et du volume de la pièce. Le CO_2 a aussi été utilisé comme marqueur du taux de ventilation par occupant (la ventilation diluant ou éliminant les polluants).

Il est supposé que les concentrations des polluants à l'intérieur des locaux peuvent varier approximativement en proportion du CO_2 émis par les occupants. Ces polluants ont de nombreuses sources : les occupants, leurs activités, les matériaux de construction, les équipements etc. Les émissions varient considérablement selon les types de contaminants et selon les bâtiments, ces variations sont aussi temporelles et spatiales à l'intérieur d'un bâtiment.

De plus, l'air intérieur est également contaminé par des polluants d'origine extérieure (via la ventilation notamment). Enfin, des réactions physico-chimiques affectant la composition de l'air intérieur peuvent se produire entre les contaminants de l'air de source intérieure et ceux provenant de l'extérieur (ventilation), mais aussi entre l'air intérieur et le contenu du bâti (ex : émissions de matériaux de construction, ...).

Dans un certain nombre de pays, des recommandations ou des réglementations sur les concentrations intérieures limites en CO_2 ont été prises. Les plus nombreuses concernent les bâtiments scolaires et les immeubles de bureaux (Ribéron et al., 2011). En France, la concentration limite dans ces deux types de locaux est de 1000 ppm (RSDT, 1985). Le choix de 1000 ppm ne s'appuie pas sur des bases scientifiques très explicites, et reposerait sur des travaux anciens. Cette valeur peut varier globalement entre 1000 et 1500 ppm selon les pays. A quelques exceptions près, la durée d'exposition n'est pas précisée. A noter aussi qu'aux Etats-Unis, l'ASHRAE a proposé en 2007 une valeur de 700 ppm au-dessus du niveau extérieur (ASHRAE, 2007).

Depuis les années 1980, plusieurs études se sont intéressées aux liens entre les concentrations intérieures en CO_2 et le syndrome des bâtiments malsains (SBS). A noter qu'en l'état actuel des connaissances, aux concentrations habituellement mesurées dans les immeubles (350 à 2500 ppm), le CO_2 ne serait pas responsable par lui-même d'effets sanitaires. Rappelons qu'en milieu du travail, les recommandations sont de 5000 ppm sur la journée de travail et de 30 000 ppm sur une courte durée (ACGIH, 2011).

Le travail, réalisé à la demande de l'ANSES, a pour objectif d'analyser les études épidémiologiques disponibles dans la littérature en vue de déterminer des valeurs de concentration en CO_2 dans l'air intérieur, indicateurs d'effets sanitaires. Il a consisté à reprendre les travaux des revues de littérature sur le sujet et à les actualiser afin de répondre aux questions : le CO_2 est-il statistiquement associé à des effets sanitaires ou à d'autres effets (confort, performance) ? Et si oui, à quelles concentrations observe-t-on ces effets ?

2 Méthodes

2.1 Recherche bibliographique

Les publications analysées dans ce travail incluent toutes une mesure directe du CO₂ dans l'air intérieur. Elles ont été répertoriées à l'aide, d'une part des grandes revues de littérature et des travaux réalisés par le CSTB sur le thème, et d'autre part grâce à de nouvelles recherches bibliographiques ayant notamment permis d'identifier les publications les plus récentes.

Les grandes revues et les travaux utilisés sont les suivants :

- 1- Seppänen Oa, Fisk Wj & Mendell Mj (1999), *Association of ventilation rates and CO₂-concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings*, Indoor Air, 9, 226-252,
- 2- Wargocki P, Sundell J, Bischof W, Brundrett G, Fanger PO, Gyntelberg F, Hanssen SO, Harrison P, Pickering A, Seppänen O & Wouters P (2002), *Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN)*, Indoor Air, 12, 113-128,
- 3- Rapport du CSTB (avec la participation de SEPIA-santé) : « Impact de la ventilation sur la qualité de l'air intérieur (1) Etude des liens directs entre la ventilation et l'impact sanitaire sur les occupants (2004),
- 4- Sundell J. & Levin H. (2007), *Ventilation Rates and Health: Report of an Interdisciplinary Review of the Scientific Literature*, ASHRAE URP1443, Final report, 48 p. : (Revue publiée en 2011 dans Indoor Air : Sundell J., Levin H., Nazaroff W., Cain W. S., Fisk W., Grimsrud D., Gyntelberg F., Li Y., Persily A., Pickering A., Samet J., Spengler J., Taylor S., Weschler C. (2011), *Ventilation Rates and Health: multidisciplinary review of the scientific literature*, Indoor Air, 21, 191-204).

A noter que ces revues s'intéressaient en premier lieu aux relations santé-ventilation. Certaines publications citées dans ces travaux, mais pour lesquelles aucune mesure de concentration en CO₂ n'a été réalisée, n'ont donc pas été intégrées dans ce travail.

Les nouvelles recherches bibliographiques ont inclus d'une part les publications recensées dans le rapport du CSTB de 2011 (CSTB, 2011) et d'autre part les publications issues de recherches avec Pubmed et Google pour la période 2000 à 2012. Les mots clé, utilisés selon plusieurs combinaisons, sont les suivants :

- CO₂, carbon dioxide, indoor air,
- health, symptoms, sicking building, building related illness, disease
- building, office, school, home, dwelling, residence, house.

2.2 Critères de sélection des articles

2.2.1 Rappel des critères de sélection des revues de littérature utilisées

➤ Etudes incluses dans la revue de Seppänen

Les auteurs ne signalent à aucun moment le nombre total de publications identifiées, ni le nombre de publications écartées par rapport aux critères de sélection choisis. De plus, ils n'indiquent pas la période de recherche. Ils ont retenu 21 études traitant de la relation entre CO₂ et effets. A noter que seulement dix d'entre elles ont été publiées dans des journaux à comité de lecture. Ces études s'étagent entre 1986 et 1999.

Pour les études transversales, les critères d'exclusion des études ont été les suivants :

- CO₂ (ou taux de ventilation) mesuré dans moins de trois espaces/bâtiments,
- Absence d'analyse statistique (uniquement des résultats descriptifs),
- Non prise en compte des caractéristiques personnelles comme facteurs de confusion.

Pour les études expérimentales, ceux-ci étaient :

- les études de type « ici-ailleurs » ou « avant-après » sans groupe de comparaison,
- celle non réalisées à « l'aveugle »,
- l'absence d'analyse statistique.

➤ Etudes incluses dans la revue du groupe EUROVEN

La recherche bibliographique, ayant porté sur la période 1966 à 2000 (plus deux articles historiques datant de 1936 et 1955), a identifié plus de 105 articles publiés dans des revues à comité de lecture (dont peu étaient communs à la revue précédente de Seppänen). Ces publications ont été classées comme suit :

- 1- adéquation par rapport au sujet, bonne méthodologie et résultats concluants
- 2- adéquation par rapport au sujet, mais n'apporte pas d'informations suffisante sur l'exposition et/ou l'effet
- 3- adéquation par rapport au sujet, mais résultats non concluants (analyse des données insuffisante notamment)
- 4- articles généraux sur le sujet
- 5- non adéquation par rapport au sujet (ou études de cas)

Au final, seuls 30 articles ont été classés dans le premier groupe et retenues pour la synthèse, 13 d'entre eux présentent des mesures de CO₂. Les articles généraux sont présentés ainsi que ceux exclus car non informatifs, ou non concluants (avec le motif d'exclusion).

➤ Etudes incluses dans le rapport du CSTB (2004)

Cette actualisation de la recherche bibliographique jusqu'en 2004 avait permis de retenir quatre publications supplémentaires sur la thématique CO₂. Les auteurs ne précisent pas les critères de sélections des articles. Ces nouvelles publications étaient également présentes dans les travaux de Sundell et al. (2007) (cf. ci-dessous)

➤ Etudes incluses dans la revue de Sundell

Sundell et al. ont utilisé les articles cités par les revues de Seppänen, du groupe Euroven ainsi que par une revue antérieure (1993) de Mendell et al.. Une actualisation bibliographique a été menée parallèlement. Seules les publications issues de journaux à comité de lecture ont été jugées aptes à être analysées. Sur un total de 365 publications identifiées, seules 74 présentaient à la fois des données de santé et de ventilation. Elles ont été étudiées par un panel de scientifiques, sur la base du design d'étude, de la méthodologie, des procédures d'analyse, des méthodes de mesure des taux de ventilation et des effets sanitaires, de la prise en compte des potentiels facteurs de confusion, des résultats et conclusions. Sur cette base, les publications ont été classées de manière assez similaire à la classification d'Euroven :

- adéquation par rapport au sujet et résultats concluants
- adéquation par rapport au sujet, mais n'apporte pas d'informations suffisante sur l'exposition ou l'effet et/ou recueil ou analyse des données incomplets
- Preuves limitées, résultats non concluant mais qui suggèrent un lien ventilation/santé
- non adéquation par rapport au sujet (ou études de cas)

Vingt-sept publications ont été retenues (24 avec des résultats concluants, trois avec des preuves limitées), dont dix seulement présentent des mesures de CO₂.

2.2.2 Sélection des publications pour la présente revue de littérature

➤ Articles cités dans les revues

Onze des 21 travaux retenus par la revue de Seppänen n'ont pas été publiés dans des journaux à comité de lecture et, en accord avec les autres grandes revues, n'ont pas été retenus.

Une analyse croisée des articles retenus par les revues de Seppänen, Euroven et Sundell a été menée, soit un pool de 22 travaux. Les articles classés « non concluants » par les revues Euroven et/ou Sundell n'ont pas été retenus. Ils sont présentés dans le Tableau 2.1, tous (n=9) correspondent à des études transversales réalisées entre 1988 et 1997.

Tableau 2.1 : Articles non retenus car non concluants pour le groupe Euroven et/ou Sundell

SBS bureaux
Skov, P., Valbjørn, O. and Pedersen, B.V. (1990) Influence of indoor climate on the sick building syndrome in an office environment, <i>Scand. J. Work Environ. Health</i> , 16, 363–371.
Hill BA, Craft BF, Burkart JA (1992), <i>Carbon dioxide, particulates, and subjective human responses in office buildings without histories of indoor air quality problems</i> , <i>Applied Occupational Environmental Hygiene</i> , 72, 101-111.
Zweers, T., Preller, L., Brunekreef, B. and Boleij, J.S.M. (1992) Health and indoor complaints of 7043 office workers in 61 buildings in the Netherlands, <i>Indoor Air</i> , 2, 127–136.
Fisk, W.J., Mendell, M.J., Daisey, J.M., Faulkner, D., Hodgson, A.T., Nematollahi, M. and Macher, J.M. (1993) Phase 1 of the California healthy building study, <i>Indoor Air</i> , 4, 246–254.
Nelson NA, Kaufman JD, Burt J, Karr C (1995), <i>Health symptoms and the work environment in four non-problem United States office buildings</i> , <i>Scandinavian Journal on Work Environment and Health</i> , 21, 51-59.
PAQ bureaux
Fanger, P.O., Lauridsen, J., Bluysen, P. and Clausen, G. (1988) Air pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit, <i>Energy and Buildings</i> , 12, 7–19
Hedge A, Erickson WA, Rubin G (1995), <i>Individual and occupational correlates of the sick building syndrome</i> , <i>Indoor Air</i> , 5, 10-21.
Bluysen P, de Oliveira Fernandes E, Groes L, Clausen G, Fanger PO, Valbjørn O Bernhard CA & Roulet CA (1996), <i>European indoor air quality audit project in 56 office buildings</i> , <i>Indoor Air</i> , 6, 221-238.
PAQ écoles
Smedje G, Norbäck D & Edling C (1997), <i>Subjective indoor air quality in schools in relation to exposure</i> , <i>Indoor Air</i> , 7, 143–150.

Les articles concluants (n=13) ont été soumis à la procédure de sélection décrite ci-dessous.

➤ Critères de sélection des articles

Les publications issues des revues et de l'actualisation bibliographique par SEPIA-Santé ont fait l'objet d'une démarche de sélection. Celle-ci porte à la fois sur la pertinence des études pour la problématique CO₂-effets et la validité des études. Les publications ont été classées en quatre groupes :

- Groupe 1 : non adéquation par rapport au sujet (ou études de cas)
- Groupe 2 : articles exclus du fait d'insuffisances :
 - o critères d'exclusion:
 - données de CO₂ insuffisantes ou CO₂ non étudié en tant que variable explicative des modèles
 - effet chez l'homme non étudié
 - analyses statistiques insuffisantes
- Groupe 3 : adéquation par rapport au sujet, bonne méthodologie et résultats concluants

2.2.3 Grille d'analyse des études retenues

Une grille d'analyse a été réalisée permettant de visualiser de façon standardisée, les principaux items permettant de décrire chacun des travaux. Si un article s'intéresse à plusieurs types d'effet, une grille a été réalisée pour chacun des effets (santé, perception ou performance). Sont présentés dans cette grille :

- Le premier auteur, l'année de publication et le pays,
- Les bâtiments, la population d'étude, l'année d'étude,
- Les conditions expérimentales (si étude expérimentale)
- Le type d'effets mesurés
- La méthode de recueil des effets,
- Le CO₂ (méthode et concentration)
- Les autres polluants mesurés et la ventilation le cas échéant
- Les méthodes statistiques (pour la relation CO₂/effet),
- Les principaux résultats obtenus,
- Une analyse critique de l'étude (conclusion, intérêt et limites).

Dans les grilles les études sont classées par lieu (bureaux, écoles, logements, chambre expérimentale), par type d'effet (effets sanitaires, perceptions de la qualité de l'air, performance) et par type d'étude.

Plusieurs types d'étude sont en effet employés sur cette problématique :

- Les études observationnelles
 - o Ecologiques,
 - o Transversales,
 - o Longitudinales (soit des transversales répétées, soit des études de panel),
- Les études quasi-expérimentales,
- Les études expérimentales.

Rappelons qu'il est classiquement admis que la capacité à montrer que les associations mises en évidence en épidémiologie sont de nature causale, est meilleure dans les études expérimentales (et quasi-expérimentales) que dans les études d'observation et parmi ces dernières, cette capacité est meilleure dans les études de cohorte que dans les études cas-témoins et plus faible dans les études transversales. Notons cependant que dans la problématique CO₂-effets chez l'homme, aucune étude de type cohorte, ni cas-témoins n'a été identifiée, et que d'autres critères de validité des études sont à prendre en compte (voir les limites des études présentées dans l'annexe).

3 Résultats

3.1 Sélection des articles

Le travail de sélection a porté sur 40 publications, 13 articles provenant des revues de littérature et 27 nouveaux articles identifiés via l'actualisation bibliographique.

3.1.1 Articles non retenus

Les articles non retenus sont présentés dans le Tableau 3.1. Ils sont au nombre de dix. Dans sept d'entre eux, les liens entre CO₂ et effets ne sont pas étudiés, les trois autres présentent seulement des résultats descriptifs ou des données/analyses insuffisantes pour exploiter les résultats vis à vis des concentrations en CO₂. Les références de ces articles non retenus sont présentées dans le chapitre Références.

Tableau 3.1 : Etudes non retenues

Etude	Type d'étude		Résultats	lien CO2/effet	Motif d'exclusion	source
SBS bureaux						
Milton, 2000 (USA)	transv*	Etude des arrêts maladies chez 3720 employés de 40 bâtiments de bureaux dont certains espaces de travail sont ventilés	SBS plus élevé dans les espaces les moins ventilés	pas étudié	Gr 3. CO ₂ n'est pas étudié en tant que variable explicative des effets	Euroven/Sundell
Myatt, 2004 (UK)	transv	Etude du rhinovirus dans l'air d'immeuble de bureaux	association entre probabilité de détection du virus et niveaux de CO ₂	pas étudié	Gr1. pas de recueil d'effets sanitaires	Sundell
Gupta, 2007 (Inde)	transv	Etude du SBS dans un immeuble situé à l'aéroport de Delhi	corrélation entre CO ₂ et SBS	(+)	Gr3. analyses insuffisantes (descriptives)	Nouveau
Jaakkola, 1991a,b (Finlande)	transv + exp*	Etude du SBS chez 968 employés exposés à différents niveaux de ventilation dans 1 immeuble de bureaux	pas de lien significatif entre SBS et ventilation	pas étudié	Gr 3. CO ₂ n'est pas étudié en tant que variable explicative des effets	Euroven
Lu, 2007 (Taiwan)	transv	Etude des liens entre un biomarqueur du stress oxydatif chez les employés de 8 immeubles de bureaux et d'une part le SBS et d'autre part l'air intérieur	association significative du 8 OHdG avec des symptômes SBS	pas étudié	Gr 3. CO ₂ n'est pas étudié en tant que variable explicative des effets dans les modèles multivariés	Nouveau
Performance bureaux						
Wiik, 2011 (Norvège)	transv	Développement d'un indice de productivité à partir de données recueillies chez des employés de 7 immeubles de bureaux	Développement d'un index de productivité	pas étudié	Gr 3. CO ₂ n'est pas étudié en tant que variable explicative des effets.	Nouveau
SBS écoles						
Madureira, 2011 (Portugal)	transv	Etude de l'impact de la QAI dans des écoles portugaise et la prévalence de SBS chez les enseignants	corrélation entre CO ₂ et SBS, corrélation aussi entre COV et SBS	(+)	Gr3. analyses insuffisantes (descriptives)	Nouveau
Performance école						
Shaughnessy, 2006 (USA)	transv	Etude des associations entre les niveaux de ventilation et la performance dans 54 écoles	associations entre ventilation et performance à la limite de la significativité	pas étudié	Gr 3. CO ₂ n'est pas étudié en tant que variable explicative des effets (concentrations non fournies par ailleurs)	Nouveau
Haverinen-Shaughnessy, 2011 (USA)	transv	Etude des associations entre les niveaux de ventilation et la performance dans 100 écoles	associations significatives entre ventilation et performance	pas étudié	Gr 3. CO ₂ n'est pas étudié en tant que variable explicative des effets	Nouveau
Bakó-Biró, 2012 (UK)	exp	Etude de la performance chez des élèves de 8 écoles après introduction de systèmes mobiles de ventilation avec apport d'air extérieur ou recirculation d'air	lien significatif entre niveau de ventilation et performance.	(+)	Gr.3 Information insuffisantes sur les niveaux précis de CO ₂ dans les salles	Nouveau

* transv : transversale ; exp : expérimentale

3.1.2 Articles retenus

Trente articles ont au final été retenus pour l'étude des liens entre CO₂ et effets sanitaires, perception et performance (Figure 3-1).

Parmi eux, cinq articles étudient deux types d'effets (santé et perception de la qualité de l'air), quatre autres trois types (santé, perception de la qualité de l'air, et performance) (Figure 3-2). Au total, 43 travaux ont donc été étudiés (grilles d'analyse présentées en annexe 1).

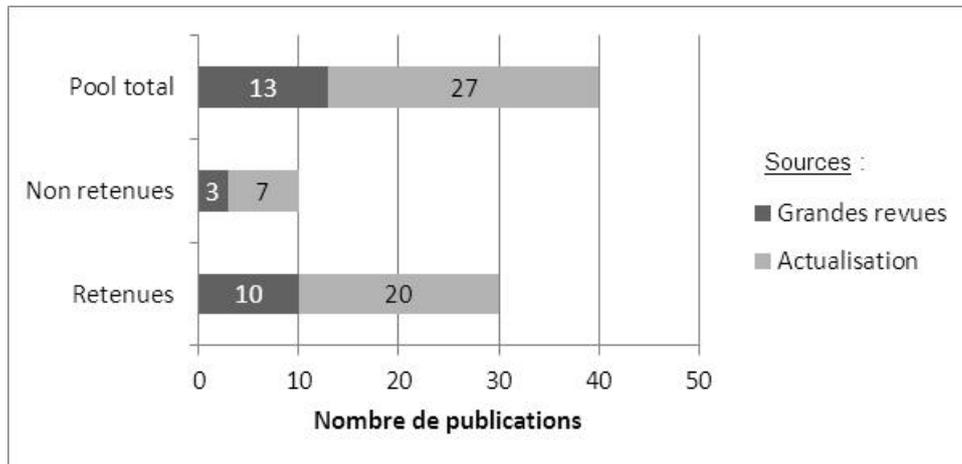


Figure 3-1 : Description de la sélection des publications

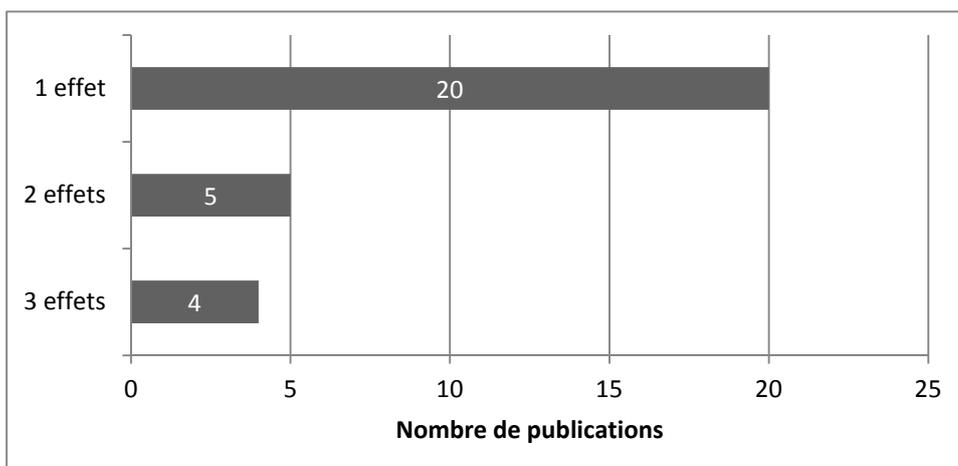


Figure 3-2 : Description du nombre d'effets étudiés par publication

Le nombre de travaux par lieu et par type d'effet est présenté dans le Tableau 3.2 et dans la Figure 3-3. Les références des articles retenus sont présentées dans le chapitre Références.

Tableau 3.2 : Répartition des travaux selon le lieu et l'effet étudiés

	Santé	Perception de la qualité de l'air	Performance
Bureaux	10	2	2
Ecoles	13	7	3
Logements	2	1	0
Chambres expérimentales	0	1	2
Total	25	11	7

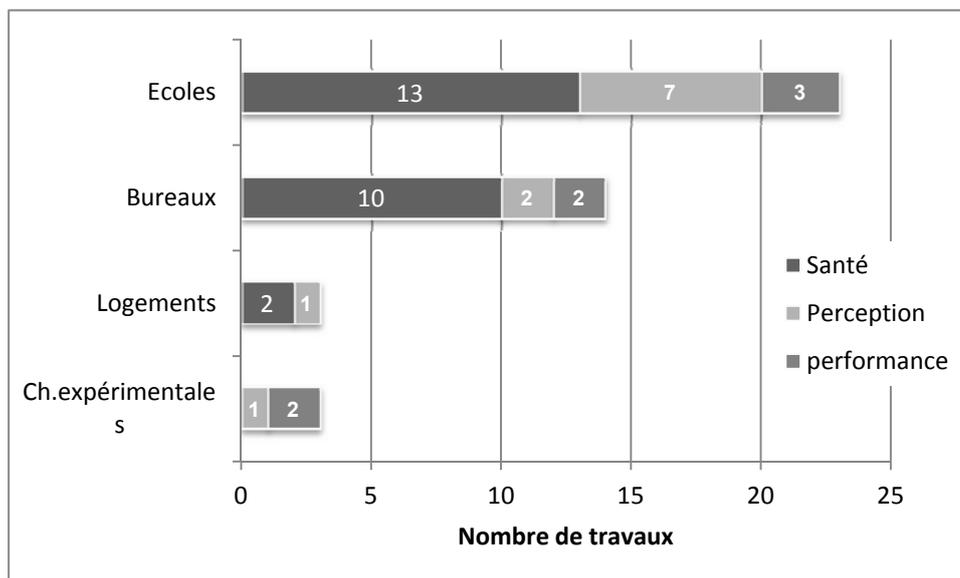


Figure 3-3 : Description des travaux par lieu et par effet

La majorité des travaux concernent les écoles (n=23), viennent ensuite les bureaux (n=14). Les logements et les chambres expérimentales ont fait, chacun, l'objet de trois travaux.

3.2 Etude de la relation CO₂ et effets

3.2.1 Immeubles de bureaux

3.2.1.1 Relation CO₂ et effets sanitaires

3.2.1.1.1 *Le CO₂ est-il associé à des effets sanitaires ?*

10 publications ont été retenues : cinq études transversales, deux études longitudinales et trois études expérimentales.

Les publications s'intéressant aux relations entre le CO₂ et la santé dans les immeubles de bureaux se sont focalisés sur les symptômes liés au syndrome des bâtiments malsains. Ceux-ci peuvent regrouper des irritations des muqueuses, des irritations de la peau, des atteintes des voies respiratoires supérieures, des atteintes des voies respiratoires inférieures et des symptômes généraux (encore appelés non spécifiques). Les symptômes pris individuellement ou des regroupements de symptômes sont les variables « à expliquer » des modèles. Néanmoins, la liste des symptômes varie d'un auteur à l'autre ainsi que les indicateurs choisis pour faire état de ce syndrome. Cinq des dix publications utilisent le questionnaire de l'étude BASE, soit une liste de symptômes survenant au moins 1 jour par semaine lors du dernier mois et s'améliorant quand la personne n'est pas dans le bâtiment (Apte, 2000 et 2008 ; Erdmann 2004 ; Tiejn 2012 ; Chao 2003). Un auteur (Marmot) interroge sur dix symptômes, sans notion d'amélioration hors bâtiment, et analyse uniquement le nombre de symptômes. La publication de Taiwan utilise le questionnaire NIOSH (proche de celui de l'étude BASE (Tsai, 2012).

Les trois études expérimentales s'intéressent aux mêmes types de symptômes, mais survenus lors de la semaine correspondant à la condition expérimentale (et donc sans notion que ces symptômes s'améliorent lorsque la personne ne travaille pas). L'étude canadienne (Menziez, 1993) analyse la présence d'un moins un symptôme ou d'un groupe de symptômes (à deux niveaux de ventilation) et le dernier auteur (deux études expérimentales, Wargocki 2000 (tests de trois niveaux de ventilation) et 2004 (tests de deux niveaux de ventilation en combinaison avec un filtre neuf ou usagé)) fait évaluer les symptômes sur des échelles analogiques visuelles (de 0 à 100).

Notons de plus que la plupart des symptômes liés au SBS sont peu spécifiques et que les différentes dénominations des regroupements de symptômes peuvent se recouper : ainsi les symptômes des voies respiratoires supérieures peuvent être liés à des irritations des muqueuses, mais aussi à des viroses (viroses dont la circulation entre personnes est susceptible d'être favorisée par les situations de confinement) ; de même les atteintes oculaires peuvent être de simples irritations, mais également être liées à des phénomènes allergiques.

Le Tableau 3.3 récapitule pour chaque étude les types de symptômes étudiés et leurs liens avec le CO₂. A noter, comme cela vient d'être signalé, que selon les publications, les symptômes affectant le nez, les sinus ou la gorge, et les éternuements sont tantôt classés en symptômes d'irritations des muqueuses, tantôt en symptômes des voies respiratoires supérieures (les irritations des yeux étant toujours classées en irritations des muqueuses). Les résultats présentés ne permettent pas systématiquement d'isoler spécifiquement les symptômes d'irritation des yeux, des autres symptômes.

Dans les tableaux suivants, le « grisé » signale les études les plus faibles sur le plan méthodologique, tel que cela est explicité dans les tableaux présentés en annexe 1.

Tableau 3.3 : Symptômes et CO₂ (immeubles de bureaux)

	Irritations muqueuses	Voies respiratoires supérieures	Voies respiratoires inférieures	Irritations cutanés	Symptômes généraux	Remarques
Marmot, 2006	-	-	-	-	-	Nombre de symptômes : NS
Apte, 2000 (BASE)	S	S	S	NS	NS	
Erdmann, 2004 (BASE)	S	S	S	NS	NS	
Apte, 2008, (BASE)	S	S (1)	S (1)	NS	NS	(1) NS après ajustement sur O3 extérieur
Tiejn, 2012 (BASE)	-	-	-	-	S	
Chao, 2003	NS (yeux)	S (2)	-	-	NS	(2) NS après ajustement sur propreté, nb personnes et charge travail
Tsai, 2012	S (yeux)	S	NS	NS	S	
Menzies, 1993	NS	NS	-	-	NS	
Wargocki, 2000	S	-	-	NS	S	
Wargocki, 2004	S	-	-	NS	S	

S : lien statistiquement significatif, NS : lien statistiquement non significatif, - : non étudié

Deux études sont négatives, ne montrant pas de lien significatif entre le CO₂ et les symptômes de type SBS : une étude transversale réalisée en Grande Bretagne (Marmot, 2006) et une étude expérimentale canadienne (Menzies, 1993). Dans la première, les auteurs ne font que contraster le nombre de symptômes entre des immeubles catégorisés sur le niveau moyen de CO₂ (± 500 ppm) (à noter que cette étude montre un lien entre symptômes et l'environnement psycho-social du travail). Dans la seconde, l'alternance de deux niveaux de ventilation (14 vs. 30 L/s/pers) avec un apport d'air extérieur respectivement de 7 et 32 % (le reste étant constitué d'air re-circulé) entraîne un différentiel faible de CO₂ de 186 ppm.

Quatre études analysent les mêmes données de l'étude BASE (soit 100 bâtiments représentatifs du parc américain d'immeubles de bureau). La première, utilisant les données sur les premiers 41 bâtiments inclus dans l'échantillon, montre un lien significatif entre plusieurs symptômes et le CO₂ (Apte, 2000), résultat que la deuxième étude confirme sur les données complètes après des ajustements supplémentaires sur les populations sensibles, le chauffage et la climatisation, la sensibilité individuelle au tabac et aux produits chimiques (Erdmann, 2004). Les résultats de la troisième étude vont dans le même sens, même s'il apparaît qu'après ajustement sur l'ozone dans l'air extérieur (mesuré par les stations de mesure urbaines), seuls les symptômes de voies respiratoires supérieures restent significativement liés au CO₂ (Apte, 2008). La quatrième étude s'intéresse aux symptômes de type maux de tête et migraine et retrouve leurs liens avec les niveaux de CO₂ (Tiejn, 2012).

L'étude longitudinale américaine (utilisant le questionnaire BASE) met en évidence des relations entre les symptômes des voies respiratoires supérieures et le CO₂ après ajustement sur la période, les moisissures et l'asthme (résultat à la limite de la significativité), relation qui devient non significative après ajustement sur le nombre de personnes par bureau, la propreté du bureau et la charge de travail (Chao, 2003).

L'étude taiwanaise est réalisée à un seul étage d'un immeuble, la comparaison des deux saisons met en évidence une fréquence plus importante d'irritations des yeux, de symptômes de voies respiratoires supérieures et de symptômes généraux durant la saison où le CO₂ est plus élevé, mais aucun ajustement n'est mis en œuvre (Tsai, 2012).

Les deux études expérimentales danoises montrent un lien entre CO₂ et scores quantitatifs de symptômes de type irritations des muqueuses et cutané notamment (Wargocki, 2000 et 2004).

Tableau 3.4 : Résumé des symptômes associés au CO₂ dans les études montrant un lien significatif CO₂/symptômes

	Irritations muqueuses	Voies respiratoires supérieures	Voies respiratoires inférieures	Irritations cutanées	Symptômes généraux
Nombre d'études	8	6	4	6	9
Nombre de résultats significatif	6	5	3	0	4

Au final, sur les dix études retenues, huit montrent un lien significatif entre CO₂ et au moins un groupe de symptômes de type SBS. Les symptômes les plus souvent en cause sont les irritations des muqueuses et/ou les symptômes des voies respiratoires supérieures, puis viennent les symptômes généraux et ceux touchant les voies respiratoires inférieures. A noter qu'aucun lien n'est observé entre le CO₂ et des affections cutanées, la sécheresse de la peau étant l'affection cutanée la plus souvent renseignée.

3.2.1.1.2 A quelle concentration, observe-t-on des effets sanitaires ?

Les auteurs utilisent des indicateurs différents pour le CO₂ : soit la valeur du CO₂, soit le différentiel de concentrations (dCO₂) entre intérieur et extérieur (dans les études BASE et les travaux de Wargocki).

Tableau 3.5 : Effets sanitaires et concentrations en CO₂ (Immeubles de bureaux)

	Indicateur CO ₂	Durée mesure	CO ₂ min	CO ₂ max	CO ₂ moy	Résumé des résultats
Marmot, 2006	2 classes de CO ₂ : < 500 vs. > 500 ppm	1 journée	NR	NR	NR	Moins de symptômes dans les 4 bâtiments > 500 ppm (NS)
Apte, 2000	dCO ₂	9 h	+6	+418	+140	OR (S) de 1,1 à 1,5 selon symptômes pour ↗ 100 ppm Test de tendance significatif
Erdmann, 2004	dCO ₂	9 h	+4	+610	+260	OR (S) de 1,08 et 1,23 pour ↗ 100 ppm (OR supérieurs chez populations sensibles) Test de tendance significatif
Apte, 2008,	dCO ₂	9 h	+4	+610	+260	OR (S) = 1,08 pour ↗ 100 ppm
Tiejien, 2012	2 classes de dCO ₂ : < 260 vs. >260 ppm	9 h	+4	+610	+260	OR (S) de 1,1 à 1,3 dans bâtiments > 260 vs. <260 ppm
Chao, 2003	CO ₂	8 h	379	1344	689	OR (S) = 1,45 pour ↗ 1 inter-quartile (valeur non précisée)
Tsai, 2012	2 classes de CO ₂ : Eté : Hiver :	9 h	375 658	484 959	431 876	OR (S) = 1,7 pour hiver vs été
Menzies, 1993	2 classes ventilation : 30 L/s/p (CO ₂ → 14L/s/p (CO ₂ →	NR			621 807	OR proches de 1 (NS)
Wargocki, 2000	3 classes ventilation : 3 L/s/p (dCO ₂ → 10 L/s/p (dCO ₂ → 30 L/s/p (dCO ₂ →	En continu (moyenne dernière heure)			1266 477 195	Test de tendance significatif entre les 3 niveaux
Wargocki, 2004	4 conditions (niveau ventilation + type filtre) 2,5 L/s/p + filtre usagé (dCO ₂ → 25 L/s/p + filtre usagé (dCO ₂ → 2,5 L/s/p + filtre neuf (dCO ₂ → 25 L/s/p + filtre neuf (dCO ₂ →	En continu (moyenne dernière heure)			721 231 830 223	↘ significative lors passage à forte ventilation

NR : non renseigné

Trois études apportent peu d'information et sont faibles sur le plan méthodologique (en grisé dans les tableaux). Leurs résultats ne seront pas commentés dans la suite de ce rapport. L'étude transversale de Marmot, 2006 a plusieurs limitations dont le fait de contraster les effets entre seulement deux niveaux de CO₂ avec seulement quatre bâtiments > 500 ppm et d'analyser non les symptômes pris individuellement, mais le nombre de symptômes. Dans l'étude longitudinale de Tsai (2012), il n'y a eu qu'un seul point de mesure pour tout l'étage et le design de l'étude n'est pas exploité, avec une simple comparaison entre deux saisons. Enfin, l'étude de Wargocki (2004) mélange deux interventions, le débit de ventilation et la qualité du filtre et apporte ainsi peu d'éléments.

Certains travaux sur les bureaux sont confrontés à la structure hiérarchique des données, c'est-à-dire au fait que les données ne sont pas indépendantes, les employés d'un immeuble étant potentiellement plus proches des employés du même immeuble, que les employés d'autres immeubles. Seule la publication de Marmot en tient compte.

Dans les publications, en fonction des types d'étude et en fonction des analyses réalisées, les résultats sont présentés de différentes manières :

- **Comparaison des effets sanitaires entre deux niveaux de CO₂** (une étude transversale : Tiejien 2012 ; une étude expérimentale : Menzies 1993). Dans la première le CO₂ est catégorisé de part et d'autre de la moyenne de l'ensemble des bâtiments, dans la seconde les conditions de ventilation (correspondant à 612 et 807 ppm) sont contrastées.
- Etude de la **relation dose-réponse** entre les niveaux de CO₂ et les effets sanitaires :
 - o **Relation exprimée sous forme d'Odds Ratio (OR) pour une augmentation de 100 ppm (le plus souvent)**. En cas d'introduction du CO₂ sous forme continue, les auteurs font l'hypothèse d'une relation linéaire entre l'effet et le niveau de CO₂. Il s'agit de trois études transversales : Apte 2000, Erdmann 2004 et Apte 2008; une étude longitudinale : Chao (2003). A noter qu'aucun auteur ne teste l'existence d'une relation non linéaire, ni l'existence d'un effet seuil à l'aide de modèles adaptés type GAM, avec introduction de fonctions « spline ». Un auteur pourtant a utilisé ce type de modèle et a ainsi mis en évidence un seuil de CO₂ (dCO₂=100 ppm) au-delà duquel il existe une relation entre présence virale et concentration de CO₂ (Myatt et al. 2004).
 - o **Réalisation d'un test de tendance**, en introduisant par exemple dans le modèle une variable CO₂ en classes (avec des niveaux croissants de CO₂) de façon continue (Apte 2000, Erdmann 2004) (ce qui permet d'obtenir un OR dans chacune des classes de CO₂, le test permettant de dire si les OR sont bien croissants en fonction des classes croissantes de CO₂), et dans le cadre d'une étude expérimentale en testant avec un modèle adapté si la relation effet-CO₂ croit dans des classes croissantes de ventilation (Wargocki 2000). Dans ces travaux, il n'est pas dit que la relation est linéaire, seulement qu'elle croit de façon monotone.

Etudes comparant l'effet sanitaire entre deux niveaux de CO₂

La ré-analyse des données de l'étude BASE sur les seuls effets migraine et maux de tête (Tiejien, 2012) ne prend pas en compte les variables d'ajustement utilisées dans les études précédentes (populations sensibles, autres variables environnementales telle que l'ozone). Néanmoins, en contrastant les bâtiments selon le niveau moyen de CO₂ de l'ensemble, elle montre une augmentation significative de ce type de symptômes (OR entre 1,08 et 1,33) dans les bâtiments ayant des niveaux de dCO₂ supérieur à 260 ppm comparés à des bâtiments ayant des niveaux inférieurs à 260 ppm, alors que ce type de symptômes n'était pas lié significativement à la concentration en CO₂ (introduite de façon continue et après ajustement sur plusieurs facteurs de confusion potentiels) dans les études BASE précédentes.

L'étude expérimentale de Menzies (2003) ne montre pas d'augmentation des symptômes de type SBS entre les deux débits de ventilation (14 L/s/p vs. 30 L/s/p). A noter que le différentiel de ventilation ne conduit qu'à un contraste minime de 186 ppm (soit 621 vs 807 ppm) en CO₂. Une hypothèse est que ce différentiel serait trop faible pour observer une baisse significative des symptômes chez des employés exposés en alternance à ces deux conditions. De plus, la ventilation est opérée principalement via un apport d'air re-circulé.

Etudes exprimant les relations sous forme d'OR

Dans les études BASE, les OR significatifs sont compris entre 1,1 et 1,5 pour une augmentation de 100 ppm de différence entre CO₂ intérieur et CO₂ extérieur. A noter que les OR dans les populations sensibles (atteintes d'asthme et/ou d'allergie et/ou de sensibilité chimique) sont nettement supérieurs (de 1,5 à 11,1 selon les symptômes, la précision de ces résultats (cf. intervalles de confiance) est cependant moindre du fait du nombre plus restreint de sujets (Erdmann 2004). La deuxième étude d'Apte montre qu'après ajustement sur l'Ozone, les relations entre symptômes de type SBS et dCO₂ sont non significatives, à part pour les symptômes des voies respiratoires supérieures qui restent significatifs. Dans ce modèle, l'ozone extérieur, ajusté sur le dCO₂, est lié aux différents symptômes, mais les auteurs ne disposent pas de mesures d'ozone à l'intérieur des locaux (seulement les données des stations urbaines) alors qu'il est connu que la corrélation entre l'ozone extérieur et l'ozone intérieur est faible.

Sachant que les concentrations maximales en dCO₂ correspondent à peu près au niveau réglementaire de l'ASHRAE (700 ppm au-dessus des niveaux extérieurs), les auteurs concluent que les taux de renouvellement d'air neuf doivent être augmentés et les sources de pollution réduites pour baisser le CO₂ intérieur à un niveau proche de celui extérieur afin de réduire les prévalences de SBS.

L'étude de Chao exprime ses résultats vis-à-vis du CO₂ intérieur sans tenir compte du CO₂ extérieur et l'OR pour les symptômes des voies respiratoires supérieures est de 1,5 pour une augmentation d'un inter-quartile (cette valeur n'étant pas précisée dans le texte, en sachant toutefois que la moyenne est de 689 ppm (379-1344), après ajustement pour les populations sensibles (asthmatiques). Notons toutefois, que cette relation n'est pas retrouvée après ajustement sur le nombre de personnes, la propreté et la charge de travail (on peut remarquer que tenir compte du nombre de personnes est potentiellement un surajustement, le CO₂ étant fortement lié au nombre de personnes).

Etudes exprimant des tests de tendance

Ces tests de tendance ont été réalisés dans trois publications seulement : les deux premières publications de l'étude BASE (Apte, 2000 et Erdmann, 2004) et l'étude expérimentale de Wargocki, 2000.

Pour les études BASE, plusieurs tests de tendance sont significatifs, cependant les graphiques ne montrent pas une progression nette des OR dans les classes croissantes de dCO₂. Les valeurs des OR ne sont pas rapportées dans les publications. L'augmentation est surtout nette pour les concentrations les plus fortes : d'après les graphiques, le seul OR significatif est celui contrastant le dernier décile de dCO₂ (> 300 ppm pour Apte en 2000, et > 444 ppm pour Erdmann en 2004) au premier décile.

L'étude expérimentale de Wargocki (2000) se passe dans un espace de bureau dédié qui s'apparente plus à une chambre expérimentale et la population est volontaire et rétribuée pour sa participation. Une augmentation monotone de certains symptômes (sécheresse de la gorge et de la bouche) est observée pour des niveaux de ventilation décroissants (30, 10 et 3 L/s/pers). En termes de dCO₂, cela signifie qu'entre 195, 477 et 1266 ppm au-dessus du niveau extérieur, la sécheresse de la gorge et de la bouche augmentent.

3.2.1.2 Relation CO₂-perception de la qualité de l'air3.2.1.2.1 *Le CO₂ est-il associé à des effets sur la perception ?*

La perception de la qualité de l'air a été traitée dans les deux articles de Wargocki, 2000 et 2004, présentés précédemment. Dans les deux études, ont été étudiés avec les mêmes instruments dans un contexte expérimental : l'acceptabilité de la qualité de l'air, la perception d'humidité, de fraîcheur, de luminosité, de bruit et de propreté, et la perception des odeurs et du confort thermique.

Le niveau de ventilation (CO₂) est associée significativement à certaines des perceptions, mais celles-ci diffèrent entre les deux études : acceptabilité de la qualité de l'air, fraîcheur de l'air et perception des odeurs uniquement à l'entrée dans la pièce (Wargocki, 2000) et luminosité, propreté et confort thermique (Wargocki, 2004).

Tableau 3.6 Perception et CO₂ (immeubles de bureaux)

	Acceptabilité	Humidité	Fraicheur	Luminosité	Bruit	Propreté	Odeurs	Confort thermique
Wargocki, 2000	NS (S à l'entrée dans la salle)	NS	NS (S à l'entrée dans la salle)	NS	NS	NS	NS (S à l'entrée)	NS
Wargocki, 2004	NS	NS	NS	S	NS	S	NS	S

S : lien statistiquement significatif, NS : lien statistiquement non significatif, - : non étudié

3.2.1.2.2 *A quelle concentration, observe-t-on des effets sur la perception ?***Tableau 3.7 : Perception et concentration en CO₂ (immeubles de bureaux)**

Etude	CO ₂			Résumé des résultats
	Indicateur	Durée	moy	
Wargocki, 2000	dCO ₂ par niveau ventilation 3 L/s/pers 10 L/s/pers 30 L/s/pers	En continu (moyenne dernière heure)	1266 477 195	Test de tendance significatif entre les 3 niveaux (perceptions à l'entrée)
Wargocki, 2004	dCO ₂ par niveau ventilation + filtre 2,5 L/s/pers + usagé 25 L/s/pers + usagé 2,5 L/s/pers + neuf 25 L/s/pers + neuf	En continu (moyenne dernière heure)	721 231 830 223	↗ ventilation conduit à amélioration significative de luminosité et de propreté (avec filtre neuf) et du confort thermique (quel que soit le filtre). Pas de relation avec satisfaction qualité de l'air

Dans la première étude expérimentale (Wargocki, 2000), l'acceptabilité de la qualité de l'air, la fraîcheur et une moindre perception des odeurs augmentent significativement avec le niveau de ventilation, mais uniquement lors de l'entrée dans la salle (elles ne peuvent donc pas être liées aux concentrations de CO₂ mesurées sur la durée de l'expérience). En cours d'expérience, aucune différence de perception n'est observée entre les niveaux de ventilation (soit en termes de dCO₂ : 195, 477 et 1266 ppm). Rappelons que la deuxième étude de Wargocki, 2004 mélangeant deux interventions (débit de ventilation et qualité du filtre) a été jugée peu informative vis-à-vis des concentrations en CO₂.

3.2.1.3 Relation CO₂-performance

3.2.1.3.1 *Le CO₂ est-il associé à des effets sur la performance ?*

Les études expérimentales sur les conditions de ventilation de Wargocki (2000 et 2004) cités précédemment pour les effets sanitaires et la perception de la qualité de l'air ont également étudié la performance. Celle-ci a été étudiée via différents tests :

- saisie de texte, additions, corrections d'épreuves et test d'imagination chez des volontaires en 2000
- analyse du temps de parole chez des opérateurs d'un centre d'appel en 2004.

Dans la première étude, le niveau de ventilation est lié significativement au test de saisie et aux tâches d'imagination. La relation avec les deux autres tests (additions et corrections d'épreuves) va dans le même sens, mais est non significative. Dans la deuxième étude, en présence d'un filtre neuf, l'augmentation de la ventilation améliore significativement la performance (et l'effet inverse se produit en présence d'un filtre usagé),

Tableau 3.8 : Performance et CO₂ (immeubles de bureaux)

	Saisie texte	Additions	Corrections épreuves	Test imagination	Temps de parole
Wargocki, 2000	S	NS	NS	S	-
Wargocki, 2004	-	-	-	-	S (si filtre neuf)

S : lien statistiquement significatif, NS : lien statistiquement non significatif, - : non étudié

3.2.1.3.2 *A quelle concentration, observe-t-on des effets sur la performance*

Etude	CO ₂ *			Résumé des résultats
	Indicateur	Durée	moy	
Wargocki, 2000	dCO ₂ par niveau ventilation 3 L/s/pers 10 L/s/pers 30 L/s/pers	En continu (moyenne dernière heure)	1266 477 195	Test de tendance significatif entre les 3 niveaux (test de saisie)
Wargocki, 2004	dCO ₂ par niveau ventilation + filtre 2,5 L/s/pers + usagé 25 L/s/pers + usagé 2,5 L/s/pers + neuf 25 L/s/pers + neuf	En continu (moyenne dernière heure)	721 231 830 223	Si filtre neuf, amélioration performance avec la hausse de ventilation (effet inverse si filtre usagé)

*Mesuré en continu (moyenne sur la dernière heure)

Dans la première étude (Wargocki, 2000), la performance (test de saisie) augmente significativement avec la baisse des niveaux de CO₂, et les résultats vont dans le même sens pour les tests d'addition et de correction. En revanche, le test d'imagination ne s'améliore qu'entre 3 et 10 L/s, soit 1266 et 477 ppm, et pas au-delà (30L/s, soit 195 ppm). Rappelons que la deuxième étude de Wargocki, 2004 mélangeant deux interventions (débit de ventilation et qualité du filtre) a été jugée peu informative vis-à-vis des concentrations en CO₂.

3.2.2 écoles

3.2.2.1 Relation CO₂ - effets sanitaires ?

3.2.2.1.1 *Le CO₂ est-il associé à des effets sanitaires ?*

Treize travaux traitant d'effets sanitaires dans les écoles ont été retenus, avec des designs d'étude divers : une étude écologique, quatre études transversales, une étude longitudinale, une étude quasi-expérimentale et six études expérimentales. Les populations étudiées sont toutes des élèves, à l'exception de deux études expérimentales, où il s'agit d'étudiants dans des salles informatiques). De plus des adultes viennent renseigner un questionnaire de perception dans une des études portant sur des enfants.

Les types d'effets sanitaires traités dans ces publications sont présentés dans le Tableau 3.9.

Contrairement aux études dans les bureaux, toutes les études transversales réalisées dans les écoles s'intéressent aux symptômes respiratoires liés à l'asthme (plus la rhinite, dans 2 études, et les éruptions cutanées d'origine allergique dans une). Ces symptômes liés à l'asthme sont également recueillis dans l'étude quasi-expérimentale de Smedge, 2000. Les symptômes sont recueillis sur la période des 12 derniers mois dans les études transversales (Mi, 2006 ; Simoni, 2012 ; Kim, 2011, Fraga, 2008) et dans l'étude quasi-expérimentale (Smedje, 2000). Le questionnaire ECHRS est utilisé dans 2 études (Mi, 2006, Smedge, 2000) et le questionnaire ISAAC dans les études de Fraga, 2008 et Simoni, 2010. En plus de ce type de symptômes, Kim, 2011 s'intéresse également à des symptômes généraux, de type fatigue et maux de tête (sur les trois derniers mois).

L'étude longitudinale de Zhang et les six études expérimentales analysent des symptômes de type SBS : voies respiratoires supérieures et inférieures, irritations cutanées, irritations des muqueuses et symptômes généraux. Les symptômes de type SBS dans l'étude longitudinale sont étudiés sur les trois derniers mois, avec la notion qu'ils s'améliorent quand l'élève n'est pas à l'école (Zhang, 2012), et dans les études expérimentales, les symptômes sont ceux ressentis la semaine passée (Smedge, 2011), la dernière heure (Norbäck, 2008a, 2011, 2012), et sans précision (Wargocki 2007a, Wargocki 2007b).

Trois études ont de plus inclus des examens complémentaires, de type rhinométrie, testant la perméabilité nasale (Simoni, 2012, Norback, 2011, Smedge 2011), la stabilité du film lacrymal (Smedge, 2011) et des biomarqueurs dans le lavage nasal (Smedge, 2011).

L'étude écologique met en relation le taux moyen annuel d'absentéisme et les niveaux de CO₂, absentéisme potentiellement lié aux infections ORL et respiratoires contagieuses (Shendell, 2004).

Les symptômes sont étudiés individuellement, sauf dans l'étude de Zhang où sont étudiés des groupes de symptômes.

Dans les tableaux suivants, le « grisé » signale les études les plus faibles sur le plan méthodologique et/ou peu informative par rapport à la problématique traitée, tel que cela est explicité dans les tableaux présentés en annexe 1.

Tableau 3.9 : Symptômes et CO₂ (écoles)

	Absen-téisme	Symptômes liés à l'asthme	Rhinite	Voies respiratoires inférieures	Voies respiratoires supérieures	Irritations cutanées	Irritations muqueuses	Symptômes généraux	Rhino-métrie Biomar-queurs
Shendell 2004	S	-	-	-	-	-	-	-	-
Mi 2006	-	S ¹	-	-	-	-	-	-	-
Fraga 2008	-	S	NS	-	-	NS (allergie)	-	-	-
Simoni 2012	-	S	S	-	-	-	-	-	NS
Kim 2011	-	S	-	-	-	-	-	NS	-
Zhang 2011 transversale ⁴	-	-	-	-	-	NS	S ↘ ²	S ↘ ²	-
Zhang 2011 longitudinale	-	-	-	-	-	NS	NS	NS	-
Smedje 2000	-	S	-	-	-	-	-	-	-
Wargocki, 2007a Hiver	-	-	-	-	NS	NS	NS (↘ S lèvres)	NS	-
Wargocki, 2007a Été	-	-	-	-	NS	NS	NS	NS	-
Wargocki, 2007b	-	-	-	-	NS	NS	NS	NS	-
Smedje 2011	-	-	-	NS	-	NS	S	NS	NS
Norbäck 2008a transversale ⁴	-	-	-	S ³	S ³	S ³	S ³	S	-
Norbäck 2008a longitudinale	-	-	-	NS	NS	NS	NS	NS	-
Norbäck 2011 transversale ⁴	-	-	-	S	S	NS	NS	S	NS
Norbäck 2011 longitudinale	-	-	-	S	NS	NS	NS	NS	S
Norbäck 2012	-	-	-	-	NS	-	NS	S	-

S : lien statistiquement significatif, NS : lien statistiquement non significatif, - : non étudié

1 : NS après ajustement sur NO₂

2 : OR<1 avec ↘ du CO₂ (NS après ajustement sur la structure hiérarchique des données)

3 : NS après ajustement sur température, RH et taux renouvellement d'air (sur-ajustement ?)

4 : analyse partielle des résultats

Une étude est totalement négative, avec une fréquence moindre de symptômes dans les salles ayant les niveaux de CO₂ les plus élevés en 2004 et une absence de relation entre la survenue de symptômes entre 2004 et 2006 et les niveaux de CO₂ (après ajustement sur âge, sexe, et antécédents familiaux d'allergie). Il s'agit d'une étude réalisée en Chine (Zhang, 2011), où les niveaux extérieurs et intérieurs en polluants d'origine extérieure (SO₂ moyen atteignant 318 µg/m³ en 2006 à l'intérieur des écoles) sont très élevés. Les écoles sont par ailleurs mal ventilées avec des niveaux de CO₂ pouvant atteindre 4000 ppm. Dans l'analyse transversale réalisée sur les données 2004, les symptômes étudiés sont liés aux concentrations de SO₂ et de NO₂ à l'intérieur des locaux.

L'étude américaine s'intéressant aux niveaux de CO₂ en lien avec l'absentéisme des enfants est positive, après ajustement sur l'âge, l'ethnie, un indicateur de défaveur socio-économique et l'état.

Parmi les cinq études s'intéressant aux symptômes de type asthmatique, l'une a également été menée en Chine avec le questionnaire ECHRS (Mi, 2006). Les niveaux de CO₂ atteignent cette fois 1910 ppm, mais le niveau moyen de NO₂ est de 86 µg/m³. Le CO₂ est lié significativement à trois indicateurs d'asthme (crise d'asthme, prise de médicaments antiasthmatique, asthme actuel) après ajustement sur âge, sexe, tabagisme et traces d'humidité, mais les OR resteraient de même importance, mais non significatifs après ajustement sur le NO₂ (résultats chiffrés non présentés). Notons que l'ajustement sur le NO₂ est potentiellement un surajustement, le CO₂ étant un « proxy » des polluants à l'intérieur des locaux. L'étude portugaise de Fraga (2008) montre un lien significatif entre CO₂ et un seul symptôme, les sifflements après effort. Dans l'étude multicentrique de Simoni (2012) qui s'appuie, comme la précédente, sur le questionnaire ISAAC, le CO₂ a été utilisé en continu ou catégorisé en plus ou moins 1000 ppm. Dans les deux cas, des liens significatifs sont mis en évidence avec deux symptômes : toux sèche nocturne et rhinite, après ajustement sur âge, sexe et tabac passif. Dans cette étude, il existe une grande hétérogénéité entre les écoles des différents pays. L'étude coréenne de Kim (2011) s'intéresse en plus des symptômes asthmatiques à des symptômes généraux (maux de tête et fatigue). Seuls les sifflements sont associés au CO₂ (moyenne de plus de 2000 ppm), après ajustement sur âge, sexe, antécédents d'allergie et environnement au domicile. Ce lien est conservé après prise en compte de la structure hiérarchique. La cinquième étude menée en Suède a un design quasi-expérimental (Smedge, 2000). Suite à l'installation de nouveaux systèmes de ventilation dans un certain nombre de bâtiments, une baisse de 270 ppm de CO₂ est mesurée avant et après l'intervention, cette baisse étant associée à une baisse des symptômes asthmatiques après ajustement sur âge, sexe et atopie.

Parmi les études ayant investigué les symptômes de type SBS, les deux plus anciennes ont été réalisées au Danemark. La première présente deux interventions réalisées dans deux classes d'une même école, une en été testant deux niveaux de ventilation, l'autre en hiver testant à la fois la variation de ventilation (de 3 à 8,5 L/s par personne) et la qualité du filtre (neuf vs. usagé). Aucun lien n'est mis en évidence entre les symptômes (évalués sur des échelles analogiques visuelles) et la ventilation, à l'exception d'une augmentation de la sécheresse des lèvres quand la ventilation est élevée. La seconde étude, suivant le même schéma expérimental, présente elle aussi deux interventions réalisées dans les deux mêmes classes en été. L'une teste l'effet de la température et n'est pas rapportée. Seule la seconde testant à la fois la variation de ventilation (de 5,2 à 9,6 L/s par personne) et la température entre dans le champ de ce travail. Aucun lien n'est observé entre les scores de symptômes et le niveau de ventilation. Smedge (2011) a réalisé une expérimentation comparant deux systèmes de ventilation avec des apports d'air différents. Moins de symptômes d'irritation des yeux sont observés avec un système mixte par rapport à un système par déplacement d'air. Norbäck (2011) expérimente également l'influence du type d'apport d'air par les systèmes de ventilation. De même le système mixte est plus favorable avec moins de symptômes (difficultés respiratoires, maux de gorge et de tête en transversal et gêne respiratoire en longitudinal) par rapport au système par déplacement d'air. Le même auteur a réalisé deux expérimentations dans des salles informatiques d'une université (Norbäck, 2008a, Norbäck, 2012) en lien avec des symptômes de type SBS. En 2008, deux taux de ventilation ont été comparés, plusieurs symptômes d'irritations des muqueuses et cutané, des voies respiratoires et des symptômes généraux sont plus fréquents avec le niveau le plus élevé de CO₂ (après ajustement sur température, humidité et taux de renouvellement d'air, seuls les maux de tête atteignent le seuil de signification), mais il s'agit là de résultats d'une analyse de type transversal, l'analyse longitudinale sur la minorité d'étudiants ayant respecté le protocole est négative. En 2012, un système de ventilation contrôlé par le niveau de CO₂ a été testé vis-à-vis d'un système à taux de renouvellement constant. Le temps d'exposition à des concentrations supérieures à 1000 ppm diminue avec le système contrôlé et les symptômes généraux sont significativement diminués (aucune différence n'est observée pour les symptômes d'irritations des muqueuses).

Tableau 3.10 : Résumé des symptômes associés au CO₂ dans les études montrant un lien significatif CO₂/symptômes (écoles)

	absentéisme	Symptômes asthmatiques	Rhinite allergique	Voies respiratoires inférieures	Voies respiratoires supérieures	Irritations cutanées	Irritations muqueuses	Symptômes généraux	rhinométrie/ biomarqueurs de lavage nasal
nombre d'études*	1	5	2	5	8	12	11	12	4
nombre de résultats significatifs	1	5	1	3	2	1	2	3	1

*récapitulatif par ligne du tableau (une étude est comptée deux fois si deux analyses sont effectuées)

Au final, sur 17 analyses (pour 13 études), 11 montrent un lien significatif entre CO₂ et au moins un indicateur sanitaire dans le sens attendu, quatre sont non significatives, et deux témoignent de relation dans le sens inverse à celui attendu.

On note que les cinq études dans les écoles ayant investigué les symptômes asthmatiques sont toutes positives, alors que la proportion d'études positives parmi celles ayant étudié les symptômes de type SBS (symptômes des voies respiratoires inférieures et supérieures, irritations cutanées, irritations des muqueuses, symptômes généraux) est relativement faible.

3.2.2.1.2 A quelle concentration, observe-t-on des effets sanitaires ?

Tableau 3.11 : Effets sanitaires et concentration en CO₂ (écoles)

Etude	CO ₂					Résumé des résultats
	Indicateur	Durée	min	max	moy	
Shendell 2004	dCO ₂	5 min	10	4230	580 1510	à ↗ 10-20 % d'absentéisme pour ↗ 1000 ppm
Mi 2006	CO ₂	1 h (mieu cours)	530	1910	1060	OR(S) : 1,15-1,18 selon symptômes pour ↗ 100 ppm Test de tendance significatif
Fraga 2008	3 classes : >2100 ; ~ 1850 ; ~1400 <i>Mais seuls 2 niveaux sont contrastés</i>	1 sem	NR	NR	NR	OR (S) = 1,86 dans écoles >2100 vs ~1400 ppm
Simoni 2012	CO ₂	1 jour (min : 4 h)	525	3475	1467	OR (S) : 1,05-1,06 pour ↗ 100 ppm
	2 classes de CO ₂ : < 1000 vs. >1000 ppm					OR (S) : 2,07 à 3,32 dans écoles > 1000 ppm vs <1000 ppm
Kim 2011	CO ₂	45-60 min	907	4113	2417	OR (S) = 1,03 pour ↗ 100 ppm
Zhang 2011 Transversal ₁	CO ₂ 2004	1 h	789	4170	2111	OR (S) : 0,77-0,84 pour ↗ 100 ppm
Zhang 2011 longitudinal	CO ₂ 2004 2006		789 965	4170 3996	2111 2651	HR (NS) : 1,0-1,19 pour ↗ 100 ppm
Smedje 2000	CO ₂ par condition : Avant -témoin -intervention Après n ^{eau} syst. ventilation -témoin - intervention	15 min			930 1050 +90 -270	OR (S) : 0,5-0,3 avant vs. après nouveau système de ventilation
Wargocki, 2007a hiver	CO ₂ par niveau ventilation + filtre :	moy sur temps d'occupation			1296	NS (sauf ↘ S sécheresse lèvres)
	3 L/s/pers + filtre neuf 3 L/s/pers + filtre usagé 8,5 L/s/pers + filtre neuf 8,5 L/s/pers + filtre usagé				1264 931 914	
Wargocki, 2007a été	CO ₂ par niveau ventilation 3,4 L/s/pers 8,5 L/s/pers				1128 904	NS

(suite) Etude	CO ₂					Résumé des résultats
	Indicateur	Durée	min	max	moy	
Wargocki, 2007b	CO ₂ par niveau ventilation + filtre : 3 L/s/pers + filtre neuf 3 L/s/pers + filtre usagé 8,5 L/s/pers + filtre neuf 8,5 L/s/pers + filtre usagé	moy sur temps d'occu- pation			1296 1264 931 914	NS
Smedje 2011	CO ₂ par syst. ventilation DV MV	1 jour	694 768	854 888	794 840	⬇ (S) symptômes en MV vs DV
Norbäck 2008a transversal ¹	CO ₂ par niveau ventilation - 7 L/s/pers - 10-13 L/s/pers CO ₂ (conditions confondues)	1 h			Difference = 263 993	OR (S) : 1,18-1,47 pour ⬆ 100 ppm
Norbäck 2008a cross-over	CO ₂ par niveau ventilation - 7 L/s/pers - 10-13 L/s/pers CO ₂ (conditions confondues)	1 h			Difference = 263 993	Aucun lien entre évolution des symptômes et les 2 conditions de CO ₂
Norbäck 2011 transversal ¹	CO ₂ par système ventilation MV DV1	3 h			867 590	⬆ (S) symptômes en MV vs DV
Norbäck 2011 longitudinal	CO ₂ par système ventilation Semaine 1 → semaine 2 MV → DV1 témoin Semaine 2 → semaine 3 DV1 → DV2 témoin	3 h			867 → 655 590 → 625 655 → 611 625 → 612	⬇ (S) symptômes entre semaine s 1 et 2 Pas de différence entre semaines 2 et 3
Norbäck 2012	CO ₂ par niveau ventilation - 13,3 L/s/pers (constant) - 8,9-37,5 L/s/pers (variable)	1 h		25% tps>1000 9% tps>1000	809 784	⬇ (S) symptômes en niveau ventilation contrôlé par CO ₂)

1 : analyse partielle des résultats

Beaucoup de ces travaux sur les écoles sont confrontés à la structure hiérarchique des données, c'est-à-dire au fait que les données ne sont pas indépendantes, les enfants étant potentiellement plus proches des enfants de la même classe, voire de la même école que des enfants d'autres classes ou écoles. Tous les auteurs n'en tiennent pas compte, mais deux auteurs montrent que la mise en place de modèles mixtes permettant la prise en compte de cette structure hiérarchique ne modifie pas les résultats (Simoni, 2010, Kim, 2011). A noter que dans l'analyse transversale de Zhang, les OR inverses (diminution des symptômes avec augmentation du CO₂) deviennent non significatifs après cette prise en compte.

Deux études sont faibles d'un point de vue méthodologique. Leurs résultats ne seront pas commentés dans la suite de ce rapport. Il s'agit en premier lieu de l'étude écologique de Shendell, 2004, outre le peu de spécificité de l'effet, est à déplorer la qualité des mesures de CO₂ : pas de temps de 5 minutes à des plages horaires non standardisées (notons que c'est la seule étude utilisant le différentiel intérieur-extérieur de CO₂, toutes les autres études dans les écoles, ne tiennent pas compte du CO₂ extérieur). L'étude portugaise (Fraga, 2008), bien qu'ayant utilisé le questionnaire standardisé ISAAC, souffre de limitations et en particulier du fait que le CO₂ n'a pas été mesuré dans toutes les salles de classes et que si les écoles avaient été classées en 3 classes, les résultats ne sont présentés qu'en contrastant la classe supérieure (>2100 ppm) à la classe inférieure (~1400 ppm). De plus, la qualité rédactionnelle est insuffisante, avec de nombreuses discordances entre texte et tableaux.

D'autre part, deux études expérimentales récentes comparant deux conditions de ventilation apportent des éléments intéressants pour la discussion des effets du CO₂ et/ou du système de ventilation, mais peu d'information sur le niveau de CO₂ susceptible d'être lié à des effets sanitaires.

- dans celle de Smedje, 2011, les deux conditions de ventilation diffèrent par leur mode d'apport d'air extérieur. Les concentrations moyennes et maximales de CO₂ ne sont pas significativement différentes entre les deux conditions (en moyenne 794 vs 809 ppm, au maximum 854 vs 888). Il faut cependant noter que le système de ventilation influe significativement sur la prévalence de certains symptômes (irritations des yeux).
- dans celle de Norbäck, 2012, conditions : les deux conditions de ventilation sont différentes, une avec un taux de ventilation constant et une avec un taux variable piloté grâce à des sondes mesurant le CO₂ et la température. Là également, les moyennes en CO₂ sont proches dans les deux conditions (784 en taux contrôle versus 809 en taux constant). Maux de tête et fatigue sont significativement diminués avec le système à taux variable (diminuant le nombre de pic de CO₂).

Comme pour les publications relatives aux bureaux, en fonction des types d'étude et en fonction des analyses réalisées, les résultats sont présentés de différentes manières :

- **Comparaison des effets sanitaires entre deux niveaux de CO₂** : 1 étude transversale (Simoni, 2012), l'étude quasi-expérimentale (Smedje, 2000) et les 4 études expérimentales (Norbäck 2008a, Norbäck, 2011, Wargocki, 2007 a et b)
- **Etude de la relation dose-réponse entre les niveaux de CO₂ et les effets sanitaires** :
 - o **Relation exprimée sous forme d'Odds Ratio (OR) pour une augmentation de CO₂ de 100 ppm (le plus souvent)**. En cas d'introduction du CO₂ sous forme continue, les auteurs font l'hypothèse d'une relation linéaire entre l'effet et le niveau de CO₂. Il s'agit de trois études transversales : Mi, 2006, Simoni, 2010, Kim, 2011, de l'analyse transversale de l'étude de Zhang, 2011 et de l'analyse transversale issue de l'étude expérimentale de Norbäck, 2008a.
 - o **Relation exprimée sous forme d'Hazard Ratio (HR) pour une augmentation de CO₂ de 100 ppm** dans l'analyse longitudinale de l'étude de Zhang. Comme pour l'OR, les auteurs font l'hypothèse d'une relation linéaire entre l'effet et le niveau de CO₂.
 - o **Réalisation d'un test de tendance**, en testant la fréquence d'enfants avec symptômes dans trois classes de niveaux croissants de CO₂ (Mi, 2006) ou en introduisant une variable CO₂ catégorisé en quartiles de façon continue, comme il est dit dans la discussion relative à l'article de Simoni, 2010 (résultats non montrés).

Etudes comparant l'effet sanitaire entre deux niveaux de CO₂

L'étude transversale de Simoni (2010) évoquée dans le paragraphe suivant (car présentant également les résultats sous forme d'OR), trouve des résultats similaires (prévalences plus élevées de toux et rhinite) en comparant les salles de classe au-dessous et au-dessus de 1000 ppm.

Dans l'étude quasi-expérimentale de Smedje en 2000, 77 % des salles de classes ont des concentrations en CO₂ au-dessus de 1000 ppm en 1993 versus 65 % en 1995 après installation d'un nouveau système de ventilation mécanique dans 12 % des écoles. L'intervention, ayant entraîné une baisse de CO₂, est liée à une diminution des symptômes asthmatiques, mais des facteurs autres que le changement de système de ventilation ont pu changer entre les deux périodes et ne sont pas contrôlés, comme une information sur les conséquences d'une mauvaise ventilation ayant pu faire évoluer les comportements.

La première étude danoise (Wargocki, 2007a) est négative alors que le niveau de CO₂ passe de 931 (filtre neuf) et 914 (filtre usagé) à un niveau de 1296 (filtre neuf) et 1264 ppm (filtre usagé). En été, le différentiel est équivalent, 904 vs. 1300 ppm. L'absence de relation significative présentée dans la seconde étude danoise est obtenue pour un passage du niveau de CO₂ de 952 (T° élevée) et 1049 (T° basse) vers un niveau de 744 (T° élevée) et 809 ppm (T° basse).

L'étude de Norbäck 2008a est totalement négative en ce qui concerne la relation CO₂-évolution des symptômes et est surtout de qualité médiocre, dans la mesure où seulement un petit nombre de sujets ont respecté les conditions expérimentales. Les sujets ont été divisés en trois groupes en fonction de la variation de ventilation entre les deux semaines d'expérimentation: 1^{er} groupe avec une variation du CO₂ de 1030 à 1170 ppm, 2^{ème} groupe avec une variation du CO₂ de 1200 à 920 ppm et 3^{ème} groupe, sans variation.

L'étude de Norbäck, 2011 s'intéresse à l'influence du type d'apport d'air par les systèmes de ventilation. L'amélioration des effets sanitaires est observée dans l'analyse transversale pour une différence en CO₂ entre 867 à 590 ppm, et dans l'analyse longitudinale pour une variation de 867 à 655 ppm dans le groupe intervention (alors que la variation dans le groupe témoin était de 590 à 625 ppm).

Etudes exprimant les relations sous forme d'OR

Dans l'étude multicentrique européenne (Italie, Norvège, Suède, Danemark, France) de Simoni, 2010, les écoles françaises situées à Reims ont toutes des concentrations moyennes en CO₂ supérieures à 1000 ppm (même chose en Italie et au Danemark, sauf 1, et dans 2 écoles sur 6 en Norvège). Les niveaux de ventilations (calculés à partir du CO₂) sont inférieurs à 8 L/s/pers dans ces mêmes écoles. Des niveaux inférieurs sont mesurés dans les écoles suédoises et 4 écoles norvégiennes, écoles qui disposent de système de ventilation mécanique (les niveaux de ventilation sont supérieurs à 8 L/s/pers sauf dans 1 école suédoise). Concernant les PM₁₀, les niveaux intérieurs sont toujours supérieurs aux niveaux extérieurs. Les prévalences de symptômes sont plus élevées en France et en Italie. Dans les régressions logistiques multivariées, le CO₂ et les PM₁₀ sont introduits simultanément (corrélation r=0,64, p<0,001 entre les deux polluants). Seul le CO₂ (entre 525 et 3475 ppm) est lié significativement aux prévalences de toux et de rhinite (OR=1,5 dans les deux cas), alors que les PM10 (entre 14 et 260 µg/m³) sont associées à la perméabilité nasale (rhinométrie).

Dans l'étude de Kim (2011) en Corée, la majorité des écoles présentent des niveaux de CO₂ supérieur à 1000 ppm (le temps de mesure apparaît relativement court). Ce dernier est associé significativement aux sifflements, mais pas aux autres symptômes liés à l'asthme, ni aux symptômes généraux (à la limite de la signification pour la fatigue). Cependant, l'effet du CO₂ (entre 901 et 4113 ppm) est relativement faible (OR=1,03). Les autres variables environnementales sont mises une à une dans le modèle : les sifflements sont liés au NO₂ extérieur et l'asthme aux particules ultrafines extérieures. Aucun polluant intérieur (NO₂, O₃, UFP) n'est lié aux symptômes (résultats à la limite de la signification entre sifflements et NO₂).

Dans la première étude chinoise (Mi, 2006), les OR pour trois indicateurs d'asthme sont significatifs pour des augmentations de CO₂ entre 530 et 1910 ppm. Rappelons qu'après ajustement sur le NO₂, ici particulièrement élevé dans les salles de classe (33 à 86 µg/m³), les OR restent similaires, mais deviennent non significatifs. Comme il est admis que le CO₂ ne constitue qu'un indicateur des polluants d'origine intérieure (i.e. sans effets sanitaires par lui-même), ce fait est potentiellement attendu. Le principal problème de cette étude est ici constitué par les niveaux de pollutions mesurés (intérieurs et extérieurs), qui gêne l'extrapolation des résultats à la situation française.

L'étude longitudinale de Zhang (2011) est réalisée dans une zone géographique de Chine très polluée, notamment par des mines de charbon, dans des écoles ventilées naturellement. Les niveaux de CO₂ indiquent une ventilation insuffisante (2211 ppm en 2004 et 2651 ppm en 2006, niveaux non différents significativement). Les niveaux en NO₂ et SO₂ sont élevés à l'extérieur comme à l'intérieur des écoles. L'analyse transversale sur les données de 2004 montre que l'augmentation de symptômes de type SBS est inversement liée à l'augmentation des concentrations en CO₂ (rappelons que la signification disparaît lorsque la structure hiérarchique est prise en compte), par contre elle est liée à l'augmentation des polluants d'origine extérieur, SO₂ et NO₂ (entrés de façon indépendante dans les modèles).

Les auteurs de l'étude expérimentale (Norbäck, 2008a) ont analysé leurs résultats de façon transversale, en utilisant les questionnaires remplis en début de semaine par les étudiants (semaines 1 et 2) et ont ainsi pu montrer des prévalences de symptômes plus élevées avec le niveau de ventilation le plus faible (soit un différentiel de CO₂ de 263 ppm). Après ajustement sur température, humidité et taux de renouvellement d'air, seuls les maux de tête sont liés au CO₂.

Etudes exprimant les relations sous forme d'HR

L'analyse longitudinale (entre 2004 et 2006) de l'étude de Zhang, 2011, évoquée ci-dessus, ne montre pas de lien entre l'incidence des symptômes et les polluants à l'intérieur des locaux (à noter que les niveaux de CO₂ ne sont pas différents entre 2004 et 2006, en revanche les concentrations en NO₂ et SO₂ ont augmenté).

Etude exprimant des tests de tendance

Seule l'étude de Mi, 2006 présente des tests de tendance significatifs, ce qui correspond à une augmentation de plusieurs symptômes selon trois classes de CO₂ (595-800 ppm / 801-1000 ppm / 1001-1555 ppm).

3.2.2.2 Relation CO₂-perception de la qualité de l'air3.2.2.2.1 *Le CO₂ est-il associé à des effets sur la perception ?*

Une étude transversale et six études expérimentales ont exploré la relation entre CO₂/ventilation et la perception de la qualité de l'air dans les écoles.

Notons que les populations d'étude sont diverses : la première a été réalisée chez les enseignants (Norbäck, 1995), deux des études expérimentales ont été réalisées auprès d'étudiants (Norbäck, 2008b, Norbäck, 2012), les quatre autres auprès d'élèves (Smedje, 2011, Norbäck, 2011, Wargocki, 2007a et 2007b). Des adultes ont également participé à la notation de la perception dans l'étude de Wargocki 2007a. Notons que 4 études sur 7 ont été réalisées par la même équipe, et toutes en Scandinavie (cinq en Suède et deux au Danemark).

