

L'acétaldéhyde en air intérieur : métrologie et niveaux mesurés

Acetaldehyde in indoor environment: metrology and concentrations

Laura Chiappini

Résumé

Classé cancérigène probable par l'IARC (2A), omniprésent dans les environnements clos, ses sources pouvant être primaires ou secondaires, ponctuelles ou permanentes, l'acétaldéhyde est l'un des polluants majeur de l'air intérieur et va faire à ce titre l'objet de l'établissement de valeurs guide par l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire (ANSES) dans le courant de l'année 2013. En effet, alors que les concentrations mesurées en air extérieur sont de l'ordre de quelques microgrammes par mètre cube, les niveaux intérieurs sont largement plus élevés d'au minimum un ordre de grandeur.

Les méthodes disponibles pour évaluer les niveaux d'acétaldéhyde en air intérieur sont les mêmes que celles utilisées pour quantifier les composés carbonyles. Les plus employées se basent sur le prélèvement actif et passif sur tubes imprégnés d'agents de dérivation. Il est important de noter que des travaux menés par le LCSQA-INERIS sont en cours pour évaluer la capacité des tubes passifs à mesurer l'acétaldéhyde, en particulier en suivant les protocoles établis pour la surveillance du formaldéhyde dans les écoles et les crèches. Le rapport de cette étude sera publié dans le courant de l'année 2013. Par ailleurs, il n'existe à ce jour aucune méthode simple et pratique pour le suivi en continu et/ou la recherche de sources.

De manière générale, les concentrations moyennes en acétaldéhyde sont relativement faibles, comprises entre 13 et 16 $\mu\text{g m}^{-3}$ (quel que soit l'environnement intérieur ou la localisation géographique sur l'Europe et les États-Unis), mais toujours supérieures aux concentrations extérieures. Notons néanmoins que les supermarchés se distinguent avec des concentrations moyennes environ trois fois plus élevées. Cependant, ponctuellement, ces concentrations peuvent atteindre des valeurs élevées (jusqu'à 176 $\mu\text{g m}^{-3}$ dans une école en France) suggérant ainsi la prévalence de sources ponctuelles et par conséquent des expositions court terme, et soulignant ainsi le besoin de développement de techniques de mesure en temps réel.

Mots-clés

acétaldéhyde, air intérieur, surveillance, métrologie

Abstract

Acetaldehyde is one of the major indoor air pollutants due to its human health effects; it has been classified as probably carcinogenic to humans by IARC (2A), and its ubiquitous sources being primary or secondary, intermittent or permanent. Conversely to outdoor concentrations which are about a few $\mu\text{g m}^{-3}$, indoor levels are usually an order of magnitude higher. Indoor air guide values will be published in 2013 by the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES).

Acetaldehyde concentrations in indoor environments are measured with the same methods used for carbonyl compounds in general and formaldehyde in particular. The more commonly used are based on active or passive sampling on derivatising agent coated adsorbent cartridges. It is worth mentioning that work to be published in 2013 are currently in progress to evaluate active and passive cartridges capacity to measure acetaldehyde.

Generally, mean indoor acetaldehyde concentrations are weak, ranging between 13 and 16 $\mu\text{g m}^{-3}$ (whatever the environment or the geographic localization, Europe, USA) but always higher than outdoor concentrations. Shopping malls distinguish themselves from other environments with mean concentrations three times higher.

Nevertheless, occasionally, concentrations can reach peak values as high as 176 $\mu\text{g m}^{-3}$ for example in a French school, suggesting the importance to consider short term exposure and highlighting the necessity to develop real time measurement technique for on-line monitoring and source detection. This kind of technique is still not available.

Keywords

acetaldehyde, indoor air, survey, metrology

Introduction

En 2007, le Grenelle de l'Environnement a énoncé la nécessité d'une surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant du public (ERP), passant par le suivi d'un certain nombre de composés d'intérêt sanitaire. Or, afin d'interpréter les résultats de mesure, il est indispensable de disposer de valeurs de référence permettant de positionner les niveaux observés.

Cependant, pour la plupart des polluants, les données disponibles sont souvent insuffisantes pour établir ces valeurs de référence chez l'homme, ce qui limite l'interprétation des résultats de mesure et l'estimation de l'impact de la pollution de l'air intérieur sur la santé des populations.

Depuis 2004, l'ANSES travaille à l'élaboration de « valeurs guides de qualité d'air intérieur » (VGAI) constituant une base pour :

- Protéger la population des effets sanitaires liés à une exposition par inhalation
- Éliminer ou réduire les polluants ayant un effet néfaste sur la santé humaine.

Depuis, l'agence a publié des VGAI pour six substances identifiées comme prioritaires : le monoxyde de carbone, le formaldéhyde, le benzène, le naphthalène, le tétrachloroéthylène et le trichloroéthylène. Pour chacune, excepté le monoxyde de carbone, le Haut Conseil de Santé Publique (HCSP) a publié des valeurs repère pour la gestion de la qualité de l'air intérieur dans les espaces clos.

Sept autres substances¹ font l'objet d'élaboration, en cours ou à venir, de VGAI par l'ANSES ainsi que le présente le dernier rapport de mise à jour de la hiérarchisation des substances (ANSES, 2011). C'est le cas de l'acétaldéhyde, substance pour laquelle l'exposition par inhalation a été considérée comme majoritaire sur la base de l'occurrence de ses sources en air intérieur et de ses effets sanitaires qui seront décrits dans ce rapport.

Dans ce contexte d'intérêt grandissant pour la qualité de l'air intérieur, de mise en place progressive d'une surveillance de la qualité de l'air dans les ERP et de besoin de connaissances concernant les expositions multiples à l'acétaldéhyde, cet article se propose de réaliser un état des lieux des techniques de mesure disponibles à ce jour mais également

des concentrations de ce composé communément mesurées dans les lieux publics. Ainsi, au regard des niveaux rencontrés, ou des lacunes identifiées, les environnements pouvant potentiellement être concernés en priorité par des actions de surveillance pourront être mieux ciblés.

1. Acétaldéhyde : sources, impact sanitaire, valeurs guides

Composé ubiquitaire dans l'environnement, l'acétaldéhyde (C_2H_4O) est produit par de nombreux processus naturels, industriels et de combustion (HEI, 2007). Liquide incolore, il est utilisé comme intermédiaire en synthèse organique, dans la fabrication de colorants ainsi que dans la synthèse du caoutchouc, comme accélérateur de vulcanisation. Il est également utilisé dans l'industrie alimentaire et en parfumerie. L'acétaldéhyde est une substance intermédiaire du métabolisme de certaines substances chez les espèces animales et de la respiration des végétaux (INERIS, 2011).

1.1 Sources d'acétaldéhyde en air extérieur

L'acétaldéhyde est formé par tous les processus de combustion du bois (Gustafson *et al.*, 2007), des matières fossiles, des essences et du diesel, le raffinage (Grosjean *et al.*, 1993)... qui participent à ses niveaux en air extérieur. Viennent s'ajouter les processus de photo-oxydation (Grosjean *et al.*, 1993) mais également d'ozonolyse de composés organiques volatils (COV) tels les terpènes, par exemple (Leungsakul *et al.*, 2005).

Les concentrations mesurées en air extérieur sont de l'ordre de quelques microgrammes par mètres cube. Ainsi, Bruinen de Bruin *et al.*, 2008, rapportent des niveaux moyens dans onze villes européennes de $1,5 \mu g m^{-3}$ avec un maximum de $3,3 \mu g m^{-3}$ mesuré à Athènes (Grèce) et un minimum de $0,2 \mu g m^{-3}$ à Arnhem (Pays-Bas).

En France, l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) a mesuré des niveaux médians de $1,3 \mu g m^{-3}$ à l'extérieur des 567 logements étudiés au cours de sa campagne nationale (OQAI, 2006). Ces niveaux sont dix fois plus faibles que les niveaux mesurés dans les logements. De manière générale, les concentrations mesurées en air intérieur sont d'un ordre de grandeur plus important que les concentrations mesurées en air extérieur (Marchand *et al.*, 2006; Lovreglio *et al.*, 2009; Bruinen de Bruin *et al.*, 2008) mettant ainsi en valeur l'importance des sources d'acétaldéhyde dans les environnements clos.

(1) Les sept substances faisant l'objet de l'établissement de VGAI par les groupes de travail de l'ANSES : acroléine, fluorène, -1,4-dichlorobenzène, furfural, acétaldéhyde, éthylbenzène, chloroforme, dioxyde d'azote.

Tableau 1. Sources d'acétaldéhyde en air intérieur
Indoor air acetaldehyde sources

Source	Référence
Torréfaction du café	Yeretzian <i>et al.</i> , 2002
Cuisson des huiles alimentaires (olive, tournesol, noix de coco...)	Katragadda <i>et al.</i> , 2010
Fruits mûrs	Boschetti <i>et al.</i> , 1999 ; Pesis <i>et al.</i> , 2002
Cuisson de la levure	Barker <i>et al.</i> , 1992
Cuisson de légumes et poissons	Kabir <i>et al.</i> , 2011
Tapis, moquettes	Weschler <i>et al.</i> , 1992
Linoléum, PVC	HCRC, 2009
Revêtements de sol, mur, isolants	CHPS, 1999 ; Kagi <i>et al.</i> , 2009
Respiration humaine	Zhang <i>et al.</i> , 1994
Peinture à l'eau	Chang, 2001
Peintures photocatalytiques	Auvinen <i>et al.</i> , 2008
Produits ménagers, désodorisants	Steinemann <i>et al.</i> , 2011 ; Projet ADOQ <i>et al.</i> , en cours de publication
Réactions secondaires	Destailats <i>et al.</i> , 2006 ; ADOQ <i>et al.</i> , en cours de publication
Réactions secondaires surfaciques	Morrison <i>et al.</i> , 2002 ; Nicolas <i>et al.</i> , 2007 ; Kagi <i>et al.</i> , 2009 ; Huang <i>et al.</i> , 2011

1.2 Sources d'acétaldéhyde en air intérieur

Comme en air extérieur, les sources d'acétaldéhyde en air intérieur sont associées aux processus de combustion tels le chauffage au bois (Gustafson *et al.*, 2007) ou le tabagisme (Hodgson *et al.*, 1996). À l'instar du formaldéhyde, l'acétaldéhyde est émis par les matériaux de construction (Missia *et al.*, 2010 ; HCRC, 2009 ; CHPS, 1999 ; Kagi *et al.*, 2009), les peintures (Chang 2001 ; Auvinen *et al.*, 2008), les moquettes (Weschler *et al.*, 1992), les produits de consommation (Steinemann *et al.*, 2011 ; Projet ADOQ *et al.*, en cours de publication)...

La torréfaction du café (Yeretzian *et al.*, 2002) mais également la cuisson des aliments (Katragadda *et al.*, 2010 ; Kabir *et al.*, 2011), de la levure (Barker *et al.*, 1992) ainsi que la maturation des fruits (Boschetti *et al.*, 1999 ; Pesis *et al.*, 2002) sont à l'origine d'émissions d'acétaldéhyde dans l'air.

L'homme lui-même en est un émetteur conséquent, de part l'air qu'il expire (Zhang *et al.*, 1994). Ces émissions peuvent être d'autant plus importantes qu'il consomme du tabac et de l'alcool.

Les réactions d'oxydation, radicalaires, d'ozonolyse, de photo-oxydation, qu'elles soient surfaciques ou en phase gazeuse avec des COV, sont à l'origine de l'émission secondaire d'acétaldéhyde (Morrison *et al.*, 2002 ; Destailats *et al.*, 2006 ; Nicolas *et al.*, 2007 ; Kagi *et al.*, 2009 ; Wang *et al.*, 2010 ; Huang *et al.*, 2011).

Dans sa revue sur les évolutions et changements des polluants en air intérieur depuis 1950, Charles Weschler identifie ces réactions secondaires comme cause principale de la stabilité des niveaux de concentration en acétaldéhyde, alors quelles devraient diminuer avec la réduction du tabagisme, leur source principale en air intérieur (Weschler, 2009).

1.3 Réglementation, toxicité, exposition, valeurs de référence

Les concentrations en acétaldéhyde ne sont réglementées ni en air ambiant ni en air intérieur. L'acétaldéhyde fait en revanche l'objet de travaux de l'ANSES pour l'établissement de valeurs guide pour la qualité de l'air intérieur.

En Flandre seulement, une valeur guide de 46 µg m⁻³ pour l'air intérieur, basée sur les données toxicologiques et épidémiologiques actuelles, a été établie (Belgisch Staadblad, 2004).

En ce qui concerne son utilisation dans les matériaux, l'acétaldéhyde fait partie des composés concernés par l'étiquetage des produits de construction imposé par l'arrêté du 20/02/12, modifiant l'arrêté du 19/04/2011², visant depuis le 1^{er} janvier 2012 les produits de construction et de décoration. Ces derniers

(2) Arrêté du 20/02/12 modifiant l'arrêté du 19 avril 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils, JO n° 49 du 26 février 2012.

doivent être munis d'une étiquette qui indique, de manière simple et lisible, leur niveau d'émission en substances volatiles.