Tableau 3.12 : Perception et CO₂ (écoles)

	Qualité de l'air	Acceptabilité	T° /Confort thermique	Sécheresse / humidité	Fraicheur	Pous-sières	Courants d'air	Odeurs	Bruit	Luminosité
Norbäck 1995	-	-	NS	NS	-	NS	-	-	-	-
Wargocki, 2007a Hiver	-	S (adulte)	NS (enfant)	NS (adulte) NS (enfant)	NS (adulte) NS (enfant)	-	NS (enfant)	S (adulte)	NS (enfant)	NS (enfant)
Wargocki, 2007a, Été	-	S (adulte)	NS (enfant)	NS (adulte) NS (enfant)	S (adulte) S (enfant)	-	NS (enfant)	S (adulte)	NS (enfant)	NS (enfant)
Wargocki 2007b	-	-	NS	NS	NS	-	NS	-	S ↗	NS
Smedje 2011	S	-	NS	NS	-	NS	NS	-	-	-
Norbäck 2008b Transversale ¹	NS*	-	NS*	NS	-	-	NS*	NS*	NS	NS
Norbäck 2008b cross-over	S**	-	S	NS	-	-	S	S	NS	NS
Norbäck2011 transversal ¹	S**	-	NS	NS	-	-	NS	NS	NS	NS
Norbäck2011 longitudinal	S	-	NS	NS	-	-	NS	NS	NS	NS
Norbäck 2012	S (à l'entrée)	-	NS	NS	-	-	NS	NS	NS	NS

S : lien statistiquement significatif, NS : lien statistiquement non significatif, - : non étudié

* significatif avant ajustement (en particulier sur température, humidité, taux de renouvellement d'air)

** à la fois à l'entrée et lors de la dernière heure

1 : analyse partielle des résultats

Plus le niveau de CO₂ baisse, meilleure est la qualité de l'air perçue (ou plus acceptable). Trois études montrent de plus des relations significatives entre la diminution du CO₂ (taux élevé de ventilation) et d'autres perceptions en relation avec la qualité de l'air : fraicheur de l'air, perception d'une température plus basse, augmentation de la perception des courants d'air et diminution de la perception des odeurs.

3.2.2.2.2 *A quelle concentration, observe-t-on des effets sur la perception ?*

Rappelons que deux études expérimentales récentes, celles de Smedje, 2011 et Norbäck, 2012, comparant deux conditions de ventilation apportent des éléments intéressants pour la discussion des effets du CO₂ et/ou du système de ventilation, mais peu d'information sur le niveau de CO₂ susceptible d'être lié à des effets sanitaires.

La première étude (Norbäck, 1995), de design transversal, fait l'hypothèse d'une relation linéaire entre CO₂ et différents indicateurs de perception. Aucune relation n'est significative, alors qu'en revanche la température, l'humidité, et les concentrations en COV sont liés à certains indicateurs de perception.

Les autres études sont de type expérimental et comparent des indicateurs de perception entre deux niveaux de CO₂, liés eux-mêmes à des conditions de ventilation différentes. L'analyse transversale des questionnaires remplis en début de semaine par les étudiants (semaines 1 et 2) ne montre pas de différence des perceptions après ajustement sur température, humidité, taux de renouvellement d'air entre les deux conditions de ventilation, soit un différentiel de CO₂ de 263 ppm (Norbäck, 2008b). Dans le petit groupe d'étudiants ayant participé aux deux phases de l'expérimentation, le même différentiel de CO₂ (les étudiants étant comparé à eux-mêmes) est lié à une meilleure perception de la qualité de l'air, une température plus froide, plus de courant d'air et moins d'odeurs. L'étude de Norbäck, 2011 s'intéresse à l'influence du type d'apport d'air par les systèmes de ventilation. L'amélioration de la perception est observée dans l'analyse transversale pour une différence en CO₂ entre 867 et 590 ppm, et dans l'analyse longitudinale pour une variation de 867 à 655 ppm dans le groupe intervention (alors que la variation dans le groupe témoin était de 590 à 625 ppm).

Tableau 3.13 : perception et concentrations en CO₂ (écoles)

	CO ₂					Résumé des résultats
	Indicateur C	Durée	min	max	CO ₂ moy	
Norbäck 1995	CO ₂ en continu Ecole niveau le plus bas Ecole niveau le plus élevé	3 min	700 1500	1200 2700	880 1850	NS
Wargocki , 2007a Hiver	CO ₂ par niveau ventilation + filtre : 3 L/s/pers + filtre neuf 3 L/s/pers + filtre usagé 8,5 L/s/pers + filtre neuf 8,5 L/s/pers + filtre usagé	moy sur temps d'occupation	-	-	1296 1264 931 914	Adultes : ↗ S perception Enfants NS
Wargocki 2007a, Eté	CO ₂ par niveau ventilation 3,4 L/s/pers 8,5 L/s/pers		-	-	1128 904	Adultes : ↗ S perception Enfants : ↗ S perception
Wargocki , 2007b	CO ₂ par niveau ventilation + filtre : 3 L/s/pers + filtre neuf 3 L/s/pers + filtre usagé 8,5 L/s/pers + filtre neuf 8,5 L/s/pers + filtre usagé	moy sur temps d'occupation	-	-	1296 1264 931 914	NS (sauf ↗ bruit à ventilation élevée)
Smedje 2011	CO ₂ par système ventilation DV MV	1 jour	694 768	854 888	794 840	Meilleure qualité de l'air perçue en MV vs DV
Norbäck 2008b transversal ¹	CO ₂ par niveau ventilation - 7 L/s/pers - 10-13 L/s/pers	1 h	-	-	1185 922	NS
Norbäck 2008b longitudinal	CO ₂ par niveau ventilation - 7 L/s/pers - 10-13 L/s/pers	1 h	-	-	1185 922	ventilation élevée liée à meilleure perception qualité de l'air, température plus froide, plus de courant d'air, moins d'odeurs
Norbäck 2011 transversal ¹	CO ₂ par système ventilation MV DV1	3 h	-	-	867 590	Amélioration perception qualité de l'air en MV vs DV1
Norbäck 2011 longitudinal	CO ₂ par système ventilation Semaine 1 → semaine 2 MV → DV1 témoin Semaine 2 → semaine 3 DV1 → DV2 témoin	3 h	-	-	867 → 655 590 → 625 655 → 611 625 → 612	amélioration perception qualité de l'air entre semaine 1 et 2 Pas de différence perceptions entre semaine 2 et 3
Norbäck 2012	CO ₂ par niveau ventilation - 13,3 L/s/pers (constant) - 8,9-37,5 L/s/pers (variable)	1 h	-	25% tps>1000 9% tps>1000	809 784	Ventilation variable est liée à meilleure perception de la qualité de l'air

1 : analyse partielle des résultats

3.2.2.4 Relation CO₂-performance

3.2.2.4.1 *Le CO₂ est-il associé à des effets sur la performance ?*

Trois publications ont été identifiées sur ce thème, deux du même auteur danois en 2007 (Wargocki) et un travail allemand récent, (Twardella, 2012). Les trois travaux ont été réalisés auprès des enfants.

Tableau 3.14 : Performance et CO₂ (écoles)

	rapidité	taux d'erreur	concentration
Twardella 2012	NS	S	NS
Wargocki 2007a Hiver	S	NS	-
Wargocki 2007a Eté	S	NS	-
Wargocki 2007b	S	NS	-

S : lien statistiquement significatif, NS : lien statistiquement non significatif, - : non étudié

L'étude allemande, sur la base d'un test standardisé sur papier (ne durant que cinq minutes) ne montre pas de lien entre, ni la concentration (le critère principal), ni la rapidité, et le niveau de CO₂ ; en revanche, le niveau de précision est affecté par des concentrations de CO₂ élevées,

La première étude danoise présente deux interventions réalisées dans deux classes d'une même école, une en été testant deux niveaux de ventilation, l'autre en hiver testant à la fois la variation de ventilation (de 3 à 8,5 L/s par personne) et la qualité du filtre (neuf vs. usagé). Plusieurs tests, proches du travail scolaire effectué par les enfants habituellement ont été effectués. Des liens entre la rapidité des tests, après ajustement sur l'effet d'apprentissage au cours de l'expérimentation, et la ventilation sont mis en évidence. En revanche, aucun lien n'est observé entre le pourcentage d'erreurs et le niveau de ventilation.

La seconde étude danoise, suivant le même schéma expérimental, présente elle aussi deux interventions réalisées dans les deux mêmes classes en été. L'une teste l'effet de la température et n'est pas rapportée. Seule la seconde testant à la fois la variation de ventilation (de 5,2 à 9,6 L/s par personne) et la température entre dans le champ de ce travail. Malheureusement, une partie des tests n'a pas été réalisée dans une classe, empêchant une grande partie des analyses. Des liens entre la rapidité de certains tests, mais sans ajustement sur l'effet d'apprentissage au cours de l'expérimentation et dans l'analyse dite déséquilibrée (c'est-à-dire prenant tous les sujets même s'ils n'ont pas participé à toutes les phases de l'expérimentation), et la ventilation sont mis en évidence. En revanche, aucun lien n'est observé entre le pourcentage d'erreurs et le niveau de ventilation.

3.2.2.4.2 A quelle concentration, observe-t-on des effets sur la performance ?

Tableau 3.15 : Performance et concentration en CO₂ (écoles)

Etude	CO ₂					Résumé des résultats
	Indicateur	durée	min	max	moy	
Twardella 2012	CO ₂ par niveau ventilation Diminution Augmentation ventilation	4 h	-	39 j>1000 18 j>1000	2115 1045	↗ nombre d'erreur entre basse et forte ventilation (+1,19 pour ↗ 100 ppm)
Wargocki 2007a hiver	CO ₂ par niveau ventilation + filtre : 3 L/s/pers + filtre neuf 3 L/s/pers + filtre usagé 8,5 L/s/pers + filtre neuf 8,5 L/s/pers + filtre usagé	moy sur temps d'occupation	-	-	1296 1264 931 914	↗ (S) rapidité
Wargocki 2007a été	CO ₂ par niveau ventilation 3,4 L/s/pers 8,5 L/s/pers		-	-	1128 904	↗ (S) rapidité entre basse et forte ventilation
Wargocki 2007b	CO ₂ par niveau ventilation + température 5,2 L/s/pers + forte T° 5,2 L/s/pers + faible T° 9,6 L/s/pers + forte T° 6,6 L/s/pers + faible T°	moy sur temps d'occupation	-	-	952 1049 744 809	NS (analyses équilibrées)

Dans l'étude allemande, pour un différentiel de 1070 ppm (de 1045 à 2115 ppm), l'analyse per-protocole met en évidence, dans le modèle de régression comparant les conditions de ventilation, un paramètre significatif de CO₂ de 1,65 (0,42-2,87). Le deuxième modèle avec le CO₂ entré en continu obtient un paramètre significatif un peu moins important pour une augmentation de 1000 ppm, soit 1,19 (0,30-2,07).

La première étude danoise obtient des résultats significatifs sur la rapidité de certains tests en hiver pour un passage du niveau de CO₂ de 931 (filtre neuf) et 914 (filtre usagé) vers un niveau de 1296 (filtre neuf) et 1264 ppm (filtre usagé). En été, le différentiel est équivalent, 904 vs. 1300 ppm.

L'absence de relation dans la seconde étude danoise est obtenue pour un passage du niveau de CO₂ de 952 (température élevée) et 1049 (température basse) vers un niveau de 744 (température élevée) et 809 ppm (température basse).

3.2.3 logements

3.2.3.1 Le CO₂ est-il associé à des effets sanitaires et à la perception de la qualité de l'air?

Seulement deux publications suédoises sur la problématique CO₂ dans les logements ont été identifiées : une étude transversale et une étude expérimentale. Dans les deux cas, les sujets sont des adultes, de 20 à 45 ans dans la première et de 18 à 64 ans dans la seconde.

La première étude (Norbäck, 1995b) a été réalisée dans le cadre de l'étude multicentrique européenne, ECHRS. L'équipe de la ville d'Uppsala a réalisée des mesures complémentaires au domicile des sujets inclus dans la deuxième phase de l'étude. Sont étudiés les symptômes respiratoires liés à l'asthme et une relation significative entre CO₂ et des symptômes respiratoires nocturnes, potentiellement liés à l'asthme, est mise en évidence.

La suivante (Enqwall, 2005) avait pour ambition de tester le principe d'adaptation saisonnière du niveau de ventilation (avec réduction de l'apport d'air extérieur) dans le but de réduire la consommation d'énergie. Sont étudiés les symptômes de type SBS : voies respiratoires supérieures et inférieures, irritations cutanées, irritations des muqueuses et symptômes généraux ainsi que la perception de la qualité de l'air. Aucune relation n'est détectée entre les symptômes et les conditions de ventilation. En revanche, la perception de la qualité de l'air est moins bonne et les personnes se plaignent d'odeurs quand la ventilation est réduite.

Tableau 3.16 : Effets sanitaires, perception et CO₂ (logements)

Effets sanitaires	Symptômes liés à l'asthme	Voies respiratoires inférieures	Voies respiratoires supérieures	Irritations cutanées	Irritations muqueuses	Symptômes généraux
Norbäck 1995	S	-	-	-	-	-
Enqwall 2005		NS	NS	NS	NS	NS
Perception	Qualité de l'air	Sécheresse de l'air	Confort thermique	Odeurs		
Enqwall 2005	S	NS	NS	S		

S : lien statistiquement significatif, NS : lien statistiquement non significatif, - : non étudié

3.2.3.2 A quelle concentration, observe-t-on des effets sanitaires et sur la perception ?

Tableau 3.17 : Effets sanitaires, perception et concentration en CO₂ (logements)

	Indicateur CO ₂	CO ₂ min	CO ₂ max	CO ₂ moy	Résumé des résultats
Norbäck, 1995	CO ₂ en continu	NR	NR	NR 26% >1000	OR (S) : 20,0 pour ↗ 1000 ppm
Enqwall, 2005 Effets sanitaires	CO ₂ par niveau ventilation Flux constant Flux réduit			721 761	NS
Enqwall, 2005 Perception	CO ₂ par niveau ventilation Flux constant Flux réduit			721 761	3 indicateurs de perception significativement liés à CO ₂

La première étude (Norbäck, 1995) exprime les résultats sous forme d'OR pour une augmentation de 1000 ppm, en rappelant qu'une concentration au-delà de 1000 pm a été mesurée dans 26 % des salles de séjour. D'autres polluants de l'air intérieur (formaldéhyde, toluène, C8-aromatiques, terpène, COV) ont également été trouvés liés aux symptômes avec des OR compris entre 4 et 12,5 pour des augmentations de dix fois le log de la concentration. Rappelons que les polluants sont introduits individuellement dans les modèles, après ajustement sur âge, sexe, tabagisme, moquettes, acariens.

L'étude expérimentale (Engwall, 2005) teste des différences de symptômes et de perceptions entre deux niveaux relativement proches de CO₂. Aucune différence n'est constatée en ce qui concerne les symptômes, en revanche, malgré ce faible différentiel, trois indicateurs de perception sont significativement modifiés.

3.2.4 chambres expérimentales

Aucun travail en chambre expérimentale étudiant les effets sanitaires n'a été identifié. En revanche, deux études ont étudié les liens entre le CO₂ et la performance (Kajtar, 2003 et Satish, 2012), la plus ancienne s'étant intéressée également à la perception de la qualité de l'air. Ce dernier travail a seulement été publié dans un acte de congrès, mais a été conservé car ce sont, à notre connaissance, les deux seuls travaux testant l'hypothèse d'un effet propre du CO₂ (en injectant du CO₂ dans la chambre expérimentale).

3.2.4.1 Le CO₂ est-il associé à des effets sur la perception ?

Tableau 3.18 : Perception et CO₂ (chambre expérimentale)

Perception	Acceptabilité	Fraicheur de l'air
Kajtar, 2003	S	S

S : lien statistiquement significatif.

Seules des figures sont présentées et commentées. Aucun résultat chiffré n'est disponible et les résultats de tests statistiques ne sont pas tous rapportés. Il apparaît qu'acceptabilité et perception de la qualité de l'air décroissent en cours de session quel que soit le niveau de CO₂. De même, acceptabilité et perception de la qualité de l'air décroissent avec les niveaux croissants de CO₂.

3.2.4.2 Le CO₂ est-il associé à des effets sur la performance ?

Tableau 3.19 : Performance et CO₂ (chambre expérimentale)

	lignes lues	% erreurs	Test sur ordinateur *
Kajtar, 2003	NS	S	-
Satish, 2012	-	-	S

S : lien statistiquement significatif, NS : lien statistiquement non significatif, - : non étudié

* 9 scores : niveau d'activité, opportunité, concentration, orientation des actions, initiative, recherche d'information, habilité à l'utiliser, flexibilité et stratégie.

L'étude de Katjar s'est basée sur un test de lecture avec deux indicateurs, la quantité de lignes lues et le pourcentage d'erreurs identifiées, tandis que l'étude de Satish plus récente a utilisé un test sur ordinateur permettant la construction de neuf scores.

Dans la première étude, le nombre de lignes lues ne serait pas lié aux concentrations en CO₂, tandis que cet indicateur augmente au cours des sessions (phénomène d'apprentissage). Le pourcentage d'erreurs en revanche serait influencé par le niveau de CO₂ (au bout de 140 min et encore plus au bout de 210 min, différence significative entre des sessions à respectivement 600 ppm et 4000 ppm).

Dans l'étude la plus récente, une altération significative de la performance pour la majorité des indicateurs de performance en relation avec l'augmentation du CO₂ est démontrée, à l'exception d'une relation inverse pour le score de concentration, l'hypothèse des auteurs étant qu'une situation défavorable s'accompagne d'un niveau « maximal de concentration ».

3.2.4.3 A quelle concentration, observe-t-on des effets ?**Tableau 3.20 : Effets et concentrations en CO₂ (chambre expérimentale)**

	Indicateur CO ₂	CO ₂ min	CO ₂ max	CO ₂ moy	Résumé des résultats
Kajtar, 2003 perception	Niveaux de CO ₂ par session			600 1500 3000 4000	Air moins acceptable si CO ₂ =3000 ppm vs. 600 ppm Air plus acceptable et frais à 1500 ppm qu'à 4000 ppm
Kajtar, 2003 performance	Niveaux de CO ₂ par session			600 1500 3000 4000	% d'erreurs identifiées supérieur à 3000 qu'à. 600 ppm % d'erreurs identifiées supérieurs à 4000 qu'à 1500 ppm (pas d'étude entre 600 et 1500 ppm)
Satish, 2012 performance	Niveaux de CO ₂ par session			600 1000 2500	1000 vs. 600 : altération modérée S de 6 indicateurs sur 9 2500 vs. 600 : altération substantielle S de 7 indicateurs sur 9

Dans la première étude, l'air est jugé moins acceptable et le pourcentage d'erreurs identifiés plus important à 3000 ppm qu'à 600 ppm. L'air à 1500 ppm est jugé plus acceptable et plus frais que celui à 4000 ppm, et question performance, le pourcentage d'erreurs identifiées est plus important à 1500 qu'à 4000 ppm.

Dans la seconde étude, est notée une altération modérée de six indicateurs sur neuf entre la session à 1000 ppm vs. celle à 600 ppm. L'altération devient substantielle pour sept indicateurs sur neuf entre la session à 2500 ppm vs. celle à 600 ppm.

3.3 Synthèse des résultats

Ce travail de synthèse sur les liens entre CO₂ et effets chez l'homme est basé sur 30 publications issues d'un travail de sélection rigoureux. A noter que vingt de ces 30 publications n'avaient pas été incluses dans les précédentes revues de littérature du domaine.

Les résultats ont été synthétisés sur les schémas ci-dessous, inspirés de la revue de Seppänen. Les niveaux de CO₂ ont été harmonisés en prenant comme référence un niveau extérieur de 400 ppm si le niveau extérieur n'était pas renseigné.

Les barres délimitent les niveaux de CO₂ étudiés. Une barre en dégradé de noir traduit une dose réponse significative (OR). Une barre scindée en deux, correspond à une analyse entre deux niveaux de CO₂, une partie noire montre un effet significatif.

Deux ronds traduisent une étude à deux concentrations de CO₂. Des ronds blancs correspondent à une absence d'effet.

Les traits verticaux symbolisent les bornes de concentrations des classes de CO₂ utilisées dans les tests de tendance.

Etudes des relations effets sanitaires – CO₂

A part l'étude la plus ancienne, toutes les études dans les bureaux se sont intéressées aux symptômes type SBS et sont positives. Les niveaux de CO₂ sont relativement homogènes, inférieurs à 1700 ppm.

Pour les écoles, les résultats sont plus contrastés et les niveaux de CO₂ (dans les études observationnelles) sont souvent plus élevés et parfois très élevés (au-delà de 4000 ppm). Les études s'étant intéressées aux symptômes liés à l'asthme sont toutes positives (avec donc une aggravation des symptômes chez les enfants les plus sensibles). Les résultats de celles ayant étudié les symptômes de type SBS sont beaucoup plus contrastés, avec plusieurs études négatives et parfois des résultats contradictoires au sein d'une même étude.

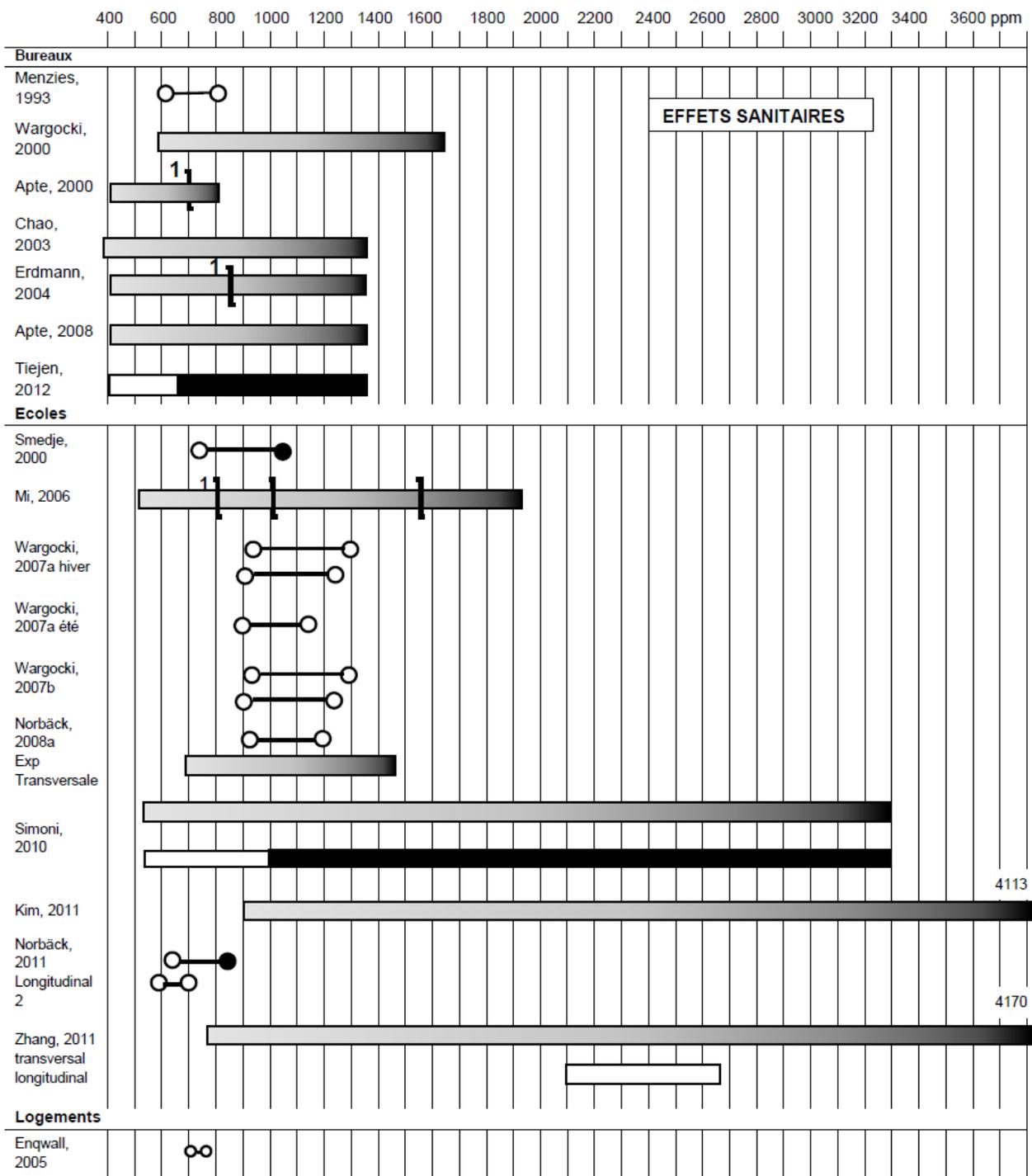
L'étude dans les logements n'apporte pas d'information, le différentiel de CO₂ étudiés étant extrêmement faible.

Etudes des relations perception de la qualité de l'air – CO₂

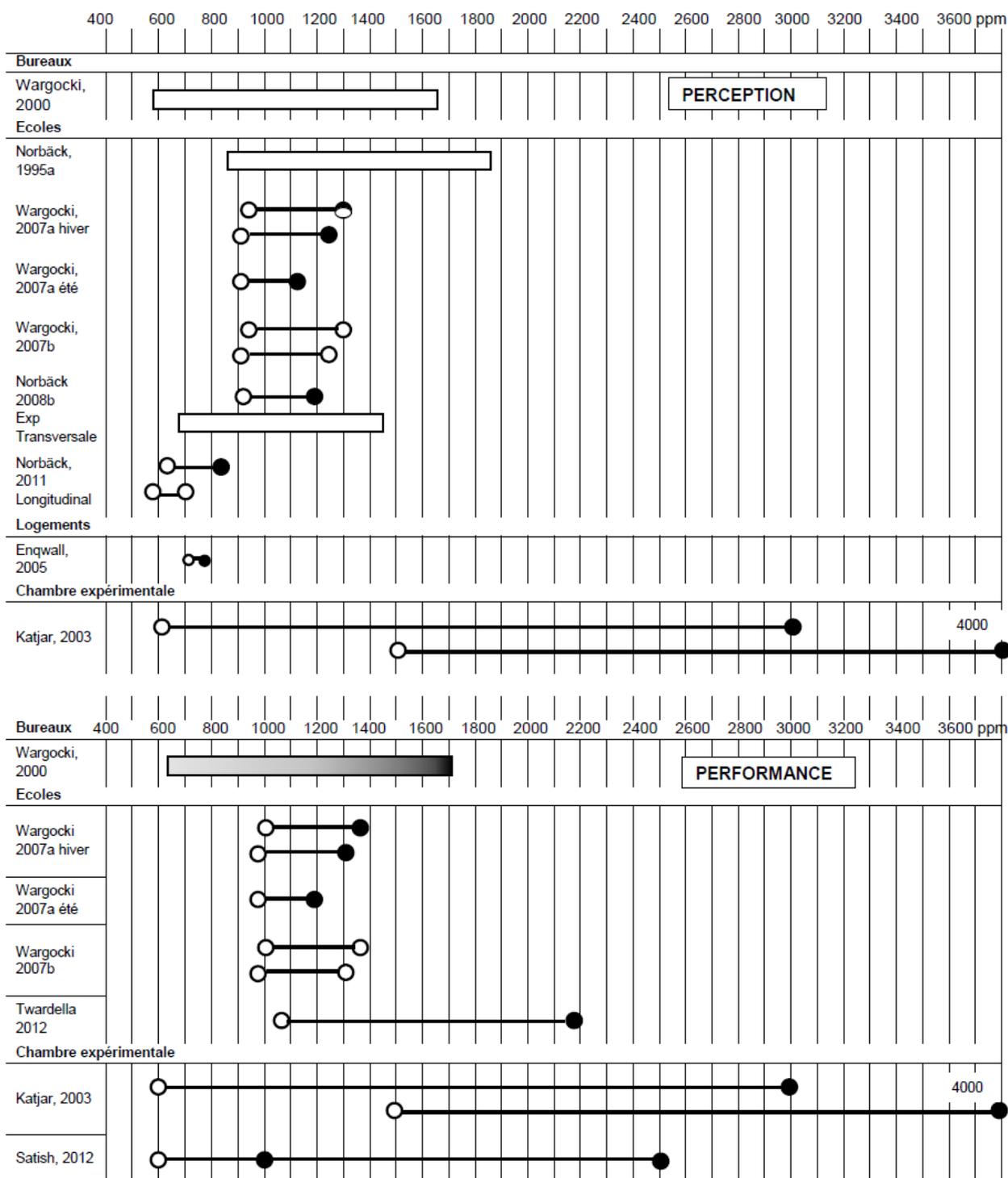
Aucune conclusion ne peut être émise en ce qui concerne la perception dans les bureaux, avec une seule étude négative. Dans les écoles, les résultats sont plus contrastés. A part l'étude la plus ancienne (niveau maximum de CO₂ au-delà de 1650 ppm), le maximum dans les autres études est autour de 1300 ppm.

Etudes des relations performance – CO₂

Les études autour de la performance sont de type expérimentales et sont toutes positives à l'exception de celle de Wargocki (2007b), malgré des instruments de mesure divers, mais cela repose sur un très petit nombre d'études, par type de lieux. Notons que les études testant l'hypothèse d'un effet propre du CO₂ ont utilisé des niveaux relativement élevés par rapport aux études expérimentales classiques, néanmoins Satish (2012) dans une bonne étude, montre un effet sur la performance démarrant autour de 1000 ppm par rapport à 600 ppm.



1 : résultats des tests de tendance (le seul OR significatif est celui contrastant le dernier décile de CO₂ (> 700 ppm pour Apte en 2000, et > 844 ppm pour Erdmann en 2004) au premier décile.



Les études incluses dans cette synthèse ont toutes mesurées les concentrations de CO₂ à l'intérieur de locaux. Elles sont, néanmoins, extrêmement hétérogènes, et en premier lieu en termes d'objectifs. Seules les études en chambre expérimentale ont pour but de tester l'hypothèse d'un effet propre du CO₂, l'ensemble des autres paramètres, et en particulier des polluants intérieurs, étant maintenus constants. Toutes les autres études considèrent le CO₂ comme un "marqueur" du niveau de ventilation et/ou de présence d'autres contaminants. Si les études transversales cherchent le plus souvent à mesurer la relation entre des effets et des concentrations de CO₂, ce n'est pas le cas des études expérimentales, que ce soit dans les bureaux, les écoles et les logements, elles ont pour but en premier lieu de tester l'influence des conditions de ventilation sur les effets chez l'homme.

La majorité des études rapportent leurs résultats sous la forme d'OR pour une augmentation de 100 ppm de CO₂ ou comparent les effets pour deux niveaux contrastés de CO₂. Il apparaît que pour répondre à la question d'une éventuelle concentration de CO₂ "seuil", les études devraient au minimum contraster les effets dans 3, ou plus, niveaux de CO₂, ce qui reste rarement fait, ou analyser la relation CO₂ (en continu)-effet sans a priori sur la forme de la relation, avec des fonctions de type « spline » qui permettraient de modéliser la forme de la relation dose-réponse et ainsi de détecter un éventuel seuil (ce qui n'a pas été fait).

Les niveaux de CO₂ rapportés et utilisés dans ce travail sont mesurés avec des méthodes diverses, un nombre variable de mesures dont la représentativité peut être questionnée, et à des moments et des pas de temps non standardisés d'une étude à l'autre.

De même le type d'effets et les outils de mesure des effets chez l'homme diffèrent d'une étude à l'autre, et ne sont pas forcément comparables. En ce qui concerne les effets sanitaires, on note que si les études dans les bureaux et l'ensemble des études expérimentales s'intéressent aux symptômes peu spécifiques regroupés sous le terme syndrome des bâtiments malsains, les études transversales dans les écoles mesurent la relation CO₂ – symptômes liés à l'asthme. En termes d'outils, si certains auteurs utilisent des questionnaires ou des outils de mesure de la performance standardisés, ce n'est pas toujours le cas. De même, une réponse à une question sur la présence ou non d'un effet sanitaire est probablement très différente de l'évaluation de cet effet sur une échelle analogique visuelle, en particulier chez des enfants.

Les protocoles d'études, en particulier ceux des études expérimentales, ne semblent pas toujours respectés, avec de nombreux résultats issus d'analyses transversales ou incomplètes.

D'une manière générale, les analyses sont relativement hétérogènes d'une étude à l'autre, en particulier les facteurs d'ajustement employés (à l'exception de facteurs tels que l'âge ou le sexe). Ces facteurs peuvent être : le tabagisme, les antécédents personnels d'allergie/asthme, les antécédents familiaux d'allergie/asthme, le niveau d'éducation des parents, le niveau socio-économique, l'ethnie, des facteurs liés à l'environnement de travail pour les études dans les bureaux, la température et l'humidité, le chauffage, la prise en compte de la structure hiérarchique de l'étude, etc. Dans certaines études, des sur-ajustements sont observés, comme le nombre de personnes et le taux de renouvellement d'air, dans la mesure où ces variables sont liées au niveau de CO₂. De même l'ajustement sur des polluants intérieurs (par exemple les moisissures, le formaldéhyde) apparaît inopportun dans ce type d'étude sur les liens CO₂-effets chez l'homme, dans la mesure où le CO₂ est considéré comme un « proximal » des polluants intérieurs. L'ajustement sur des polluants ayant principalement des sources extérieures (NO₂, SO₂) est lui complexe et rend compte d'une thématique un peu différente de celle traitée ici (en théorie les polluants extérieurs étant en grande partie introduits via le renouvellement d'air, l'augmentation de leurs concentrations peut aller de pair avec une baisse des concentrations en CO₂). En revanche pour l'ozone, il est décrit que la corrélation entre ozone à l'extérieur et l'ozone à l'intérieur est faible.

Au final, il apparaît qu'il est difficile, vu le petit nombre d'études et leurs limites, de tirer des conclusions quant aux effets chez l'homme de type perception et performance en lien avec le CO₂ par type de lieu. En revanche, les études sur les effets sur la santé dans les bureaux (N=10) d'une part, et dans les écoles (N=13) d'autre part, apportent des informations pertinentes sur l'existence de ce type d'effets en relation avec les concentrations de CO₂. En revanche, il reste difficile de connaître à quels niveaux de CO₂, ces effets apparaissent. Si une démarche de type évaluation des risques est menée pour déterminer ce seuil par type de lieu, elle doit pouvoir se baser sur les études les plus valides. Parmi les études sur les bureaux, il apparaît que l'étude américaine BASE, et en particulier la publication d'Erdmann, 2004, est la plus pertinente. Il s'agit d'une étude transversale, sur un échantillon représentatif d'immeubles aux Etats-Unis dont les résultats sont corroborés par ceux de l'étude expérimentale de Wargocki, 2000. Une des réserves est que les immeubles sont tous (sauf 1) des immeubles climatisés. Parmi les études dans les écoles, l'étude multicentrique européenne (Simoni, 2010) semble la plus pertinente, D'autres études sont proches d'un point de vue méthodologique et résultats, mais il s'agit de deux études asiatiques, dans des contextes de pollution extérieure moins favorables.

4 Références

ACGIH. 2011. TLVs and BEIs. Cincinnati, OH :American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

ASHRAE (2007), Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Standard 62.1-2007, Atlanta, GA, American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

Ramalho O, Segala C, Collignan B. & Kirchner S. (2004), Impact de la ventilation sur la qualité de l'air intérieur (1) – Etude des liens directs entre la ventilation et l'impact sanitaire sur les occupants, Rapport DDD/CVA-04.152R (DGUHC Décision n° Y 0327 du 09.10.2003), 67 p.

Ribéron J, Jallet, P, Pelé C, Ramalho O, Kirchner S. Evolution de la réglementation sanitaire des bâtiments : ventilation et CO2. Rapport ESE-Santé-2011-098R.

Seppänen Oa, Fisk Wj & Mendell Mj (1999). Association of ventilation rates and CO2-concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings, *Indoor Air*, 9, 226-252.

Sundell J & Levin H (2007), Ventilation Rates and Health: Report of an Interdisciplinary Review of the Scientific Literature, ASHRAE URP1443, Final report, 48 p.

Sundell J, Levin H, Nazaroff W, Cain W S, Fisk W, Grimsrud D, Gyntelberg F, Li Y, Persily A, Pickering A, Samet J, Spengler J, Taylor S, Weschler C. (2011), Ventilation Rates and Health: multidisciplinary review of the scientific literature, *Indoor Air*, 21, 191-204).

Wargocki P, Sundell J, Bischof W, Brundrett G, Fanger PO, Gyntelberg F, Hanssen SO, Harrison P, Pickering A, Seppänen O & Wouters P (2002), Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN), *Indoor Air*, 12, 113-128.

Références des articles non retenus

Bakó-Biró Z, Clements-Croome DJ, Kochhar N, Awbi HB, Williams MJ (2012), Ventilation rates in schools and pupils' performance, *Building and Environment*, 48, 215-223.

Gupta S, Khare M, Goyal R (2007), Sick building syndrome—A case study in a multistory centrally air-conditioned building in the Delhi City, *Building and Environment* 42, 2797–2809. Haverinen-Shaughnessy, 2011 (USA)

Haverinen-Shaughnessy U, Moschandreas DJ, Shaughnessy R. (2001). Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air*, 21(2),121-131.

Jaakkola, JJ, Reinikainen, L.M, Heinonen, O.P, Majanen, A. and Seppanen, O. (1991a) Indoor air requirements for healthy office buildings: recommendations based on epidemiologic study, *Environ. Int.*, 17, 371–378.

Jaakkola, J.J., Heinonen, O.P. and Seppanen, O. (1991b) Mechanical ventilation in office buildings and the sick building syndrome: an experimental and epidemiological study, *Indoor Air*, 1, 111–121.

Lu CY, Ma YC, Lin JM (2007). Oxidative stress associated with indoor air pollution and sick building syndrome-related symptoms among office workers in Taiwan. *Inhalation toxicology*, 19, 57-65.

Madureira J, Alvim-Ferraz MCM, Rodrigues S, Gonçalves C, Azevedo MC, Pinto E, Mayan O.(2009) Indoor air quality in schools and health symptoms among portuguese teachers. *Human and ecological risk assessment : an international journal*, 15(1),159-169.Milton, 2000 (USA)

Myatt TA, Johnston SL, Zuo Z, Wand M, Keadze T, Rudnick S, and Milton DK (2004), Detection of Airborne Rhinovirus and Its Relation to Outdoor Air Supply in Office Environments, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 169, 1187-1190.

Shaughnessy RJ, Haverinen-Shaughnessy U, Nevalainen A, Moschandreas DJ (2006). A preliminary study on the association between ventilation rate in classrooms and student performance. *Indoor air*, 16, 465-468.

Wiik R (2011). Indoor productivity measured by common response patterns to physical and psychosocial stimuli. *Indoor Air*, 21(4), 328-40.

Références des articles retenus

Apte MG, Fisk WJ & Daisey JM (2000), Associations between indoor (CO₂) concentrations and sick building syndrome symptoms in US Office Buildings: an analysis of the 1994–1996 BASE Study Data (LBNL 44385), *Indoor Air*, 10, 246-257.

Apte MG, Buchanan ISH & Mendell MJ (2008), Outdoor ozone and building-related symptoms in the BASE study, *Indoor Air*, 18, 156-170.

Chao HJ, Schwartz J, Milton DK, Burge HA (2003). The work environment and workers' health in four large office building. *Environmental Health Perspective*, 111, 1242-1248.

Engvall K, Wickman P, Norbäck D. Sick building syndrome and perceived indoor environment in relation to energy saving by reduced ventilation flow during heating season: a 1 year intervention study in dwellings. *Indoor Air*. 2005 Apr;15(2):120-6.

Erdmann CA & Apte MG (2004), Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset, *Indoor Air*, 14(s8), 127-134.

Fraga S, Ramos E, Martins A, Samudio MJ, Silva G, Guedes J, Oliveira Fernandes E, Barros H (2008), Indoor air quality and respiratory symptoms in Porto schools, *Revista Portuguesa de Pneumologia*, 14(4), 487-507.

Kajtar L, Herczeg L, Lang E. (2003), Examination of influence of CO₂ concentration by scientific methods in the laboratory, *Proceedings of the Indoor Air 2003 conference*, Singapore, 176-181.

Kim JL, Elfman L, Wieslander G, Ferm M, Torén K, Norbäck D (2010). Respiratory health among korean pupils in relation to home; school and outdoor environment. *Journal of Korean Medicine Science*, 26,166-173.

Marmot A F, Eley J, Stafford M, Stansfeld S A, Warwick E and Marmot M G (2006), Building health: an epidemiological study of "sick building syndrome" in the Whitehall II study, *Occupational and Environmental Medicine*, 63, 283-289

Menzies R, Tamblyn R, Farant JP, Hanley J, Nunes F & Tamblyn R (1993), The effect of varying levels of outdoor-air supply on the symptoms of sick building syndrome, *New English Journal of Medicine*, 328, 821-827.

Mi Y-H, Norbäck D, Tao J, Mi Y-L, Ferm M. (2006), Current asthma and respiratory symptoms among pupils in Shanghai, China: influence of building ventilation, nitrogen dioxide, ozone, and formaldehyde in classrooms, *Indoor Air*, 16: 454–464.

Norbäck, D (1995a). Subjective indoor air quality in schools – the influence of high room temperature, carpeting, fleecy wall materials and volatile organic compounds. *Indoor Air*, 5 :237-246.

Norbäck, D, Bjornsson, E, Janson, C, Widstrom, J. and Boman, G. (1995b) Asthmatic symptoms and volatile organic compounds, formaldehyde, and carbon dioxide in dwellings, *Occup. Environ. Med*, 52, 388–395.

Norbäck D & Nordström K (2008a). Sick building syndrome in relation to air exchange rate, CO₂, room temperature and relative air humidity in university computer classrooms: an experimental study, *Int Arch Occup Env Health*, 82: 21-30.

Norbäck D & Nordström K (2008b) An experimental study on effects of increased ventilation flow on students' perception of indoor environment in computer classrooms. *Indoor Air*, 18 :293-300.

Norbäck D, Wieslander G, Zhang X, Zhao Z (2011). Respiratory symptoms, perceived air quality and physiological signs in elementary school pupils in relation to displacement and mixing ventilation system: an intervention study. *Indoor Air*, 21(5),427-437.

Norbäck D, Nordström K, Zhao Z (2012). Carbon dioxide (CO₂) demand-controlled ventilation in university computer classrooms and possible effects on headache, fatigue and perceived indoor environment: an intervention study. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, Mar 16

Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, Fisk WB (2012). Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*, Sep 20.

Shendell DG, Prill R, Fisk WJ, Apte MG, Blake D, Faulkner D (2004), Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho, *Indoor Air*, 14: 333–341.

Simoni M, Annesi-Maesano I, Sigsgaard T, Norbäck D, Wieslander G, Nystad W, Canciani M, Sestini P, Viegi G (2010), School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children, *European Respiratory Journal*, 35:742-749.

Smedje G & Norbäck D (2000), New ventilation systems at select schools in Sweden – effects on asthma and exposure, *Archives of Environmental Health*, 55, 18-25.

Smedje G, Mattsson M, Walinder R (2011). Comparing mixing and displacement ventilation in classrooms: pupils' perception and health. *Indoor air*, 21 (6), 454-461.

Tietjen GE, Khubchandani J, Ghosh S, Bhattacharjee S, Kleinfelder J (2012). Headache symptoms and indoor environmental parameters: Results from the EPA BASE study. *Annals Indian Academy of Neurology*, 15(Suppl 1), S95-9.

Tsai DH, Lin JS, Chan CC (2012). Office workers' sick building syndrome and indoor carbon dioxide concentrations. *Journal of Occupational and environmental hygiene*, 9(5), 345-351.

Twardella D, Matzen W, Lahrz T, Burghardt R, Spegel H, Hendrowarsito L, Frenzel AC, Fromme H (2012). Effect of classroom air quality on students' concentration: results of a cluster-randomized cross-over experimental study. *Indoor Air*, 22(5), 378-387.

Wargocki, P, Wyon, D.P, Sundell, J, Clausen, G. and Fanger, P.O. (2000) The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity, *Indoor Air*, 10, 222–236.

Wargocki P & Wyon D (2007a), The Effects of Outdoor Air Supply Rate and Supply Air Filter Condition in Classrooms on the Performance of Schoolwork by Children, HVAC&R Research, 13(2), 165-191.

Wargocki P & Wyon D (2007b), The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children, HVAC&R Research, 13(2), 193-220. Wargocki P, Wyon DP, Fanger PO (2004). The performance and subjective responses of call-center operators with new and used supply air filters at two outdoor air supply rates. Indoor air, 14 (suppl 8), 7-16.

Zhang X, Zhao Z, Nordquist T, Norbäck D (2011), The prevalence and incidence of sick building syndrome in Chinese pupils in relation to the school environment: a two-year follow-up study, Indoor Air, 21(6), 462-471.

5 ANNEXE: Analyse des travaux retenus

L'ensemble des travaux est décrit ci-dessous selon une grille de lecture commune (cf.2.2.3).

REMARQUES sur les tableaux suivants :

Expression des concentrations en CO₂ : il s'agit toujours des concentrations totales, sauf s'il est précisé « dCO₂ », « d » signifiant le différentiel entre les concentrations intérieure et extérieure des bâtiments. A noter que certains auteurs, bien qu'ils mesurent le CO₂ extérieur, analysent leurs données en fonction du CO₂ total.

Présence d'assurance ou de contrôle qualité sur les mesures de CO₂, elle est explicite uniquement pour les travaux réalisés dans le cadre de BASE (Apte, 2002 et 2008, Erdmann, 2004 et Tiejen, 2012).

Travaux en grisé : le grisé signale les études les plus faibles sur le plan méthodologique et/ou peu informative par rapport à la problématique traitée comme justifié en base de tableau.

5.1 Bureaux

5.1.1 Effets sanitaires: symptômes de type SBS

5.1.1.1 Etudes transversales

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autre paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Marmot, 2006 Etude Whitehall II (Grande Bretagne)	44 bâtiments publics Londres et banlieue, (sans plainte, non représentatifs) 4 052 personnes (42 à 62 ans) 1991-93	Liés au SBS : 10 symptômes, non spécifiques, muqueuses, et voies respiratoires supérieures lors des 14 derniers jours	Auto-questionnaires: Quest SBS + « 30-item General Health Quest ». + Quest. sur environnement physique de travail + Quest. de Karasek pour environnement psychosocial de travail	10 points de mesures/bat (1 journée, une partie en été, une partie en hiver) dans seulement 29 bâtiments. <u>Utilisation d'une moyenne par bâtiment et catégorisation autour de 500 ppm : 25 bât. ≤ 500 ppm et 4 bât. >500ppm</u> (pas de données sur CO ₂ extérieur)	<u>Environnement physique</u> : COV, particules inhalables, moisissures et bactéries dans l'air, T°, RH, Luminosité, vitesse de l'air	<u>Variable à expliquer</u> : score=moyenne du nombre de symptômes parmi la liste des 10 symptômes SBS <u>Modèle</u> : régression linéaire multiple (RLM) (n=2 523) <u>Variable explicative</u> : bâtiment ≤ 500 ppm vs. Bâtiments > 500 ppm <u>Variables d'ajustement</u> : âge, sexe, niveau d'emploi, structure hiérarchique (personne, bâtiment) Autres analyses : RLM avec prise en compte conjointe environnement physique et environnement psychosocial (pas d'effet significatif de la saison)	Prévalences symptômes comprises entre 8,4 % et 51 % chez les femmes, et 7,8% et 36,3 % chez les hommes. Moyenne de 2,2 chez hommes et 2,7 chez femmes et variant de 1,2 à 3,2 entre les bâtiments. <u>Scores de symptômes SBS non significativement différents selon les niveaux de CO₂ (tendance NS à moins de symptômes dans les 4 bâtiments > 500 ppm)</u> Aucune variable environnement physique n'est liée aux symptômes Score de symptômes SBS significativement plus élevé si plus d'exigence au travail, moins de support, et peu de contrôle sur l'environnement (soit incapacité d'ajuster la T°, le chauffage, la lumière, ouvrir les fenêtres et plus de 10 personnes/pièces)

Conclusion : Etude négative (pas d'augmentation du nombre de symptômes de type SBS dans les bâtiments au-dessus de 500 ppm)

Intérêt : Prise en compte de l'environnement psycho-social du travail

Limites : Les mesures ont été faites dans 29 bâtiments seulement, alors que les occupants de 44 bâtiments ont répondu au questionnaire

Les mesures comme le remplissage des questionnaires ont été réalisés à des saisons différentes de l'année

Contraste entre 2 niveaux (± 500 ppm) avec seulement 4 bâtiments > 500 ppm

Les concentrations moyennes précises en CO₂ ne sont pas indiquées

Le pourcentage hommes/femmes n'est pas renseigné

Pas de notion que les symptômes disparaissent quand la personne n'est pas au travail et analyse seulement du nombre de symptômes et non des symptômes pris individuellement

Données anciennes

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autre paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Apte, 2000 Etude BASE (USA)	41 bâtiments (parmi les 100 de l'étude BASE, représentatifs du parc de bâtiments américains avec système mécanique de ventilation et tous sauf 1 avec air conditionné) 1 579 personnes 1994-96	SBS : Symptômes survenant au moins pendant 1-3 jour par semaine lors du dernier mois, avec amélioration en période hors bâtiment	Auto-quest. BASE posé la même semaine que les mesures météorologiques	3 points de mesure par bâtiment Calcul sur les 3 jours de mesure : médiane, min-max (ppm) - dCO ₂ (différence des moy sur 9 h) : 140, 6-418 - dCO ₂ max (max sur 1h –moy ext sur 9h) :350, 120-716 1 seul bâtiment avec CO ₂ > 1000 ppm	T °C-h au-dessus de 20°C: 31 HR : 35% (exclusion des bâtiments avec RH<20%) TMB (COV lié aux émissions automobiles s'infiltrant à l'intérieur): 1,2±3,0 ppb (autres COV non lié en univarié aux symptômes)	<u>Variables à expliquer</u> : Symptômes d'irritations (nez, sinus, yeux, gorge) et symptômes respiratoires (toux, sifflement, oppression, gêne) <u>Modèle</u> : régression logistique <u>Variable explicative</u> : 1 : moy dCO ₂ en continu (OR/100ppm) 2 : dCO ₂ catégorisé sur la médiane 3 : moy dCO ₂ max en continu (OR/250 ppm) 4 : dCO ₂ max catégorisé sur la médiane 5 : valeur max dCO ₂ /bat 6 : valeur max dCO ₂ max/bat <u>Variables d'ajustement</u> : âge, sexe, tabagisme, moquette, HR, T° et TMB <u>Etude dose-réponse</u> : dCO ₂ catégorisé en 5 classes après catégorisation du dCO ₂ en décile, référence : 1 ^{er} décile (<55 ppm), max : dernier décile (>300 ppm), 3 classes intermédiaire : 55-140, 140-220, 220-300 ppm Test de tendance en introduisant en continu la variable CO ₂ en 5 classes	Symptômes (prévalence) : OR (IC-95%) pour >100 ppm Irritations muqueuses (27,1%) : 1,1 (1,0-1,3) ¹ 1,3 (1,0-1,7) ² 1,3 (1,0-1,5) ³ 1,2 (0,9-1,5) ⁴ 1,7 (1,1-2,7) ⁵ 1,9 (1,1-3,2) ⁶ Mal de gorge (6,9 %) : 1,5 (1,2-1,9) ¹ 1,4 (0,9-2,2) ² 2,3 (1,6-3,2) ³ 2,0 (1,2-3,3) ⁴ 6,2 (2,5-15) ⁵ 10,2 (3,6-29) ⁶ Nez/sinus (13,1 %) : 1,2 (1,0-1,4) ¹ 1,5 (1,0-2,1) ² 1,4 (1,1-1,8) ³ 2,1 (1,1-4,1) ⁴ 2,1 (1,1-4,1) ⁵ 2,7 (1,4-5,6) ⁶ Sifflements (2,5%) 1,4 (1,0-2,0) ¹ 1,3 (1,0-1,7) ² 1,9 (1,1-3,4) ³ 3,0 (1,2-7,9) ⁴ 4,5 (1,1-18) ⁵ 6,3 (1,2-34) ⁶ Oppression thoracique (2,4 %) : 1,5 (1,1-2,2) ¹ 2,1 (0,4-1,9) ² 4,9 (1,2-21) ⁵ Résultats non significatifs pour sécheresse/irritation oculaire (19,9 %), toux (5,6 %), difficulté respiratoire (2,3 %) Dose réponse : dose réponse significative pour : Irritations des muqueuses (p<0,05), mal de gorge (p<0,005), nez/sinus (p<0,05), sifflements (p<0,05) et oppression thoracique (p<0,05) (les valeurs des OR ne sont pas rapportées)

Conclusion : Etude positive (lien entre plusieurs symptômes SBS et des niveaux de CO₂ intérieur faiblement supérieur au niveau de CO₂ extérieur)

Intérêt : Bonne définition des symptômes SBS

Recherche de relations dose-réponse

Limites : Données anciennes

Tous les bâtiments équipés de système de ventilation avec air conditionné

Pas d'ajustement sur chauffage, climatisation, personnes sensibles, bâtiments

Pour estimation CO₂ : seulement 3 mesures par bâtiment

Relations dose-réponse : les tests de tendance peuvent être significatifs sans que les graphiques (pas de données chiffrées) montrent une progression nette des OR dans les classes croissantes de CO₂

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ ventilation /	Autre paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Erdmann 2004 Etude BASE (USA)	100 bâtiments représentatifs du parc de bâtiments américains avec système mécanique de ventilation et tous sauf 1 avec air conditionné 4 200 pers. 66 % de femmes 1994-98	Voir Apte, 2000	Voir Apte, 2000	Utilisation des données d'une seule journée (car données complètes) Moyenne (ET), min-max (ppm) : dCO ₂ : 260 (130), 4-610	T °C-TWA au-dessus de 20°C: 25 HR<20% : 16 % degrés-jours : chauffage :2200 ±1163 Refroidissement :801±583 TMB : 0,98±1,1 ppb (<i>autres COV non lié en univarié aux symptômes</i>)	<u>Variables à expliquer</u> : - chacun des symptômes <u>Modèle</u> : régression logistique <u>Variable explicative</u> : dCO ₂ en continu (OR/100ppm) <u>Variables d'ajustement</u> 1 : âge, sexe, tabagisme, moquette, HR, T° ; TMB 7 : + saison, degrés-jours de chauffage, degrés-jours de refroidissement (climatisation) et allergies, asthme, migraine, sensibilité tabac environnementale, ou chimique <u>Résultats après stratification</u> 8 : résultats chez les femmes avec ajust 1 9 : résultats dans population sensibles (allergies, asthme, migraine, sensibilité tabac environnementale, ou produit chimique) <u>Etude dose-réponse</u> : ajust 1+7 référence : 1 ^{er} décile (<110), max : dernier décile (>444ppm), 3 classes intermédiaires : 110-188, 188-273, 273-444 ppm Test de tendance en introduisant en continu la variable CO ₂ en 5 classes	Symptômes (prévalence) : OR (IC-95%) pour ↗100 ppm Irritations muqueuses (29 %) : 1,05 (0,98-1,1) ¹ 1,08 (1,02-1,15) ⁷ 2,07 (1,78-2,42) ⁸ 1,88 (1,55-2,29) ⁹ mal de gorge (7 %) : 1,15 (1,05-1,26) ¹ : 1,21 (1,09-2,2) ⁷ : 2,12 (1,56-2,89) ⁸ : 2,21 (1,46-3,35) ⁹ nez/sinus (13 %) : 1,05 (0,98-1,13) ¹ 1,11 (1,02-1,20) ⁷ 1,80 (1,45-2,24) ⁸ 2,34 (1,73-3,16) ⁹ sifflements (2 %) : 1,21 (1,03-1,43) ¹ : 1,23 (1,01-1,48) ⁷ : 2,44 (1,10-5,40) ⁹ sécheresse/irritation : 1,09 (1,02-1,17) ⁷ oculaire (19 %) : 2,18 (1,80-2,63) ⁸ : 2,14 (1,66-2,74) ⁹ éternuements (11 %) : 1,09 (1,00-1,19) ⁷ : 1,99 (1,58-2,52) ⁸ : 1,52 (1,14-2,01) ⁹ oppression thoracique (2 %) : 1,84 (1,10-3,07) ⁸ : 11,13 (2,72-45,53) ⁹ difficulté respiratoire (2 %) : 3,00 (1,53-5,89) ⁸ : 5,53 (1,72-17,80) ⁹ toux (5 %) : 1,80 (1,29-2,51) ⁸ : 1,90 (1,22-2,95) ⁹ <u>Dose réponse</u> : dose-réponse significative pour irritations muqueuses (p=0,0007), sécheresse/irritation oculaire (p=0,009), mal de gorge (p=0,0008), nez/sinus (p=0,01), éternuements (p<0,01), sifflements (p=0,03) (les valeurs des OR ne sont pas rapportées)
Conclusion : Etude positive (lien entre symptômes SBS et des niveaux de CO ₂ intérieur faiblement supérieur au niveau de CO ₂ extérieur)							
Intérêt : Bonne définition des symptômes SBS Recherche d'une relation dose-réponse Plusieurs ajustements sur chauffage, climatisation, personnes sensibles Résultats chez les femmes et dans populations sensibles (↗ OR)							
Limites : Données anciennes Tous les bâtiments équipés de système de ventilation avec air conditionné Pour estimation CO ₂ : seulement 3 mesures par bâtiment Relations dose-réponse : les tests de tendance peuvent être significatifs sans que les graphiques montrent une progression nette des OR dans les classes croissantes de CO ₂							

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autre paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Apte, 2008 Etude BASE (USA)	Voir Erdmann, 2004	Voir Apte 2000 Symptômes individuels : toux, yeux secs, peau sèche ou irritée, mal de tête + Regroupement de symptômes : respiratoires inférieurs, respiratoires supérieurs, neurologiques	Voir Apte, 2000	Voir Erdmann, 2004	O ₃ , collecté rétrospectivement à partir des stations extérieures (0,5-300 km/bâtiment). (pas d'O ₃ intérieur) pour le jour de remplissage du questionnaire 3 calculs (moyenne, min-max, µg/m ³) : A : moyenne sur 24h (50, 4,9-132) B : moyenne sur la journée de travail (8-17h) (67, 4,9-169) C : moyenne pour 15-18h (71, 4,9-210) TMB (COV)	<u>Variables à expliquer</u> : - chacun des symptômes <u>Modèle</u> : régression logistique <u>Variable explicative</u> : dCO ₂ en continu (OR/100ppm) <u>Variables d'ajustement</u> : âge, sexe, tabagisme, sensibilités individuelles, HR, T°, TMB, chauffage, climatisation, saison, O ₃ Analyse O₃-symptômes <u>Variable explicative</u> : O ₃ (A, B, C) <u>Variables ajustement</u> : Age, sexe, tabagisme, moquette, HR, T° ; TMB, saison, degrés-jours de chauffage, degrés-jours de refroidissement (climatisation) et allergies, asthme, migraine, sensibilité tabac environnementale, ou chimique, Etude dose réponse : O ₃ (C) en quintile	Relation dCO₂-symptômes pour ↗100 ppm <u>OR : 1,08 (1,01-1,16) pour symptômes respiratoires supérieurs</u> (par contre symptômes respiratoires inférieurs et yeux secs liés significativement à dCO ₂ , mais NS une fois ajusté sur O ₃) Relation O₃-symptômes : Symptômes (prévalence) : OR (IC-95%) ↗10 µg/m ³ d'O ₃ : Symptômes respiratoires supérieurs (21 %) : 1,04 (1,01-1,08) ^A 1,03 (1,00-1,06) ^B 1,04 (1,02-1,06) ^C Sécheresse oculaire (18,6 %) : 1,03 (1,01-1,05) ^C Neurologiques (fatigue, troubles concentration) (19,2 %) : 1,03 (1,01-1,05) ^C Maux de tête (15,2 %) : 1,03 (1,00-1,05) ^C Aucune association significative pour les symptômes : toux (5,1 %) et sécheresse cutanée (4,7 %) Dose-réponse O₃ : Relation dose-réponse significative uniquement pour symptômes respiratoires supérieurs (NS avec les autres symptômes) Des corrélations significatives entre O ₃ et quelques COV
Conclusion : Etude positive : la relation, après ajustement sur O ₃ extérieur, n'est significative qu'avec les symptômes des voies aériennes supérieures							
Intérêt : Bonne définition des symptômes SBS Plusieurs ajustements sur chauffage, climatisation, personnes sensibles Etude des liens entre SBS et l'ozone extérieure (polluant influant sur la chimie des polluants intérieurs) : lien CO ₂ /SBS conservé partiellement							
Limites : Données anciennes Pour estimation CO ₂ : seulement 3 mesures par bâtiment Pour estimation O ₃ , pas de mesure intérieure, ni extérieure, seulement les données des stations urbaines							

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ ventilation /	Autre paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Tiejen, 2012 Etude BASE (USA)	Voir Erdmann, 2004.	Voir Apte, 2000 Focus sur migraines et maux de tête	Voir Apte, 2000	valeurs de dCO ₂ non fournies (Erdmann, 2004 : moyenne est de 260 ±130	CO Luminosité Température RH Bruit COV PM10	<p><u>Variables à expliquer</u> :</p> <p>- migraine et maux de tête (selon 3 niveaux de fréquence)</p> <p><u>Modèle</u> : régression logistique</p> <p><u>Variable explicative</u> :</p> <p>Deux niveaux de CO₂ : au-dessus et en dessous de la moyenne (moyenne considérée comme niveau de confort),</p> <p><u>Variables d'ajustement</u></p> <p>âge, sexe</p> <p><u>Autres variables explicatives</u> :</p> <p>les variables environnementales sont introduites catégorisées au-dessus et en dessous de la moyenne (moyenne considérée comme niveau de confort), sauf pour T° avec niveau de confort entre 69-75°F et HR entre 30-60%</p>	<p>Symptômes (prévalence) : OR (IC-95%) (référence : niveau de confort):</p> <p>Relation CO₂-symptômes : OR > moyenne vs. < moyenne</p> <p>Migraine (21 %) : 1,24 (1,06-1,44)</p> <p>Maux de tête (occasionnel) : 1,08 (1,04-1,19)</p> <p>Maux de tête (fréquent) : 1,28 (1,19-1,37)</p> <p>Maux de tête (continuuel) : 1,33 (1,05-1,69)</p> <p>Relation autres variables environnementales-migraines</p> <p>CO : 1,39 (1,09-1,78)</p> <p>Luminosité : 1,04 (1,03-1,22)</p> <p>Température : 1,14 (1,01-1,33)</p> <p>RH : 1,06 (1,04-1,23)</p> <p>Bruit : 1,05 (1,03-1,22)</p> <p>COV : 1,04 (1,02-1,22)</p> <p>PM10 : 1,04 (1,03-1,25)</p>
<p>Conclusion : Etude positive (lien entre symptômes type migraine, mal de tête et niveau de CO₂)</p> <p>Intérêt : Bonne définition des symptômes SBS</p> <p>Limites : Données environnementales, y compris CO₂, catégorisées en 2 classes seulement</p> <p>Analyse statistique moins satisfaisantes que les études BASE précédentes (peu de variables d'ajustement et pas d'ajustement mutuel entre variables environnementales)</p> <p>Données anciennes</p> <p>Pour estimation CO₂ : seulement 3 mesures par bâtiment</p>							

5.1.1.2 Etudes longitudinales

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ ventilation /	Autre paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Chao, 2003 USA	21 bureaux dans 4 bâtiments de Boston 98 personnes (80 % de femmes) 1 année (à partir de mai 1997)	SBS Symptômes survenant au moins pendant 1 jour de la semaine lors du dernier mois, avec amélioration en période non travaillée Focus sur 3 groupes : respiratoires supérieurs, irritation yeux et non spécifiques	Auto-quest. BASE + version courte posée toute les 6 semaines	10 périodes de mesures (toutes les 6 semaines) 1 heure (pas), mesure en continu sur l'année d'étude. calcul sur 9-17h/sem/site Moy (ET), min-max) 689.4±184.0 - 379.5-1344.7 (Chao et al. Environ Health Perspect, 110 : 777-782 (2002)	Particules et moisissures (air, plancher, chaise), T°, RH, Moisissures négativement corrélées au CO2	<u>Variables à expliquer</u> : - groupe de symptômes <u>Modèle</u> : modèle mixte (régression logistique multivariée) pour prise compte des données répétées <u>Variable explicative</u> : CO2 (en linéaire) <u>Variables d'ajustement</u> : Modèle 1 : date d'échantillonnage Modèle 2 : date d'échantillonnage, moisissures Modèle 3 : date d'échantillonnage, moisissures, asthme Modèle 4 : date d'échantillonnage, moisissures, asthme, nombre personnes, propreté bureau, charge de travail <u>Autres analyses</u> : - poussières-irritations yeux (ajusté sur date d'échantillonnage, âge, asthme, propreté) - Moisissures-symptômes non spécifiques (ajusté sur date d'échantillonnage, sexe, asthme, nombre personnes, propreté, satisfaction travail)	Relation SBS-CO2 : OR (IC-95 %) pour ↗ d'un interquartile Modèle 1 : - Irritation yeux : 0,95 (0,72-1,26) - Non spécifiques : 1,24 (0,86-1,78) - Symptômes respiratoires supérieurs : 1,45 (1,01-2,08) Modèle 2 : - Symptômes respiratoires supérieurs : 1,45 (1,01-2,08) Modèle 3 : - Symptômes respiratoires supérieurs : 1,41 (0,98-2,03) Modèle 4 : - Symptômes respiratoires supérieurs : CO2 ne reste pas dans le modèle Relation SBS-autres variables environnementales : OR (IC-95 %) pour ↗ d'un interquartile - poussières : irritations yeux : 1,46 (1,14-1,86) - moisissures : symptômes non spécifiques : 1,87 (1,11-3,15)
Conclusion : Etude de panel positive pour uniquement les symptômes des voies respiratoires supérieures (résultat NS après ajustement sur nombre de personnes, propreté des bureaux et charge de travail)							
Intérêt : Bonne définition des symptômes SBS (même questionnaire que l'étude BASE) Design longitudinal avec bonne analyse (modèle mixte) Plusieurs ajustements sur chauffage, climatisation, personnes sensibles Relation entre les irritations des yeux et les particules et entre les symptômes non spécifiques et les moisissures							
Limites : Pas d'ajustement mutuel des différentes variables environnementales Pas d'information sur niveau extérieur de CO2							

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autre paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Tsai, 2012 Taiwan	6ième étage d'1 bâtiment avec air conditionné (open-space avec cloison d'1,50 mètre) 111 (79% d'hommes) 2003	17 symptômes (5 groupes : irritations yeux, non-spécifiques, respiratoires supérieurs, respiratoires inférieurs, irritations peau)	Auto-Quest. NIOSH Symptômes au moins une fois par semaine, qui apparaît lors de l'entrée dans le bâtiment et disparaît à la sortie.	1 point de mesure/6 ^{ème} étage, 1 journée (9-18h) par saison, pas de 1 min (IAQ-CALC, model 8762 ; TSIIInc, shoreview, Minn.) Moyenne : Août : 431±19 (375-484), ext : 385 ppm novembre :876±48 (658-959); ext :400 ppm	PM2,5, T°, HR	<u>Variables à expliquer :</u> - groupe de symptômes et symptômes pris individuellement <u>Modèle :</u> modèle GEE (modèle logistique multivarié) <u>Variable explicative :</u> CO ₂ : >800 ppm (hiver) vs. < 500 ppm été) <u>Variables d'ajustement :</u> Aucune	Relation SBS-CO₂ : OR (IC-95 %) pour >800 ppm vs. <500 : Irritation des yeux : 1,7 (1,1-2,7) Symptômes non spécifiques : 1,4 (0,9-2,2) Symptômes respiratoires supérieurs : 1,7 (1,0-2,7) Symptômes respiratoires inférieurs : 1,5 (0,8-2,6) Irritations peau : 0,9 (0,4-2,0) Mal de tête : 1,7 (1,0-3,0) Difficultés de concentration : 1,7 (1,0-2,9) Autres analyses : Pas de relation significative avec âge et tabagisme Relations significatives avec sexe (plus de symptômes chez les femmes) et allergies (plus de symptômes chez allergiques)
Conclusion : Etude transversale répétée positive (lien entre symptômes voies respiratoires supérieures, irritations des yeux, symptômes généraux et période hivernale avec niveau plus élevé de CO ₂)							
Intérêt : Bonne définition des symptômes SBS							
Limites : Aucun ajustement, simple comparaison entre les 2 saisons 1 seul point de mesure pour tout l'étage CO ₂ catégorisé en 2 classes (été/ hiver)							

5.1.1.3 Etudes expérimentales

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ ventilation /	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Menzies 1993 Canada	4 bâtiments de bureau (2 étages/bat) fenêtres non ouvrables et système mécanique de ventilation 1 546 pers (dont 637 personnes ont rempli les 6 questionnaires) 47 % de femmes	<u>Type d'étude</u> : randomisée cross over en double-aveugle <u>Intervention</u> : 3 périodes de 2 semaines avec alternance aléatoire des niveaux de ventilation (14 ou 30 L/pers avec un apport d'air extérieur respectivement de 7 ou 32 % de l'air total insufflé) Conditions opposées entre les 2 bâtiments Niveau de ventilation calculé à partir du CO ₂ 2 bâtiments étudiés au printemps, 2 en automne	symptômes SBS en 3 groupes : non spécifiques, irritations, respiratoires, supérieurs	Auto-Quest. au début de l'étude + Q court chaque semaine avec symptômes du jour + Quest sur satisfaction vis-à-vis environnement (9 items)	8 à 12 points de mesures par étage, le jour de remplissage du Q, en milieu d'après-midi Moyennes : 621 ppm (ventil+) et 807 ppm (ventil -) Δ 186 ppm	COV totaux : 287 (ventil +) vs. 792 µg/m ³ (ventil -) Formaldéhyde : 0,024 (ventil +) vs 0,039 ppm (ventil -) NOx, CO, particules, moisissures, T°, HR, Vitesse de l'air	Analyse 1 <u>Modèle</u> : uniquement sur paires discordantes : symptômes + et ventil. + et symptômes + et ventil. - Analyse 2 <u>Variable explicative</u> : moyennes hebdomadaires CO ₂ <u>Modèle</u> : régression logistique conditionnelle <u>Variables ajustement</u> : <u>2.1.</u> vitesse de l'air, T°, HR <u>2.2.</u> semaine, vitesse de l'air, T°, HR, score satisfaction	50% des participants ont au moins 1 symptôme/semaine et forte ↘ symptômes au cours de l'étude. Analyse 1 Au moins 1 symptôme : OR=1,0 (0,9-1,1) Irritations : OR=1,0 (0,8-1,1) Non spécifiques : OR=1,1 (0,9-1,2) Analyse 2 : OR (IC-95%) pour ↘ de 400 ppm <u>Ajustement 2.1</u> Au moins 1 symptôme : OR=1,0 (0,8-1,0) <u>Ajustement 2.2</u> Au moins 1 symptôme : OR=1,0 (0,8-1,2) Relation SBS-autres variables Vitesse (↘ de 0,1m/sec) : OR=1,0 (1,0-1,1) Humidité (↘ de 40 à 30 %) : OR=1,1 (0,9-1,1)
Conclusion : Etude négative (pas de lien entre symptômes SBS et niveau de CO ₂ (seulement 186 ppm de différence entre les 2 niveaux))								
Intérêt : Hypothèse des auteurs : les bâtiments choisis n'étaient pas malsains								
Limites : Pas de mesures de CO ₂ extérieur Durée de mesures du CO ₂ non renseigné Augmentation du niveau de ventilation par apport d'un mélange d'air extérieur								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2000 Danemark	1 espace de bureau expérimental classé « low-polluting » (CEN, 1998) 30 étudiantes volontaires	<u>Type d'étude</u> : randomisée, cross over à l'aveugle <u>Intervention</u> : 3 semaines (13h-18h- 275 min/jour), 5 groupes de 6 personnes exposés aléatoirement à 3 niveaux de ventilation, 3, 10, 30 L/s/pers, 1 semaine/condition avec chaque fois 1 tapis (source pollution) T° (22°), HR (40%), vitesse de l'air (0,0m/sec), bruit (42 dB) maintenus constants Niveau de ventilation calculé à partir d'un gaz traceur	20 symptômes SBS sur échelle visuelle analogique (0 à 100 ; EVA) + irritations des yeux, nez et gorge sur une échelle ordinale de 1 à 6	Auto-Quest. déjà utilisé par les auteurs Tous les jours Questionnaire irritations renseigné tous les jours à l'entrée dans la salle, pendant et après la pause (après être sorti de la pièce)	dCO ₂ Moyennes selon niveau de ventilation (L/s/pers) : 3 : 1266±68 10 : 477±26 30 : 195±18	dO ₃ ext/int 3 : 16/0 10 : 18/4 30 : 27/16 Formaldéhyde 3 : 5 10 : 3,2 30 : 0,8 TCOV et aldéhyde C5-C10 : inférieur à la LD	<u>Variable explicative</u> : Niveau de ventilation <u>Modèle</u> : Tests de tendance via analyses non paramétriques pour données ordonnées (test de Page)	<u>Pendant l'intervention</u> avec augmentation de la ventilation (3, 10, 30 L/s/pers) : - ↘ irritations de la gorge (EVA) - ↘ significative de 4 symptômes: sécheresse de la gorge, de la bouche, difficulté à penser clairement, sensation d'être mal
Conclusion : Etude positive (symptômes présents dès dCO ₂ =195 ppm)								
Intérêt : Etude s'apparentant en une étude en chambre expérimentale (aucune source de pollution intérieure), avec ici introduction d'un tapis comme source de pollution Confirmation de la diminution du formaldéhyde et augmentation O ₃ intérieur avec l'augmentation de la ventilation Test de la relation dose-réponse (↘ symptômes dans les classes décroissantes de ventilation)								
Limites : Symptômes SBS évalués sur échelle analogique visuelle (différent des études épidémiologiques) et des relations avec seulement 4 symptômes sur 20								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ ventilation /	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2004 Danemark	1 open-space (centre d'appel téléphonique) situé dans 1 bâtiment. de bureau 26 opérateurs (dont seulement 5 ont des données sur les 8 semaines)	<u>Type d'étude</u> : étude sur un groupe unique de personnes <u>Intervention</u> : 4 conditions combinant filtre usagé vs neuf et taux de ventilation 2.5 vs 25 L/s/personne 1 condition par semaine (un seul facteur changé entre 2 semaines consécutives), chaque condition répétée 2 fois (8 semaines d'expérience) Ventilation quantifiée par gaz traceur	20 symptômes SBS sur échelle visuelle analogique (0 à 100) + irritations des yeux, nez et gorge sur une échelle ordinale de 1 à 6	Auto-Quest. un jour/semaine	Vaisala:CO2 transmitter, mesure en continu avec enregistreur (Onset:Hobo) dCO ₂ (moy): Filtre usé+faible ventil : 721±95 Filtre usé+forte ventil : 231±60 Filtre neuf+faible ventil : 830±175 Filtre neuf+forte ventil : 223±27	T°, HR, bruit, luminosité, et O3 ext (variant peu entre les conditions) Particules (0,75->15 µm) (plus de particules de diamètre élevé à l'intérieur en présence d'un filtre neuf, signant origine extérieure des particules)	Analyse 1 <u>Variable explicative</u> : 4 conditions <u>Modèle</u> : Analyse de rang non paramétrique (Friedman) : analyse globale et analyses 2 à 2 Analyse 2 <u>Variable explicative</u> : Changement entre 2 conditions <u>Modèle</u> : Analyse permettant comparaison de deux conditions successives « transit »	Analyse 1 - Irritations du nez (p<0,007): ↘ irritations avec forte ventilation et filtre neuf ↗ irritations avec filtre neuf et faible ventilation - Irritations des yeux (p<0,045) ↗ irritations avec filtre neuf et faible ventilation Analyse 2 - changement filtre usager pour un neuf à faible ventilation : Peau moins sèche (p=0,012) Moins de fatigue (p=0,018) - changement d'une faible vers forte ventilation avec filtre neuf : Moins d'irritations des yeux (p=0,044) Sentiment d'être mieux (p=0,027) -
Conclusion : Etude positive (lien entre ↘ symptômes d'irritations et ↗ niveau de ventilation)								
Intérêt : Etude expérimentale dans un centre d'appel téléphonique								
Limites : Symptômes SBS évalués sur échelle analogique visuelle ((différent des études épidémiologiques) : des relations avec seulement quelques symptômes Mélange de 2 interventions : ventilation et filtre, difficilement interprétable Seulement 26 opérateurs, dont seulement 5 ont des données complètes, et de très nombreuses données ont été exclues (certains créneaux horaires notamment)								

5.1.2 Perception de la qualité de l'air

5.1.2.1 1.2.1. Etudes expérimentales

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Perceptions	Méthode recueil perceptions	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2000 Danemark	1 espace de bureau « low-polluting » (CEN, 1998) 30 étudiantes volontaires	<u>Type d'étude</u> : randomisée, cross over en simple aveugle <u>Intervention</u> : 3 semaines (13h-18h- 275 min/jour), 5 groupes de 6 personnes exposés aléatoirement à 3 niveaux de ventilation, 3, 10, 30 L/s/pers, 1 semaine/condition avec chaque fois 1 tapis (source pollution) T° (22°), HR (40%), vitesse de l'air (0,0m/sec), bruit (42 dB) maintenus constants Niveau de ventilation calculé à partir d'un gaz traceur	Echelle continue de satisfaction de qualité de l'air (de -1 : totalement non acceptable à 0 : juste non acceptable ; de 0 juste acceptable à +1 totalement acceptable) Echelle sur 5 perceptions : humidité, fraîcheur, luminosité, bruit, propreté) Echelle sur perception des odeurs (en 6 classes) Echelle confort thermique (en 7 classes)	Questionnaires perception renseignés à l'entrée dans la salle, pendant et après la pause (après être sorti de la pièce) (+ questionnaire renseigné à la sortie à propos de l'air extérieur)	dCO ₂ Moyennes selon niveau de ventilation (L/s/pers) : 3 : 1266±68 10 : 477±26 30 : 195±18	dO3 ext/int 3 : 16/0 10 : 18/4 30 : 27/16 Formaldéhyde 3 : 5 10 : 3,2 30 : 0,8 TCOV et aldéhyde C5-C10 : inférieur à la LD	<u>Variable explicative</u> : Niveaux de ventilation <u>Modèle</u> : Analyse de variance pour mesures répétées (si données normales) Analyse non paramétrique (si données non normales)	<u>A l'entrée dans la salle</u> : relations linéaires significatives en relation avec ↘ du niveau de ventilation (30 → 10 → 3) : - ↗ satisfaction qualité de l'air (p<0,002) - ↗ satisfaction fraîcheur de l'air (p<0,05) - ↘ perception odeur (p<0,02) <u>Après la pause</u> : relations linéaires significatives en relation avec ↘ du niveau de ventilation (30 → 10 → 3) : - ↗ satisfaction qualité de l'air (p<0,01) - ↘ perception odeur (p=0,10) <u>Pendant l'intervention</u> , pas de lien significatif entre perceptions et niveaux de ventilation

Conclusion : Etude positive uniquement pour des perceptions à l'entrée dans la salle (a priori, non liées au niveau de CO₂ pendant l'expérimentation). Pas de relation perception-ventilation en cours d'expérimentation

Intérêt : Etude s'apparentant en une étude en chambre expérimentale (aucune source de pollution intérieure), avec ici introduction d'un tapis comme source de pollution

Diminution du formaldéhyde et augmentation O₃ intérieur avec l'augmentation de la ventilation

Test de la relation dose-réponse

Limites : Les perceptions à l'entrée dans la salle ne paraissent pas pouvoir être liées aux niveaux de CO₂, qui sont des moyennes pendant la durée d'expérimentation

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Perceptions	Méthode recueil perceptions	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargoocki, 2004	1 open-space (centre d'appel téléphonique) situé dans 1 bâtiment. de bureau	<u>Type d'étude</u> : étude cross-over <u>Intervention</u> : 4 conditions combinant filtre usagé vs neuf et taux de ventilation 2.5 vs 25 L/s/personne	idem Wargoocki 2000	Auto-Quest. un jour/semaine	Vaisala:CO2 transmitter, mesure en continu avec enregistreur (Onset:Hobo) dCO ₂ (moy maximales): Filtre usé+faible ventil : 721±95 Filtre usé+ forte ventil : 231±60 Filtre neuf+faible ventil : 830±175 Filtre neuf+forte ventil : 223±27	T°, HR, bruit, luminosité, et O ₃ ext (variant peu entre les conditions) Particules (0,75->15 µm) (plus de particules de diamètre élevé à l'intérieur en présence d'un filtre neuf, signant origine extérieure des particules)	Analyse 1 <u>Variable explicative</u> : 4 conditions <u>Modèle</u> : Analyse de variance (ANOVA ou non paramétrique selon distribution variable) Analyse 2 après pool des données sur les conditions identiques <u>Variable explicative</u> : Changement entre 2 conditions <u>Modèle</u> : « analyse de transit » : traitement des paires de données de manière indépendante, exclusion des réponses incohérentes entre deux conditions identiques.	Analyse 1 : - ↗ luminosité (p<0,003) avec forte ventilation et filtre neuf - ↗ confort thermique (p<0,02) avec forte ventilation quel que soit le filtre Analyse 2 : - changement filtre usager pour un neuf à faible ventilation : Perception air moins sec (p=0,039) Perception air plus frais (p=0,005) - changement d'une faible vers forte ventilation avec filtre neuf : Meilleure luminosité (p=0,001) Bureaux plus propres (p0,015) - changement filtre neuf pour un usagé à forte ventilation : Moins bonne acceptabilité de qualité de l'air (p=0,059) Moins bonne luminosité (p=0,034) Bureaux moins propres (p0,059)
Danemark	26 opérateurs (dont seulement 5 ont des données sur les 8 semaines)	1 condition par semaine (un seul facteur changé entre 2 semaines consécutives), chaque condition répétée 2 fois (8 semaines d'expérience) Ventilation quantifiée par gaz traceur						
Conclusion : Etude positive (lien entre certaines perceptions et ↗ niveau de ventilation)								
Intérêt : Etude expérimentale dans un centre d'appel téléphonique								
Limites : Mélange de 2 interventions : ventilation et filtre, difficilement interprétable								
Seulement 26 opérateurs, dont seulement 5 ont des données complètes, et de très nombreuses données ont été exclues (certains créneaux horaires notamment)								

5.1.3 Performance

5.1.3.1 1.3.1. Etudes expérimentales

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Performance	Méthode recueil performance	CO ₂ ventilation /	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2000 Danemark	1 espace de bureau « low-polluting » (CEN, 1998) 30 étudiantes volontaires	<u>Type d'étude</u> : randomisée, cross over à l'aveugle <u>Intervention</u> : 3 semaines (13h-18h- 275 min/jour), 5 groupes de 6 personnes exposés aléatoirement à 3 niveaux de ventilation, 3, 10, 30 L/s/pers, 1 semaine/condition avec chaque fois 1 tapis (source pollution) T° (22°), HR (40%), vitesse de l'air (0,0m/sec), bruit (42 dB) maintenus constants Niveau de ventilation calculé à partir d'un gaz traceur	Tests de saisie de texte (55 mn sur PC), d'additions (20 min), de corrections d'épreuves (20 min) et d'imagination (25 min)	6 versions des 4 tests (2 par exposition)	dCO ₂ Moyennes selon niveau de ventilation (L/s/pers) : 3 : 1266±68 10 : 477±26 30 : 195±18	dO ₃ ext/int 3 : 16/0 10 : 18/4 30 : 27/16 Formaldéhyde de 3 : 5 10 : 3,2 30 : 0,8 TCOV et aldéhyde C5-C10 : inférieur à la LD	<u>Variable à expliquer</u> : Vitesse et exactitude (pour saisie, addition et corrections) <u>Variable explicative</u> : Niveaux de ventilation <u>Modèles</u> : - Analyse de variance pour mesures répétées - Analyse non paramétrique « Page test » - Test paramétrique de tendance (vis-à-vis des niveaux de ventilation après log transformation)	Analyse de variance : tendances non significatives à ↗ performance avec ↗ ventilation (p<0,08 pour nombre de caractères tapés par minute) Analyse non paramétrique : tendance à ↗ avec ↗ niveau de ventilation : - nombre de caractères tapés/min n (p<0,08) - nombre d'addition/heure (p<0,06) - nombre de lignes corrigées par min (p<0,07) Test de tendance significatif pour caractères tapés (p<0,03) : chaque doublement de la ventilation entre 3 et 30 L/s ; tend à ↗ de 1,1% la performance pour les caractères tapés et de 2,1% (NS) pour les performances d'additions et corrections d'épreuves Pour tâches d'imagination : ↗ de la performance (p<0,025) seulement pour ↗ entre 3 et 10 L/s

Conclusion : Etude positive (2 tests de performance significatifs, et 2 tests à la limite de la signification)

Intérêt : Etude s'apparentant en une étude en chambre expérimentale (aucune source de pollution intérieure), avec ici introduction d'un tapis comme source de pollution

Diminution du formaldéhyde et augmentation O₃ intérieur avec l'augmentation de la ventilation

Test de la relation dose-réponse (amélioration du test de saisie dans les classes croissantes de ventilation).