L'ensemble des données concernant les effets sanitaires liés à l'exposition à l'acétaldéhyde est tiré de la fiche de données toxicologiques et environnementales de l'INERIS (INERIS, 2011)³, accessible via le portail des substances chimiques (<http://www.ineris.fr/substances>).

L'exposition a des vapeurs d'acétaldéhyde induit une irritation des yeux, de la peau et des voies respiratoires.

En tant que métabolite de l'éthanol, l'acétaldéhyde entraîne des altérations hépatiques, des rougeurs de la face lors de la consommation d'alcool.

En ce qui concerne sa cancérogénicité, une seule étude épidémiologique met en valeur une augmentation de l'incidence des cancers, toutes causes confondues, chez des travailleurs exposés à l'acétaldéhyde. Cependant, le faible nombre de cas ne permet pas de conclure à une cancérogénicité de l'acétaldéhyde qui est classé comme peut-être cancérogène (2B) par l'IARC (1999), probable (B2) par l'US EPA (IRIS) (1991), et considéré de catégorie 3 (substance préoccupante pour l'homme en raison d'effets CMR possibles mais pour laquelle les informations disponibles sont insuffisantes) par l'Union européenne (SCCS, 2012). L'OEHHA a publié en 2008 une VTR pour une exposition chronique par inhalation de $140 \mu\text{g m}^{-3}$ (OEHHA, 2008).

2. Métrologie de l'acétaldéhyde

Le tableau ci-dessous présente les différentes méthodes existantes pour prélever et analyser l'acétaldéhyde (méthodes indirectes) et le mesurer en continu, *on-line* (méthode directe). Il est important de noter que ces méthodes s'appliquent également au formaldéhyde et à l'ensemble des composés carbonylés.

Outre les méthodes normalisées actives et passives, largement employées, basées sur la dérivation de l'acétaldéhyde (et plus généralement des carbonylés) par la DiNitroPhénylHydrazine (DNPH), de nombreuses autres méthodes de prélèvement mettant en œuvre d'autres agents de dérivation ont été développées. Ces méthodes, de par

leur facilité de mise en œuvre et leur faible limite de détection, sont adaptées à des études d'exposition à court et long termes. Cependant, il est important de noter que des travaux menés par le LCSQA-INERIS sont en cours pour évaluer la capacité des tubes passifs à mesurer l'acétaldéhyde, en particulier en suivant les protocoles établis pour la surveillance du formaldéhyde dans les écoles et les crèches. Les résultats préliminaires montrent d'importants écarts entre les mesures passives et les mesures actives, de l'ordre de 60 %, les tubes passifs se caractérisant par une tendance à la sous-estimation des concentrations en acétaldéhyde. Le rapport de cette étude sera publié dans le courant de l'année 2013. Les techniques de mesure en continu, en revanche, bien que particulièrement performantes en termes de limite de détection, de résolution temporelle et de sélectivité, impliquent l'emploi d'appareils encombrants, chers, peu faciles d'utilisation et par conséquent peu adaptés à l'analyse d'acétaldéhyde en air intérieur.

Cependant, contrairement au formaldéhyde qui fait l'objet d'un grand nombre de développements instrumentaux et pour lesquels des appareils commerciaux et en développement sont disponibles (Chiappini *et al.*, 2010), aucun appareil de mesure en continu, facile à mettre en œuvre et utilisable en air intérieur, n'est aujourd'hui disponible pour la mesure de l'acétaldéhyde. Les niveaux de ce composé dans les milieux clos n'en restent pas moins importants, parfois du même niveau voire supérieur aux niveaux de formaldéhyde.

3. État des lieux des niveaux de concentration en acétaldéhyde en air intérieur

Deux revues, l'une européenne (Sarigiannis *et al.*, 2011), l'autre américaine (Logue *et al.*, 2011) font un état des lieux des principaux polluants de l'air intérieur.

Ainsi, Logue *et al.* (2011), en compilant les résultats de 77 études publiées rapportant des mesures de polluants dans des résidences américaines, ont identifié neuf composés d'intérêt représentant un risque potentiel pour la santé. L'acétaldéhyde, pour lequel neuf études ont été recensées, et une concentration moyenne de $22 \mu\text{g m}^{-3}$ mesurée, en fait partie.

Sarigiannis *et al.* (2011) rapportent des concentrations moyennes entre 6 et $20 \mu\text{g m}^{-3}$ en acétaldéhyde mesurées au cours d'études européennes, principalement l'étude dans le cadre de l'étude AIRMEX (http://ihcp.jrc.ec.europa.eu/our_databases/airmex).

(3) INERIS (2011) - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques - Acétaldéhyde (consultable sur le portail des substances chimiques de l'INERIS, à l'adresse : <http://www.ineris.fr/substances/fr/glossaire/view/letter/A>).

Tableau 2 : Synthèse des méthodes de mesure de l'acétaldéhyde. * Les références sont données à titre d'exemple, la liste n'est pas exhaustive. AI : air intérieur
*Acetaldehyde measurement method synthesis. *references are given as example. IA: Indoor air*