Limites : 1 résultat discordant : pas de relation dose-réponse pour le test d'imagination (pas d'amélioration pour ventilation de 30 L/s)

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Performance	Méthode recueil performance	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2004 Danemark	1 open-space (centre d'appel téléphonique) situé dans 1 bâtiment. de bureau 26 opérateurs (dont seulement 5 ont des données sur les 8 semaines)	<u>Type d'étude</u> : étude cross-over <u>Intervention</u> : 4 conditions combinant filtre usagé vs neuf et taux de ventilation 2.5 vs 25 L/s/personne 1 condition par semaine (un seul facteur changé entre 2 semaines consécutives), chaque condition répétée 2 fois (8 semaines d'expérience) Ventilation quantifiée par gaz traceur	Pour chaque opérateur : Temps moyen de parole sur 30 minutes (obtenu par division du temps total (entre 9 et 17 h) par le nombre d'appels,	Données d'appels enregistrées en routine les jours de semaine	Vaisala:CO2 transmitter, mesure en continu avec enregistreur (Onset:Hobo) dCO ₂ (moy): Filtre usé+faible ventil : 721±95 Filtre usé+ forte ventil : 231±60 Filtre neuf+faible ventil : 830±175 Filtre neuf+forte ventil : 223±27	T°, HR, bruit, luminosité, et O3 ext (variant peu entre les conditions) Particules (0,75- >15 µm) (plus de particules de diamètre élevé à l'intérieur en présence d'un filtre neuf, signant origine extérieure des particules)	Analyse de variance pour données appariées (+ ajust sur la T° dans une analyse de covariance)	En présence d'un filtre neuf, ↗ de la ventilation entraîne ↗ de la performance (soit une ↘ du temps de parole) (p<0,055) En présence d'une forte ventilation, remplacer une filtre neuf par un usagé ↘ la performance (p<0,01) ; ce remplacement en présence de faible ventilation n'a pas d'effet. En présence d'un filtre usagé, ↘ la ventilation entraîne ↗ de la performance (de façon inattendue) (p<0,05)

Conclusion : Etude positive (lien entre ↘ symptômes d'irritations et ↗ niveau de ventilation)

Intérêt : Etude expérimentale dans un centre d'appel téléphonique

Limites : Définition de la performance basée sur le temps de parole d'opérateurs (et non sur des tests standardisés)

Mélange de 2 interventions : ventilation et filtre, difficilement interprétable

Seulement 26 opérateurs dont seulement 5 ont des données complètes, et de très nombreuses données ont été exclues (certains créneaux horaires notamment)

5.2 Ecoles

5.2.1 Effets sanitaires

5.2.1.1 Etude écologique

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Shendell, 2004 USA	434 salles de 22 écoles (409 traditionnelles, 25 préfabriq.) Toutes avec système mécanique de ventilation (et air conditionné) 2 états : Idaho et Washington 2000-2001	Taux moyen annuel de fréquentation et d'absentéisme	Recueil rétrospectif auprès des administrations Recueil avant et après visite des salles	2 x 5 min par salle (Q-trak 8551), pas de standardisation du moment de mesure d CO ₂ (moy (min-max)) : Bâtiments traditionnels : Idaho (n=165) : 840 (50-4230) Washington (n=244) : 580 (60-3030) Bâtiments préfabriqués : Idaho (n=7) : 1510 (110-2440) Washington (n=18) : 610 (10-3510) 55 % des salles > 1000 ppm (au-dessus du niveau extérieur)	Aucun	<u>Variable à expliquer</u> : Taux annuel de fréquentation, Taux annuel fréquentation avant visites Taux annuel absentéisme <u>Variable explicative</u> : dCO ₂ en continu <u>Modèle</u> : régression linéaire multiple <u>Variables d'ajustement</u> : Par classe : traditionnelle vs. préfabriquée, niveau scolaire, état, et par école : origine ethnique, % repas gratuits (indicateur du niveau socio-économique)	45% des classes avec dCO ₂ > 1000 ppm, soit un débit ventilation < 7,5L/s/pers ↘ taux annuel fréquentation avec ↗ dCO ₂ : β : -0,0005 (p=002) (soit ↘ de 0,5%, correspondant à une ↗ relative de 10% du taux moyen de 5% d'absentéisme pour une ↗ de 1000 ppm de dCO ₂) ↘ taux annuel fréquentation avant visites avec ↗ dCO ₂ : β : -0,0009 (p=0001) (soit ↘ de 0,9% correspondant à une ↗ relative de 20% du taux moyen de 5% d'absentéisme pour une ↗ de 1000 ppm de dCO ₂) Résultats significatifs pour autres variables du modèle : - Type de salle - Repas gratuits - Origines ethniques Effet de dCO ₂ plus important que ceux des autres variables : ↗ 1000 ppm → ↗ 10-20 % d'absentéisme
<p>Conclusion : Etude positive (augmentation de 1000 ppm de CO₂ associée à +10-20% d'absentéisme)</p> <p>Intérêt : Etude de l'absentéisme lié principalement aux maladies respiratoires virales contagieuses (peu exploré dans les études retenues)</p> <p>Limites : Mesures de CO₂ sur de très courtes périodes et à des moments non standardisés de la journée</p> <p>Effet sanitaire peu spécifique</p> <p>L'absentéisme n'est lié ici qu'à une très forte ↗ du CO₂</p>							

5.2.1.2 Etudes transversales

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Mi, 2006 Chine (Shanghai)	10 écoles (30 salles) choisies arbitrairement Aucune n'est équipée de système de ventilation mécanique, d'air conditionné, ou de chauffage 1 414 élèves (âge moyen 13 ans) Novembre-décembre 2000	symptômes respiratoires, asthmatiques et allergiques	Auto-Quest. ECHRS Symptômes sur les 12 derniers mois	Q-track (TSI Incorporated, ST Paul, MN, USA), 1 h au milieu des cours 1060 ±370 (530-1910) ; extérieur : 370-400 ppm (mesure pour certaines écoles seulement) 45% des classes > 1000 ppm	Formaldéhyde : 9,4±6,9 (3-20) µg/m ³ T°: 17,4±1,8 (13,4-20,7) °C HR : 56±12 (36-82) % O3 (µg/m ³ ;7 jours) : Int : 5,3±2,8 (1,1-7,0) Ext : 20,9±3,6(17-28) NO2 (µg/m ³ ;7 jours) : Int: 55±13 (33-86) Ext: 63±13 (47-83) Renouvellement d'air (/CO ₂) : 8,8 (2,6-21,7) L/s/pers (79% des salles avec fenêtres ouvertes)	Analyse 1 Test de tendance : % enfants avec symptômes selon 3 classes de CO ₂ (595-800/ 801-1000/ 1001-1555) Analyse 2 <u>Variable à expliquer</u> : chacun des symptômes <u>Variable explicative</u> : CO ₂ <u>Modèle</u> : régression logistique multivarié <u>Variables d'ajustement</u> : 1. âge, sexe, tabagisme, trace d'humidité 2. âge, sexe, tabagisme, humidité des bâtiments + autres variables environnementales liés en univarié aux symptômes : T°, NO ₂ , O ₃ and RH	Analyse 1 Test de tendance significatif pour crise asthme (p<0,01), médicaments antiasthmatiques (p<0,05), asthme actuel (p<0,01). A noter une relation inverse pour gêne respiratoire diurne (p<0,05), Analyse 2 1. Symptômes (prévalence) : OR (IC- 95%) pour ↗ 100 ppm CO ₂ : Sifflements (3,1%) : OR=1,03 (0,92-1,15) Gêne respiratoire diurne (23%) : OR=0,95 (0,91-0,99) Gêne respiratoire nocturne (2,6%) : OR=1,12 (0,98-1,28) Crise d'asthme (2,4 %) : OR=1,18 (1,04-1,35) Médicaments asthme (2,3 %) : OR=1,15 (1,02-1,31) Asthme actuel (3,1 %) : OR=1,18 (1,06-1,32) 2. pour asthme, médicaments asthme et asthme actuel : OR similaires, mais perte de la significativité si ajustement sur NO ₂ Relations avec autres variables environnementales Moisissures liés à crise d'asthme (OR=2,40, p<0,05) Température liée à gêne respiratoire diurne (OR=1,26 pour ↗ 1°, p<0,001) NO ₂ intérieur lié à asthme actuel (OR=1,51 pour ↗ 10 µg/m ³ , p<0,01) et médicaments pour asthme (OR=1,45 pour ↗ 10 µg/m ³ , p<0,01) NO ₂ extérieur lié à asthme actuel (OR=1,44 pour ↗ 10 µg/m ³ , p<0,05) O ₃ (intérieur et extérieur) lié négativement à gêne respiratoire diurne
<p>Conclusion : Etude positive avec un lien entre CO₂ et symptômes de type asthmatiques. A noter que cette relation devient non significative après ajustement sur le NO₂ intérieur</p> <p>Intérêt : Etude de la relation dose-réponse Etude des liens entre symptômes et autres polluants environnementaux</p> <p>Limites : Résultats difficilement extrapolables, vu les niveaux de pollution extérieur et intérieur particulièrement élevés- Temps de mesure du CO₂ relativement court (1 heure) Pas de prise en compte de la structure hiérarchique des données Tableau chiffré du modèle final multivarié non présenté : les résultats présentés sont partiels Relation inverse paradoxale entre CO₂ et gêne respiratoires diurne</p>							

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Fraga, 2008 Portugal	9 écoles 1 607 élèves (âge moyen : 14 ans) <i>Année de recueil non précisée</i>	Symptômes respiratoires, asthmatiques et allergiques	Quest. ISAAC aux élèves des salles instrumentées	1 min, sur 1 semaine 2 salles par école (1 exposée sud, 1 exposée nord), mesure directe (GasProbe IAQ indoor air quality monitor), Niveaux de CO ₂ non renseignés. Classification écoles (ppm): >2100 (n=3); ~ 1850 (n=4); ~1400 (n=2)	COV : Classification des écoles (µg/m ³) : >800 µg/m ³ (n=2); ~ 450 (n=2); ~ 250 (n=5) Classification pour confort thermique : froide froide et humide (niveaux non renseignés.)	<u>Variables à expliquer</u> : symptômes (sifflements, asthme, éternuements, rhinite, éruption cutanée, diagnostic d'allergie) <u>Modèle</u> : régression logistique <u>Variable explicative</u> : CO ₂ (3 classes) <u>Variables d'ajustement</u> : le niveau d'éducation des parents (« proximi » de l'exposition au domicile selon les auteurs)	Relation effets-CO₂ : Symptômes (prévalence) : OR (IC- 95%) pour niveau fort vs. faible : Sifflements post-exercice : OR=1,86 (1,20-2,89) Toux nocturne : OR=1,40 (0,95-2,89) Aucune autre relation significative Relation effets-autres variables Tendances non significatives entre COV et sifflements, asthme et toux nocturne pas de relation significative avec confort thermique
Conclusion : Etude positive (sifflement après effort physique et toux nocturne sont liés au CO₂)							
Limites : De nombreuses informations manquantes, parmi lesquelles les concentrations précises en CO ₂ , et des erreurs (les résultats dans le texte ne correspondent pas à ceux donnés dans les tableaux) Toutes les salles de classe des élèves ayant répondu au questionnaire, n'ont pas été instrumentées (seulement 2 salles instrumentées par école) Manque ajustement (notamment, âge, sexe)							

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Simoni, 2010 Europe	21 écoles (46 salles), 5 pays Etude européenne HESE (étude pilote, sur échantillon non représentatif) 654 élèves Recueil en 2004-2005	Symptômes respiratoires, asthmatiques, allergiques des 12 derniers mois : sifflements, toux sèche nocturne, rhinite indice de perméabilité nasale (rhinométrie)	2 Quest. ISAAC 1 prise en compte de quest remplis par les parents et les enfants (68%), par les enfants uniquement (16,4 %), par les parents uniquement (15,6%)	Hiver Q-trak IAQ monitor (TSI Incorporated, St Paul, Mn, USA), Moy sur 1 min, 1 journée (min 4H) Int : 1467±683 (525-3475) Ext : 398 Int/ext =3,7 (1,3-9,1) 66% des salles >1000 ppm	PM10 (µg/m ³) : 112±69 (14-260) Taux de renouvellement d'air : 7,64 L/s/pers Selon les pays : 2,61 à 16,88	Analyse 1 <u>Variables à expliquer</u> : sifflements, toux sèche nocturne, rhinite, <u>Modèle</u> : régression logistique <u>Variable explicative</u> : CO2 catégorisé + ou - 1000ppm CO2 en continu <u>Variables d'ajustement</u> : tabagisme passif au domicile, sexe, âge, salle de classe, PM10 (catégorisé + ou - 50 µg/m ³ ou en continu) Analyse 2 Modèle mixte hiérarchique (niveau 1 : enfant, niveau 2 : classe)	Analyse 1 CO2 catégorisé (> 1000 ppm vs. < 1000 ppm) : - sifflements (13%) OR=1,24 (0,55-1,03) - toux sèche nocturne (34 %) : OR=2,99 (1,65-5,44) - rhinite (32%) : OR=2,07 (1,14-3,73) CO2 en continu (pour ↗ 100 ppm) : - sifflements : OR=0,99 (0,94-1,04) - toux sèche nocturne : OR = 1,05 (1,01-1,09) - Rhinite : OR=1,05 (1,02-1,09) Analyse 2 CO2 catégorisé (> 1000 ppm vs. < 1000 ppm) : - sifflements (13%) OR=1,52 (0,68-3,39) - toux sèche nocturne (34 %) : OR=3,32 (1,21-9,09) - rhinite (32%) : OR=1,76 (0,71-4,38) CO2 en continu (pour ↗ 100 ppm) : - sifflements : OR=1,00 (0,95-1,05) - toux sèche nocturne : OR = 1,06 (1,00-1,13) - Rhinite : OR=1,06 (1,00-1,11) Résultats avec PM10 : OR autour de 1 non significatifs après ajustement sur CO2 Rhinométrie ↘ perméabilité nasale avec ↗ PM10 (CO2 non significatif dans le modèle)
Conclusion : Etude positive : relation CO2 avec toux nocturne et rhinite							
Intérêt : Etude multicentrique standardisée dans 5 pays Résultats très proches avec et sans prise en compte de la structure hiérarchique des données Pas d'effet des PM10 sur les symptômes							
Limites : Ecoles non représentatives Ecoles dont les caractéristiques sont très hétérogènes, écoles ventilées naturellement ou par système de ventilation mécanique. 67% avec ventilation naturelle <8L/S :pers, contre 13% avec ventilation mécanique. En Suède toutes les écoles <1000 ppm. Tests de tendance (CO2 catégorisé en quartiles) qui seraient significatifs, mais cités uniquement dans la discussion sans données chiffrées							

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Kim, 2011 Corée	12 écoles (tirage aléatoire, écoles sans plainte) dans 3 villes 1 922 élèves (dont 1 028 élèves des classes instrumentées) Moyenne d'âge : 10 ans Recueil en 2004 : novembre-décembre	symptômes respiratoires, asthmatiques et allergiques dans les 12 derniers mois + maux de tête et fatigue dans les 3 derniers mois	Auto-quest. posé avant l'instrumentation des salles	Q-trak IAQ monitor (TSI Incorporated, St Paul, Mn, USA), moy sur 1 min, durée de 45-60 min, 34 salles de classe (~3/école) CO ₂ (ppm) Int : 2417±839 (907-4113) ext=463±42 (382-530)	Mesure sur 7 jours : formaldéhyde (intérieur et extérieur) SO ₂ (exclu des analyses car très bas), <u>UFP</u> (10 ³ /cm ³) : Int : 18,2±17,3 (3,7-52,8) Ext : 16,5±12,5 (3,3-45,3) <u>NO₂</u> (µg/m ³) : Int : 18,8±7,7 (7,2-37,9) Ext : 30,7±9,8 (16,5-48,6) <u>O₃</u> (µg/m ³) : Int : 7,5±3,3 (2,5-57,6) Ext : 15,5±5,3 (6,4-25,9)	<u>2 populations d'étude</u> : Les élèves des classes instrumentées d'une part (analyse CO ₂) et tous les élèves répondants d'autre part (analyse polluants extérieur), Analyse 1 <u>Variables à expliquer</u> : chacun des symptômes <u>Modèle</u> : régression logistique <u>Variables explicatives</u> : CO ₂ <u>Variables d'ajustement</u> : âge, sexe, allergie (pollens, chat, chien), environnement au domicile <u>Autres variables environnementales</u> : entrées individuellement dans le modèle Analyse 2 Régression logistique multiniveau : niveau 1 : élève, niveau 2 : école, niveau 3 : ville	Analyse 1 Symptômes (prévalence) : OR (IC- 95%) pour ↗ 100 ppm CO ₂ : Sifflements (8%) : OR = 1,03 (1,001-1,06) Asthme diagnostiqué (6%) : OR=1,01 (0,97-1,04) Asthme actuel (6,9%) : OR=1,02 (0,99-1,05) Maux de tête (11,7%) : OR=1,00 (0,97-1,02) Fatigue (30,3%) : OR=1,01 (1,00-1,03) Autres variables explicatives significatives Sifflements liés à NO ₂ extérieur: OR=1,27 (1,06-1,53) Sifflements liés négativement à O ₃ ext.: OR=0,21 (0,08-0,53) Asthme actuel lié à UFP ext.: OR=1,93 (1,08-3,46) Pas de relation significative avec autres polluants intérieurs (relation à la limite de la significativité entre NO ₂ et sifflements) Analyse 2 : Résultats identiques après prise en compte de la structure hiérarchique des données
<p>Conclusion : Etude positive mais uniquement avec le symptôme sifflement (et à la limite de la signification pour fatigue)</p> <p>Intérêt : Résultats similaires avec et sans prise en compte de la structure hiérarchique des données</p> <p>Limites : Temps de mesure du CO₂ relativement court Niveaux de CO₂ élevés : la plupart des écoles sont > à 1000 ppm Pas d'ajustement mutuel entre variables environnementales</p>							

5.2.1.3 Etude longitudinale

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Zhang, 2011 Chine	Ville de Taiyuan, une des villes les plus polluées de Chine. Décembre 2004 et Décembre 2006 10 écoles ventilées naturellement, 46 salles en 2004 avec 1 193 élèves (11-15 ans) 8 écoles, 37 classes en 2006 1143 élèves ayant participé les 2 années	Symptômes SBS : irritations des muqueuses, de la peau et symptômes généraux (sur une échelle en 4 classes) dans les 3 derniers mois + amélioration quand les élèves ne sont pas à l'école	Auto-quest. posé 1 semaine avant l'instrumentation des salles	Hiver, pas dans toutes les salles Q-trak TM IAQ (TSI Incorporated, St Paul, Mn, USA), moy sur 1 heure, CO ₂ (ppm) 2004 : Int : 2211± 1005 (789-4170); Ext : 522±26 (480-559) 2006 : Int : 2651±642 (965-3996); Ext : 497±52 (433-574) différence 2004/2006 non significative)	T°, HR, AH (humidité absolue) intérieur et extérieur Densité des élèves dans les salles SO ₂ , NO ₂ sur 7 jours SO ₂ (µg/m ³) 2004 : Int : 264± 139 ; Ext : 712±189,3 2006 : Int : 318±111,9; Ext : 767±138,5 NO ₂ (µg/m ³) 2004 : Int : 39,4± 9,5 ; Ext : 52,3±9,5 2006 : Int : 50,1±6,9; Ext : 48,6±15,8 ↗ significatives des niveaux int entre 2004 et 2006 pour NO ₂ et SO ₂	Etude transversale I (2004) <u>Variables à expliquer</u> : prévalence de 3 groupes de symptômes et amélioration si éloignement <u>Modèle</u> : régression logistique <u>Variables explicatives</u> : CO ₂ (en continu) <u>Variables d'ajustement</u> : âge, sexe, asthme ou allergies des parents <u>Autres variables environnementales intérieures</u> : Densité d'élèves, SO ₂ , SO ₂ ratio (I/E), NO ₂ , NO ₂ ratio, RH, AH : mises 1 à 1 dans modèle à la place du CO ₂ Etude transversale II (2004) <u>Idem</u> , sauf modèle <u>Modèle</u> : régression logistique multiniveau (élève et classe) Etude longitudinale (incidence nouveaux symptômes entre 2004 et 2006) <u>Variables à expliquer</u> : incidence des 3 groupes de symptômes et amélioration si éloignement <u>Modèle</u> : régression logistique conditionnelle pour données agrégées <u>Variables explicatives</u> : CO ₂ (en continu) <u>Variables d'ajustement</u> : âge, sexe, asthme ou allergies des parents <u>Autres variables environnementales intérieures</u> : Densité d'élèves, SO ₂ , SO ₂ ratio, NO ₂ , NO ₂ ratio, RH, AH : mises 1 à 1 dans modèle à la place du CO ₂	Etude transversale I (2004) Symptômes (prévalence) : OR (IC- 95%) pour ↗ 100 ppm CO ₂ : Au moins 1 symptôme général (28,6%) : OR=0,77 (0,67-0,89) Au moins 1 irritation (33,4%) : OR=0,84 (0,73-0,96) Au moins 1 symptôme peau (6,7%) : OR=0,82 (0,62-1,08) Amélioration si éloignement (22,7%) : OR=0,81 (0,70-0,95) <u>Autres variables environnementales</u> OR > 1 et significatifs avec SO ₂ (3 symptômes) OR > 1 et significatif avec SO ₂ ratio (I/E) (2 symptômes) OR > 1 et significatif avec NO ₂ pour Irritation muqueuse OR > 1 et significatif avec NO ₂ ratio (I/E) (1 symptômes) OR<1 et significatifs pour densité, température et humidité Etude transversale II (2004) OR similaires, mais le plus souvent NS Etude longitudinale Symptômes (incidence) : Hazard Ratio (IC- 95%) pour ↗ 100 ppm CO ₂ : Au moins 1 symptôme (26%) : HR=1,19 (0,91-1,56) Au moins 1 irritation (21%) : HR=1,0 (0,75-1,32) Au moins 1 symptôme peau (5%) : HR=1,07 (0,62-1,83) Amélioration si éloignement (14%) : HR=1,06 (0,78-1,43) <u>Autres variables environnementales</u> OR non significatifs avec l'ensemble des variables, sauf 1 relation inverse entre incidence symptôme peau et SO ₂
Conclusion : Etude transversale répétée négative (avec en transversal, quelques associations inverses : les polluants d'origine extérieure affectant de manière plus importante les symptômes qu'une mauvaise ventilation)							
Intérêt : A la fois des analyses transversale et longitudinale							
Limites : Concentrations intérieures en polluants extérieurs très élevées (SO ₂) dans ces écoles par ailleurs mal ventilées (CO ₂ élevé) Etude dans une région de la Chine très polluée, résultats difficilement comparables à ceux des autres études traitées ici							

5.2.1.4 Etude quasi-expérimentale

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Intervention	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation effet sanitaire vs. CO ₂)	Principaux résultats
Smedje, 2000 Suède	39 écoles (57 bâtiments) sélectionnées aléatoirement dans le comté d'Uppsala 1 476 élèves (10 ans en moyenne en 93) 2 phases : janvier-février 1993 et décembre 94-janvier 95	Changement du système de ventilation (+ mécanique, par déplacement d'air) dans 12 bâtiments entre 1993 et 95. Avant intervention : bâtiments ventilés naturellement (5) ou avec système mécanique Autre bâtiments (avec système ou sans) en 1993 et 1995,	symptômes respiratoires, asthmatiques et allergiques asthme diagnostiqué par médecin	Auto-Quest. renseigné par les parents (basé sur ECHRS)	Mars-mai 1993 + janvier-mars 1995 2-5 salles/écoles à la fin des cours Mesure sur 15 min (Riken RI 411-A) Bâtiments avec nouveau système de ventilation en 1995 (12% ; n=7): - 1993 : 1050 ppm - 1995 : -270 ppm Autres bâtiments (n=50) : -1993 : 930 ppm -1995 : +90ppm	Taux de renouvellement d'air (gaz tracer) : Avec nouveau système de ventilation en 1995 (12%): - 1993 : 1,3 L/s/pers - 1995 : +11 L/s/pers Autres bâtiments : -1993 : 3,9 L/s/pers -1995 : + 0,5 L/s/pers - T° - HR, poussières, formaldéhyde, COV, microorganismes (baisse en 1995 si + ventilation) Auto-quest. sur expositions à domicile et environnement psychosocial à l'école	<u>Variable à expliquer</u> : incidence symptômes entre 93 et 95 <u>Variable explicative</u> : nouveau système de ventilation (143 élèves) vs. absence de changement (1 333 élèves) <u>Modèle</u> : régression logistique multivariée <u>Variables d'ajustement</u> : âge, atopie, sexe	Allergie : OR=0,3 (0,1-1,2) Asthme (diagnostic médical) : OR=0,6 (0,2-2,8) Asthme actuel : OR=1,2 (0,4-4,1) Au moins 1 symptôme asthmatique : OR=0,3 (0,1-0,8) Plus de symptômes asthmatiques en 95 qu'en 93 : OR=0,5 (0,2-0,97)
<p>Conclusion : Etude positive : l'intervention (entraînant une \downarrow du CO₂) est liée à \downarrow des symptômes asthmatiques</p> <p>Intérêt : Design d'étude intéressant : évaluation d'une intervention ayant consisté à changement système ventilation Montre que la \downarrow du CO₂ s'accompagne d'une \downarrow des moisissures, COV, formaldéhyde et particules</p> <p>Limites : Temps de mesure du CO₂ de seulement 15 minutes Des facteurs autres que la ventilation ont pu potentiellement changé dans ces écoles entre les deux périodes</p>								

5.2.1.5 Etudes expérimentales

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2007a Danemark	1 école (2 salles équipées ventilation mécanique 100% extérieur) Enfants de 10-12 ans (entre 25 et 45 selon les tests) Eté et hiver	<u>Type d'étude:</u> Cross-over en simple aveugle <u>2 Interventions:</u> HIVER : 4 conditions (2x2 semaines) combinant filtre usagé vs filtre neuf, et 2 taux de ventilation : 3 vs 8,5 L/s/pers. ETE: 2 conditions de ventilation : 3-4 vs 8,5 L/s/pers (avec filtre neuf) Ventilation quantifiée via le CO ₂	8 échelles visuelles analogiques : congestions nasale, gorge, lèvres, sécheresse de la peau, yeux irrités, fatigue, endormissement, maux de tête	Le vendredi durant le dernier cours	Mesure en continu (pas de 1-5 min), sonde à base de silicone à infrarouge non dispersif <u>Hiver</u> Variation CO ₂ : Filtre usé: 914 (ventilation élevée) vs. 1264 ppm (ventilation basse) Filtre neuf : 931 (ventilation élevée) vs. 1296 ppm (ventilation basse) <u>Eté</u> 904(ventilation élevée) vs. 1128 ppm (ventilation basse)	T°, HR UFP	<u>Variables à expliquer :</u> Scores de symptômes <u>Modèle HIVER :</u> 1. Analyse de variance (ANOVA) pour tous les élèves ayant participé à toutes les conditions (analyse équilibrée) 2. Régression linéaire multiple pour l'ensemble des élèves, même s'ils n'ont pas participé à toutes les conditions (analyse déséquilibrée) <u>Modèle ETE :</u> Test de Wilcoxon <u>Variables explicatives :</u> conditions expérimentales en hiver (4), en été (2) <u>Variable d'ajustement :</u> effet d'apprentissage	Intervention hiver <u>analyse équilibrée</u> Après prise en compte du type de filtre : ↗ ventilation de 3 à 8 L/s/pers liée à : - ↗ (S) sécheresse des lèvres - ↘(p=0,08) des maux de tête Intervention été aucun symptôme significativement lié à la ventilation
Conclusion : Etude quasi-totalement négative								
Intérêt : Design d'étude un peu compliqué en hiver avec 2 interventions mélangées, mais l'analyse permet d'isoler l'effet ventilation de l'effet filtre								
Limites : En hiver, trente élèves ont participé, contre plus de quarante en été								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2007b Danemark	1 école (2 salles équipées ventilation mécanique 100% extérieur) Enfants de 10-12 ans (entre 25 et 45 selon les tests) Eté	<u>Type d'étude</u> Cross-over en simple aveugle <u>Intervention*</u> 4 conditions combinant (2x2 sem), 2 conditions de température (20/25°C) et 2 conditions de ventilation (5/10 L/s/pers) Ventilation quantifiée via le CO ₂	8 échelles visuelles analogiques : congestions nasale, gorge, lèvres, sécheresse de la peau, yeux irrités, fatigue, endormissement, maux de tête	Le vendredi durant le dernier cours	Mesure en continu (pas de 1-5 min), sonde à base de silicone à infrarouge non dispersif Variation CO ₂ : Forte température : 744 (ventilation élevée) vs. 952 ppm (ventilation basse) Faible température : 809 (ventilation élevée) vs. 1049 ppm (ventilation basse)	T°, HR UFP	<u>Variables à expliquer</u> : Scores de symptômes <u>Modèle</u> : 1. Analyse de variance (ANOVA) pour tous les élèves ayant participé à toutes les conditions (analyse équilibrée) 2. Régression linéaire multiple pour l'ensemble des élèves, même s'ils n'ont pas participé à toutes les conditions (analyse déséquilibrée) <u>Variables explicatives</u> : conditions expérimentales <u>Variable d'ajustement</u> : effet d'apprentissage	<u>analyse équilibrée</u> aucune échelle significativement liée à ventilation
Conclusion : Etude totalement négative								
Intérêt : Design d'étude un peu compliqué en hiver avec 2 interventions mélangées, mais l'analyse permet d'isoler l'effet ventilation de l'effet température								
Limites : Certains tests n'ont pas été distribués aux enfants une des semaines, ce qui empêche une grande partie du traitement des données								

* une deuxième intervention est présentée dans la publication, mais ne concerne qu'un changement de température

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Smedje, 2011 Suède	1 école (datant de 1940), 4 salles de classe (2 par étage) 111 élèves (10-11 ans) Février-mars	<u>Type d'étude</u> : Cross-over <u>Intervention</u> : 2 conditions en alternance DV* et MV avec taux de ventilation constant sur période de 4 semaines	symptômes (respiratoires, cutanés, généraux, irritations des muqueuses) ° médicaments pour asthme et allergie perméabilité nasale (rhinométrie) biomarqueurs (lavage nasal)	Questionnaire rempli à la maison à la fin de chaque période (sur symptômes de la semaine passée) et examen clinique à l'école	Mesures sur 1 journée aléatoire lors des 2 dernières semaines de chaque période Q-tracks TSI instruments (shoreview, MN, USA) DV:794 (694-854) MV : 840 (768-888) (différence non significative)	T°, HR, allergènes de chat Taux de ventilation entre 10,6 et 12,3 L/s/pers	<u>Comparaison des symptômes entre les 2 systèmes</u> : - test de McNemar <u>Comparaison des paramètres cliniques entre 2 systèmes</u> : - Test de Student si distributions normales, U-test de Mann-Whitney sinon	MV vs. DV - moins de symptômes d'irritation des yeux (20 vs 41, p=0,001) -tendance à moins de symptômes des voies respiratoires (39 vs 55, p=0,054) Aucune différence significative des paramètres cliniques entre les deux conditions

Conclusion : Etude positive, moins de symptômes en présence d'un système de ventilation mixte qu'en présence d'un système par déplacement d'air

Intérêt : Test entre deux systèmes de ventilation

Limites : Relativement peu informative vis-à-vis de l'étude seuil de CO₂/effet sanitaire. Le taux de ventilation est maintenu constant, le CO₂ n'est pas significativement différent entre les deux types de système (concentrations toujours < 1000 ppm)

*DV : système de ventilation par déplacement d'air ; MV : système mixte de ventilation

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Norbäck 2012, Suède	4 salles informatiques d'une université 232 étudiants (20-25 ans) dont 61 les 2 semaines Avril 2005	<u>Type d'étude</u> : Cross-over en simple aveugle <u>Intervention</u> : 2 conditions : un taux de ventilation constant et 1 taux variable (sondes CO ₂ et T°) (1 semaine /condition) Collecte des données le lundi et le mardi de chaque semaine	11 symptômes : irritations des muqueuses, voies respiratoires supérieures, généraux (sur 1 échelle de 1 à 6)	Auto-Quest. renseigné lors de la dernière heure (le matin ou l'après-midi)	Q-trak, 1 min, 9-15 H (2 jours de chacune des 2 semaines d'expérience), moyennes sur 1 heure 2 semaines combinées: Taux constant : 809 ppm et 25,4 % de temps >1000 ppm Taux variable : 784 ppm 8,7 % de temps >1000 ppm	Particules (PM10), microorganismes, formaldéhyde, allergènes (non différents entre les conditions) (2 semaines combinées) : Taux constant : T° : 22,5°C HR : 30% 13,3 L/s/pers Taux contrôlé : T° :22,6°C HR : 28% entre 8,9 et 37,5 L/s/pers	<u>Différence des effets sanitaires entre systèmes</u> U-test de Mann-Whitney	Prévalence ↘ significativement si système contrôlé vs système constant (↘ lié au groupe constant puis variable) : - Maux de tête (p=0,003) - Fatigue (p=0,007) Pas de différence significative pour symptômes irritations

Conclusion : Etude positive, moins de symptôme si le temps d'exposition au CO₂>1000 ppm est réduit (soit si le système de ventilation est contrôlé par le CO₂ versus un système à taux constant)

Intérêt : Test d'un système contrôlé par niveaux de CO₂. Apporte des informations sur le lien éventuel entre pics de CO₂ et symptômes

Limites : Difficile dans le contexte du présent travail, d'interpréter la baisse de symptômes en termes de concentration en CO₂

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Norbäck 2008a Suède	4 salles informatiques d'une université 355 étudiants (dont 121 ayant participé les 2 semaines) février 2004	<u>Type d'étude</u> : Cross-over en simple aveugle <u>Intervention</u> : 2 taux de ventilation, 7 L/s/pers vs. 10-13L /s/pers (max du syst) (1 semaine /condition)	11 symptômes : irritations des muqueuses, cutanées, voies respiratoires supérieures, généraux (sur 1 échelle de 1 à 6)	Auto-Quest. renseigné lors de la dernière heure (le matin ou l'après-midi) Collecte des données lundi et mardi de chaque semaine	Q-trak TM IAQ monitor (TSI Inc., St Paul, MN, USA) 1 min, 9-15 H (2 jours de chacune des 2 semaines d'expériences), moyennes sur 1 heure CO ₂ moyen taux réduit : 1185 ppm CO ₂ moyen taux élevé : 922 ppm Différence entre taux réduit et élevé : 263 ppm	Particules (PM10, UFP), microorganismes, formaldéhyde, NO ₂ , O ₃ T° (-1,1°C à ventilation élevée) HR (24% identique)	Analyse transversale (n=355, premier Quest de la semaine 1 ou 2) : <u>Variables à expliquer</u> : symptômes (recodés en variables binaires) <u>Modèle</u> : régression logistique multivariée <u>Variables explicatives</u> : CO ₂ en continu <u>Variables d'ajustement</u> : 1-sexe, tabagisme, asthme, allergies aux pollens, animaux, utilisation de lentilles (pour symptômes oculaires) 2 - + T°, HR, taux de renouvellement d'air Analyse cross-over (n=121, ↗ ventilation pour 50, ↘ ventilation pour 33 et même niveau de ventilation pour 38) Division des sujets en 3 groupes en fonction de la variation de ventilation entre les 2 semaines : ↘ (CO ₂ de 1030 à 1170 ppm), ↗ (CO ₂ de 1200 à 920 ppm) et identique Comparaison des prévalences de sujets avec score de symptômes en ↗ ou ↘ entre ces 2 situations par le U-test de Mann-Whitney	Analyse transversale prévalence (%) : OR (IC95%) pour ↗ 100 ppm Symptômes oculaires (16,5) : 1,21 (1,04-1,40) Symptômes nasaux (16,8) : 1,21 (1,05-1,40) Symptômes de gorge (17,4) : 1,21 (1,06-1,39) Difficulté respiratoires (8,7) : 1,47 (1,18-1,83) Symptômes cutanés (4,6) : 1,32 (1,01-1,72) Maux de tête (24,5) : 1,19 (1,05-1,34) Fatigue (42,7) : 1,18 (1,07-1,31) <u>Après ajustement supplémentaire (2)</u> sur T°, HR, taux de renouvellement d'air : Maux de tête : 1,19 (1,003-1,41) Les autres OR ↘ un peu et non significatifs (même résultats si ajustement uniquement sur T°) <u>Autres variables environnementales</u> (ajustement mutuel) Température liée à irritations yeux, du nez, de la gorge, maux de tête et fatigue RH inversement lié à fatigue Taux renouvellement air lié à maux de tête et fatigue Analyse cross-over ↘ des symptômes en semaine 2 quelle que soit la ventilation Plus de fatigue en-lien avec température plus élevée Aucun lien significatif entre évolution des symptômes et niveau de ventilation (CO ₂)
Conclusion : Etude positive uniquement quand analysée de façon transversale (négative sinon en cross-over, telle que l'expérimentation était programmée). Prévalence de symptômes augmente avec ↗ du CO ₂ (différence de 263 ppm)								
Intérêt : Résultats de l'étude transversale (avec la réserve qu'il s'agit des symptômes sur la dernière heure) avec ajustement mutuel de plusieurs variables environnementales								
Limites : Protocole expérimental mal suivi, seuls 121 étudiants ont participé aux 2 semaines (dont 38 ont de plus été soumis aux mêmes niveaux de ventilation les 2 semaines)								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Norbäck 2011 Suède	1 école, 3 salles 61 élèves (26 groupe intervention / 35 groupe témoin) Novembre 2005	<u>Intervention</u> en simple aveugle avec groupe témoin succession de 3 types de ventilation: - semaine 1 : MV - semaine 2 : DV type 1 (système frontal) - semaine 3 : DV type 2 (système sol) <u>1 salle intervention</u> <u>2 salles témoin (DVtype 2 sol)</u>	rhinométrie acoustique, stabilité du film lacrymal, 9 symptômes SBS (échelle de 0 à 6) : nez, yeux, gorge, cutané, sinus, gêne respiratoire, mal de tête et fatigue	Questionnaire posé par un médecin (1 fois par semaine, symptômes sur la dernière heure) Recueil des données médicales du mardi au jeudi pendant les 3 (chaque enfant étant examiné le même jour et à la même heure)	Q-trak TM IAQ monitor (TSI Inc., St Paul, MN, USA), 1 min, 3 h/j du mardi au jeudi, 3 semaines <u>Moyennes CO₂</u> : Semaine 1 MV : 867 ppm Témoin (DV1) : 590 ppm Semaine 2 DV1 : 655 ppm Témoin (DV1) : 625 ppm Semaine 3 DV2 : 611 ppm Témoin (DV1) : 612 ppm	formaldéhyde, NO ₂ , O ₃ , microorganismes, UFP, Allergènes (la première semaine seulement)	Analyse 1 de type transversal (données semaine 1) Comparaison entre les 2 groupes par le U-test de Mann Whitney Analyse 2 : Comparaison des différences de scores entre deux semaines, entre groupe Intervention et groupe Témoin par le U-test de Mann Whitney Différence intra-groupe : test apparié de Wilcoxon	Analyse 1 (MV vs. DV1) : ↗ maux de gorge (p=0,04), ↗ difficultés respiratoires (p<0,0001), ↗ maux de tête (p=0,03) Pas de différence perméabilité nasale et film lacrymal Analyse 2 Semaine 1 à 2: ↘ gêne respiratoire (p=0,006) perméabilité nasale améliorée (p=0,03) Semaine 2 à 3 : pas de différence entre les 2 groupes
<p>Conclusion : Etude positive en lien avec la baisse de CO₂ (3 symptômes en analyse transversale, et 1 symptôme et 1 indicateur de perméabilité nasale en analyse longitudinale)</p> <p>Intérêt : Analyses à la fois transversale et longitudinale (avec groupe témoin) Test de deux systèmes de ventilation avec des modes différents d'apport d'air</p> <p>Limites : En longitudinal, sur 9 symptômes SBS, 1 seul est différent entre les deux groupes</p> <p>*DV : système de ventilation par déplacement d'air ; MV : système mixte de ventilation</p>								

5.2.2 Perception de la Qualité de l'Air

5.2.2.1 Etude transversale

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Norbäck, 1995a Suède	36 salles dans 6 écoles (dont 2 avec moquette en 1982 et 4 tirées au sort : 2 récentes et 2 anciennes). Les moquettes ont été retirées entre 82 et 86. 4 bâtiments sur 6 disposent d'une ventilation mécanique 97 enseignants (46 ans en moyenne) 2 phases : 1982 et 1986 (janv-mai). Mais seule la deuxième phase est présentée ici.	3 échelles analogiques visuelles de perception (0 à 100) du confort thermique, sécheresse et empoûssièrem ent de l'air (sur les 6 derniers mois) 3 autres échelles sur le stress, satisfaction, coopération au travail	Auto-Quest. postal portant sur les 6 derniers mois	Mesures dans toutes les salles en novembre 1986 : 5 à 10 pendant 3 minutes à la fin des cours Tubes avec détection colorimétrique, Draeger 0,01%/a 880 (700-1200) à 1850 (1500-2700) ppm selon les écoles	COVs (int et ext),, formaldéhyde, poussières, T°, HR	Analyse 1 <u>Variables à expliquer</u> : perception T°, sécheresse, empoûssièrem ent <u>Modèle</u> : régression linéaire multiple <u>Variable explicative</u> : CO2 <u>Autres variables environnementales</u> : T° et HR, poussières, COV int, COV ext <u>Variables d'ajustement</u> Satisfaction, stress, coopération au travail, textile sur les murs <u>Autres variables testées</u> : antécédent allergique, sexe, âge, tabagisme, âge du bâtiment, ventilation mécanique, humidité bâtiment, non retenues dans le modèle car non significatives Analyse 2 Modèle introduisant toutes les variables significatives: personnelles, textiles sur murs et mesures environnementales	Analyse 1 <u>Relation CO2 - perception</u> : Relations NS avec les 3 échelles de perception <u>Relation autres variables environnementales - perception</u> : T° associée positivement à perception sécheresse de l'air HR associée négativement à perception sécheresse de l'air COV int associés positivement à la perception de la T° et sécheresse air COV ext associés positivement à la perception de la sécheresse air Analyse 2 Perception température : variable textiles sur mur significative et COV int NS Perception sécheresse : variable température significative
Conclusion : Etude négative, pas de modification de la perception de la qualité de l'air par les enseignants en lien avec le CO2							
Intérêt : Test d'autres variables environnementales, T°, HR, COV qui sont associés à certaines perceptions Ajustement des modèles sur de nombreux facteurs dont l'environnement de travail							
Limites : Mesures du CO2 sur de courte durée Données anciennes							

5.2.2.2 Etudes expérimentales

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Perceptions	Méthode recueil perceptions	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2007a Danemark	1 école (2 salles équipées ventilation mécanique 100% extérieur) Panel d'adultes Enfants Eté et hiver	<u>Type d'étude:</u> Cross-over en simple aveugle <u>2 Interventions:</u> HIVER : 4 conditions (2x2 semaines) combinant filtre usagé vs filtre neuf, et 2 taux de ventilation : 3 vs 8,5 L/s/pers. ETE: 2 conditions de ventilation : 3-4 vs 8,5 L/s/pers (avec filtre neuf) Ventilation quantifiée via le CO ₂	<u>Adultes</u> 4 échelles visuelles analogiques : Acceptabilité Intensité odeurs Fraicheur de l'air Sécheresse de l'air <u>Enfants</u> 6 échelles visuelles analogiques : Température, courants d'air, sécheresse, fraicheur, luminosité, bruit	<u>Adultes</u> Tests réalisés une fois par semaine, une heure à 1 heure et demi après le départ des enfants <u>Enfants</u> Le vendredi durant le dernier cours	Mesure en continu (pas de 1-5 min), sonde à base de silicone à infrarouge non dispersif <u>Hiver</u> Variation CO ₂ : Filtre usé : 914 (ventilation élevée) vs. 1264 ppm (ventilation basse) Filtre neuf : 931 (ventilation élevée) vs. 1296 ppm (ventilation basse) <u>Eté</u> 904(ventilation élevée) vs. 1128 ppm (ventilation basse)	T°, HR UFP	<u>Variables à expliquer :</u> Scores de perceptions <u>Modèle HIVER :</u> 1. Analyse de variance (ANOVA) pour tous les élèves ayant participé à toutes les conditions (analyse équilibrée) 2. Régression linéaire multiple pour l'ensemble des élèves, même s'ils n'ont pas participé à toutes les conditions (analyse déséquilibrée) <u>Modèle ETE :</u> Test de Wilcoxon <u>Variables explicatives :</u> conditions expérimentales en hiver (4), en été (2) <u>Variable d'ajustement :</u> effet d'apprentissage	Intervention hiver <u>analyse équilibrée enfants</u> aucune échelle significativement liée à ventilation <u>panel adultes</u> ↗ ventilation de 3 à 8 L/s/pers liée à : ↗ acceptabilité (p=0,038) ↘ odeurs (p=0,005) Intervention été <u>analyse équilibrée enfants</u> ↗ ventilation de 3 à 8 L/s/pers liée à : - ↗ (S) de la perception de fraicheur de l'air <u>panel adultes</u> ↗ ventilation de 3 à 8 L/s/pers liée à : ↗ acceptabilité (p<0,001) ↘ odeurs (p<0,006) ↗ fraicheur de l'air (p<0,001)
<p>Conclusion : Etude positive pour les adultes, avec amélioration de plusieurs perceptions, chez les enfants, seule la fraicheur de l'air est améliorée l'été en relation avec ↗ ventilation</p> <p>Intérêt : Design d'étude un peu compliqué en hiver avec 2 interventions mélangées, mais l'analyse permet d'isoler l'effet ventilation de l'effet filtre Une analyse équilibrée a pu être réalisée</p> <p>Limites : En été, seule une trentaine d'élèves ont participé, contre une quarantaine en été</p>								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Perceptions	Méthode recueil perceptions	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2007b Danemark	1 école (2 salles équipées ventilation mécanique 100% extérieur) Enfants de 10-12 ans Eté	<u>Type d'étude</u> Cross-over en simple aveugle <u>Intervention*</u> 4 conditions combinant (2x2 sem), 2 conditions de température (20/25°C) et 2 conditions de ventilation (5/10 L/s/pers) Ventilation quantifiée via le CO ₂	6 échelles visuelles analogiques : Température, courants d'air, sécheresse, fraîcheur, luminosité, bruit	Le vendredi durant le dernier cours	Mesure en continu (pas de 1-5 min), sonde à base de silicone à infrarouge non dispersif Variation CO ₂ : Forte température : 744 (ventilation élevée) vs. 952 ppm (ventilation basse) Faible température : 809 (ventilation élevée) vs. 1049 ppm (ventilation basse)	T°, HR UFP	<u>Variables à expliquer</u> : Scores de perception <u>Modèle</u> : 1. Analyse de variance (ANOVA) pour tous les élèves ayant participé à toutes les conditions (analyse équilibrée) 2. Régression linéaire multiple pour l'ensemble des élèves, même s'ils n'ont pas participé à toutes les conditions (analyse déséquilibrée) <u>Variables explicatives</u> : conditions expérimentales <u>Variable d'ajustement</u> : effet d'apprentissage	<u>analyse équilibrée</u> aucune échelle significativement liée à ventilation, à l'exception de celle de bruit (↗) avec ventilation élevée)

Conclusion : Etude négative pour les enfants en ce qui concerne la qualité de l'air

Intérêt : Design d'étude un peu compliqué en hiver avec 2 interventions mélangées, mais l'analyse permet d'isoler l'effet ventilation de l'effet température

Limites : Certains tests n'ont pas été distribués aux enfants une des semaines, ce qui empêche une grande partie du traitement des données)

* une deuxième intervention est présentée dans la publication, mais ne concerne qu'un changement de température

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Perceptions	Méthode recueil perceptions	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Smedje, 2011 Suède	1 école (datant de 1940), 4 salles de classe (2 par étage) 111 élèves (11 ans en moyenne) Février-mars	<u>Type d'étude</u> : Cross-over <u>Intervention</u> : 2 conditions en alternance DV (avec taux de ventilation constant sur période de 4 semaines)	Echelle visuelle analogique (0-100) sur perceptions de qualité de l'air, empoussièrément, humidité, température et courants d'air	Echelles remplies à l'école	Mesures sur 1 journée aléatoire lors des 2 dernières semaines de chaque période Q-tracks TSI instruments (shoreview, MN, USA) DV:794 (694-854) MV : 840 (768-888) (différence non significative)	T°, HR, allergènes de chat Taux de ventilation entre 10,6 et 12,3 L/s/pers	<u>Relation perception/ventilation</u> : -Tests appariés	Avec système MV : meilleure qualité de l'air perçue (57 vs 50), p=0,024 Pas d'autre différence significative entre les 2 systèmes pour les autres perceptions
<p>Conclusion : Etude positive : meilleure perception de la QAI en présence d'un système mixte de ventilation qu'en présence d'un système par déplacement d'air</p> <p>Intérêt : Test entre deux systèmes de ventilation</p> <p>Limites : Relativement peu informative vis-à-vis de l'étude seuil de CO2/effet sanitaire. Le taux de ventilation est maintenu constant, le CO2 n'est pas significativement différent entre les deux types de système (concentrations toujours < 1000 ppm)</p> <p>*DV : système de ventilation par déplacement d'air ; MV : système de ventilation mixte</p>								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Perceptions	Méthode recueil perceptions	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Norbäck, 2012, Suède	4 salles informatiques d'une université 232 étudiants (20-25 ans) dont 61 les 2 semaines Avril 2005	<u>Type d'étude</u> : Cross-over en simple aveugle <u>Intervention</u> : 2 conditions : un taux de ventilation constant et 1 taux variable (sondes CO2 et T°) (1 semaine /condition) Collecte des données le lundi et le mardi de chaque semaine	8 questions sur la perception de la qualité de l'air intérieur (échelle de 0 à 6) : qualité de l'air (à l'entrée et la dernière heure), T°, humidité, courants d'air, bruit en général, bruit de la ventilation, luminosité, odeurs	Auto-Quest (1 question après 15 min et les autres lors de la dernière heure (le matin ou l'après-midi))	Q-trak, 1 min, 9-15 H (2 jours de chacune des 2 semaines d'expérience), moyennes sur 1 heure 2 semaines combinées: Taux constant : 809 ppm et 25,4 % de temps >1000 ppm Taux variable : 784 ppm 8,7 % de temps >1000 ppm	Particules (PM10), microorganismes, formaldéhyde, allergènes (non différents entre les conditions) (2 semaines combinées) : Taux constant : T° : 22,5°C HR : 30% 13,3 L/s/pers Taux contrôlé : T° : 22,6°C HR : 28% entre 8,9 et 37,5 L/s/pers	<u>Différence des perceptions entre systèmes</u> U-test de Mann-Whitney	Perception immédiate de bonne qualité de l'air ↗ significativement si système variable vs système constant (↗ liée au groupe constant puis variable) (p=0,02)
<p>Conclusion : Etude faiblement positive : meilleure perception immédiate de bonne qualité de l'air si le temps d'exposition au CO2>1000 ppm est réduit soit si le système de ventilation est contrôlé par le CO2 versus système à taux constant (les perceptions lors de la dernière heure ne sont pas significativement différentes)</p> <p>Intérêt : Test d'un système de ventilation avec taux contrôlé par le CO2</p> <p>Limites : Difficile dans le contexte du présent travail, d'interpréter la baisse de symptômes en termes de concentration en CO2</p>								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Perceptions	Méthode recueil perceptions	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Norbäck 2008b, Suède	4 salles informatiques d'une université 355 étudiants (dont 83 ayant participé les 2 semaines) février 2004	<u>Type d'étude</u> : Cross-over en simple aveugle <u>Intervention</u> : 2 taux de ventilation, 7 L/s/pers vs. 10-13L /s/pers (max du syst) (1 semaine /condition)	9 questions sur la perception de l'environnement intérieur (échelle de 0 à 6) Perceptions de qualité de l'air (immédiate et dernière heure), T°, humidité, courants d'air, bruit en général, bruit de la ventilation, luminosité, odeurs	Auto-Quest. (1 question après 15 min et 7 questions lors de la dernière heure (le matin ou l'après-midi) Collecte des données lundi et mardi de chaque semaine	Q-trak TM IAQ monitor (TSI Inc., S Paul, MN, USA) 1 min, 9-15 H (2 jours de chacune des 4 semaines d'expériences), moyennes sur 1 heure CO2 moyen taux réduit : 1185 ppm CO2 moyen taux élevé : 922 ppm Différence moyenne entre réduit et élevé : 263 ppm	particules, microorganismes, formaldéhyde, NO ₂ , O ₃ T° (+1,1°C à ventilation élevée) HR (identique)	Analyse transversale (n=355, premier Q de la semaine 1 ou 2) : <u>Variables à expliquer</u> : scores de perception <u>Modèle</u> : régression linéaire multiple <u>Variables explicatives</u> : CO ₂ en continu <u>Variables d'ajustement</u> : sexe, tabagisme, asthme, allergies aux pollens, animaux, utilisation de lentilles (pour symptômes oculaires), T°, HR, taux renouvellement air Analyse cross-over (n=83) Comparaison des différences des scores de perception en fonction de la variation de ventilation entre les 2 semaines (soit ↘ : CO ₂ de 1030 à 1170 ppm ; soit ↗ : CO ₂ de 1200 à 920 ppm) par le U-test de Mann-Whitney	Analyse transversale : <u>Résultats bruts</u> : CO ₂ significativement liés à qualité de l'air, température, courants d'air et odeurs <u>Modèle ajusté</u> : Pas de relation entre CO ₂ et les différents scores de perception. <u>Autres variables environnementales</u> : T° est liée significativement à perception T° chaude, moins de courants d'air, et mauvaise qualité de l'air. Renouvellement d'air est lié significativement à perception T° fraîche, plus de courants d'air, et meilleure qualité de l'air. Pas de lien avec HR. Analyse cross-over ↗ ventilation est liée significativement à : perception température plus basse ↗ perception des courants d'air ↘ perception des odeurs ↗ perception bonne qualité de l'air (immédiate et dernière heure)
Conclusion : Etude négative pour la partie transversale, positive pour la partie analysée en cross-over telle que planifiée								
Intérêt : Intervention comparant deux taux de ventilation entrainant un différentiel modeste de CO ₂								
Limites : Protocole expérimental mal suivi : seuls 83 étudiants ayant participé aux 2 semaines et s'étant installé dans la bonne salle ont été inclus dans l'analyse en cross-over Pour la partie transversale, les auteurs ne présentent pas leurs résultats avec ajustement sur les seuls facteurs personnels, uniquement ceux ajustés en plus des facteurs personnels sur T°, RH et taux de renouvellement d'air (alors que cela avait été fait dans l'étude sur les symptômes : Norbäck, 2008a)								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Perceptions	Méthode recueil perceptions	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Norbäck 2011, Suède	1 école, 3 salles avec plancher chauffant 61 élèves (26 groupe intervention / 35 groupe témoin) Novembre 2005	<u>Intervention à l'aveugle :</u> succession de 3 types de ventilation: - semaine 1 : MV - semaine 2 : DV type 1 (système frontal) - semaine 3 : DV type 2 (système sol) <u>1 salle intervention</u> <u>2 salles témoin (DVtype 2 sol)</u>	9 questions sur la perception de l'environnement sur 1 échelle de 0-6: Perceptions de T°, humidité, mouvements d'air, qualité de l'air, luminosité, bruit	Questionnaire posé par un médecin (1 fois par semaine, du mardi au jeudi) Questions posées pour la dernière heure (sauf 1 question sur qualité de l'air à l'entrée (dans les 15 min) dans la salle)	Q-trak TM IAQ monitor (TSI Inc., St Paul, MN, USA), 1 min, 3 h/j du mardi au jeudi, 3 semaines <u>Moyennes CO₂ :</u> Semaine 1 MV : 867 ppm Témoin (DV1) : 590 ppm Semaine 2 DV1 : 655 ppm Témoin (DV1) : 625 ppm Semaine 3 DV2 : 611 ppm Témoin (DV1) : 612 ppm	formaldéhyde, NO ₂ , O ₃ , microorganisme, UFP, Allergènes (la première semaine seulement)	Analyse 1 de type transversal (données semaine 1) Comparaison entre les 2 groupes par le U-test de Mann Whitney Analyse 2 : Comparaison des différences de scores entre deux semaines, entre groupe Intervention et groupe Témoin par le U-test de Mann Whitney Différence intra-groupe : test apparié de Wilcoxon	Analyse 1 MV vs. DV 1 : perception d'une plus mauvaise qualité de l'air (à la fois à l'entrée et dernière heure) dans le groupe intervention Analyse 2 Sem 1 à 2: ➤ perception bonne qualité de l'air (p=0,006) Sem 2 à 3 : pas de différence entre les 2 groupes
Conclusion : Etude positive : meilleure perception de la qualité de l'air en lien avec la baisse de CO ₂								
Intérêt : Test de deux systèmes de ventilation avec des modes différents d'apport d'air Analyses à la fois transversale et longitudinale (avec groupe témoin)								
Limites :								

*DV : système de ventilation par déplacement d'air ; MV : système mixte de ventilation

5.2.3 Performance

5.2.3.1 Etudes expérimentales

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Performance	Méthode recueil performance	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Twardella, 2012 Allemagne	6 écoles, 20 salles 417 élèves Entre nov 2009 et avril 2012	<u>Type d'étude</u> Cross-over à l'aveugle, Toutes les salles sont équipées d'un système mécanique de ventilation, <u>Intervention</u> 3 conditions - réglage habituel - diminution de la ventilation (CO ₂ : 2000-2500 ppm) - augmentation de la ventilation (CO ₂ <1000 ppm) conditions sur 2 jours d'une semaine, pendant 3 semaines consécutives 1 ^{ière} semaine : conditions habituelles, puis alternance aléatoires entre ventilation et élevée	Concentration évaluée par le d2-test Test sur papier durant 5 min TN : indicateur de rapidité TE : indicateur exactitude CP : indicateur concentration (<i>paramètre principal pour les investigateurs</i>)	Tests en matinée pendant 6 jours expérimentaux (2 par semaine) Au total 2366 tests réalisés	Mesure sur les 3 semaines, pas de 1 min, A l'aide d'une sonde de la QA (Klimawächter MF420-IR-CTF ; J.Dittrich Elektronik GmbH&Co KG, Baden-Baden, Germany) Moyenne sur 4 h le matin des jours expérimentaux CO ₂ (médiane sur 40 jours, ppm) - Habituelle : 1371 5 jours<1000 35 jours >1000 0 jours >2500 - basse : 2115 1 jours<1000 39 jours>1000 6 jours >2500 -élevée : 1045 22 jours<1000 18 jours>1000 ppm 0 jours >2500	T°, HR T° similaire entre les 3 conditions HR supérieure en «ventilation basse» par rapport «ventilation élevée »	<u>Variables à expliquer</u> : TN, TE, CP <u>Modèle</u> : modèle hiérarchique linéaire à 3 niveaux (prise en compte de la répétition des données par élève et de la corrélation des élèves par salle de classe) <u>Variables explicatives</u> : - Analyse 1 : variable à 3 classes, soit les 3 conditions expérimentales (habituelle/basse/élevée) en « intention de traiter » (= tout le monde) - Analyse 2 : idem en « per protocole (déviations au protocole exclues) - Analyse 3 : niveau CO ₂ médian en continu (↗100 ppm), en per-protocole <u>Variables d'ajustement</u> : Effet d'apprentissage (terme linéaire et quadratique)	Pas d'effets significatifs entre ventilation faible et élevée pour 2 indicateurs de concentration CP et TN (analyses 1, 2 et 3) Effets significatifs mis en évidence uniquement pour TE (nombre d'erreurs) en condition basse vs. élevée Analyse 1 : +1,34 (-0,03-2,70) Analyse 2 : + 1,65 (0,42-2,87) significatif Analyse 3 : + 1,19 (0,30-2,07) significatif pour ↗ 1000 ppm
Conclusion : Etude partiellement positive : pas de relation avec concentration (critère principal) et rapidité, mais relation significative avec taux d'erreurs qui ↗ avec ↗ des niveaux de CO ₂								
Intérêt : Etude expérimentale bien planifiée, protocole respecté, nombre de sujets important, bon modèle statistique (avec en plus du test des conditions de ventilation, la réalisation d'un modèle avec le CO ₂ introduit en continu)								
Limites : Durée du test très courte (les auteurs font l'hypothèse, que motivés, pour un temps aussi court (5 min), les enfants arrivent à se concentrer et à être rapide quel que soit le niveau deCO ₂), mais que le taux d'erreur ↗ avec la mauvaise qualité de l'air								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Performance	Méthode recueil performance	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2007a Danemark	1 école (2 salles équipées ventilation mécanique 100% extérieur) Enfants de 10-12 ans (entre 25 et 45 selon les tests) Eté et hiver	<u>Type d'étude:</u> Cross-over en simple aveugle <u>2 Interventions:</u> HIVER : 4 conditions (2x2 semaines) combinant filtre usagé vs filtre neuf, et 2 taux de ventilation : 3 vs. 8,5 L/s/pers. ETE: 2 conditions de ventilation : 3 vs. 8,5 L/s/pers (avec filtre neuf) Ventilation quantifiée via le CO ₂	7 tests : soustraction, addition, multiplication, comparaisons de nombre, compréhension de texte à la lecture et à l'oral, test de logique	Tests réalisés le même jour de la semaine présentés aux enfants comme étant du travail scolaire 2 indicateurs par test : rapidité et % d'erreurs	Mesure en continu (pas de 1-5 min), sonde à base de silicone à infrarouge non dispersif <u>Hiver</u> Variation CO ₂ : Filtre usé : 914 (ventilation élevée) vs. 1264 ppm (ventilation basse) Filtre neuf : 931 (ventilation élevée) vs. 1296 ppm (ventilation basse) <u>Eté</u> 904(ventilation élevée) vs. 1128 ppm (ventilation basse)	T°, HR UFP	<u>Variables à expliquer :</u> rapidité (min) et % d'erreurs lors des différents tests <u>Modèle HIVER :</u> 1. Analyse de variance (ANOVA) pour tous les élèves ayant participé à toutes les conditions (analyse équilibrée) 2. Régression linéaire multiple pour l'ensemble des élèves, même s'ils n'ont pas participé à toutes les conditions (analyse déséquilibrée) <u>Modèle ETE :</u> Test de Wilcoxon <u>Variables explicatives :</u> conditions expérimentales en hiver (4), en été (2) <u>Variable d'ajustement :</u> effet d'apprentissage	Intervention hiver <u>analyse équilibrée</u> Après prise en compte du type de filtre : ➤ ventilation de 3 à 8 L/s/pers liée à : - ➤ (S) rapidité des tests de soustraction, test logique, <u>analyse déséquilibrée :</u> ➤ (S) rapidité des tests de soustraction, multiplication, test logique et compréhension écrite) Intervention été (analyses équilibrée et déséquilibrée) ➤ ventilation de 3 à 8 L/s/pers liée à : - ➤ (S) rapidité des tests d'addition et compréhension écrite Dans les 2 interventions pas d'effet de la ventilation sur % d'erreurs
<p>Conclusion : Etude positive, avec amélioration de la performance si meilleure ventilation même si ce ne sont pas exactement les mêmes tests qui sont impactés en été et en hiver</p> <p>Intérêt : Design d'étude un peu compliqué en hiver avec 2 interventions mélangées, mais analyse permet d'isoler l'effet ventilation de l'effet filtre</p> <p>Limites : Plusieurs tests n'ont pas été réalisés par tous les élèves et ne sont pas analysés (addition en hiver et soustraction, multiplication, comparaison de nombre et test logique en été), ce qui gêne la comparaison des résultats entre les 2 saisons Nombre limité, et surtout variable d'enfants selon les tests</p>								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Performance	Méthode recueil performance	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Wargocki, 2007b Danemark	1 école (2 salles équipées ventilation mécanique 100% extérieur) Enfants de 10-12 ans (entre 25 et 45 selon les tests) Eté	<u>Type d'étude</u> Cross-over en simple aveugle <u>Intervention*</u> 4 conditions combinant (2x2 semaines), 2 conditions de température (20/25°C) et 2 conditions de ventilation (5,2 vs. 9,6 L/s/pers) Ventilation quantifiée via le CO ₂	8 tests : soustraction, addition, multiplication, comparaisons de nombre, compréhension de texte à la lecture et à l'oral, test de logique, recherche d'erreurs	Tests réalisés le même jour de la semaine présentés aux enfants comme étant du travail scolaire 2 indicateurs par test : rapidité et % d'erreurs	Mesure en continu (pas de 1-5 min), sonde à base de silicone à infrarouge non dispersif Variation CO ₂ : Forte température : 744 (ventilation élevée) vs. 952 ppm (ventilation basse) Faible température : 809 (ventilation élevée) vs. 1049 ppm (ventilation basse)	T°, HR UFP	<u>Variables à expliquer</u> : rapidité (min) et % d'erreurs lors des différents tests <u>Modèle HIVER</u> : 1. Analyse de variance (ANOVA) pour tous les élèves ayant participé à toutes les conditions (analyse équilibrée) 2. Régression linéaire multiple pour l'ensemble des élèves, même s'ils n'ont pas participé à toutes les conditions (analyse déséquilibrée) <u>Modèle ETE</u> : Test de Wilcoxon <u>Variables explicatives</u> : conditions expérimentales en hiver (4), en été (2) <u>Variable d'ajustement</u> : effet d'apprentissage	<u>analyse équilibrée</u> Après prise en compte de la température : ➤ ventilation de 5 à 10 L/s/pers n'est liée à aucun test (pas de données pour les 4 tests arithmétiques) : <u>analyse déséquilibrée</u> : Après prise en compte de la température : ➤ ventilation liée à : - ➤ (S) rapidité des 4 tests arithmétique (mais sans ajustement sur effet d'apprentissage) En revanche, plus de relations significatives avec la température

Conclusion : Etude faiblement positive (résultats obtenus sans tenir compte de l'apprentissage)

Intérêt : Design d'étude un peu compliqué en hiver avec 2 interventions mélangées, mais analyse permet d'isoler l'effet ventilation de l'effet température

Limites : Certains tests n'ont pas été distribués aux enfants une des semaines, ce qui empêche une grande partie du traitement des données)

* une deuxième intervention est présentée dans la publication, mais ne concerne qu'un changement de température

5.3 Logements

5.3.1 Etude Transversale

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Type d'effets sanitaires	Méthode recueil effets sanitaires	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Norbäck, 1995b Suède	Echantillon constitué des 88 participants (20-45 ans) d'Uppsala à l'étude ECRHS : 47 participants avec au moins 1 symptôme et 41 participants sans symptôme (sélectionnés aléatoirement,	Symptômes respiratoires et asthmatiques	Quest ECHRS, recueil en 1990	Oct 1991 à avril 1992 dans la salle de séjour et la chambre du participant Spectromètre à infrarouge (lecture directe) (Rieken RI-411A, Rieken keini, Japan), calcul d'une concentration sur 30 min CO ₂ > 1000 ppm dans 26% des salles de séjour	T°, HR, COV, particules respirables dans la chambre et la salle de séjour Formaldéhyde et guanine d'acariens (poussières) dans la chambre	Analyse 1 Comparaison moyennes CO ₂ avec et sans symptôme avec ttest (no apparié) Analyse 2 <u>Variables à expliquer</u> : Dyspnée nocturne <u>Modèle</u> : régression logistique <u>Variables explicatives</u> : CO ₂ en continu (moyenne CO ₂ chambre et CO ₂ salle de séjour) <u>Variables d'ajustement</u> : Age, sexe, tabagisme, acariens, moquettes, <u>Autres variables environnementales</u> : entrées individuellement dans le modèle formaldéhyde, Toluène, C8-aromatiques, terpène, TCOV, LCOV	Analyse 1 : Avec oppression thoracique nocturne : 1020 ppm Sans oppression thoracique nocturne : 850 ppm p < 0,01 Analyse 2 <u>Relation pour ↗ 1000 ppm de CO₂</u> : Gêne respiratoire nocturne : OR (IC-95%) : 20,0 (2,7-146) <u>Autres variables environnementales associés à gêne respiratoire nocturne</u> : Formaldéhyde, Toluène, C8-aromatiques, terpène, TCOV, LCOV (OR entre 4 et 12,5 pour ↗ 10 fois le log de la concentration) Acariens et traces d'humidité liés S à « au moins 1 symptôme asthmatique » Présence de moquette liée S à toux nocturne
Conclusion : Etude positive							
Intérêt : Résultat d'une étude européenne dont le protocole et les questionnaires étaient standardisés							
Limites : Effectif restreint : il est dommage que les mesures environnementales n'aient été réalisées que dans une seule ville de l'étude ECHRS. Population particulière : une moitié avec au moins 1 symptôme lié à l'asthme et une moitié tiré au sort sans symptôme servant de témoin							
Temps court des mesures : 30 min							
Le focus de cette étude est sur les COV, pas sur le CO ₂ (moyenne, min-max des logements ne sont pas présentés). Pas d'ajustement mutuel entre les différentes variables environnementales							
Pas de données précises de la distribution du CO ₂ (il n'est donc pas possible d'inclure cette étude dans le schéma de synthèse)							
Il n'est pas clair si les auteurs ont choisi de présenter les symptômes nocturnes en guise d'exemple, ou si les autres symptômes ne sont pas liés							