Type de méthode		Supports commerciaux ou développés	Référence	Analyse	Temps, débits de prélèvement / Résolution temporelle	Limite de détection	Commentaires
Méthodes indirectes actives	*Dérivatisation DNPH (2,4-DiNitroPhénylHydrazine) / Extraction solvent	Sep-Pack® (Waters) LpDNPH® (Supelco) Possibilité d'imprimer de la silice avec de la DNPH	Gilbert <i>et al.</i> , 2005 Loh <i>et al.</i> , 2006 Marchand <i>et al.</i> , 2006 ; Uchiyama <i>et al.</i> , 2008	HPLC-UV	Quelques minutes – plusieurs heures quelques dizaines de mL min ⁻¹ à 1 L min ⁻¹	0,1 µg/tube qq µg m ⁻³ (prélèvement de 4h à 100 mL min ⁻¹)	Normalisée : NF ISO 16000-3 Artéfacts négatifs (ozonolyse hydrazones) =>pièges à ozone (iodure de potassium)
	Dérivatisation PFPH (pentafluorophenyl hydrazine) / Extraction solvent	Développé	Li <i>et al.</i> , 2009	GC/MS	80 mL min ⁻¹ 3-4 h	30 µg m ⁻³	Temps dérivatisation : 3 jours Pas adapté à la surveillance en AI
	Dérivatisation 2-(hydroxymethyl) piperidine (2-HMP) / Extraction solvent	Développé	Huynh <i>et al.</i> , 2002	GC/MS	100 – 500 mL min ⁻¹ Temps non précisé	Non précisé	
	Dérivatisation 2.3.4.5.6-PentaFluoroBenzylHydroxylAmine (PFBHA) et microextraction en phase solide, SPME	Développé	Koziel <i>et al.</i> , 2001	GC/FID	10 min – 8 h	Non précisé	Développé pour le formaldéhyde mais adaptable à la mesure de l'acétaldéhyde
	Dérivatisation PFBHA / thermodésorption	Développé	Sai Hang Ho <i>et al.</i> , 2002, Rossignol <i>et al.</i> , 2012	GC/MS	qq dizaine de min – qq heures / ~100 mL min ⁻¹	qq dixièmes de µg m ⁻³	Rossignol <i>et al.</i> , 2012 en cours de test pour la mesure de l'acétaldéhyde par le LCSQA
Méthodes indirectes passives	*Dérivatisation DNPH (2,4-DiNitroPhénylHydrazine) / Extraction solvent	Radiello code 165 (Fondazione Salvayore maugeri) DSD-DNPH (Supelco)	Bates <i>et al.</i> , 2000 ; Huynh <i>et al.</i> , 2002 ; Clarisse <i>et al.</i> , 2003 Uchiyama <i>et al.</i> , 2004	HPLC-UV	qq heures – 14 jours 84 mL min ⁻¹ (Radiello), ~50 mL min ⁻¹ (DSD-DNPH)	0,2 µg/tube soit ~0,3 µg m ⁻³ pour 4.5 jours de prélèvement	Normalisée : NF ISO 16000-4
	Dérivatisation DNSH (5-diméthylaminonaphthalène-1-sulfonyldrazine) / Extraction solvent	Développé / PAKS (Personal Aldehydes and Ketones Sampler)	Zhang <i>et al.</i> , 2000	HPLC-Fluorescence	24 à 48 heures	0,5 µg m ⁻³ pour un prélèvement de 24 h	
	Dérivatisation CNET : O-(4-cyano-2-ethoxybenzyl)hydroxylamine / Extraction solvent	Développé	Onishi <i>et al.</i> , 2007	HPLC-UV	8 et 24 heures 44 mL min ⁻¹	0,5 µg m ⁻³ pour un prélèvement 24 h	
Méthodes directes	Spectrométrie Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)	Développé ou commercialisé	Fung <i>et al.</i> , 1990	Absorption UV	qq minutes	qq µg m ⁻³	Techniques spécifiques, quantitatives et offrent une très bonne résolution temporelle mais sont lourdes à mettre en œuvre, peu adaptées à l'IAI
	Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR : Fourier Transform Infrared Absorption)	Commercialisé	Fung <i>et al.</i> , 1990 ; Hak <i>et al.</i> , 2005	Absorption IR	qq secondes	qq ng m ⁻³	
	Spectrométrie TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy).	Commercialisé	Fung <i>et al.</i> , 1990 ; Sauer <i>et al.</i> , 2003	Absorption IR	qq minutes	qq ng m ⁻³	
	Spectrométrie de masse en ligne (PTRMS)	Commercialisé	Karl <i>et al.</i> , 2007 ; Fortner <i>et al.</i> , 2009	MS	qq secondes	qq ng m ⁻³	

Ce rapport complète les deux précédentes études en balayant l'ensemble des travaux réalisés dans des environnements intérieurs aussi bien publics que résidentiels, et intégrant les études menées sur le continent asiatique. Une synthèse est présentée dans le tableau 3.

Compte tenu de son occurrence en air intérieur et de la similarité de certaines de leurs sources, les concentrations en formaldéhyde sont également reportées à titre indicatif.

Enfin, dans la mesure où les concentrations en acétaldéhyde sont systématiquement au moins trois fois plus importantes dans les environnements intérieurs par rapport à l'extérieur, les données de niveaux extérieurs ne sont pas précisées dans le tableau ci-dessous.

4. Exploitation des données et discussions

De manière générale, les concentrations en acétaldéhyde sont plus faibles que celles en formaldéhyde, le ratio formaldéhyde/acétaldéhyde présentant

en moyenne une valeur de trois. En Europe, ce ratio atteint une valeur maximale de 9 dans un magasin de meubles où les émissions en formaldéhyde s'expliquent aisément par la présence de tout type de mobilier et de matériaux. Il est le plus faible dans un supermarché (de l'ordre de 0,1) où les émissions de fruits et légumes peuvent expliquer la présence conséquente d'acétaldéhyde (Boschetti *et al.*, 1999 ; Pesis *et al.*, 2002).

Si l'on excepte les supermarchés, les concentrations en acétaldéhyde sont comparables, quel que soit l'environnement intérieur ou la localisation géographique, avec des valeurs comprises entre 13 et 16 $\mu\text{g m}^{-3}$. Les supermarchés se distinguent avec des concentrations moyennes environ trois fois plus élevées. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Wu *et al.*, 2011. Notons que ces concentrations moyennes sont toutes inférieures à la valeur guide de 46 $\mu\text{g m}^{-3}$ établie en Flandre (Stranger *et al.*, 2007).

La figure ci-dessous représente la distribution des concentrations en acétaldéhyde mesurées dans différents ERP des études recensées dans ce rapport. De même que pour Wu *et al.* (2011), les supermarchés se distinguent par des niveaux plus élevés.