5.3.2 Etude expérimentale

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Type d'effets	Méthode recueil effets	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Enqwail, 2005 Suède	<p>un immeuble d'habitation de 73 logements</p> <p>18-<64 ans</p> <p>57% femmes</p> <p>Partie A : 20 logements et 18 participants</p> <p>Partie B : 25 logements et 26 participants</p> <p>Partie C : 28 logements (mesures uniquement)</p> <p>Parties A, B et C à des étages différents</p> <p>Nov 1993 à mars 94 Nov 1994 à mars 1995</p>	<p>Etude cross over en simple aveugle</p> <p>2 conditions de ventilation (avec inversion des conditions l'année suivante) :</p> <p>- Réduction de 20-25 % de l'apport d'air extérieur (ACH =0,35 /h)</p> <p>- Flux constant (ACH=0,5/h)</p>	Symptômes de type SBS : yeux, peau, nez, gorge, toux, visage, maux de tête, fatigue (échelle de 1 à 3) dans les 3 derniers mois,	Quest (SIEQ) posé en mars-avril 1994 et 1995	<p>Mesures dans 8 logements de la partie C soumise aux 2 conditions en alternance sur de 1 semaine, mesures en continu, moy sur 1 heure</p> <p><u>Moy chambre (nuit) ventilation réduite :</u> 980 ppm Flux constant : 920 ppm</p> <p><u>Moyenne totale ventilation réduite :</u> 761±313 ppm Flux constant : 721±235 ppm (différence significative)</p>	<p>T°, HR, ventilation, Questionnaire sur les logements A et B</p> <p>Ventilation constante vs. réduite : T° : -0,1-0,2°C HR :-2-7% significativement plus faible en ventilation constante</p> <p>Ventilation réduite : perte d'énergie diminuée de 13%</p>	<p><u>Variables à expliquer :</u> Prévalences hebdomadaires</p> <p><u>Analyse :</u> Test des différences de prévalences entre les deux conditions de ventilation, avec le U-test de Mann Whitney (non paramétrique)</p>	<p>Caractéristiques, personnelles, densité de population par pièce, ventilation, nombre d'heures passées dans le logement similaires entre les 2 groupes</p> <p>Pas de différences des prévalences de symptômes entre les deux conditions</p>
<p>Conclusion : Etude négative : les effets sanitaires ne sont pas différents selon les deux conditions de ventilation (qui entraîne un différentiel en CO2 très faible, idem pour la température et l'humidité relative)</p> <p>Intérêt : Test le principe d'adaptation saisonnière du niveau de ventilation dans le but de réduire la consommation d'énergie (en application dans certains immeubles d'habitation en Suède) sur les symptômes de type SBS chez les habitants</p> <p>Limites : Prévalences faibles des symptômes étudiés chez les 44 participants</p> <p>En condition de ventilation réduite, les habitants ont ouvert davantage les prises d'air au niveau des fenêtres (mais différence non significative) ce qui pourrait expliquer le faible différentiel de CO2 entre les deux conditions (un différentiel plus élevé était attendu)</p> <p>Méthode de mesure du CO2 non renseignée, mesures non réalisées dans les parties d'immeubles occupées par les habitants ayant renseigné les questionnaires</p> <p>Nombre faible de participants, avec un taux de participation différent entre A (69%) et B (81%)</p>								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Type d'effets	Méthode recueil effets	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Enqwall, 2005 Suède	Voir ci-dessus	Voir ci-dessus	9 perceptions : sécheresse de l'air (0 à 2), plusieurs types d'odeur (0/1), qualité de l'air (0 à 4) dans chambre, salle de séjour et appartement en général, confort thermique (0 à 4)	Quest (SIEQ) posé en mars-avril 1994 et 1995	Voir ci-dessus	Voir ci-dessus	Différence de scores entre les deux conditions de ventilation, U-test de Mann Whitney	Score significativement plus élevés en condition de ventilation réduite pour : - Odeurs étouffantes (p=0,05) - mauvaise qualité de l'air dans la chambre (p=0,04) - mauvaise qualité de l'air dans l'appartement en général (p=0,03) (soit 3 sur 9 variables de perception significatives)
<p>Conclusion : Etude positive avec un effet significatif et négatif de la réduction de la ventilation en hiver sur la perception de la QAI, effet observé pour un faible différentiel de CO₂ (et également de température et d'humidité relative)</p> <p>Intérêt : Test du principe d'adaptation saisonnière du niveau de ventilation dans le but de réduire la consommation d'énergie (en application dans certains immeubles d'habitation en Suède) sur la perception de la QAI des habitants</p> <p>Limites : En condition de ventilation réduite, les habitants ont ouvert davantage les prises d'air au niveau des fenêtres (mais différence non significative) ce qui pourrait expliquer le faible différentiel de CO₂ entre les deux conditions (un différentiel plus élevé était attendu)</p> <p>Méthode de mesure du CO₂ non renseignée, mesures non réalisées dans les parties d'immeubles occupées par les habitants ayant renseigné les questionnaires</p> <p>Nombre faible de participants, avec un taux de participation différent entre A (69%) et B (81%)</p>								

5.4 Chambre expérimentale

5.4.1 Perception / Performance

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Performance	Méthode recueil performance	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Kajtar, 2003 Hongrie	10 participants Octobre 2002	<p><u>Intervention :</u> 4 conditions successives de CO₂ : 600, 1500, 3000, 4000 ppm</p> <p>140 min pour conditions 1500 et 4000</p> <p>210 min pour conditions 600 et 3000</p> <p>Conditions au-delà de 600: injection de CO₂ ultra-pure dans la chambre avant la session</p>	Performance (test de lecture) : quantité lue et % d'erreurs identifiées	<p>2 tests (2x70 min) pendant sessions 1500 et 4000 ppm</p> <p>3 tests (3x70 min) pendant sessions 3000 et 600 ppm</p>	Analyseur de gaz à infrarouges (Horiba via 510)	T°, HR Identiques entre les 4 conditions	<p>Seules les périodes de même durée ont été comparées</p> <p><u>Variables à expliquer :</u> performance (quantité et % d'erreurs)</p> <p><u>Variables explicatives :</u> 4 conditions expérimentales de CO₂</p> <p><u>Modèle :</u> analyse de variance avec prise en compte des données répétées</p>	<p><u>Durant les sessions</u> ↗ quantité de lignes lues au cours des sessions quel que soit niveau CO₂</p> <p><u>Entre les sessions</u> % d'erreurs identifiées supérieures à 600 qu'à 4000 ppm (2^{ème} et dernier test de session)</p> <p>% d'erreurs identifiées supérieurs à 600 qu'à 3000 ppm (3^{ème} et dernier test de session)</p> <p>Pas de différence sur le 2^{ème} indice : quantité de lignes lues</p>
<p>Conclusion : Etude positive</p> <p>Intérêt : Teste les effets propres du CO₂ dans un design expérimental</p> <p>Limites : Des analyses de variance ont été effectuées, mais les résultats chiffrés ne sont pas présentés : seulement des graphiques</p> <p>Effet d'apprentissage non pris en compte (quantité de lignes augmentent avec le nombre de session)</p> <p>Effet des précédentes expositions au CO₂</p> <p>Nombre extrêmement réduit de participants</p> <p>Les 4 périodes n'ont pas la même durée (140 minutes pour 2 niveaux de CO₂ et 210 minutes pour les 2 autres)</p>								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Perceptions	Méthode recueil performance	CO ₂ ventilation /	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Kajtar, 2003 Hongrie	10 participants Octobre 2002	Voir ci-dessus	1 échelle analogique visuelle (Fanger) d'acceptabilité de la qualité de l'air (-1 à +1) 1 échelle de confort (5 classes) 1 échelle analogique visuelle de fraîcheur de l'air (de 0 à +1) Ont été enregistrés : pouls, tension, ECG et température	Remplissage au début, à la fin et pendant la pause entre les périodes de 70 mn : 3 fois pendant sessions à 1500 et 4000 ppm 4 fois pendant sessions à 3000 et 600 ppm	Voir ci-dessus	Voir ci-dessus	Seules les périodes de même durée ont été comparées <u>Variables à expliquer</u> : scores de perception <u>Modèle</u> : analyse de variance avec prise en compte des données répétées <u>Variables explicatives</u> : conditions expérimentales de CO ₂	<u>Durant les sessions</u> ↘ acceptabilité et dégradation de la perception de la qualité de l'air au cours des sessions quel que soit niveau CO ₂ <u>Entre les sessions</u> ↘ acceptabilité et dégradation de la perception de la qualité de l'air avec les concentrations croissantes de CO ₂
<p>Conclusion : Etude positive</p> <p>Intérêt : Teste les effets propres du CO₂ dans un design expérimental</p> <p>Limites : Des analyses de variance ont été effectuées, mais les résultats chiffrés ne sont pas présentés : seulement des graphiques. Il semble de plus que les analyses aient été faites pour chaque questionnaire, au lieu de prendre en compte l'aspect longitudinal de l'étude et la répétition des données intra-sujet Nombre extrêmement réduit de participants</p>								

Auteur, année Etude	Bâtiment / Population / années d'étude	Conditions expérimentales	Performance	Méthode recueil performance	CO ₂ / ventilation	Autres paramètres	Méthodes statistiques (relation SBS vs. CO ₂)	Principaux résultats
Satish, 2012 Etats-Unis	22 participants : 6 groupes de 4 (2 non participants)	<u>Type d'étude</u> Cross-over en double aveugle 6 groupes de 4 participants <u>Intervention</u> 3 conditions de CO ₂ : 600, 1000 et 2500 ppm chaque groupe participe à 1 journée avec successivement les 3 conditions (2,5h /condition) Conditions à 1000 et 2500 : injection de CO ₂ ultra-pure dans la chambre avant la session	Test sur ordinateur (sélection de décisions proposées en relation avec un texte). <i>Symptômes SBS et perception qualité de l'air recueillies, mais non présentés</i>	Après 1 heure, remplissage test performance sur PC pendant 1h30 après 10 mn de formation avec un technicien	600, 1006 et 2496 ppm Mesuré en continu (pas 1 mn)	T° :23°C Taux de ventilation : 100L/s HR : 50±15% Mesurés en continu et constants entre les sessions	Analyse du test à l'aide d'un logiciel sur la base de 9 scores ((niveau d'activité, opportunité, concentration, orientation des actions, initiative, recherche d'information, habilité à l'utiliser, flexibilité, stratégie) Standardisation des scores (percentiles) en fonction de scores de référence obtenus sur 20 000 adultes 16-83 ans aux Etats-Unis <u>Variables à expliquer</u> : 9 scores de performance (scores bruts, différence scores entre 2 conditions, percentiles) <u>Variable explicative</u> : CO ₂ en 3 classes (600/1000/2500) <u>Modèle</u> : analyse de variance et description graphique	1000 vs 600 ppm : altération modérée mais significative de la performance à travers 6 des 9 indicateurs 2500 vs 600 ppm : altération substantielle et significative de la performance pour 7 des 9 indicateurs Relation inverse pour 1 score : celui de concentration : performance max à 2500 ppm et min à 600 ppm (hypothèse des auteurs : une situation défavorable s'accompagne d'un niveau « d'extrême concentration »)
Conclusion : Etude positive								
Intérêt : Design expérimental solide et le test d'un éventuel effet propre du CO₂								
Limites : Symptômes SBS et perception non présentés								

Annexe 3 : Recherche de corrélations entre niveaux de dioxyde de carbone et niveaux de polluants cibles dans l'air des environnements intérieurs (CSTB, 2013)



Recherche de corrélations entre niveaux de dioxyde de carbone et niveaux de polluants cibles dans l'air des environnements intérieurs

Olivier RAMALHO, Guillaume WYART, Corinne MANDIN

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

Direction Santé-Confort / Division Expologie

Rapport final

Mars 2013

Rapport final n° DSC-Expologie/2013-016R

Convention de recherche et développement ANSES/CSTB n° 2012-CRD-13

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent document, faite sans l'autorisation du CSTB est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1er juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

*Toute citation d'extraits ou reproduction doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : **Ramalho O., Wyart G., Mandin C., Recherche de corrélations entre niveaux de dioxyde de carbone et niveaux de polluants cibles dans l'air des environnements intérieurs; Rapport final N° DSC-Expologie/2013-016R, mars 2013, CSTB, 117 pages.***

Résumé

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'une convention de recherche et développement entre l'ANSES et le CSTB et vise à rechercher et analyser les corrélations entre le niveau de dioxyde de carbone (CO₂) et le niveau de polluants cibles (formaldéhyde, acétaldéhyde, acroléine, benzène, 1,4-dichlorobenzène, fractions massiques PM_{2,5} et PM₁₀) à partir des données produites par des campagnes de mesures dans différents milieux intérieurs (logements, écoles et bureaux) entre 2003 et 2012. Les données disponibles représentent des mesures intégrées sur plusieurs jours intégrant les périodes d'occupation et d'inoccupation des locaux. L'enregistrement en continu du CO₂ permet de prendre exclusivement en compte la période d'occupation. Les mesures intégrées sont basées sur des prélèvements par diffusion qui ont été récemment remises en question pour la mesure de certains polluants comme l'acroléine ou l'acétaldéhyde.

Les résultats montrent que le niveau de CO₂ est significativement corrélé avec d'autres polluants cibles, notamment : le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et les particules (fractions PM_{2,5} et PM₁₀). Dans certains cas, la présence de très fortes valeurs (cas du 1,4-dichlorobenzène) perturbe cette association. Une transformation logarithmique de la variable ou une corrélation des rangs rend significative cette corrélation.

Pour le benzène, une corrélation significative est observée avec le niveau de CO₂ dans les logements et les écoles et crèches. Par contre, dans les bureaux et dans la campagne pilote écoles, cette corrélation n'est pas observée. Le même constat est établi pour l'acroléine qui est corrélée avec le niveau moyen de CO₂ dans les logements mais pas dans les bureaux.

Plusieurs facteurs permettent en partie d'expliquer ces corrélations observées de manière générale : la période de chauffe, la présence de sources particulières (fumeurs, combustion), le degré d'occupation des locaux ainsi que l'ouverture des ouvrants.

En plus de la recherche des corrélations, l'étude a mis en relation la proportion de situations où un polluant cible dépasse une valeur guide d'air intérieur ou une valeur cible définie avec le niveau moyen de CO₂ déterminé en période d'occupation.

Plus le niveau moyen de CO₂ est élevé, plus la proportion de situations où un polluant dépasse une valeur cible tend à augmenter. Cette proportion dépend également du type d'environnement intérieur considéré. A l'inverse, se placer dans les situations où le niveau de CO₂ est faible réduit la plupart du temps les chances de dépasser une valeur cible, mais sans pour autant les rendre nulles.

Ces observations ont conduit à calculer la sensibilité et la spécificité de l'utilisation d'un niveau seuil de CO₂ pour discriminer le dépassement ou le respect des valeurs guides d'air intérieur ou de valeurs cibles par les polluants considérés. Les niveaux seuils de 750, 1000, 1500 et 2000 ppm de CO₂ ont été sélectionnés et testés.

Les tests de sensibilité et de spécificité se sont en général avérés les plus performants pour des niveaux de CO₂ plutôt faibles, voisins de 750 ppm. Le cas le plus probant concerne l'acétaldéhyde, pour lequel une bonne discrimination des situations de dépassement sur la base du niveau de CO₂ a été obtenue dans les différents milieux intérieurs.

Pour l'ensemble des polluants, dans les logements et les écoles, se situer au-dessus de 750 ppm de CO₂ entraîne une probabilité élevée de dépasser la valeur cible (VC) considérée : entre 86 % et 92 % pour le formaldéhyde, 81 % pour l'acétaldéhyde, 80 % pour l'acroléine, 90 % pour le 1,4-dichlorobenzène, 90 % à 95 % respectivement pour les fractions PM₁₀ et PM_{2,5}, et autour de 60 % pour le benzène (par rapport à une VC de 2 µg/m³). Par contre, si le niveau de CO₂ est inférieur au seuil, la probabilité que la concentration de polluant soit supérieure à la VC reste en général élevée entre 40 % pour le benzène à plus de 80 % pour le formaldéhyde et la fraction PM_{2,5}. Cette probabilité devient très faible (entre 0,5 % et 7 %) pour le benzène et le 1,4-dichlorobenzène par rapport à une VC respective de 10 et 60 µg/m³.

Au final, l'utilisation d'un seuil de 750 ppm de CO₂ permet d'augmenter de 15 % la probabilité de détecter les situations de dépassement de la VC en acétaldéhyde dans les logements tout en augmentant de 21 % la probabilité de détecter les situations où la VC est respectée. Une augmentation similaire des probabilités est observée pour l'acroléine dans les logements avec respectivement 13 % et 19 %. Pour les autres polluants, le gain par rapport à la prévalence initiale reste inférieur à 10 % dans l'ensemble des situations.

Dans les écoles et crèches, la probabilité de détecter les situations où le formaldéhyde est inférieur à 10 µg/m³ augmente de 33 % lorsque le niveau de CO₂ moyen durant l'occupation est inférieur à 750 ppm par rapport à l'ensemble des situations. A l'inverse, la probabilité de détecter les situations de dépassement de la VC n'est que de 9 %. Pour le benzène, avec une VC de 2 µg/m³, ces mêmes probabilités augmentent respectivement de 14 % et 4 %.

Dans les bureaux, le faible nombre d'observations ne permet pas d'avoir une estimation fine de la prévalence des situations de dépassement. Pour l'échantillon considéré, la discrimination des bureaux selon leur niveau moyen de CO₂ n'améliore pas la détection de dépassement de la VC pour chacun des polluants.

Mots-clés

corrélation, CO₂, formaldéhyde, benzène, particules, logements, écoles, bureaux

Table des matières

1	Contexte de l'étude.....	160
2	Objectif de l'étude.....	160
3	Logements : campagne nationale OQAI 2003-2005.....	163
3.1	Présentation des données disponibles.....	163
3.2	Corrélations entre le CO₂ et les polluants cibles.....	167
3.2.1	Corrélation CO ₂ / Formaldéhyde dans les logements (chambre).....	172
3.2.2	Corrélation CO ₂ / Acétaldéhyde dans les logements (chambre).....	172
3.2.3	Corrélation CO ₂ / Acroléine dans les logements (chambre).....	173
3.2.4	Corrélation CO ₂ / Benzène dans les logements (chambre).....	174
3.2.5	Corrélation CO ₂ / 1,4-dichlorobenzène dans les logements (chambre).....	175
3.2.6	Corrélation CO ₂ / PM _{2,5} dans les logements (séjour / chambre).....	176
3.2.7	Corrélation CO ₂ / PM ₁₀ dans les logements (séjour / chambre).....	178
3.3	Relations entre les variables.....	179
3.4	Analyse des corrélations observées.....	183
3.5	Dépassement des Valeurs cibles selon le niveau de CO₂.....	186
3.6	Sensibilité et spécificité des dépassements de VC selon le niveau de CO₂.....	190
4	Ecoles et crèches : campagne pilote de la surveillance de la qualité de l'air dans les ERP (2009-2011).....	198
4.1	Présentation des données disponibles.....	198
4.2	Corrélations entre le CO₂ et les polluants cibles.....	201
4.2.1	Corrélation CO ₂ / Formaldéhyde dans les écoles et crèches.....	202
4.2.2	Corrélation CO ₂ / Benzène dans les écoles et crèches.....	204
4.3	Relations entre les variables.....	205
4.4	Analyse des corrélations observées.....	209
4.5	Dépassement des valeurs cibles selon le niveau de CO₂.....	211
4.6	Sensibilité et spécificité des dépassements de VC selon le niveau de CO₂.....	213
5	Ecoles : campagne pilote de l'OQAI 2010.....	216
5.1	Présentation des données disponibles.....	216
5.2	Corrélations entre le CO₂ et les polluants cibles.....	217
5.2.1	Corrélation CO ₂ / Formaldéhyde dans les écoles (OQAI).....	220
5.2.2	Corrélation CO ₂ / Acétaldéhyde dans les écoles (OQAI).....	221
5.2.3	Corrélation CO ₂ / PM _{2,5} dans les écoles (OQAI).....	222
5.3	Relations entre les variables.....	222
5.4	Dépassement des valeurs cible selon le niveau de CO₂.....	224
5.5	Sensibilité et spécificité des dépassements de VC selon le niveau de CO₂.....	225

6	Bureaux : campagne de mesure menée par le CSTB en France (2012-2013)	228
6.1	Présentation des données disponibles	228
6.2	Corrélations entre le CO₂ et les polluants cibles.....	230
6.3	Relations entre les variables	232
6.4	Dépassement des valeurs cibles selon le niveau de CO₂.....	233
6.5	Sensibilité et spécificité des dépassements de VC selon le niveau de CO₂.....	233
7	Synthèse des corrélations observées	236
8	Conclusion.....	240
9	Références	243
10	Annexes - Rappels statistiques	244
10.1	Corrélation linéaire entre deux variables	244
10.2	Analyse par composantes principales	244
10.3	Classification hiérarchique.....	245
11	Annexes relatives aux données logements	246
11.1	Statistiques descriptives des données logements	246
11.2	Données logements : caractérisation des 3 classes de partition par les variables.....	249
12	Annexes relatives aux données écoles et crèches (2009-2011).....	253
12.1	Statistiques descriptives globales des données de la campagne pilote de surveillance.....	253
12.2	Statistiques descriptives hivernales des données de la campagne pilote de surveillance.....	254
12.3	Statistiques descriptives estivales des données de la campagne pilote de surveillance.....	255
12.4	Statistiques descriptives des données de la campagne pilote de surveillance en outremer.....	256
12.5	Données Ecoles et crèches : caractérisation des 5 classes de partition par les variables	257
13	Annexes relatives aux données écoles (OQAI, 2010).....	263
13.1	Données écoles (OQAI, 2010) : Statistiques descriptives des variables	263

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des polluants cibles disponibles par campagne de mesure	161
Tableau 2 : Valeur cible retenue pour chaque polluant.....	162
Tableau 3 : Valeurs seuil utilisées pour définir les classes de concentrations de CO ₂	163
Tableau 4 : Caractéristiques de la mesure des polluants lors de la campagne logements.	164
Tableau 5 : Limites de détection et de quantification des polluants cibles.....	165
Tableau 6 : Incertitudes de mesure des polluants mesurés dans la campagne logements.....	166
Tableau 7 : Autres paramètres pris en compte issus de la campagne logements	166
Tableau 8 : Corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de significativité alpha=0.05.	168
Tableau 9 : p-values associées aux corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants	170
Tableau 10 : ACP – Valeurs propres associées aux 10 premiers axes.	179
Tableau 11 : ACP – Coordonnées des variables sur les 5 premiers axes (<i>en rouge, contribution positive ; en bleu, contribution négative ; en italique : variable nominale</i>)	180
Tableau 12 : Corrélations entre le niveau moyen de CO ₂ pendant l'occupation du logement et les polluants cibles pour différentes catégories de logements (en rouge : effet des modalités sur les corrélations observées).	184
Tableau 13 : Proportions de logements dépassant ou non la valeur cible des polluants selon le niveau de concentration en CO ₂ durant l'occupation.	187
Tableau 14 : VPP/VPN des dépassements des VC selon le seuil de CO ₂ (données logements). Seuil en italique : seuil optimal correspondant au maximum de (sensibilité + spécificité).	192
Tableau 15 : Valeurs AUC associées aux dépassements de VC selon le niveau de CO ₂	197
Tableau 16 : Caractéristiques de la mesure des polluants lors de la campagne pilote de la surveillance de la QAI dans les écoles et crèches.	199
Tableau 17 : Limites de détection et de quantification des polluants cibles.....	200
Tableau 18 : Autres paramètres pris en compte issus de la campagne surveillance-écoles	200
Tableau 19 : Corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de significativité alpha=0.05.	201
Tableau 20 : p-values associées aux corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants.	202
Tableau 21 : ACP : valeurs propres associées aux 10 premiers axes	206
Tableau 22 : ACP – Coordonnées des variables sur les 5 premiers axes (<i>en italique : variables nominales</i>)....	206
Tableau 23 : Corrélations entre le niveau moyen de CO ₂ pendant l'occupation du logement et les polluants cibles pour différentes catégories d'établissements.	210
Tableau 24 : Proportions de salles de classe (mesures été et hiver) qui dépassent ou non la VC du formaldéhyde ou du benzène.	211
Tableau 25 : VPP/VPN des dépassements des VC selon le seuil de CO ₂ (données écoles). Seuil en italique : seuil optimal correspondant au maximum de (sensibilité + spécificité).....	213
Tableau 26 : Valeurs AUC associées aux dépassements de VC selon le niveau de CO ₂	215
Tableau 27 : Caractéristiques de la mesure des polluants lors de la campagne écoles (OQAI).....	216
Tableau 28 : Corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de significativité alpha=0.05.	218
Tableau 29 : p-values associées aux corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants.	219
Tableau 30 : ACP sur les données écoles (OQAI). Valeurs propres et coordonnées des variables.....	223

Tableau 31 : Proportion de salles de classe qui dépassent la valeur cible d'un polluant donné selon la concentration en CO ₂	224
Tableau 32 : VPP/VPN des dépassements des VC selon le seuil de CO ₂ (données écoles (OQAI)). Seuil en italique : seuil optimal correspondant au maximum de (sensibilité + spécificité).....	226
Tableau 33 : Valeurs AUC associées aux dépassements de VC selon le niveau de CO ₂	227
Tableau 34 : Caractéristiques de la mesure des polluants lors de la campagne bureaux.	228
Tableau 35 : Statistiques des données de la campagne bureaux (n= 36).....	229
Tableau 36 : Corrélations entre le niveau de CO ₂ et les autres polluants dans les bureaux.	230
Tableau 37 : ACP – Valeurs propres et coordonnées des variables (données bureaux) sur les 5 premiers facteurs.	232
Tableau 38 : Proportion de bureaux qui dépasse la VC d'un polluant cible en fonction du niveau de CO ₂	233
Tableau 39 : VPP/VPN des dépassements des VC selon le seuil de CO ₂ (données bureaux). Seuil en italique : seuil optimal correspondant au maximum de (sensibilité + spécificité).	234
Tableau 40 : Valeurs AUC associées aux dépassements de VC selon le niveau de CO ₂	235
Tableau 41 : Synthèse des corrélations observées (r de Pearson, seuil 5 %). NS : non significatif. Concentrations en µg/m ³ (ou ppm pour CO ₂).	236
Tableau 42 : Synthèse des coefficients directeurs des relations linéaires [CO ₂ _occup_ppm] = f([polluant_µg/m ³]).	236
Tableau 43 : Synthèse des valeurs prédictives positives et négatives VPP et VPN de dépassement de VC pour un seuil de CO ₂ de 750 ppm.	237
Tableau 44 : Gains diagnostiques positifs et négatifs pour l'ensemble des polluants dans les quatre campagnes de mesures étudiées et pour un seuil de 750 ppm de CO ₂ . En rouge, gain supérieur à 10 %.	238
Tableau 45 : Statistiques de distribution des variables quantitatives de la campagne logements	246
Tableau 46 : Statistiques de distribution des variables quantitatives de la campagne pilote écoles (OQAI).....	263

Liste des figures

Figure 1 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ et la concentration intérieure de formaldéhyde. (MCE : moyenne des carrés des erreurs).....	172
Figure 2 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ et le logarithme de la concentration intérieure d'acétaldéhyde exprimée en ppb.....	173
Figure 3 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ et la concentration intérieure d'acétaldéhyde.	173
Figure 4 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ et le logarithme de la différence entre la concentration intérieure et extérieure d'acroléine exprimée en ppb.....	174
Figure 5 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ et la concentration intérieure d'acroléine.....	174
Figure 6 : Association entre le niveau maximum de CO ₂ et le logarithme de la différence entre la concentration intérieure et extérieure de benzène exprimée en ppb.	175
Figure 7 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ et la concentration intérieure de benzène.....	175
Figure 8 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ et le logarithme de la concentration intérieure de 1,4-dichlorobenzène exprimée en ppb.....	176
Figure 9 : Association entre le niveau P95 de CO ₂ et la concentration intérieure de la fraction massique PM _{2,5} exprimée en µg/m ³	177
Figure 10 : Association entre le niveau P95 de CO ₂ et la concentration intérieure de la fraction massique PM _{2,5} exprimée en µg/m ³ (donnée extrême retirée).....	177
Figure 11 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ (occupation) et la concentration intérieure de la fraction massique PM _{2,5} < 95 µg/m ³	177
Figure 12 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ (sur la durée de programmation) et la concentration intérieure de la fraction massique PM ₁₀ exprimée en µg/m ³	178
Figure 13 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ (sur la durée de programmation) et la concentration intérieure de la fraction massique PM ₁₀ < 95 µg/m ³	178
Figure 14 : ACP : représentation des variables dans le plan principal	181
Figure 15 : ACP : représentation des logements dans le plan principal selon la période de mesure (période de chauffe ou hors-chauffe).....	181
Figure 16 : ACP : représentation des logements dans le plan principal selon la présence (1) / absence de fumeurs (0) dans le volume habitable.	182
Figure 17 : ACP : représentation des logements dans le plan principal selon une partition en 3 classes d'une classification hiérarchique ascendante.	183
Figure 18 : Représentation graphique des proportions de logements qui dépassent ou non la VC du formaldéhyde (à gauche) et de l'acétaldéhyde (à droite, VC = 9,8 µg/m ³).	188
Figure 19 : Représentation graphique des proportions de logements qui dépassent ou non la VC de l'acroléine (à droite).	188
Figure 20 : Représentation graphique des proportions de logements qui dépassent ou non la VC du benzène de 2 µg/m ³ (à gauche) et de 10 µg/m ³ (à droite).	189
Figure 21 : Représentation graphique des proportions de logements qui dépassent ou non la VC du 1,4-dichlorobenzène de 0,9 µg/m ³ (à gauche) et de 60 µg/m ³ (à droite).	189
Figure 22 : Représentation graphique des proportions de logements qui dépassent ou non la VC de la fraction PM _{2,5} (à gauche) et de la fraction PM ₁₀ (à droite).....	189
Figure 23 : Courbes ROC associées au niveau de CO ₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC de formaldéhyde (gauche) et d'acétaldéhyde (droite, VC = 9,8 µg/m ³).	195
Figure 24 : Courbes ROC associées au niveau de CO ₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC de l'acroléine (gauche) et du benzène (droite, VC = 2 µg/m ³).	196
Figure 25 : Courbes ROC associées au niveau de CO ₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC du benzène (gauche, VC = 10 µg/m ³) et du 1,4-dichlorobenzène (droite, VC = 60 µg/m ³).	196

Figure 26 : Courbes ROC associées au niveau de CO ₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC en PM ₁₀ (gauche) et en PM _{2,5} (droite).	196
Figure 27 : Niveau moyen de CO ₂ en fonction du logarithme de la concentration de formaldéhyde.	203
Figure 28 : Niveau moyen de CO ₂ en fonction du niveau intégré de formaldéhyde.	203
Figure 29 : Niveau moyen de CO ₂ durant l'occupation des salles en fonction du niveau intégré de formaldéhyde.	203
Figure 30 : Niveau moyen de CO ₂ en fonction de la différence de concentration de benzène entre l'intérieur et l'extérieur exprimée en ppb.	204
Figure 31 : Niveau moyen de CO ₂ en fonction du niveau intégré de benzène.	204
Figure 32 : Niveau moyen de CO ₂ durant l'occupation des salles en fonction du niveau intégré de benzène. .	205
Figure 33 : ACP – données écoles : cercle de corrélations des variables.	207
Figure 34 : ACP – données écoles : représentations des salles de classes selon la saison (E pour été et H pour hiver). Les triangles et carrés verts correspondent respectivement aux établissements situés sur l'Île de la Réunion et à la Martinique.	208
Figure 35 : ACP – données écoles : répartition des salles de classes en 5 catégories.	209
Figure 36 : Proportions de salles de classes dépassant ou non en été ou en hiver la VC du formaldéhyde selon le niveau de CO ₂	212
Figure 37 : Proportions de salles de classes dépassant ou non en été ou en hiver la VC du benzène selon le niveau de CO ₂	212
Figure 38 : Courbes ROC associées au niveau de CO ₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC de formaldéhyde (gauche) et de benzène (droite, VC = 2 µg/m ³).	214
Figure 39 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ et la concentration intérieure de formaldéhyde exprimée en µg/m ³	220
Figure 40 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ durant l'occupation des salles et la concentration intérieure de formaldéhyde exprimée en µg/m ³	220
Figure 41 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ et la concentration intérieure d'acétaldéhyde exprimée en µg/m ³	221
Figure 42 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ durant l'occupation et la concentration intérieure d'acétaldéhyde exprimée en µg/m ³	221
Figure 43 : Association entre le niveau moyen de CO ₂ calculé sur la période de programmation et la concentration intérieure en fraction massique PM _{2,5} en µg/m ³	222
Figure 44 : Courbes ROC associées au niveau de CO ₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC de l'acétaldéhyde (gauche, VC = 9,8 µg/m ³) et du benzène (droite, VC = 2 µg/m ³).	227
Figure 45 : Corrélation entre le niveau moyen de CO ₂ entre 09h00 et 19h00 et la concentration en formaldéhyde dans les bureaux.	231
Figure 46 : Corrélation entre le niveau moyen de CO ₂ entre 09h00 et 19h00 et la concentration d'acétaldéhyde dans les bureaux.	231
Figure 47 : Courbe ROC associée au niveau de CO ₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC de l'acétaldéhyde.	235

1 Contexte de l'étude

Plusieurs études internationales ont investigué d'éventuelles associations entre le niveau de dioxyde de carbone (CO₂) et des effets sur la santé, la perception de la qualité de l'air ou encore la performance en milieu scolaire ou dans le tertiaire (voir notamment les revues de Seppanen et al., 1999 ; Sundell et al., 2011). Des associations ont pu être observées dans certains cas, les niveaux de CO₂ étant bien inférieurs aux seuils connus de toxicité du CO₂ (INRS, 2005). Ces observations interrogent sur l'utilité du CO₂ en tant qu'indicateur de la présence d'autres polluants. Il est néanmoins nécessaire de valider cette hypothèse par la recherche de corrélations significatives entre le CO₂ et d'autres polluants d'intérêt pour la qualité de l'air intérieur.

Par ailleurs, des concentrations limites de CO₂ sont utilisées dans la réglementation sur l'aération des locaux (RSDT, 1985) et dans l'indice de confinement ICONE utilisé pour la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public (Ribéron et al., 2012 ; MEDDTL, 2012), sans que le fondement scientifique ni sa formulation ne soient clairement explicités.

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'une convention de recherche et développement entre l'ANSES et le CSTB et vise à rechercher et analyser les corrélations entre le niveau de CO₂ et le niveau de polluants cibles à partir des données produites par des campagnes de mesures dans différents milieux intérieurs en France.

2 Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude est de rechercher les corrélations entre le niveau de CO₂ et différents polluants cibles définis au travers d'une hiérarchisation sanitaire pour différents environnements intérieurs (ANSES, 2011). Par ailleurs, les résultats de quatre campagnes de mesures ayant à la fois intégré des mesures de CO₂ et de polluants cibles sont disponibles :

- Une campagne de mesure menée dans 567 logements en France (campagne nationale de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur ; Kirchner et al., 2007).
- Une campagne de mesure dans 310 crèches, écoles maternelles et élémentaires en France (MEDDTL, 2012 ; Michelot et al., 2011) avec 896 salles instrumentées entre septembre 2009 et décembre 2011.
- Une campagne pilote dans 17 écoles maternelles et élémentaires de l'agglomération de Clermont-Ferrand avec 51 salles de classes instrumentées en 2010 (OQAI, Derbez et Dassonville, 2011).
- Une campagne menée dans 9 immeubles de bureaux en France par le CSTB dans le cadre du projet européen Officair (<http://www.officair-project.eu/>) avec 36 points de mesures distincts.

Tous les polluants cibles n'ont pas forcément été mesurés dans l'ensemble de ces campagnes. Les polluants cibles disponibles par campagne de mesure sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 21 : Liste des polluants cibles disponibles par campagne de mesure

Polluant cible	Campagne de mesure			
	Logements	Ecoles et crèches	Ecoles	Bureaux
	2003-2005	2009-2011	2010	2012-2013
Formaldéhyde	X	X	X	X
Benzène	X	X	X	X
Acétaldéhyde	X		X	X
Acroléine	X			X
1,4-Dichlorobenzène	X			
PM _{2,5}	X		X	(X)*
PM ₁₀	X			

* Les données ont été toutefois invalidées.

La recherche de corrélations a été complétée en déterminant la proportion de logements, d'écoles ou de bureaux dépassant ou non une valeur cible définie pour un polluant donné selon le niveau de CO₂.

La sélection de la valeur cible (VC) pour chacun des polluants a été réalisée par l'Anses selon la démarche suivante :

1. en première intention, la VC correspond à la valeur guide de qualité de l'air intérieur proposée par l'Anses (VGAI_{Anses}) ;
2. si aucune VGAI_{Anses} n'est disponible pour le polluant cible, la VC correspond à la VTR à seuil pour une exposition chronique par inhalation ou à la concentration équivalente à un excès de risque individuel (ERI) de 10⁻⁵ proposée par l'Anses (VTR_{Anses}) ;
3. si aucune VTR_{Anses} n'est disponible pour le polluant cible, la VC correspond à la VTR à seuil pour une exposition chronique par inhalation ou à la concentration équivalente à un excès de risque individuel (ERI) de 10⁻⁵ la plus faible (VTR) ;
4. si aucune VTR n'est disponible pour le polluant cible (cas des fractions massiques de particules PM_{2,5} et PM₁₀), la VC correspond à la valeur guide OMS en air ambiant.

Pour les polluants cibles ne disposant ni de VGAI_{Anses} ni de VTR_{Anses} et n'ayant donc pas fait l'objet d'une expertise de l'Anses (cas n° 3), la VTR existante la plus protectrice a été recherchée par l'Anses dans la base Furetox (www.furetox.fr). Furetox est une base de données recensant les VTR publiées par un certain nombre d'organismes pour des expositions chroniques uniquement. Cette base permet un accès rapide aux VTR associées à chaque substance recherchée pour la voie orale et inhalatoire ainsi que pour les effets à seuil et sans seuil. Elle recense les VTR établies par des instances nationales ou internationales, reconnues dans le domaine de l'évaluation des risques, incluant l'ATSDR¹⁴, l'OEHHA¹⁵, l'OMS/JECFA¹⁶, l'INERIS, Agritox, JMPR¹⁷, Santé Canada, le RIVM¹⁸,

¹⁴ ATSDR : Agency for Toxic Pollutants and Disease Registry (Etats-Unis)

¹⁵ OEHHA : Office of Environmental Health Hazard Assessment, agence de l'état de Californie, Etats-Unis

l'U.S. EPA¹⁹ et l'OMS²⁰/IPCS²¹. Le numéro d'enregistrement CAS des polluants cibles concernés a été utilisé dans le moteur de recherche Furetox.

Cette démarche de sélection des VC s'est voulue pragmatique dans la mesure où le choix a été de retenir en première intention les valeurs issues de l'expertise de l'Anses et à défaut les valeurs les plus protectrices pour la santé, sans analyse approfondie de la construction de ces valeurs (transparence de la méthode de construction, choix de l'effet critique, de l'étude clé, de la dose critique, des facteurs d'incertitude, les ajustements éventuels, etc.).

Concernant le 1,4-dichlorobenzène, en plus de la valeur la plus protectrice qui correspond à une concentration de 0,9 µg.m⁻³ équivalente à un ERI de 10⁻⁵ (OEHHA), la VTR à seuil la plus protectrice de 0,01 ppm soit 60 µg.m⁻³ (ATSDR) a également été retenue comme VC compte tenu de la prévalence très élevée des concentrations de 1,4-dichlorobenzène supérieures à 0,9 µg/m³ dans les logements (91 %).

Pour les particules, aucune VGAI ou VTR n'étant disponible, les valeurs guides de l'OMS pour l'air ambiant, s'apparentant à des valeurs de gestion, ont été retenues comme VC.

Tableau 22 : Valeur cible retenue pour chaque polluant.

polluant	Valeur cible en µg/m ³	Source
formaldéhyde	10	VGAI Anses
acétaldéhyde	9,8	(ERI 10 ⁻⁵) VTR la plus protectrice (OEHHA)
acroléine	0,8	VGAI Anses
benzène	2	(ERI 10 ⁻⁵) VGAI Anses <i>sans seuil</i>
	10	VGAI Anses <i>à seuil</i>
1,4-dichlorobenzène	0,9	(ERI 10 ⁻⁵) VTR la plus protectrice (OEHHA)
	60	VTR à seuil la plus protectrice (ATSDR)
PM _{2,5}	10	VG air ambiant (OMS)

Les concentrations retenues comme valeurs « seuil » en CO₂ sont présentées au Tableau 23.

¹⁶ JEFA : Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives

¹⁷ JMPR : Joint Meeting on Pesticides Residues

¹⁸ RIVM : Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. Institut national de la santé publique et de l'Environnement (Pays-bas).

¹⁹ US EPA : United States Environmental Protection Agency

²⁰ OMS : Organisation Mondiale de la Santé

²¹ IPCS : International Program on Chemical Safety

Tableau 23 : Valeurs seuil utilisées pour définir les classes de concentrations de CO₂.

Concentration (ppm)	justification
750	750 ppm : somme de la valeur par défaut de 350 ppm au-dessus de l'air ambiant pour une "qualité de l'air intérieur excellente" (norme EN15251) et de la valeur 400 ppm correspondant à une concentration usuellement retenue pour l'air ambiant extérieur.
1000	1000 ppm : limite réglementaire et normative dans les espaces intérieurs la plus usuelle, exigée en France par le RSDT (non résidentiel).
1500	1500 ppm : limite réglementaire ou normative usuellement identifiée, en particulier pour les bâtiments scolaires – Royaume-Uni, Allemagne, Autriche.
2000	2000 ppm : seuil suffisamment élevé par rapport à la distribution des concentrations moyennes de CO ₂ mesurées par le CSTB en période d'occupation dans les bâtiments scolaires.

3 Logements : campagne nationale OQAI 2003-2005

L'Observatoire de la qualité de l'air intérieur a mené entre septembre 2003 et décembre 2005 une campagne nationale dans 567 résidences principales en France continentale. Une seule campagne de mesure a été réalisée au sein de chaque logement soit en période de chauffe soit en période hors-chauffe selon la date de l'enquête. Cette campagne de mesures a été présentée en détail par Kirchner et al. (2007) et les résultats sont consultables en ligne (<http://www.air-interieur.org>).

3.1 Présentation des données disponibles

Le détail des paramètres de la campagne pris en compte pour l'étude est présenté ci-après. La durée des mesures couvrait une semaine complète (7 jours). Pour la mesure des particules, une programmation du prélèvement a été mise en place pour prendre en compte la présence des occupants dans leur logement et se rapprocher d'une mesure d'exposition. La programmation a été élaborée a priori en sélectionnant les soirées en jours de semaine, de 17h00 jusqu'à 08h00 le lendemain, et toute la journée durant le samedi et le dimanche.

Tableau 24 : Caractéristiques de la mesure des polluants lors de la campagne logements.

Paramètre	Unités	Méthode	Lieu	Durée
CO ₂	ppm ²²	Mesure en continu (Sonde Q-Track) Pas de temps : 10 min	Chambre	7 jours
Formaldéhyde	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant DNPH (Radiello®) Analyse par HPLC/UV ²³	Chambre Extérieur	7 jours
Acétaldéhyde	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant DNPH (Radiello®) Analyse par HPLC/UV	Chambre Extérieur	7 jours
Acroléine	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant DNPH (Radiello®) Analyse par HPLC/UV	Chambre Extérieur	7 jours
Benzène	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant Carbograph4 (Radiello®) Analyse par TD/GC/MS ²⁴	Chambre Extérieur	7 jours
1,4-Dichlorobenzène	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant Carbograph4 (Radiello®) Analyse par TD/GC/MS	Chambre Extérieur	7 jours
PM _{2,5}	µg/m ³	Prélèvement actif (programmation) Collecte sur membrane Teflon Pesées avant / après prélèvement	Séjour	17h-08h (L-V) 24/24 (WE) 123h cumulées
PM ₁₀	µg/m ³	Prélèvement actif (programmation) Collecte sur membrane Teflon Pesées avant / après prélèvement	Séjour	17h-08h (L-V) 24/24 (WE) 123h cumulées

La méthode de dérivation à la dinitrophenyl hydrazine (DNPH) n'est pas la plus appropriée pour la mesure de l'acroléine dont le produit dérivé n'est pas très stable. Il est nécessaire d'avoir ce point métrologique à l'esprit au moment d'interpréter les résultats qui lui sont associés.

Le CO₂ étant enregistré en continu sur une semaine, il est nécessaire de prendre en compte un critère intégré pour pouvoir le comparer aux autres polluants qui sont exprimés en termes de concentration intégrée sur la semaine. Différents critères ont été utilisés. Ils sont décrits ci-après :

- La concentration moyenne sur les 7 jours de mesure (période identique à la durée de prélèvement des capteurs passifs), intégrant le jour et la nuit (CO₂_moyen_sem)
- La concentration maximale observée sur la semaine (CO₂_max_sem). La limite de l'appareil est fixée à 6000 ppm. Le maximum observé peut dans certains cas être tronqué.
- La concentration correspondante au 95^{ème} percentile de la distribution des données au cours de la semaine (CO₂_P95_sem). Ce critère permet de palier la présence de données dépassant la limite de l'appareil par rapport au maximum.
- La concentration moyenne durant la programmation de mesure des particules dans le séjour (CO₂_moy_occup).

²² Unités ppm : fraction volumique en parties par million (1 ppm = 1 pour 10⁶), de même 1 ppb représente une partie par milliard (1 pour 10⁹).

²³ DNPH : dinitrophenyl hydrazine : réactif spécifique aux fonctions aldéhydes ou cétones des substances. HPLC/UV : chromatographie liquide haute performance et analyse par absorption dans l'ultraviolet.

²⁴ TD/GC/MS : extraction des composés organiques volatils par thermodésorption, séparation des substances par chromatographie en phase gazeuse et analyse par spectrométrie de masse.

De nouvelles variables ont également été créées à partir des concentrations de polluants observées. Ces nouvelles variables ont été déclinées pour chaque polluant et sont décrites ci-après :

- Fraction volumique du polluant gazeux exprimé en ppb. La transformation de la concentration massique en fraction volumique permet d'intégrer la température moyenne lors du prélèvement et ainsi de comparer deux mesures réalisées à des températures différentes (notamment entre l'intérieur et l'extérieur). Les concentrations de particules ne peuvent pas faire l'objet de transformations en fractions volumiques.
- Le logarithme décimal de la fraction volumique du polluant gazeux. Les distributions de concentrations des polluants étant généralement voisines d'une distribution log-normale, la transformation des données en log permet de se rapprocher d'une distribution normale.
- La différence de concentration exprimée en ppb entre l'intérieur et l'extérieur pour un polluant donné. La différence a été préférée au ratio car elle permet de garder la même unité que les concentrations prises individuellement et surtout parce qu'une valeur très faible à l'extérieur peut entraîner des ratios très élevés.
- Le logarithme décimal de cette différence, lorsque celle-ci est strictement positive, c'est-à-dire lorsque la concentration est strictement plus élevée à l'intérieur par rapport à l'extérieur. Cette transformation logarithmique vise à normaliser la distribution.

Pour l'ensemble des données de concentration, les valeurs inférieures à la limite de quantification (LQ) ont été remplacées par la valeur LQ/2. De même, les valeurs inférieures à la limite de détection (LD) ont été remplacées par la valeur LD/2. Le CO₂ ne présente jamais de valeur inférieure à sa limite de quantification, étant donné qu'il est déjà présent dans l'air extérieur à des niveaux voisins de 380 ppm. La LD est déterminée à partir des masses résiduelles mesurées dans des cartouches adsorbantes propres. La LQ est déterminée à partir des conditions analytiques d'étalonnage. Pour les particules, les données brutes ont été conservées, même si elles étaient inférieures à la LQ. Les valeurs de LD et LQ pour les fractions PM_{2,5} et PM₁₀, déterminées à partir de filtres témoins, sont présentées au Tableau 25.

Tableau 25 : Limites de détection et de quantification des polluants cibles

Substance	LD µg/m ³	LQ µg/m ³	% données < LD	% données < LQ	% données ext < LD	% données ext < LQ
CO ₂	1 ppm	50 ppm	0	0	-	-
Formaldéhyde	0,6	1,1	0	0	9,5	9,5
Acétaldéhyde	0,3	0,4	0	0	2,3	2,3
Acroléine	0,1	0,3	0,7	4,2	21,4	77,9
Benzène	0,4	1,1	1,5	17	7,3	51,2
1,4-Dichlorobenzène	0,07	0,2	1,9	6	5,3	15,6
PM _{2,5}	0,8	2,6	0	0,3	-	-
PM ₁₀	0,8	2,6	0	0,3	-	-

L'incertitude de mesure a été déterminée lors de la campagne nationale logement de l'OQAI pour plusieurs niveaux de concentrations en composés organiques volatils ou pour un niveau donné en fraction massique de particules ou en CO₂ (Kirchner et al., 2007b). Les incertitudes obtenues sont présentées au Tableau 26.

Tableau 26 : Incertitudes de mesure des polluants mesurés dans la campagne logements

	Plage de concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Incertitude élargie (k = 2) en %
Formaldéhyde	9 – 85	20 % - 25 %
Acétaldéhyde	6 -94	24 % - 35 %
Acroléine	0,5 – 13	23 % - 49 %
Benzène	1 – 22	21 % - 34 %
1,4-Dichlorobenzène	1 – 4800	25 % - 52 %
PM _{2,5}	13	20 %
PM ₁₀	22	27 %
CO ₂	1500 ppm	4,5 %

Enfin, d'autres paramètres ont été pris en considération en supposant qu'ils pouvaient affecter le niveau de CO₂ et/ou des polluants cibles. Ces paramètres sont listés au Tableau 27.

Tableau 27 : Autres paramètres pris en compte issus de la campagne logements

Paramètre	Modalités
Température moyenne de la chambre	Variable quantitative
Température moyenne extérieure	Variable quantitative
Humidité spécifique (g/kg air sec)	Variable quantitative
Taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (vol/h)	Variable quantitative
Taux de renouvellement d'air nocturne (équivalent minimum hebdomadaire) (vol/h)	Variable quantitative
Volume du logement (m ³)	Variable quantitative
Nombre moyen d'occupants dans la chambre sur la semaine	Variable quantitative
Nombre moyen d'occupants dans le séjour sur la semaine	Variable quantitative
Nombre moyen d'occupants dans le logement sur la semaine	Variable quantitative
Durée cumulée d'occupation de la chambre par au moins un individu sur la semaine (min)	Variable quantitative
Durée cumulée d'occupation du séjour par au moins un individu sur la semaine (min)	Variable quantitative
Etat d'ouverture de la porte de la chambre	4 modalités
Fréquence d'ouverture des fenêtres du séjour par jour	3 modalités
Fréquence d'ouverture des fenêtres de la chambre	3 modalités
Fréquence d'ouverture des fenêtres du logement	3 modalités
Nombre de fumeurs dans le logement	5 modalités
Fonctionnement du chauffage	2 modalités

Les statistiques descriptives des données sont présentées à l'annexe 11.1.

3.2 Corrélations entre le CO₂ et les polluants cibles

La relation entre les deux variables quantitatives que sont la concentration de CO₂ et celle d'un polluant cible a été exprimée par un coefficient de corrélation linéaire. Le principe de cette relation est présenté en annexe 10.1.

Les corrélations (r de Pearson) entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants mesurés sont présentées au Tableau 28. Les p -values associées sont présentées au Tableau 29.

Tout d'abord, les différents critères utilisés pour exprimer le niveau de CO₂ sont fortement corrélés entre eux. Un seul critère pourrait suffire. Le niveau moyen hebdomadaire est conservé par défaut. Le niveau moyen de CO₂ déterminé sur la période de programmation n'est lui utilisé que pour la comparaison aux niveaux de particules.

Une corrélation négative significative est observée entre le niveau de CO₂ et la température aussi bien intérieure qu'extérieure. Ceci indique que la saison à laquelle a été réalisée la mesure joue sur le niveau de CO₂ intérieur, celui-ci étant en général plus faible durant la saison chaude. Il est nécessaire de prendre en compte la saison pour l'analyse des corrélations brutes observées. La saison peut modifier la fréquence d'occupation et les pratiques d'aération du logement, qui ont un impact direct sur le niveau de CO₂.

Avec une certaine logique, le niveau de CO₂ est bien anticorrélé avec le taux de renouvellement d'air moyen. En effet, le calcul du taux de renouvellement d'air moyen est basé sur le niveau de CO₂ moyen sur la semaine, mais aussi sur le nombre moyen d'occupants sur la semaine et le volume effectif de la pièce ou du logement selon la situation de la porte de la chambre (ouverte ou fermée). Ces deux derniers paramètres sont également associés de manière significative au niveau de CO₂. Par contre, la durée d'occupation sur la semaine dans la chambre ou le séjour ne l'est pas.

En dehors du 1,4-dichlorobenzène, la concentration intérieure des polluants cibles est corrélée avec le niveau de CO₂ et ce quelle que soit la forme de la variable utilisée (concentration en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en ppb, en différence par rapport à l'extérieur, en logarithme). Une corrélation entre le niveau de 1,4-dichlorobenzène et celui de CO₂ n'est observée que lorsque les valeurs sont transformées en logarithme. La présence de très fortes valeurs de 1,4-dichlorobenzène en est sans doute la cause. Une corrélation des rangs (Spearman) entre ces deux variables est d'ailleurs systématiquement significative ($p < 0,01$).

Tableau 28 : Corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de significativité alpha=0.05.

	Type d'association	CO ₂ _moyen occup	CO ₂ _moyen	CO ₂ _max	CO ₂ _P95
CO ₂ _moyen_occup	+				
CO ₂ _moyen_sem	+	0.932			
CO ₂ _max_sem	+	0.786	0.819		
CO ₂ _P95_sem	+	0.838	0.885	0.945	
Log_CO ₂ _moy_occup	+	0.962	0.903	0.769	0.808
Log_CO ₂ _moy	+	0.913	0.964	0.821	0.871
Log_CO ₂ _max	+	0.779	0.801	0.954	0.891
Log_CO ₂ _P95	+	0.835	0.866	0.909	0.946
Température chambre (°C)	-	-0.206	-0.216	-0.166	-0.189
Température extérieure (°C)	-	-0.244	-0.266	-0.139	-0.144
Humidité_specifique (g/kg)	+	0.065	0.076	0.126	0.130
Formaldéhyde	+	0.191	0.229	0.171	0.175
Acétaldéhyde	+	0.371	0.449	0.338	0.352
Acroléine	+	0.247	0.299	0.232	0.217
Benzène	+	0.150	0.166	0.169	0.155
1,4-Dichlorobenzène		0.043	0.043	0.034	0.030
PM10	+	0.209	0.237	0.191	0.207
PM2.5	+	0.123	0.170	0.183	0.190
Formaldéhyde_ext	-	-0.199	-0.172	-0.116	-0.156
Acétaldéhyde_ext	-	-0.108	-0.078	-0.092	-0.111
Acroléine_ext	+	0.070	0.133	0.113	0.107
Benzène_ext		-0.006	0.052	-0.009	-0.037
Dichlorobenzène_ext		0.036	0.032	0.055	0.050
Formaldéhyde_ppb	+	0.185	0.223	0.166	0.171
Acétaldéhyde_ppb	+	0.369	0.448	0.337	0.351
Acroléine_ppb	+	0.246	0.299	0.232	0.217
Benzène_ppb	+	0.154	0.170	0.171	0.158
Dichlorobenzène_ppb		0.040	0.041	0.032	0.028
Formaldéhyde_ext_ppb	-	-0.210	-0.185	-0.124	-0.163
Acétaldéhyde_ext_ppb	-	-0.117	-0.088	-0.098	-0.117
Acroléine_ext_ppb	+	0.064	0.127	0.107	0.103
Benzène_ext_ppb		-0.005	0.050	-0.011	-0.036
Dichlorobenzène_ext_ppb		0.031	0.027	0.053	0.047
diff_Formaldéhyde_ppb	+	0.193	0.228	0.161	0.165
diff_Acétaldéhyde_ppb	+	0.358	0.449	0.341	0.358
diff_Acroléine_ppb	+	0.219	0.275	0.207	0.194
diff_Benzène_ppb	+	0.150	0.151	0.177	0.172
diff_Dichlorobenzène_ppb		0.038	0.036	0.033	0.027

	Type d'association	CO ₂ _moyen occup	CO ₂ _moyen	CO ₂ _max	CO ₂ _P95
log_Formaldéhyde_ppb	+	0.169	0.214	0.184	0.183
log_Acétaldéhyde_ppb	+	0.399	0.463	0.366	0.371
log_Acroléine_ppb	+	0.307	0.370	0.306	0.291
log_Benzène_ppb	+	0.183	0.212	0.203	0.185
log_Dichlorobenzène_ppb	+	0.139	0.140	0.100	0.095
log_Formaldéhyde_ppb_ext	-	-0.208	-0.180	-0.104	-0.149
log_Acétaldéhyde_ppb_ext	-	-0.109	-0.072	-0.080	-0.111
log_Acroléine_ppb_ext	+	0.062	0.134	0.082	0.074
log_Benzène_ppb_ext		-0.025	0.036	-0.016	-0.051
log_Dichlorobenzène_ppb_ext		-0.022	-0.023	0.005	0.003
log_diff_Formaldéhyde_ppb	+	0.180	0.218	0.182	0.181
log_diff_Acétaldéhyde_ppb	+	0.395	0.460	0.369	0.375
log_diff_Acroléine_ppb	+	0.308	0.372	0.294	0.291
log_diff_Benzène_ppb	+	0.189	0.207	0.217	0.209
log_diff_Dichlorobenzène_ppb	+	0.148	0.133	0.101	0.095
Taux de renouvellement d'air moyen	-	-0.408	-0.423	-0.370	-0.394
Taux de renouvellement d'air minimum nocturne	-	-0.356	-0.359	-0.331	-0.341
Volume	-	-0.033	-0.096	-0.143	-0.102
Nombre moyen d'occupants_chambre	+	0.157	0.167	0.105	0.126
Nombre moyen d'occupants_sejour	+	0.225	0.224	0.150	0.182
Durée d'occupation de la chambre (min)		0.031	0.049	-0.006	-0.025
Durée d'occupation du séjour (min)	+	0.076	0.099	0.064	0.048
Nombre moyen d'occupants de la chambre (programmation)	+	0.151	0.161	0.094	0.111
Nombre moyen d'occupants du séjour (programmation)	+	0.221	0.225	0.144	0.180
Durée d'occupation de la chambre (min) - programmation		-0.003	0.035	-0.003	-0.024
Durée d'occupation du séjour (min) - programmation	+	0.084	0.107	0.044	0.033

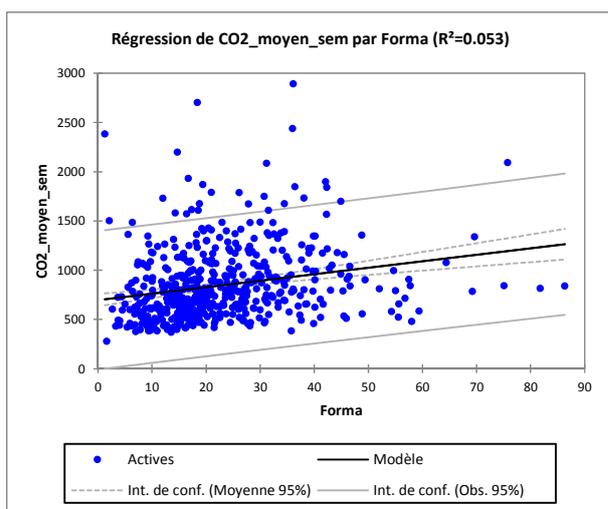
Tableau 29 : p-values associées aux corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants

	Type d'association	CO ₂ _moyen occup	CO ₂ _moyen	CO ₂ _max	CO ₂ _P95
CO ₂ _moyen_occup	+				
CO ₂ _moyen_sem	+	< 0.0001			
CO ₂ _max_sem	+	< 0.0001	< 0.0001		
CO ₂ _P95_sem	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	
Log_CO ₂ _moy_occup	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Log_CO ₂ _moy	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Log_CO ₂ _max	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Log_CO ₂ _P95	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Température chambre (°C)	-	< 0.0001	< 0.0001	0.0002	< 0.0001
Température extérieure (°C)	-	< 0.0001	< 0.0001	0.0013	0.0009
Humidité_specifique (g/kg)	+	0.1509	0.0930	0.0055	0.0040
Formaldéhyde	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Acétaldéhyde	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Acroléine	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Benzène	+	0.0009	0.0002	0.0001	0.0004
1,4-Dichlorobenzène		0.3444	0.3305	0.4429	0.4961
PM10	+	0.0004	< 0.0001	0.0011	0.0004
PM2.5	+	0.0442	0.0045	0.0022	0.0015
Formaldéhyde_ext	-	< 0.0001	0.0001	0.0096	0.0005
Acétaldéhyde_ext	-	0.0173	0.0811	0.0403	0.0130
Acroléine_ext	+	0.1264	0.0028	0.0113	0.0169
Benzène_ext		0.9047	0.2579	0.8387	0.4191
Dichlorobenzène_ext		0.4440	0.4810	0.2280	0.2722
Formaldéhyde_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	0.0001	< 0.0001
Acétaldéhyde_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Acroléine_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Benzène_ppb	+	0.0006	0.0001	0.0001	0.0003
Dichlorobenzène_ppb		0.3758	0.3585	0.4757	0.5252
Formaldéhyde_ext_ppb	-	< 0.0001	< 0.0001	0.0054	0.0002
Acétaldéhyde_ext_ppb	-	0.0100	0.0484	0.0282	0.0092
Acroléine_ext_ppb	+	0.1597	0.0044	0.0168	0.0216
Benzène_ext_ppb		0.9072	0.2749	0.8006	0.4301
Dichlorobenzène_ext_ppb		0.4958	0.5555	0.2464	0.3058
diff_Formaldéhyde_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	0.0003	0.0002
diff_Acétaldéhyde_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
diff_Acroléine_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
diff_Benzène_ppb	+	0.0012	0.0010	0.0001	0.0002
diff_Dichlorobenzène_ppb		0.4150	0.4291	0.4696	0.5554

	Type d'association	CO ₂ _moyen occup	CO ₂ _moyen	CO ₂ _max	CO ₂ _P95
log_Formaldéhyde_ppb	+	0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
log_Acétaldéhyde_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
log_Acroléine_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
log_Benzène_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
log_Dichlorobenzène_ppb	+	0.0021	0.0017	0.0251	0.0328
log_Formaldéhyde_ppb_ext	-	< 0.0001	< 0.0001	0.0207	0.0008
log_Acétaldéhyde_ppb_ext	-	0.0171	0.1088	0.0743	0.0140
log_Acroléine_ppb_ext	+	0.2250	0.0081	0.1038	0.1472
log_Benzène_ppb_ext		0.6021	0.4482	0.7425	0.2757
log_Dichlorobenzène_ppb_ext		0.6414	0.6212	0.9106	0.9530
log_diff_Formaldéhyde_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
log_diff_Acétaldéhyde_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
log_diff_Acroléine_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
log_diff_Benzène_ppb	+	0.0002	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
log_diff_Dichlorobenzène_ppb	+	0.0024	0.0055	0.0350	0.0487
Taux de renouvellement d'air moyen	-	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Taux de renouvellement d'air minimum nocturne	-	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Volume	-	0.4518	0.0263	0.0009	0.0180
Nombre moyen d'occupants_chambre	+	0.0006	0.0002	0.0206	0.0055
Nombre moyen d'occupants_sejour	+	< 0.0001	< 0.0001	0.0010	< 0.0001
Durée d'occupation de la chambre (min)		0.4986	0.2832	0.9014	0.5881
Durée d'occupation du séjour (min)	+	0.1025	0.0303	0.1635	0.2925
Nombre moyen d'occupants de la chambre (programmation)	+	0.0010	0.0004	0.0395	0.0149
Nombre moyen d'occupants du séjour (programmation)	+	< 0.0001	< 0.0001	0.0017	< 0.0001
Durée d'occupation de la chambre (min) - programmation		0.9485	0.4411	0.9560	0.6050
Durée d'occupation du séjour (min) - programmation	+	0.0701	0.0203	0.3423	0.4691

3.2.1 Corrélation CO₂ / Formaldéhyde dans les logements (chambre)

L'association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure de formaldéhyde a donné le r de Pearson le plus élevé (0.229). Le nuage de points associé est représenté à la Figure 4. L'intensité de la relation est représentée par le coefficient de détermination r². Le r² ajusté est une correction du r² qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Il correspond à la part de dispersion commune aux deux variables, soit dans ce cas 5 %. L'intensité de la relation entre le CO₂ et le formaldéhyde est donc très faible.



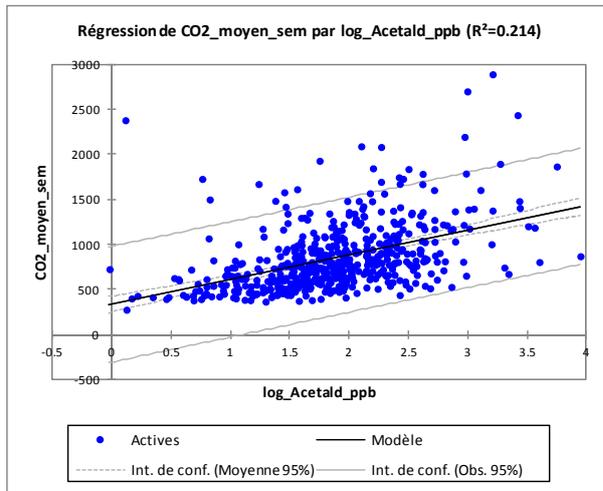
Observations	525
R ²	0.053
R ² ajusté	0.051
MCE	127233
Constante	695 (633 - 758)
Pente	6.6 (4.2 - 9.0)

Figure 4 : Association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure de formaldéhyde. (MCE : moyenne des carrés des erreurs)

3.2.2 Corrélation CO₂ / Acétaldéhyde dans les logements (chambre)

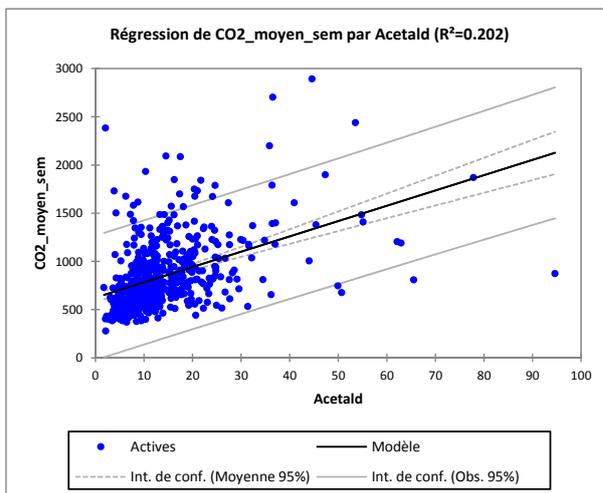
L'association entre le niveau moyen de CO₂ et le logarithme de la concentration intérieure d'acétaldéhyde a donné le r de Pearson le plus élevé (0.463). Le nuage de points associé est représenté à la Figure 5. L'intensité de la relation représentée par le coefficient de détermination r² est de 21 %. Cette intensité est donc faible, mais pas négligeable.

L'association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure d'acétaldéhyde (r = 0.449) est représenté à la Figure 6. L'intensité de la relation diminue légèrement (20 %).



Observations	525
R ²	0.214
R ² ajusté	0.213
MCE	105520
Constante	336 (247 - 424)
Pente	275 (230 - 320)

Figure 5 : Association entre le niveau moyen de CO₂ et le logarithme de la concentration intérieure d'acétaldéhyde exprimée en ppb.



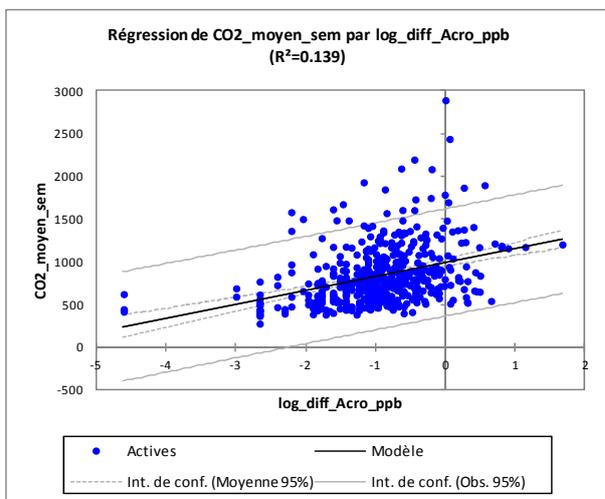
Observations	525
R ²	0.202
R ² ajusté	0.200
MCE	107206
Constante	623 (576 - 670)
Pente	15.9 (13.2 – 18.6)

Figure 6 : Association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure d'acétaldéhyde.

3.2.3 Corrélation CO₂ / Acroléine dans les logements (chambre)

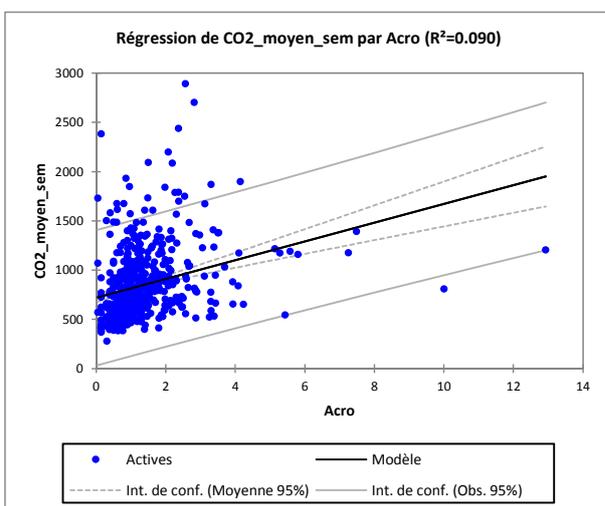
L'association entre le niveau moyen de CO₂ et le logarithme de la différence entre la concentration intérieure et extérieure en acroléine a donné le r de Pearson le plus élevé (0.372). Le nuage de points associé est représenté à la Figure 7. L'intensité de la relation représentée par le coefficient de détermination r² est de 14 %. Elle est plutôt faible.

L'association directe entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure d'acroléine (0.299) est représentée à la Figure 8. L'intensité de la relation n'est alors plus que de 9 %.



Observations	480
R ²	0.139
R ² ajusté	0.137
MCE	101497
Constante	990 (944 - 1035)
Pente	162 (126 - 198)

Figure 7 : Association entre le niveau moyen de CO₂ et le logarithme de la différence entre la concentration intérieure et extérieure d'acroléine exprimée en ppb.



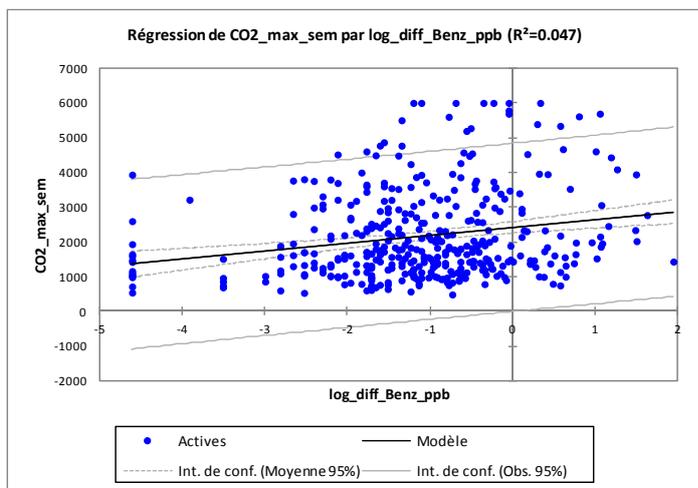
Observations	525
R ²	0.090
R ² ajusté	0.088
MCE	122266
Constante	718 (672 - 764)
Pente	95.4 (69.3 - 121.5)

Figure 8 : Association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure d'acroléine.

3.2.4 Corrélation CO₂ / Benzène dans les logements (chambre)

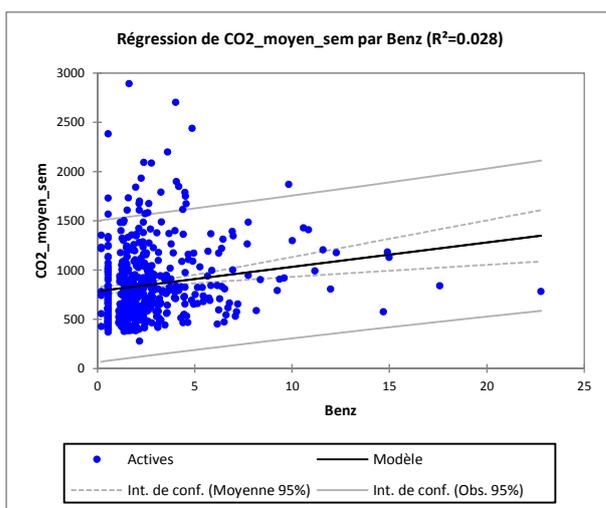
La corrélation observée est la plus forte (r de Pearson le plus élevé, soit 0.217) en associant le niveau maximum de CO₂ et le logarithme de la différence entre la concentration intérieure et extérieure en benzène. Le nuage de points associé est représenté à la Figure 9. L'intensité de la relation représentée par le coefficient de détermination r^2 est de 5 %. Elle est par conséquent très faible.

L'association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure de benzène indique également une corrélation significative, mais avec une intensité moindre ($r = 0,166$ et r^2 de 3 %). Cette association est représentée à la Figure 10.



Observations	394
R ²	0.047
R ² ajusté	0.045
MCE	1505600
Constante	2415 (2247 - 2584)
Pente	229 (127 - 331)

Figure 9 : Association entre le niveau maximum de CO₂ et le logarithme de la différence entre la concentration intérieure et extérieure de benzène exprimée en ppb.



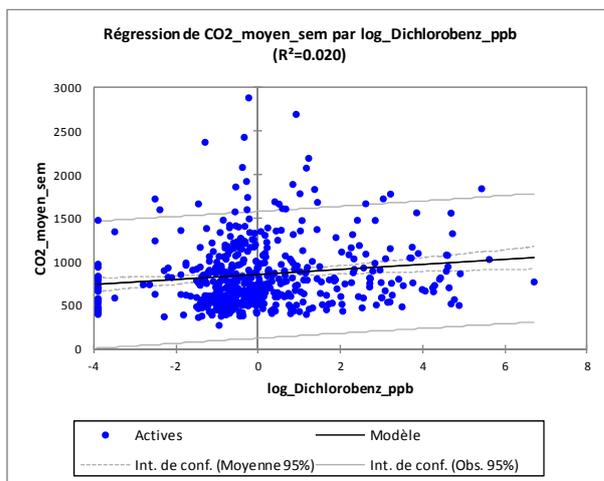
Observations	506
R ²	0.028
R ² ajusté	0.026
MCE	133397
Constante	784 (737 - 830)
Pente	24.8 (11.9 – 37.7)

Figure 10 : Association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure de benzène.

3.2.5 Corrélation CO₂ / 1,4-dichlorobenzène dans les logements (chambre)

L'association entre le niveau moyen de CO₂ et le logarithme de la concentration intérieure en 1,4-dichlorobenzène a donné le r de Pearson le plus élevé (0.140). Le nuage de points associé est représenté à la Figure 11. L'intensité de la relation représentée par le coefficient de détermination r² est de 2 %. Celle-ci est pratiquement négligeable.

La concentration intérieure de 1,4-dichlorobenzène n'est par contre pas corrélée avec le niveau de CO₂, sans doute du fait de la présence de valeurs extrêmes.



Observations	502
R ²	0.020
R ² ajusté	0.018
MCE	137267
Constante	850 (818 - 882)
Pente	29 (11 - 47)

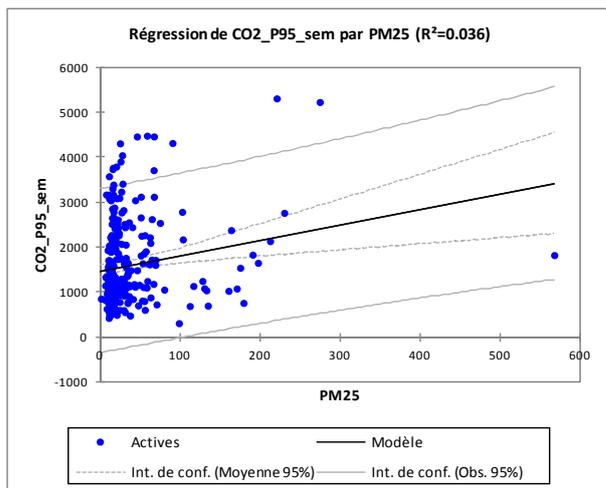
Figure 11 : Association entre le niveau moyen de CO₂ et le logarithme de la concentration intérieure de 1,4-dichlorobenzène exprimée en ppb.