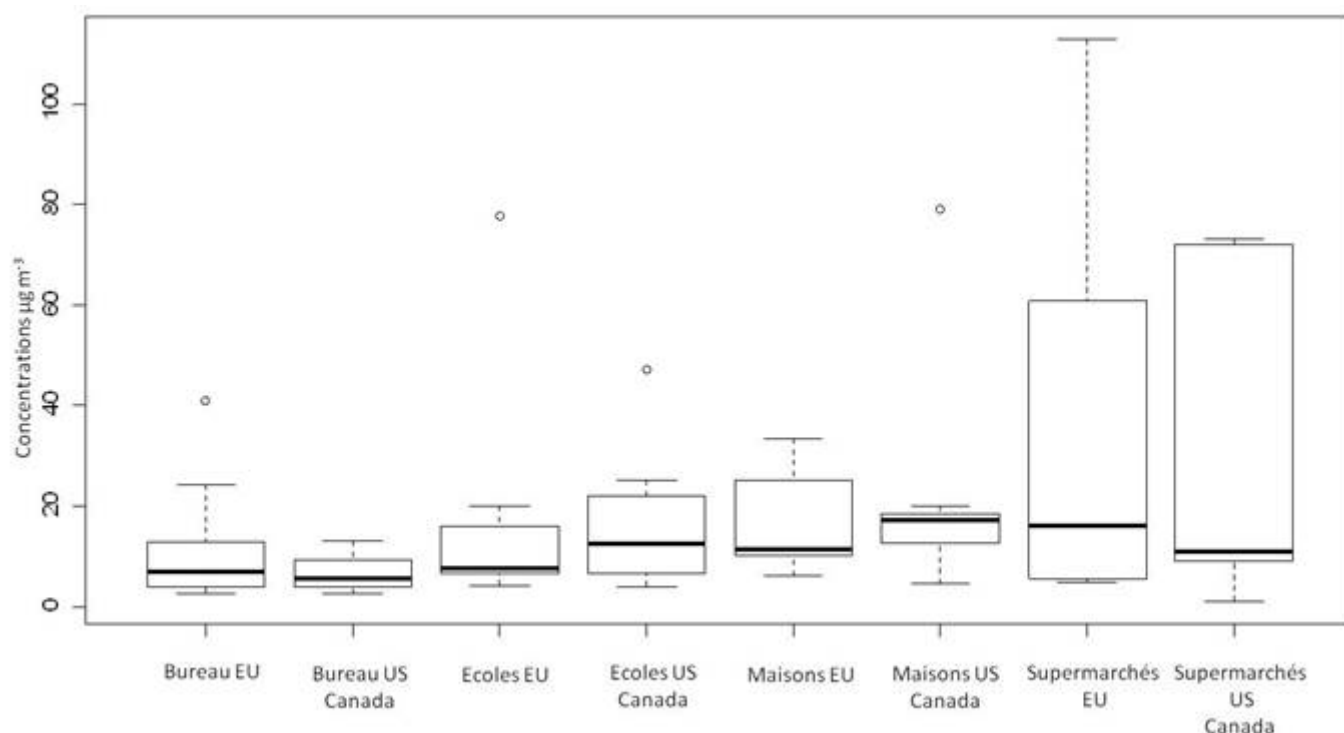


Figure 1. Concentrations en acétaldéhyde mesurées dans différents ERP des études recensées dans ce rapport. Le trait en gras représente la médiane sur l'ensemble des valeurs, la boîte en elle-même contient 50 % de toutes les valeurs, le haut correspondant au quantile à 75 %, et le bas au quantile à 25 %.

Acetaldehyde concentrations measured in the different indoor environments. Bold line: median, the box plot represent 50 % of the data, the top to the 75 % quantile, the bottom, the 25 % quantile.

Tableau 3. Synthèse des études recensées dans la littérature. NR : non renseigné. Form : formaldéhyde, Acet : acétaldéhyde. Toutes les concentrations notées c sont données en $\mu\text{g m}^{-3}$.
Synthesis of literature data. NM: Not mentioned, Form: formaldehyde, Acet: acetaldehyde. Concentrations are noted C and given in $\mu\text{g m}^{-3}$

Lieu	Nombre de sites/ points de mesure	Méthode de mesure	Durée	C moyennes		Form/Acet	C minimale		C maximale		Référence
				Acet	Form		Acet	Form	Acet	Form	
Europe : France											
Supermarché	1	Active (DNPH)	8-16 h	85	12	0	61	10	113	15	Rapport LCSQA, 2007
Magasin de meubles	1	Active (DNPH)	8-16 h	6	50	9	5	44	6	67	
Centre commercial	1 centre / 2 points de mesure	Active (DNPH)	20-90 min	25	28	1	24	28	26	28	Marchand <i>et al.</i> , 2006
Librairie	2	Active (DNPH)	20-90 min	8	45	6	5	31	12	62	
Bureau	1	Active (DNPH)	48 h	8	28	4					Rapport LCSQA-INERIS, 2008
Bureau	1	Passive (Radiello)	48 h	6	23	4	NR	NR	NR	NR	
Maison	4	Active (DNPH)	48h	23	43	2	11	38	34	51	
Maison	4	Passive (Radiello)	48h	25	45	2	9	39	33	58	
Maisons	567 / 2	Passive (Radiello)	7 jours	12	20	2	NR	NR	NR	NR	
Maison	61 maisons / 3 pièces	Passive (Radiello)	72 h	10	24	2	NR	NR	NR	NR	Clarisse <i>et al.</i> , 2003
Écoles	108 écoles (401 classes)	Passive (Radiello)	7 jours	7	19	3	3	4	10	30	Annesi-Maesano <i>et al.</i> , 2012
Écoles	3	Passive (Radiello)	7 jours	6	19	3	4	8	8	32	Atmo Picardie, 2009
Écoles	2	Passive (Radiello)	4,5 jours	6	22	4	5		11	32	Air PL, 2009
Écoles	5	Passive (Radiello)	4,5 jours	4	25	6	3	8	6	72	Air Breihz, 2012
Écoles	16 écoles	Passive (Radiello)	7 jours	10	38	4	6	14	16	67	OQAI, 2002
École	1 salle	Sep Pack	4 h	78	31	0	7	17	176	57	Rapport LCSQA-INERIS, 2009
École	1 école / 11 salles	Passive (Radiello)	4,5 jours	8	18	2	7	14	9	20	
Écoles maternelles	28	Passive (Radiello)	4,5 jours	7	24	3	6	18	9	30	Atmo Rhône-Alpes, 2007
Crèches	22	Passive (Radiello)	4,5 jours	8	18	2	6	15	9	22	
Bureaux	2	Passive (Radiello)	7 jours	24	57	2	NR	NR	NR	NR	ASPA, 2007

Lieu	Nombre de sites/ points de mesure	Méthode de mesure	Durée	C moyennes		Form/Acet	C minimale		C maximale		Référence
				Acet	Form		Acet	Form	Acet	Form	
Europe : Italie											
Maisons	5 urbains, 1 rural	Passive (Radiello)	24-72 h	6	10	2	2	4	26	53	Andreini et al., 2000
Maisons	59	Passive (Radiello)	24 h	11	16	1	5	0	39	42	Lovreglio et al., 2009
Finlande											
Exposition	15 personnes			14	26	2	4	9	27	49	Jurvelin et al., 2001
Maison	15 maisons			10	33	3	2	7	23	62	
Bureau	9			3	12	5	1	7	4	26	
Europe (Projet AIRMEX)											
Exposition	58 personnes	Passive (Radiello)	7 jours	9	NR	NR	1	NR	29	NR	Geiss et al., 2011
Lieux publics	3 ERP, 2 écoles par ville, 10 villes			13	NR	NR	4	NR	41	NR	
Maisons	96 mesures			14	NR	NR	5	NR	29	NR	

Lieu	Nombre de sites/ points de mesure	Méthode de mesure	Durée	C moyennes		Form/ Acet	C minimale		C maximale		Référence
				Acet	Form		Acet	Form	Acet	Form	
Canada											
Maison	59	Active (DNPH)	24 h	20	32	2	4	6	79	27	Gilbert <i>et al.</i> , 2005
Crèches	21	Mesure passive (SKC UME _x 100)	72 h	19	23	1	7	12	47	45	St-Jean <i>et al.</i> , 2011
États-Unis											
Supermarché	37	Active (DNPH)	4h	9	16	2	1	1	73	102	Wu <i>et al.</i> , 2011
Bureaux	1			5	15	3	3	7	13	31	Hodgson <i>et al.</i> , 2003
Maisons (avec chauffage au bois)	14	Passive	24 h	17	24	1	NR	NR	NR	NR	Gustafson <i>et al.</i> , 2007
Exposition dans maison avec chauffage au bois	14	Passive	24 h	17	24	1	NR	NR	NR	NR	
Maisons (sans chauffage au bois)	10	Passive	24 h	12	27	2	NR	NR	NR		Gustafson <i>et al.</i> , 2007
Exposition dans maison sans chauffage au bois	10	Passive	24 h	13	26	2	NR	NR	NR		
Écoles	20	Passive	7 jours	7	22	3	0	13	25	55	Shendell <i>et al.</i> , 2004
Écoles	200	Active (DNPH)	6-8 h	12	22	2	NR	NR	NR	NR	Jenkin <i>et al.</i> , 2003
Bureaux	23	Active (DNPH)		5	12	2	NR	NR	NR	NR	Subramanian <i>et al.</i> , 2000
Magasins/centres commerciaux	110	Active (DNPH)	7h	11	20	2	NR	NR	72	91	Loh <i>et al.</i> , 2006
Restaurants	20	Active (DNPH)	1,5h	24	14	1	NR	NR	48	185	Loh <i>et al.</i> , 2006
Asie											
ERP	23 sites (818 points de mesure)	Passive	Non précisé	6	18	3	1	1	75	105	Kunugita <i>et al.</i> , 2011
Centres commerciaux	3	Active (DNPH)	3-6h	13	125	10	9	61	19	246	Weng <i>et al.</i> , 2009
Supermarchés	2	Active (DNPH)	3-6h	45	63	1	30	53	56	76	
Magasin de meubles	1	Active (DNPH)	3-6h	27	165	6	NR	NR	NR	NR	
Cinéma	3	Active (DNPH)	3-6h	25	82	3	15	65	32	115	
Gare	2	Active (DNPH)	3-6h	20	16	1	15	12	18	20	

Il est important de considérer l'ensemble de ces données et en particulier celles obtenues par mesure passive au regard des travaux du LCSQA en cours qui ont montré d'importants écarts entre les mesures passives et les mesures actives, de l'ordre de 60 %, les tubes passifs se caractérisant par une tendance à la sous-estimation des concentrations en acétaldéhyde.

Un fort besoin peut donc être exprimé, au même titre que pour le formaldéhyde, composé pour lequel des techniques commencent à émerger, de validation des méthodes existantes mais également de développer des méthodes de mesure pratiques, adaptées à l'air intérieur et au suivi en continu de ce composé, dont les sources majoritaires semblent être ponctuelles.

Andreini BP, Baroni R, Galimberti E, Sesana G. Aldehydes in the atmospheric environment: evaluation of human exposure in the north-west area of Milan. *Microchem. J.* 2000; 67: 11-9.

Annesi-Maesano I, Hulin M, Lavaud F *et al.* Poor air quality in classrooms related to asthma and rhinitis in primary schoolchildren of the French 6 Cities Study. *Thorax* 2012; 67: 682-8.

ANSES. Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur : évolution de la méthode d'élaboration des valeurs guides de qualité d'air intérieur. <http://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2010sa0307Ra.pdf>, 2011.

ASPA. Suivi de la qualité de l'air en atmosphère intérieure dans les locaux de l'école maternelle et élémentaire Les Vergers, Illkirch Graffenstaden. http://www.atmo-alsace.net/medias/produits/Campagne_de_mesure_en_a.pdf, 2007.

Atmo Picardie. Mesure de la qualité de l'air des crèches et écoles d'Amiens Métropole. http://www.atmo-picardie.com/publications/fichiers/88/Synthese_QAI_creches_ecoles.pdf, 2009:

Atmo Rhône-Alpes. Mesure des aldéhydes dans l'air intérieur des écoles maternelles et des crèches de la région Rhône-Alpes. <http://www.air-rhonealpes.fr/site/media/telecharger/161385>, 2007:

Auvinen J, Wirtanen L. The influence of photocatalytic interior paints on indoor air quality - *Atmos. Environ.* 2008, 42, 4101-12.

Barker R, Williamson M. Assessment of VOC emissions and their control from baker's yeast manufacturing facilities. Final report: Medium: X; Size: Pages: (55 p).

Bates MS, Gonzalez-Flesca N, Sokhi R, Cocheo V. Atmospheric volatile organic compound monitoring. Ozone induced artefact formation. *Environ. Monit. Asses.* 2000; 65: 89-97.

Belgisch Staatsblad Belgisch Staatsblad. 19.10.2004 <http://reflex.raadvst-consetat.be/reflex/pdf/Mbbs/2004/10/19/88722.pdf>, 2004:

Boschetti A, Biasioli F, van Opbergen M *et al.* PTR-MS real time monitoring of the emission of volatile organic compounds during postharvest aging of berryfruit - *Postharvest Biol. Tech.* 1999; 17: 143-51.

Bruinen de Bruin Y, Koistinen K, Kephelopoulos S *et al.* Characterisation of urban inhalation exposures to benzene, formaldehyde and acetaldehyde in the European Union: comparaison of measured and modelled exposure data. *Environ. Sci. Pollut. R.* 2008; 15: 417-30.

Chang JC. Report on the Development of a Standard Test Method for VOC Emissions from Interior Latex and Alkyd Paints. EPA Indoor Environment Management Branch, 2001.

Chiappini L, Dagnellie R, Sassine M *et al.* Multi-tool formaldehyde measurement in simulated and real atmospheres for indoor air survey and concentration change monitoring. *Air Quality, Atmosphere & amp Health*, 2010: 1-10

CHPS Collaborative for High Performance Schools (CHPS) <http://www.chps.net/overview/overviewHealthProductivity.htm>, 1999.