3.2.6 Corrélation CO₂ / PM_{2,5} dans les logements (séjour / chambre)

Les conditions opératoires de la campagne ont privilégié une mesure des particules dans le séjour par rapport à la chambre dans laquelle les substances chimiques étaient mesurées. Le séjour apparaît en effet comme la pièce du logement qui centralise les activités domestiques, sources bien connues de particules. A l'inverse la chambre, malgré une durée d'occupation plus importante essentiellement la nuit, n'est pas la pièce dans laquelle on enregistre le plus d'activités domestiques. Autant dans le cas où la porte de la chambre instrumentée reste ouverte pendant la nuit, on peut supposer que le niveau de CO₂ est en moyenne assez proche entre le séjour et la chambre, autant il est difficile de l'affirmer pour les particules qui interagissent avec les surfaces. Dès lors, la recherche d'une corrélation entre ces deux variables mesurées dans deux pièces distinctes est limitée par le protocole opératoire. Les résultats présentés ici doivent donc être interprétés avec prudence.

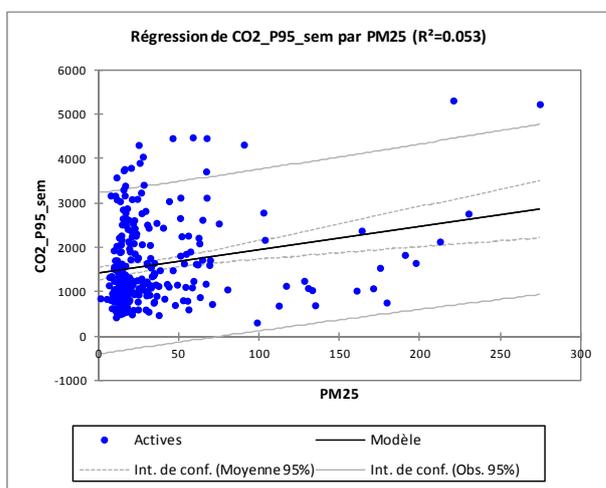
L'association entre le niveau P95 de CO₂ sur la semaine et la concentration intérieure en PM_{2,5} a donné le r de Pearson le plus élevé (0.190). Le nuage de points associé est représenté à la Figure 12. Un point particulier correspondant à la concentration en PM_{2,5} la plus élevée tire à lui tout seul l'ensemble de la relation. En le retirant, l'association devient plus significative (0.244). L'intensité de cette relation représente 5 % de part de dispersion commune.

En sélectionnant le niveau moyen de CO₂ calculé sur la même période que les particules (entre 17h00 et 08h00 les jours ouvrés et 24 h / 24 h les fins de semaine), la corrélation observée avec la fraction PM_{2,5} est la moins intense (r = 0,123). Mais elle s'accroît lorsqu'on ne considère que les niveaux de PM_{2,5} inférieurs à 95 µg/m³ (r = 0,281 et r² = 0,08). L'intensité de la relation entre le CO₂ et la fraction PM_{2,5} demeure très faible.



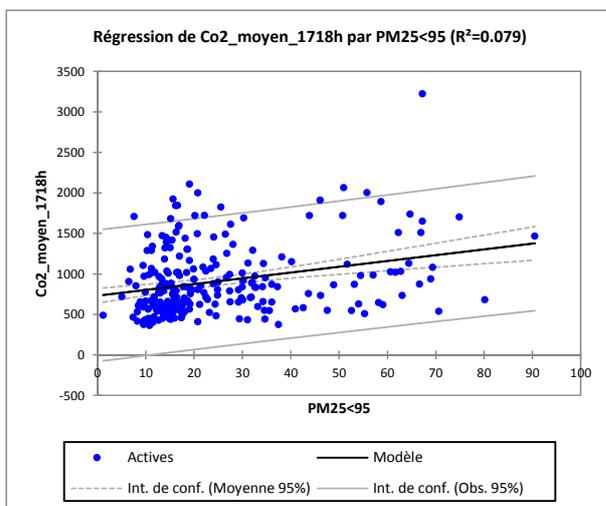
Observations	276
R ²	0.036
R ² ajusté	0.033
MCE	856140
Constante	1471 (1337 - 1606)
Pente	3.4 (1.3 - 5.6)

Figure 12 : Association entre le niveau P95 de CO₂ et la concentration intérieure de la fraction massique PM_{2,5} exprimée en µg/m³.



Observations	275
R ²	0.053
R ² ajusté	0.050
MCE	844204
Constante	1413 (1270 - 1556)
Pente	5.3 (2.6 - 7.9)

Figure 13 : Association entre le niveau P95 de CO₂ et la concentration intérieure de la fraction massique PM_{2,5} exprimée en µg/m³ (donnée extrême retirée).



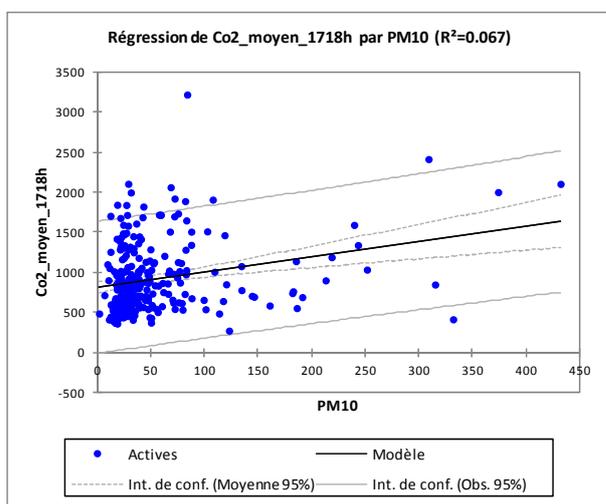
Observations	248
R ²	0.079
R ² ajusté	0.075
MCE	167496
Constante	730 (639 - 822)
Pente	7.2 (4.1 - 10.2)

Figure 14 : Association entre le niveau moyen de CO₂ (occupation) et la concentration intérieure de la fraction massique PM_{2,5} < 95 µg/m³.

3.2.7 Corrélation CO₂ / PM₁₀ dans les logements (séjour / chambre)

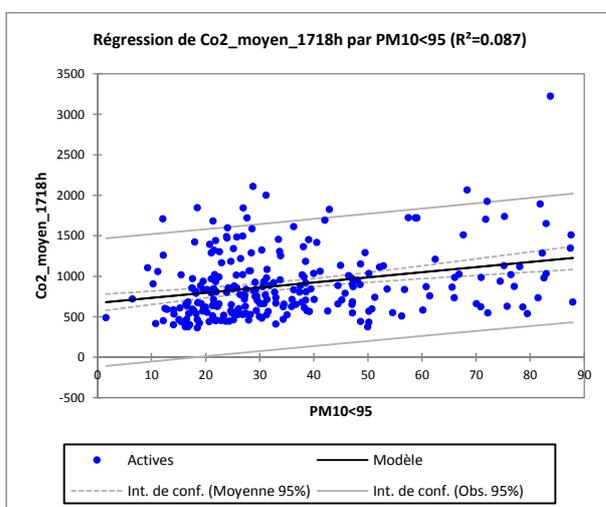
La fraction massique PM₁₀ a été mesurée dans les mêmes conditions que la fraction PM_{2,5}. Par conséquent, les limites évoquées précédemment s'appliquent également ici. L'association entre le niveau moyen de CO₂ sur la durée de programmation et la concentration intérieure en PM₁₀ a donné le r de Pearson le plus élevé (0.258). Le nuage de points associé est représenté à la Figure 15. Le même logement précédemment identifié dans le cas des PM_{2,5} présentait également une valeur extrême en PM₁₀. Celle-ci n'a pas été prise en compte. L'intensité de cette relation est très faible et représente 6 % de part de dispersion commune.

En sélectionnant le niveau moyen de CO₂ calculée sur la même période que les particules (entre 17h00 et 08h00 les jours ouvrés et 24 h / 24 h les fins de semaine), la corrélation observée avec la fraction PM₁₀ est la moins intense (r = 0,209). Mais elle s'accroît lorsqu'on ne considère que les niveaux de PM₁₀ inférieurs à 95 µg/m³ (r = 0,294 et r² = 0,087). L'intensité de la relation entre le CO₂ et la fraction PM₁₀ demeure néanmoins très faible.



Observations	279
R ²	0.067
R ² ajusté	0.063
MCE	174032
Constante	811 (745 - 877)
Pente	1.9 (1.1 - 2.7)

Figure 15 : Association entre le niveau moyen de CO₂ (sur la durée de programmation) et la concentration intérieure de la fraction massique PM₁₀ exprimée en µg/m³.



Observations	249
R ²	0.087
R ² ajusté	0.083
MCE	157734
Constante	670 (565 - 774)
Pente	6.3 (3.8 - 6.9)

Figure 16 : Association entre le niveau moyen de CO₂ (sur la durée de programmation) et la concentration intérieure de la fraction massique PM₁₀ < 95 µg/m³.

3.3 Relations entre les variables

Des corrélations ont été observées en regardant chaque polluant cible de manière individuelle. Toutefois, d'autres facteurs sont également corrélés avec le CO₂ et les polluants, notamment la température. De façon à avoir une vision plus globale, une analyse par composantes principales normée (ACP) est réalisée de manière à identifier de manière plus précise ces facteurs qui seront ensuite pris en compte pour affiner les corrélations observées. Le principe de l'ACP est présenté à l'annexe 10.2. Le logiciel SPAD version 5.6 (DECISIA, France) a été utilisé pour cette analyse.

Les données CO₂ ont été projetées comme variables supplémentaires. Les variables nominales relatives à la période de chauffe, à la présence de fumeurs fumant effectivement dans le logement, et à l'utilisation d'une cheminée, ont également été rajoutées. Par ailleurs, une variable associée à la présence de combustion dans le logement a été construite à partir des mesures de monoxyde de carbone sur la semaine (moyenne glissante sur 15 min). Si le logement présente une valeur maximale de CO strictement supérieure à 3 ppm sur la semaine, le logement est considéré comme ayant utilisé une source de combustion au cours de la semaine. Le seuil de 3 ppm correspond à une fluctuation haute du zéro de l'instrument de mesure. La présence ou l'absence de certains combustibles (gaz, bois, fuel) n'était pas une donnée suffisante pour qualifier la présence d'une source de combustion dans le logement. Il doit être interprété comme un indicateur de la présence de combustion associée à un équipement ou une activité sur la semaine. Ce paramètre peut également couvrir l'impact associé à la présence de fumeurs. Au total, 28 variables ont été prises en compte.

Les résultats de l'ACP sont présentés dans les tableaux et figures ci-dessous. Le plan principal ne représente que 28 % de la variance totale de l'ensemble des données prises en compte. Les 10 premiers axes n'expliquent que 76 % de la variance totale. Lorsque les données présentent un caractère multidimensionnel très marqué comme c'est ici le cas, une approche par classification intégrant le nombre choisi de facteurs est préférable. Celle-ci est présentée plus loin.

Les cinq premiers axes de l'ACP sont tout de même décrits. On retrouve sur le premier axe les corrélations entre le CO₂ et les autres polluants. L'impact de la période de chauffe / hors-chauffe et du taux de renouvellement d'air est significatif sur les 3 premiers axes. La présence de fumeurs et de sources de combustion (CO_{max} > 3 ppm) est également associée au premier axe. Le second axe met plutôt en évidence la période de chauffe, l'utilisation d'une cheminée, et le volume du logement. L'axe 3 est associé à des niveaux élevés de formaldéhyde en période estivale, tandis que l'axe 4 est uniquement caractérisé par les niveaux de 1,4-dichlorobenzène. Le 5^{ème} axe met en évidence l'impact du nombre d'occupants dans la chambre ou le séjour, leur durée d'occupation et les niveaux de particules.

Tableau 30 : ACP – Valeurs propres associées aux 10 premiers axes.

Axe	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé	Axe	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	4.50	16.08	16.08	6	1.68	6.01	57.85
2	3.30	11.77	27.85	7	1.61	5.74	63.59
3	2.87	10.25	38.10	8	1.40	5.01	68.60
4	2.02	7.20	45.30	9	1.05	3.77	72.37
5	1.83	6.53	51.84	10	1.02	3.63	76.00

Tableau 31 : ACP – Coordonnées des variables sur les 5 premiers axes
(en rouge, contribution positive ; en bleu, contribution négative ; en italique : variable nominale)

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Température moyenne	0.28	-0.72	0.28	0.05	0.03
Température moy ext	0.33	-0.62	0.42	0.15	-0.04
Humidité_specifique	0.14	-0.58	0.54	0.07	0.02
Formaldéhyde	-0.36	-0.39	0.63	0.06	-0.03
Acétaldéhyde	-0.78	-0.04	0.14	-0.04	-0.08
Acroléine	-0.83	-0.14	0.01	0.03	0.03
Benzène	-0.59	0.11	-0.25	0.09	-0.02
Dichlorobenzène	0.00	-0.02	0.16	-0.97	0.07
PM10	-0.42	-0.08	-0.14	-0.02	0.24
PM2.5	-0.45	-0.11	-0.11	-0.01	0.24
Formaldéhyde_ext	-0.06	-0.74	-0.36	-0.02	-0.19
Acétaldéhyde_ext	-0.16	-0.63	-0.46	-0.04	-0.21
Acroléine_ext	-0.29	-0.25	-0.49	-0.04	-0.21
Benzène_ext	-0.29	-0.39	-0.56	-0.16	-0.22
Dichlorobenzène_ext	-0.01	-0.14	-0.10	-0.13	0.01
diff_Formaldéhyde_ppb	-0.36	-0.34	0.65	0.07	-0.02
diff_Acétaldéhyde_ppb	-0.76	0.02	0.19	-0.03	-0.06
diff_Acroléine_ppb	-0.81	-0.11	0.10	0.04	0.09
diff_Benzène_ppb	-0.49	0.24	-0.04	0.16	0.07
diff_Dichlorobenzène_ppb	0.00	-0.03	0.16	-0.97	0.08
CO _{max} 15	-0.22	0.19	-0.05	0.02	-0.01
TRA moyen hebdomadaire	0.33	-0.44	-0.39	0.03	0.37
TRA nocturne	0.29	-0.38	-0.38	0.05	0.33
Volume	0.15	0.30	0.13	0.07	0.16
N _{occup_chambre}	-0.03	-0.04	0.06	0.01	0.59
N _{occup_sejour}	-0.07	-0.03	0.14	0.10	0.56
Durée _{occup_chambre_min}	-0.03	-0.11	-0.13	-0.04	0.50
Durée _{occup_sejour_min}	-0.26	-0.06	-0.20	0.02	0.56
CO ₂ _moyen_occupation	-0.36	0.15	0.18	-0.04	0.04
CO ₂ _moyen_sem	-0.43	0.12	0.17	-0.04	0.04
CO ₂ _max_sem	-0.35	0.09	0.17	-0.03	-0.01
Variable nominale	Valeurs-test				
CO _{max} ≤ 3	7.7	-2.4	1.2	0.1	-1.3
CO _{max} > 3	-7.6	2.4	-1.4	0.8	1.5
Chauffe	-7.7	11	-6.8	-3.3	0.5
Hors Chauffe	7.7	-11	6.8	3.3	-0.5
Pas de cheminée utilisée	-0.5	-7.5	1.3	0.1	-1.1
Utilisation cheminée	0.5	7.5	-1.3	-0.1	1.1
Pas de fumeurs	7.7	1.8	1.5	-1.9	-3.6
Fumeurs dans logement	-7.7	-1.8	-1.5	1.9	3.6

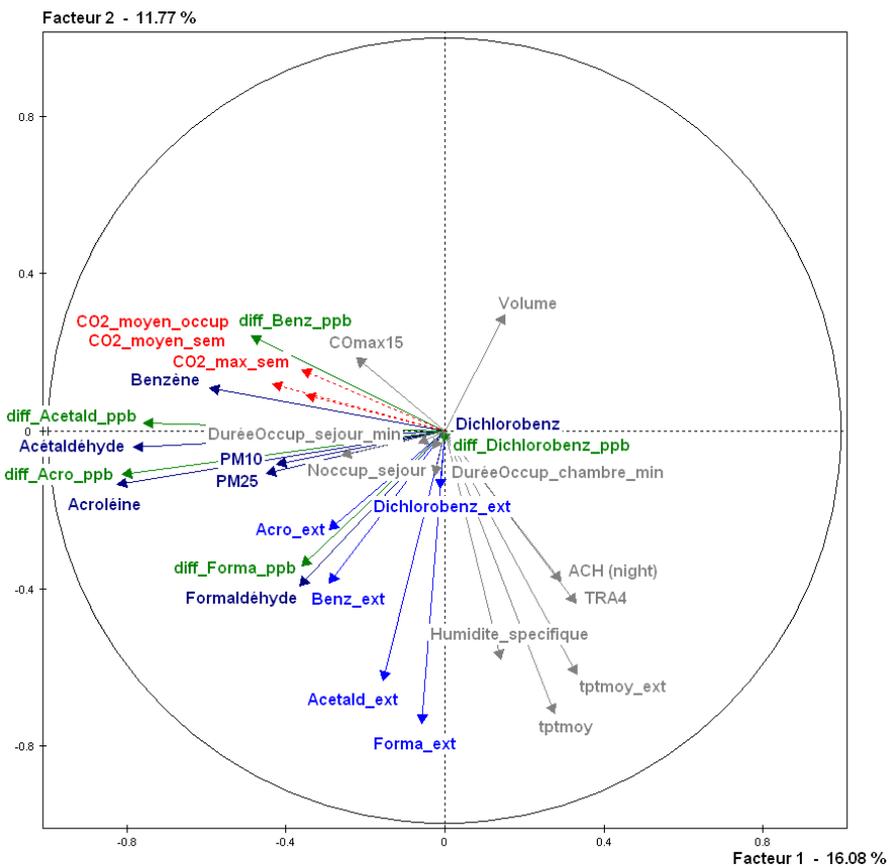


Figure 17 : ACP : représentation des variables dans le plan principal

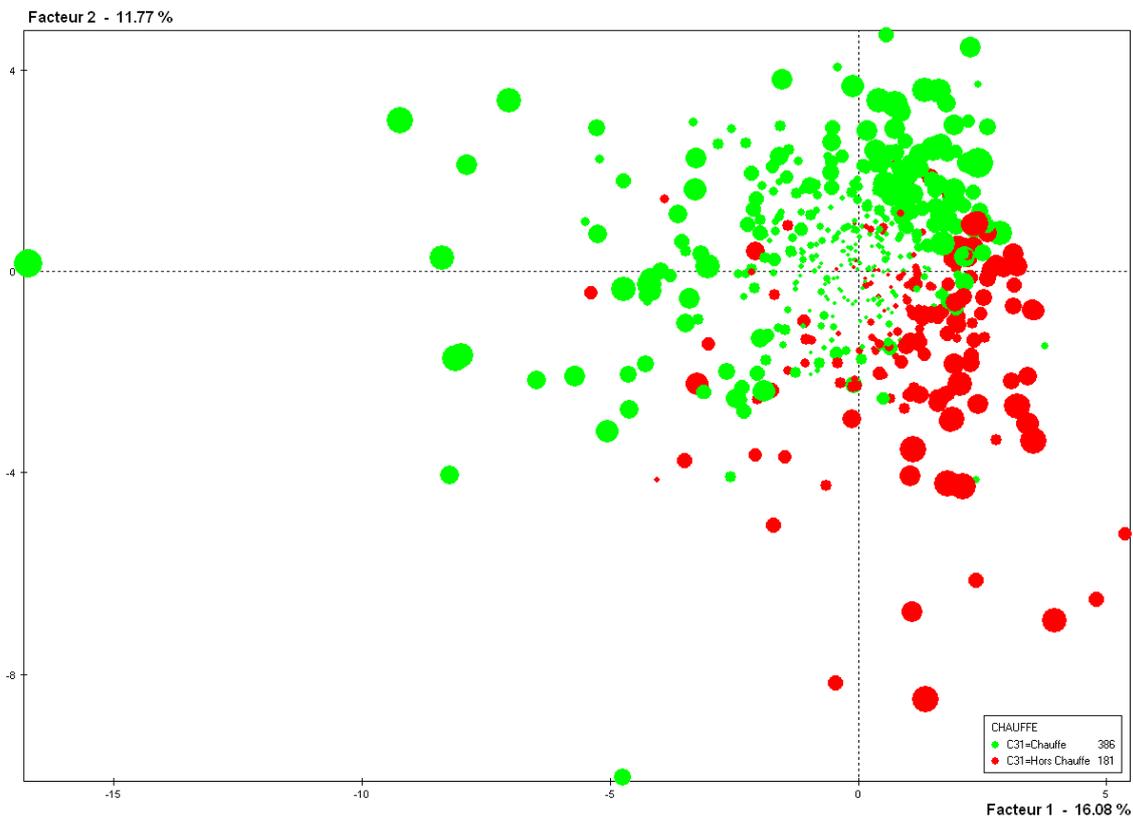


Figure 18 : ACP : représentation des logements dans le plan principal selon la période de mesure (période de chauffe ou hors-chauffe)

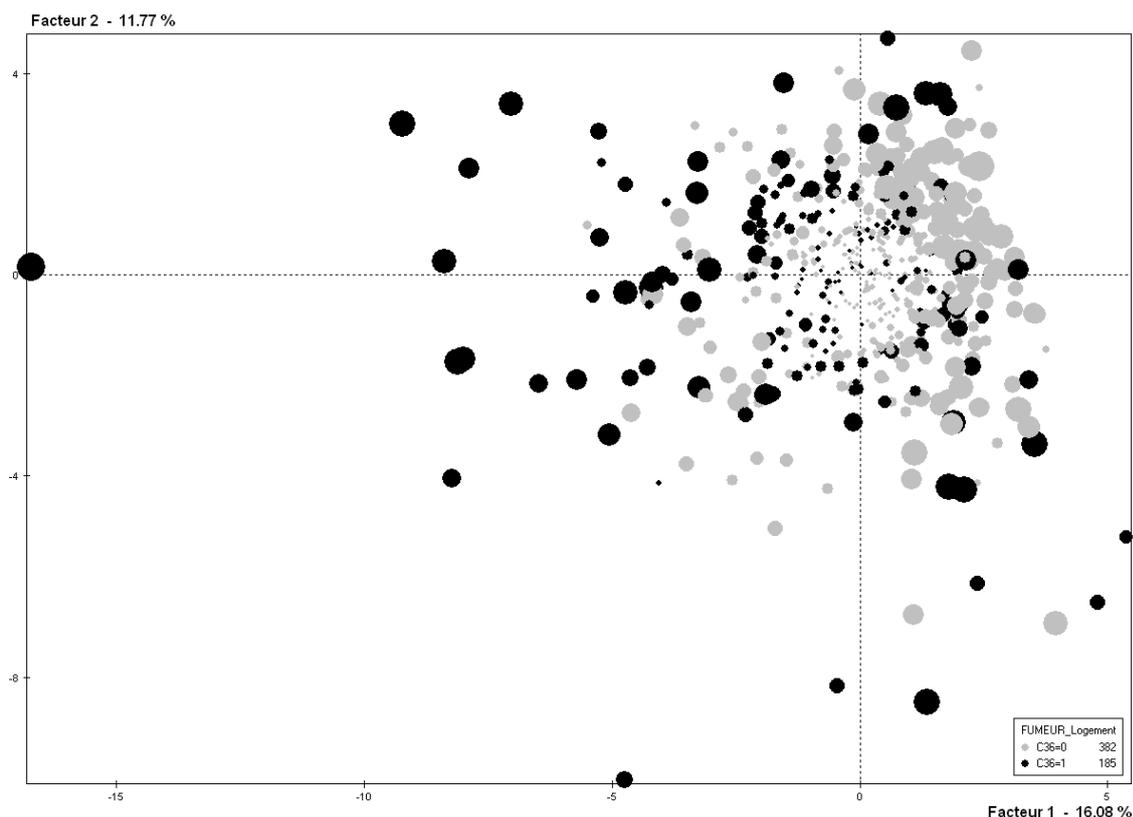


Figure 19 : ACP : représentation des logements dans le plan principal selon la présence (1) / absence de fumeurs (0) dans le volume habitable.

A partir de l'ACP, une classification ascendante hiérarchique (annexe 10.3) a été réalisée sur les 10 premiers axes (76 % de variance expliquée). Une partition en 3 classes est représentée sur la Figure 20. Les 3 classes ont été caractérisées selon les variables continues et nominales (données détaillées à l'annexe 11.2).

La classe 1 (176 logements) est caractérisée par une proportion plus élevée de logements instrumentés durant la saison hors chauffe, avec des températures intérieures et extérieures plus élevées, des niveaux de formaldéhyde (intérieurs comme extérieurs) plus élevés. Cela est imputable à l'augmentation des émissions internes par les matériaux qui varient avec la température. Les niveaux de CO₂ y sont en moyenne plus faibles que dans les autres logements, tout comme les niveaux de benzène, de particules, d'acétaldéhyde ou d'acroléine. Enfin, la majorité de ces logements présente une proportion de valeurs CO_{max} ≤ 3 ppm plus élevée qui implique l'absence de sources de combustion spécifique en fonctionnement et/ou une compensation des niveaux par une augmentation du taux de renouvellement d'air.

La classe 2 (309 logements) comprend une majorité de logements instrumentés en hiver durant la période de chauffe, plutôt occupés par des non-fumeurs. Les logements qui ont utilisé leur cheminée durant la semaine de mesure font pratiquement tous partie de cette classe. Ils présentent en moyenne des niveaux de concentrations de différents polluants inférieurs à la moyenne générale.

La classe 3 (82 logements) couvre également des logements instrumentés en hiver pendant la période de chauffe. La proportion de fumeurs y est plus importante, tout comme la présence de sources de combustion. L'ensemble des polluants (y compris le CO₂) est en général plus concentré dans ces logements.

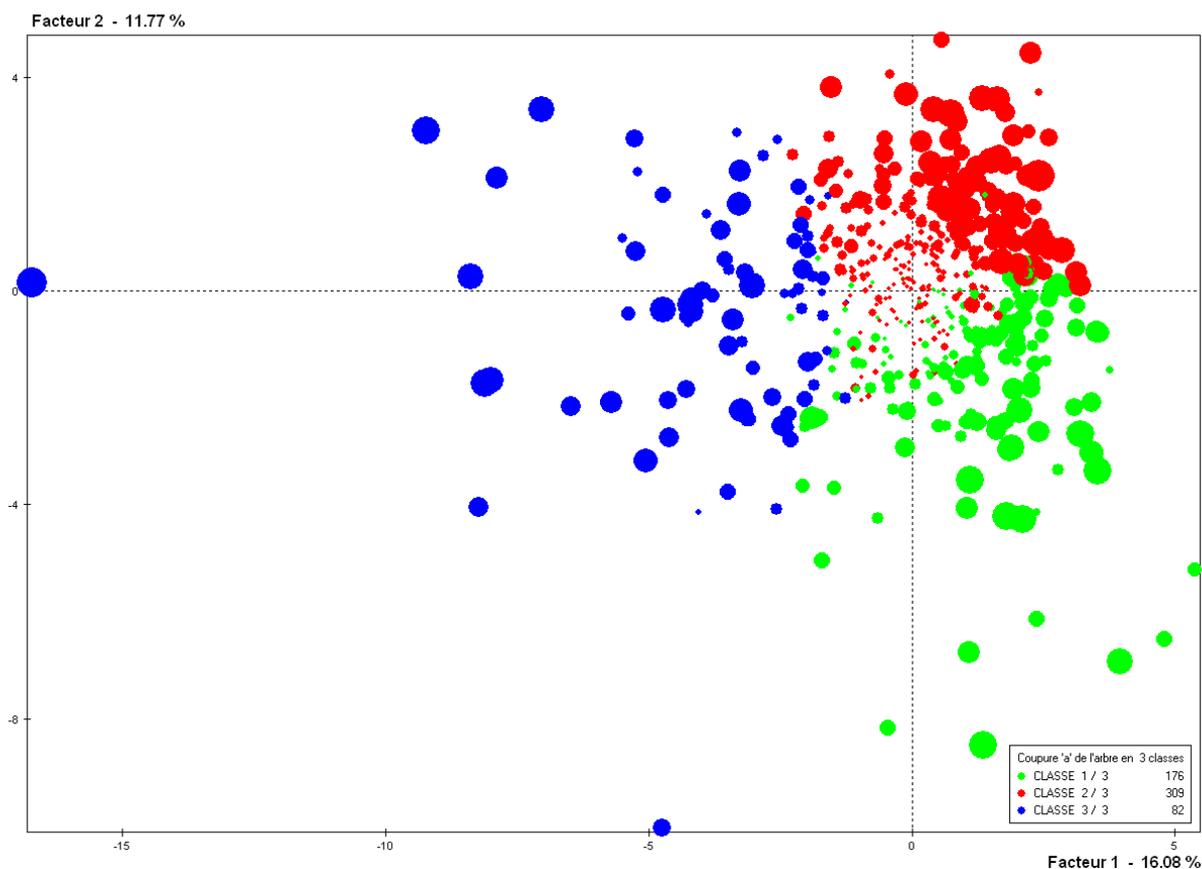


Figure 20 : ACP : représentation des logements dans le plan principal selon une partition en 3 classes d'une classification hiérarchique ascendante.

Compte tenu de ces éléments, il semble important de regarder les corrélations observées en tenant compte de la variable période de chauffe, de la présence d'une source de combustion ($CO_{max} > 3$ ppm) et de la présence de fumeurs. Ces trois paramètres ne sont pas forcément indépendants les uns des autres et dépendent en partie des pratiques d'aération dans le logement.

3.4 Analyse des corrélations observées

L'étude des corrélations entre le niveau moyen de CO_2 pendant l'occupation du logement et les polluants cibles a été réalisée pour différentes catégories de logements suivant la période de chauffe, la présence d'une source de combustion ($CO_{max} > 3$ ppm), la saison et la présence de fumeurs dans le logement (Tableau 32).

La concentration de formaldéhyde est corrélée avec le niveau de CO_2 dans l'ensemble des situations sauf dans les logements qui présentent une source de combustion ($CO_{max} > 3$ ppm), ou bien en été.

Les niveaux d'acétaldéhyde et d'acroléine sont systématiquement corrélés avec le niveau de CO_2 , sauf en été.

Le niveau de benzène n'est corrélé avec le niveau de CO_2 que dans les logements qui présentent une source de combustion ($CO_{max} > 3$ ppm) ou dans lesquels il y a un ou plusieurs fumeurs. Le niveau de benzène n'est pas corrélé avec le niveau moyen de CO_2 durant la période de chauffe et de hors-chauffe. Une corrélation significative est tout de même observée entre le différentiel de concentration de benzène entre l'intérieur et l'extérieur et le niveau de CO_2 .

Sans transformation logarithmique, le niveau de 1,4-dichlorobenzène n'est jamais corrélé avec le niveau de CO₂.

Les corrélations des niveaux de particules avec le niveau de CO₂ sont observées durant la période de chauffe et dans les logements qui présentent un niveau max de CO > 3 ppm ou dans les logements sans fumeurs. Dans les logements avec fumeurs, une corrélation avec le niveau de CO₂ est observée pour la fraction PM₁₀ mais pas pour la fraction PM_{2.5}.

Tableau 32 : Corrélations entre le niveau moyen de CO₂ pendant l'occupation du logement et les polluants cibles pour différentes catégories de logements (en rouge : effet des modalités sur les corrélations observées).

		CO ₂ _moyen Occupation	FORM	ACET	ACRO	BENZ	DICHL	PM ₁₀	PM _{2.5}
CHAUFFE	r (Pearson)	1	0.241	0.338	0.208	0.101	0.039	0.217	0.150
	p-value	0	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0.067	0.485	0.003	0.045
Hors CHAUFFE	r (Pearson)	1	0.244	0.367	0.250	0.126	-0.013	0.025	0.002
	p-value	0	0.002	< 0,0001	0.001	0.113	0.872	0.812	0.986
CO ≤ 3	r (Pearson)	1	0.324	0.370	0.269	0.130	0.102	0.025	-0.040
	p-value	0	< 0,0001	< 0,0001	0.001	0.123	0.231	0.767	0.645
CO > 3	r (Pearson)	1	0.116	0.389	0.207	0.192	-0.033	0.270	0.185
	p-value	0	0.187	< 0,0001	0.018	0.030	0.711	0.002	0.042
ÉTÉ	r (Pearson)	1	0.098	0.275	0.281	0.223	-0.122	0.262	0.215
	p-value	0	0.576	0.110	0.102	0.204	0.490	0.134	0.238
HIVER	r (Pearson)	1	0.194	0.265	0.167	0.074	-0.004	0.101	-0.030
	p-value	0	0.004	< 0,0001	0.013	0.282	0.951	0.281	0.755
NON FUMEUR	r (Pearson)	1	0.179	0.299	0.293	0.103	0.050	0.279	0.258
	p-value	0	0.001	< 0,0001	< 0,0001	0.063	0.370	0.0001	0.0004
FUMEURS	r (Pearson)	1	0.221	0.485	0.260	0.215	0.054	0.210	0.131
	p-value	0	0.003	< 0,0001	0.001	0.006	0.491	0.045	0.224
GLOBAL	r (Pearson)	1	0.191	0.371	0.247	0.150	0.043	0.209	0.123
	p-value	0	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0.001	0.344	0.0004	0.044

		FORM ext	ACET ext	ACRO ext	BENZ ext	DICHL ext	diff_FORM ppb	diff_ACET ppb	diff_ACRO ppb
CHAUFFE	r (Pearson)	-0.079	-0.076	-0.045	-0.066	0.062	0.235	0.312	0.187
	p-value	0.156	0.170	0.415	0.245	0.272	< 0,0001	< 0,0001	0.001
Hors CHAUFFE	r (Pearson)	-0.255	-0.113	0.263	-0.001	-0.064	0.259	0.406	0.193
	p-value	0.001	0.157	0.001	0.991	0.430	0.001	< 0,0001	0.016
CO ≤ 3	r (Pearson)	-0.192	-0.117	0.170	-0.043	-0.101	0.335	0.383	0.230
	p-value	0.023	0.170	0.045	0.621	0.249	< 0,0001	< 0,0001	0.006
CO > 3	r (Pearson)	-0.121	-0.038	0.012	-0.037	0.139	0.123	0.385	0.180
	p-value	0.177	0.671	0.893	0.687	0.127	0.177	< 0,0001	0.048

ÉTÉ	r (Pearson)	-0.295	-0.142	-0.015	-0.183	-0.173	0.129	0.266	0.290
	p-value	0.091	0.424	0.932	0.309	0.337	0.476	0.135	0.101
HIVER	r (Pearson)	-0.013	-0.013	-0.048	-0.030	0.031	0.186	0.203	0.130
	p-value	0.846	0.851	0.490	0.672	0.666	0.007	0.003	0.063
NON FUMEUR	r (Pearson)	-0.153	-0.051	0.112	0.024	0.010	0.186	0.245	0.210
	p-value	0.006	0.365	0.044	0.676	0.864	0.001	< 0,0001	0.0001
FUMEURS	r (Pearson)	-0.273	-0.228	-0.021	-0.073	0.105	0.214	0.509	0.249
	p-value	0.0005	0.004	0.787	0.366	0.194	0.007	< 0,0001	0.002
GLOBAL	r (Pearson)	-0.199	-0.108	0.070	-0.006	0.036	0.193	0.358	0.219
	p-value	< 0,0001	0.017	0.126	0.905	0.444	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

		diff_BENZ ppb	diff_DICHL ppb	TEMP int	TEMP ext	HUM SP g/kg	N_occup Chambre	N_occup séjour
CHAUFFE	r (Pearson)	0.130	0.034	-0.049	-0.013	0.353	0.181	0.232
	p-value	0.022	0.551	0.373	0.807	< 0,0001	0.001	< 0,0001
Hors CHAUFFE	r (Pearson)	0.086	-0.014	-0.253	-0.348	0.085	0.010	0.211
	p-value	0.292	0.860	0.001	< 0,0001	0.288	0.899	0.009
CO <= 3	r (Pearson)	0.163	0.113	-0.183	-0.313	-0.066	0.192	0.229
	p-value	0.064	0.199	0.027	0.0001	0.429	0.022	0.007
CO > 3	r (Pearson)	0.195	-0.037	0.008	-0.137	0.232	0.131	0.300
	p-value	0.032	0.687	0.928	0.110	0.009	0.147	0.001
ÉTÉ	r (Pearson)	0.183	-0.124	-0.138	-0.544	-0.052	-0.086	0.368
	p-value	0.293	0.478	0.437	0.0004	0.772	0.618	0.027
HIVER	r (Pearson)	0.098	-0.016	-0.053	-0.059	0.380	0.195	0.239
	p-value	0.171	0.826	0.447	0.379	< 0,0001	0.005	0.001
NON FUMEUR	r (Pearson)	0.090	0.047	-0.206	-0.209	0.065	0.192	0.233
	p-value	0.117	0.409	0.0002	< 0,0001	0.244	0.001	< 0,0001
FUMEURS	r (Pearson)	0.223	0.046	-0.203	-0.318	0.066	0.084	0.205
	p-value	0.006	0.576	0.009	< 0,0001	0.401	0.289	0.010
GLOBAL	r (Pearson)	0.150	0.038	-0.206	-0.244	0.065	0.157	0.225
	p-value	0.001	0.415	< 0,0001	< 0,0001	0.151	0.001	< 0,0001

		Durée_occup_Chambre	Durée_occup_Séjour	TRA_hebdo	TRA_nocturne
CHAUFFE	r (Pearson)	0.059	0.049	-0.352	-0.373
	p-value	0.298	0.392	< 0,0001	< 0,0001
Hors CHAUFFE	r (Pearson)	-0.042	0.043	-0.451	-0.356
	p-value	0.601	0.598	< 0,0001	< 0,0001
CO <= 3	r (Pearson)	0.060	0.123	-0.465	-0.385
	p-value	0.476	0.148	< 0,0001	< 0,0001
CO > 3	r (Pearson)	0.002	-0.051	-0.395	-0.358
	p-value	0.986	0.580	< 0,0001	< 0,0001
ÉTÉ	r (Pearson)	-0.192	-0.288	-0.410	-0.459
	p-value	0.263	0.089	0.018	0.007
HIVER	r (Pearson)	0.003	0.028	-0.339	-0.368
	p-value	0.965	0.692	< 0,0001	< 0,0001

NON FUMEUR	r (Pearson)	0.034	0.073	-0.397	-0.361
	p-value	0.549	0.198	< 0,0001	< 0,0001
FUMEURS	r (Pearson)	0.029	0.067	-0.437	-0.387
	p-value	0.720	0.402	< 0.0001	< 0.0001
GLOBAL	r (Pearson)	0.031	0.076	-0.408	-0.370
	p-value	0.499	0.103	< 0,0001	< 0,0001

3.5 Dépassement des Valeurs cibles selon le niveau de CO₂

La proportion de logements dépassant ou non la valeur cible (VC) pour un polluant donné a été déterminée pour différentes classes de concentrations de CO₂. La concentration de CO₂ prise en compte dans le calcul est la moyenne des concentrations sur une période d'occupation *a priori* du logement, c'est-à-dire les soirées les jours de semaine (de 17h00 à 08h00 le lendemain du lundi au vendredi) et 24h/24h le samedi et dimanche. Cette concentration moyenne calculée sur une occupation théorique du logement est très corrélée à la concentration moyenne hebdomadaire, mais est systématiquement plus élevée que cette dernière (+80 ppm en moyenne, variable selon le niveau).

Cinq classes de concentrations ont été définies par l'ANSES pour ce calcul :

- $[\text{CO}_2]_{\text{occup}} \leq 750$ ppm
- $750 < [\text{CO}_2]_{\text{occup}} \leq 1000$ ppm
- $1000 < [\text{CO}_2]_{\text{occup}} \leq 1500$ ppm
- $1500 < [\text{CO}_2]_{\text{occup}} \leq 2000$ ppm
- $[\text{CO}_2]_{\text{occup}} > 2000$ ppm

Par ailleurs, il est important de garder en mémoire le fait que les concentrations des polluants couvrent l'intégralité de la semaine de mesure (périodes d'inoccupation du logement comprises), contrairement à la concentration de CO₂ prise en compte. Le calcul qui suit ne présage pas des différences éventuelles entre la concentration moyenne hebdomadaire d'un polluant et la concentration moyenne d'exposition tenant compte de l'occupation effective du logement. Ces différences seraient liées à la fois aux contributions relatives des sources propres à l'environnement intérieur et extérieur durant la présence ou l'absence des occupants, leurs activités et à leur modulation liée au comportement des occupants. Elles sont sans doute variables d'un logement à l'autre.

Il est également important de noter que l'échelle de temps entre la mesure qui couvre une semaine et la VC qui couvre une période long terme (typiquement une année) est différente. Cette différence peut venir modifier la répartition des logements au sein des différentes classes, notamment pour des polluants dont les niveaux varient avec la saison. Néanmoins, la campagne de mesure a duré 28 mois. Un total de 303 logements a été instrumenté sur une période dite estivale (d'avril à septembre), 232 logements sur une période hivernale (de novembre à février) et 32 sur une période transitoire (mars ou octobre). Par contre, 386 logements ont été instrumentés sur la période de chauffe (celle-ci peut s'étendre jusqu'à mai selon les régions) et seulement 181 sur la période hors-chauffe.

Les valeurs cibles à prendre en compte pour les différents polluants ont été transmises par l'ANSES et sont indiquées ci-dessous :

- Formaldéhyde : 10 µg/m³
- Acétaldéhyde : 9,8 µg/m³
- Acroléine : 0,8 µg/m³
- Benzène : 2 µg/m³ et 10 µg/m³
- 1,4-Dichlorobenzène : 0,9 µg/m³ et 60 µg/m³
- Fraction PM_{2,5} : 10 µg/m³
- Fraction PM₁₀ : 20 µg/m³.

Les résultats des croisements sont présentés au Tableau 33 et de la Figure 21 à la Figure 25. Globalement, plus le niveau de CO₂ durant l'occupation est élevé, plus la proportion de logements qui dépasse la VC augmente. Pour le formaldéhyde, la proportion de logements reste supérieure à 80 % quel que soit le niveau de CO₂, de même pour la fraction PM_{2,5}.

Tableau 33 : Proportions de logements dépassant ou non la valeur cible des polluants selon le niveau de concentration en CO₂ durant l'occupation.

CO ₂	Variable	Ntot	N ≤VC	N >VC	% ≤VC	% >VC
≤750	CO ₂	215				
750-1000	CO ₂	131				
1000-1500	CO ₂	118				
1500-2000	CO ₂	42				
>2000	CO ₂	14				
≤750	Formaldéhyde = 10	210	37	173	18%	82%
750-1000	Formaldéhyde = 10	130	10	120	8%	92%
1000-1500	Formaldéhyde = 10	117	8	109	7%	93%
1500-2000	Formaldéhyde = 10	40	5	35	13%	88%
>2000	Formaldéhyde = 10	13	2	11	15%	85%
≤750	Acétaldéhyde = 9.8	210	127	83	60%	40%
750-1000	Acétaldéhyde = 9.8	130	39	91	30%	70%
1000-1500	Acétaldéhyde = 9.8	117	24	93	21%	79%
1500-2000	Acétaldéhyde = 9.8	40	8	32	20%	80%
>2000	Acétaldéhyde = 9.8	13	2	11	15%	85%
≤750	Acroléine = 0.8	210	109	101	52%	48%
750-1000	Acroléine = 0.8	130	32	98	25%	75%
1000-1500	Acroléine = 0.8	117	20	97	17%	83%
1500-2000	Acroléine = 0.8	40	7	33	18%	83%
>2000	Acroléine = 0.8	13	2	11	15%	85%
≤750	Benzène = 2	202	121	81	60%	40%
750-1000	Benzène = 2	121	54	67	45%	55%
1000-1500	Benzène = 2	115	53	62	46%	54%
1500-2000	Benzène = 2	40	13	27	33%	68%
>2000	Benzène = 2	13	4	9	31%	69%
≤750	Benzène = 10	202	201	1	100%	0%
750-1000	Benzène = 10	121	117	4	97%	3%
1000-1500	Benzène = 10	115	109	6	95%	5%
1500-2000	Benzène = 10	40	39	1	98%	3%
>2000	Benzène = 10	13	13	0	100%	0%
≤750	1,4-Dichlorobenzène = 0.9	202	15	187	7%	93%
750-1000	1,4-Dichlorobenzène = 0.9	121	15	106	12%	88%
1000-1500	1,4-Dichlorobenzène = 0.9	115	12	103	10%	90%
1500-2000	1,4-Dichlorobenzène = 0.9	40	3	37	8%	93%
>2000	1,4-Dichlorobenzène = 0.9	13	0	13	0%	100%

<=750	1,4-Dichlorobenzène = 60	202	188	14	93%	7%
750-1000	1,4-Dichlorobenzène = 60	121	105	16	87%	13%
1000-1500	1,4-Dichlorobenzène = 60	115	97	18	84%	16%
1500-2000	1,4-Dichlorobenzène = 60	40	35	5	88%	13%
>2000	1,4-Dichlorobenzène = 60	13	10	3	77%	23%

CO2	Variable	Ntot	N <=VC	N >VC	% <=VC	% >VC
<=750	PM2.5 = 10	119	14	105	12%	88%
750-1000	PM2.5 = 10	65	4	61	6%	94%
1000-1500	PM2.5 = 10	55	2	53	4%	96%
1500-2000	PM2.5 = 10	24	1	23	4%	96%
>2000	PM2.5 = 10	6	0	6	0%	100%
<=750	PM10 = 20	125	32	93	26%	74%
750-1000	PM10 = 20	67	9	58	13%	87%
1000-1500	PM10 = 20	58	5	53	9%	91%
1500-2000	PM10 = 20	24	2	22	8%	92%
>2000	PM10 = 20	6	0	6	0%	100%

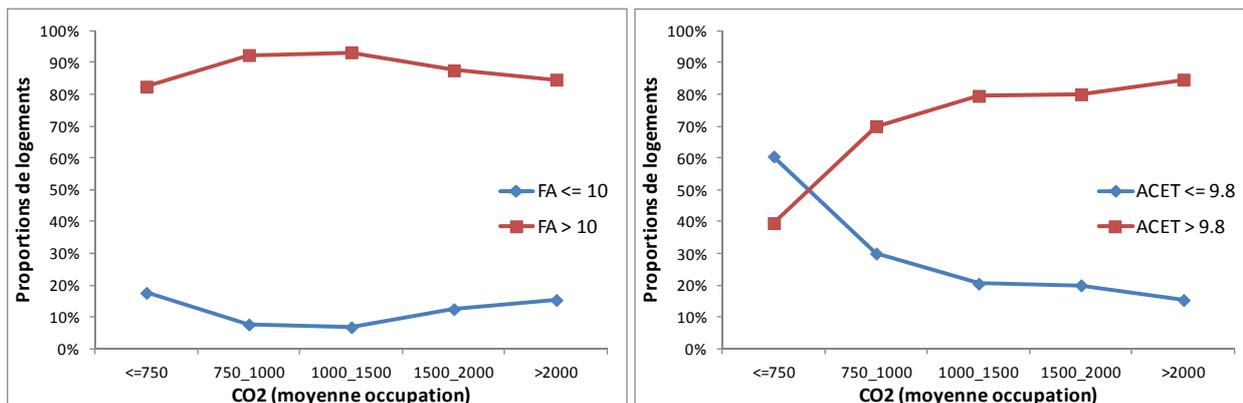


Figure 21 : Représentation graphique des proportions de logements qui dépassent ou non la VC du formaldéhyde (à gauche) et de l'acétaldéhyde (à droite, VC = 9,8 µg/m³).

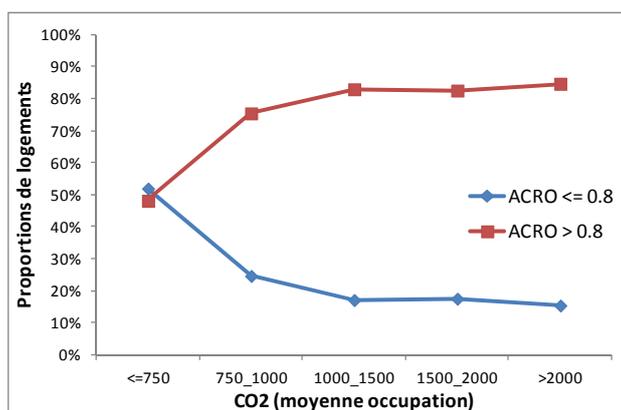


Figure 24 : Représentation graphique des proportions de logements qui dépassent ou non la VC de l'acroléine (à droite).

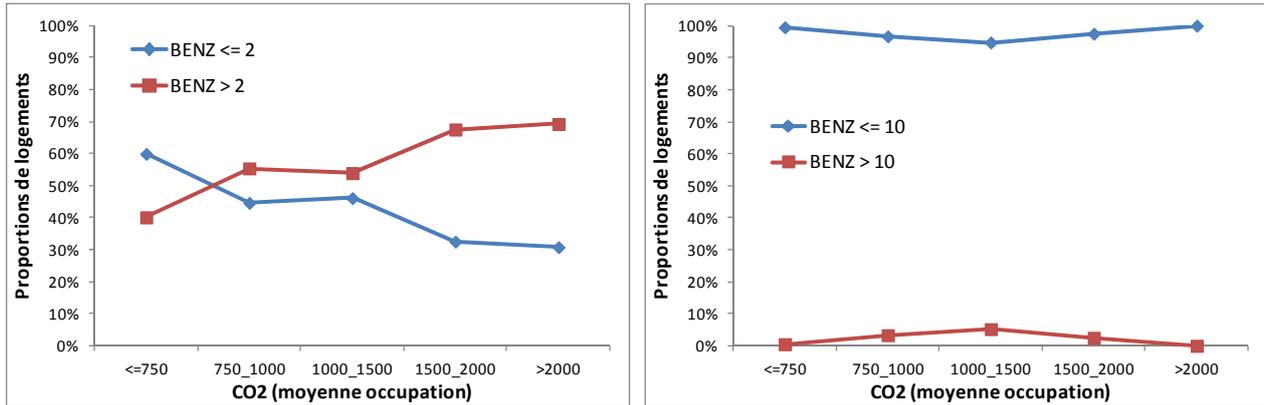


Figure 25 : Représentation graphique des proportions de logements qui dépassent ou non la VC du benzène de 2 µg/m³ (à gauche) et de 10 µg/m³ (à droite).

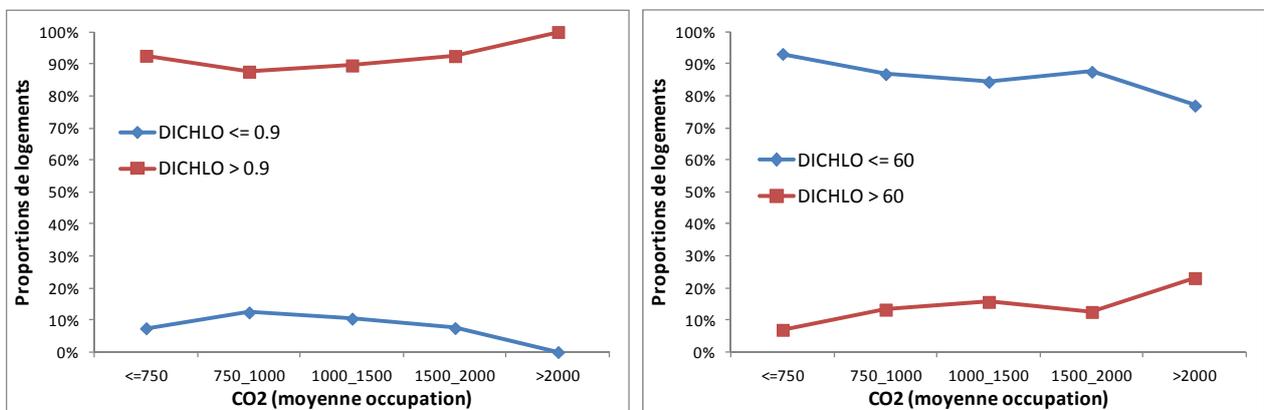


Figure 26 : Représentation graphique des proportions de logements qui dépassent ou non la VC du 1,4-dichlorobenzène de 0,9 µg/m³ (à gauche) et de 60 µg/m³ (à droite).

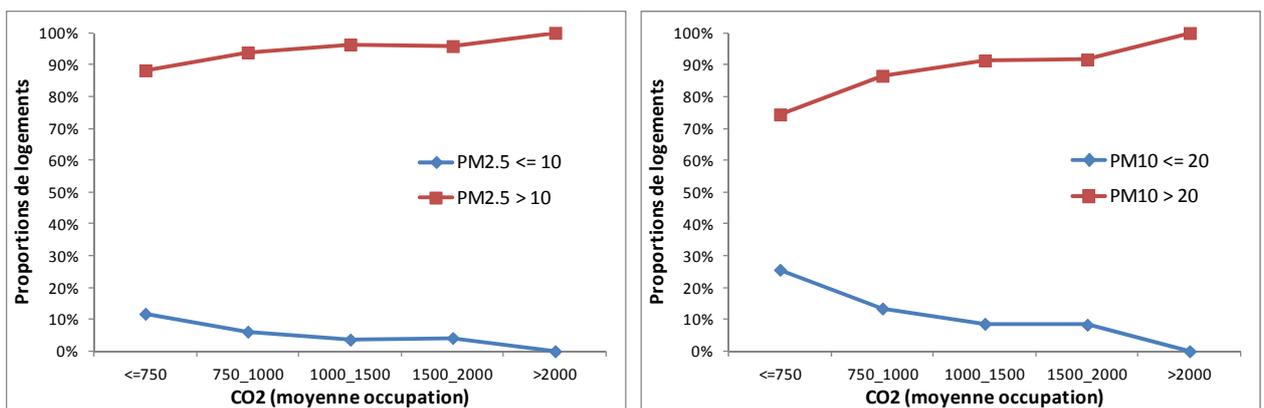


Figure 25 : Représentation graphique des proportions de logements qui dépassent ou non la VC de la fraction PM_{2,5} (à gauche) et de la fraction PM₁₀ (à droite).

3.6 Sensibilité et spécificité des dépassements de VC selon le niveau de CO₂

La sensibilité et la spécificité des occurrences de dépassement des VC (cas avérés) ont été déterminées pour différents seuils de concentration de CO₂ (variable test). Les seuils retenus sont 750, 1000, 1500 et 2000 ppm de CO₂. La méthodologie générale du test est décrite dans Bouyer et al. (2010).

Les calculs ont été réalisés avec le logiciel XLStat 2012 (version 2012.6.03, module XLStat-Life, Addinsoft), permettant de calculer la sensibilité, la spécificité, les valeurs prédictives positives et négatives en faisant varier les seuils. Les paramètres calculés sont définis ci-après. Leur intervalle de confiance est déterminé à partir des intervalles de Wald ajustés.

Vrais positifs (VP) : nombre d'individus déclarés positifs par le test et qui le sont effectivement. Ils correspondent aux situations où le niveau de CO₂ est supérieur à la valeur seuil fixée et pour lesquelles la VC du polluant cible considéré est dépassé (CO₂₊ | VC+).

Faux positifs (FP) : nombre d'individus déclarés positifs par le test mais qui sont en réalité négatifs. Ils correspondent aux situations où le niveau de CO₂ est supérieur à la valeur seuil fixée et pour lesquelles la VC du polluant cible considéré n'est pas dépassé (CO₂₊ | VC-).

Vrais négatifs (VN) : nombre d'individus déclarés négatifs par le test et qui le sont effectivement. Ils correspondent aux situations où le niveau de CO₂ est inférieur à la valeur seuil fixée et pour lesquelles la VC du polluant cible considéré n'est pas dépassé (CO₂₋ | VC-).

Faux négatifs (FN) : nombre d'individus détectés négatifs par le test mais qui sont en réalité positifs. Ils correspondent aux situations où le niveau de CO₂ est inférieur à la valeur seuil fixée et pour lesquelles la VC du polluant cible considéré est dépassé (CO₂₋ | VC+).

Prévalence de l'événement : fréquence de survenance de l'événement dans l'échantillon total (VP+FN)/N.

Sensibilité (aussi appelée Fraction de Vrais Positifs): proportion d'individus positifs effectivement bien détectés par le test. Autrement dit, la sensibilité permet de mesurer à quel point le test est performant lorsqu'il est utilisé sur des individus positifs. Le test est parfait pour les individus positifs lorsque la sensibilité vaut 1, équivalent à un tirage au hasard lorsque la sensibilité vaut 0.5. S'il est inférieur à 0.5, le test est contre-performant et on aurait intérêt à inverser la règle pour qu'il soit supérieur à 0.5 (à condition que cela n'affecte pas la spécificité). La définition mathématique est : Sensibilité = VP/(VP + FN).

Spécificité (aussi appelée Fraction de Vrais Négatifs): proportion d'individus négatifs effectivement bien détectés par le test. Autrement dit, la spécificité permet de mesurer à quel point le test est performant lorsqu'il est utilisé sur des individus négatifs. Le test est parfait pour les individus négatifs lorsque la spécificité vaut 1, équivalent à un tirage au hasard lorsque la spécificité vaut 0.5. S'il est inférieur à 0.5, le test est contre-performant et on aurait intérêt à inverser la règle pour qu'il soit supérieur à 0.5 (à condition que cela n'affecte pas la sensibilité). La définition mathématique est : Spécificité = VN/(VN + FP).

Fraction de faux positifs (FFP) : proportion de négatifs détectés comme des positifs par le test (1-Spécificité).

Fraction de faux négatifs (FFN) : proportion de positifs détectés comme des négatifs par le test (1-Sensibilité)

Valeur Prédictive Positive (VPP) : proportion de cas effectivement positifs parmi les positifs détectés par le test. On a $VPP = VP/(VP+FP)$, ou $VPP = \text{Sensibilité} \times \text{Prévalence} / [(\text{Sensibilité} \times \text{Prévalence}) + (1 - \text{Spécificité})(1 - \text{Prévalence})]$. C'est une valeur fondamentale qui a la particularité de dépendre aussi de la prévalence, une donnée indépendante de la qualité du test.

Valeur Prédictive Négative (VPN) : proportion de cas effectivement négatifs parmi les négatifs détectés par le test. On a $VPN = VN/(VN+FN)$, ou $VPN = \text{Spécificité}(1 - \text{Prévalence}) / [\text{Spécificité}(1 - \text{Prévalence}) + (1 - \text{Sensibilité})\text{Prévalence}]$. Cet indice dépend aussi de la prévalence, une donnée indépendante de la qualité du test.

Rapport de vraisemblance positif (LR+) : ce rapport indique à quel point un individu a plus de chance d'être positif en réalité si le test est positif. On a $LR+ = \text{Sensibilité} / (1 - \text{Spécificité})$. Si $LR+ > 1$, le test fournit un gain mineur dans le diagnostic des dépassements de VC. Si $LR+ > 10$, le gain est important.

Rapport de vraisemblance négatif (LR-) : ce rapport indique à quel point un individu a plus de chance d'être positif en réalité, si le test est négatif. Le risque relatif est nécessairement une valeur positive ou nulle. On a $LR- = (1 - \text{Sensibilité}) / (\text{Spécificité})$.

Odds ratio : l'odds ratio indique à quel point un individu a plus de chance d'être positif si le test est positif, par rapport au cas où le test est négatif. Par exemple, un odds ratio de 2 signifie que la probabilité pour que l'événement se produise est 2 fois supérieure si le test est positif. L'odds ratio est une valeur positive ou nulle. On a $\text{Odds ratio} = VP \times VN / (FP \times FN)$.

Risque relatif : le risque relatif est un ratio qui mesure à quel point le test se comporte mieux lorsqu'il est positif par rapport au cas où il est négatif. Par exemple, un risque relatif de 2 signifie que le test est 2 fois plus performant lorsqu'il est positif que lorsqu'il est négatif. Une valeur proche de 1 correspond à un cas d'indépendance entre les lignes et les colonnes, et à un test aussi performant quand il est positif que lorsqu'il est négatif. Le risque relatif est une valeur positive ou nulle donnée par : $\text{Risque relatif} = VP / (VP + FP) / (FN / (FN + VN))$.

L'aire sous la courbe (ou Area Under the Curve – AUC) est un indice synthétique calculé pour les courbes ROC. L'AUC correspond à la probabilité pour qu'un événement positif soit classé comme positif par le test sur l'étendue des valeurs seuil possibles. Pour un modèle idéal, on a $AUC=1$, pour un modèle aléatoire, on a $AUC=0.5$. On considère habituellement que le modèle est bon dès lors que la valeur de l'AUC est supérieure à 0.7. Un modèle bien discriminant doit avoir une AUC entre 0.87 et 0.9. Un modèle ayant une AUC supérieure à 0.9 est excellent.

Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-après.

Pour le formaldéhyde, la prévalence des dépassements de VC est élevée (88 %). La sensibilité la plus élevée correspond au seuil de CO₂ le plus faible (750 ppm). La VPP est importante : dans 92 % des situations où le niveau de CO₂ dépasse 750 ppm, la VC du formaldéhyde est également dépassée. Par contre, la VPN est très médiocre : la VC du formaldéhyde n'est pas dépassée dans seulement 18 % des cas où le niveau de CO₂ est inférieur à 750 ppm. Autrement dit, être en-deçà de ce seuil ne permet pas de se prononcer sur l'absence de dépassement de la VC. A l'inverse, dépasser ce seuil de CO₂ serait un bon indicateur de dépassement de cette VC. Les performances optimales, caractérisées par le maximum de la somme (sensibilité et spécificité), correspondent à un niveau seuil de CO₂ de 701 ppm.

Tableau 34 : VPP/VPN des dépassements des VC selon le seuil de CO₂ (données logements). Seuil en italique : seuil optimal correspondant au maximum de (sensibilité + spécificité).

CO ₂ _moyen_occupation (ppm)					
FORM > 10	>750	>1000	>1500	>2000	> 701
VP	275	155	46	11	298
VN	37	47	55	60	36
FP	25	15	7	2	26
FN	173	293	402	437	150
Bien classés	0.611 (0.569-0.654)	0.396 (0.353-0.438)	0.198 (0.163-0.232)	0.139 (0.109-0.169)	0.654 (0.613-0.696)
Sensibilité	0.613 (0.567-0.657)	0.345 (0.303-0.391)	0.102 (0.077-0.134)	0.024 (0.013-0.044)	0.665 (0.620-0.707)
Spécificité	0.596 (0.472-0.709)	0.758 (0.636-0.847)	0.887 (0.780-0.946)	0.967 (0.881-0.996)	0.580 (0.456-0.694)
VPP	0.916 (0.885-0.947)	0.911 (0.869-0.954)	0.867 (0.776-0.959)	0.846 (0.650-1)	0.919 (0.890-0.949)
VPN	0.176 (0.124-0.227)	0.138 (0.101-0.174)	0.120 (0.090-0.150)	0.120 (0.092-0.149)	0.193 (0.136-0.250)
LR+	1.522 (1.114-2.078)	1.430 (0.904-2.262)	0.909 (0.429-1.924)	0.761 (0.172-3.353)	1.586 (1.174-2.141)
LR-	0.647 (0.511-0.818)	0.862 (0.738-1.008)	1.011 (0.920-1.111)	1.007 (0.960-1.057)	0.576 (0.449-0.739)
Risque relatif	1.112 (1.036-1.194)	1.058 (0.993-1.126)	0.986 (0.884-1.100)	0.962 (0.768-1.204)	1.140 (1.055-1.232)
Odds ratio	2.352 (1.374-4.027)	1.657 (0.904-3.036)	0.899 (0.395-2.042)	0.755 (0.187-3.043)	2.750 (1.607-4.707)
Prévalence	0.878 (0.850-0.906)				

CO ₂ _moyen_occupation (ppm)					
ACET > 9.8	>750	>1000	>1500	>2000	> 801
VP	227	136	43	11	213
VN	127	166	190	198	139
FP	73	34	10	2	61
FN	83	174	267	299	97
Bien classés	0.694 (0.654-0.734)	0.592 (0.549-0.634)	0.456 (0.413-0.500)	0.409 (0.367-0.452)	0.690 (0.650-0.730)
Sensibilité	0.732 (0.680-0.778)	0.438 (0.384-0.494)	0.138 (0.104-0.182)	0.035 (0.019-0.063)	0.687 (0.633-0.736)
Spécificité	0.635 (0.566-0.698)	0.83 (0.771-0.875)	0.95 (0.908-0.973)	0.99 (0.961-0.999)	0.695 (0.627-0.754)
VPP	0.756 (0.708-0.805)	0.8 (0.739-0.860)	0.811 (0.705-0.916)	0.846 (0.650-1)	0.777 (0.728-0.826)
VPN	0.604 (0.538-0.670)	0.488 (0.435-0.541)	0.415 (0.370-0.460)	0.398 (0.355-0.441)	0.588 (0.526-0.651)
LR+	2.006 (1.651-2.437)	2.580 (1.853-3.593)	2.774 (1.427-5.393)	3.548 (0.794-15.84)	2.252 (1.803-2.813)
LR-	0.421 (0.341-0.521)	0.676 (0.601-0.759)	0.906 (0.858-0.957)	0.974 (0.949-0.999)	0.450 (0.372-0.543)
Risque relatif	1.914 (1.601-2.288)	1.563 (1.375-1.776)	1.388 (1.195-1.613)	1.406 (1.113-1.776)	1.891 (1.603-2.230)
Odds ratio	4.758 (3.250-6.965)	3.816 (2.483-5.864)	3.059 (1.520-6.156)	3.642 (0.916-14.46)	5.003 (3.408-7.345)
Prévalence	0.607 (0.565-0.650)				

CO ₂ _moyen_occupation (ppm)					
ACRO > 0.8	>750	>1000	>1500	>2000	> 701
VP	239	141	44	11	258
VN	109	141	161	168	104
FP	61	29	9	2	66
FN	101	199	296	329	82
Bien classés	0.682 (0.641-0.722)	0.552 (0.509-0.596)	0.401 (0.359-0.444)	0.350 (0.309-0.392)	<i>0.709 (0.670-0.749)</i>
Sensibilité	0.702 (0.652-0.748)	0.414 (0.363-0.467)	0.129 (0.097-0.169)	0.032 (0.017-0.057)	<i>0.758 (0.710-0.801)</i>
Spécificité	0.641 (0.566-0.709)	0.829 (0.764-0.878)	0.947 (0.900-0.972)	0.988 (0.954-0.999)	<i>0.611 (0.536-0.681)</i>
VPP	0.796 (0.751-0.842)	0.829 (0.772-0.885)	0.830 (0.729-0.931)	0.846 (0.650-1)	<i>0.796 (0.752-0.840)</i>
VPN	0.519 (0.451-0.586)	0.414 (0.362-0.467)	0.352 (0.308-0.396)	0.338 (0.296-0.379)	<i>0.559 (0.487-0.630)</i>
LR+	1.959 (1.583-2.422)	2.431 (1.705-3.466)	2.444 (1.222-4.888)	2.75 (0.616-12.26)	<i>1.954 (1.603-2.382)</i>
LR-	0.463 (0.379-0.565)	0.705 (0.630-0.789)	0.919 (0.870-0.970)	0.979 (0.954-1.004)	<i>0.394 (0.315-0.492)</i>
Risque relatif	1.656 (1.424-1.926)	1.417 (1.266-1.585)	1.281 (1.116-1.471)	1.278 (1.014-1.610)	<i>1.806 (1.523-2.141)</i>
Odds ratio	4.228 (2.865-6.239)	3.444 (2.193-5.410)	2.659 (1.286-5.497)	2.808 (0.706-11.16)	<i>4.957 (3.340-7.358)</i>
Prévalence	0.666 (0.625-0.707)				

CO2_moyen_occupation (ppm)

BENZ > 2	>750	>1000	>1500	>2000	> 771
VP	165	98	36	9	161
VN	121	175	228	241	129
FP	124	70	17	4	116
FN	81	148	210	237	85
Bien classés	0.582 (0.538-0.626)	0.556 (0.512-0.599)	0.537 (0.493-0.581)	0.509 (0.464-0.553)	0.590 (0.547-0.634)
Sensibilité	0.670 (0.609-0.726)	0.398 (0.339-0.460)	0.146 (0.107-0.196)	0.036 (0.018-0.069)	0.654 (0.592-0.711)
Spécificité	0.493 (0.431-0.556)	0.714 (0.654-0.767)	0.930 (0.890-0.956)	0.983 (0.956-0.994)	0.526 (0.464-0.588)
VPP	0.570 (0.513-0.627)	0.583 (0.508-0.657)	0.679 (0.553-0.804)	0.692 (0.441-0.943)	0.581 (0.523-0.639)
VPN	0.599 (0.531-0.666)	0.541 (0.487-0.596)	0.520 (0.473-0.567)	0.504 (0.459-0.549)	0.602 (0.537-0.668)
LR+	1.325 (1.138-1.542)	1.394 (1.085-1.791)	2.109 (1.218-3.651)	2.240 (0.699-7.179)	1.382 (1.177-1.622)
LR-	0.666 (0.535-0.829)	0.842 (0.740-0.958)	0.917 (0.862-0.975)	0.979 (0.951-1.008)	0.656 (0.532-0.808)
Risque relatif	1.423 (1.171-1.730)	1.273 (1.070-1.514)	1.416 (1.151-1.742)	1.396 (0.976-1.996)	1.463 (1.207-1.773)
Odds ratio	1.987 (1.380-2.861)	1.655 (1.136-2.410)	2.299 (1.261-4.188)	2.287 (0.734-7.124)	2.106 (1.466-3.026)
Prévalence	0.501 (0.456-0.545)				

CO2_moyen_occupation (ppm)

BENZ > 10	>750	>1000	>1500	>2000	> 841
VP	11	7	1	0	11
VN	201	318	427	466	256
FP	278	161	52	13	223
FN	1	5	11	12	1
Bien classés	0.431 (0.387-0.475)	0.661 (0.620-0.703)	0.871 (0.842-0.901)	0.949 (0.929-0.968)	0.543 (0.499-0.587)
Sensibilité	0.916 (0.621-1)	0.583 (0.319-0.805)	0.083 (0-0.378)	0 (0-0.287)	0.916 (0.621-1)
Spécificité	0.419 (0.376-0.464)	0.663 (0.620-0.704)	0.891 (0.860-0.916)	0.972 (0.953-0.984)	0.534 (0.489-0.578)
VPP	0.038 (0.016-0.060)	0.041 (0.011-0.071)	0.018 (0-0.055)	0 (0-0)	0.047 (0.019-0.074)
VPN	0.995 (0.985-1)	0.984 (0.971-0.997)	0.974 (0.960-0.989)	0.974 (0.960-0.988)	0.996 (0.988-1)
LR+	1.579 (1.310-1.903)	1.735 (1.058-2.845)	0.767 (0.115-5.101)	0 (-)	1.968 (1.618-2.394)
LR-	0.198 (0.030-1.300)	0.627 (0.320-1.229)	1.028 (0.864-1.223)	1.027 (1.012-1.043)	0.155 (0.023-1.020)
Risque relatif	7.688 (1.415-41.75)	2.691 (0.910-7.961)	0.751 (0.140-4.021)	0 (-)	12.08 (2.224-65.62)
Odds ratio	7.953 (1.436-44.02)	2.765 (0.905-8.445)	0.746 (0.132-4.191)	0 (-)	12.62 (2.281-69.88)
Prévalence	0.024 (0.010-0.038)				

CO2_moyen_occupation (ppm)

DICHLO > 0.9	>750	>1000	>1500	>2000	> 1058
VP	259	153	50	13	133
VN	15	30	42	45	36
FP	30	15	3	0	9
FN	187	293	396	433	313
Bien classés	0.558 (0.514-0.601)	0.372 (0.329-0.415)	0.187 (0.152-0.221)	0.118 (0.089-0.146)	0.344 (0.302-0.386)
Sensibilité	0.580 (0.534-0.625)	0.343 (0.300-0.388)	0.112 (0.086-0.145)	0.029 (0.016-0.049)	0.298 (0.257-0.342)
Spécificité	0.333 (0.213-0.480)	0.666 (0.519-0.786)	0.933 (0.813-0.982)	1 (0.903-1)	0.8 (0.658-0.892)
VPP	0.896 (0.861-0.931)	0.910 (0.867-0.953)	0.943 (0.881-1)	1 (1-1)	0.936 (0.896-0.976)
VPN	0.074 (0.038-0.110)	0.092 (0.061-0.124)	0.095 (0.068-0.123)	0.094 (0.067-0.120)	0.103 (0.071-0.135)
LR+	0.871 (0.698-1.086)	1.029 (0.667-1.586)	1.681 (0.546-5.174)	+∞	1.491 (0.817-2.720)
LR-	1.257 (0.820-1.928)	0.985 (0.793-1.224)	0.951 (0.873-1.035)	0.970 (0.955-0.986)	0.877 (0.748-1.027)
Risque relatif	0.968 (0.916-1.023)	1.003 (0.946-1.064)	1.043 (0.970-1.121)	1.103 (1.072-1.136)	1.044 (0.987-1.103)
Odds ratio	0.692 (0.365-1.312)	1.044 (0.549-1.984)	1.767 (0.571-5.464)	(-)	1.699 (0.809-3.569)
Prévalence	0.908 (0.882-0.933)				

CO₂_moyen_occupation (ppm)

DICHLO > 60	>750	>1000	>1500	>2000	> 803
VP	42	26	8	3	41
VN	188	293	390	425	214
FP	247	142	45	10	221
FN	14	30	48	53	15
Bien classés	0.468 (0.424-0.512)	0.649 (0.607-0.691)	0.810 (0.775-0.845)	0.871 (0.842-0.901)	0.519 (0.475-0.563)
Sensibilité	0.75 (0.621-0.845)	0.464 (0.340-0.592)	0.142 (0.072-0.260)	0.053 (0.013-0.153)	0.732 (0.602-0.830)
Spécificité	0.432 (0.386-0.479)	0.673 (0.628-0.715)	0.896 (0.864-0.921)	0.977 (0.957-0.987)	0.491 (0.445-0.538)
VPP	0.145 (0.104-0.185)	0.154 (0.100-0.209)	0.150 (0.054-0.247)	0.230 (0.001-0.459)	0.156 (0.112-0.200)
VPN	0.930 (0.895-0.965)	0.907 (0.875-0.938)	0.890 (0.861-0.919)	0.889 (0.860-0.917)	0.934 (0.902-0.966)
LR+	1.320 (1.112-1.568)	1.422 (1.041-1.943)	1.380 (0.686-2.777)	2.330 (0.661-8.214)	1.441 (1.199-1.731)
LR-	0.578 (0.362-0.922)	0.795 (0.617-1.023)	0.956 (0.855-1.068)	0.968 (0.908-1.032)	0.544 (0.349-0.848)
Risque relatif	2.096 (1.187-3.701)	1.666 (1.024-2.709)	1.377 (0.703-2.695)	2.081 (0.815-5.308)	2.389 (1.370-4.165)
Odds ratio	2.283 (1.221-4.267)	1.788 (1.023-3.123)	1.444 (0.655-3.185)	2.405 (0.694-8.335)	2.646 (1.433-4.885)
Prévalence	0.114 (0.085-0.142)				

CO₂_moyen_occupation (ppm)

PM10 > 20	>750	>1000	>1500	>2000	> 678
VP	139	81	28	6	157
VN	32	41	46	48	31
FP	16	7	2	0	17
FN	93	151	204	226	75
Bien classés	0.610 (0.553-0.667)	0.435 (0.377-0.493)	0.264 (0.212-0.315)	0.192 (0.146-0.239)	0.671 (0.616-0.726)
Sensibilité	0.599 (0.534-0.660)	0.349 (0.290-0.412)	0.120 (0.084-0.169)	0.025 (0.010-0.056)	0.676 (0.613-0.733)
Spécificité	0.666 (0.524-0.783)	0.854 (0.724-0.929)	0.958 (0.850-0.995)	1 (0.909-1)	0.645 (0.503-0.765)
VPP	0.896 (0.848-0.944)	0.920 (0.863-0.976)	0.933 (0.844-1)	1 (1-1)	0.902 (0.858-0.946)
VPN	0.256 (0.179-0.332)	0.213 (0.155-0.271)	0.184 (0.135-0.232)	0.175 (0.130-0.220)	0.292 (0.205-0.379)
LR+	1.797 (1.188-2.718)	2.394 (1.180-4.854)	2.896 (0.713-11.75)	+∞	1.910 (1.290-2.828)
LR-	0.601 (0.466-0.775)	0.761 (0.655-0.885)	0.917 (0.850-0.989)	0.974 (0.953-0.994)	0.500 (0.378-0.662)
Risque relatif	1.205 (1.074-1.352)	1.170 (1.063-1.287)	1.143 (1.023-1.277)	1.212 (1.148-1.280)	1.275 (1.118-1.453)
Odds ratio	2.989 (1.563-5.713)	3.141 (1.379-7.154)	3.156 (0.833-11.95)	(-)	3.817 (2.001-7.279)
Prévalence	0.828 (0.784-0.872)				

CO₂_moyen_occupation (ppm)

PM2.5 > 10	>750	>1000	>1500	>2000	> 662
VP	143	82	29	6	165
VN	14	18	20	21	13
FP	7	3	1	0	8
FN	105	166	219	242	83
Bien classés	0.583 (0.524-0.642)	0.371 (0.313-0.429)	0.182 (0.136-0.228)	0.100 (0.064-0.136)	0.661 (0.605-0.718)
Sensibilité	0.576 (0.514-0.636)	0.330 (0.275-0.391)	0.116 (0.082-0.163)	0.024 (0.010-0.053)	0.665 (0.604-0.721)
Spécificité	0.666 (0.451-0.828)	0.857 (0.643-0.956)	0.952 (0.752-1)	1 (0.813-1)	0.619 (0.407-0.792)
VPP	0.953 (0.919-0.987)	0.964 (0.925-1)	0.966 (0.902-1)	1 (1-1)	0.953 (0.922-0.985)
VPN	0.117 (0.059-0.175)	0.097 (0.054-0.140)	0.083 (0.048-0.118)	0.079 (0.047-0.112)	0.135 (0.066-0.203)
LR+	1.729 (0.935-3.197)	2.314 (0.799-6.697)	2.455 (0.351-17.14)	+∞	1.746 (1.005-3.034)
LR-	0.635 (0.454-0.888)	0.780 (0.642-0.949)	0.927 (0.834-1.030)	0.975 (0.956-0.995)	0.540 (0.370-0.789)
Risque relatif	1.080 (1.003-1.163)	1.069 (1.004-1.138)	1.054 (0.978-1.137)	1.086 (1.048-1.126)	1.103 (1.012-1.201)
Odds ratio	2.723 (1.089-6.812)	2.963 (0.917-9.573)	2.648 (0.482-14.52)	(-)	3.230 (1.316-7.926)
Prévalence	0.921 (0.889-0.953)				

Pour l'acétaldéhyde, utiliser le niveau de CO₂ pour caractériser un dépassement de VC fournit de meilleurs résultats à la fois en terme de VPP (76 %), mais aussi de VPN (61 %), une assez bonne prédiction des cas de dépassement et de non-dépassement. Le seuil optimal de CO₂ est de 801 ppm.

Les performances pour prédire les dépassements de concentration en acroléine sont assez proches de celles observées pour l'acétaldéhyde.

Dans le cas du benzène, la prévalence des dépassements est plus faible, 50 % pour 2 µg/m³ et 2,4 % pour 10 µg/m³. Les VPP et VPN sont correctes (autour de 60 %) pour un seuil de 750 ppm de CO₂ et une VC de 2 µg/m³. Par contre, pour la VC de 10 µg/m³, la VPP est extrêmement faible (4 %) compte tenu de la prévalence. Le seuil optimal se situe autour de 800 ppm de CO₂.

La prévalence des concentrations de 1,4-dichlorobenzène supérieures à 0,9 µg/m³ est très élevée (91 %). Ceci conduit à une VPP de 90 % ou plus. Par contre, le rapport de vraisemblance positif (LR+) reste systématiquement voisin de 1, ce qui indique que l'utilisation du niveau de CO₂ pour anticiper les dépassements n'apporte pas grand-chose par rapport à une répartition au hasard. Ce n'est plus le cas lorsque l'on considère une valeur cible de 1,4-dichlorobenzène de 60 µg/m³. La VPN est très élevée compte tenu de la faible prévalence des dépassements. La VPP reste faible autour de 15 %. Le seuil optimal est de 803 ppm dans ce dernier cas.

Pour les particules, fractions PM₁₀ et PM_{2,5}, la prévalence de dépassement est très élevée 83 % et 92 % respectivement. Dans les deux cas, la VPP est élevée (90 % à 95 %) pour un seuil de CO₂ de 750 ppm. La sensibilité et la spécificité sont toutes deux supérieures à 0,5 pour le seuil considéré. Le seuil optimal de CO₂ se situe entre 650 et 700 ppm.

Les courbes ROC correspondantes aux différents tests sont représentées ci-après.

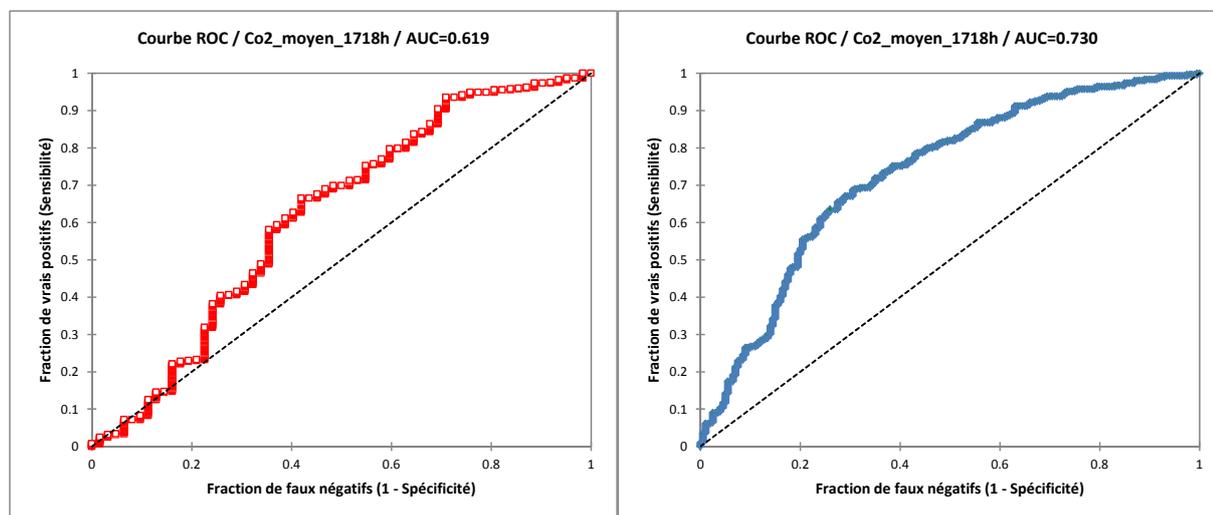


Figure 28 : Courbes ROC associées au niveau de CO₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC de formaldéhyde (gauche) et d'acétaldéhyde (droite, VC = 9,8 µg/m³).

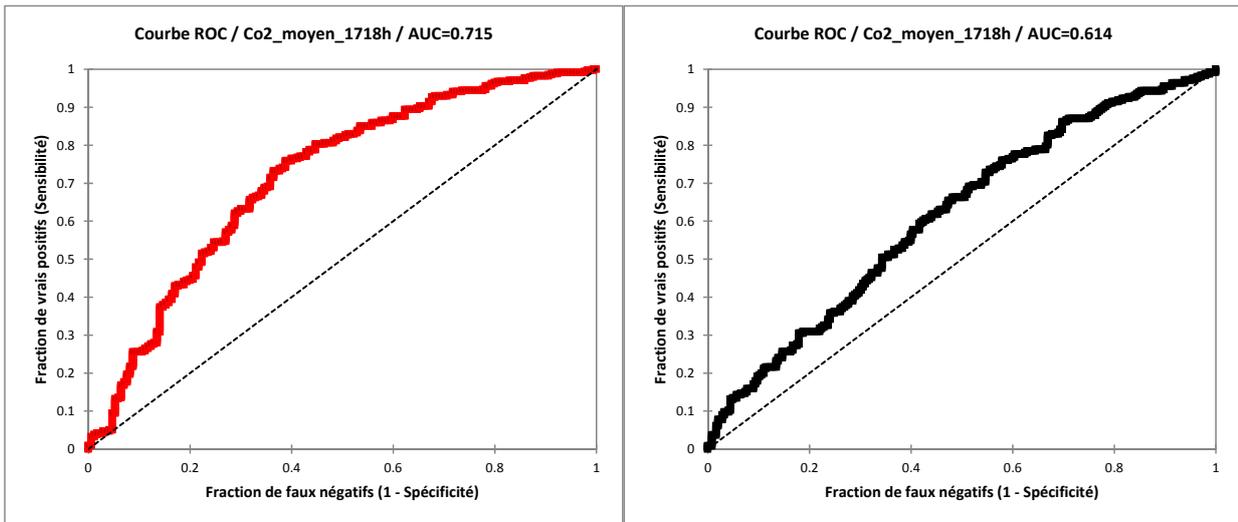


Figure 29 : Courbes ROC associées au niveau de CO₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC de l'acroléine (gauche) et du benzène (droite, VC = 2 µg/m³).

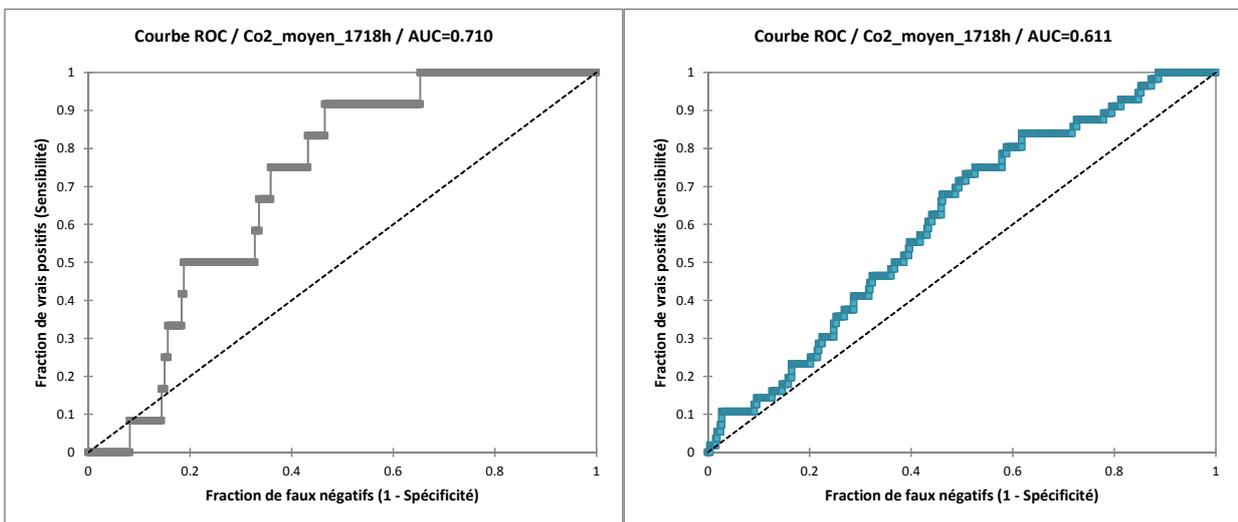


Figure 30 : Courbes ROC associées au niveau de CO₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC du benzène (gauche, VC = 10 µg/m³) et du 1,4-dichlorobenzène (droite, VC = 60 µg/m³).

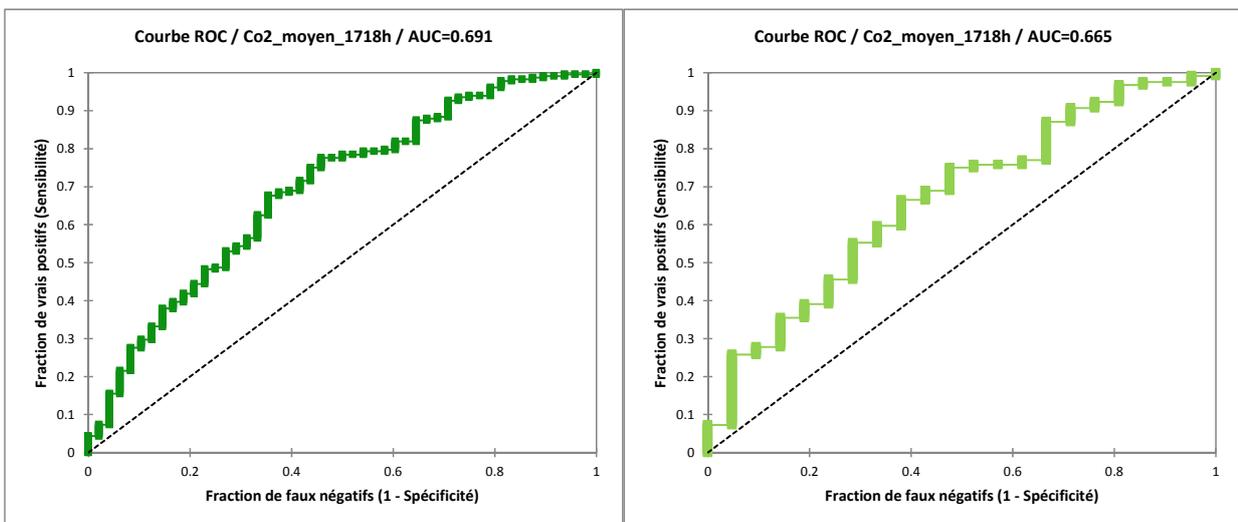


Figure 31 : Courbes ROC associées au niveau de CO₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC en PM₁₀ (gauche) et en PM_{2,5} (droite).

L'aire sous la courbe ROC de chaque polluant est reportée dans le Tableau 35 par ordre décroissant. La discrimination des situations de dépassement de valeur cible par le niveau de CO₂ peut être considérée comme bonne pour l'acétaldéhyde, l'acroléine et pour le benzène (VC de 10 µg/m³).

Tableau 35 : Valeurs AUC associées aux dépassements de VC selon le niveau de CO₂.

	AUC	Ecart-type	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
ACETALDEHYDE > 9.8	0.730	0.023	0.685	0.776
ACROLEINE > 0.8	0.715	0.025	0.666	0.764
BENZENE > 10	0.710	0.051	0.611	0.810
PM10 > 20	0.691	0.043	0.607	0.775
PM2.5 > 10	0.665	0.062	0.544	0.786
FORMALDEHYDE > 10	0.619	0.043	0.535	0.703
BENZENE > 2	0.614	0.025	0.564	0.663
1,4-DICHLOROBENZENE > 60	0.611	0.036	0.539	0.682
1,4-DICHLOROBENZENE > 0.9	0.490	0.042	0.406	0.573

En gras, valeurs significativement différentes de 0,5 au seuil de 5 %

4 Ecoles et crèches : campagne pilote de la surveillance de la qualité de l'air dans les ERP (2009-2011)

Dans le cadre de la loi Grenelle de l'environnement, le principe de surveillance de la qualité de l'air dans les établissements recevant du public a été adopté. Pour définir ses modalités, une campagne pilote a été menée dans 310 écoles maternelles, écoles élémentaires et crèches dans l'ensemble des régions de France y compris en Martinique et sur l'île de La Réunion entre septembre 2009 et décembre 2011. Cette campagne de mesure a été pilotée par le ministère de l'écologie (MEDDE) sous la direction conjointe de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), avec la participation de la Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN), de la Direction générale de la santé (DGS), de l'INERIS, du CSTB, et de la Fédération des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (Atmo-France).

Cette campagne pilote a été décrite plus en détail par Michelot et al. (2011) et les conclusions sont disponibles sur le site du ministère de l'écologie (MEDDE, 2012). Les données relatives au confinement et à la ventilation dans ces établissements ont fait l'objet d'une publication (Ramalho et al., 2012). Cette campagne a permis entre autres de fixer des valeurs d'alertes et la stratégie d'échantillonnage spatiale et temporelle à adopter. Ces éléments ont été repris dans les décrets qui déclinent les modalités de cette surveillance réglementaire.

4.1 Présentation des données disponibles

Un total de 310 établissements a participé à cette campagne pilote de surveillance de la QAI : 101 crèches (187 salles d'activités instrumentées), 101 écoles maternelles (220 salles de classe) et 108 écoles élémentaires (489 salles de classe). La campagne de mesure couvre deux phases correspondant à deux années scolaires 2009-2010 et 2010-2011. Trois régions ont participé aux deux phases : l'Île-de-France, la Normandie et PACA.

Chaque salle a été instrumentée deux fois au cours d'une même année scolaire : une fois pendant la saison de chauffe (entre novembre et février) et une autre fois pendant la saison hors-chauffe (entre avril et septembre). Pour la Martinique et La Réunion, deux mesures ont également été réalisées au cours d'une même année scolaire, mais la notion de saisons n'est pas applicable pour ces régions. Lors de la première année scolaire (2009-2010), le dioxyde de carbone n'a été mesuré que durant la saison de chauffe. La durée des mesures couvrait une semaine du lundi matin au vendredi soir. Dans 18 établissements, un suivi de 16 semaines successives (hors périodes de vacances) a été réalisé. Ces 18 établissements n'ont pas été inclus dans cette étude.

Selon la taille et la configuration de l'établissement, de 1 à 8 salles de classe ou d'accueil de jeunes enfants ont été instrumentées. Dans 6 établissements, l'ensemble des salles a fait l'objet de mesures (jusqu'à 17 salles) avec pour objectif de mieux définir la représentativité spatiale des mesures.

Au final, chaque individu statistique correspond à une saison d'une salle de classe.

Les mesures de dioxyde de carbone avaient comme objectif de définir l'état de confinement dans les salles de classe. Cet état de confinement a été exprimé sous la forme d'un indicateur (ou score nommé ICONÉ®) qui est basé sur la fréquence de dépassement des niveaux de CO₂ par rapport à deux seuils (1000 et 1700 ppm). Ces seuils viennent encadrer la valeur définie dans le cadre du RSDT de 1000 ppm par rapport au niveau de l'extérieur. Dans le cadre de la présente étude centrée sur les niveaux de CO₂, cet indicateur n'a pas été utilisé.

Tableau 36 : Caractéristiques de la mesure des polluants lors de la campagne pilote de la surveillance de la QAI dans les écoles et crèches.

Paramètre	Unités	Méthode	Lieu	Durée
CO ₂	ppm ²⁵	Mesure en continu (Sonde Lumair®) Pas de temps : 10 min	Salle de classe ou d'activité	4,5 jours
Formaldéhyde	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant DNPH (Radiello®) Analyse par HPLC/UV	Salle de classe ou d'activité	4,5 jours
Benzène	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant Carbograph4 (Radiello®) Analyse par TD/GC/MS	Salle de classe ou d'activité	4,5 jours

Le CO₂ étant enregistré en continu sur une semaine, il est nécessaire de prendre en compte un critère intégré pour pouvoir le comparer aux autres polluants qui sont exprimés en termes de concentration intégrée sur la semaine. Différents critères ont été utilisés. Ils sont décrits ci-après :

- La concentration moyenne sur les 4,5 jours de mesure (période identique à la durée de prélèvement des capteurs passifs), intégrant le jour et la nuit (CO₂_moyen)
- La concentration maximale observée sur la semaine (CO₂_max). La limite de l'appareil est fixé à 5000 ppm. Le maximum observé peut par conséquent dans certains cas être tronqué.
- La concentration moyenne sur la période effective d'occupation des salles par les enfants durant les 4,5 jours de mesure (données disponibles uniquement pour la phase 2 de la campagne)²⁶. Cette période effective d'occupation était déterminée par des budgets espace-temps renseignés par l'enseignant à la fin de chaque semaine.

De nouvelles variables ont également été créées à partir des concentrations de polluants observées. Ces nouvelles variables ont été déclinées pour chaque polluant et sont décrites ci-après :

- Fraction volumique du polluant gazeux exprimé en ppb. La transformation de la concentration massique en fraction volumique permet d'intégrer la température moyenne lors du prélèvement et ainsi de comparer deux mesures réalisées à des températures différentes (notamment entre l'intérieur et l'extérieur).

²⁵ Unités ppm : fraction volumique en parties par million (1 ppm = 1 pour 10⁶), de même 1 ppb représente une partie par milliard (1 pour 10⁹).

²⁶ Les budgets espace-temps sont disponibles pour les deux phases, mais n'ont été vérifiés que pour la phase 2. La vérification des budgets espace-temps de la phase 1 n'était pas compatible avec les délais de la présente étude.

- Le logarithme décimal de la fraction volumique du polluant gazeux. Les distributions de concentrations des polluants étant généralement voisines d'une distribution log-normale. La transformation des données en log permet de se rapprocher d'une distribution normale.
- La différence de concentration exprimée en ppb entre l'intérieur et l'extérieur pour un polluant donné. La différence a été préférée au ratio car elle permet de garder la même unité que les concentrations prises individuellement et surtout parce qu'une valeur très faible à l'extérieur implique des ratios très élevés.
- Le logarithme décimal de cette différence, lorsque celle-ci est strictement positive, c'est-à-dire lorsque la concentration est strictement plus élevée à l'intérieur par rapport à l'extérieur. Cette transformation logarithmique vise à normaliser la distribution.

La limite de détection (LD) de la méthode a été déterminée systématiquement à partir des blancs de terrain disposés à raison d'un par établissement (Tableau 37). La limite de quantification (LQ) est donnée par le laboratoire. Les données brutes ont été retenues pour l'exploitation. Le CO₂ ne présente jamais de valeur inférieure à sa limite de quantification, étant donné qu'il est déjà présent dans l'air extérieur à des niveaux voisins de 380 ppm.

Tableau 37 : Limites de détection et de quantification des polluants cibles

Substance	Blancs de lot	Blancs de terrain	LD	LQ
	Moyenne ± écart-type	Moyenne ± écart-type		
CO ₂ (ppm)	--	--	1	50
Formaldéhyde (µg/m ³)	0,25 ± 0,22	0,37 ± 0,31	1,3	2
Benzène (µg/m ³)	--	0,16 ± 0,12	0,5	1

Enfin, d'autres paramètres ont été pris en considération en supposant qu'ils pouvaient affecter le niveau de CO₂ et/ou des polluants cibles. Ces paramètres sont listés au Tableau 38.

Tableau 38 : Autres paramètres pris en compte issus de la campagne surveillance-écoles

Paramètre	Modalités
Température moyenne de la salle de classe	Variable quantitative
Température moyenne extérieure	Variable quantitative
Taux de renouvellement d'air moyen nocturne (vol/h) ²⁷	Variable quantitative
Volume de la salle de classe (m ³)	Variable quantitative
Nombre d'enfants dans la salle de classe (ou pour les crèches la capacité d'accueil de la salle d'activité) (phase 2 seulement) ²⁸	Variable quantitative
Etat d'ouverture de la porte de la salle de classe durant la semaine	3 modalités (ouvert / fermé / donnée indisponible)

²⁷ Le taux de renouvellement d'air moyen nocturne a été déterminé à partir de la décroissance des niveaux de CO₂ observés (voir Ramalho *et al.*, 2012).

²⁸ Lorsque le nombre d'enfants renseigné était supérieur à 40, il n'a pas été pris en compte car celui-ci correspondait plus à la capacité d'accueil de l'établissement plutôt qu'à celle de la salle instrumentée.

Les statistiques descriptives globales, hivernales et estivales des données sont présentées en annexe 12.

4.2 Corrélations entre le CO₂ et les polluants cibles

Les corrélations (r de Pearson) entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants mesurés sont présentés au Tableau 39. Les p-values associées sont présentées au Tableau 40.

Comme dans le cas des données logements, le niveau de CO₂, et notamment celui déterminé en période d'occupation de la salle par les enfants, est significativement corrélé avec le niveau de formaldéhyde et de benzène. Les anticorrélations observées avec la température et l'humidité indique un effet saison très marqué. Enfin, le niveau de CO₂ est également corrélé avec le nombre d'enfants par salle et le volume de la salle de classe.

Tableau 39 : Corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de significativité alpha=0.05.

Matrice de corrélation (Pearson) :

Variables	Type d'association	Moy(CO ₂)_occup	moy_CO ₂	max_CO ₂	P95_CO ₂
Moy(CO ₂)_occup	+	1	0.873	0.884	0.932
moy_CO ₂	+	0.873	1	0.816	0.904
max_CO ₂	+	0.884	0.816	1	0.945
P95_CO ₂	+	0.932	0.904	0.945	1
Formaldéhyde	+	0.283	0.276	0.274	0.275
Benzène	+	0.105	0.141	0.122	0.141
Benzène_ext	-	-0.107	0.013	-0.017	-0.018
Formaldéhyde_ppb	+	0.280	0.271	0.269	0.268
Benzène_ppb	+	0.097	0.135	0.117	0.135
Benzène_ext_ppb	-	-0.144	-0.017	-0.046	-0.055
Diff_benzène_ppb	+	0.209	0.179	0.162	0.194
Log_Formaldéhyde_ppb	+	0.452	0.418	0.450	0.449
Log_Benzène_ppb	+	0.158	0.196	0.161	0.187
Log_Benzène_ext_ppb	-	-0.123	-0.021	-0.036	-0.033
Log_diff_Benzène	+	0.143	0.139	0.108	0.150
Température_int	-	-0.509	-0.430	-0.445	-0.506
Température_ext	-	-0.456	-0.413	-0.372	-0.430
HR_int	-	-0.153	-0.033	-0.117	-0.075
HR_ext	+	0.173	0.200	0.057	0.087
Humidité spécifique_int	-	-0.389	-0.278	-0.347	-0.339
Humidité spécifique_ext	-	-0.463	-0.444	-0.408	-0.452
nb_enfants	+	0.253	0.195	0.294	0.256
Volume (m ³)	+	0.151	0.145	0.177	0.162
TRA_nocturne (vol/h)	-	-0.122	-0.091	-0.099	-0.041

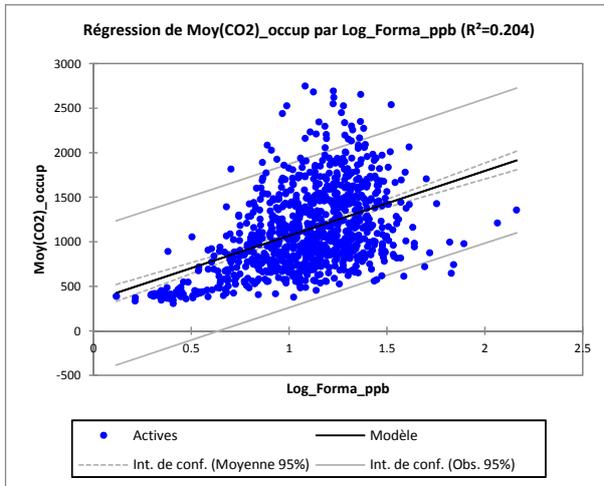
Tableau 40 : p-values associées aux corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants.

p-values :

Variables	Type d'association	Moy(CO ₂)_occup	moy_CO ₂	max_CO ₂	P95_CO ₂
Moy(CO ₂)_occup	+	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
moy_CO ₂	+	< 0.0001	0	< 0.0001	< 0.0001
max_CO ₂	+	< 0.0001	< 0.0001	0	< 0.0001
P95_CO ₂	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0
Formaldéhyde	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Benzène	+	0.002	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Benzène_ext	-	0.002	0.675	0.548	0.582
Formaldéhyde_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Benzène_ppb	+	0.004	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Benzène_ext_ppb	-	< 0.0001	0.573	0.108	0.088
Diff_benzène_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Log_Formaldéhyde_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Log_Benzène_ppb	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Log_Benzène_ext_ppb	-	0.0003	0.477	0.200	0.302
Log_diff_Benzène	+	0.0001	< 0.0001	0.000	< 0.0001
Température_int	-	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Température_ext	-	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
HR_int	-	< 0.0001	0.298	< 0.0001	0.023
HR_ext	+	< 0.0001	< 0.0001	0.085	0.016
Humidité spécifique_int	-	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Humidité spécifique_ext	-	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
nb_enfants	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Volume (m ³)	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
TRA_nocturne (vol/h)	-	0.021	0.049	0.033	0.375

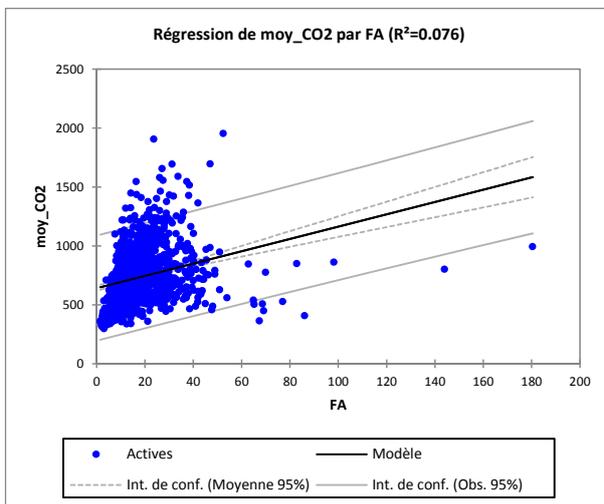
4.2.1 Corrélation CO₂ / Formaldéhyde dans les écoles et crèches

La corrélation la plus importante (Figure 32) a été obtenue pour l'association entre le niveau moyen de CO₂ et le logarithme de la concentration de formaldéhyde (r de Pearson = 0,452). L'intensité de cette relation est modérée (r^2 de 20 %). L'association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration de formaldéhyde (r de Pearson de 0,276) est représentée à la Figure 33. Cette même association avec le niveau moyen de CO₂ calculé durant l'occupation (r de Pearson de 0,283) est représentée à la Figure 34. Dans ces deux derniers cas, l'intensité de la corrélation n'est que de 8 %.



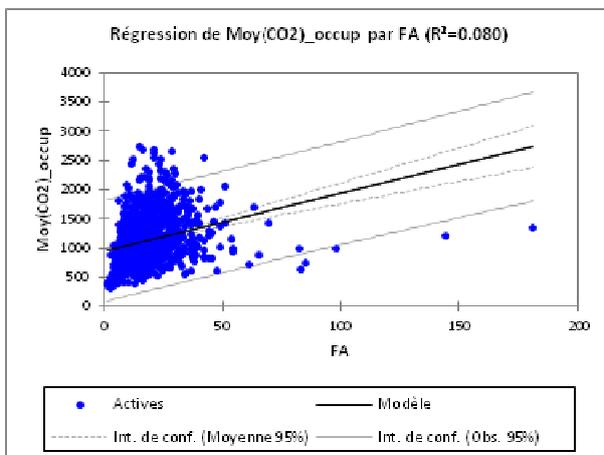
Observations	898
R ²	0.204
R ² ajusté	0.203
MCE	168131
Constante	340 (234 – 446)
Pente	727 (633 – 821)

Figure 32 : Niveau moyen de CO₂ en fonction du logarithme de la concentration de formaldéhyde.



Observations	1151
R ²	0.076
R ² ajusté	0.076
MCE	51501
Constante	642 (618 – 665)
Pente	5.2 (4.2 – 6.3)

Figure 33 : Niveau moyen de CO₂ en fonction du niveau intégré de formaldéhyde.

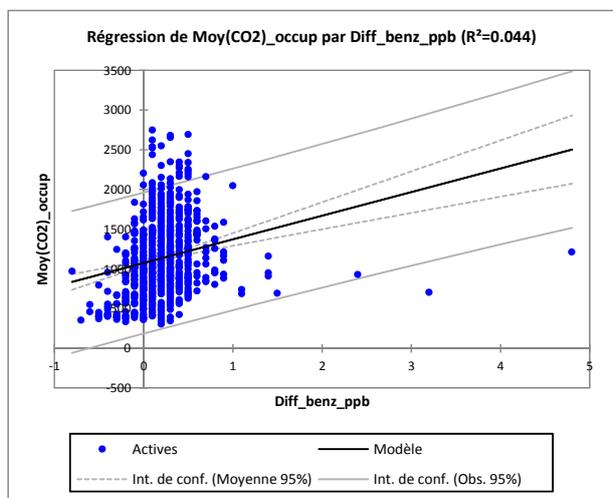


Observations	898
R ²	0.080
R ² ajusté	0.079
MCE	194334
Constante	949
Pente	9.9 (7.7 – 12.1)

Figure 34 : Niveau moyen de CO₂ durant l'occupation des salles en fonction du niveau intégré de formaldéhyde.

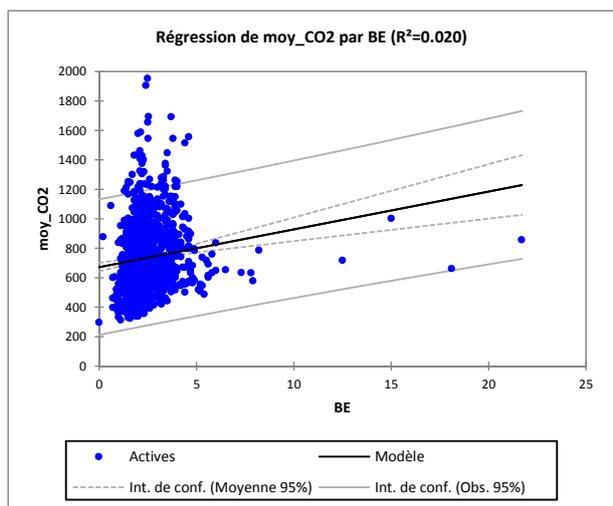
4.2.2 Corrélation CO₂ / Benzène dans les écoles et crèches

C'est en utilisant la différence de concentration de benzène entre l'intérieur et l'extérieur que la corrélation avec le niveau de CO₂ est la plus forte ($r = 0,209$, Figure 35). L'association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration de benzène (r de Pearson de 0,141) est représentée à la Figure 36. En considérant le niveau de CO₂ durant l'occupation, la corrélation observée et la concentration de benzène (r de Pearson de 0,105) est représentée à la Figure 37. L'intensité de la corrélation est très faible dans les 3 cas (4 %, 2 % et 1 % respectivement).



Observations	859
R ²	0.044
R ² ajusté	0.043
MCE	204478
Constante	1073 (1037 – 1109)
Pente	298 (204 – 391)

Figure 35 : Niveau moyen de CO₂ en fonction de la différence de concentration de benzène entre l'intérieur et l'extérieur exprimée en ppb.



Observations	1135
R ²	0.020
R ² ajusté	0.019
MCE	54838
Constante	672 (642 – 702)
Pente	25.7 (15.1 – 36.2)

Figure 36 : Niveau moyen de CO₂ en fonction du niveau intégré de benzène.

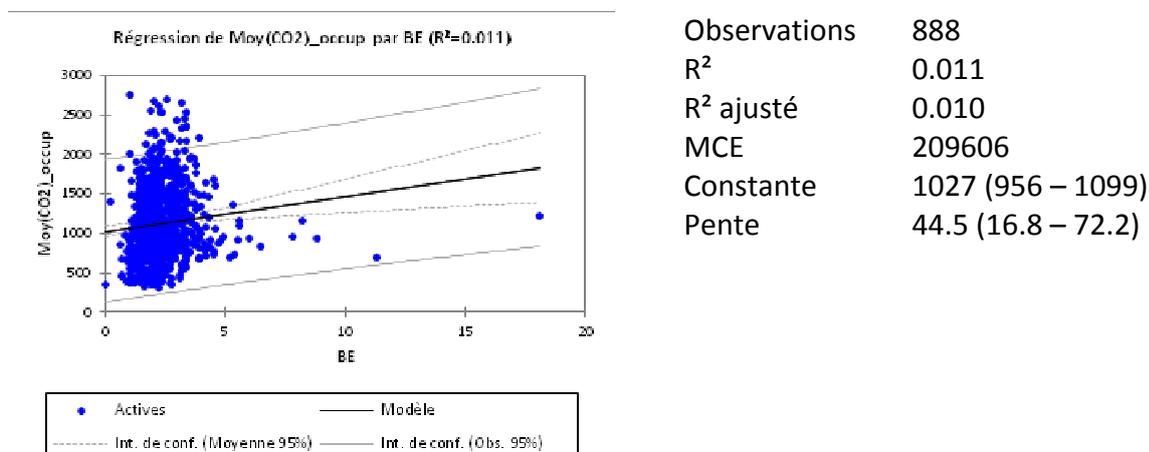


Figure 37 : Niveau moyen de CO₂ durant l'occupation des salles en fonction du niveau intégré de benzène.

4.3 Relations entre les variables

Des corrélations ont été observées en prenant chaque polluant cible de manière individuelle. Toutefois, d'autres facteurs sont également corrélés avec le CO₂ et les polluants, notamment la température et l'humidité. Une analyse par composantes principales normée (ACP) est réalisée de manière à identifier de manière plus précise ces facteurs qui seront ensuite pris en compte pour affiner les corrélations observées. Les données CO₂ ont été projetées comme variables supplémentaires.

Le nombre d'enfants par salle, le volume de la salle et le taux de renouvellement d'air nocturne ont été ajoutés comme variables quantitatives. L'état d'ouverture de la porte de la salle et le type d'établissement (crèche, école maternelle ou élémentaire) ont également été pris en compte comme variable nominale.

Au total, 30 variables ont été prises en compte.

Les résultats de l'ACP sont présentés dans les tableaux et figures ci-dessous. Le plan principal représente 45 % de la variance totale de l'ensemble des données prises en compte. Le premier axe traduit l'effet de la saison avec notamment des niveaux de benzène et dans une moindre mesure des niveaux de CO₂ plus élevés en hiver. L'état de la porte de la salle est le plus souvent fermé. Le second axe se caractérise par des niveaux de benzène à l'extérieur plutôt faibles, et des niveaux de CO₂ qui restent élevés. Le troisième axe est associé à des niveaux de formaldéhyde élevés, à la saison été et aux écoles maternelles. Le différentiel de concentration en benzène entre l'intérieur et l'extérieur caractérise le quatrième axe. Enfin, le cinquième axe met en avant le nombre d'enfants et le volume des salles par opposition aux crèches. Celles-ci ont tendance à accueillir un nombre d'enfants plus faible que les salles de classe d'école maternelle ou élémentaire et par ailleurs le volume des salles d'activités est plus petit.

Tableau 41 : ACP : valeurs propres associées aux 10 premiers axes

Numéro	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	5.34	26.70	26.70
2	3.67	18.34	45.04
3	2.80	13.98	59.02
4	2.05	10.23	69.26
5	1.25	6.25	75.51
6	1.14	5.69	81.19
7	0.99	4.96	86.15
8	0.72	3.60	89.76
9	0.62	3.12	92.88
10	0.51	2.56	95.44

Tableau 42 : ACP – Coordonnées des variables sur les 5 premiers axes
(en italique : variables nominales)

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Formaldéhyde	0.01	0.34	0.91	-0.12	0.07
Formaldéhyde_ppb	0.00	0.33	0.91	-0.13	0.06
Log_Formaldéhyde_ppb	0.13	0.42	0.83	-0.05	0.02
Benzène	0.81	-0.33	0.04	-0.39	0.02
Benzène_ppb	0.80	-0.34	0.05	-0.40	0.02
Log_Benzène_ppb	0.85	-0.33	0.06	-0.25	0.02
Benzène_ext	0.40	-0.81	0.26	0.26	0.03
Benzène_ext_ppb	0.35	-0.84	0.27	0.24	0.02
Log_Benzène_ext_ppb	0.27	-0.79	0.28	0.33	-0.01
Diff_benzène_ppb	0.62	0.30	-0.16	-0.60	0.00
Log_diff_Benzène	0.50	0.22	-0.25	-0.47	-0.02
T_int	-0.47	-0.42	-0.02	-0.41	-0.15
T_ext	-0.76	-0.35	0.15	-0.29	-0.14
HR_int	-0.66	-0.25	0.17	-0.32	0.18
HR_ext	0.26	0.19	-0.13	-0.19	0.47
Hum_spec_int	-0.71	-0.46	0.05	-0.45	0.08
Hum_spec_ext	-0.68	-0.44	0.02	-0.45	0.09
nb_enfants	0.17	0.01	0.04	-0.05	-0.72
Volume	0.01	0.11	0.08	-0.15	-0.62
TRA_nuit	-0.01	0.02	-0.17	0.06	0.17
Moy(CO2)_occup	0.28	0.35	0.20	0.11	-0.03
moy_CO2	0.28	0.23	0.24	0.05	0.03
max_CO2	0.29	0.28	0.26	0.09	-0.06
P95_CO2	0.29	0.27	0.22	0.09	-0.04

Variables nominales	Valeurs-test				
Type : Crèches	1.43	-3.91	-6.71	4.80	7.08
Type : Maternelles	-1.38	1.34	5.39	-1.36	-2.30
Type : Élémentaires	-0.03	2.11	1.04	-2.83	-3.92
Phase 1 (2009-2010)	5.56	-0.09	-1.61	-0.98	2.49
Phase 2 (2010-2011)	-5.56	0.09	1.61	0.98	-2.49
Été	-17.82	-2.74	7.80	-1.05	-6.66
Hiver	17.82	2.74	-7.80	1.05	6.66
Etat_porte : ouverte	-2.85	-2.46	-2.54	-3.97	-0.79
Etat_porte : fermée	5.24	2.98	-0.40	5.28	1.96

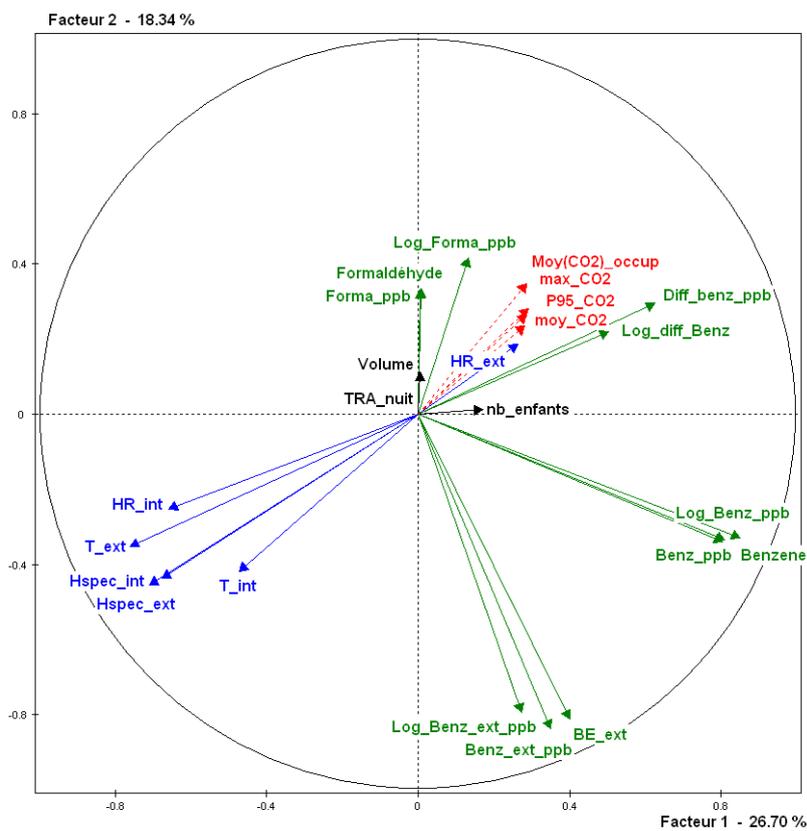


Figure 38 : ACP – données écoles : cercle de corrélations des variables.

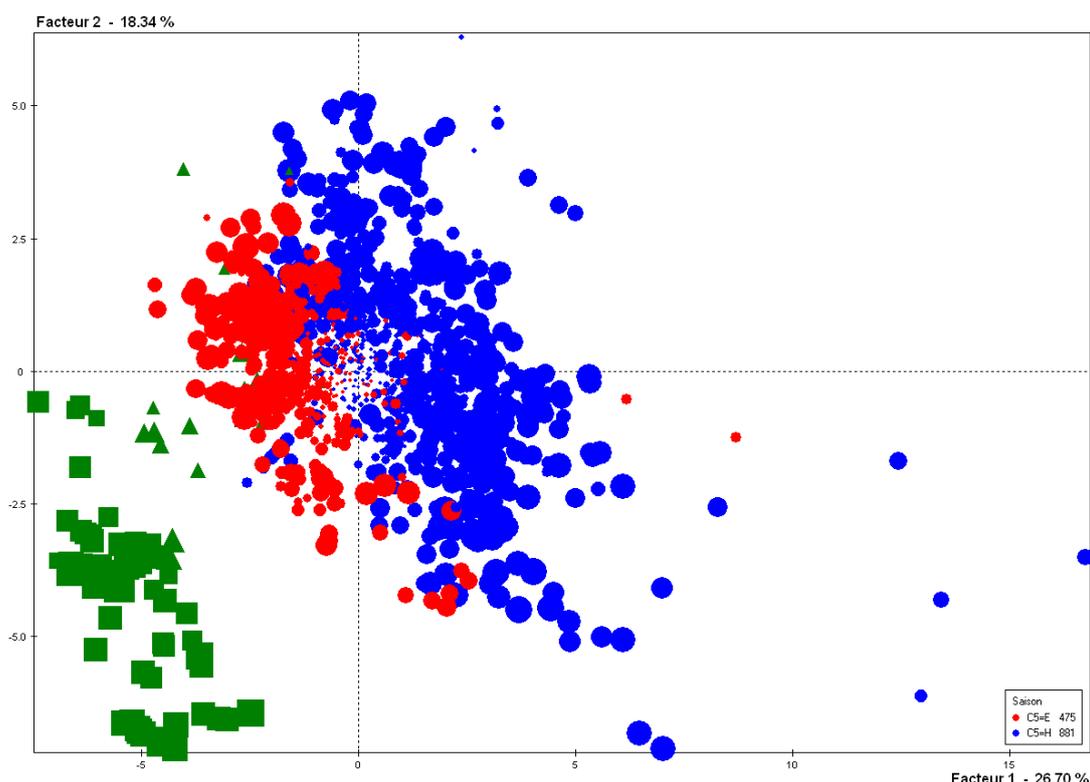


Figure 39 : ACP – données écoles : représentations des salles de classes selon la saison (E pour été et H pour hiver). Les triangles et carrés verts correspondent respectivement aux établissements situés sur l'île de la Réunion et à la Martinique.

Une classification ascendante hiérarchique a été réalisée sur les 10 premiers axes factoriels. Une partition en 5 classes est représentée sur la Figure 40. Les 5 classes ont été caractérisées selon les variables continues et nominales (données détaillées à l'annexe 12.5).

La classe 1 (effectif : 498) est caractérisée par une proportion plus élevée de salles de classes d'écoles élémentaires instrumentées en hiver et présentant des niveaux de CO₂ plutôt élevés. Les concentrations de benzène et de formaldéhyde sont en moyenne faibles.

A l'inverse, la classe 2 (effectif : 470) représente des salles de classes dans lesquelles les mesures ont été réalisées en été et qui présentent en moyenne des niveaux de formaldéhyde plus élevés. Par contre, les niveaux de benzène et de CO₂ sont inférieurs à la moyenne générale.

La classe 3 est composée d'un petit effectif de 6 salles de classe dans lesquelles des concentrations très élevées en benzène ont été observées.

La classe 4 (effectif : 315) se caractérise par une proportion de crèches plus importante majoritairement instrumentées en hiver, dans lesquelles les niveaux de benzène et de CO₂ sont en général plus élevés. Les niveaux de formaldéhyde sont par contre plus faibles que la moyenne générale.

La classe 5 (effectif : 67) regroupe les établissements d'outre-mer caractérisés par des températures et niveaux d'humidité élevés, ainsi que des niveaux de formaldéhyde, de benzène et de CO₂ à l'intérieur plus faibles. La porte de la salle reste le plus souvent ouverte pendant la présence des enfants.

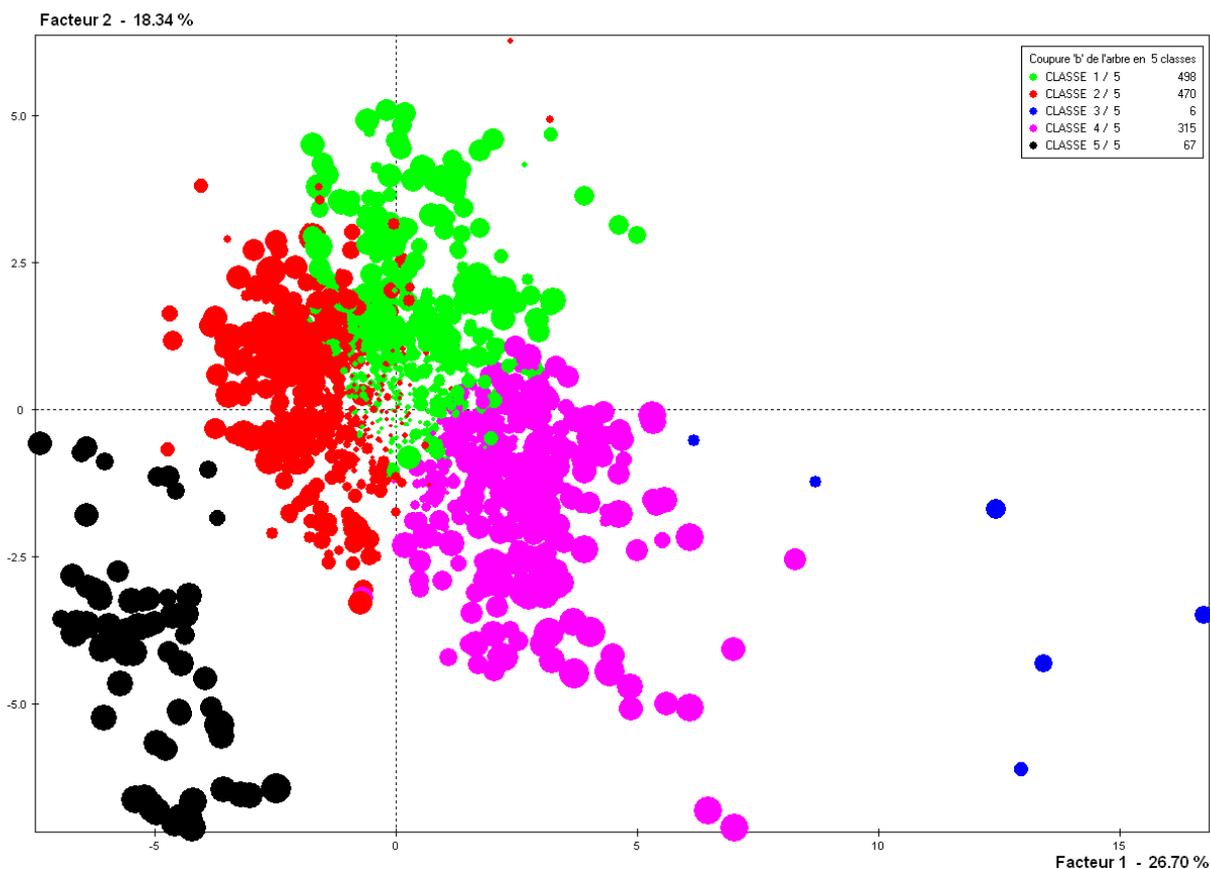


Figure 40 : ACP – données écoles : répartition des salles de classes en 5 catégories.

Le type d'établissement et la saison permettent en grande partie d'expliquer la répartition des niveaux de formaldéhyde et de benzène dans cette analyse multidimensionnelle. Ces variables sont donc à prendre en compte dans la recherche des corrélations des niveaux de polluants avec le CO₂.

4.4 Analyse des corrélations observées

L'analyse des corrélations entre le niveau moyen de CO₂ pendant la présence des enfants et les polluants cibles a été réalisée pour différentes catégories de salles suivant la saison et le type d'établissement.

Le niveau de formaldéhyde est toujours corrélé avec le niveau de CO₂ dans l'ensemble des situations (Tableau 43). Les corrélations en rouge marquent l'effet des modalités sur les corrélations observées.

La corrélation du niveau de benzène avec le niveau de CO₂ n'est observé qu'en hiver ou dans les écoles élémentaires. La corrélation n'est plus significative dans les autres cas.

Tableau 43 : Corrélations entre le niveau moyen de CO₂ pendant l'occupation du logement et les polluants cibles pour différentes catégories d'établissements.

Variables		Moy(CO2) occupation	Moy CO2	Max CO2	P95 CO2	FORM int	BENZ int	BENZ ext
Global	r de Pearson	1	0.873	0.884	0.932	0.283	0.105	-0.107
	p-value	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.002	0.002
Hiver	r de Pearson	1	0.860	0.894	0.935	0.277	-0.104	-0.151
	p-value	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.033	0.002
Eté	r de Pearson	1	0.783	0.829	0.875	0.244	-0.080	-0.062
	p-value	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.106	0.219
Outremer	r de Pearson	1	0.691	0.875	0.977	0.317	-0.052	0.150
	p-value	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.013	0.693	0.260
Crèches	r de Pearson	1	0.804	0.801	0.893	0.270	0.118	-0.128
	p-value	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.088	0.066
Maternelles	r de Pearson	1	0.853	0.882	0.932	0.380	0.042	-0.131
	p-value	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.610	0.119
Elémentaires	r de Pearson	1	0.873	0.862	0.922	0.306	0.114	-0.077
	p-value	0	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.009	0.080

Variables		Diff_benz ppb	Temp int	Temp ext	Hspec int	Hspec ext	N enfants	Volume
Global	r de Pearson	0.209	-0.509	-0.456	-0.389	-0.463	0.178	0.090
	p-value	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.015
Hiver	r de Pearson	-0.003	-0.223	0.062	0.333	0.042	0.373	0.177
	p-value	0.951	< 0.0001	0.208	< 0.0001	0.401	< 0.0001	0.001
Eté	r de Pearson	-0.016	-0.250	-0.214	0.027	-0.044	0.282	0.136
	p-value	0.755	< 0.0001	< 0.0001	0.593	0.386	< 0.0001	0.015
Outremer	r de Pearson	-0.230	0.102	0.207	-0.024	0.106	-0.335	0.054
	p-value	0.082	0.439	0.112	0.853	0.422	0.020	0.714
Crèches	r de Pearson	-0.176	-0.106	-0.292	0.142	-0.200	-0.267	0.270
	p-value	0.009	0.127	< 0.0001	0.038	0.004	< 0.0001	< 0.0001
Maternelles	r de Pearson	-0.553	-0.251	-0.447	0.082	-0.475	-0.531	0.377
	p-value	< 0.0001	0.002	< 0.0001	0.340	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Elémentaires	r de Pearson	-0.592	-0.275	-0.616	0.183	-0.523	-0.628	0.299
	p-value	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

Variables		TRA nocturne
Global	r de Pearson	-0.122
	p-value	0.021
Hiver	r de Pearson	-0.223
	p-value	0.003
Eté	r de Pearson	-0.023
	p-value	0.756
Outremer	r de Pearson	--
	p-value	--
Crèches	r de Pearson	0.112
	p-value	0.107
Maternelles	r de Pearson	0.029
	p-value	0.725
Elémentaires	r de Pearson	0.106
	p-value	0.015

4.5 Dépassement des valeurs cibles selon le niveau de CO₂

Comme dans le cas des données logements, la proportion de salles de classe dépassant ou non la valeur cible (VC) pour un polluant cible donné a été déterminée pour différentes classes de concentrations de CO₂.

La concentration de CO₂ prise en compte dans le calcul est la moyenne des concentrations sur une période d'occupation effective de la salle de classe par les enfants. Cette occupation effective correspond à une présence a minima de 50 % de l'effectif théorique de la classe (ou de la capacité d'accueil pour les crèches). Elle est renseignée a priori par l'enquêteur par tranche de 30 min compte tenu des éléments fournis par l'enseignant et vérifiée à la fin de la semaine avec l'enseignant pour tenir compte des modifications d'emploi du temps. Seules les données d'occupation correspondantes à la deuxième phase de la campagne (2010 – 2011) ont été vérifiées et donc incluses dans ce calcul.

La concentration de CO₂ calculée en période effective d'occupation est certes corrélée avec le niveau moyen de CO₂ déterminée sur la globalité des 4,5 jours, mais elle est systématiquement plus élevée que cette dernière (+400 ppm en moyenne, variable selon le niveau). L'écart est ici plus important que dans le cas des logements.

Les concentrations de formaldéhyde ou de benzène quant à elles intègrent à la fois des périodes d'occupation et d'inoccupation des salles de classe.

Les résultats des croisements sont présentés au Tableau 44, aux Figure 41 et Figure 42. Plus le niveau de CO₂ durant l'occupation est élevé, plus la proportion de salles de classes qui dépasse la VC augmente. Cette augmentation est plus prononcée pour le formaldéhyde que pour le benzène. Le nombre de cas qui dépasse la VC de 10 µg/m³ en benzène est trop faible pour permettre de voir une quelconque relation avec les classes de concentration de CO₂.

Tableau 44 : Proportions de salles de classe (mesures été et hiver) qui dépassent ou non la VC du formaldéhyde ou du benzène.

Moyenne CO ₂ (occupation)	Effectif N	Effectif N_Form	Effectif N_Benz	FORM		BENZ		BENZ	
				<=10	>10	<=2	>2	<=10	>10
≤ 750	185	185	183	56%	44%	56%	44%	99.5%	0.5%
>750-≤1000	215	214	214	22%	78%	41%	59%	100%	0%
>1000-≤1500	316	316	310	13%	87%	41%	59%	99.7%	0.3%
>1500-≤2000	146	146	145	7%	93%	34%	66%	100%	0%
>2000	37	37	36	3%	97%	28%	72%	100%	0%

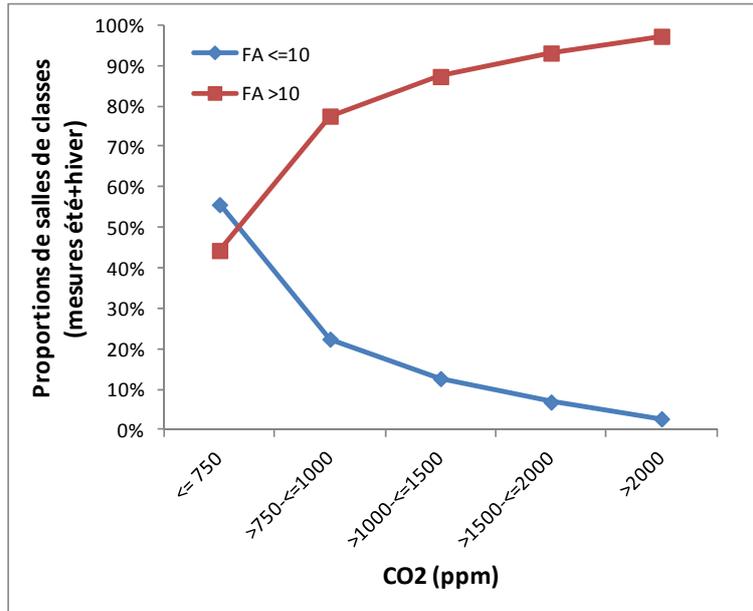


Figure 41 : Proportions de salles de classes dépassant ou non en été ou en hiver la VC du formaldéhyde selon le niveau de CO₂.

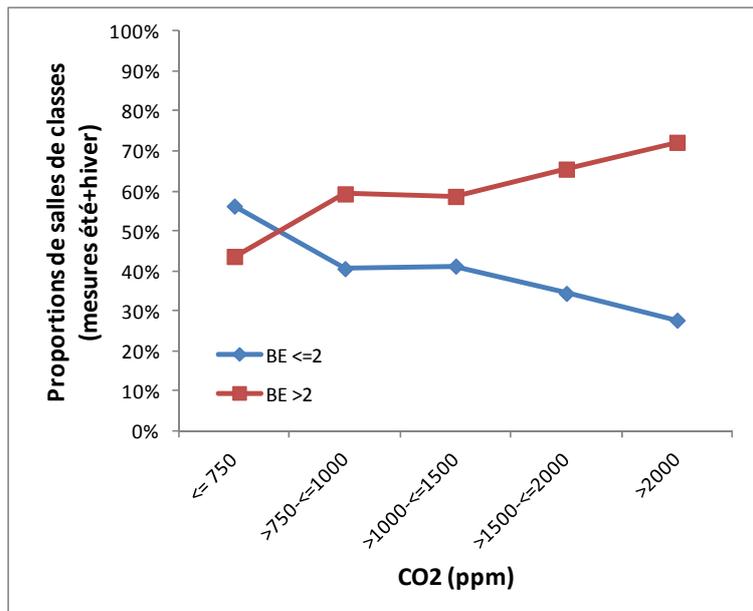


Figure 42 : Proportions de salles de classes dépassant ou non en été ou en hiver la VC du benzène selon le niveau de CO₂.

4.6 Sensibilité et spécificité des dépassements de VC selon le niveau de CO₂

La sensibilité et la spécificité des occurrences de dépassement des VC (cas avérés) ont été déterminées pour différents seuils de concentration de CO₂ (variable test). Les seuils retenus sont 750, 1000, 1500 et 2000 ppm de CO₂. La méthode et les paramètres pris en compte sont définis au paragraphe 3.6. Les résultats sont présentés ci-après.

La prévalence de dépassement de la VC pour le formaldéhyde est de 77,5 %. Le pourcentage de bien classés est de 80 % au seuil de 750 ppm de CO₂, qui correspond à une sensibilité de 88 %. Pour ce seuil, la VPP et la VPN sont toutes deux supérieures à 50 %, ce qui indique une bonne prédiction des situations de dépassement et de respect de la VC en se basant sur le niveau de CO₂. Le seuil optimal de CO₂ correspond à 892 ppm.

Pour le benzène, la prévalence de dépassement de la VC est plus faible : 57 % de situations supérieures à 2 µg/m³ et 0,2 % supérieures à 10 µg/m³. Dans le premier cas, les meilleures performances sont observées pour un seuil de 680 ppm de CO₂ avec une VPP et une VPN autour de 60 %. Néanmoins, le rapport de vraisemblance positif (LR+) reste voisin de 1, indiquant que le gain dans la prédiction des dépassements apporté par l'utilisation du niveau de CO₂ reste minime. Pour une VC de 10 µg/m³, le nombre de situations de dépassement est trop restreint pour pouvoir se prononcer.

Tableau 45 : VPP/VPN des dépassements des VC selon le seuil de CO₂ (données écoles). Seuil en italique : seuil optimal correspondant au maximum de (sensibilité + spécificité).

FORM > 10	CO ₂ _moyen_occupation (ppm)				> 892
	>750	>1000	>1500	>2000	
VP	614	449	172	36	534
VN	103	150	191	201	137
FP	99	52	11	1	65
FN	82	247	524	660	162
Bien classés	0.798 (0.772-0.825)	0.667 (0.636-0.698)	0.404 (0.372-0.436)	0.264 (0.235-0.293)	0.747 (0.719-0.776)
Sensibilité	0.882 (0.856-0.904)	0.645 (0.609-0.68)	0.247 (0.217-0.281)	0.052 (0.038-0.071)	0.767 (0.734-0.797)
Spécificité	0.51 (0.441-0.578)	0.743 (0.678-0.798)	0.946 (0.904-0.97)	0.995 (0.969-1)	0.678 (0.611-0.739)
VPP	0.861 (0.836-0.887)	0.896 (0.87-0.923)	0.94 (0.905-0.974)	0.973 (0.921-1)	0.891 (0.867-0.916)
VPN	0.557 (0.485-0.628)	0.378 (0.33-0.426)	0.267 (0.235-0.3)	0.233 (0.205-0.262)	0.458 (0.402-0.515)
LR+	1.8 (1.56-2.077)	2.506 (1.97-3.188)	4.538 (2.518-8.179)	10.448 (1.441-75.736)	2.384 (1.944-2.925)
LR-	0.231 (0.181-0.295)	0.478 (0.42-0.544)	0.796 (0.754-0.84)	0.953 (0.934-0.972)	0.343 (0.291-0.405)
Risque relatif	1.943 (1.65-2.288)	1.44 (1.327-1.564)	1.282 (1.211-1.358)	1.269 (1.19-1.354)	1.645 (1.477-1.832)
Odds ratio	7.79 (5.443-11.15)	5.244 (3.694-7.444)	5.7 (3.068-10.589)	10.964 (2.126-56.545)	6.948 (4.932-9.787)
Prévalence	0.775 (0.748-0.802)				

CO ₂ _moyen_occupation (ppm)					
BENZ > 2	>750	>1000	>1500	>2000	> 680
VP	430	303	121	26	461
VN	103	188	318	368	88
FP	275	190	60	10	290
FN	80	207	389	484	49
Bien classés	0.6 (0.568-0.632)	0.553 (0.52-0.586)	0.494 (0.461-0.527)	0.444 (0.411-0.476)	0.618 (0.586-0.65)
Sensibilité	0.843 (0.809-0.872)	0.594 (0.551-0.636)	0.237 (0.202-0.276)	0.051 (0.035-0.074)	0.904 (0.875-0.927)
Spécificité	0.272 (0.23-0.32)	0.497 (0.447-0.548)	0.841 (0.801-0.875)	0.974 (0.951-0.986)	0.233 (0.193-0.278)
VPP	0.61 (0.574-0.646)	0.615 (0.572-0.658)	0.669 (0.6-0.737)	0.722 (0.576-0.869)	0.614 (0.579-0.649)
VPN	0.563 (0.491-0.635)	0.476 (0.427-0.525)	0.45 (0.413-0.486)	0.432 (0.399-0.465)	0.642 (0.562-0.723)
LR+	1.159 (1.078-1.246)	1.182 (1.045-1.337)	1.495 (1.13-1.977)	1.927 (0.941-3.947)	1.178 (1.107-1.254)
LR-	0.576 (0.444-0.747)	0.816 (0.705-0.944)	0.907 (0.849-0.968)	0.975 (0.95-1.001)	0.413 (0.299-0.57)
Risque relatif	1.395 (1.172-1.66)	1.173 (1.043-1.318)	1.215 (1.075-1.373)	1.271 (1.033-1.565)	1.716 (1.364-2.16)
Odds ratio	2.013 (1.45-2.795)	1.448 (1.108-1.893)	1.649 (1.171-2.321)	1.977 (0.955-4.092)	2.855 (1.957-4.165)
Prévalence	0.574 (0.542-0.607)				

CO ₂ _moyen_occupation (ppm)					
BENZ > 10	>750	>1000	>1500	>2000	> 699
VP	1	1	0	0	2
VN	182	394	705	850	152
FP	704	492	181	36	734
FN	1	1	2	2	0
Bien classés	0.206 (0.179-0.233)	0.445 (0.412-0.478)	0.794 (0.767-0.821)	0.957 (0.944-0.971)	0.173 (0.149-0.198)
Sensibilité	0.5 (0.1-0.9)	0.5 (0.1-0.9)	0 (0-0.711)	0 (0-0.711)	1 (0.289-1)
Spécificité	0.205 (0.18-0.233)	0.445 (0.412-0.478)	0.796 (0.768-0.821)	0.959 (0.944-0.971)	0.172 (0.148-0.198)
VPP	0.001 (0-0.004)	0.002 (0-0.006)	0 (0-0)	0 (0-0)	0.003 (0-0.006)
VPN	0.995 (0.984-1)	0.997 (0.993-1)	0.997 (0.993-1)	0.998 (0.994-1)	1 (1-1)
LR+	0.629 (0.157-2.517)	0.9 (0.225-3.605)	0	0	1.207 (1.171-1.244)
LR-	2.434 (0.605-9.791)	1.124 (0.281-4.504)	1.257 (1.215-1.299)	1.042 (1.028-1.057)	0 (0-0)
Risque relatif	0.26 (0.027-2.481)	0.801 (0.084-7.673)			
Odds ratio	0.259 (0.027-2.5)	0.801 (0.083-7.729)			
Prévalence	0.002 (0-0.005)				

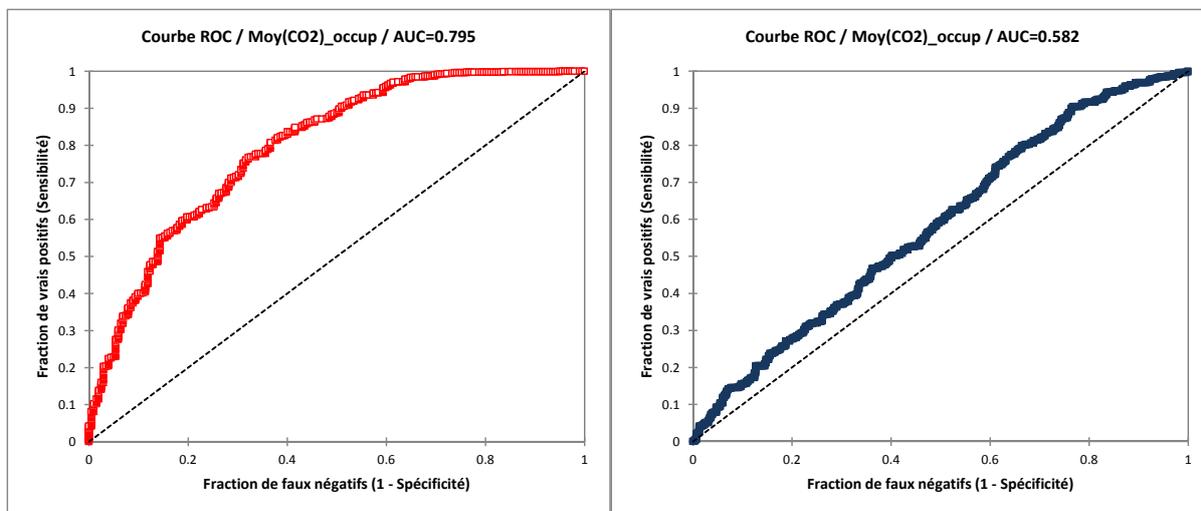


Figure 43 : Courbes ROC associées au niveau de CO₂ moyen durant l'occupation et au dépassement de la VC de formaldéhyde (gauche) et de benzène (droite, VC = 2 µg/m³).

Le tableau suivant présentant l'aire sous la courbe ROC permet d'identifier les meilleures performances en terme de discrimination des situations de dépassement de VC à partir du niveau de CO₂.

Tableau 46 : Valeurs AUC associées aux dépassements de VC selon le niveau de CO₂.

	AUC	Ecart-type	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
FORMALDEHYDE > 10	0.795	0.019	0.759	0.832
BENZENE > 2	0.582	0.019	0.544	0.620
BENZENE > 10	0.399	0.227	0.000	0.844

En gras, valeurs significativement différentes de 0,5 au seuil de 5 %

5 Ecoles : campagne pilote de l'OQAI 2010

Dans le but de préparer une campagne nationale de mesure sur un échantillon représentatif du parc français des écoles maternelles et élémentaires visant à acquérir une connaissance plus complète des niveaux d'exposition des enfants aux différents polluants de l'air, l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) a réalisé entre janvier et juin 2010 une étude pilote pour tester un protocole harmonisé dans 51 salles de classe (17 écoles maternelles et élémentaires) et développer une application informatique permettant l'intégration dans une base de données et la validation en temps réel des données collectées (flux de données). L'ensemble des écoles était situé dans la région de Clermont-Ferrand.

A côté du confinement de l'air et des paramètres d'ambiance (température et humidité relative), des polluants chimiques (aldéhydes, COVs) et particulaires ont été mesurés dans l'air des salles de classe du lundi matin au vendredi après-midi. Parallèlement, des métaux et des allergènes ont été évalués dans des prélèvements de poussières déposées.

5.1 Présentation des données disponibles

Le détail des paramètres de la campagne pris en compte pour l'étude est présenté ci-après. La durée des mesures couvrait 4,5 jours du lundi matin au vendredi soir. Pour la mesure des particules, une programmation du prélèvement a été mise en place pour prendre en compte la présence des enfants dans la salle de classe et se rapprocher d'une mesure d'exposition. La programmation a été élaborée a priori en sélectionnant les périodes comprises entre 08h00 et 17h00 du lundi au vendredi en excluant la journée du mercredi.

Tableau 47 : Caractéristiques de la mesure des polluants lors de la campagne écoles (OQAI).

Paramètre	Unités	Méthode	LD	LQ	Durée
CO ₂	ppm	Mesure en continu (Sonde Q-Track) Pas de temps : 10 min	1	50	4,5 jours
Formaldéhyde	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant DNPH (Radiello®) Analyse par HPLC/UV	0,6	1,1	4,5 jours
Acétaldéhyde	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant DNPH (Radiello®) Analyse par HPLC/UV	0,3	0,4	4,5 jours
Benzène	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant Carbograph4 (Radiello®) Analyse par TD/GC/MS	0,4	1,1	4,5 jours
PM _{2,5}	µg/m ³	Prélèvement actif (programmation) Collecte sur membrane Teflon Pesées avant / après prélèvement	2,6	8,9	8h-17h (L-V) Sauf Mercredi

Les autres variables prises en compte sont :

- Le nombre de minutes avec les fenêtres fermées sur les 4,5 jours en période d'occupation
- Le nombre de minutes avec au moins une fenêtre ouverte sur les 4,5 jours en période d'occupation
- Le nombre moyen d'enfants sur les 4,5 jours en période d'occupation
- La durée cumulée de présence des enfants dans la salle de classe sur les 4,5 jours en minutes.
- Le volume de la salle de classe en m³.

Les statistiques descriptives des données sont présentées en annexe au Tableau 66.

5.2 Corrélations entre le CO₂ et les polluants cibles

Les corrélations (r de Pearson) entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants mesurés sont présentés au Tableau 59. Les p -values associées sont présentées au Tableau 60.

Les différents critères utilisés pour exprimer le niveau de CO₂ sont fortement corrélés entre eux. Un seul critère peut suffire. Le niveau moyen hebdomadaire est conservé par défaut. Le niveau moyen de CO₂ déterminé sur la période de programmation n'est lui utilisé que pour se comparer aux niveaux de particules.

Aucune corrélation significative n'est observée entre le niveau de CO₂ et la température aussi bien intérieure qu'extérieure. Les niveaux de CO₂ ne semblent donc pas être influencés par un effet saison. Toutefois, la campagne de mesure n'a couvert que 6 mois de l'année entre janvier et juin et est surtout limitée à une seule zone géographique. De ce fait, l'impact de la saison ne peut être que modéré. Par contre, cela peut également indiquer que le comportement associé à l'aération et à la fréquence d'occupation, n'a pas varié tout au long de la campagne.

L'humidité spécifique intérieure est corrélée significativement avec le niveau de CO₂. Il est probable dans le cas d'une salle de classe, que ces deux substances partagent la même source, à savoir la densité d'occupation. Le niveau maximum de CO₂ est lui également corrélé avec l'humidité spécifique extérieure.

Le niveau de CO₂ est directement corrélé avec le nombre moyen d'enfants par salle de classe. Par contre, seul le niveau maximum de CO₂ est corrélé avec la durée d'occupation. L'impact de la durée d'ouverture ou de fermeture des fenêtres est uniquement visible lorsque le niveau de CO₂ moyen est calculé entre 08h00 et 17h00.

La concentration de formaldéhyde, d'acétaldéhyde ou de la fraction massique PM_{2,5} est significativement corrélée avec le niveau de CO₂ et ce quelle que soit la forme de la variable utilisée (concentration en µg/m³, en ppb, en logarithme). Par contre, aucune corrélation n'est observée entre le niveau de benzène (intérieur, extérieur ou différence) et celui de CO₂. Cela est confirmé en regardant la corrélation des rangs (Spearman).

Tableau 59 : Corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants. Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de significativité alpha=0.05.

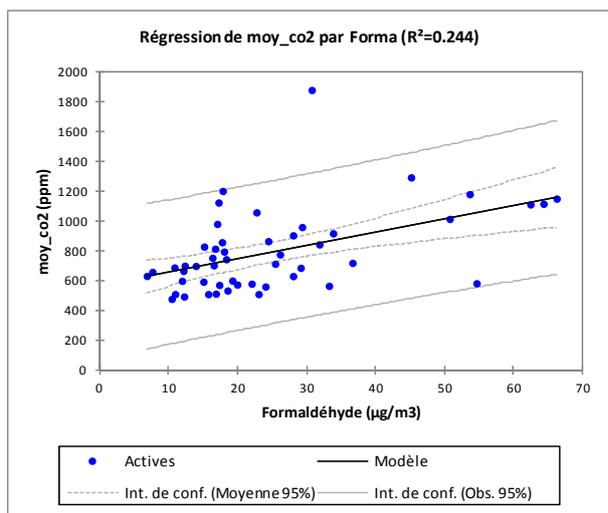
Variables	Type d'association	CO2_moyen	CO2_max	CO2_P95	CO2_moyen_08h17h
CO2_moyen	+	1			
CO2_max	+	0.638			
CO2_P95	+	0.824	0.896		
CO2_moyen_08h17h	+	0.861	0.818	0.960	
Log_moy_CO2	+	0.979	0.715	0.891	0.918
Log_max_CO2	+	0.650	0.982	0.896	0.818
Log_P95_CO2	+	0.802	0.883	0.986	0.940
Log_moy_CO2_PM	+	0.845	0.820	0.965	0.988
Formaldéhyde	+	0.494	0.469	0.452	0.530
Acétaldéhyde	+	0.468	0.439	0.400	0.460
Benzène		0.130	0.033	0.128	0.097
Benzène_ext		0.140	0.048	0.142	0.104
PM _{2,5}	+	0.319	0.362	0.476	0.509
Formaldéhyde_ppb	+	0.447	0.430	0.404	0.480
Benzène_ppb		-0.055	-0.044	0.014	-0.061
Acétaldéhyde_ppb	+	0.393	0.386	0.320	0.368
Benzène_ext_ppb		0.142	0.052	0.145	0.106
diff_benzène		-0.032	-0.113	-0.046	-0.095
Log_Formaldéhyde_ppb	+	0.462	0.465	0.431	0.470
Log_Benzène_ppb		-0.088	-0.083	-0.023	-0.107
Log_Acétaldéhyde_ppb	+	0.424	0.428	0.363	0.397
Log_Benzène_ext_ppb		0.146	0.142	0.198	0.159
Log_diff_benzène		0.060	-0.042	-0.048	-0.111
Température (°C)		0.138	-0.039	-0.043	-0.017
Température_ext		-0.021	0.177	0.066	0.045
Humidite_spécifique (g/kg)	+	0.305	0.434	0.310	0.323
Humidite_spécifique_ext	+	0.112	0.309	0.186	0.167
Nb moyen d'enfants	+	0.293	0.369	0.358	0.345
Durée d'occupation (min)	+	-0.005	0.303	0.251	0.247
Fenêtres fermées (min)	+	0.164	0.270	0.300	0.307
Fenêtres ouvertes (min)	-	-0.260	-0.132	-0.252	-0.305

Tableau 60 : p-values associées aux corrélations de Pearson observées entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants.