Clarisse B, Laurent AM, Seta N *et al.* Indoor aldehydes: measurement of contamination levels and identification of their determinants in Paris dwellings. *Environ. Res.* 2003; 92: 245-53.

Destailats H, Lunden M, Singer BC *et al.* Indoor secondary pollutants from household product emissions in the presence of ozone: A bench-scale chamber study. *Environ. Sci. Tech.* 2006; 40: 4421-8.

Fortner EC, Zheng J, Zhang R *et al.*, Measurements of Volatile Organic Compounds Using Proton Transfer Reaction - Mass Spectrometry during the MILAGRO 2006 Campaign - *Atmos. Chem. Phys.* 2009; 9: 467-81.

Fung K, Wright B. Measurement of Formaldehyde and Acetaldehyde Using 2,4-Dinitrophenylhydrazine-impregnated Cartridges During the Carbonaceous Species Methods Comparison Study - *Aerosol Sci. Tech.* 1990; 12: 44-8.

Geiss O, Giannopoulos G, Tirendi S *et al.* The AIRMEX study – VOC measurements in public buildings and schools/ kindergartens in eleven European cities: Statistical analysis of the data - *Atmos. Environ.* 2011; 45: 3676-84.

Gilbert NL, Guay M, David J *et al.* Levels and determinants of formaldehyde, acetaldehyde, and acrolein in residential indoor air in Prince Edward Island, Canada - *Environ. Res.* 2005; 99: 11-7.

Grosjean E, Williams EL, Grosjean D. Ambient Levels of Formaldehyde and Acetaldehyde in Atlanta, Georgia - *Air & Waste* 1993; 43: 469-74.

Gustafson P, Barregard L, Strandberg B, Sallsten G. The impact of domestic wood burning on personal, indoor and outdoor levels of 1,3-butadiene, benzene, formaldehyde and acetaldehyde - *J. Environ. Monit.* 2007; 9: 23-32.

Hak C, Pundt I, Trick S *et al.* Intercomparison of four different in-situ techniques for ambient formaldehyde measurements in urban air - *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2005: 2881-2900.

HCRC Health Care Research Collaboration - <https://www.healthybuilding.net/uploads/files/resilient-flooring-chemical-hazards-a-comparative-analysis-of-vinyl-and-other-alternatives-for-health-care.pdf>, 2009.

HEI Health Effects Institut, Sepcial report 16, Mobile-Source Air Toxics: a critical review of the literature on exposure and health effects: acetaldehyde - <http://pubs.healtheffects.org/getfile.php?u=388>, 2007.

Hodgson A, Daisey JM, Mahanama KR *et al.* Use of volatile tracers to determine the contribution of environmental tobacco smoke to concentrations of volatile organic compounds in smoking environments - *Environ. Int.*, 22, 1996: 295-307.

Hodgson AT, Faulkner D, Sullivan DP *et al.* Effect of outside air ventilation rate on volatile organic compound concentrations in a call center - *Atmos. Environ.*, 37, 2003: 5517-27.

Huang YT, Chen CC, Chen YK *et al.* Environmental test chamber elucidation of ozone-initiated secondary pollutant emissions from painted wooden panels in buildings - *Build. Environ.*, 50, 2011: 135-40.

Huynh CK, T Vu-Duc. Intermethod comparisons of active sampling procedures and analysis of aldehydes at environmental levels - *Anal. Bioanal. Chem.*, 372, 2002: 654-7.

IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risks of chemical to humans - <http://www.inchem.org/documents/iarc/iarc/iarc740.htm>, <https://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol74/mono74.pdf> 1999.

INERIS Données technico-économiques sur les substances chimiques en France: acétaldéhyde, 309 - <http://www.ineris.fr/substances/fr/glossaire/view/letter/A>, 2011.

Jenkin PL, T Phillips, J Waldman. Report to the California Legislature Environmental health conditions in California's portable classrooms - Disponible sur <http://www.arb.ca.gov/research/indoor/pes/pes.htm>, 2003.

Jurvelin J, M Vartiainen, M Jantunen, P Pasanen. Personal Exposure Levels and Microenvironmental Concentrations of Formaldehyde and Acetaldehyde in the Helsinki Metropolitan Area, Finland - *J. Air Waste Manage.*, 51, 2001: 17-24.

Kabir E, KH Kim. An investigation on hazardous and odorous pollutant emission during cooking activities - *J. Hazard. Mater.*, 188, 2011: 443-54.

Kagi, N., S. Fujii, H. Tamura and N. Namiki Secondary VOC emissions from flooring material surfaces exposed to ozone or UV irradiation - *Build. Environ.*, 44, 2009: 1199-205.

Karl TG, TJ Christian, RJ Yokelson *et al.* The Tropical Forest and Fire Emissions Experiment: method evaluation of volatile organic compound emissions measured by PTR-MS, FTIR, and GC from tropical biomass burning - *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2007: 5883-97.

Katragadda HR, A Fullana, S Sidhu, AA Carbonell-Barrachina. Emissions of volatile aldehydes from heated cooking oils - Food Chem., 120, 2010: 59-65.

Koziel JA, J Noah, J Pawliszyn. Field sampling and determination of formaldehyde in indoor air with solid-phase microextraction and on-fiber derivatisation - Environ. Sci. Technol., 35, 2001: 1481-6.

Kunugita N, K Arashidani, T Katoh. Investigation of air pollution in large public buildings in Japan and of employees' personal exposure levels, 2011, Abdul-Wahab, S.A.

Leungsakul S, M Jaoui, RM Kamens. Kinetic mechanism for predicting secondary organic aerosol formation from the reaction of d-limonene with ozone, - Environ. Sci. Tech., 39, 2005: 9583-94.

Li J, YL Feng, CJ Xie *et al.* Determination of gaseous carbonyl compounds by their pentafluorophenyl hydrazones with gas chromatography/mass spectrometry - Anal. Chim. Acta, 635, 2009: 84-93.

Logue JM, TE McKone, MH Sherman, BC Singer. Hazard assessment of chemical air contaminants measured in residences - Indoor Air, 21, 2011: 92-109.

Loh MM, EA Houseman, GM Gray *et al.* Measured concentrations of VOCs in several non-residential microenvironments in the United States - Environ. Sci. Tech., 40, 2006: 6903-11.

Lovreglio P, A Carrus, S Lavicoli *et al.* Indoor formaldehyde and acetaldehyde levels in the province of Bari, South Italy, and estimated health risk - J. Environ. Monit., 11, 2009: 955-61.