Variables	Type d'association	CO2_moyen	CO2_max	CO2_P95	CO2_moyen_08h17h
CO2_moyen	+				
CO2_max	+	< 0.0001			
CO2_P95	+	< 0.0001	< 0.0001		
CO2_moyen_08h17h	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	
Log_moy_CO2	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Log_max_CO2	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Log_P95_CO2	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Log_moy_CO2_PM	+	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Formaldéhyde	+	0.0003	0.001	0.001	< 0.0001
Acétaldéhyde	+	0.001	0.001	0.004	0.001
Benzène		0.422	0.838	0.431	0.550
Benzène_ext		0.381	0.764	0.377	0.517
PM2.5	+	0.035	0.016	0.001	0.000
Formaldéhyde_ppb	+	0.002	0.003	0.006	0.001
Benzène_ppb		0.752	0.801	0.934	0.726
Acétaldéhyde_ppb	+	0.008	0.009	0.032	0.013
Benzène_ext_ppb		0.377	0.746	0.367	0.511
diff_benzène		0.859	0.523	0.797	0.592
Log_Formaldéhyde_ppb	+	0.001	0.001	0.003	0.001
Log_Benzène_ppb		0.617	0.637	0.894	0.540
Log_Acétaldéhyde_ppb	+	0.004	0.003	0.014	0.007
Log_Benzène_ext_ppb		0.363	0.375	0.214	0.321
Log_diff_benzène		0.776	0.844	0.818	0.599
Température (°C)		0.366	0.801	0.781	0.913
Température_ext		0.885	0.218	0.649	0.756
Humidite_spécifique (g/kg)	+	0.042	0.003	0.038	0.030
Humidite_spécifique_ext	+	0.438	0.029	0.196	0.246
Nb moyen d'enfants	+	0.043	0.010	0.013	0.016
Durée d'occupation (min)	+	0.974	0.036	0.086	0.090
Fenêtres fermées (min)	+	0.282	0.073	0.045	0.040
Fenêtres ouvertes (min)	-	0.089	0.393	0.099	0.044

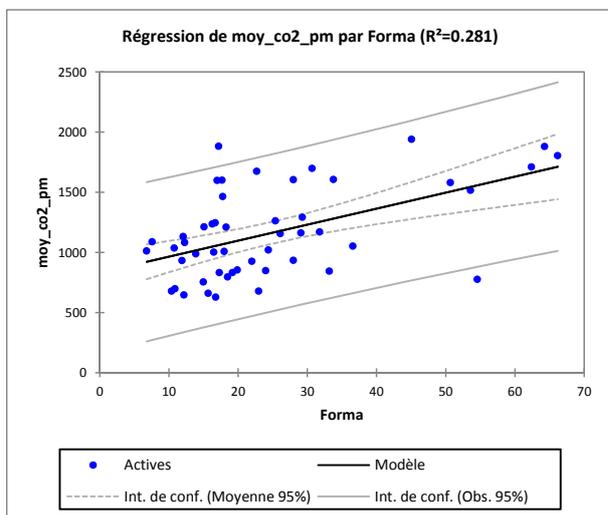
5.2.1 Corrélation CO₂ / Formaldéhyde dans les écoles (OQAI)

Le niveau moyen de CO₂ et la concentration de formaldéhyde dans la salle de classe exprimée en µg/m³ sont corrélés de façon significative ($r = 0,494$). Le nuage de points associé est représenté à la Figure 44. L'intensité de cette relation est modérée ($r^2 = 24\%$). Une corrélation plus significative ($r = 0,530$) est observée lorsque le niveau moyen de CO₂ est calculé sur les périodes d'occupation des salles (Figure 45).



Observations	50
R ²	0.244
R ² ajusté	0.228
MCE	55771
Constante	566 (434 - 698)
Pente	8.9 (4.4 - 13.4)

Figure 44 : Association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure de formaldéhyde exprimée en µg/m³.

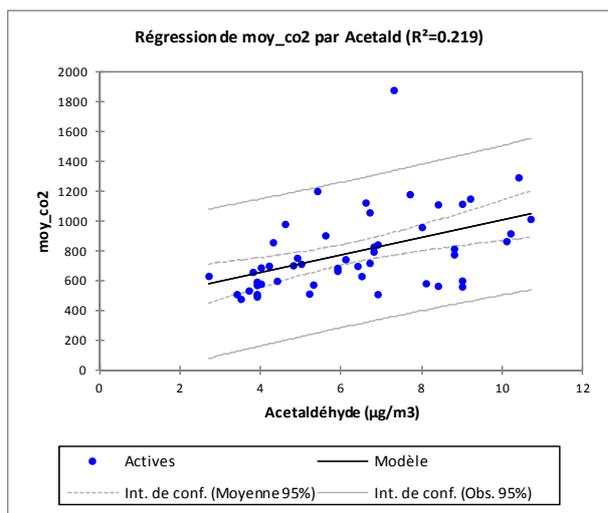


Observations	50
R ²	0.281
R ² ajusté	0.266
MCE	103347
Constante	832 (652 - 1011)
Pente	13 (7.1 - 20)

Figure 45 : Association entre le niveau moyen de CO₂ durant l'occupation des salles et la concentration intérieure de formaldéhyde exprimée en µg/m³.

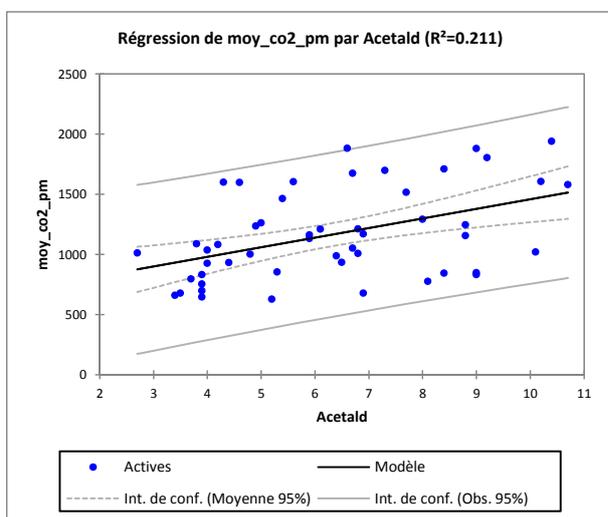
5.2.2 Corrélation CO₂ / Acétaldéhyde dans les écoles (OQAI)

L'association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure d'acétaldéhyde exprimée en µg/m³ a donné le r de Pearson le plus élevé (0,468). Le nuage de points associé est représenté à la Figure 46. L'intensité de cette relation est modérée (r² = 22 %). Lorsque le niveau moyen de CO₂ est calculé sur les périodes d'occupation, la corrélation observée est légèrement plus faible (r = 0,460 ; Figure 47).



Observations	50
R ²	0.219
R ² ajusté	0.203
MCE	57624
Constante	420 (208 - 633)
Pente	58 (26 - 90)

Figure 46 : Association entre le niveau moyen de CO₂ et la concentration intérieure d'acétaldéhyde exprimée en µg/m³.

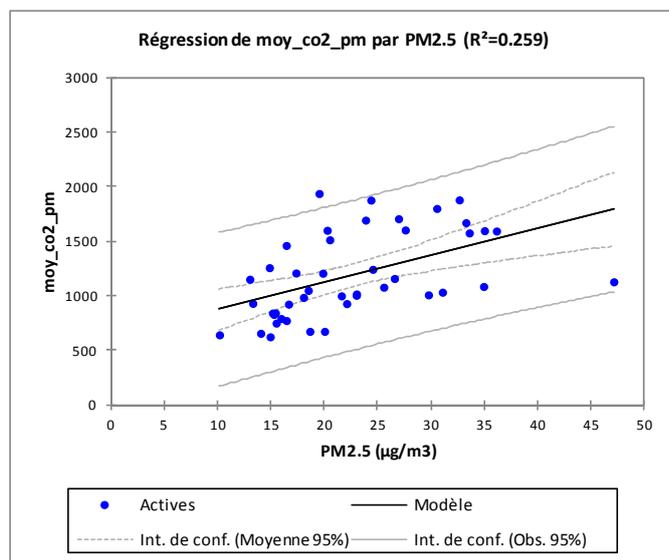


Observations	50
R ²	0.211
R ² ajusté	0.195
MCE	113288
Constante	659 (351 - 958)
Pente	80 (35 - 125)

Figure 47 : Association entre le niveau moyen de CO₂ durant l'occupation et la concentration intérieure d'acétaldéhyde exprimée en µg/m³.

5.2.3 Corrélation CO₂ / PM_{2.5} dans les écoles (OQAI)

L'association entre le niveau moyen de CO₂ sur la durée de programmation et la concentration intérieure de la fraction massique PM_{2.5} a donné le r de Pearson le plus élevé (0.509). Le nuage de points associé est représenté à la Figure 48. L'intensité de la relation reste modérée (26 %).



Observations	44
R ²	0.259
R ² ajusté	0.241
MCE	113463
Constante	625 (312 - 937)
Pente	25 (12 - 38)

Figure 48 : Association entre le niveau moyen de CO₂ calculé sur la période de programmation et la concentration intérieure en fraction massique PM_{2.5} en µg/m³.

5.3 Relations entre les variables

Une analyse par composantes principales normée (ACP) a été réalisée pour tenter de comprendre la structure des relations entre les variables. Elle a porté sur 18 variables (polluants, nombre d'enfants par salle, durée d'occupation, durée cumulée de fenêtres ouvertes ou fermées, température et humidité). Les quatre variables relatives au CO₂ ont été introduites en tant que variables supplémentaires.

Les résultats sont présentés au Tableau 61. Le plan principal représente 56 % de la variance totale. Le premier facteur (37 %) oppose les niveaux en formaldéhyde et en acétaldéhyde, corrélés à la température et à l'humidité spécifique aux niveaux de benzène à l'intérieur et à l'extérieur. Il marque l'influence de la saison. En effet, 30 salles de classe (10 écoles) ont été instrumentées entre janvier et mars et 21 autres (7 écoles) entre mai et juin. Le second facteur (19 %) est caractérisé par des niveaux élevés de formaldéhyde, acétaldéhyde ou benzène, notamment la concentration extérieure en benzène. Il pourrait être lié au caractère urbain de certains établissements, mais cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée. Ce facteur est associé en partie à des niveaux de CO₂ plutôt élevés. Le troisième facteur (12 %) résulte des contributions de la fraction PM_{2.5}, de la durée d'occupation des salles et de la durée cumulée durant lesquelles les fenêtres restent fermées, par opposition à la durée d'ouverture des fenêtres. Il représente l'occupation des salles et est également associé à des niveaux de CO₂ élevés. Le quatrième facteur (8 %) est marqué par des niveaux d'acétaldéhyde qui s'opposent à la température et à l'humidité extérieures. Il caractérise donc des niveaux d'acétaldéhyde plutôt élevés en période froide. Enfin, le cinquième facteur (7 %) représente les situations d'occupation des salles durant lesquelles au moins une fenêtre était maintenue ouverte. Ces situations correspondent plutôt aux salles accueillant peu d'élèves.

Tableau 61 : ACP sur les données écoles (OQAI). Valeurs propres et coordonnées des variables.

Facteurs	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	6.59	3.50	2.23	1.40	1.18
Variabilité (%)	36.61	19.46	12.40	7.780	6.56
% cumulé	36.61	56.08	68.47	76.254	82.81
Formaldéhyde	0.692	0.617	0.042	-0.069	-0.155
Formaldéhyde_ppb	0.718	0.562	0.073	-0.087	-0.036
Acétaldéhyde	0.596	0.558	-0.027	0.469	-0.134
Acétaldéhyde_ppb	0.644	0.452	-0.004	0.508	0.076
Benzène	-0.720	0.663	-0.072	-0.131	-0.010
Benzène_ppb	-0.746	0.608	-0.036	-0.174	0.139
Benzène_ext	-0.644	0.691	-0.105	-0.175	0.133
Benzène_ext_ppb	-0.638	0.694	-0.105	-0.183	0.133
diff_benzène	-0.665	0.327	-0.064	0.343	-0.073
PM _{2,5}	-0.106	0.047	0.825	0.161	-0.190
Température_int	0.615	0.000	-0.293	0.218	0.223
Température_ext	0.810	0.031	-0.095	-0.423	0.036
Humidite_spécifique	0.849	0.386	0.017	-0.235	0.125
Humidite_spécifique_ext	0.820	0.225	0.016	-0.429	0.011
N_enfants / salle	0.098	0.389	-0.235	0.191	-0.588
Durée d'occupation (min)	0.027	0.221	0.536	0.295	0.446
Durée cumulée (fenêtres ouvertes)	0.163	-0.037	-0.570	0.238	0.599
Durée cumulée (fenêtres fermées)	0.116	0.106	0.865	-0.096	0.255
CO ₂ moyen (4,5 J)	0.161	0.226	0.245	0.045	-0.012
CO ₂ max	0.185	0.309	0.374	-0.023	0.014
CO ₂ P95	0.137	0.312	0.366	-0.007	-0.003
CO ₂ moyen_08h-17h	0.184	0.289	0.379	0.014	-0.014

Le nombre d'individus étant relativement faible, il n'a pas été jugé utile de poursuivre cette exploitation par une classification et une recherche des partitions.

5.4 Dépassement des valeurs cible selon le niveau de CO₂

Comme dans le cas des campagnes de mesures précédentes, la proportion de salles de classe dépassant ou non la valeur guide d'air intérieur (VC) pour un polluant cible donné a été déterminée pour différentes classes de concentrations de CO₂.

La concentration de CO₂ prise en compte dans le calcul est la moyenne des concentrations sur une période d'occupation théorique de la salle de classe entre 08h00 et 17h00 du lundi au vendredi en excluant le mercredi. L'écart moyen de cette variable avec le niveau moyen de CO₂ calculé sur les 4,5 jours complets se situe autour de 400 ppm, du même ordre que l'écart observé dans la campagne pilote de surveillance de la QAI dans les écoles.

Les résultats des croisements sont présentés au Tableau 62. Les niveaux de formaldéhyde et de PM_{2,5} dépassent pratiquement toujours leur VC respective et ce quel que soit le niveau de CO₂. La prévalence de dépassement de la VC par le formaldéhyde est supérieure à celle observée dans la campagne pilote de surveillance (qui couvrait également les crèches). Mais, le nombre d'observations est ici beaucoup plus faible et ne couvre que l'agglomération de Clermont-Ferrand. La campagne pilote de surveillance a également mesuré le formaldéhyde dans 7 écoles de la région Auvergne entre 2009 et 2010. Dans 82 % des salles de classe, la concentration de formaldéhyde dépassait 10 µg/m³. Compte tenu du faible nombre de cas, cette prévalence est similaire à celle observée ici (96 %).

En ce qui concerne le benzène, aucune mesure ne dépasse la VC de 10 µg/m³, mais quel que soit le niveau de CO₂, il y a toujours au moins un cas qui dépasse 2 µg/m³. Dans 4 cas, les mesures d'acétaldéhyde dépassent 9,8 µg/m³. Ils correspondent systématiquement à des niveaux de CO₂ supérieurs à 1000 ou plus fréquemment à 1500 ppm.

Tableau 62 : Proportion de salles de classe qui dépassent la valeur cible d'un polluant donné selon la concentration en CO₂.

CO ₂ _08h-17h	Variable	Ntotal	N<=VC	N>VC	%<=VC	%>VC
<=750	CO ₂ _08h-17h	6				
750-1000	CO ₂ _08h-17h	12				
1000-1500	CO ₂ _08h-17h	19				
1500-2000*	CO ₂ _08h-17h	13				
<=750	Formaldéhyde = 10	6	0	6	0%	100%
750-1000	Formaldéhyde = 10	12	0	12	0%	100%
1000-1500	Formaldéhyde = 10	19	2	17	11%	89%
1500-2000	Formaldéhyde = 10	13	0	13	0%	100%
<=750	Acétaldéhyde = 9.8	6	6	0	100%	0%
750-1000	Acétaldéhyde = 9.8	12	12	0	100%	0%
1000-1500	Acétaldéhyde = 9.8	19	18	1	95%	5%
1500-2000	Acétaldéhyde = 9.8	13	10	3	77%	23%
<=750	Benzène = 2	5	4	1	80%	20%
750-1000	Benzène = 2	9	8	1	89%	11%
1000-1500	Benzène = 2	15	11	4	73%	27%
1500-2000	Benzène = 2	11	9	2	82%	18%
<=750	Benzène = 10	5	5	0	100%	0%
750-1000	Benzène = 10	9	9	0	100%	0%
1000-1500	Benzène = 10	15	15	0	100%	0%
1500-2000	Benzène = 10	11	11	0	100%	0%

CO ₂ _08h-17h	Variable	Ntotal	N<=VC	N>VC	%<=VC	%>VC
<=750	PM _{2,5} = 10	5	0	5	0%	100%
750-1000	PM _{2,5} = 10	10	0	10	0%	100%
1000-1500	PM _{2,5} = 10	16	0	16	0%	100%
1500-2000	PM _{2,5} = 10	13	0	13	0%	100%

*Pas de données CO₂ > 2000 ppm

5.5 Sensibilité et spécificité des dépassements de VC selon le niveau de CO₂

La sensibilité et la spécificité des occurrences de dépassement des VC (cas avérés) ont été déterminés pour différents seuils de concentration de CO₂ (variable test). Les seuils retenus sont 750, 1000 et 1500 ppm de CO₂. La méthode et les paramètres pris en compte sont définis au paragraphe 3.6. Les résultats sont présentés ci-après. Les valeurs de PM_{2,5} sont toujours supérieures à la VC et ce quel que soit le niveau de CO₂. Par conséquent, ils n'ont pas été pris en compte.

Le nombre de situations à comparer est beaucoup plus restreint par rapport aux campagnes de données précédentes. La répartition de quelques individus supplémentaires entre les classes peut modifier sensiblement les valeurs présentées ici. Ces résultats ne peuvent être considérés qu'à titre indicatif.

La prévalence des situations de dépassement de la VC du formaldéhyde est supérieure à celle observée dans la campagne école de surveillance de la QAI. La VPP reste très élevée. Mais, le très faible nombre de valeurs inférieures à la VC ne permet pas de se prononcer sur la VPN, et a fortiori sur l'utilisation in fine du niveau de CO₂ comme variable de discrimination.

Pour l'acétaldéhyde, la prévalence de dépassement est très faible entre 8 et 10 % suivant la valeur cible prise en compte. La VPP est très faible, par contre la VPN très élevée. Ainsi, lorsque le niveau de CO₂ est inférieur au seuil, la probabilité que la concentration en acétaldéhyde ne dépasse pas la valeur cible est supérieure à 95 %. Le rapport LR+ est supérieur à 3, ce qui indique que le test apporte un gain non négligeable. Le seuil optimal de CO₂ est de 1516 ppm.

Aucune valeur de benzène n'était supérieure à 10 µg/m³. Cette VC n'a donc pas pu être testée. Pour une VC de 2 µg/m³, la prévalence de dépassement est de 20 %. La VPP est faible, mais la VPN élevée. Néanmoins, le pourcentage de mal classés est plus important que dans le cas de l'acétaldéhyde. Enfin, le rapport de vraisemblance positif reste proche de 1, par conséquent le test basé sur le niveau de CO₂ n'apporte pas grand-chose.

Tableau 63 : VPP/VPN des dépassements des VC selon le seuil de CO₂ (données écoles (OQAI)). Seuil en italique : seuil optimal correspondant au maximum de (sensibilité + spécificité).

CO ₂ _moyen_occupation (ppm)				
FORM > 10	>750	>1000	>1500	> 1088
VP	42	30	13	24
VN	0	0	2	2
FP	2	2	0	0
FN	6	18	35	24
Bien classés	0.84 (0.738-0.942)	0.6 (0.464-0.736)	0.3 (0.173-0.427)	0.52 (0.382-0.658)
Sensibilité	0.875 (0.748-0.944)	0.625 (0.483-0.748)	0.271 (0.165-0.412)	0.5 (0.364-0.636)
Spécificité	0 (0-0.711)	0 (0-0.711)	1 (0.289-1)	1 (0.289-1)
VPP	0.955 (0.893-1)	0.938 (0.854-1)	1 (1-1)	1 (1-1)
VPN	0 (0-0)	0 (0-0)	0.054 (0-0.127)	0.077 (0-0.179)
LR+	0.875 (0.786-0.974)	0.625 (0.502-0.778)	+∞	+∞
LR-	+∞	+∞	0.729 (0.614-0.866)	0.5 (0.377-0.663)
Risque relatif	0.955 (0.896-1.017)	0.938 (0.858-1.024)	1.057 (0.98-1.141)	1.083 (0.972-1.208)
Odds ratio	0 (0-0)	0 (0-0)		
Prévalence	0.96 (0.906-1)			

CO ₂ _moyen_occupation (ppm)				
ACET > 9.8	>750	>1000	>1500	> 1516
VP	4	4	3	3
VN	6	18	36	37
FP	40	28	10	9
FN	0	0	1	1
Bien classés	0.2 (0.089-0.311)	0.44 (0.302-0.578)	0.78 (0.665-0.895)	0.8 (0.689-0.911)
Sensibilité	1 (0.45-1)	1 (0.45-1)	0.75 (0.29-0.96)	0.75 (0.29-0.96)
Spécificité	0.13 (0.058-0.262)	0.391 (0.264-0.536)	0.783 (0.642-0.878)	0.804 (0.665-0.895)
VPP	0.091 (0.006-0.176)	0.125 (0.01-0.24)	0.231 (0.002-0.46)	0.25 (0.005-0.495)
VPN	1 (1-1)	1 (1-1)	0.973 (0.921-1)	0.974 (0.923-1)
LR+	1.15 (1.028-1.286)	1.643 (1.303-2.071)	3.45 (1.569-7.586)	3.833 (1.698-8.656)
LR-	0 (0-0)	0 (0-0)	0.319 (0.058-1.756)	0.311 (0.057-1.707)
Risque relatif			8.538 (1.399-52.108)	9.5 (1.565-57.654)
Odds ratio			10.8 (1.415-82.409)	12.333 (1.602-94.938)
Prévalence	0.08 (0.005-0.155)			

CO ₂ _moyen_occupation (ppm)				
BENZ > 2	>750	>1000	>1500	> 933
VP	7	6	2	7
VN	4	12	23	12
FP	28	20	9	20
FN	1	2	6	1
Bien classés	0.275 (0.137-0.413)	0.45 (0.296-0.604)	0.625 (0.475-0.775)	0.475 (0.32-0.63)
Sensibilité	0.875 (0.505-0.995)	0.75 (0.4-0.933)	0.25 (0.067-0.6)	0.875 (0.505-0.995)
Spécificité	0.125 (0.045-0.288)	0.375 (0.23-0.548)	0.719 (0.544-0.845)	0.375 (0.23-0.548)
VPP	0.2 (0.067-0.333)	0.231 (0.069-0.393)	0.182 (0-0.41)	0.259 (0.094-0.425)
VPN	0.8 (0.449-1)	0.857 (0.674-1)	0.793 (0.646-0.941)	0.923 (0.778-1)
LR+	1 (0.746-1.34)	1.2 (0.741-1.943)	0.889 (0.237-3.334)	1.4 (0.962-2.037)
LR-	1 (0.129-7.766)	0.667 (0.185-2.4)	1.043 (0.662-1.645)	0.333 (0.051-2.2)
Risque relatif	1 (0.222-4.506)	1.615 (0.436-5.991)	0.879 (0.242-3.191)	3.37 (0.662-17.16)
Odds ratio	1 (0.133-7.503)	1.8 (0.356-9.09)	0.852 (0.165-4.399)	4.2 (0.635-27.77)
Prévalence	0.2 (0.076-0.324)			

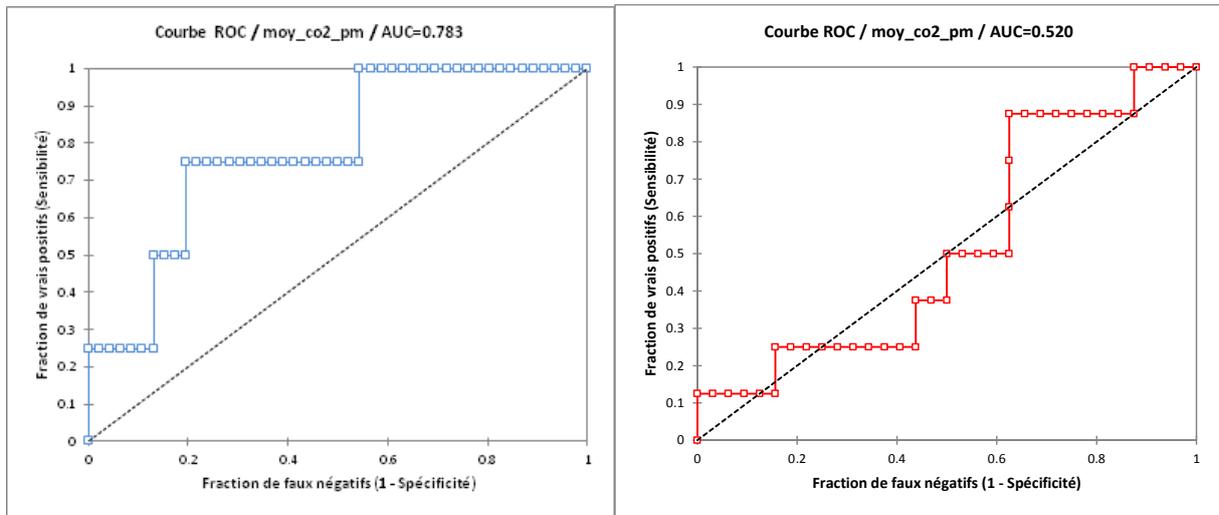


Figure 49 : Courbes ROC associées au niveau de CO₂ moyen durant l’occupation et au dépassement de la VC de l’acétaldéhyde (gauche, VC = 9,8 µg/m³) et du benzène (droite, VC = 2 µg/m³).

Compte tenu de l’aire sous la courbe ROC, utiliser un test basé sur le niveau de CO₂ pour discriminer les situations de dépassement de la VC n’apporte un gain que dans le cas de l’acétaldéhyde.

Tableau 64 : Valeurs AUC associées aux dépassements de VC selon le niveau de CO₂.

	AUC	Ecart-type	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
ACETALDEHYDE > 9.8	0.783	0.114	0.559	1.000
FORMALDEHYDE > 10	0.542	0.060	0.424	0.660
BENZENE > 2	0.520	0.110	0.304	0.735

En gras, valeurs significativement différentes de 0,5 au seuil de 5 %

6 Bureaux : campagne de mesure menée par le CSTB en France (2012-2013)

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) mène actuellement une campagne de mesures dans 9 immeubles de bureaux pour un total de 36 points de mesures sur deux saisons dans le cadre du projet européen Officair²⁹. Les cibles recherchées sont entre autres le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, l'acroléine, le benzène et la fraction massique PM_{2,5}. Par ailleurs, des mesures de dioxyde de carbone, d'ozone et de dioxyde d'azote ont également été réalisées. A ce jour, seules les données collectées durant la saison estivale de 2012 sont disponibles. Malheureusement, l'ensemble des données PM_{2,5} a été invalidé pour cette campagne.

6.1 Présentation des données disponibles

Le détail des paramètres de la campagne pris en compte pour l'étude est présenté ci-après. La durée des mesures couvrait 4,5 jours du lundi matin au vendredi soir. La concentration moyenne de CO₂ est déterminée exclusivement entre 09h00 et 19h00 du lundi au vendredi.

Tableau 65 : Caractéristiques de la mesure des polluants lors de la campagne bureaux.

Paramètre	Unités	Méthode	LD	LQ	Durée
CO ₂	ppm	Mesure en continu (Sonde Q-Track) Pas de temps : 10 min	1	50	9h-19h (L-V)
Formaldéhyde	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant DNPH (Radiello®) Analyse par HPLC/UV	0,68	1,48	4,5 jours
Acétaldéhyde	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant DNPH (Radiello®) Analyse par HPLC/UV	0,85	2,3	4,5 jours
Acroléine	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant DNPH (Radiello®) Analyse par HPLC/UV	0,3	0,8	4,5 jours
Benzène	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant Carbograph4 (Radiello®) Analyse par TD/GC/MS	nd	nd	4,5 jours
Ozone	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant DNPH (Radiello®) Analyse par HPLC/UV	0,8	2,7	4,5 jours
NO ₂	µg/m ³	Prélèvement passif Adsorbant Triéthanolamine (Radiello®) Analyse par TD/GC/MS	0,7	2,3	4,5 jours
PM _{2,5}	µg/m ³	Prélèvement actif Collecte sur filtre quartz Pesées avant / après prélèvement	nd	nd	4,5 jours

nd : information non disponible à la rédaction de ce rapport.

²⁹ http://www.ogai.fr/userdata/documents/386_OFFICAIR_En_bref.pdf

D'autres informations relatives au nombre d'occupants, à l'état d'ouverture de la porte du bureau, au type de bureau, au volume ont également été collectées. Ces informations sont encore au stade de validation et par conséquent elles ne sont pas encore disponibles.

Les statistiques des variables de la campagne bureaux sont présentées ci-après. On peut noter que les concentrations d'acroléine aussi bien intérieures qu'extérieures sont relativement élevées par rapport aux données observées dans les logements. La méthodologie était la même, mais le laboratoire différent. Nous ne sommes malheureusement pas en mesure d'aller plus loin dans cette comparaison, compte tenu du fait que nous n'avons pas à notre disposition tous les éléments concernant cette campagne bureaux encore en cours d'exploitation.

Tableau 66 : Statistiques des données de la campagne bureaux (n= 36).

	moy_CO ₂ 09h-19h	TEMP int	TEMP ext	O ₃ int	O ₃ ext	NO ₂ int	NO ₂ ext	BENZ int	FORM int	ACETAL int	ACROL int
Effectif	35	36	36	36	36	36	36	36	36	36	32
Moyenne	620	24.1	19.4	2.9	36.7	13.9	22.4	2.4	14.6	6.4	3.2
Ecart-type	109	1.1	2.1	4.0	19.5	4.9	9.7	0.7	3.8	1.8	0.8
Min	448	21.6	15.4	0.1	4.4	5.9	8.2	1.1	5.5	3.5	1.5
P1	464	21.6	15.4	0.1	4.4	6.0	8.2	1.1	6.7	3.6	1.6
P5	497	21.9	15.4	0.1	4.4	6.4	8.2	1.4	9.4	3.8	1.9
P10	511	22.6	16.1	0.2	12.6	6.7	8.3	1.7	10.3	4.3	2.0
P25	531	23.4	17.6	0.7	23.8	10.7	17.2	1.8	11.5	5.3	2.8
P50	601	24.3	19.9	1.8	36.1	12.6	22.6	2.2	15.6	6.3	3.1
P75	677	24.6	21.1	3.7	45.2	18.3	30.5	2.9	17.6	7.4	3.5
P90	747	25.5	21.4	5.4	66.0	20.1	33.8	3.2	19.3	8.1	4.2
P95	803	25.7	21.6	8.0	66.3	21.3	34.3	3.4	20.1	9.3	4.5
P99	911	26.3	21.6	18.5	66.3	22.5	34.3	4.2	21.3	11.4	5.2
Max	966	26.5	21.6	22.0	66.3	23.1	34.3	4.5	22.0	12.1	5.4

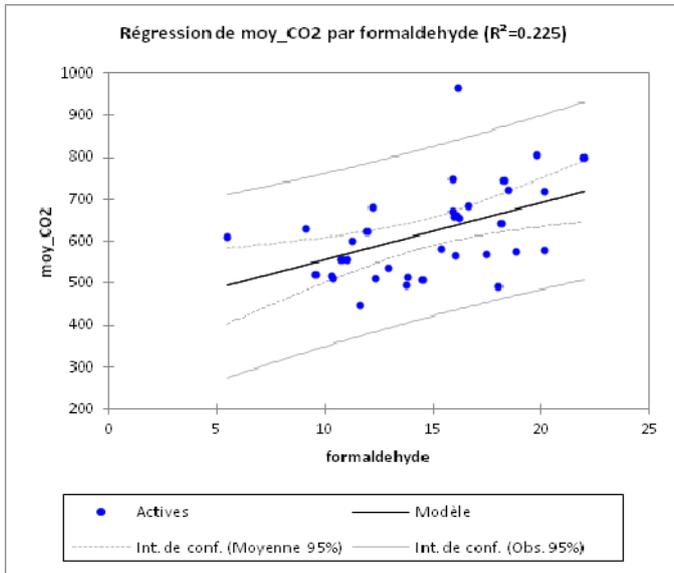
	BENZ ext	FORM ext	ACETAL ext	ACROL ext	diff_BENZ ppb	diff_FORM ppb	diff_ACETAL ppb	diff_ACROL ppb
Effectif	36	36	20	32	36	36	20	32
Moyenne	1.35	4.00	2.42	3.18	0.32	8.7	2.11	0.01
Ecart-type	0.33	1.23	0.19	1.28	0.21	3.0	0.75	0.53
Min	0.88	1.66	2.18	1.87	-0.14	3.1	0.72	-1.22
P1	0.88	1.66	2.18	1.87	-0.09	3.4	0.80	-1.19
P5	0.88	1.66	2.18	1.87	0.02	4.8	1.12	-1.00
P10	0.92	2.04	2.18	1.90	0.06	5.3	1.19	-0.71
P25	1.09	3.35	2.21	2.36	0.18	6.0	1.67	-0.19
P50	1.36	4.27	2.50	3.12	0.31	8.9	2.06	0.14
P75	1.63	4.70	2.59	3.26	0.45	10.9	2.34	0.38
P90	1.78	5.37	2.60	5.94	0.59	12.1	3.20	0.48
P95	1.88	5.57	2.60	6.24	0.67	14.0	3.22	0.55
P99	1.88	5.57	2.60	6.24	0.78	15.3	3.53	0.94
Max	1.88	5.57	2.60	6.24	0.82	15.9	3.60	1.09

6.2 Corrélations entre le CO₂ et les polluants cibles

Les corrélations (r de Pearson et p-values associée) entre le niveau de dioxyde de carbone et le niveau des autres polluants mesurés sont présentées au Tableau 67. Seuls les niveaux intérieurs en formaldéhyde et acétaldéhyde présentent une corrélation avec le niveau moyen de CO₂ (09h – 19h) dans les bureaux. Ces corrélations sont détaillées aux Figure 50 et Figure 51.

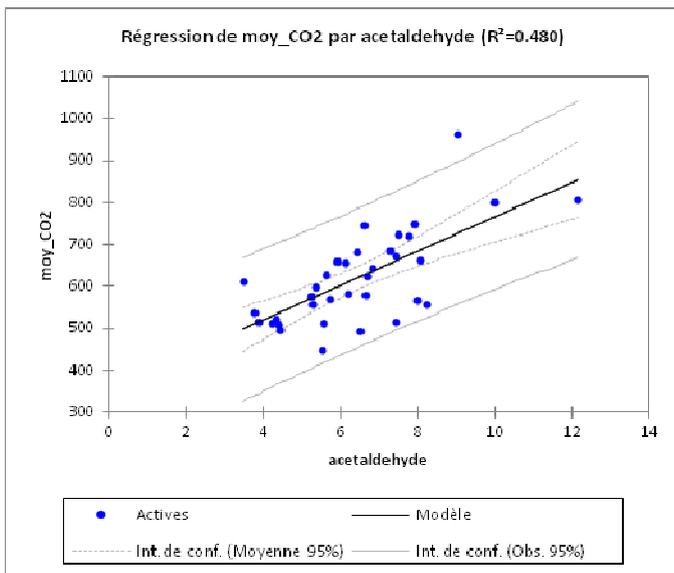
Tableau 67 : Corrélations entre le niveau de CO₂ et les autres polluants dans les bureaux.

Variables	r de Pearson	p-value
	moy_CO2_09h-19h	
moy_CO2_09h-19h	1	0
Formaldéhyde	0.474	0.004
Formaldéhyde_ppb	0.475	0.004
log_formaldéhyde_ppb	0.423	0.011
Formaldéhyde_ext	0.060	0.733
Formaldéhyde_ext_ppb	0.057	0.744
diff_formaldéhyde_ppb	0.470	0.004
Acétaldéhyde	0.693	< 0.0001
Acétaldéhyde_ppb	0.694	< 0.0001
log_acétaldéhyde_ppb	0.667	< 0.0001
Acétaldéhyde_ext	0.273	0.259
Acétaldéhyde_ext_ppb	0.274	0.257
diff_acétaldéhyde_ppb	0.542	0.017
Acroléine	0.065	0.727
Acroléine_ppb	0.066	0.725
log_acroléine_ppb	0.020	0.915
Acroléine_ext	0.139	0.456
Acroléine_ext_ppb	0.137	0.464
diff_acroléine_ppb	-0.098	0.601
Benzène	0.007	0.966
Benzène_ppb	0.010	0.954
log_benzène_ppb	0.046	0.791
Benzène_ext	-0.272	0.114
Benzène_ext_ppb	-0.274	0.112
diff_benzène_ppb	0.140	0.423
Ozone_int	-0.287	0.094
Ozone_ext	0.002	0.992
NO ₂ _int	0.063	0.718
NO ₂ _ext	-0.108	0.537
Température_int	0.061	0.727
Température_ext	-0.141	0.420



Observations	35
R ²	0.225
R ² ajusté	0.201
MCE	9579
Constante	418
penne	14

Figure 50 : Corrélation entre le niveau moyen de CO₂ entre 09h00 et 19h00 et la concentration en formaldéhyde dans les bureaux.



Observations	35
R ²	0.480
R ² ajusté	0.464
MCE	6429
Constante	355
penne	41

Figure 51 : Corrélation entre le niveau moyen de CO₂ entre 09h00 et 19h00 et la concentration d'acétaldéhyde dans les bureaux.

6.3 Relations entre les variables

Une analyse par composantes principales a été réalisée sur ces données pour essayer d'appréhender la structure des relations entre les variables. Elle a porté sur 18 variables polluants. Le niveau moyen en CO₂ a été rajouté en tant que variable supplémentaire. Les résultats sont présentés au Tableau 68.

Le premier facteur (22 % de variance expliquée) est caractérisé par des niveaux élevés en formaldéhyde et en acétaldéhyde, ainsi qu'en dioxyde de carbone. Les facteurs deux (20 %) et trois (17 %) mettent respectivement en évidence de faibles niveaux de dioxyde d'azote et des niveaux élevés d'acroléine. Le quatrième facteur (12 %) est associé à des niveaux élevés d'ozone avec des niveaux plutôt faibles en CO₂. Le cinquième facteur (9 %) se caractérise plus par les niveaux de benzène à l'intérieur. En l'absence de variables complémentaires, il est difficile d'approfondir l'interprétation des facteurs.

Tableau 68 : ACP – Valeurs propres et coordonnées des variables (données bureaux) sur les 5 premiers facteurs.

Facteurs	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	3.94	3.62	3.09	2.24	1.57
Variabilité (%)	21.88	20.09	17.17	12.46	8.72
% Cumulé	21.88	41.97	59.13	71.60	80.31
Formaldéhyde	0.407	0.101	-0.100	-0.170	0.036
Formaldéhyde_ext	0.232	-0.281	-0.103	0.305	0.034
diff_formaldéhyde_ppb	0.344	0.189	-0.061	-0.278	0.026
Acétaldéhyde	0.396	-0.026	-0.055	-0.229	-0.273
Acétaldéhyde_ext	0.349	-0.074	0.230	0.062	0.328
diff_acétaldéhyde_ppb	0.359	-0.128	-0.188	-0.120	-0.324
Acroléine	0.103	0.194	0.355	0.149	0.090
Acroléine_ext	0.128	-0.254	0.433	0.168	0.003
diff_acroléine_ppb	-0.068	0.400	-0.209	-0.078	0.036
Benzène	0.145	0.065	-0.343	0.286	0.436
Benzène_ext	-0.190	0.348	-0.219	-0.074	0.294
diff_benzène_ppb	0.241	-0.103	-0.257	0.338	0.325
Ozone_int	-0.079	0.084	-0.036	0.506	-0.370
Ozone_ext	0.128	0.231	-0.032	0.425	-0.250
NO ₂ _int	-0.174	-0.384	-0.014	-0.078	0.119
NO ₂ _ext	-0.224	-0.351	-0.171	-0.040	0.049
Température_int	0.061	0.068	0.432	-0.094	0.313
Température_ext	-0.029	0.345	0.278	0.140	-0.061
moy_CO2 (09h-18h)	0.185	-0.033	-0.021	-0.139	0.051

Le nombre d'individus étant particulièrement faible, il n'a pas été jugé opportun de poursuivre cette exploitation par une classification et une recherche des partitions.

6.4 Dépassement des valeurs cibles selon le niveau de CO₂

Comme dans le cas des campagnes de mesures précédentes, la proportion de bureaux dépassant ou non la valeur cible (VC) pour un polluant cible donné a été déterminée pour différentes classes de concentrations de CO₂.

La concentration de CO₂ prise en compte dans le calcul est la moyenne des concentrations sur une période d'occupation théorique du bureau entre 09h00 et 18h00 du lundi au vendredi. La majorité des valeurs est inférieure à 750 ppm. La nuance apportée par le découpage en classe est donc relativement restreinte.

Les résultats des croisements sont présentés au Tableau 69. Les niveaux de formaldéhyde et d'acroléine dépassent pratiquement toujours leur VC respective et ce quel que soit le niveau de CO₂. En ce qui concerne le benzène, aucune mesure ne dépasse la VC de 10 µg/m³. Par contre, dans plus de 50 % des cas, la VC de 2 µg/m³ est dépassée. Les valeurs les plus élevées d'acétaldéhyde qui dépassent 9,8 µg/m³ correspondent également aux niveaux les plus élevés en CO₂ (entre 750 et 1000 ppm).

Tableau 69 : Proportion de bureaux qui dépasse la VC d'un polluant cible en fonction du niveau de CO₂.

CO ₂ (09h-19h)	Variable	Ntotal	N <=VC	N >VC	% <=VC	% >VC
<=750	CO ₂ _09h-18h	32				
750-1000*	CO ₂ _09h-18h	3				
<=750	Benzène = 2	32	13	19	41%	59%
750-1000	Benzène = 2	3	1	2	33%	67%
<=750	Benzène = 10	32	32	0	100%	0%
750-1000	Benzène = 10	3	3	0	100%	0%
<=750	Formaldéhyde = 10	32	3	29	9%	91%
750-1000	Formaldéhyde = 10	3	0	3	0%	100%
<=750	Acétaldéhyde = 9.8	32	32	0	100%	0%
750-1000	Acétaldéhyde = 9.8	3	1	2	33%	67%
<=750	Acroléine = 0.8	28	0	28	0%	100%
750-1000	Acroléine = 0.8	3	0	3	0%	100%

*Pas de données supérieures à 1000 ppm de CO₂

6.5 Sensibilité et spécificité des dépassements de VC selon le niveau de CO₂

La sensibilité et la spécificité des occurrences de dépassement des VC (cas avérés) ont été déterminées pour un seuil de concentration de CO₂ (variable test). Le seuil retenu est 750 ppm de CO₂ (aucune valeur n'est supérieure à 1000 ppm). La méthode et les paramètres pris en compte sont définis au paragraphe 3.6.

Le nombre de situations à comparer est beaucoup plus restreint par rapport aux campagnes de données précédentes. La répartition de quelques individus supplémentaires entre les classes peut modifier sensiblement les valeurs présentées ici. Ces résultats ne peuvent être considérés qu'à titre indicatif.

La prévalence des dépassement de la VC du formaldéhyde est de 91 %. La VPP est maximale avec aucun faux positif. Par contre, la VPN reste faible (9 à 14 %) avec des faux négatifs plus nombreux que les vrais négatifs. La sensibilité est très faible. Le seuil optimal correspond à 629 ppm.

Les dépassements de la valeur cible de l'acétaldéhyde correspondent à 6 ou 9 % des cas selon la valeur prise en considération. Le test de discrimination basé sur le niveau de CO₂ est pratiquement idéal avec quasiment aucun faux positif ou faux négatif.

La concentration d'acroléine est systématiquement supérieure à la VC. La sensibilité est très faible pour un seuil de CO₂ de 750 ppm. Le test basé sur le niveau de CO₂ n'est donc pas concluant.

La prévalence de dépassement de 2 µg/m³ de benzène est de 60 %. Les VPP et VPN sont correctes. La sensibilité est très faible (10 %) pour un seuil de 750 ppm de CO₂. Le seuil optimal correspond à 557 ppm. De toute façon, avec un rapport de vraisemblance positif proche de 1, l'apport du test de discrimination selon le niveau de CO₂ est insuffisant. Les niveaux de benzène restent toujours inférieurs à la VC de 10 µg/m³. Aucun calcul de sensibilité ne peut être réalisé.

Tableau 70 : VPP/VPN des dépassements des VC selon le seuil de CO₂ (données bureaux). Seuil en italique : seuil optimal correspondant au maximum de (sensibilité + spécificité).

	Formaldéhyde > 10		Acétaldéhyde > 9.8	Acroléine > 0.8
	CO₂ > 750 ppm	CO₂ > 629 ppm	CO₂ > 750 ppm	CO₂ > 750 ppm
VP	3	14	3	2
VN	3	3	0	32
FP	0	0	0	1
FN	29	18	28	0
Bien classés	0.171 (0.047-0.296)	0.486 (0.32-0.651)	0.097 (0-0.201)	0.971 (0.916-1)
Sensibilité	0.094 (0.026-0.252)	0.438 (0.282-0.607)	0.097 (0.027-0.259)	1 (0.289-1)
Spécificité	1 (0.38-1)	1 (0.38-1)		0.97 (0.831-1)
VPP	1 (1-1)	1 (1-1)	1 (1-1)	0.667 (0.133-1)
VPN	0.094 (0-0.195)	0.143 (0-0.293)	0 (0-0)	1 (1-1)
LR+	+∞	+∞		33 (4.79-227.363)
LR-	0.906 (0.811-1.013)	0.563 (0.414-0.764)		0 (0-0)
Risque relatif	1.103 (0.989-1.231)	1.167 (0.984-1.383)	1 (1-1)	
Odds ratio				
Prévalence	0.914 (0.822-1)		0.057 (0-0.134)	1 (1-1)

	Benzène > 2		Benzène > 10
	CO₂ > 750 ppm	CO₂ > 557 ppm	CO₂ > 750 ppm
VP	2	16	0
VN	13	7	32
FP	1	7	3
FN	19	5	0
Bien classés	0.429 (0.265-0.593)	0.657 (0.5-0.814)	0.914 (0.822-1)
Sensibilité	0.095 (0.016-0.304)	0.762 (0.544-0.896)	
Spécificité	0.929 (0.661-1)	0.5 (0.269-0.731)	0.914 (0.767-0.977)
VPP	0.667 (0.133-1)	0.696 (0.508-0.884)	0 (0-0)
VPN	0.406 (0.236-0.576)	0.583 (0.304-0.862)	1 (1-1)
LR+	1.333 (0.133-13.342)	1.524 (0.857-2.71)	
LR-	0.974 (0.797-1.191)	0.476 (0.188-1.204)	
Risque relatif	1.123 (0.547-2.306)	1.67 (0.847-3.291)	
Odds ratio	1.368 (0.161-11.629)	3.2 (0.79-12.956)	
Prévalence	0.6 (0.438-0.762)		0 (0-0)

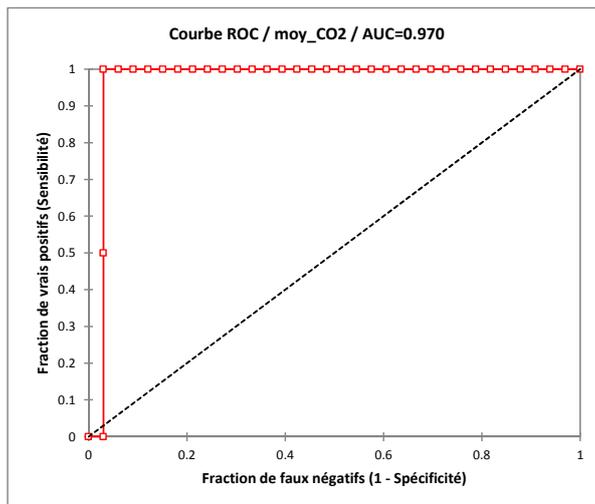


Figure 52 : Courbe ROC associée au niveau de CO₂ moyen durant l’occupation et au dépassement de la VC de l’acétaldéhyde.

Compte tenu des aires sous la courbe ROC, la discrimination des dépassements de VC selon le niveau de CO₂ n’est effective que pour l’acétaldéhyde.

Tableau 71 : Valeurs AUC associées aux dépassements de VC selon le niveau de CO₂.

	AUC	Ecart-type	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Acétaldéhyde > 9.8	0.970	0.052	0.867	1.000
Benzène > 2	0.605	0.095	0.418	0.793
Formaldéhyde > 10	0.552	0.111	0.335	0.769

En gras, valeurs significativement différentes de 0,5 au seuil de 5 %

7 Synthèse des corrélations observées

Une synthèse des corrélations observées est présentée au Tableau 72. Le formaldéhyde a été mesuré dans les 4 campagnes. Il est systématiquement corrélé avec le niveau de CO₂ durant l'occupation des locaux. A l'inverse, le benzène également mesuré lors des 4 campagnes, n'est pas toujours corrélé avec le niveau moyen de CO₂.

Tableau 72 : Synthèse des corrélations observées (r de Pearson, seuil 5 %).
NS : non significatif. Concentrations en µg/m³ (ou ppm pour CO₂).

Données	Logements	Ecoles et Crèches	Ecoles (OQAI)	Bureaux
	Date 2003-2005 CO ₂ _17h-08h	2009-2011 CO ₂ _BET	2010 CO ₂ _08h-17h	2012 CO ₂ _09h-19h
Formaldéhyde	0.191	0.283	0.530	0.474
Acétaldéhyde	0.371	--	0.460	0.693
Acroléine	0.247	--	--	NS
Benzène	0.150	0.105	NS	NS
1,4-Dichlorobenzène	0.139*	--	--	--
PM _{2,5}	0.123	--	0.509	--
PM ₁₀	0.209	--	--	--

*variable transformée en log de la différence int-ext (sinon NS).

Les coefficients directeurs associés aux relations linéaires $[CO_2_occup_ppm] = f([polluant_µg/m^3])$ ont été rassemblés au Tableau 73. Ainsi, une variation de 10 µg/m³ de formaldéhyde est associée à une variation moyenne de CO₂ comprise entre 65 et 137 ppm selon le type d'environnement intérieur considéré. Une variation similaire de la concentration intérieure d'acétaldéhyde serait associée à une variation de CO₂ comprise entre 156 et 798 ppm.

Tableau 73 : Synthèse des coefficients directeurs des relations linéaires
 $[CO_2_occup_ppm] = f([polluant_µg/m^3])$.

Données	Logements	Ecoles et Crèches	Ecoles (OQAI)	Bureaux
	Date 2003-2005 CO ₂ _17h-08h	2009-2011 CO ₂ _BET	2010 CO ₂ _08h-17h	2012 CO ₂ _09h-19h
Formaldéhyde	6.5	9.9	13.3	13.7
Acétaldéhyde	15.6	--	79.8	41.2
Acroléine	92.4	--		(8.8) NS
Benzène	26.3	44.5	(16.6) NS	(1.1) NS
1,4-Dichlorobenzène*	(0.07) NS	--	--	--
PM _{2,5}	1	--	24.8	--
PM ₁₀	1.9	--	--	--

*variable transformée en log de la différence int-ext (sinon NS).

La sensibilité et la spécificité des occurrences de dépassement des VC (cas avérés) ont été déterminées pour différents seuils de concentration de CO₂ (variable test). Dans la majorité des cas, l'optimum de discrimination représenté par le maximum de la somme (sensibilité + spécificité) situe la valeur seuil de CO₂ à des niveaux voisins voire inférieurs à 750 ppm. Le Tableau 74 regroupe les résultats obtenus pour les trois polluants mesurés presque systématiquement au cours des 4 campagnes (formaldéhyde, acétaldéhyde et benzène). Pour les campagnes de grande envergure (logements et écoles), l'utilisation du niveau de CO₂ permet de discriminer les situations de

dépassement de VC. La valeur prédictive positive (VPP) est très élevée pour le formaldéhyde et l'acétaldéhyde (respectivement 92 % et 81 %) et modérément élevée pour le benzène (57 %). La VPN reste acceptable (entre 54 % et 60 %) sauf dans le cas du formaldéhyde dans les logements (17,6 %). Le rapport de vraisemblance positif (LR+) est supérieur à 1 pour ces deux campagnes de mesures, ce qui indique un gain mineur dans le diagnostic des situations de dépassement ou de respect des VC.

Pour les deux autres campagnes de moindre envergure (écoles(OQAI) et bureaux), l'utilisation du niveau de CO₂ pour discriminer les situations de dépassement de VC ne fournit pas de résultats satisfaisants comme l'attestent les valeurs de LR+ et AUC non significatives, sauf pour l'acétaldéhyde. De plus, le faible nombre d'observations dans ces campagnes ne permet pas de considérer la prévalence des situations de dépassement des VC comme représentative. Des observations supplémentaires peuvent faire varier sensiblement cette prévalence et venir modifier les VPP et VPN calculées. Par conséquent, les résultats de ces deux campagnes basées sur un nombre restreint d'observations doivent être interprétés avec précaution.

L'acétaldéhyde est le seul polluant pour lequel la discrimination des situations de dépassement de VC selon le niveau de CO₂ donne des résultats convenables, et ce pour les 3 campagnes dans lesquelles il a été mesuré.

Tableau 74 : Synthèse des valeurs prédictives positives et négatives VPP et VPN de dépassement de VC pour un seuil de CO₂ de 750 ppm.

Formaldéhyde > 10 CO ₂ > 750 ppm					
	VPP	VPN	LR+	LR-	AUC
Logements	0.916 (0.885-0.947)	0.176 (0.124-0.227)	1.522 (1.114-2.078)	0.647 (0.511-0.818)	0.619 (0.535-0.703)
Ecoles (SURV)	0.861 (0.836-0.887)	0.557 (0.485-0.628)	1.8 (1.56-2.077)	0.231 (0.181-0.295)	0.795 (0.759-0.832)
Ecoles (OQAI)	0.955 (0.893-1)	0 (0-0)	0.875 (0.786-0.974)	+∞	0.542 (0.424-0.660)
Bureaux	1 (1-1)	0.094 (0-0.195)	+∞	0.906 (0.811-1.013)	0.552 (0.335-0.769)

Acétaldéhyde > 9,8 CO ₂ > 750 ppm					
	VPP	VPN	LR+	LR-	AUC
Logements	0.756 (0.708-0.805)	0.604 (0.538-0.670)	2.006 (1.651-2.437)	0.421 (0.341-0.521)	0.730 (0.685-0.776)
Ecoles (SURV)			<i>Pas de mesures</i>		
Ecoles (OQAI)	0.091 (0.006-0.176)	1 (1-1)	1.15 (1.028-1.286)	0 (0-0)	0.783 (0.559-1.000)
Bureaux	0.667 (0.133-1.000)	1 (1-1)	33 (4.8-227)	0 (0-0)	0.970 (0.867-1.000)

Benzène > 2 CO ₂ > 750 ppm					
	VPP	VPN	LR+	LR-	AUC
Logements	0.570 (0.513-0.627)	0.599 (0.531-0.666)	1.325 (1.138-1.542)	0.666 (0.535-0.829)	0.614 (0.564-0.663)
Ecoles (SURV)	0.61 (0.574-0.646)	0.563 (0.491-0.635)	1.159 (1.078-1.246)	0.576 (0.444-0.747)	0.582 (0.544-0.620)
Ecoles (OQAI)	0.2 (0.067-0.333)	0.8 (0.449-1)	1 (0.746-1.34)	1 (0.129-7.766)	0.520 (0.304-0.735)
Bureaux	0.667 (0.133-1)	0.406 (0.236-0.576)	1.333 (0.133-13.342)	0.974 (0.797-1.191)	0.605 (0.418-0.793)

Un moyen simple d'évaluer le gain net apporté par l'utilisation d'un seuil de CO₂ pour discriminer les situations de dépassement de valeur cible est le gain diagnostique positif. C'est la différence entre la probabilité pré-test (prévalence) de dépassement de la VC et la probabilité post-test (valeur prédictive positive) : **gain positif = VPP – prévalence**. Par exemple, un gain positif de 0,2 correspond à 20 % de chances supplémentaires de détecter une situation de dépassement pour un polluant cible lorsque le niveau de CO₂ dépasse le seuil fixé.

De la même façon, un gain diagnostique négatif peut être calculé. Ce dernier représente la différence entre la probabilité pré-test (1-prévalence) d'être inférieur à la VC et la probabilité post-test (valeur prédictive négative) : **gain négatif = VPN – (1-prévalence)**. Par exemple, un gain négatif de 0,1 correspond à 10 % de chances supplémentaires de détecter une situation pour laquelle la concentration d'un polluant cible ne dépasse pas la VC lorsque le niveau de CO₂ reste inférieur au seuil fixé.

Les gains diagnostique positifs (VPP-Prev) et négatifs (VPN-(1-Prev)) liés à l'utilisation d'un seuil de CO₂ pour discriminer les situations de dépassement de VC ont été déterminés pour l'ensemble des polluants au niveau des quatre campagnes de mesures étudiées (Tableau 75).

Tableau 75 : Gains diagnostiques positifs et négatifs pour l'ensemble des polluants dans les quatre campagnes de mesures étudiées et pour un seuil de 750 ppm de CO₂. En rouge, gain supérieur à 10 %.

					Gain +	Gain -
LOGEMENTS	VPP	VPN	Prev	1-Prev	VPP-Prev	VPN-(1-Prev)
Formaldéhyde > 10	0.916	0.176	0.878	0.122	0.038	0.054
Acétaldéhyde > 9,8	0.756	0.604	0.607	0.393	0.149	0.211
Acroléine > 0,8	0.796	0.519	0.666	0.334	0.13	0.185
Benzène > 2	0.57	0.599	0.501	0.499	0.069	0.1
Benzène > 10	0.038	0.995	0.024	0.976	0.014	0.019
1,4-dichlorobenzène > 0,9	0.896	0.074	0.908	0.092	-0.012	-0.018
1,4-dichlorobenzène > 60	0.145	0.93	0.114	0.886	0.031	0.044
PM ₁₀	0.896	0.256	0.828	0.172	0.068	0.084
PM _{2,5}	0.953	0.117	0.921	0.079	0.032	0.038
ECOLES-CRECHES	VPP	VPN	Prev	1-Prev	VPP-Prev	VPN-(1-Prev)
Formaldéhyde > 10	0.861	0.557	0.775	0.225	0.086	0.332
Benzène > 2	0.61	0.563	0.574	0.426	0.036	0.137
Benzène > 10	0.001	0.995	0.002	0.998	-0.001	-0.003
Ecoles OQAI	VPP	VPN	Prev	1-Prev	VPP-Prev	VPN-(1-Prev)
Formaldéhyde > 10	0.955	0	0.96	0.04	-0.005	-0.04
Acétaldéhyde > 9,8	0.091	1	0.08	0.92	0.011	0.08
Benzène > 2	0.2	0.8	0.2	0.8	0	0
Bureaux	VPP	VPN	Prev	1-Prev	VPP-Prev	VPN-(1-Prev)
Formaldéhyde > 10	1	0.094	0.914	0.086	0.086	0.008
Acétaldéhyde > 9,8	1	0	0.057	0.943	0.943	-0.943
Acroléine > 0,8	0.667	1	1	0	-0.333	1
Benzène > 2	0.667	0.406	0.6	0.4	0.067	0.006
Benzène > 10	0	1	0	1	0	0

L'utilisation du seuil de CO₂ ne représente un apport significatif qu'à partir du moment où le gain positif et le gain négatif sont tous deux strictement supérieurs à zéro. Ainsi dans les bureaux, le gain positif est de 94 % pour l'acétaldéhyde avec un seuil de CO₂ de 750 ppm, mais le gain négatif est de -94 %. Par conséquent, la nette amélioration de la détection des situations de dépassement s'accompagne d'une probabilité nulle de détecter les situations où la VC de l'acétaldéhyde est respectée. Dans ces conditions, utiliser un seuil de CO₂ n'apporte pas grand-chose.

L'apport le plus significatif est observé dans les logements avec l'acétaldéhyde et l'acroléine. Leur gain positif basé sur un seuil de 750 ppm de CO₂ est respectivement de 13 % et 15 %, tandis que leur gain négatif est respectivement de 18 % et 21 %. Pour les autres polluants, le gain par rapport à la prévalence initiale reste inférieur à 10 % dans l'ensemble des situations. La probabilité de discriminer les situations de dépassement est même dégradée dans le cas du 1,4-dichlorobenzène pour une VC de 0,9 µg/m³.

Dans les écoles et crèches, le gain négatif est de 33 % pour le formaldéhyde, mais le gain positif reste faible (inférieur à 10 %). Pour le benzène, avec une VC de 2 µg/m³, ces mêmes probabilités augmentent respectivement de 14 % et 4 %. Par contre, pour une VC de 10 µg/m³ en benzène, la probabilité de discrimination des situations de dépassement ou de respect de la VC n'est pas améliorée.

Dans l'échantillon des 50 salles de classe de la campagne OQAI, seul les probabilités de discrimination de l'acétaldéhyde sont améliorées. Pour les bureaux, malgré un gain négatif pratiquement nul, la probabilité de détecter un dépassement de la concentration de formaldéhyde ou de benzène (VC = 2 µg/m³) augmente respectivement de 9 % et de 7 %. Toutefois, le nombre d'observations de ces deux dernières campagnes de mesures est relativement faible. En conséquence, la prévalence initiale des situations de dépassement peut varier de façon importante si d'autres mesures sont réalisées. Il est donc difficile d'extrapoler les observations faites sur ces échantillons à l'échelle d'une population.

8 Conclusion

Les données disponibles ont permis de mettre en relation le niveau de CO₂ avec la concentration de plusieurs polluants cibles pour différents environnements intérieurs. La mesure en continu du CO₂ permet de prendre en compte de manière exclusive les périodes d'occupation. Par contre, la mesure des autres polluants intègre des périodes d'occupation et d'inoccupation. Les associations observées dans cette étude sont donc forcément limitées par cette contrainte métrologique.

Le niveau de CO₂ est significativement corrélé avec la plupart des polluants cibles, notamment : le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et les particules (fraction PM_{2,5} et PM₁₀). Dans certains cas, la présence de très fortes valeurs (cas du 1,4-dichlorobenzène) perturbe cette association. Une transformation logarithmique de la variable ou une corrélation des rangs permet de faire apparaître cette corrélation.

Pour le benzène, une corrélation significative est observée avec le niveau de CO₂ dans le cadre de la campagne nationale logements et de la campagne de surveillance dans les écoles et crèches mais pas dans celui de la campagne pilote écoles, ou de la campagne bureaux. De la même façon, l'acroléine est associée au CO₂ dans les logements mais pas dans les bureaux.

La saison joue un rôle marqué dans l'ensemble des campagnes de mesures dès lors qu'elles couvraient au moins une année complète. Son effet est visible au travers des corrélations observées avec la température et l'humidité intérieures comme extérieures. La période de chauffe qui dépend de la zone climatique présente un rôle encore plus marqué dans les corrélations observées entre le CO₂ et certains polluants cibles (benzène et PM_{2,5}), notamment dans les logements. Ces corrélations sont également conditionnées par la présence de fumeurs, ainsi que par la présence d'une source de combustion dans le logement, exprimée au travers d'une concentration maximale en monoxyde de carbone sur la semaine supérieure à 3 ppm.

Dans les écoles, outre la saison et la zone climatique, c'est le type d'établissement qui conditionne la corrélation observée entre le niveau de benzène et le niveau de CO₂.

D'autres facteurs présentent également un lien avec à la fois les niveaux de CO₂, mais aussi les niveaux de polluants. Par conséquent, ils sont également à même de conditionner les corrélations observées. Ainsi, le nombre moyen d'occupants au travers de la production métabolique a un impact direct sur le niveau de CO₂, mais il est également corrélé avec le niveau de formaldéhyde et de particules (dans les logements), avec le niveau de formaldéhyde et d'acétaldéhyde (dans les écoles) ou seulement avec le benzène (dans les écoles et crèches). L'ouverture des fenêtres affecte également le niveau des polluants en particulier celui des particules. Compte tenu du nombre d'observations parfois restreint de certaines campagnes de mesures, il n'est pas toujours possible de prendre en compte ces facteurs. L'approche que nous avons initié dans cette étude au travers des analyses par composantes principales et des classifications est loin d'être exhaustive. Néanmoins, une exploitation plus approfondie de ces données sort du cadre de l'étude dont l'objet est de rechercher des corrélations sans nécessairement chercher un caractère explicatif.

Enfin, les proportions de situations qui dépassent ou non une valeur guide d'air intérieur (ou valeur cible) pour un polluant donné ont été déterminées selon le niveau moyen de CO₂ en période d'occupation. Pour les logements, le critère d'occupation a été défini par rapport à un temps de présence théorique à l'échelle du logement : en soirée durant la semaine (17h00 à 08h00 le lendemain et 24h / 24h les samedis et dimanches). L'occupation aurait également très bien pu être définie au niveau de la chambre instrumentée, avec comme conséquence des niveaux moyens de CO₂ plus élevés. Pour les écoles et les bureaux, l'occupation est définie à travers un planning

théorique de présence ou des budgets espace-temps. Seuls les niveaux de CO₂ ont pris en compte l'occupation, la mesure des autres polluants couvrent à la fois des périodes d'occupation et d'inoccupation.

Dans trois des campagnes de mesures étudiées, la proportion de situations où le formaldéhyde dépasse la valeur cible est supérieure à 80 % quel que soit le seuil de CO₂ choisi. Dans les écoles et les crèches instrumentées entre 2009 et 2011 (mesures estivales et hivernales confondues), cette proportion varie de 44 % lorsque le niveau moyen de CO₂ reste inférieur ou égal à 750 ppm et augmente jusqu'à 97 % lorsqu'il dépasse 2000 ppm.

La concentration de benzène ne dépasse 10 µg/m³ qu'en de rares occasions qui n'apparaissent pas reliées au niveau de CO₂. Par contre, elle dépasse la valeur de 2 µg/m³ de 40 % à 70 % des cas suivant le niveau moyen de CO₂ dans les écoles et crèches ou encore dans les logements. Plus le niveau de CO₂ augmente, plus cette proportion augmente également.

De la même façon, la proportion de logements qui dépasse la valeur cible de l'acétaldéhyde varie de 40 % à 85 % selon le niveau de CO₂. Dans les écoles, les premiers cas de dépassement sont enregistrés à partir de 1000 ppm de CO₂ ; et à partir de 750 ppm dans les bureaux.

En ce qui concerne l'acroléine, la proportion qui dépasse la valeur cible varie de 50 % à 85 % suivant le niveau de CO₂ dans les logements.

Dans plus de 90 % des logements, le 1,4-dichlorobenzène dépasse la valeur cible de 0,9 µg/m³ indépendamment du niveau de CO₂. La proportion de logements qui dépasse 60 µg/m³ varie quant à elle entre 7 % et 23 % selon le niveau de CO₂.

Enfin, la concentration en masse de particules, fraction PM₁₀, dépasse la valeur cible de 20 µg/m³ dans 74 % des logements qui présentent les niveaux les plus faibles de CO₂ et jusqu'à 100 % dans ceux qui présentent plus de 2000 ppm de CO₂. Pour la fraction PM_{2,5}, la proportion qui dépasse la valeur cible de 10 µg/m³ est plus importante : entre 88 % et 100 % suivant le niveau de CO₂. Dans l'étude écoles de l'OQAI, la valeur cible est systématiquement dépassée.

Plus le niveau moyen de CO₂ est élevé, plus la proportion de situations où un polluant dépasse une valeur cible tend à augmenter. Cette proportion dépend également du type d'environnement intérieur considéré. A l'inverse, se placer dans les situations où le niveau de CO₂ est faible réduit la plupart du temps les chances de dépasser une valeur cible, mais sans pour autant les rendre nulles.

Les tests de sensibilité et de spécificité se sont en général avérés les plus performants pour des niveaux de CO₂ plutôt faibles, voisins de 750 ppm. Le cas le plus probant concerne l'acétaldéhyde, pour lequel une bonne discrimination des situations de dépassement sur la base du niveau de CO₂ a été obtenue dans les différents milieux intérieurs.

Pour l'ensemble des polluants, en excluant les résultats obtenus pour un faible nombre d'observations, se situer au-dessus de 750 ppm de CO₂ entraîne une probabilité élevée de dépasser la valeur cible considérée : entre 86 % et 92 % pour le formaldéhyde, 76 % pour l'acétaldéhyde, 80 % pour l'acroléine, 90 % pour le 1,4-dichlorobenzène, 90 % à 95 % respectivement pour les fractions PM₁₀ et PM_{2,5}, et autour de 60 % pour le benzène (par rapport à une VC de 2 µg/m³).

Par contre, si le niveau de CO₂ est inférieur au seuil de 750 ppm, la probabilité que la concentration de polluant soit supérieure à la VC reste en général élevée entre 40 % pour le benzène à plus de 80 % pour le formaldéhyde et la fraction PM_{2,5}. Cette probabilité devient très faible (entre 0,5 % et 7 %) pour le benzène et le 1,4-dichlorobenzène par rapport à une VC respective de 10 et 60 µg/m³.

Au final, l'utilisation d'un seuil de 750 ppm de CO₂ permet d'augmenter de 15 % la probabilité de détecter les situations de dépassement de la VC en acétaldéhyde dans les logements tout en augmentant de 21 % la probabilité de détecter les situations où la VC est respectée. Une augmentation similaire des probabilités est observée pour l'acroléine dans les logements avec respectivement 13 % et 19 %. Pour les autres polluants, le gain par rapport à la prévalence initiale reste inférieur à 10 % dans l'ensemble des situations.

Dans les écoles et crèches, la probabilité de détecter les situations où le formaldéhyde est inférieur à 10 µg/m³ augmente de 33 % lorsque le niveau de CO₂ moyen durant l'occupation est inférieur à 750 ppm par rapport à l'ensemble des situations. A l'inverse, la probabilité de détecter les situations de dépassement de la VC n'est que de 9 %. Pour le benzène, avec une VC de 2 µg/m³, ces mêmes probabilités augmentent respectivement de 14 % et 4 %.

Dans les bureaux, le faible nombre d'observations ne permet pas d'avoir une estimation fine de la prévalence des situations de dépassement. Les résultats observés ne sont par conséquent pas robustes. Pour l'échantillon considéré, la probabilité de détecter un dépassement de la concentration de formaldéhyde ou de benzène (VC = 2 µg/m³) augmente respectivement de 9 % et de 7 %. A l'inverse, la probabilité de respecter la VC n'est pas améliorée.

9 Références

- ANSES (2011) : *Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur, Évolution de la méthode d'élaboration des valeurs guides de qualité d'air intérieur, Rapport et avis*, avril 2011, 79 p. (<http://www.anses.fr/Documents/AIR2010sa0307Ra.pdf>)
- Bouyer J., Hémon D., Cordier S., Derriennic F., Stücker I., Stengel B., Clavel J. (2010), *Chapitre 16 : Choix et évaluation des paramètres caractérisant l'état de santé*, dans *Épidémiologie - Principes et méthodes quantitatives*, Editions INSERM, Tec & Doc, EM Inter, Lavoisier, 498 p.
- Derbez M., Dassonville C. (2011), *Etude pilote de la campagne nationale de connaissance des expositions des enfants dans les écoles, Rapport final, Programme d'études et de recherche de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur*, mars 2011, 142 p. (confidentiel)
- INRS (2005) : *Institut national de recherche et de sécurité, Dioxyde de carbone*, fiche toxicologique FT n° 238, 6 p.
- Kirchner S., Cochet C., Derbez M., Duboudin C., Elias P., Gregoire A., Jédor B., Lucas J.P., Pasquier N., Pigneret M. & Ramalho O. (2007), *Etat de la qualité de l'air dans les logements français, Environnement Risques & Santé*, 6(4), 259-269.
- Kirchner S., Arenes J.F., Cochet C., Derbez M., Duboudin C., Elias P., Gregoire A., Jédor B., Lucas J.P., Pasquier N., Pigneret M., Ramalho O. (2007b), *Observatoire de la qualité de l'air intérieur. Campagne nationale logements : Etat de la qualité de l'air dans les logements français, Rapport final DDD/SB-2006-57*, mai 2007, 183 p. (http://www.oqai.fr/userdata/documents/Document_133.pdf)
- MEDDE (2012) : *Ministère de l'écologie, du développement durable, et de l'énergie, Mesures pour améliorer la qualité de l'air intérieur, Dossier de presse du 6 janvier 2012*, 15 p. (http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DP_Etiquette_COV_et_qualite_de_l_air_interieur.pdf)
- Michelot N., Mandin C., Ramalho O., Ribéron J., Marchand C., Malherbe L., Ramel M., Personnaz M.B., Delmas V., Urban S., Carrega M. (2011), *Campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches en France. Résultats de la première phase, Pollution Atmosphérique*, 53(211), 267-279.
- Ramalho O., Mandin C., Ribéron J., Wyart G. (2012), *Air stuffiness and air exchange rate in French schools and day-care centers, Proceedings of the 10th International conference on Industrial Ventilation*, Paris (France), 17th – 19th September 2012, 6 pages. (<http://www.inrs-ventilation2012.fr/uploads/documents/RamalhoO..pdf>)
- Ribéron J., Ramalho O., Mandin C., Cochet V. (2012), *Guide d'application pour la surveillance du confinement de l'air dans les établissements d'enseignement, d'accueil de la petite enfance et d'accueil de loisirs, Rapport CSTB DESE/Santé N°2012-086R*, mai 2012, 10 pages (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/document130382>)
- RSDD (1985) : *Règlement Sanitaire Départemental Type. Circulaires du 9 août 1978, 26 avril 1982, 20 janvier 1983 et 18 mai 1984. Journal Officiel de la République Française*, n°1448. 1985.
- Seppänen O., Fisk W. & Mendell M. (1999), *Association of ventilation rates and CO₂-concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings, Indoor Air*, 9, 226-252.
- Sundell J., Levin H., Nazaroff W., Cain W. S., Fisk W., Grimsrud D., Gyntelberg F., Li Y., Persily A., Pickering A., Samet J., Spengler J., Taylor S., Weschler C. (2011), *Ventilation Rates and Health: multidisciplinary review of the scientific literature, Indoor Air*, 21, 191-204.

10 Annexes - Rappels statistiques

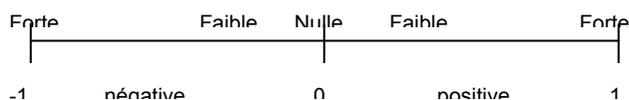
Les rappels statistiques présentés ci-après ont été rédigés à partir des sources suivantes :

- Lebart L., Morineau A., Piron M. (1995), Statistique exploratoire multidimensionnelle, Editions Dunod, 456 p.
- Danzart M. (1998), Partie IV – Statistique, dans Evaluation sensorielle, manuel méthodologique, SSHA 2^{ème} édition, collection sciences et techniques agroalimentaires, Editions Ted & Doc Lavoisier, 353 p.
- Aide en ligne XLSTAT version 2013.2.01 (Addinsoft, France).
- Aide en ligne SPAD version 5.6 (Decisia, France).

10.1 Corrélation linéaire entre deux variables

La mesure de la corrélation correspond à la mesure de la dépendance linéaire de deux variables quelconques, deux variables pouvant être corrélées sans aucun lien de causalité. Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson, aussi noté $r_{(x,y)}$, est ainsi défini comme la covariance des variables standardisées x^s et y^s , soit $r_{(x,y)} = (s_{xy} / s_x s_y)$. Ses valeurs varient de -1 à $+1$, tel que :

Association



$r_{(x,y)} = \pm 1 \leftrightarrow$ relation linéaire parfaite entre les deux variables : $y = ax + b$

$r_{(x,y)} < 0 \leftrightarrow$ les deux variables évoluent en sens contraires

$r_{(x,y)} > 0 \leftrightarrow$ les deux variables évoluent dans le même sens

$r_{(x,y)} = 0 \leftrightarrow$ les deux variables ne sont pas corrélées

A noter que la corrélation de Pearson fonctionne mieux avec des données qui suivent une distribution normale. En effet, il suppose une homogénéité des observations. Il perd tout sens pratique s'il existe des sous-groupes à l'intérieur de la population.

Le coefficient de corrélation de rang de Spearman correspond à la dépendance linéaire de deux variables quelconques, mais pour lesquelles chaque valeur est remplacée par son rang. Une valeur de $+1$ traduit l'identité de l'ordre entre les deux variables, alors que la valeur -1 correspond à un ordre parfaitement inverse entre elles.