Marchand C, B Bulliot, S Le Calvé, P Mirabel. Aldehyde measurements in indoor environments in Strasbourg (France) - Atmos. Environ., 40, 2006: 1336-45.

Missia DA, E Demetriou, N Michael *et al.* Indoor exposure from building materials: A field study - Atmos. Environ., 44, 2010: 4388-95.

Morrison GC, WW Nazaroff. Ozone Interactions with Carpet: Secondary Emissions of Aldehydes - Environ. Sci. Tech., 36, 2002: 2185-92.

Nicolas MI, O Ramalho, FO Maupetit. Reactions between ozone and building products: Impact on primary and secondary emissions - Atmos. Environ., 41, 2007: 3129-38.

OEHA Acetaldehyde Reference Exposure Levels,
<http://oeha.ca.gov/media/downloads/air/document/acetaldehydepostsrp3.pdf> 2008

Onishi M, Y Sekine, K Sugihara *et al.* A passive sampler for the determination of carbonyl compounds in indoor air employing O-(4-cyano-2-ethoxybenzyl)hydroxylamine as reactive adsorbant - J. Health Sci., 53, 2007: 413-22.

OQAI Rapport exécutif des résultats de l'étude pilote à la définition de la campagne nationale dans les logements - 2002.

OQAI Campagne de surveillance nationale sur la qualité de l'air intérieur dans les logements français -
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/OQAI.pdf> 2006.

Pesis E, O Dvir, O Feygenberg *et al.* Production of acetaldehyde and ethanol during maturation and modified atmosphere storage of litchi fruit - Postharvest Biol. Tech., 26, 2002: 157-65.

Rapport LCSQA-INERIS Mesure du formaldéhyde - <http://www.lcsqa.org/action/2008/air-interieur/mesure-formaldehyde>, 2008.

Rapport LCSQA-INERIS Mesure du formaldéhyde - <http://www.lcsqa.org/action/2009/missions-diverses/mesure-formaldehyde>, 2009.

Rapport LCSQA Comparaison de différentes méthodes de prélèvement des aldéhydes en présence d'ozone, en atmosphères réelle et simulée - <http://www.lcsqa.org/rapport/2007/ineris/mesure-formaldehyde>, 2007.

Rossignol S, L Chiappini, E Perraudin *et al.* Development of parallel sampling and analysis for the elucidation of gas/particle partitioning of oxygenated semi-volatile organics: a limonene ozonolysis study - *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2012: 1459-89.

Sai Hang Ho S, JZ Yu. Feasibility of collection and analysis of airborne carbonyls by on-sorbent derivatization and thermal desorption - *Anal. Chem.*, 74, 2002: 1232-40.

Sarigiannis DA, SP Karakitsios, A Gotti *et al.* Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk - *Environ. Int.*, 31, 2011: 743-65.

Sauer CG, JT Pisano, DR Fitz. Tunable diode laser absorption spectrometer measurements of ambient nitrogen dioxide, nitric acid, formaldehyde, and hydrogen peroxide in Parlier, California - *Atmos. Environ.*, 37, 2003: 1583-91.

SCCS Européan Commission, Scientific Committee on Consumer Safety, Opinion on Acetaldehyde - http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_o_104.pdf, 2012.

Shendell D, AM Winer, TH Stock *et al.* Air concentrations of VOCs in portable and traditional classrooms: Results of a pilot study in Los Angeles County - *J. Expo. Anal. Env. Epid.*, 14, 2004: 44-59.

St-Jean M, A St-Amand, NL Gilbert *et al.* Indoor air quality in Montreal area day-care centres, Canada - *Environ. Res.*, 118, 2011: 1-7.

Steinemann AC, IC MacGregor, SM Gordon *et al.* Fragranced consumer products: Chemicals emitted, ingredients unlisted - *Environ. Impact Assess.*, 31, 2011: 328-33.

Stranger M, SS Potgieter-Vermaak, R Van Grieken. Comparative overview of indoor air quality in Antwerp, Belgium - *Environ. Int.*, 33, 2007: 789-97.

Subramanian P, GM Breuer, SJ Reynolds. Low Molecular Weight Carbonyls in Large Midwestern Office Buildings - *Int. J. Environ. An. Ch.*, 76, 2000: 215-39.

Uchiyama S, S Aoyagi, M. Ando. Evaluation of a diffusive sampler for measurement of carbonyl compounds in air - *Atmos. Environ.*, 38, 2004: 6319-26.

Uchiyama S, Y Otsubo. Simultaneous determination of ozone and carbonyls using trans-1,2-bis(4-pyridyl)ethylene as an ozone scrubber for 2,4-dinitrophenylhydrazine-impregnated silica cartridge - *Anal. Chem.*, in press, 2008.

US EPA (IRIS) Acetaldehyde - Reference Concentration for Chronic Inhalation Exposure (RfC). U.S. Environmental Protection Agency - Integrated Risk Information System - <http://www.epa.gov/iris/>, https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0290_summary.pdf 1991.

Wang H, G. C. Morrison. Ozone-surface réactions in five homes: surface reaction probabilities, aldehydes yields, and trends - *Indoor Air*, 20, 2010: 224-34.

Weng M, L. Zhu, K. Yang, S. Chen. Levels and health risks of carbonyl compounds in selected public places in Hangzhou, China - *J. Hazard. Mater.*, 164, 2009: 700-6.

Weschler CJ. Changes in indoor pollutants since the 1950s - *Atmos. Environ.*, 43, 2009: 153-69.

Weschler C, Hodgson AT, Wooley JD. Indoor chemistry: ozone, volatile organic compounds, and carpets - *Environ. Sci. Tech.*, 26, 1992: 2371-7.

Wu XM, Apte MG, Maddalena R, Bennett DH. Volatile Organic Compounds in Small- and Medium-Sized Commercial Buildings in California - *Environ. Sci. Technol.*, 45, 2011: 9075-83.

Yeretzian C, Jordan A, Badoud R, Lindinger W. From the green bean to the cup of coffee: investigating coffee roasting by on-line monitoring of volatiles - *Eur. Food Res. Technol.*, 214, 2002: 92-104.

Zhang J, Liou P, He Q. Characteristics of aldehydes: concentrations, sources, and exposures for indoor and outdoor residential microenvironments - *Environ. Sci. Tech.*, 28, 1994: 146-52.

Zhang J, Zhang L, Fan Z, Ilacqua V. Development of the Personal Aldehydes and Ketones Sampler Based upon DNSH Derivatization on Solid Sorbent - *Environ. Sci. Tech.*, 34, 2000: 2601-7.