10.2 Analyse par composantes principales

L'analyse par composantes principales (ACP) permet de représenter un tableau de données de n observations et p variables quantitatives par un nuage de points dans un espace à p dimensions. Les dimensions ou composantes principales, ou encore axes factoriels, sont orthogonaux deux à deux. Elles synthétisent les corrélations de l'ensemble des variables initiales. La première dimension correspond à la direction qui étire le plus possible le nuage de points, autrement dit la direction de plus grande variance exprimée sous forme de valeur propre ou inertie. Dans le cas d'une ACP normée, la valeur propre d'un axe représente un pouvoir explicatif équivalent à un nombre plus ou moins élevé de variables. Ainsi, un axe avec une valeur propre de 20,3 représente la même variance que 20 variables initiales.

L'ACP peut être considérée comme une méthode de projection qui permet de projeter les observations depuis l'espace à p dimensions des p variables vers un espace à k dimensions ($k < p$) tel qu'un maximum d'information soit conservée (l'information est ici mesurée au travers de la variance totale du nuage de points) sur les premières dimensions. Si l'information associée aux 2 ou 3 premiers axes représente un pourcentage suffisant de la variabilité totale du nuage de points, on pourra représenter les observations sur un graphique à 2 ou 3 dimensions, facilitant ainsi grandement l'interprétation.

L'ACP utilise une matrice indiquant le degré de similarité entre les variables pour calculer des matrices permettant la projection des variables dans le nouvel espace. Il est commun d'utiliser comme indice de similarité le coefficient de corrélation de Pearson (cas d'une ACP normée). L'utilisation du coefficient de corrélation permet de supprimer les effets d'échelle : ainsi une variable variant entre 0 et 1 ne pèse pas plus dans la projection qu'une variable variant entre 0 et 1000.

L'un des avantages de l'ACP est qu'elle fournit à la fois une visualisation optimale des variables et des données. Néanmoins, ces représentations ne sont fiables que si la somme des pourcentages de variabilité associés aux axes de l'espace de représentation, est suffisamment élevée. Si ce pourcentage est élevé (par exemple 80%), on peut considérer que la représentation est fiable. Si le pourcentage est faible, il est conseillé de faire des représentations sur plusieurs couples d'axes afin de valider l'interprétation faite sur les deux premiers axes factoriels.

Les variables sont représentées dans une sphère de corrélation de rayon 1, centrée à l'origine des axes. La représentation des variables dans un plan donné (cercle de corrélation) permet d'interpréter les angles entre les variables car ils sont directement liés aux corrélations entre les variables. Enfin, la projection d'un vecteur variable dans l'espace de représentation est une approximation de l'écart-type de la variable (la longueur du vecteur dans l'espace des k facteurs est égale à l'écart-type de la variable).

Les distances entre les observations sont une approximation de leur distance euclidienne dans l'espace des p variables. Plus deux observations sont proches, plus leur profil ligne (ensemble de valeurs prises pour chaque variable) est proche.

L'analyse des coordonnées des variables pour chaque axe est proportionnelle à leur contribution dans la construction de cet axe. Pour une variable nominale, la contribution est définie par une autre statistique : la valeur-test. Plus cette valeur-test en valeur absolue est différente de 0 (en pratique supérieure à 2), plus la contribution de la variable est importante.

Les variables supplémentaires n'interviennent pas dans la constitution des axes factoriels. Leur représentation est utile lorsque l'on veut représenter des variables à expliquer (supplémentaires) par rapport à des variables explicatives (actives).

10.3 Classification hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification itérative dont le principe est simple. On commence par calculer la dissimilarité entre les N objets. Puis on regroupe les deux objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets. On calcule ensuite la dissimilarité entre cette classe et les $N-2$ autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis, on regroupe les deux objets ou classes d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation. On continue ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés.

Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions.

On peut alors choisir une partition en tronquant l'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant soit des contraintes de l'utilisateur (l'utilisateur sait combien de classes il veut obtenir), soit de critères plus objectifs. La partition permet de constituer plusieurs classes les plus homogènes possibles avec des variances intra-classe minimales.

11 Annexes relatives aux données logements

11.1 Statistiques descriptives des données logements

Tableau 76 : Statistiques de distribution des variables quantitatives de la campagne logements

Variable	Effectif	Moyenne	Ecart-type	Min	P1	P5	P10	P25	Médiane	P75	P90	P95	P99	Max
moy_CO2_occupation	520	929	436	273	374	435	486	620	833	1127	1510	1730	2349	3275
moy_CO2_sem	535	847	367	277	384	440	484	596	762	997	1341	1574	2090	2892
max_CO2_sem	535	2106	1219	491	607	781	926	1214	1734	2675	3802	4606	6000	6000
P95_CO2_sem	535	1638	1001	312	489	601	702	957	1313	2053	3069	3746	5082	6000
Formaldéhyde	554	22.7	12.6	1.3	3.7	7.4	9.4	14.5	19.7	29.0	38.9	45.5	66.7	86.3
Acétaldéhyde	554	14.1	10.5	1.8	2.7	4.2	5.3	7.8	11.5	17.2	24.7	31.8	58.4	94.6
Acroléine	554	1.4	1.2	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.1	1.6	2.5	3.4	5.7	12.9
Benzène	534	2.7	2.5	0.2	0.2	0.6	0.6	1.3	2.0	3.2	5.6	7.0	12.2	22.8
1,4-Dichlorobenzène	534	51.7	253.6	0.04	0.04	0.1	1.0	2.2	4.1	12.3	77.5	243.9	752.6	4809.8
PM ₁₀	297	53.6	64.1	1.6	10.3	14.2	17.0	22.0	31.3	56.8	104.6	182.4	333.7	522.6
PM _{2.5}	286	37.0	52.1	1.2	6.8	9.5	10.7	14.0	19.1	34.8	68.3	133.9	222.2	567.7
Formaldéhyde_EXT	529	2.1	1.1	0.3	0.6	0.6	1.1	1.5	1.9	2.5	3.2	3.7	5.3	15.4
Acétaldéhyde_EXT	529	1.4	1.0	0.2	0.2	0.5	0.6	0.9	1.3	1.7	2.4	2.9	5.0	12.4
Acroléine_EXT	529	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.5	0.9	1.8
Benzène_EXT	508	1.2	0.9	0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	0.6	1.6	2.2	2.9	4.4	7.0
1,4-Dichlorobenzène_EXT	508	1.9	2.8	0.04	0.04	0.04	0.1	0.9	1.7	2.2	3.2	4.2	8.1	52.1
Formaldéhyde_ppb	550	18.5	10.4	1.0	3.0	5.9	7.7	11.7	16.0	23.6	31.6	37.7	54.9	70.8
Acétaldéhyde_ppb	550	7.8	5.8	1.0	1.5	2.3	2.9	4.3	6.3	9.6	13.7	17.8	32.2	51.8
Acroléine_ppb	550	0.6	0.5	0.02	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.1	1.5	2.5	5.5
Benzène_ppb	536	0.8	0.8	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.6	1.0	1.7	2.1	3.8	7.1
Dichlorobenzène_ppb	536	8.6	42.3	0.01	0.01	0.02	0.2	0.4	0.7	2.1	13.4	39.7	125.1	804.8
Formaldéhyde_ext_ppb	529	1.6	0.9	0.2	0.4	0.4	0.9	1.2	1.5	2.0	2.5	2.9	4.3	11.8
Acétaldéhyde_ext_ppb	529	0.8	0.5	0.1	0.1	0.3	0.3	0.5	0.7	0.9	1.3	1.5	2.7	6.8
Acroléine_ext_ppb	529	0.1	0.1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.8
Benzène_ext_ppb	517	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.5	0.7	0.9	1.4	2.1
Dichlorobenzène_ext_ppb	517	0.3	0.4	0.01	0.01	0.01	0.02	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.2	8.1

Variable	Effectif	Moyenne	Ecart-type	Min	P1	P5	P10	P25	Médiane	P75	P90	P95	P99	Max
diff_Formaldéhyde_ppb	519	16.8	10.5	0.1	1.5	4.3	5.9	9.7	14.1	21.9	30.2	35.9	54.2	68.0
diff_Acétaldéhyde_ppb	519	7.0	5.7	-2.0	0.6	1.6	2.4	3.7	5.5	8.6	12.7	16.3	30.6	51.1
diff_Acroléine_ppb	519	0.5	0.5	-0.5	-0.02	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.3	2.2	5.3
diff_Benzène_ppb	500	0.5	0.8	-0.7	-0.4	-0.04	0	0.1	0.3	0.6	1.2	1.9	3.5	7.0
diff_Dichlorobenzène_ppb	500	8.4	43.4	-0.6	-0.03	0	0.02	0.1	0.3	1.5	13.1	39.2	129.5	804.3
log_Formaldéhyde_ppb	550	2.8	0.6	0.02	1.1	1.8	2.0	2.5	2.8	3.2	3.5	3.6	4.0	4.3
log_Acétaldéhyde_ppb	550	1.9	0.6	-0.02	0.4	0.8	1.1	1.5	1.8	2.3	2.6	2.9	3.5	3.9
log_Acroléine_ppb	546	-0.8	0.7	-2.8	-2.7	-2.0	-1.6	-1.2	-0.8	-0.4	0.1	0.4	0.9	1.7
log_Benzène_ppb	529	-0.5	0.8	-1.8	-1.8	-1.8	-1.8	-0.8	-0.4	0.0	0.5	0.8	1.3	2.0
log_Dichlorobenzène_ppb	527	0.0	1.8	-3.9	-3.9	-2.5	-1.5	-0.9	-0.4	0.8	2.6	3.7	4.8	6.7
log_Formaldéhyde_ppb_ext	527	0.4	0.5	-0.9	-0.9	-0.8	-0.2	0.1	0.4	0.7	0.9	1.1	1.5	2.5
log_Acétaldéhyde_ppb_ext	523	-0.4	0.5	-2.2	-2.1	-1.1	-1.0	-0.7	-0.4	-0.1	0.2	0.4	1.0	1.9
log_Acroléine_ppb_ext	416	-2.5	0.5	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.1	-1.8	-1.4	-1.0	-0.3
log_Benzène_ppb_ext	480	-1.2	0.6	-1.8	-1.8	-1.8	-1.8	-1.8	-1.1	-0.7	-0.4	-0.1	0.4	0.8
log_Dichlorobenzène_ppb_ext	490	-1.5	1.0	-3.9	-3.9	-3.9	-3.9	-1.8	-1.3	-1.0	-0.7	-0.4	0.3	2.1
log_diff_Formaldéhyde_ppbt	519	2.6	0.7	-2.3	0.4	1.5	1.8	2.3	2.6	3.1	3.4	3.6	4.0	4.2
log_diff_Acétaldéhyde_ppb	518	1.7	0.7	-1.2	-0.4	0.5	0.9	1.3	1.7	2.2	2.5	2.8	3.4	3.9
log_diff_Acroléine_ppb	503	-1.0	0.8	-4.6	-3.0	-2.3	-1.8	-1.4	-0.9	-0.5	-0.02	0.3	0.8	1.7
log_diff_Benzène_ppb	415	-1.1	1.2	-4.6	-4.6	-3.3	-2.5	-1.7	-1.1	-0.4	0.3	0.7	1.4	1.9
log_diff_Dichlorobenzène_ppb	458	-0.4	2.1	-4.6	-4.6	-3.2	-2.7	-1.8	-0.9	0.6	2.7	3.7	4.9	6.7
Température (°C)	493	20.8	2.9	5.4	12.6	15.9	17.3	19.1	20.7	22.6	24.2	25.3	27.1	29.1
Température_Ext (°C)	567	11.1	6.0	-3.7	-1.3	2.3	3.7	6.3	10.6	15.9	19.5	20.9	23.6	25.1
Humidité spécifique (g/kg)	491	7.4	1.6	2.9	3.7	5.0	5.3	6.1	7.2	8.5	9.6	10.1	11.1	12.1
Taux de renouvellement d'air moyen (vol/h)	450	0.76	0.83	0.04	0.09	0.15	0.19	0.31	0.54	0.92	1.45	2.02	4.58	7.57
Taux de renouvellement d'air nocturne minimum (vol/h)	450	0.65	0.87	0.05	0.07	0.11	0.15	0.26	0.44	0.66	1.28	1.76	5.17	9.40
Volume logement (m ³)	567	300.1	216.5	17.5	59.2	99.9	120.9	180.0	250.0	360.0	500.0	646.8	1110	2450

Variable	Effectif	Moyenne	Ecart-type	Min	P1	P5	P10	P25	Médiane	P75	P90	P95	P99	Max
Nombre moyen d'occupants dans la chambre en semaine	515	1.4	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.6	1.9	2.7	5.0
Nombre moyen d'occupants dans le séjour en semaine	505	1.8	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.3	1.6	2.2	2.7	3.0	3.4	5.4
Durée cumulée d'occupation de la chambre par au moins un individu sur la semaine (min)	515	3890	1132	180	470	1971	2634	3425	3920	4445	5080	5536	6917	8670
Durée cumulée d'occupation du séjour par au moins un individu sur la semaine (min)	505	2797	1585	30	120	522	854	1710	2710	3680	4676	5698	7617	8700
Durée cumulée d'occupation de la chambre par au moins un individu sur le temps de programmation (min)	508	1256	575	10	20	364	661	960	1195	1520	1883	2277	3175	3970
Durée cumulée d'occupation du séjour par au moins un individu sur le temps de programmation (min)	501	1283	824	30	50	210	320	660	1130	1790	2510	2860	3400	4040

11.2 Données logements : caractérisation des 3 classes de partition par les variables

CLASSE 1 / 3 (Effectif: 176 - Pourcentage: 31.04)

Libellés des variables	Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans l'échantillon	% de la classe dans la modalité	Valeur-Test	Probabilité	Poids
Période_Chauffe	Hors Chauffage	76.14	31.92	74.03	15.04	0.000	181
saison	Eté	93.75	53.44	54.46	13.78	0.000	303
Utilisation_cheminée	non	99.43	86.60	35.64	6.96	0.000	491
CO _{max} > 3	≤ 3 ppm	61.36	50.79	37.50	3.30	0.000	288
CO _{max} > 3	> 3 ppm	34.09	43.74	24.19	-3.03	0.001	248
Utilisation_cheminée	oui	0.57	13.40	1.32	-6.96	0.000	76
saison	Hiver	2.84	40.92	2.16	-13.64	0.000	232
Période_Chauffe	Chauffe	23.86	68.08	10.88	-15.04	0.000	386
Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
Température_ext		17.7	11.1	3.3	6.0	17.65	0.000
Humidite_spécifique		8.9	7.4	1.2	1.6	14.76	0.000
Température int		23.3	20.8	1.8	2.9	13.70	0.000
Formaldéhyde		28.4	22.7	15.2	12.6	7.13	0.000
TRA moyen		1.1	0.8	1.2	0.8	6.63	0.000
diff_Formaldéhyde_ppb		21.3	16.8	12.9	10.4	6.62	0.000
Formaldéhyde_ext		2.5	2.1	1.0	1.1	5.99	0.000
TRA nocturne		1.0	0.7	1.3	0.9	5.38	0.000
Acétaldéhyde_ext		1.6	1.4	1.2	1.0	2.66	0.004
DuréeOccup_sejour_min		2510.5	2797.4	1485.6	1583.6	-2.81	0.002
CO _{max} 15 (ppm)		3.3	5.1	7.3	9.6	-3.00	0.001
diff_Benzène_ppb		0.3	0.5	0.5	0.8	-3.11	0.001

Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
diff_Acroléine_ppb		0.4	0.5	0.3	0.5	-3.17	0.001
PM _{2,5}		22.4	37.0	16.7	52.0	-3.38	0.000
CO ₂ _max_sem		1817.0	2105.6	1092.2	1217.9	-3.74	0.000
PM ₁₀		33.2	53.6	19.7	64.0	-3.85	0.000
Acroléine		1.0	1.4	0.6	1.2	-4.27	0.000
Benzène_ext		0.9	1.2	0.8	0.9	-4.34	0.000
Benzène		1.9	2.7	1.6	2.5	-5.09	0.000
Acétaldéhyde		10.7	14.1	5.1	10.5	-5.13	0.000
diff_Acétaldéhyde_ppb		5.1	7.0	2.8	5.7	-5.13	0.000
CO ₂ _moyen_occupation		784.2	928.9	373.6	435.8	-5.20	0.000
Acroléine_ext		0.1	0.2	0.1	0.2	-5.28	0.000
CO ₂ _moyen_sem		717.0	847.5	309.0	367.1	-5.60	0.000

CLASSE 2 / 3 (Effectif: 309 - Pourcentage: 54.50)

Libellés des variables	Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans l'échantillon	% de la classe dans la modalité	Valeur-Test	Probabilité	Poids
CHAUFFE	Chauffe	88.03	68.08	70.47	11.28	0.000	386
saison	Hiver	59.55	40.92	79.31	10.02	0.000	232
Utilisation_cheminée	oui	22.65	13.40	92.11	7.52	0.000	76
FUMEUR_Logement	non	73.46	67.37	59.42	3.29	0.000	382
FUMEUR_Logement	oui	26.54	32.63	44.32	-3.29	0.000	185
Utilisation_cheminée	non	77.35	86.60	48.68	-7.52	0.000	491
saison	Eté	34.30	53.44	34.98	-10.09	0.000	303
CHAUFFE	Hors Chauffe	11.97	31.92	20.44	-11.28	0.000	181

Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
Benzène		2.4	2.7	1.8	2.5	-2.74	0.003
diff_Benzène_ppb		0.4	0.5	0.5	0.8	-2.85	0.002
PM _{2,5}		28.7	37.0	27.5	52.0	-2.91	0.002
TRA nocturne		0.5	0.7	0.5	0.9	-3.19	0.001
TRA hebdomadaire		0.6	0.8	0.5	0.8	-4.14	0.000
Acétaldéhyde_ext		1.2	1.4	0.6	1.0	-5.48	0.000
diff_Acétaldéhyde_ppb		5.7	7.0	3.1	5.7	-5.56	0.000
Acétaldéhyde		11.5	14.1	5.6	10.5	-6.42	0.000
Acroléine		1.0	1.4	0.5	1.2	-6.67	0.000
diff_Acroléine_ppb		0.4	0.5	0.2	0.5	-6.84	0.000
Formaldéhyde_ext		1.7	2.1	0.8	1.1	-7.53	0.000
diff_Formaldéhyde_ppb		13.1	16.8	6.8	10.4	-8.75	0.000
Formaldéhyde		18.0	22.7	8.5	12.6	-9.45	0.000
Température int		19.5	20.8	2.5	2.9	-10.51	0.000
Humidite_spécifique		6.4	7.4	1.2	1.6	-13.32	0.000
Température ext		7.8	11.1	4.3	6.0	-14.11	0.000

CLASSE 3 / 3 (Effectif: 82 - Pourcentage: 14.46)

Libellés des variables	Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans l'échantillon	% de la classe dans la modalité	Valeur-Test	Probabilité	Poids
FUMEUR_Logement	oui	64.63	32.63	28.65	6.34	0.000	185
CO _{max} > 3	> 3 ppm	71.95	43.74	23.79	5.46	0.000	248
CHAUFFE	Chauffe	87.80	68.08	18.65	4.29	0.000	386
saison	Eté	39.02	53.44	10.56	-2.71	0.003	303
CHAUFFE	Hors Chauffe	12.20	31.92	5.52	-4.29	0.000	181
CO _{max} > 3	≤ 3 ppm	23.17	50.79	6.60	-5.40	0.000	288
FUMEUR_Logement	non	35.37	67.37	7.59	-6.34	0.000	382

Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
Acétaldéhyde		30.9	14.1	15.6	10.5	15.68	0.000
Acroléine		3.1	1.4	1.9	1.2	14.93	0.000
diff_Acétaldéhyde_ppb		16.0	7.0	8.8	5.7	14.71	0.000
diff_Acroléine_ppb		1.2	0.5	0.8	0.5	13.95	0.000
Benzène		5.4	2.7	4.1	2.5	10.48	0.000
PM _{2.5}		109.6	37.0	104.6	52.0	9.08	0.000
diff_Benzène_ppb		1.2	0.5	1.4	0.8	8.23	0.000
PM ₁₀		128.6	53.6	109.3	64.0	7.95	0.000
CO ₂ _moyen_sem		1122.2	847.5	478.7	367.1	6.98	0.000
Acroléine_ext		0.3	0.2	0.3	0.2	6.19	0.000
Benzène_ext		1.8	1.2	1.3	0.9	6.15	0.000
CO ₂ _max_sem		2799.5	2105.6	1336.5	1217.9	5.32	0.000
CO ₂ _moyen_occup		1177.9	928.9	482.9	435.8	5.30	0.000
DuréeOccup_sejour_min		3628.1	2797.4	1718.6	1583.6	4.61	0.000
Acétaldéhyde_ext		1.9	1.4	1.3	1.0	4.28	0.000
Formaldéhyde		27.8	22.7	12.6	12.6	3.96	0.000
diff_Formaldéhyde_ppb		20.9	16.8	10.6	10.4	3.69	0.000
CO _{max} 15		8.8	5.1	8.7	9.6	3.67	0.000
Formaldéhyde_ext		2.4	2.1	1.9	1.1	2.78	0.003
TRA nocturne		0.4	0.7	0.3	0.9	-2.75	0.003
TRA hebdomadaire		0.5	0.8	0.3	0.8	-3.09	0.001
Température ext		9.1	11.1	4.3	6.0	-3.24	0.001
Température int		19.7	20.8	2.4	2.9	-3.37	0.000

12 Annexes relatives aux données écoles et crèches (2009-2011)

12.1 Statistiques descriptives globales des données de la campagne pilote de surveillance.

GLOBAL	Moy(CO2) occup	Moy CO2	Max CO2	P95 CO2	FORM int	BENZ int	BENZ ext	Diff BENZ	TEMP int	HR int	TEMP ext	HR ext	Hspec int	Hspec ext	N enfants	Volume	TRA nocturne
Effectif	899	1153	1302	1011	1353	1335	1297	1287	1352	1150	1331	958	1150	958	704	726	471
Moyenne	1132	736	2255	1640	18	2.5	1.8	0.23	21.3	48.3	10.7	74.0	7.8	6.7	21	164	0.16
Ecart-type	459	236	985	702	13	1.3	0.9	0.32	2.7	11.1	7.5	13.5	2.8	3.3	6	51	0.15
Min	303	296	368	343	1.6	0.2	0.1	-0.80	14.0	20.0	-6.0	19.0	3.2	1.7	3	17	0.03
P1	371	347	453	408	2.8	0.9	0.2	-0.40	16.5	24.5	-3.0	27.6	3.9	2.6	4	28	0.03
P5	437	407	676	485	5.1	1.2	0.5	-0.16	18.0	31.0	0.0	55.0	4.6	3.0	9	64	0.05
P10	572	467	1007	735	7.0	1.4	0.9	-0.03	18.0	34.0	2.0	60.0	5.2	3.5	12	106	0.06
P25	806	569	1537	1155	11	1.8	1.2	0.10	19.9	41.0	5.0	64.0	6.2	4.7	18	147	0.08
P50	1059	698	2176	1579	16	2.2	1.6	0.20	21.0	47.2	10.0	76.0	7.3	6.1	22	165	0.12
P75	1435	864	2878	2076	23	2.8	2.2	0.32	22.7	55.0	15.2	85.0	8.6	7.9	25	185	0.20
P90	1739	1044	3595	2590	32	3.7	2.9	0.50	24.6	62.1	20.0	89.2	9.8	9.2	27	217	0.30
P95	1936	1162	4054	2924	39	4.1	3.4	0.62	27.0	71.5	26.0	91.3	15.2	15.1	28	239	0.40
P99	2449	1454	4731	3427	64	5.8	4.3	1.01	30.0	75.0	29.0	96.0	18.4	18.5	31	275	0.87
Max	2747	1953	5000	4056	181	21.7	6.3	4.80	33.0	85.0	32.0	98.0	19.3	18.5	36	484	1.28

12.2 Statistiques descriptives hivernales des données de la campagne pilote de surveillance.

Hiver	Moy(CO2) occup	Moy CO2	Max CO2	P95 CO2	FORM int	BENZ int	BENZ ext	Diff BENZ	TEMP int	HR int	TEMP ext	HR ext	Hspec int	Hspec ext	N enfants	Volume	TRA nocturne
Effectif	422	739	788	599	811	800	786	778	810	646	799	468	646	468	339	361	289
Moyenne	1320	793	2461	1835	18	2.8	1.9	0.3	20.1	44.4	5.8	82.0	6.5	4.7	20	163	0.17
Ecart-type	455	240	927	656	12	1.4	0.9	0.3	1.8	9.6	3.9	10.5	1.3	1.1	6	53	0.16
Min	465	337	742	535	3.0	0.7	0.0	-0.8	14.0	20.0	-6.0	34.0	3.2	1.7	3	17	0.03
P1	533	416	906	677	5.0	1.3	0.2	-0.1	16.0	22.5	-3.0	53.0	3.7	2.3	4	26	0.04
P5	691	487	1183	939	6.6	1.6	0.4	0.0	17.0	29.4	-2.0	60.0	4.3	2.9	6	59	0.05
P10	784	532	1344	1076	8.0	1.8	0.6	0.1	18.0	32.0	1.0	61.0	4.7	3.1	12	96	0.06
P25	957	622	1754	1333	11	2.1	1.3	0.2	19.0	37.0	3.0	79.0	5.5	4.0	18	146	0.08
P50	1254	748	2341	1768	15	2.6	1.7	0.3	20.0	45.0	6.0	85.0	6.4	4.7	21	165	0.12
P75	1619	917	3042	2223	22	3.3	2.4	0.4	21.0	51.4	9.0	89.0	7.4	5.4	25	186	0.20
P90	1913	1102	3800	2753	29	3.9	3.1	0.6	22.0	57.0	10.7	91.3	8.1	6.1	26	217	0.30
P95	2160	1234	4326	3061	36	4.6	3.5	0.7	23.0	60.0	11.2	92.9	8.7	6.4	28	240	0.39
P99	2534	1552	4829	3519	52	6.5	4.5	1.1	24.4	64.0	14.0	98.0	9.2	7.2	31	274	0.99
Max	2690	1953	5000	4056	181	21.7	6.3	4.8	26.0	67.0	19.0	98.0	10.3	8.3	33	484	1.28

12.3 Statistiques descriptives estivales des données de la campagne pilote de surveillance.

Eté	Moy(CO2) occup	Moy CO2	Max CO2	P95 CO2	FORM int	BENZ int	BENZ ext	Diff BENZ	TEMP int	HR int	TEMP ext	HR ext	Hspec int	Hspec ext	N enfants	Volume	TRA nocturne
Effectif	417	329	417	329	445	438	416	414	445	436	435	428	436	428	317	317	181
Moyenne	1044	695	2222	1565	22	1.9	1.6	0.1	22.2	50.4	16.0	65.2	8.3	7.5	21	166	0.16
Ecart-type	360	167	856	578	12	0.8	0.6	0.3	1.7	8.3	3.0	11.9	1.2	1.5	6	50	0.13
Min	404	404	714	602	3.8	0.2	0.4	-0.5	18.0	26.0	0.0	19.0	4.2	2.6	3	20	0.03
P1	501	425	809	643	5.4	0.8	0.4	-0.3	19.0	32.4	10.0	19.0	5.8	2.6	4	29	0.03
P5	560	481	1002	764	8.0	1.1	0.8	-0.2	20.0	39.0	11.0	47.0	6.5	5.0	10	80	0.05
P10	642	516	1151	891	9.4	1.2	0.9	-0.1	20.0	41.0	13.0	55.0	6.9	5.9	12	109	0.05
P25	780	566	1561	1149	14	1.5	1.1	0.0	21.0	44.6	14.0	60.0	7.4	6.7	18	149	0.08
P50	972	672	2108	1443	19	1.8	1.5	0.1	22.0	49.0	16.0	66.0	8.1	7.5	22	165	0.11
P75	1261	804	2829	1972	27	2.2	1.9	0.2	23.0	56.0	18.0	73.0	9.1	8.5	25	190	0.18
P90	1516	944	3447	2376	37	2.6	2.3	0.3	24.0	61.0	19.0	78.0	9.8	9.2	27	219	0.29
P95	1696	993	3725	2645	42	2.9	2.6	0.4	25.3	65.0	21.0	83.7	10.6	9.5	28	237	0.48
P99	2009	1170	4424	3060	68	4.1	4.3	0.9	26.1	73.7	23.0	90.0	11.6	10.3	30	275	0.73
Max	2747	1252	4805	3363	98	11.3	4.3	3.2	28.8	75.0	24.0	91.0	11.6	13.5	35	456	0.84

12.4 Statistiques descriptives des données de la campagne pilote de surveillance en outremer.

Outremer	Moy(CO2) occup	Moy CO2	Max CO2	P95 CO2	FORM int	BENZ int	BENZ ext	Diff BENZ	TEMP int	HR int	TEMP ext	HR ext	Hspec int	Hspec ext	N enfants	Volume	TRA nocturne
Effectif	60	85	97	83	97	97	95	95	97	68	97	62	68	62	48	48	1
Moyenne	428	408	723	535	9	1.7	1.8	0.0	27.9	72.7	27.1	74.7	17.2	17.0	21	156	0.26
Ecart-type	87	71	442	252	13	0.5	0.9	0.3	2.0	4.1	2.3	3.6	1.4	1.4	5	30	--
Min	303	296	368	343	1.6	0.0	0.4	-0.7	21.0	64.0	21.0	67.0	14.1	14.4	10	111	0.26
P1	321	309	380	354	1.6	0.7	0.4	-0.6	22.9	64.5	22.9	67.0	14.3	14.4	10	111	0.26
P5	342	333	407	372	2.4	0.9	0.4	-0.5	24.0	65.4	23.0	67.0	14.6	14.4	10	115	0.26
P10	362	342	439	397	2.6	1.1	1.0	-0.4	26.0	67.0	24.0	70.0	15.0	14.6	15	115	0.26
P25	384	368	492	424	3	1.4	1.3	-0.3	27.0	71.9	26.0	73.0	16.5	15.7	20	132	0.26
P50	411	397	579	463	4	1.6	1.8	0.0	28.0	73.0	27.0	76.0	17.8	17.6	23	165	0.26
P75	440	440	743	551	8	2.1	2.3	0.1	29.0	74.0	29.0	76.0	18.2	18.4	23	170	0.26
P90	492	475	1082	711	17	2.3	3.4	0.2	30.0	78.3	29.0	80.8	18.7	18.5	26	180	0.26
P95	560	500	1683	843	23	2.5	3.4	0.3	30.2	79.7	31.0	81.0	19.0	18.5	26	180	0.26
P99	764	611	2400	1583	70	2.8	3.9	0.6	32.0	83.7	32.0	81.0	19.3	18.5	36	246	0.26
Max	834	864	2845	2265	86	3.1	3.9	0.6	33.0	85.0	32.0	81.0	19.3	18.5	36	246	0.26

12.5 Données Ecoles et crèches : caractérisation des 5 classes de partition par les variables

CLASSE 1 / 5 (Effectif: 498 - Pourcentage: 36.73)

Libellés des variables	Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans l'échantillon	% de la classe dans la modalité	Valeur-Test	Probabilité	Poids
Saison	Hiver	87.35	64.97	49.38	13.72	0.00	881
Phase	1 (2009-2010)	40.56	29.94	49.75	6.39	0.00	406
Type_Ecoles	Elémentaires	62.05	56.86	40.08	2.89	0.00	771
Type_Ecoles	Crèches	16.47	21.24	28.47	-3.25	0.00	288
Phase	2 (2010-2011)	59.44	70.06	31.16	-6.39	0.00	950
Saison	Eté	12.65	35.03	13.26	-13.72	0.00	475
Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
Log_diff_Benzène		-0.51	-0.68	0.24	0.40	12.42	0.00
HR_ext		81.98	74.04	10.16	13.53	12.17	0.00
Diff_benzène_ppb		0.35	0.23	0.21	0.32	10.42	0.00
Moy(CO2)_occupation		1274.35	1132.13	437.03	459.04	6.29	0.00
P95_CO2		1776.80	1640.14	604.29	701.67	4.89	0.00
max_CO2		2404.62	2254.65	877.14	984.36	4.23	0.00
Volume		175.96	164.36	64.90	56.20	4.03	0.00
moy_CO2		769.52	736.38	225.06	235.81	3.82	0.00
TRA_nuit		0.19	0.16	0.19	0.15	2.84	0.00
Benzène		2.30	2.45	0.56	1.27	-3.33	0.00
Benzène_ppb		0.71	0.76	0.18	0.39	-3.47	0.00
Log_Formaldéhyde_ppb		1.05	1.09	0.20	0.27	-3.73	0.00

Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
Formaldéhyde		15.64	18.34	7.39	12.55	-6.00	0.00
Formaldéhyde_ppb		12.54	14.77	5.90	10.12	-6.15	0.00
HR_int		45.52	48.34	8.60	11.14	-6.25	0.00
Hum_Spec_ext		5.28	6.71	1.28	3.30	-9.01	0.00
Hum_Spec_int		6.63	7.79	1.16	2.83	-10.15	0.00
T_int		20.06	21.34	1.86	2.74	-12.96	0.00
T_ext		6.84	10.67	4.17	7.50	-14.08	0.00
Benzène_ext		1.21	1.76	0.49	0.86	-17.43	0.00
Log_Benzène_ext_ppb		-0.50	-0.34	0.27	0.25	-17.76	0.00
Benzène_ext_ppb		0.35	0.52	0.14	0.26	-17.93	0.00

CLASSE 2 / 5 (Effectif: 470 - Pourcentage: 34.66)

Libellés des variables	Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans l'échantillon	% de la classe dans la modalité	Valeur-Test	Probabilité	Poids
Saison	Eté	77.23	35.03	76.42	24.01	0.00	475
Phase	2 (2010-2011)	84.04	70.06	41.58	8.40	0.00	950
Phase	1 (2009-2010)	15.96	29.94	18.47	-8.40	0.00	406
Saison	Hiver	22.77	64.97	12.15	-24.01	0.00	881
Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
T_ext		15.95	10.67	4.49	7.50	18.72	0.00
Formaldéhyde_ppb		19.63	14.77	13.32	10.12	12.89	0.00
Log_Formaldéhyde_ppb		1.22	1.09	0.26	0.27	12.75	0.00
Formaldéhyde		24.30	18.34	16.49	12.55	12.74	0.00
T_int		22.18	21.34	2.31	2.74	8.28	0.00

Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
HR_int		51.75	48.34	7.91	11.14	7.91	0.00
Hum_spec_int		8.41	7.79	1.25	2.83	5.67	0.00
Hum_spec_ext		7.45	6.71	1.59	3.30	5.59	0.00
P95_CO2		1564.94	1640.14	676.25	701.67	-2.44	0.01
Moy(CO2)_occupation		1085.19	1132.13	397.71	459.04	-2.55	0.01
moy_CO2		701.44	736.38	226.53	235.81	-3.42	0.00
Benzène_ext_ppb		0.47	0.52	0.16	0.26	-5.12	0.00
Benzène_ext		1.57	1.76	0.50	0.86	-5.92	0.00
Diff_benzène_ppb		0.09	0.23	0.15	0.32	-11.58	0.00
Benzène_ppb		0.56	0.76	0.15	0.39	-13.28	0.00
Benzène		1.81	2.45	0.46	1.27	-13.42	0.00
HR_ext		65.62	74.04	12.30	13.53	-15.66	0.00
Log_diff_Benzène		-0.98	-0.68	0.39	0.40	-16.50	0.00
Log_Benzène_ppb		-0.27	-0.16	0.13	0.17	-17.33	0.00

CLASSE 3 / 5 (Effectif: 6 - Pourcentage: 0.44)

Libellés des variables	Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans l'échantillon	% de la classe dans la modalité	Valeur-Test	Probabilité	Poids
Aucune							
Benzène		14.57	2.45	4.32	1.27	23.38	0.00
Benzène_ppb		4.50	0.76	1.32	0.39	23.36	0.00
Diff_benzène_ppb		3.45	0.23	0.78	0.32	22.49	0.00
Log_Benzène_ppb		0.64	-0.16	0.13	0.17	11.40	0.00
Log_diff_Benzène		0.53	-0.68	0.10	0.40	6.87	0.00

CLASSE 4 / 5 (Effectif: 315 - Pourcentage: 23.23)

Libellés des variables	Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans l'échantillon	% de la classe dans la modalité	Valeur-Test	Probabilité	Poids
Saison	Hiver	94.60	64.97	33.83	13.90	0.00	881
Type_Ecoles	Crèches	28.89	21.24	31.60	3.63	0.00	288
Phase	1 (2009-2010)	37.78	29.94	29.31	3.35	0.00	406
Type_Ecoles	Elémentaire	49.84	56.86	20.36	-2.80	0.00	771
Phase	2 (2010-2011)	62.22	70.06	20.63	-3.35	0.00	950
Saison	Eté	5.40	35.03	3.58	-13.90	0.00	475
Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
Benzène_ext		2.82	1.76	0.72	0.86	24.67	0.00
Benzène_ext_ppb		0.82	0.52	0.22	0.26	23.57	0.00
Log_Benzène_ppb		0.03	-0.16	0.10	0.17	22.03	0.00
Log_Benzène_ext_ppb		-0.10	-0.34	0.11	0.25	19.27	0.00
Benzène		3.57	2.45	0.91	1.27	17.76	0.00
Benzène_ppb		1.10	0.76	0.28	0.39	17.66	0.00
nb_enfants		30.06	23.94	24.53	15.63	5.54	0.00
HR_ext		77.94	74.04	13.09	13.53	4.78	0.00
moy_CO2		792.39	736.38	227.27	235.81	4.55	0.00
Log_diff_Benzène		-0.59	-0.68	0.32	0.40	4.49	0.00
P95_CO2		1792.07	1640.14	702.69	701.67	3.65	0.00
Moy(CO2)_occupation		1238.53	1132.13	453.58	459.04	3.55	0.00
max_CO2		2418.80	2254.65	969.47	984.36	3.31	0.00
Diff_benzène_ppb		0.27	0.23	0.24	0.32	2.57	0.01
Formaldéhyde		16.52	18.34	8.75	12.55	-2.93	0.00

Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
Formaldéhyde_ppb		13.28	14.77	7.04	10.12	-2.98	0.00
Volume		151.26	164.36	50.48	56.20	-3.25	0.00
T_int		20.54	21.34	1.83	2.74	-5.86	0.00
Hum_spec_int		6.14	7.79	1.42	2.83	-10.61	0.00
Hum_spec_ext		4.42	6.71	1.32	3.30	-11.55	0.00
HR_int		40.94	48.34	9.33	11.14	-12.10	0.00
T_ext		5.17	10.67	4.89	7.50	-14.88	0.00

CLASSE 5 / 5 (Effectif: 67 - Pourcentage: 4.94)

Libellés des variables	Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans l'échantillon	% de la classe dans la modalité	Valeur-Test	Probabilité	Poids
Etat_porte	1 (ouverte)	59.70	26.33	11.20	5.79	0.00	357
Phase	2 (2010-2011)	89.55	70.06	6.32	3.72	0.00	950
Phase	1 (2009-2010)	10.45	29.94	1.72	-3.72	0.00	406
Etat_porte	2 (fermée)	8.96	38.79	1.14	-5.49	0.00	526
Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
Hum_spec_int		17.22	7.79	1.37	2.83	28.08	0.00
Hum_spec_ext		16.98	6.71	1.43	3.30	25.31	0.00
T_int		28.47	21.34	1.12	2.74	21.87	0.00
T_ext		27.79	10.67	1.41	7.50	19.17	0.00
HR_int		72.76	48.34	4.12	11.14	18.48	0.00
Benzène_ext_ppb		0.66	0.52	0.30	0.26	4.37	0.00
Log_Benzène_ext_ppb		-0.24	-0.34	0.25	0.25	3.09	0.00

Variables caractéristiques		Moyenne dans la classe	Moyenne générale	Ecart-type dans la classe	Ecart-type général	Valeur-Test	Probabilité
Benzène_ext		2.06	1.76	0.95	0.86	2.82	0.00
Benzène_ppb		0.53	0.76	0.19	0.39	-4.82	0.00
Benzène		1.69	2.45	0.58	1.27	-5.03	0.00
Log_diff_Benzène		-1.10	-0.68	0.59	0.40	-5.73	0.00
Log_Benzène_ppb		-0.29	-0.16	0.14	0.17	-6.46	0.00
Formaldéhyde_ppb		4.31	14.77	3.46	10.12	-8.67	0.00
Formaldéhyde		5.22	18.34	4.18	12.55	-8.77	0.00
Diff_benzène_ppb		-0.12	0.23	0.27	0.32	-9.10	0.00
moy_CO2		407.58	736.38	77.40	235.81	-10.59	0.00
Moy(CO2)_occupation		427.98	1132.13	86.53	459.04	-12.29	0.00
P95_CO2		508.38	1640.14	264.09	701.67	-12.30	0.00
max_CO2		634.25	2254.65	347.43	984.36	-13.83	0.00
Log_Formaldéhyde_ppb		0.54	1.09	0.26	0.27	-16.87	0.00

13 Annexes relatives aux données écoles (OQAI, 2010)

13.1 Données écoles (OQAI, 2010) : Statistiques descriptives des variables

Tableau 66 : Statistiques de distribution des variables quantitatives de la campagne pilote écoles (OQAI)

Variable	Effectif	Moyenne	Ecart-type	Min	P1	P5	P10	P25	Médiane	P75	P90	P95	P99	Max
moy_co2	50	788	269	477	477	509	511	582	707	917	1136	1200	1878	1878
moy_co2_08h-17h	50	1164	375	626	626	658	686	846	1084	1516	1703	1880	1940	1940
max_co2	50	2500	842	1119	1119	1250	1394	1881	2354	3138	3757	3891	4596	4596
P95_co2	50	1734	560	833	833	881	998	1274	1647	2186	2516	2615	2826	2826
Formaldéhyde	51	25.1	14.8	6.8	6.8	10.4	11.9	15.7	19.2	30.7	50.7	62.4	66.2	66.2
Acétaldéhyde	51	6.3	2.1	2.7	2.7	3.5	3.9	4.3	6.1	8.1	9.0	10.2	10.7	10.7
Benzène	41	2.1	2.2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.4	1.6	6.8	7.7	8.5	8.5
Benzène_ext	42	1.6	1.9	0.1	0.1	0.1	0.2	0.7	0.9	1.4	5.6	6.7	6.7	6.7
PM2.5	45	22.4	7.9	10.1	10.1	13.3	14.8	16.1	20.3	26.9	33.6	35.0	47.1	47.1
Formaldéhyde_ppb	45	19.8	11.9	6.1	6.1	8.7	9.5	12.7	15.0	23.6	43.4	50.6	53.3	53.3
Acétaldéhyde_ppb	45	3.4	1.1	1.9	1.9	2.0	2.1	2.4	3.4	4.4	5.0	5.0	5.6	5.6
Benzène_ppb	35	0.6	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.6	2.1	2.6	2.6	2.6
Benzène_ext_ppb	42	0.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	1.6	2.0	2.0	2.0
diff_Benzène_ppb	34	0.2	0.2	-0.2	-0.1	-0.03	-0.02	0.005	0.1	0.225	0.58	0.64	0.7	0.7
log_Formaldéhyde_ppb	45	2.8	0.5	1.8	1.8	2.2	2.3	2.5	2.7	3.2	3.8	3.9	4.0	4.0
log_Acétaldéhyde_ppb	45	1.2	0.3	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	1.2	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7
log_Benzène_ppb	35	-0.8	0.7	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-0.8	-0.5	0.7	0.9	1.0	1.0
log_Benzène_ext_ppb	42	-1.3	1.1	-3.5	-3.5	-3.5	-2.9	-1.5	-1.3	-0.9	0.5	0.7	0.7	0.7
Log_diff_benzène	25	-1.8	1.0	-3.9	-3.9	-3.7	-2.9	-2.5	-1.8	-1.1	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4

Variable	Effectif	Moyenne	Ecart-type	Min	P1	P5	P10	P25	Médiane	P75	P90	P95	P99	Max
Température	45	22.1	1.7	19.1	19.1	19.5	19.8	20.7	22.2	23.3	24.5	24.6	26.4	26.4
Humidité relative (%)	50	35.5	10.2	21.4	21.4	22.9	24.6	27.4	33.2	40.1	50.9	57.6	62.9	62.9
Humidité spécifique (g/kg)	45	5.9	1.9	3.4	3.4	3.4	3.7	4.5	5.7	6.7	9.1	9.7	10.5	10.5
Humidité spécifique_ext	50	3.0	2.0	0.9	0.9	0.9	1.1	1.4	2.1	4.8	5.9	6.3	8.5	8.5
Nb moyen enfant/salle	49	20.1	4.3	9.7	9.7	10.8	15.2	17.4	20.3	23.0	25.0	26.2	30.0	30.0
Durée d'occupation cumulée sur la semaine (min)	48	856	335	30	129	257	281	755	890	1092	1199	1293	1442	1470
Durée cumulée sur la semaine (Fenêtres fermées) (min)	46	1027	639	8	8	30	180	405	1111	1516	1891	1995	2270	2270
Durée cumulée sur la semaine (au moins 1 fenêtre ouverte) (min)	45	422	374	10	10	31	65	104	351	570	1050	1204	1351	1351

Fin du rapport

Communication complémentaire

A la demande de l'Anses, les calculs de gains positifs (+) et gains négatifs (-) ont été réalisés pour la campagne de surveillance dans les écoles et crèches pour le seuil optimal de 892 ppm également, ainsi que pour le seuil de 680 ppm (pour le benzène). Les résultats sont présentés ci-dessous :

Ecoles SURV	Seuil CO ₂ = 892 ppm						Seuil CO ₂ = 680 ppm					
	VPP	VPN	Prev	1-Prev	VPP-Prev	VPN-(1-Prev)	VPP	VPN	Prev	1-Prev	VPP-Prev	VPN-(1-Prev)
Formaldéhyde > 10	0.891	0.458	0.775	0.2249	0.116	0.233	/	/	/	/	/	/
Benzène > 2	0.615	0.507	0.574	0.4257	0.041	0.081	0.614	0.642	0.574	0.426	0.040	0.216
Benzène > 10	0.002	0.997	0.002	0.9977	-0.001	-0.001	0.003	1.000	0.002	0.9977	0.000	0.002

Au seuil de 892 ppm, le gain+ est de 0.116 et le gain- de 0.233 pour une concentration de Formaldéhyde > à la valeur cible (VC) de 10 µg/m³. Donc un gain de plus de 10% en moyenne.

Annexe 4 : Liens mentionnés dans les déclarations publiques d'intérêts des experts

Cette partie présente les liens déclarés par les experts dans le cadre de leur déclaration publique d'intérêt et précise d'une part comment ces liens ont été analysés par rapport au domaine sur lequel porte la saisine et d'autre part la manière dont ils ont été gérés, eu égard à un risque potentiel de conflit d'intérêts.

Les déclarations publiques d'intérêts sont mises à jour par les experts à chaque changement de situation.

Au cours des expertises, les liens d'intérêts sont réexaminés au vu de l'ordre du jour au début de chaque réunion.

RAPPEL DES RUBRIQUES DE LA DÉCLARATION PUBLIQUE D'INTÉRÊTS

■ NOUVEAU FORMAT DE DPI

- 1.1. Activité principale exercée actuellement
- 1.2. Activités exercées à titre principal au cours des 5 dernières années
- 2.1. Activités exercées à titre secondaires : participation à une instance décisionnelle d'un organisme public ou privé dont l'activité, les techniques ou produits entrent dans le champ de compétences, en matière de santé publique et de sécurité sanitaire, de l'instance collégiale au sein de laquelle l'expert intervient (actuellement et au cours des 5 années précédentes).
- 2.2. Activités exercées à titre secondaires : activité de consultant, de conseil ou d'expertise auprès d'un organisme entrant dans le champ de compétence, en matière de santé publique et de sécurité sanitaire, de l'instance collégiale au sein de laquelle l'expert intervient (actuellement et au cours des 5 années précédentes).
- 2.3. Activités exercées à titre secondaires : participation à des travaux scientifiques pour des organismes publics et/ou privés entrant dans le champ de compétence, en matière de santé publique et de sécurité sanitaire, de l'instance collégiale au sein de laquelle l'expert intervient (actuellement et au cours des 5 années précédentes).
- 2.4. Activités exercées à titre secondaires : rédaction d'articles, interventions dans des congrès, conférences, colloques, réunions publiques diverses ou formations organisés ou soutenus financièrement par des entreprises ou organismes privés entrant dans le champ de compétence, en matière de santé publique et de sécurité sanitaire, de l'instance collégiale au sein de laquelle l'expert intervient (actuellement et au cours des 5 années précédentes).
- 2.5. Activités exercées à titre secondaires : inventeur et/ou détenteur d'un brevet ou d'un produit, procédé ou toute autre forme de propriété intellectuelle non brevetée en relation avec le champ de compétence, en matière de santé publique et de sécurité sanitaire, de l'instance collégiale au sein de laquelle l'expert intervient (actuellement et au cours des 5 années précédentes).
3. Activités dirigées par l'expert et qui ont bénéficié d'un financement par un organisme à but lucratif dont l'objet social entre dans le champ de compétence, en matière de santé publique et de sécurité sanitaire, de l'instance collégiale au sein de laquelle l'expert intervient (actuellement et au cours des 5 années précédentes).
4. Participations financières de l'expert dans le capital d'une société dont l'objet social entre dans le champ de compétence, en matière de santé publique et de sécurité sanitaire, de l'instance collégiale au sein de laquelle l'expert intervient (actuellement et au cours des 5 années précédentes).

5. Proches parents de l'expert salariés et/ou possédant des intérêts financiers dans toute structure dont l'objet social entre dans le champ de compétence, en matière de santé publique et de sécurité sanitaire, de l'instance collégiale au sein de laquelle l'expert intervient (actuellement et au cours des 5 années précédentes).
6. Autres liens d'intérêts (actuellement et au cours des 5 années précédentes).

▪ **ANCIEN FORMAT DE DPI**

IF	Intérêts financiers dans le capital d'une entreprise
IP-A	Interventions ponctuelles : autres
IP-AC	Interventions ponctuelles : activités de conseil
IP-CC	Interventions ponctuelles : conférences, colloques, actions de formation
IP-RE	Interventions ponctuelles : rapports d'expertise
IP-SC	Interventions ponctuelles : travaux scientifiques, essais, <i>etc.</i>
LD	Liens durables ou permanents
PF	Participation financière dans le capital d'une entreprise
SR	Autres liens sans rémunération (relatifs à un parent)
SR-A	Autres liens sans rémunération)
VB	Activités donnant lieu à un versement au budget d'un organisme

POUR LE COMITE D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	<i>en cas de lien déclaré</i>	

BAEZA	<p>Armelle</p> <p>1.1 Université Paris Diderot : Maître de conférence hors classe (depuis 1990)</p> <p>2.1 Association pour la recherche en toxicologie : membre du bureau (depuis 2003) – aucune de rémunération Société de pharmaco-toxicologie cellulaire : membre du bureau (depuis 2010) - aucune de rémunération AFSSAPS : groupe d'évaluation des risques et de l'efficacité de substances et produits biocides (2005-2011) - aucune de rémunération Observatoire des Micro et nano Technologies : expert (depuis 2009) - aucune de rémunération</p> <p>2.2 GDF-Suez : consultante (2 réunions 2011-2012) - aucune de rémunération Safran : consultante (1 réunion 2012) - aucune de rémunération</p> <p>3. Financement d'une bourse de thèse qui se déroule dans son laboratoire sous sa direction (2012-2015) – financement Ademe/BASF</p> <p>6. APR ANSES (EST 2007-65) - partenaires : LEPI, CEA-CNRS, INSERM, U885, Airparis, LigAir (2008-2010) ANR Megatox - partenaires : LEPI, CEA-CNRS, INSERM U885, Ecole des Mines de Douai, IPL, Université de Strasbourg (2008-2012) ANR Soudonano – partenaires : INSERM, NRS, Universités de Paris 6, 5 et 12 (2010-2013) ANSES (EST-2010/2/079) – partenaires : INSERM U1045, Université de bordeaux, CNRS (2010-2013) ADEME – partenaires : CNRS, INERIS (2010-2013) ADEME – partenaires : INSERM U1045, Université de Bordeaux, CNRS (2013 – 1015) ANR (ERA-NET SIIN) – partenaires : Université Duisburg, Leibniz IUF, IUTA (2013 – 2016)</p>	22 février 2013
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	<i>en cas de lien déclaré</i>	
BLANCHARD	Olivier 1.1 EHESP : enseignant-chercheur (depuis 2009) INERIS : ingénieur d'étude (1989-2009)	24 septembre 2012
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
BOUDET-DEVIDAL	Céline 1.1 INERIS : Responsable d'unité (Impact sanitaire et exposition) (Depuis 2005). 2.1 SFSE : membre (depuis 2006) – aucune rémunération InVS : Coordination de la Convention annuelle INERIS InVS (depuis 2005) – aucune rémunération DGS : Coordination de la Convention annuelle (risques émergents, ERS). (2005-2010) – rémunération versée à l'Inéris MEDD : Interventions régulières et ponctuelles dans les domaines de la santé environnementale et des sites et sols pollués; Coordination de programmes d'appui (environnements intérieurs, hiérarchisation, inégalités environnementales, biomarqueurs, post-accident). (depuis 2005) – rémunération versée à l'Inéris ELFE (cohorte longitudinale depuis l'enfance) : Membre du GPS (groupe de pilotage scientifique) (depuis 2005) – aucune rémunération AFITE : Présidence de la commission environnement santé (depuis 2009) – aucune rémunération GPRADE (ASN) : membre nommé (2013-2016) – aucune rémunération 2.2. ECETOC : Participation au GT sur le Modèle Targeted Risk Assessment (TRA) (2006-2008) – aucune rémunération InVS : Participation au Comité scientifique du plan national de biosurveillance. (depuis 2011) – aucune rémunération HCSP : Participation au GT étude de zone (2009-2010) – aucune rémunération SYMOVE : Participation au Conseil Scientifique du projet de centre multifilière de traitement de déchets de Villers St Sépulcre (60). (2010) – aucune rémunération OMS : Participation à la TF sur les inégalités environnementales (2010-2011) – aucune rémunération ELFE : Coordination du GT substances chimiques (depuis 2005) – aucune rémunération 2.3. Areva : Vérificateur d'expertises ponctuelles - Evaluations du	31 janvier 2013

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt Analyse Anses : <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
	<p>risque sanitaire d'installations industrielles (2009-2013) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>Cnes : Vérificateur d'expertises ponctuelles - ERS hydrazine (2009-2011) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>Total : Vérificateur d'expertises ponctuelles - bioaccessibilité, EQRS, modélisation des transferts (2010-2013) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>Véolia Propreté : Vérificateur d'expertises ponctuelles - ERS compostage (2007-2010) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>Colas : Vérificateur d'expertises ponctuelles - ERS, transferts (2009-2013) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>SFERB : Vérificateur d'expertises ponctuelles - Développement de protocoles de lixiviation (bitumes) (2009-2013) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>Novergie : Vérificateur d'expertises ponctuelles - ERS, surveillance (2009-2011) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>Arcelor (devenu imperator) : ERS, surveillance (2009-2011) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>SLN, Enertherm, Parthena, Senerval, Danisco, CUMA, Comurhex, Shepherd, Motul, Diosynth: Vérificateur d'expertises ponctuelles - ERS, EI, investigations, conseil (2010 – 2013) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>GDF Suez: Vérificateur d'expertises ponctuelles – ERS (2009) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>Spontex, Minakem, Performance Fibers, SYCTOM Romainville: Vérificateur d'expertises ponctuelles - ERS d'installations industrielles odeur, EI, MTD (2012-2013) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>DREAL, SPPPI ARS, CHU Rennes, collectivités territoriales: Vérificateur d'expertises ponctuelles - ERS, post-accident, étude de zone, métrologie (biomarqueurs), formations (depuis 2005) – rémunération versée à l'Inéris</p> <p>2.4</p> <p>Véolia R&D (colloques Healthy Building 2012, International conf on exposure sciences, 2012): Réunions régulières à Paris (entretiens avec les volontaires, présentation des résultats) – aucune rémunération</p> <p>Abstracts communs pour Healthy building 2012 et X2012. - Retardateurs de flamme bromés (APR ANSES 2007) (2007-2012) – aucune rémunération</p> <p>Adebiotech : Colloque sur l'exposition de l'homme via son environnement - Organisation, Modul'ERS, études de zone (2010-2011) – aucune rémunération</p> <p>UIC-Commission environnement, Paris : ERS et MTD (2012-2013) – aucune rémunération</p> <p>2.5</p> <p>Dépôt de marque et du logiciel MODUL'ERS dans le cadre des activités de modélisation de l'exposition multimédia de l'unité (C Boudet: vérificateur). : INERIS (diffusion large - à tous- en 2013, outil développé à la demande du MEDD : appui aux pouvoirs publics) (2009-1013) – aucune</p>	

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	<i>en cas de lien déclaré</i> rémunération	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
BROCHARD	Patrick Université Victor Segalen Bordeaux 2 : enseignant chercheur 2. AIRAQ : membre du conseil d'administration (depuis 2009) – aucune rémunération	18/10/2011
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
BUGAJNY	Christine CETE Nord-Picardie : Responsable du groupe Air et Bruit 2.5. Ecole des Ponts PARIS Tech : Environnement/qualité air – rémunération personnelle	6 mai 2013
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
CHARPIN	Denis Université d'Aix-Marseille : Chef de service 2.2. Laboratoire Novartis : essai clinique de phase 2 de l'Indacaterol (depuis 2008) – rémunération sur compte associatif Laboratoire Almirail : essai clinique de phase 3 de l'Acilnidium (depuis 2010) - rémunération sur compte associatif 2.4. Laboratoire Novartis : membre du board national et régional Onbrez (depuis 2010) – honoraires 2.5. Laboratoire Novartis : congrès Preuves et Pratiques (2012) – honoraires Laboratoire Pfizer : Congrès de médecine générale (2011) – honoraires 3. Stallergènes, Novartis, Gsk, Chiesi, ALK : aide à la recherche au profit de l'association Habitat-santé – Président Pierre Favre : aide à la recherche au profit de l'association Habitat-santé – Président	21 février 2013
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
DECLERCQ	Christophe 1.1. Institut de veille sanitaire : Coordonnateur du programme de	22 janvier 2013

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	<p>surveillance air et santé (depuis 2008)</p> <p>1.2. Observatoire régional de la santé Nord-Pas-de-Calais : chargé d'études (1984-2008)</p> <p>Membre bénévole du bureau du Comité régional Nord-Pas-de-Calais de l'Association pour la prévention de la pollution atmosphérique (jusqu'en août 2008)</p> <p>2.3. Véolia : Rédaction d'un article dans un ouvrage édité par le Quotidien du Médecin avec le soutien de Véolia - Pollution atmosphérique et maladies cardiovasculaires (2008) – aucune rémunération</p> <p>INSERM : Expertise collective - Expertise opérationnelle sur les stratégies de dépistage du saturnisme infantile (2007-2008) – aucune rémunération</p>	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
GARCON	<p>Guillaume</p> <p>1.1. Université de Lille 2 : Professeur des Universités (depuis 2011)</p> <p>1.2. Université de Lille 2 : Professeur des Universités en toxicologie (depuis 2011)</p> <p>Université du Littoral-Côte d'Opale : Maître de Conférences en toxicologie (2001-2011)</p> <p>2.2. Domaines d'Intérêt Majeur Santé, Environnement, Toxicologie (DIM SEiT) de la Région Ile-de-France : Expert auprès du comité d'évaluation des demandes de subvention (2010) – aucune rémunération</p> <p>Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) : Expert auprès du Comité Scientifique du Programme de Recherche (CSPR) (2010) – aucune rémunération</p> <p>Agence Nationale de la Recherche (ANR) Contaminants et Environnements: Métrologie, Santé, Adaptabilité, Comportements et Usages (CESA) : Expert auprès du comité d'évaluation de l'ANR CESA (2012) – aucune rémunération</p>	21 octobre 2012
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
GIROUX	<p>Michel</p> <p>1.1 Retraité depuis 2011</p> <p>Collaboration ponctuelle avec école vétérinaire de Toulouse</p>	20 septembre 2012

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	<i>en cas de lien déclaré</i> (bénévole) (juin 2011) 1.2. INSERM : Ingénieur (1970-2011)	
GLORENNEC	Philippe 1.1 EHESP : enseignant chercheur (depuis 2002) 2.1. Air Breizh : membre du conseil d'administration (2005-2008) – aucune rémunération 2.2. Inserm : expert, expertise collective (2007-2008) – rémunération personnelle Commission Européenne : expert groupe de travail "lead in drinking water" (2010) – rémunération personnelle Anses : CES Air (depuis 2003) - rémunération personnelle InVS : CS enquête imprégnation plomb (2007-2010) – aucune rémunération OQAI : CS (depuis 2011) – aucune rémunération Primequal : CS (depuis 2009) : CS (depuis 2009) – aucune rémunération Haut Conseil Santé Publique : groupes de travail (ers, Pb...) (depuis 2009) – aucune rémunération EDF, service études médicales : cours évaluation des risques 1 fois/an (depuis les années 2000) – rémunération personnelle Société Française de Santé Environnement : président section méthodologie (depuis 2009) – aucune rémunération 2.3. EHESP- Inserm U1085 : exposition des populations (activité de recherche sur fonds publics) - substances chimiques : plomb, composés semi volatils... – investigateur coordonnateur) (depuis 2007) - rémunération versée à l'EHESP 2.4. Adebitech/Ineris : colloque exposition – expologie (2011) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement ISES : épidémiologie environnementale (annuelle) – pas de rémunération épidémiologie environnementale : épidémiologie environnementale (annuelle) - pas de rémunération 4. Legris SA, Rennes (épargne salariale conjoint, ancienne employée)	13 octobre 2012

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>Analyse Anses :</i> en cas de lien déclaré	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses	<p>5. Ville de Rennes Legris SA</p> <p>Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine</p>	
HERRERA	<p>Horacio</p> <p>1.1. Institut Universitaire Romand de Santé au Travail : Chef de service d'hygiène du travail (depuis 1999)</p> <p>Analyse Anses : Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine</p>	11 décembre 2012
KIRCHNER	<p>Séverine</p> <p>1.1. Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) : Responsable du Pôle Expologie des environnements intérieurs ; Responsable de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur ; Chef du programme de recherche Usage Santé Confort (depuis 1990)</p> <p>2.1. Société Française de Santé Environnement (SFSE) : cofondatrice, membre du conseil d'administration (2008-2011) – aucune rémunération Réseau International Santé Environnement (RISE) : Présidente (2004 - 2007) puis membre du conseil d'administration (2007 - 2011) (2004-2011) – aucune rémunération PRIMEQUAL 2 (Programme de Recherche Inter organismes pour une Meilleure Qualité de l'Air à l'Echelle Locale) : Présidente du conseil scientifique (depuis 2004) – aucune rémunération Groupe «Énergie et environnement» (GO 1) du PREDIT (Programme de coordination des politiques françaises de recherche et d'innovation sur les transports terrestres) : Membre (depuis 2004) – aucune rémunération</p> <p>2.2. Organisation mondiale de la santé (OMS) : Membre du steering committee Development of WHO Guidelines for Indoor Air Quality (depuis 2006) – rémunération personnelle</p> <p>2.3. Joint Research Center, Ispra, It: Définition de protocoles de collecte de données sur les environnements intérieurs – IndoorMonit (étude multicentrique) (2010) – rémunération au CSTB</p> <p>2.4. Conférence Indoor Air - Austin, Texas, USA (2011) – aucune</p>	24 octobre 2012

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	<i>en cas de lien déclaré</i> rémunération Indoor Air conference - Copenhague, DK (2008) – aucune rémunération 2.5. Procédé de régulation et de contrôle du confinement de l'air intérieur : CSTB (2009) - aucune rémunération 5. CSTB	
Analyse Anses	Il existe un risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine, et l'expert n'a pas participé aux débats.	
LANGLOIS	Eddy	11 décembre 2012
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine 1.1. INRS : responsable de laboratoire (depuis 2001) 2.3. ANR : Analyse de mycotoxines dans l'air – polymères à empreinte moléculaire (étude multicentrique/co-investigateur) (2011-2013) – rémunération versée à l'INRS	
PAILLAT	Loïc	20 décembre 2012
	1.1. Laboratoire Central de la Préfecture de Police de Paris : responsable technique dans la section Air et Mesures (depuis 2008) 1.2. COFRAC : responsable d'accréditation au sein du pôle Chimie-Environnement (2006-2008) 2.2. Institut du temps Géré : évaluateur qualitatif et technique pour le COFRAC (depuis 2008) – rémunération personnelle ULCO – Université du littoral Côte d'opale : intervenant en Master 2 (depuis 2010) – rémunération personnelle COFRAC : évaluateur qualitatif et technique pour le COFRAC (2008-2012) – rémunération versée au LCPP AFNOR : commission de normalisation (depuis 2006) – aucune rémunération 2.3. ADEME : Primequal – exposition des citoyens aux polluants atmosphériques au cours de leur trajet domicile travail (2008-2010) – rémunération versée au LCPP ADEME : Impact d'un site pollué sur des habitations – étude dans différents milieux air ambiant et air intérieur (2011-	

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt Analyse Anses : <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
	<p>2013) – rémunération versée au LCPP RATP : mesures de qualité d'air (2011) – rémunération versée au LCPP SNCF : mesures de qualité d'air – rémunération versée au LCPP ADP : mesures de qualité d'air (2011) – rémunération versée au LCPP CSTB : analyses de polluants atmosphériques – rémunération versée au LCPP</p> <p>2.4.</p> <p>Indoor Air, Austin : Impact de sources extérieures sur la qualité de l'air extérieur (2011) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement Indoor Air, Austin : Bilan des intoxications oxycarbonées en région parisienne – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement World Clean Air Congress – iuappa: étude de l'exposition de la brigade périphérique sur la pollution atmosphérique (2010) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement World Clean Air Congress – iuappa, Vancouver : étude de l'exposition des citadins (primequal) (2010) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement Atmosphair, Lyon ; impact de sources extérieures sur la qualité de l'air intérieur – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement Les Respirations, Enghien : étude de la qualité de l'air dans les parcs de stationnement (2010) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement Les Respirations, Enghien : bilan des mesures réalisées dans les logements au-dessus des pressings (2012) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement Les Respirations, Enghien : étude de la qualité de l'air dans les parcs de stationnement (2009) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement Journée régionales de santé, Paris : impact de l'activité de nettoyage à sec sur l'environnement (2011) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement Transports et pollution de l'air, Grèce : étude de l'exposition de la brigade du périphérique (2012) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement APPA (revue pollution atmosphérique) : bilan pressings et étude primequal – aucune rémunération</p> <p>Analyse Anses : Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine</p>	
PARIS	Christophe	28 décembre 2012

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	<p>1.1. Université de Lorraine : Professeur des Universités - Praticien Hospitalier (depuis 2003)</p> <p>2.1. CRAM Gd EST : Membre titulaire du CRRMP (depuis 2009) – rémunération personnelle MSA Lorraine : Membre de la commission pluridisciplinaire de pénibilité (depuis 2012) – rémunération personnelle ANSES : Président du CES Milieux aériens (depuis 2010) – rémunération personnelle RNV3P : Membre (depuis 2003) – aucune rémunération</p> <p>2.2. Société Française de Médecine du Travail (SFMT) : Président du Conseil Scientifique (depuis 2012) – aucune rémunération Réseau National de Vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P) : Coordinateur du GT Système d'information, membre du COPIL (depuis 2010) – aucune rémunération Haute Autorité de Santé : Président de la commission d'audition Publique sur la surveillance médicale des personnes ayant été exposées à l'amiante (2009-2010) – aucune rémunération Institut National du Cancer : Membre du groupe "prévention des cancers professionnels", à titre d'expert SFMT (depuis 2010) – aucune rémunération</p> <p>2.3. INCa : Cancer professionnel, étude épidémiologique - Projet NET-KEEP (étude multicentrique/investigateur principal) (2010-2013) – rémunération versée au CHU de Nancy CNAM-TS : Pathologies de l'amiante, cohorte - ARDCO II (étude multicentrique/investigateur coordonnateur) (2010-2012) – rémunération versée à l'Inserm ANSES : Cancers digestifs et amiante, cohorte - ARDCO-NUT (étude multicentrique/investigateur principal) (2009-2013) – rémunération versée à l'Inserm DHOS (PHRC) : Asthme professionnel – ABCD (étude monocentrique/investigateur coordonnateur) (2008-2012) – rémunération versée à l'Inserm DHOS (PHRC) : Asthme professionnel – MIBAP-POLYGEN (étude multicentrique) (2004-2012) – rémunération versée à l'Inserm ANSES : Cancer bronchique – DEFIPOP (étude multicentrique) (2007-2012) – rémunération versée au CHU de Nancy Europe (Projet EU-COST) : pathologies professionnelles émergentes – MODERNET (étude multicentrique) (2010-2014) – aucune rémunération</p> <p>2.4.</p>	

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	<p><i>en cas de lien déclaré</i></p> <p>Société Française de Pneumologie de Langue Française, Lille, Congrès annuel de Pneumologie : amiante (2011) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement</p> <p>ICOH, Congrès international (tous les 3 ans), 2009 (Capetown), 2012 (Cancun) : Pathologie respiratoire professionnelle, épidémiologie (2009-2012) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement</p> <p>ERS (Congrès internationaux, annuel), Vienne, Barcelone, Amsterdam,... : Pathologie respiratoire professionnelle, épidémiologie (2009-2012) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement</p> <p>ATS, Congrès Internationaux, annuel, (San Francisco) : Pathologie respiratoire professionnelle, épidémiologie (2012) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement</p> <p>Sécurité Sociale Allemande, Congrès nationale, Dresde : amiante (2012) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement</p> <p>SFMTans, Congrès national de médecine du travail, tous les deux ans (Tours, Toulouse, Clermont-Ferrand, etc) : Pathologie respiratoire professionnelle, épidémiologie (2008) – aucune rémunération, mais prise en charge des frais de déplacement</p>	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
SEIGNEUR	<p>Christian</p> <p>1.1. Ecole nationale des ponts et chaussées : Directeur du Cerea (2008-2014)</p> <p>1.2 Atmospheric & Environmental Research, Inc. : Vice président (1996-2008)</p> <p>2.1. INERIS : Commission scientifique, division des risques chroniques (2009-2014) – aucune rémunération</p>	9 octobre 2012
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
SQUINAZI	<p>Fabien</p> <p>1.1. Retraité (depuis 2013)</p> <p>1.2. Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris : Directeur (1984-2013)</p>	23 mars 2013

NOM	Prénom	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	Rubrique de la DPI Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	
Analyse Anses : Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine		

POUR LES RAPPORTEURS

NOM	Prénom	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	Rubrique de la DPI Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	

BLONDEAU	Patrice	28 septembre 2012
	1.1 Université de La Rochelle : Enseignant chercheur (depuis 09/1994). Editions John Libbey : rédacteur en chef de la revue ERS. (Depuis 05/2002).	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
CABANES	Pierre-André	26 novembre 2012
	1.1 EDF : Adjoint au directeur du service des études médicales (Depuis 11/1991). Editions John Libbey : rédacteur en chef de la revue ERS. (Depuis 05/2002).	
	2.1 Société Française de Santé et Environnement – SFSE : membre du CA secrétaire général (07/2008). Aucune rémunération. Réseau International Santé Environnement : membre du CA. (Du 06/1996 au 12/2011). Aucune rémunération.	
	2.2 Ineris : membre du conseil scientifique de la direction des risques chroniques. (Du 01/2005 au 01/2011). Aucune rémunération. SFSE : membre des sections méthodologie, communication et risques et société. (09/2009). Aucune rémunération.	
	2.3 EDF : étude expérimentale en chambre d'exposition, Interaction formaldéhyde/allergène sur la réactivité bronchique de patients asthmatiques légers, (Du 09/2001 au 02/2002). Aucune	

rémunération.

GDF : étude expérimentale en chambre d'exposition, Effets bronchiques de l'exposition répétée à de faibles doses de dioxyde d'azote chez des sujets asthmatiques (Du 01/2007 au 03/2009). Aucune rémunération.

Analyse Anses : Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine

LECLERC

Nathalie

11 décembre
2012

1.1

ASPA : ingénieur d'étude (depuis octobre 2000)

2.2

Anses : Expert rapporteur dans le cadre de la saisine n° 2012-SA-0093. (Avis relatif à l'élaboration de valeurs indicatives associant CO₂ dans l'air intérieur et effet sanitaires) (11/2012 – 04/2013) (rémunération au déclarant)

ADEME-INERIS : Expertise d'un projet Primequal APR Environnements intérieurs et approches innovantes : nouveaux bâtiments et matériaux, polluants émergents et exposition multiple (03/2012) (aucune rémunération)

OQAI – CSTB Participation au GT spécifique Chimie pour l'élaboration des protocoles de collecte des données (base de référence, bâtiments performants en énergie) (fin 2011 – en cours) (aucune rémunération)

CSTB : membre du conseil Scientifique de l'OQAI (06/2011 – en cours) (aucune rémunération)

2.3

ARS – Alsace : Suivi et organisation de la QAI en Alsace – situation dégradée. (2010 – 2014) (rémunération de son organisme d'appartenance)

EDF - ES Strasbourg : Suivi de la QAI dans des maisons rénovées (2012 – 2013) (rémunération de son organisme d'appartenance)

ADEME Alsace – Région Alsace - DREAL - CETE de l'Est : Programme PREBAT sur le suivi de la QAI dans des bâtiments BBC (2012 – 2014) (rémunération de son organisme d'appartenance)

ADEME –Primequal : Projet MERMAID - recherche QAI dans des bâtiments performants (2012 – 2015) (rémunération de son organisme d'appartenance)

CSTB : Instrumentation QAI bureaux (2012) (rémunération de son organisme d'appartenance)

En partenariat avec Atmos'air Bourgogne (AASQA) : Instrumentation bureaux tour à énergie positive (2012 – 2013) (rémunération de son organisme d'appartenance)

ADEME Alsace : Suivi QAI pour les logements chauffés au bois (2012) (rémunération de son organisme d'appartenance)

ARTE, DIRECCTE Colmar, M2A, communes... Suivi QAI à la demande de gestionnaires d'ERP ou bureaux... (2008 – 2012) (rémunération de son organisme d'appartenance)

Ministère chargé de l'Ecologie et du développement durable : campagne de mesure pilote pour la mise en place de la surveillance réglementaire (2010 – 2011) (rémunération de son organisme d'appartenance)

2.4

AMIRA, Association de Membres Insuffisants Respiratoires d'Alsace : Article sur la qualité de l'air intérieur (2012) (aucune rémunération)

APPA Alsace : Conférence débat « Matériaux de construction et santé » (2009) (aucune rémunération)

Conseil Général 67 : Atelier qualité de l'air intérieur et éco-matériaux (2010) (aucune rémunération)

Salon Energivie Mulhouse 2011, Parc des expositions - Mulhouse : Intervention sur la qualité de l'air intérieur et les matériaux (2011) (aucune rémunération)

Pôle Energivie. Soprema Natura Concept CUS : Inauguration de la maison AA Place Kléber – Strasbourg. Quelle santé dans l'habitat du futur (2011) (aucune rémunération)

AMO : Table ronde : les aventuriers du BBC. Bureaux de Steelcase- 67300 Schiltigheim Qualité de l'air intérieur (2011) (aucune rémunération)

UHA - Université de Haute Alsace, Campus UHA Mulhouse : Pollution de l'air intérieur : quels risques et comment la prévenir (2012) (aucune rémunération)

Ordre des architectes – Strasbourg : Vendredi de l'INFO - Strasbourg /Colmar. Qualité de l'air intérieur et photocatalyse (avec OQAI) (2012) (aucune rémunération)

Mutualité Française d'Alsace : Intervention sur la qualité de l'air intérieur (2011) (aucune rémunération)

MACIF Guebwiller : Intervention sur la qualité de l'air intérieur (2012) (aucune rémunération)

Salon Energivie Mulhouse 2012, Parc des expositions - Mulhouse : Intervention sur la qualité de l'air intérieur et les matériaux (2012) (aucune rémunération)

Union départementale des Associations Familiales du Haut-Rhin, Hôtel Mercure - 68000 Colmar : LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR Maisons, écoles, crèches... Quel air y respirons-nous (2012) (aucune rémunération)

6

Membre SFSE

Analyse Anses : ***Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine***

MULLOT**Jean-Ulrich**23
novembre
2012**1.1**

Service de Santé des Armées : pharmacien militaire (depuis 1992)

2.2

InVS : membre du conseil scientifique de l'étude « Biosurveillance » (aucune rémunération) (depuis 2011)

Contrat de baie « Rade de Toulon » : membre du conseil scientifique (aucune rémunération) (depuis 2011)

CSTB : membre du conseil scientifique pour l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (aucune rémunération) (depuis 2011)

Primequal/Predit : membre du conseil scientifique (aucune rémunération) (depuis 2009)

6

Représentant français dans un groupe de travail OTAN en rapport avec les risques NRBC - Activité en relation avec mon activité principale (aucune rémunération ou indemnités, défraiement transport/logement uniquement) (depuis 2011)

Analyse Anses : **Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine**

Notes



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
27-31 avenue du général Leclerc
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr