

Livrable

LOT 2 : Caractérisation des sources et exposition typique dans les bâtiments résidentiels

Le 23/02/2026

Auteur(s) : Eol Geffre (LaSIE) et Marc Abadie (LaSIE)

Ce document est extrait des travaux réalisés dans le cadre du projet SmartAIR
Les organismes présentés ci-dessous contribuent à ce projet :

Partenaires financiers du projet



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Contacts : Etienne Marx, suivi technique du projet

Frédérique BIENVENU chargée des suivis administratifs et financiers

Ministère de la Transition Ecologique

Contact : en attente du successeur de Léa GAROT, Cheffe de projet
Acoustique et Qualité de l'Air Intérieur, DHUP/QC1

Partenaires techniques du projet



Cerema

Contact : Gaelle Guyot, gaelle.guyot@cerema.fr



Université de la Rochelle - Laboratoire LaSIE (UMR CNRS 7356)

Contact : Marc Abadie, mabadie@univ-lr.fr

Rapport établi par :

Date	Version	Commentaires
04/02/2026	v1	Rédaction par Eol Geffre – version 1
23/02/2026	v2	Intégration des dernières publications

Notice analytique :

Références	Informations
Commanditaire :	ADEME 500 Route des Lucioles 06560 Valbonne
Objet de l'étude :	Développement d'une approche performancielle pour les stratégies intelligentes de gestion de la qualité de l'air – vers une performance globale intégrant énergie, santé et QAI dans les bâtiments résidentiels
Résumé de la commande :	Prestations réalisées dans le cadre de l'appel à projet "AQACIA" - Edition 2022. Réponse technique et financière présentée à l'ADEME
Référence du dossier :	Convention de financement ADEME / Partenaires du projet n°2262D0108
Communicabilité :	☐ Libre (avec acceptation du commanditaire dans le contrat) ☐ Contrôlée (communiquée avec l'autorisation du commanditaire) ☒ Confidentielle
Pilote du projet :	Cerema : Gaëlle GUYOT Gaelle.guyot@cerema.fr
Constitution de l'équipe :	Cerema et La Rochelle Université (LaSIE)
Mots clés :	Ventilation, Performance, Evaluation, Logement, smart ventilation, simulation

Liste des destinataires :

Contact	Adresse	Nbre et Type
Etienne Marx Frédérique Bienvenue	ADEME, 500 Route des Lucioles, 06560 Valbonne	1 (PDF)

Résumé :

Ce livrable, produit dans le cadre du projet SmartAIR, est consacré à la caractérisation des sources de pollution intérieure et à l'évaluation de l'exposition dans les bâtiments résidentiels. La première partie présente la base de données PANDORA, un référentiel ouvert qui recense les taux d'émission de polluants (formaldéhyde, COV, particules, etc.) issus de matériaux, équipements et activités, et leur utilisation pour la modélisation de la qualité de l'air intérieur. La seconde partie décrit des outils et méthodes standardisées pour analyser les données de terrain, permettant d'établir des concentrations typiques de polluants (CO₂, PM_{2.5}, COVT, etc.) selon les types de ventilation et d'usage des espaces.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
1 CARACTERISATION DES SOURCES	5
1.1 Revue de la littérature sur les taux d'émission des sources de polluants intérieurs	5
1.1.1 Matériaux de construction et de décoration	6
1.1.2 Meubles	6
1.1.3 Produits de nettoyage et désodorisants	7
1.1.4 Occupants et activités des occupants	7
1.1.5 Appareils de chauffage et de cuisson	8
1.1.6 Équipements électriques	9
1.1.7 Emissions à l'échelle de la pièce ou d'un bâtiment	9
1.2 Base de données Pandora	9
1.2.1 Structure	9
1.2.2 Données individuelles	12
1.2.3 Analyse des données	14
1.2.4 Exemple d'utilisation de PANDORA	17
2 EXPOSITION TYPIQUE / CONCENTRATION TYPIQUE	23
2.1 Liste récapitulative des mesures pertinentes de la QAI	23
2.2 Description de l'analyse standardisée	25
2.2.1 Concept global	25
2.2.2 Procédure d'analyse	26
2.2.3 Implémentation en R	28
2.2.4 Fourniture de métadonnées	29
2.3 Dépôt de données et dépôt open source (Git)	30
2.3.1 Dépôt de la base de données QAI	30
2.3.2 Dépôts d'analyse des données QAI	31
2.4 Méta-analyse de la base de données QAI	32
2.4.1 Agrégation des résultats de différentes études	32
2.4.2 Synthèse des concentrations typiques de polluants intérieurs et des conditions intérieures	34
2.4.3 Estimation exemplaire des taux d'émission de formaldéhyde et de COVT	37
3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES	39

3.1	Caractérisation ascendante et descendante des émissions de formaldéhyde	39
3.2	Synthèse et perspectives	40
4	REFERENCES	41
ANNEXE 1 : INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES SUR LES ETUDES DE LA BIBLIOGRAPHIE		47
ANNEXE 2 : INFORMATIONS SUR LES CONDITIONS DE MESURE DES DONNEES COMPILEES		69
ANNEXE 3 : CHAMPS STANDARDISES DES INFORMATIONS CONCERNANT LES ETUDES ANALYSEES		76
ANNEXE 40 : SYNTHESE DES RESULTATS DE LA META-ANALYSE		79

INTRODUCTION

Le présent livrable vise à synthétiser les développements théoriques et pratiques développés au cours de la sous-tâche 2 (*subtask 2*) de l'Annexe 86 de l'Agence Internationale de l'Energie (2020-2025). Cette sous-tâche intitulée « *Source characterization and typical exposure in residential buildings* » était décomposée selon deux phases : la première dédiée à la caractérisation des sources intérieures de polluants et la seconde à la connaissance de la qualité environnementale des bâtiments résidentiels, avec un focus particulier sur les niveaux de concentration des polluants rencontrés à l'intérieur des logements.

Ainsi, la coordination de ces travaux a été exercée par Marc Abadie (La Rochelle Université) pour la partie relative à la compilation et à l'analyse des taux d'émission des sources de polluants communément rencontrées à l'intérieur des logements et par Gabriel Rojas pour les niveaux de concentration. In fine, une trentaine de chercheurs (Tableau 1) se sont investis dans les différentes étapes d'études bibliographiques, de compilation, d'analyse de données et de rédaction de livrables et d'articles.

Ces travaux ont donné lieu à diverses publications tout au long du projet de recherche. Ils ont été répertoriés dans les livrables ou parties de livrables de l'Annexe 86 (<https://annex86.iea-ebc.org/publications>).

- D1: *A literature list for energy efficient energy management* (Laverge, 2025).
 - Chapitre 2 “*ST2 : Source characterization and typical exposure in residential buildings*” : liste d'une centaine de références clés sur cette thématique.
- D2: *An open registry for the rating of IAQ management strategies* (Rojas et Abadie, 2025).
 - Livrable dédié à la sous-tâche 2 présentant les résultats en termes de référentiels, à savoir une base de données en libre accès sur Internet répertoriant les taux d'émission des sources intérieures (<https://db-pandora.univ-lr.fr/>) et une suite d'outils permettant de générer des concentrations types de polluants dans les bâtiments résidentiels (exposition type). Il s'agit de ressources importantes pour les concepteurs, les décideurs politiques et les autres parties prenantes qui souhaitent utiliser l'évaluation des performances basée sur la modélisation dans la conception et la notation des stratégies de gestion de la qualité de l'air intérieur (QAI).
- D3: *Methods and tools for the rating of IAQ management strategies* (Laverge et al., 2025).
 - Chapitre 3 “*ST2 : Source characterization and typical exposure in residential buildings*” : une trentaine de pages présentant les développements et les analyses des outils développés dans la sous-tâche 2.
- D4: *Energy Efficient IAQ management strategies – applications* (Kolarik, 2025).
 - Chapitre 2 “*Standardized statistical analysis and benchmarking of IAQ measurements*” : un exemple d'utilisation des outils développés sur les niveaux de concentration en polluants (relatif au D2).
 - Chapitre 3 “*Pollutant Load from Building Envelope Materials for Indoor Air Quality Modelling*” : un exemple d'utilisation des données de PANDORA (relatif au D2) effectué dans le cadre du projet Smart-Air pour la détermination des taux d'émission des sources du lot 3.

Enfin, ces travaux ont fait l'objet de deux publications dans des journaux scientifiques : *Journal of Building Engineering* pour la base de données PANDORA (Abadie et al., 2025) et

Building and Environment pour les expositions aux polluants dans les logements (Rojas et al., 2026a).

Tableau 1 : Chercheurs impliqués dans la sous-tâche 2 de l'Annexe 86.

Nom	Institution	Pays
Andreas Frei	Universität Innsbruck	Austria
Aurora Monge Barrio	Universidad de Navarra	Spain
Bart Cremers	Zehnder	The Netherlands
Charles-Florian Picard	Tipee	France
Constanza Molina	Pontificia Universidad Catolica de Chile	Chile
Dusan Licina	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	Switzerland
Eol Geffre	LaSIE - La Rochelle Université	France
Francesco Babich	Eurac Research	Italy
Gabriel Bekö	Danmarks Tekniske Universitet	Denmark
Gabriel Rojas	Universität Innsbruck	Austria
Gráinne McGill	University of Strathclyde	United Kingdom
Hala Hassan	University of Galway	Ireland
James McGrath	Maynooth University	Ireland
Kevin Verniers	Renson	Belgium
Lena Mayr	Universität Innsbruck	Austria
Linda Toledo	Eurac Research	Italy
Marc Abadie	LaSIE - La Rochelle Université	France
Marcel Loomans	Technische Universiteit Eindhoven	The Netherlands
Maria Justo Alonso	SINTEF	Norway
Marie Coggins	University of Galway	Ireland
Mohsen Pourkiaei	Maynooth University	Ireland
Nuria Casquero-Modrego	Lawrence Berkeley National Laboratory	USA
Peter Tappler	Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie	Austria
Reto Stauffer	Universität Innsbruck	Austria
Sasan Sadrizadeh	Kungliga Tekniska högskolan	Sweden
Sascha Hammes	Universität Innsbruck	Austria
Timm Freundorfer	Universität Innsbruck	Austria

Le présent livrable reprend les développements principaux des travaux de la sous-tâche 2 de l'Annexe 86 et, à ce titre, apporte une traduction/synthèse/relecture de plusieurs des documents précités. Une première partie est dédiée à la caractérisation des sources (base de données PANDORA) et présente ainsi un état des lieux des connaissances sur les taux d'émission des sources et de leur utilisation dans la modélisation. Une seconde partie présente les outils/base de données permettant d'analyser l'exposition aux polluants dans les bâtiments résidentiels.

1 CARACTERISATION DES SOURCES

Les modèles de qualité de l'air intérieur (QAI) nécessitent des données d'entrée variées, notamment des informations sur les fuites de l'enveloppe, les conditions météorologiques, les caractéristiques des systèmes de ventilation, les taux d'émission des sources de contaminants, taux d'élimination par dépôt (ou réactions), les plannings d'occupation et les taux d'élimination par les purificateurs d'air. Howard-Reed and Polidoro (2006) ont souligné que, bien que la plupart de ces données soient disponibles dans la littérature, elles sont rarement compilées en une source facilement accessible. Ils ont conclu qu'il était urgent de créer des bases de données bien conçues de données mesurées des contaminants pour simplifier le processus de modélisation de la QAI et permettre d'évaluer la qualité et l'exhaustivité des données. Cela a conduit à la création, en 2009, de la base de données PANDORA (comPiAation of iNDoOR Air pollutant emissions), qui compile de manière systématique les données disponibles sur les taux d'émission des polluants gazeux et particulaires, offrant ainsi des informations précieuses aux modélisateurs de la QAI (Abadie and Blondeau, 2011). L'objectif principal des participants à la sous-tâche 2 de l'Annexe 86 était de découvrir et de rassembler de nouvelles données d'entrée nécessaires aux modélisateurs de la QAI pour caractériser avec précision les sources intérieures de polluants puisque l'intégration des données de la littérature s'était arrêtée en 2014. La première section de ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour identifier, implémenter et analyser les taux d'émission des polluants provenant de sources intérieures. La seconde section détaille la base de données PANDORA, y compris les données sous-jacentes et les instructions pour son utilisation afin d'évaluer les taux d'émission des outils de modélisation de la QAI.

1.1 Revue de la littérature sur les taux d'émission des sources de polluants intérieurs

Les recherches scientifiques sur les taux d'émission se sont d'abord concentrées, au début des années 1980, sur les émissions intérieures provenant des appareils de chauffage et de cuisson tels que les cuisinières domestiques à gaz, les poêles à gaz, les chauffages d'appoint non ventilés à gaz ou à pétrole, ainsi que les poêles à bois conventionnels et catalytiques. Cette catégorie représente aujourd'hui 12 % des références collectées dans PANDORA. Dans les années 1990, plusieurs études se sont intéressées aux équipements électriques rencontrés en milieu professionnel (imprimantes, photocopieurs, ordinateurs, etc.) en tant que sources de polluants intérieurs. En 1997, Bluyssen et al. ont défini les principes d'évaluation des émissions de composés organiques volatils (COV) provenant des matériaux de construction, en se concentrant particulièrement sur une procédure d'évaluation des revêtements de sol solides par la détermination des facteurs d'émission. Cela a marqué le début de divers projets sur les émissions des matériaux de construction et de décoration, qui constituent désormais 21 % des références intégrées dans PANDORA. Plusieurs bases de données sur les émissions ont ainsi été développées, notamment la base européenne SOPHIE (Oliveira Fernandes, 2001), celle de Californie pour les matériaux de construction des bâtiments scolaires (Alevantis, 2003), la base canadienne MEDB-IAQ (Won et Shaw, 2004), et plus récemment, la base européenne BUMA (Barrero, 2009). L'intérêt pour les émissions provenant des produits d'entretien et des désodorisants (11 % des références) ainsi que des meubles (7 %) a émergé au début des années 2000 (Zhu et al., 2001; Oliveira Fernandes, 2001). En parallèle, différentes études se sont penchées sur les émissions des

équipements électriques de bureau (14 % des références). L'étude de Klepeis et al. (2003) sur la fumée environnementale de tabac issue des cigares et cigarettes peut être considérée comme la première source de données liée aux occupants et à leurs activités. Cette catégorie a connu une croissance significative et représente désormais 30 % des références totales. Enfin, la dernière catégorie de sources (5 % des références), plus récente, traite les espaces intérieurs comme une source d'émission unique.

Les sections suivantes résument les articles dont les données ont été intégrées à PANDORA. La littérature est organisée selon la structure de la base de données, qui repose sur sept catégories de sources. Pour une compréhension approfondie des méthodes et des sources utilisées dans la mesure des taux d'émission de polluants, des tableaux synthétiques sont présentés en annexe 1, fournissant des informations complémentaires telles que les sources étudiées, les dimensions des chambres expérimentales, les conditions environnementales et le débit d'air frais, la durée des mesures, les polluants sélectionnés ainsi que les systèmes de mesure employés, et le type de données sur les taux d'émission fournies par les auteurs.

1.1.1 Matériaux de construction et de décoration

Bluyssen et al. (1997) ont développé une procédure pour évaluer les émissions de composés organiques volatils (COV) provenant des matériaux de construction, en se concentrant sur les revêtements de sol solides par la détermination des facteurs d'émission et la modélisation des concentrations intérieures de COV. Oliveira Fernandes (2001) a souligné la nécessité d'utiliser des matériaux à faibles émissions, en rapportant les émissions de COV et de formaldéhyde de divers matériaux de construction. Alevantis (2003) a comparé les émissions de COV entre des matériaux standards et durables, révélant que les revêtements à base de caoutchouc présentaient des émissions plus élevées. Afshari et al. (2003) ont étudié les émissions de COV des peintures, mettant en évidence le rôle de l'épaisseur du film. Won et Shaw (2004) ont créé une base de données couvrant 60 matériaux de construction, facilitant la sélection de produits à faibles émissions. Berrios et al. (2005) ont montré que les matériaux de bureau comme les moquettes émettaient moins de COV que les équipements électroniques. Bartekova et al. (2006) ont testé des panneaux OSB et des revêtements, concluant qu'ils respectaient les normes de faibles émissions. Le projet BUMA (Barrero, 2009) a développé une base de données d'émissions pour plus de 400 matériaux de construction. Plaisance et al. (2014) ont observé une variabilité significative des émissions de carbonylés parmi 23 matériaux. Maupetit (2014) a noté que les modèles additifs, c'est-à-dire l'addition des taux d'émission individuels des sources, surestiment les émissions totales des sources situées dans une pièce. Kozicki et al. (2018) ont évalué les émissions de COV des matériaux d'étanchéité, insistant sur l'importance de la ventilation. Kozicki et Guzik (2021) ont analysé les adhésifs, révélant des variations d'émissions selon la composition des matériaux. Caudron et al. (2022) ont observé une augmentation des émissions des matériaux biosourcés à humidité élevée. Jung et al. (2022) ont proposé des modèles d'émission de formaldéhyde, tandis que de Kort et al. (2023) ont évalué les émissions de différents matériaux en panneaux, soulignant les différences entre les options biosourcées et synthétiques.

1.1.2 Meubles

Oliveira Fernandes (2001) a synthétisé les émissions de COV provenant de sources intérieures dans la base de données SOPHIE, en mettant l'accent sur des tests réalisés sur des coussins à l'aide de petites chambres expérimentales dans des conditions contrôlées

(23 ± 1 °C, 45 ± 5 % HR), mesurant ainsi les émissions de COV et de formaldéhyde. Berrios et al. (2005) ont analysé les émissions provenant de sources passives (comme les bureaux et les chaises) et actives (comme les imprimantes et les ordinateurs) en milieu de bureau, constatant que les TVOC des meubles étaient négligeables. Roux (2012) a mesuré les émissions de COV et d'aldéhydes provenant de 21 meubles de crèche et de 38 composants individuels, observant des niveaux d'émission généralement faibles, avec des résultats variables selon qu'il s'agissait d'un meuble complet ou de composants séparés. Yan et al. (2019) ont étudié un tabouret et une table de chevet, révélant que les émissions de COV atteignaient un pic en 1 à 2 heures et identifiant des risques pour la santé liée à l'exposition au xylène. Enfin, Zheng et al. (2024) ont examiné les émissions lors d'activités en crèche, en particulier celles provenant des matelas, sous différentes conditions. Leurs résultats ont mis en évidence des risques sanitaires critiques pour les jeunes occupants, les profils d'émission étant influencés par le type et l'âge des produits.

1.1.3 Produits de nettoyage et désodorisants

Les produits d'entretien et les désodorisants constituent des sources majeures de pollution de l'air intérieur, émettant des COV et des particules fines ($PM_{2.5}$) qui peuvent réagir avec l'ozone pour former des polluants secondaires nocifs, comme le formaldéhyde et les aérosols organiques secondaires (Zhu et al., 2001; Singer et al., 2006). Les terpènes, tels que le limonène et l'alpha-pinène, souvent présents dans les produits parfumés, sont particulièrement réactifs, et leur interaction avec l'ozone augmente la formation de polluants secondaires (Liu et al., 2004; Nicolas et al., 2013). Zhu et al. (2001) ont identifié le 2-butoxyéthanol comme un COV clé dans les produits d'entretien, tandis que Singer et al. (2006) ont démontré que la dilution de ces produits réduit les émissions de COV. Afshari et al. (2005) et Géhin et al. (2008) ont mis en évidence des pics significatifs de particules ultrafines lors des activités de nettoyage, en particulier dans la plage de 5 à 40 nm. Nicolas et al. (2018) ont souligné la variabilité des émissions entre les produits commerciaux et faits maison, et Zheng et al. (2024) ont montré que la marque des produits, la température et l'humidité influencent les profils d'émission. Parmi les stratégies d'atténuation essentielles figurent une ventilation adéquate, l'utilisation diluée des produits et le non recours à des appareils générateurs d'ozone.

1.1.4 Occupants et activités des occupants

Klepeis et al. (2003) ont développé un modèle pour estimer les facteurs d'émission de particules à partir de sources intérieures, appliqué à la fumée environnementale de tabac. He et al. (2004) ont mesuré les taux d'émission de $PM_{2.5}$ pour des activités résidentielles à Brisbane, associant des concentrations élevées à des comportements spécifiques. Lee et Wang (2004) ont étudié les émissions de polluants atmosphériques provenant de la combustion d'encens dans une chambre contrôlée, révélant que l'encens est une source significative de pollution intérieure. Moser et al. (2005) ont analysé les COV exhalés, identifiant des différences entre fumeurs et non-fumeurs à l'aide de la spectrométrie de masse à transfert de protons (PTR-MS). Afshari et al. (2005) ont mesuré les émissions de particules de diverses sources intérieures, y compris les cigarettes et les bougies, lors d'expériences en chambre contrôlée. Wallace (2006) a rapporté les concentrations de particules selon différents types de cuisson, mettant en évidence des libérations variables de masse particulaire. Health Canada (2006) a analysé les émissions de tabac, en comparant les cigarettes nationales et importées. Zai et al. (2006) ont utilisé des modèles d'émission pour quantifier les particules de fumée de bougie selon différents modes de combustion. Yeung

and To, (2008) ont exploré les émissions de particules liées à la cuisson, estimant les taux d'émission pour les styles de cuisine chinoise et occidentale. Evans et al. (2008) ont examiné la production de fumées lors de la friture, notant des différences significatives entre les foyers. Kurosawa et al. (2008) ont étudié les COV émis par les téléviseurs et les chaussures, identifiant des émissions élevées de certains COV. Géhin et al. (2008) ont mesuré les émissions de particules liées aux activités résidentielles, détectant des particules ultrafines issues de la cuisson et du nettoyage. Pagels et al. (2009) ont étudié les émissions de bougies, signalant des taux massiques plus élevés en cas de suie. Riess et al. (2010) ont évalué les COV dans l'haleine exhalée pendant l'exercice. Derbez et Solal (2014) ont quantifié les émissions provenant de fournitures scolaires et de produits d'entretien. Tang et al. (2016) ont quantifié les émissions humaines de COV, révélant une contribution significative aux niveaux intérieurs de COV. Persily et de Jonge (2017) ont fourni des données sur la génération de CO₂ par les humains en fonction de l'activité, de l'âge et de la corpulence ; données essentielles pour les évaluations de ventilation. Nicolas et al. (2017) ont étudié les émissions d'encens et de bougies, constatant que l'encens produisait des niveaux de polluants plus élevés. O'Leary et al. (2019) ont analysé les émissions de cuisson dans des foyers néerlandais, notant des réductions significatives lors de l'utilisation des hottes. Zhao et al. (2021) ont quantifié les émissions de sources intérieures dans 40 foyers allemands, soulignant que les bougies étaient des contributeurs majeurs. Wang et al. (2022) ont mesuré les émissions de COV humains dans des conditions contrôlées, observant une augmentation en présence d'ozone. Enfin, Zheng et al. (2024) ont évalué les émissions de COV liées aux activités en crèche, incluant une évaluation des risques pour la santé.

1.1.5 Appareils de chauffage et de cuisson

Plusieurs études se sont concentrées sur les émissions de polluants provenant des appareils de chauffage et de cuisson en milieu résidentiel. Traynor et al. (1982) ont quantifié les émissions des tables de cuisson à gaz, démontrant l'efficacité d'un modèle de qualité de l'air intérieur pour prédire les niveaux de polluants. De même, Girman et al. (1982) ont évalué les émissions des cuisinières à gaz et des chauffages d'appoint non ventilés, soulignant les risques associés à ces appareils, en particulier dans les espaces mal ventilés. Borrazzo et al. (1987) ont utilisé des modèles de bilan massique pour étudier les émissions de CO et de NO₂ dans des logements énergivores, mettant en avant le rôle de l'échange d'air sur les niveaux de polluants. Cáceres et al. (1983) ont mesuré les émissions des chauffages à gaz et à pétrole, constatant que les niveaux de concentration dépassaient souvent les normes de qualité de l'air. McCrillis et Burnet (1990) ont mesuré les taux d'émission de hydrocarbures aromatiques polycycliques, tels que le naphthalène, le pyrène et le benzo(a)pyrène, issus de la combustion résidentielle du bois dans des poêles à bois (conventionnels et catalytiques), en fonction de différents taux de combustion, types de bois et altitudes. Tissari et al. (2008) ont comparé les conditions de combustion dans les poêles à bois, révélant que la combustion lente augmentait significativement les émissions de CO, de COV et de particules. En 2012, Carteret, Pauwels et Hanoune ont analysé, en laboratoire, les facteurs d'émission gazeux de deux types de chauffages mobiles au pétrole (à mèche et à injecteur) utilisant cinq carburants disponibles localement en France. Ces études soulignent collectivement l'importance d'une ventilation adéquate et d'un entretien régulier des appareils pour réduire la pollution de l'air intérieur liée aux sources de chauffage et de cuisson.

1.1.6 Équipements électriques

De nombreuses études ont examiné les émissions provenant des équipements de bureau et des appareils électroniques, mettant en lumière leur contribution à la pollution de l'air intérieur. Hetes et al. (1995) ont signalé que les émissions provenant des matériaux (comme les boîtiers et les encres) et des processus opérationnels augmentent les concentrations d'hydrocarbures, d'ozone et de particules, soulignant la nécessité de prévenir l'exposition aux photocopieurs utilisant des procédés secs. Black (1999) et Brown (1999) ont quantifié les émissions de COV, d'ozone et de PM₁₀ des imprimantes, photocopieurs et ordinateurs, révélant que les imprimantes laser émettent des niveaux de COV et d'ozone significativement plus élevés que les imprimantes à jet d'encre. Lam et Lee (2000) ont confirmé cette disparité en identifiant des émissions plus élevées de COV et d'ozone chez les imprimantes laser. Wensing (2002) et Nakagawa et al. (2003) ont observé une diminution des émissions de COV des appareils électroniques au fil du temps, mais des émissions constantes pendant leur fonctionnement. Funaki et al. (2003) ont démontré que des appareils comme les ordinateurs portables et les journaux photo contribuent de manière significative aux niveaux de COV et d'aldéhydes. Berrios et al. (2005) ont associé les sources actives (comme les ordinateurs et les imprimantes) à des niveaux élevés de COV. He et al. (2007) ont mis en avant l'impact des types d'imprimantes sur les émissions de particules ultrafines (UFP). Enfin, Géhin et al. (2008) ont souligné les émissions de particules fines et ultrafines liées aux activités résidentielles, tout en notant des émissions négligeables provenant des imprimantes.

1.1.7 Emissions à l'échelle de la pièce ou d'un bâtiment

Les études sur les taux d'émission des appareils de chauffage et de cuisson dans les bâtiments résidentiels ont apporté des éclairages précieux sur la qualité de l'air intérieur. Offermann et al. (2009) ont constaté que les logements équipés de systèmes de ventilation mécanique ne respectaient souvent pas les normes requises pour le formaldéhyde, avec des taux d'émission plus élevés que prévu, en particulier pendant les mois d'hiver. Blondel et Plaisance (2011) ont mesuré les taux d'émission de formaldéhyde provenant des matériaux intérieurs dans des résidences étudiantes, observant une variabilité des taux, avec des émissions plus élevées pour certains matériaux comme les lits. Chan et al. (2020) ont fourni des données détaillées sur plusieurs contaminants dans des maisons californiennes, incluant les PM_{2.5}, le CO, le NO₂ et le formaldéhyde, en capturant les concentrations variables de ces polluants au fil du temps. Leurs travaux soulignent l'importance de mesures précises des taux d'émission pour évaluer la qualité de l'air intérieur. Enfin, Zhao et al. (2022) se sont concentrés sur les émissions de formaldéhyde, utilisant un modèle de régression pour estimer les taux d'émission dans divers logements. Ils ont mis en évidence que la ventilation mécanique et les fuites d'air pouvaient influencer de manière significative ces émissions.

1.2 Base de données Pandora

1.2.1 Structure

La structure de la base de données PANDORA a été définie en 2009. La Figure 1 présente les principales tables de données et les liens qui les unissent. Cette structure repose sur quatre niveaux (Abadie and Blondeau, 2011) :

- **Catégorie** : La base de données est organisée en 8 catégories principales de sources intérieures : Matériaux de construction et de décoration, Mobilier, Produits

d'entretien et désodorisants, Occupants et activités des occupants, Appareils de chauffage et de cuisson, Équipements électriques, Pièce ou bâtiment entier.

- **Type global (ou sous-catégorie) :** Ce premier sous-niveau affine la description des sources intérieures. Par exemple, pour la catégorie « Occupants et activités des occupants », on trouve des sources variées comme le corps humain, la respiration, la cuisson, la peinture, le tabagisme, etc.
- **Type (ou source) :** Un dernier niveau apporte des précisions sur le type de source (ex. : « friture de viande à l'huile sur une plaque électrique », « cuisson de poisson au four électrique »), mais aussi sur le protocole expérimental (durée, conditions environnementales, débits d'air, quantité de produits utilisés, etc.), le lieu (résidentiel, école, bureau, hôpital, etc.), le pays d'origine et la référence de l'étude source.
- **Contaminant (ou polluant) :** Ce niveau définit les polluants générés par la source intérieure, avec leurs taux d'émission précisés à ce dernier niveau.

Cette structure en quatre niveaux a été conçue pour faciliter la navigation dans les données. Cependant, des informations complémentaires sur les sources ou les conditions expérimentales de mesure des taux d'émission peuvent être nécessaires. Des champs supplémentaires sont donc prévus dans les catégories **type** et **contaminant** pour ajouter des commentaires. Ainsi, la base de données PANDORA répertorie les principaux polluants intérieurs, accompagnés de leurs noms courants, synonymes et numéros CAS (Chemical Abstracts Service).

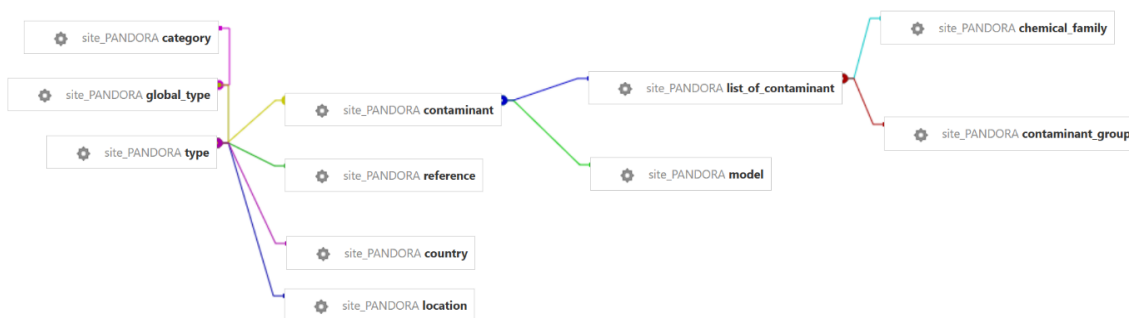


Figure 1 : Aperçu de la structure de PANDORA.

Un tableau important est la liste des modèles utilisés pour décrire les taux d'émission de polluants intérieurs d'une source. Le Tableau 2 présente les 25 modèles (ou façons d'exprimer les taux d'émission) intégrés dans la base de données, tenant compte du type de polluant (gaz ou particules), de la dépendance temporelle (état stationnaire ou transitoire) et de l'unité de taux d'émission. Par exemple, les données sur les COV pour les « Matériaux de construction et de décoration » sont exprimées sous forme de taux d'émission spécifiques à la surface et sont généralement fournies pour différentes périodes (modèle n°11), tandis que celles relatives aux « Occupants et activités des occupants » peuvent être rapportées à une utilisation (par unité, masse de produit ou énergie) ou directement intégrées en masse par unité de temps. Pour les particules, les taux d'émission sont exprimés en masse ou en nombre par unité de temps. Afin de limiter le nombre de modèles, des calculs complémentaires ont été réalisés à partir des données originales lorsque les informations fournies par les auteurs le permettaient.

Tableau 2 : Modèles d'émission de polluants utilisés dans la base de données PANDORA.

#	Description	Equation ⁽¹⁾
01	Gas - Steady-State - Emission Rate (µg/unit)	$S = a$
02	Gas - Steady-State - Emission Rate (mg/h)	$S = a$
03	Gas - Steady-State - Emission Rate (mg/m².h)	$S = a$
04	Gas - Steady-State - Emission Rate (mg/g)	$S = a$
05	Gas - Steady-State - Emission Rate (µg/(h.person))	$S = a$
06	Gas - Steady-State - Discrete Emission Data Model - Temp/RH (µg/h)	$S(T, RH) = a_i \text{ at } T_i \text{ and } RH_i$
07	Gas - Steady-State - Discrete Emission Data Model - Temp/RH (µg/(h.m²))	$S(T, RH) = a_i \text{ at } T_i \text{ and } RH_i$
08	Gas - Steady-State - Metabolism dependant (µg/(h.person)) ⁽²⁾	$S(BMR, M) = 3197 \times BMR \times M$
09	Gas - Steady-State - T/RH - House (mg/(h.m².floor)) ⁽³⁾	$S(T, RH) = H \times C_s \times \frac{(1 + A \times (T - 25))(1 + B \times (RH - 25))}{\frac{1}{a_t} + \frac{1}{k \times L}}$
10	Gas - Transient - Discrete Emission Data Model (µg/h)	$S(t) = a_i \text{ at } t = t_i$
11	Gas - Transient - Discrete Emission Data Model (µg/m².h)	$S(t) = a_i \text{ at } t = t_i$
12	Gas - Transient - Discrete Emission Data Model (µg/(h.unit))	$S(t) = a_i \text{ at } t = t_i$
13	Gas - Transient - Discrete Emission Data Model (µg/(h.g))	$S(t) = a_i \text{ at } t = t_i$
14	Gas - Transient - Peak Model (mg/m².h)	$S(t) = a_1 e^{-0.5 \left(\frac{\ln \frac{t}{t_p}}{a_2} \right)^2}$
15	Gas - Transient - Power Law Model (mg/m².h)	$S(t) = a_1 \times t_p^{-a_2} \text{ if } t \leq t_p$ $S(t) = a_1 \times t^{-a_2} \text{ if } t > t_p$
16	Gas - Transient - Single Exponential Decay Model (µg/h)	$S(t) = a_1 e^{-a_2 t}$
17	Gas - Transient - Double Exponential Decay Model (mg/(h.m²))	$S(t) = a_1 e^{-a_2 t} + a_3 e^{-a_4 t}$
18	Gas - Transient - Single Exponential Growth Model (µg/h)	$S(t) = a_1 + a_2(1 - e^{-a_3 t})$
19	Gas - Transient - Steps (mg/h)	$S(t) = a_i \text{ if } t(i-1) < t < t(i), t(0) = 0$
20	Particles - Steady-State - [dpmin; dpmax] (#/min)	$S(t) = a$
21	Particles - Steady-State - [dpmin; dpmax] (µg/unit)	$S(t) = a$
22	Particles - Steady-State - [dpmin; dpmax] (mg/min)	$S(t) = a$
23	Particles - Steady-State - Log-Normal Distribution (#/min)	$S(t) = \sum S_i \int \frac{1}{d_p(2\pi)^{0.5} \ln GSD_i} e^{-\frac{(\ln d_p - \ln GMD_i)^2}{2(\ln GSD_i)^2}} dd_p$
24	Particles - Steady-State - Log-Normal Distribution (mg/min)	$S(t) = \sum S_i \int \frac{1}{d_p(2\pi)^{0.5} \ln GSD_i} e^{-\frac{(\ln d_p - \ln GMD_i)^2}{2(\ln GSD_i)^2}} dd_p$
25	Particles - Transient - Steps (mg/h)	$S(t) = a_i \text{ if } t(i-1) < t < t(i), t(0) = 0$

⁽¹⁾ S: Emission rate (unit depends on model); a: mean, min, max, median and/or standard deviation (unit depends on model); t: time (h); a_i: constants (unit depends on model); t_p: time constant (h); d_p: particle diameter (µm); GSD: Geometric Mean Diameter (µm); GSD: Geometric Standard Deviation (-).

⁽²⁾ BMR: Basal Metabolic Rate (MJ/d); M: metabolic rate (met).

⁽³⁾ H: ceiling height (m); A, B, and C_s: fitted parameters; L: effective emitting material loading rate in the house (m²/m³); a_i: average air exchange rate for 1h (/h); k: mass transfer constant (m/s).

Des bibliothèques complémentaires sont mises à jour avec l'intégration de nouvelles données, telles que la bibliothèque **liste des contaminants (ou groupes)**, qui fournit la catégorie de polluants (particules, COV, SVOC, etc.), leur nom usuel et leur numéro CAS, la bibliothèque **pays** pour enregistrer l'origine géographique des données, la bibliothèque **location** pour préciser où la source est généralement rencontrée (bâtiment résidentiel, école, crèche, etc.) et la bibliothèque **référence** pour tracer l'article scientifique ou le rapport d'où les données ont été extraites.

1.2.2 Données individuelles

Les graphiques suivants présentent la nature des données intégrées dans PANDORA : près de 10 000 taux d'émission issus de la littérature ont été compilés à ce jour. Les premières études présentant des taux d'émission de polluants intérieurs ont été publiées en 1982 et concernaient les émissions des « Matériaux de construction et de décoration » (Figure 2). L'année 2003 marque un tournant avec la publication de plusieurs rapports issus de projets américains et européens sur les émissions de COV par les matériaux. Depuis 2013, des études rapportant des taux d'émission pour les « Produits d'entretien, Désodorisants » et « Activités des occupants » ont également été publiées.

À ce jour, environ 65 % des taux d'émission répertoriés dans la base de données concernent les « Matériaux de construction et de décoration », 16 % les « Produits d'entretien », et 12 % les « Occupants et leurs activités ».

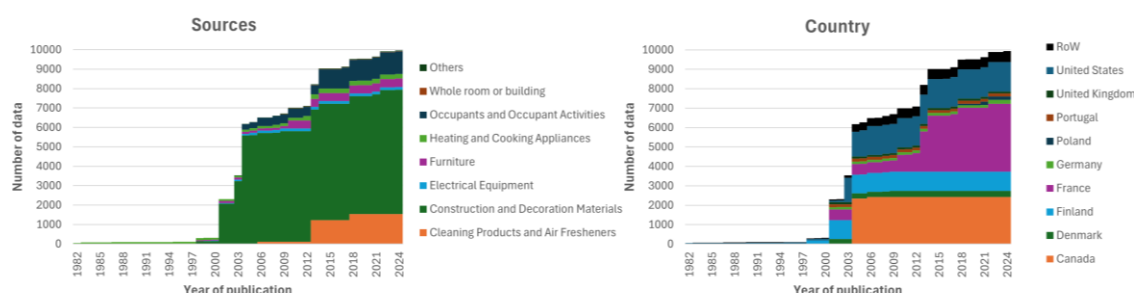


Figure 2 : Nombre de données mises en œuvre selon la catégorie de sources (à gauche) et le pays (à droite).

La base de données recense au total environ 3 000 polluants intérieurs, chacun associé à au moins un taux d'émission. La Figure 3 montre que le formaldéhyde est actuellement le polluant le plus cité, avec 336 taux d'émission, suivi des COVT (311), des particules (173) et du benzène (150).

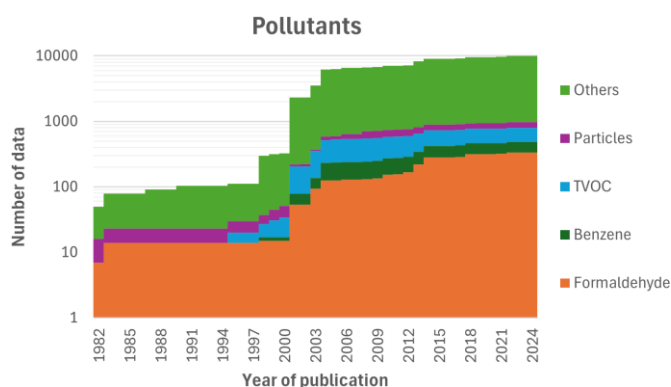


Figure 3 : Nombre de données mises en œuvre selon les polluants intérieurs.

Les particules sont exprimées en termes de $PM_{2.5}$, PM_{10} ou par intervalles de taille. Les principales sources disponibles dans PANDORA pour ces particules proviennent des « Activités des occupants » et des « Appareils de chauffage et de cuisson » (Figure 3). Les émissions de formaldéhyde ont été étudiées dans la littérature pour toutes les catégories de sources, notamment les « Matériaux de construction et de décoration », les « Produits d'entretien et Désodorisants », ainsi que les « Activités des occupants ». La majorité des taux d'émission pour le benzène proviennent des « Matériaux de construction et de décoration » et des « Activités des occupants ». Enfin, les COVT ont principalement été analysés pour les « Matériaux de construction et de décoration » et les « Équipements électriques » (notamment les imprimantes et les photocopieurs).

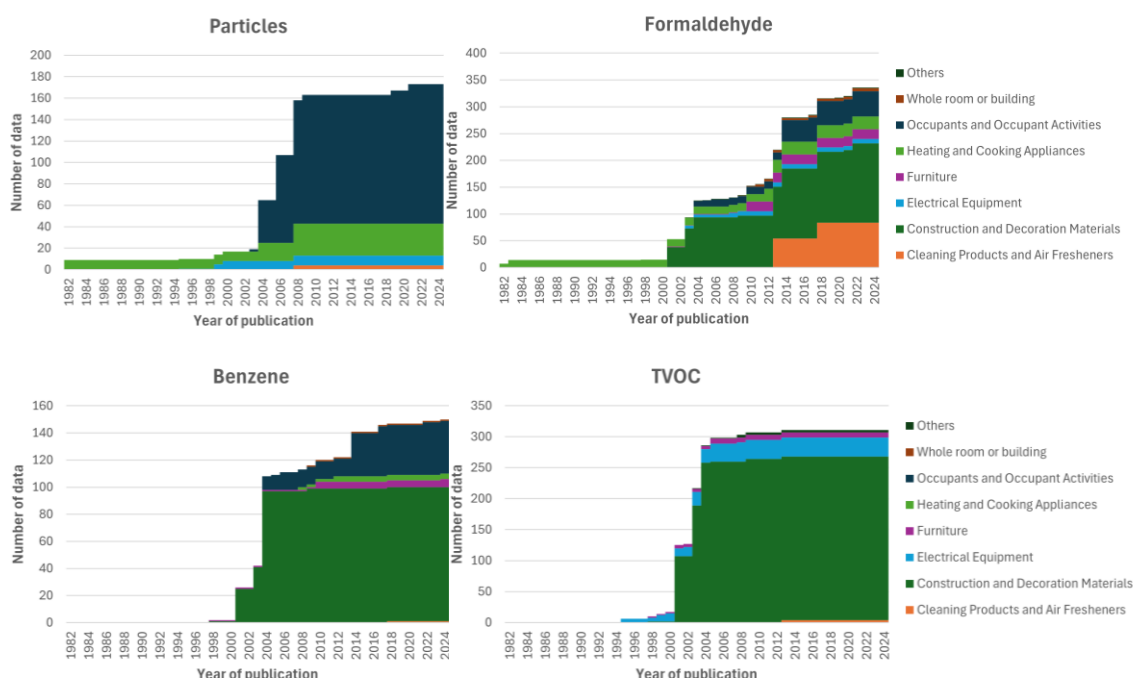


Figure 4 : Nombre de données mises en œuvre selon la catégorie de sources intérieures pour les particules, le formaldéhyde, le benzène et les COVT.

62 % des données intégrées dans la base proviennent d'articles scientifiques évalués par des pairs, publiés dans des revues telles que Indoor Air Journal, Atmospheric Environment et Environmental Science and Technology. Les rapports de projets de recherche représentent 25 % des données, incluant notamment les informations sur les « Matériaux de construction et de décoration » issues de bases de données historiques (SOPHIE, MEDB-IAQ ou BUMA), ainsi que des projets plus récents sur les « Activités des occupants » et les « Produits d'entretien ». Le reste des données est issu d'actes de conférences internationales, comme celles d'Indoor Air et Healthy Buildings.

L'ensemble des données est accessible depuis la page d'accueil de la base de données (<https://db-pandora.univ-lr.fr/>). Les recherches peuvent être effectuées par source de polluants définie par **catégorie**, **sous-catégorie** et **source** et/ou par polluant d'intérêt, via son **groupe**, son **nom** ou son **numéro CAS** (Figure 5). Les résultats s'affichent en bas de page sous forme d'étiquettes (Figure 6). En cliquant sur une étiquette sélectionnée, des informations détaillées sur la source, la référence bibliographique (à gauche) et le taux d'émission/modèle (à droite) s'affichent (Figure 7).

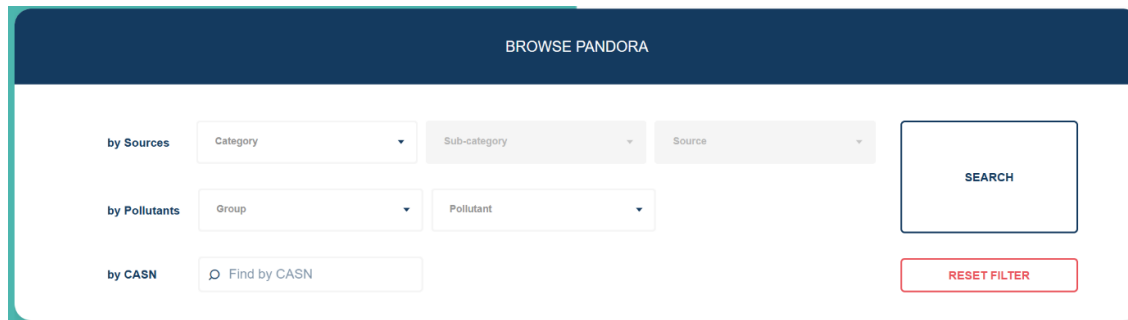


Figure 5 : Filtrage des données dans la base de données PANDORA.

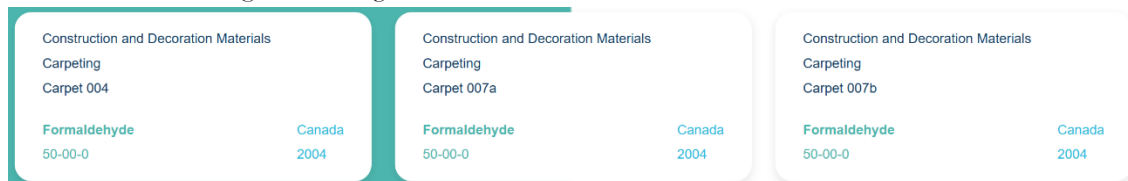


Figure 6 : Affichage des résultats.



Figure 7 : Informations sur le taux d'émission du polluant et de la source sélectionnés.

1.2.3 Analyse des données

La recherche ou la sélection de données individuelles dans la base peut s'avérer complexe en raison de la grande variété d'options disponibles. Pour fournir des informations plus pratiques aux modélisateurs de la qualité de l'air intérieur, un site compagnon dédié a été créé. Il propose des analyses statistiques de certains groupes de données, facilitant ainsi une prise de décision plus éclairée. Ce site est accessible depuis la page « Data Analysis » de la base de données PANDORA, en cliquant sur le lien « PANDORA Statistical Analysis ».

L'analyse s'est concentrée sur quatre polluants cibles : les PM_{2.5}, le formaldéhyde, le benzène et les COVT. Pour chaque polluant intérieur, les données ont été compilées en fonction de leurs principales sources intérieures, à savoir les « Matériaux de construction et de décoration », le « Mobilier », ainsi que les « Occupants et leurs activités » (y compris les produits d'entretien). Si la plupart des résultats présentés sur le site sont des compilations directes, la catégorie « Matériaux de construction et de décoration » bénéficie d'une analyse plus approfondie en raison du volume important de données disponibles (65 % de la base). Les résultats sont affichés sous forme de figures, et les statistiques associées (moyenne, écart-type, minimum, P25, médiane, P75 et maximum) peuvent être téléchargées pour une utilisation externe.

1.2.3.1 Matériaux de construction et de décoration

Les résultats de l'analyse des données sur les « Matériaux de construction et de décoration » pour le formaldéhyde émis par les revêtements de sol sont présentés à titre illustratif dans la Figure 8. Le premier graphique illustre les taux d'émission à 3 jours, 28 jours et 365 jours, tandis que le second graphique classe ces résultats en fonction de l'année de publication des données.

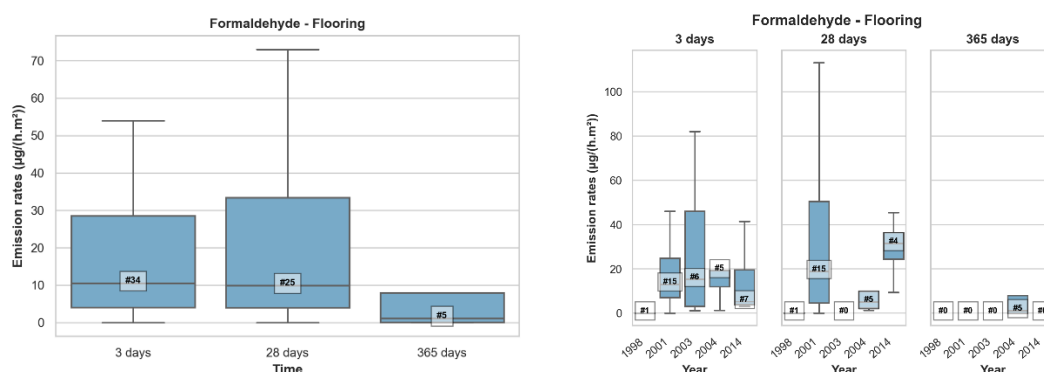


Figure 8 : Statistiques des taux d'émission de formaldéhyde pour les revêtements de sol après 3, 28 et 365 jours (à gauche : toutes les données ; à droite : séparées par année de publication).

Comme mentionné précédemment, les données sont exprimées dans différents formats. Pour les « Matériaux de construction et de décoration », cinq approches de modélisation ont été utilisées pour calculer les statistiques à trois moments : 3 jours, 28 jours et 365 jours. La méthodologie appliquée pour chaque modèle est la suivante :

- Modèle #03 : Les références fournissent une valeur d'émission uniquement pour $t = 3$ jours et $t = 28$ jours. Il est à noter que la disponibilité des données est limitée et que l'âge des matériaux est souvent inconnu ou non rapporté.
- Modèles #14, #15 et #17 : Les calculs sont effectués pour chaque point temporel. Ces équations sont généralement basées sur des données de périodes inférieures à 30 jours (parfois jusqu'à 60 jours). On notera que les calculs pour $t = 365$ jours sont extrapolés et doivent donc être interprétés avec prudence.
- Modèle #11 :
 - Pour $t = 3$ jours : Le point temporel disponible le plus proche, inférieur ou égal à 3 jours, est utilisé.
 - Pour $t = 28$ jours : Le point temporel disponible le plus proche, inférieur ou égal à 30 jours, est utilisé (pour tenir compte de l'abondance des données à $t = 30$ jours plutôt qu'à $t = 28$ jours).
 - Pour $t = 365$ jours : Le point temporel disponible le plus proche, supérieur à 6 mois, est utilisé (actuellement, aucune donnée pour cette durée n'est disponible dans PANDORA).

Dans les résultats précédents, les sources étaient encore séparées par sous-catégories, à savoir : « Moquettes », « Matériaux acoustiques », « Revêtements », « Revêtements de sol », « Matériaux d'ameublement », « Matériaux d'installation », « Panneaux intérieurs », « Matériaux structurels », « Matériaux d'isolation », « Revêtements muraux » et « Fenêtres et Portes ». Ainsi, les modélisateurs de la qualité de l'air intérieur doivent sélectionner les taux d'émission correspondant aux matériaux composant le sol, le plafond et les murs verticaux de l'environnement intérieur qu'ils souhaitent modéliser. Pour faciliter le calcul d'un taux d'émission global prenant en compte l'ensemble de ces parties du bâtiment, nous calculons une donnée agrégée finale appelée métadonnée, liée à la surface géométrique totale, c'est-à-

dire la somme des surfaces du sol, du plafond et des murs verticaux. Cependant, la base de données ne contient actuellement pas de champ spécifique permettant de distinguer si le matériau est utilisé pour le sol, les murs verticaux ou le plafond. Par conséquent, tous les matériaux sont appliqués de manière égale à chaque type de surface avec la même probabilité. Ainsi, il n'y a pas de dépendance aux dimensions du bâtiment ou de la pièce. Les statistiques des métadonnées sont dérivées d'une valeur statistique unique (moyenne ou maximale) de chaque catégorie de matériaux (« Matériaux acoustiques », « Moquettes », etc.), préalablement calculée, et du nombre de points de données disponibles. La méthodologie employée ici s'appuie sur les règles de la base de données française d'ACV INIES (INIES, 2022) pour calculer des valeurs par défaut lorsque des valeurs spécifiques ne sont pas disponibles :

- Si une seule valeur est disponible, la valeur résultante est multipliée par deux.
- Si deux valeurs sont disponibles, la valeur résultante est la valeur maximale des deux valeurs disponibles, multipliée par 1,3.
- S'il y a plus de deux valeurs disponibles, la valeur résultante est la valeur moyenne, multipliée par 1,3.

Lorsqu'elles sont disponibles, les couleurs de l'étiquette française pour les émissions de COV des matériaux de construction et de décoration (Décret français du 19 avril 2011) sont affichées pour les émissions à 28 jours. Le code couleur utilisé pour catégoriser les émissions est le suivant : vert (A+ = faible émission), vert clair (A), jaune (B) et rouge (C = émission élevée). Les dimensions de la pièce de référence et le taux de renouvellement d'air utilisés sont de $4,0 \times 3,0 \times 2,5 \text{ m}^3$ et 0,5 vol/h d'air propre. Les calculs actuels considèrent que le matériau est appliqué sur toutes les surfaces internes (ALL, 59 m²), uniquement sur le sol ou le plafond (S/P, 12 m²) et uniquement sur les murs verticaux (VERT, 35 m²).

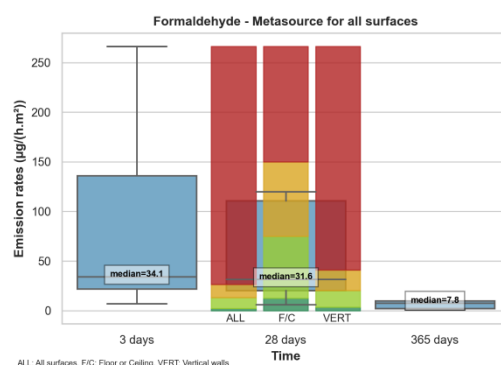


Figure 9 : Statistiques des métadonnées des taux d'émission de formaldéhyde après 3, 28 et 365 jours (l'échelle de couleurs des étiquettes françaises est affichée à titre de comparaison).

1.2.3.2 Autres sources

Étant donné que le nombre de points de données disponibles est insuffisant pour calculer des statistiques, l'ensemble des taux d'émission pour les autres sources de formaldéhyde, benzène et COVT (meubles, occupants et leurs activités), ainsi que pour les particules exprimées en PM_{2.5} (occupants et leurs activités), sont mis à disposition sur la page « Data Analysis » du site. Ces données peuvent être téléchargées sous forme de fichier .txt. La Figure 10 illustre la manière dont ces informations sont présentées, en prenant l'exemple du formaldéhyde.

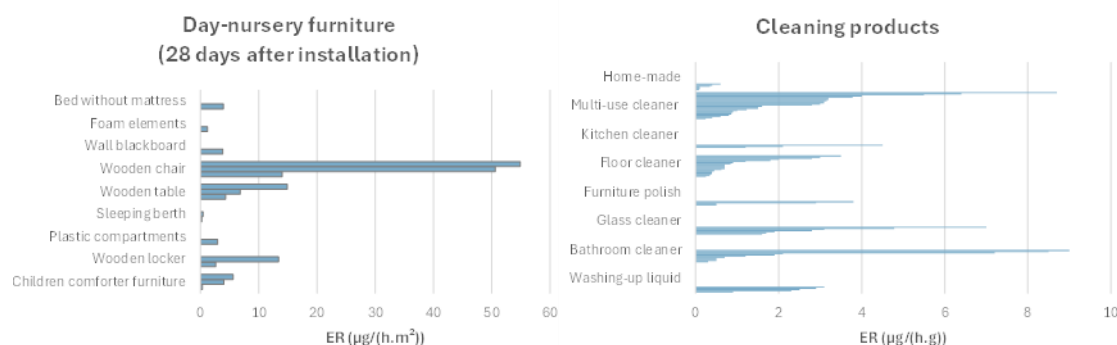


Figure 10 : Données disponibles pour le formaldéhyde concernant les « meubles de crèche » (à gauche) et les « produits d'entretien » (à droite).

1.2.4 Exemple d'utilisation de PANDORA

Cette section présente un exemple de calcul des taux d'émission pour une chambre d'enfant en utilisant les données de PANDORA. Il est important de noter que :

- Cet exemple se concentre uniquement sur les émissions de formaldéhyde.
- Seuls les taux d'émission après 28 jours sont pris en compte.
- Pour calculer le taux d'émission global de la pièce, la somme des taux d'émission de toutes les sources individuelles considérées dans cet exemple a été effectuée.

Comme l'a souligné Maupetit (2014), les modèles additifs, qui additionnent les émissions de toutes les sources présentes dans une pièce, tendent à surestimer l'émission totale. Par conséquent, c'est le cas le plus défavorable qui est calculé ici.

1.2.4.1 Description de la chambre

Les dimensions de la chambre d'enfant sont de 4 m × 3 m × 2,5 m, soit un volume de 30 m³. Le sol est recouvert d'une moquette, tandis que les murs verticaux et le plafond sont peints. La surface de la fenêtre, considérée comme exempte d'émissions de polluants, est de 2 m². Les meubles présents dans la pièce sont les suivants : un lit avec son matelas, une chaise en bois, une table en bois, un casier en bois, deux compartiments en plastique et un tableau noir. En raison de la présence des meubles, la surface émettrice du sol est réduite de 2,5 m². De même, la surface émettrice des murs verticaux est réduite de 6 m² en raison de la présence du casier et des œuvres d'art accrochées. Le nettoyage des surfaces des meubles est supposé être effectué quotidiennement.

Tableau 3 : Surfaces contribuant aux émissions de formaldéhyde provenant des murs, des meubles et de l'activité de nettoyage.

	Surface area of formaldehyde emission (m ²)
Floor, vertical walls and ceiling	
Carpet	9.5
Finishes	64.0
Furniture	
Bed without mattress	4.5
Foam elements	2.4
Wooden chair	1.5
Wooden table	0.7
Wooden locker	6.2

Plastic compartment (2)	3.7
Blackboard	0.3
Cleaning activity	
Multi-use cleaner	5.0

1.2.4.2 Évaluation du taux d'émission pour l'ensemble de la pièce

Il existe trois approches pour évaluer le taux d'émission de formaldéhyde pour l'ensemble d'une pièce en utilisant les données de PANDORA (<https://db-pandora.univ-lr.fr/>) :

- (1) **La sélection individuelle des sources** à l'aide de l'outil de recherche de la base de données et le choix des plus appropriées,
- (2) **L'utilisation des plages de valeurs issues de l'Annexe 86**, qui présente une analyse statistique des données de PANDORA,
- (3) **L'approche métadonnée**, qui fusionne l'ensemble des taux d'émission de toutes les sources de la catégorie « Matériaux de construction et de décoration » en une seule estimation.

- **Approche 1** : Sélection des sources individuelles depuis la base de données

La sélection de sources individuelles via l'outil de recherche de la base de données est la méthode habituelle pour obtenir des données d'entrée destinées aux simulations de QAI. Comme présenté dans la Figure 5, les données peuvent être filtrées par source et par polluant. Les sources sont filtrées selon la structure de la base de données, c'est-à-dire par Catégorie, Sous-Catégorie et Source. Les polluants peuvent être facilement identifiés en filtrant d'abord par Groupe de polluants, puis par nom ou numéro CAS (dans le cas présent, « formaldéhyde » ou « 50-00-0 »). Il est recommandé de réinitialiser les filtres entre chaque recherche en cliquant sur le bouton « reset filter » pour éviter toute interférence. Le Tableau 4 présente les sources sélectionnées avec leurs taux d'émission respectifs. Une colonne intitulée « Motivation » a été ajoutée pour expliquer pourquoi une entrée spécifique de taux d'émission a été choisie pour cet exemple.

Tableau 4 : Sélection des entrées depuis la base de données – Approche 1.

	Category	Sub-category	# of results	Selected Source	Motivation	Emission Rate - ER ($\mu\text{g}/(\text{h.m}^2)$)
Floor, vertical walls and ceiling						
Carpet	Construction and Decoration Materials	Carpeting	9	Carpet	Most recent data (2014)	1.9
Finishes	Construction and Decoration Materials	Finishes	8	Acrylic paint 1	Most recent data (2014) - random choice between two sources	3.9
Furniture						
Bed without mattress	Furniture	Day-nursery furniture	17	Bed without mattress (G06482B)	Only one data	3.9
Foam elements	Furniture	Day-nursery furniture	7	Foam elements (MBR 13 A)	Only one data	1.2
Wooden chair	Furniture	Day-nursery furniture	17	Wooden chair (10/2701R/5-1)	Lowest ER out of three data	14
Wooden table	Furniture	Day-nursery furniture	17	Wooden table (10/2701R/8-1)	Lowest ER out of three data	4.3

Wooden locker	Furniture	Day-nursery furniture	17	Wooden locker (MBR-05 A)	Lowest ER out of two data	2.6
Plastic compartment (2)	Furniture	Day-nursery furniture	17	Tidying up furniture with plastic compartments (MBR-17 A)	Only one data	2.9
Blackboard	Furniture	Day-nursery furniture	17	Wall blackboard (MBR 01 A)	Only one data	3.8
Cleaning activity						
Multi-use cleaner	Cleaning Products and Air Fresheners	Cleaning Products	86	Multi-purpose bleach-less cleaner – spray (PEPS21 #2)	Recent data and bleach-less	6.0*

* The emission rate (ER) has been calculated as the average over 2 hours from the data 4.0 µg/(h.g) between 0h-1h and 0.8 µg/(h.g) between 1h-2h after application. The mass of product applied is given in the information regarding the experimental methodology (2.5 g/m²).

Le taux d'émission global de la pièce est calculé en additionnant les produits du taux d'émission de chaque source et de sa surface émettrice, pondérés par la durée d'émission (sur 24 heures pour toutes les sources, sauf pour le nettoyant multi-usage, supposé émettre pendant 2 heures). Le taux d'émission total pour cette pièce s'élève à **342 µg/h**. La Figure 11 compare l'importance des différentes sources, révélant que l'élément « Revêtements » est responsable de la majorité des émissions de formaldéhyde (73 %), tandis que 20 % proviennent des meubles.

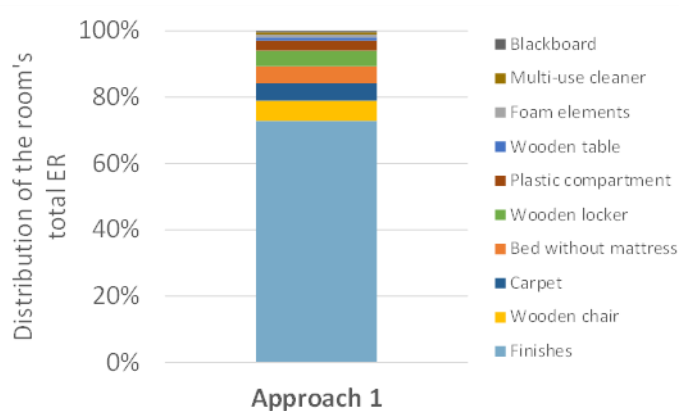


Figure 11 : Importance des différentes sources sur la base d'un taux d'émission total de 342 µg/h – Approche 1.

- **Approche 2** : Utilisation des résultats de l'analyse statistique

Le site compagnon de PANDORA est accessible via le menu « Data Analysis » en cliquant sur le lien « PANDORA Statistical Analysis ». Pour le formaldéhyde, des données statistiques sont disponibles pour les Moquettes et les Revêtements à différents moments, et sont classées selon l'année de publication des articles de référence, comme présenté dans les Figure 12 et Figure 13 (via la section « Formaldehyde/Construction and Decoration Materials/Data »). Les valeurs tabulées correspondant à ces figures peuvent être téléchargées via la sous-section « Download data » (lien « Formaldehyde Emission rates per types for all materials »). Les données pour le « Mobilier » et les « Produits d'entretien », affichées dans la Figure 10, peuvent être téléchargées en cliquant sur « Formaldehyde Emission rates per type

for all Furniture » et « Formaldehyde Emission rates per type for all other Sources », situées respectivement dans les sous-sections « Furniture » et « Other Sources (Occupants, etc.) ».

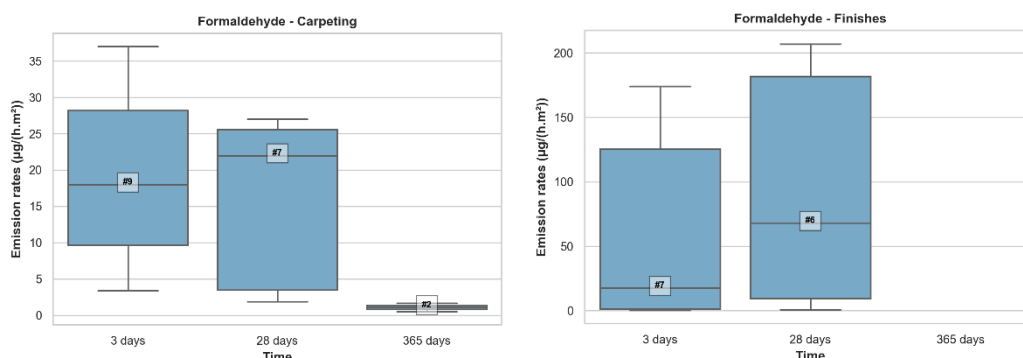


Figure 12 : Taux d'émission de formaldéhyde pour les moquettes et les revêtements après 3, 28 et 365 jours – Approche 2.

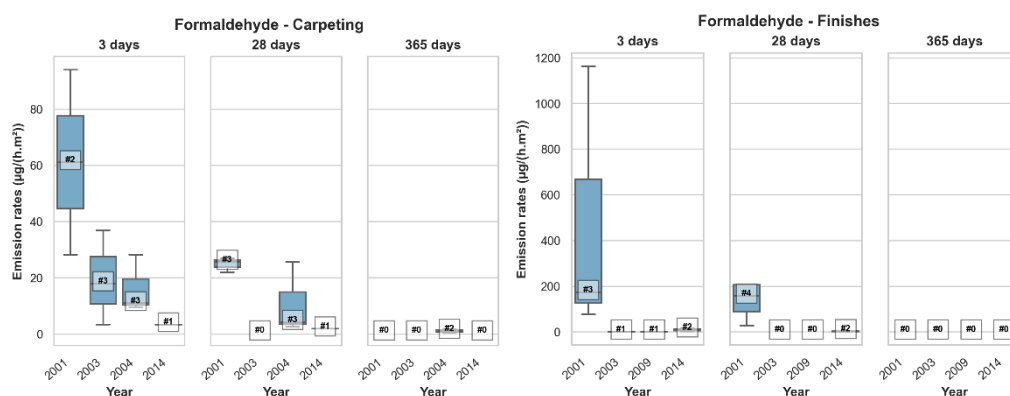


Figure 13 : Taux d'émission de formaldéhyde pour les moquettes et les revêtements après 3, 28 et 365 jours, réparties par années – Approche 2.

Pour comparer la contribution des différentes sources, un traitement identique a été appliqué afin de calculer leurs taux d'émission en $\mu\text{g}/\text{h}$. Cela a été réalisé en multipliant les statistiques de chaque source par sa surface émettrice, puis en pondérant par la durée d'émission quotidienne. La Figure 14 (gauche) présente les taux d'émission résultants pour toutes les sources de formaldéhyde. Comme dans la première approche, les « Revêtements » (Finishes) restent la source dominante. Pour les deux sources liées aux murs, une large gamme de valeurs possibles est observable, avec des valeurs maximales élevées. Cela provient principalement des données les plus anciennes (2001), comme illustré dans la Figure 13; les données plus récentes montrent des taux d'émission plus faibles. Le graphique de droite de la Figure 14 compare les résultats des deux approches. Dans la deuxième approche, la somme des taux d'émission individuels prend en compte toutes les mesures statistiques (maximum, P75, P50, etc.) comme si l'utilisateur avait choisi l'une de ces valeurs pour calculer le taux d'émission global de la pièce. En raison des choix arbitraires (ou « Motivations ») effectués dans l'approche 1 (une seule valeur issue de données récentes), son taux d'émission se situe dans la fourchette basse des résultats de l'approche 2.

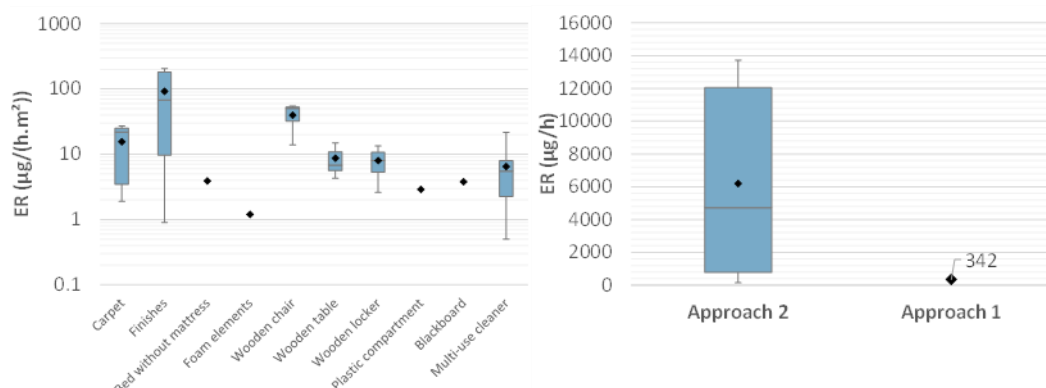


Figure 14 : Taux d'émission pour toutes les sources (à gauche) et pour la pièce (à droite) – Approche 2.

- **Approche 3** : Utilisation des données métadonnée

Les données métadonnée fusionnent les taux d'émission de tous les Matériaux de construction et de décoration disponibles en une source d'émission fictive unique (voir section 1.2.3.1). Les données tabulées peuvent être téléchargées en cliquant sur « Formaldehyde Meta emission rates », situé dans la sous-section « Meta-data » de la section « Construction and Decoration Materials » pour le formaldéhyde. La Figure 15 compare les taux d'émission obtenus avec les trois approches. Par rapport à la deuxième approche, la plage de variation des données avec l'approche 3 est légèrement plus étroite, mais elle montre toujours des écarts importants entre les valeurs extrêmes.

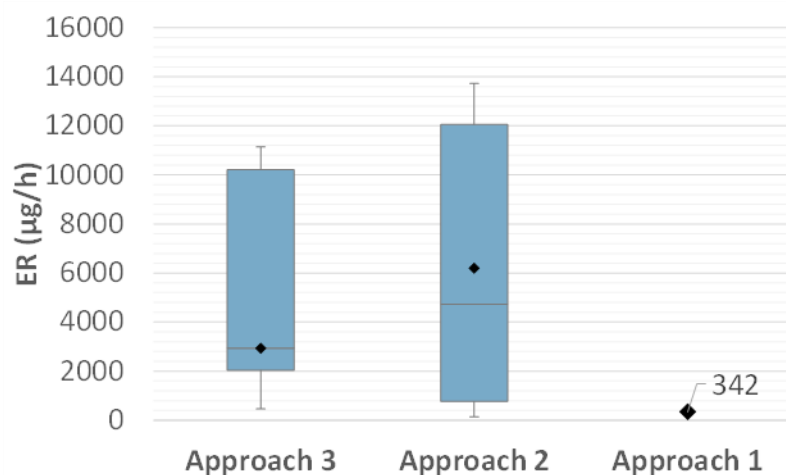


Figure 15 : Comparaison des trois approches en termes de taux d'émission pour l'ensemble de la pièce.

1.2.4.3 Conclusion

La Figure 16 présente la concentration à l'équilibre (ou concentration en régime permanent) de formaldéhyde, calculée selon les trois méthodes. La concentration à l'équilibre correspond au niveau atteint au fil du temps avec un taux d'émission constant et un renouvellement d'air, et se calcule comme le rapport entre le taux d'émission et le débit d'air. Dans ce cas, un débit d'air de 15 m³/h a été sélectionné, ce qui équivaut à 0,5 renouvellement d'air par heure (ACH), une valeur courante pour les chambres à coucher. Sachant que les concentrations de formaldéhyde mesurées en intérieur sont souvent inférieures à 100 µg/m³, il est recommandé de considérer les valeurs basses des approches 2 et 3 comme représentatives. Même pour le formaldéhyde, qui dispose du plus grand nombre de valeurs

d'émission enregistrées, les données restent insuffisantes pour représenter statistiquement la large variabilité des sources réelles et de leur intensité. Par conséquent, les taux d'émission rapportés ont tendance à surestimer les moyennes réelles.

Sur la base de notre expertise dans l'utilisation de ces données pour la modélisation de la qualité de l'air intérieur dans le cadre de l'Annexe 86, nous recommandons d'utiliser les statistiques de P25 (plutôt que les moyennes ou médianes) pour obtenir des niveaux de concentration moyenne fiables à l'aide de calculs de bilan massique en environnement intérieur. Cette conclusion s'applique uniquement au formaldéhyde ; des analyses supplémentaires seraient nécessaires pour étendre cette recommandation à d'autres polluants.

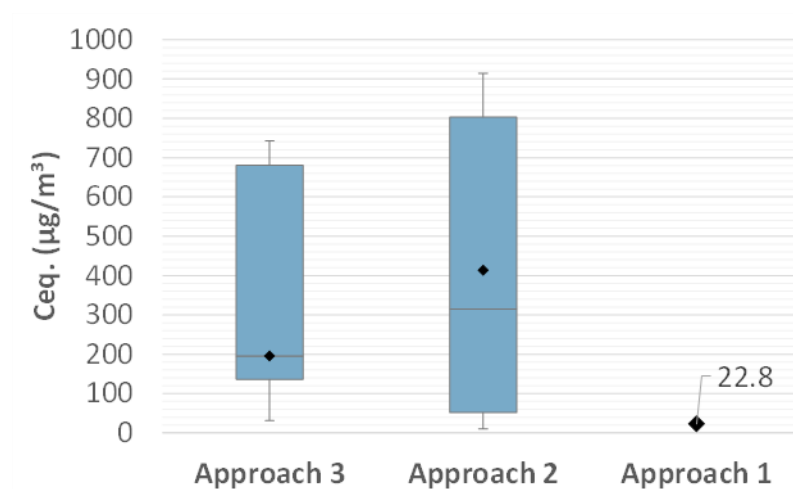


Figure 16 : Comparaison des trois approches en termes de concentration à l'équilibre.

2 EXPOSITION TYPIQUE / CONCENTRATION TYPIQUE

Le travail mené dans le cadre de la Sous-tâche 2 (ST2) de l'Annexe 86 vise à améliorer la compréhension des niveaux d'exposition aux polluants dans les bâtiments résidentiels. Pour y parvenir, la ST2 a analysé de manière systématique des données issues de mesures sur le terrain réalisées dans des logements, avec pour objectif de soutenir l'estimation des concentrations typiques de polluants en milieu résidentiel. Plutôt que de constituer une collection statique et finie de « polluants typiques » et de leurs concentrations associées, le projet a mis l'accent sur le **développement d'un processus dynamique et adaptable, couplé à une base de données exhaustive**. Cette approche garantit que l'ensemble des données reste une ressource évolutive, pouvant être mise à jour et enrichie à mesure que de nouvelles données et méthodes analytiques deviennent disponibles. Ce rapport inclut un résumé des concentrations de polluants intérieurs, issu de nombreuses études de mesure de QAI. Cependant, le processus et la base de données ont été conçus comme des « objets vivants », capables de continuer à croître et à se développer au-delà de la conclusion formelle de l'Annexe 86. Avec l'augmentation des données de mesure de la QAI, les analyses peuvent être réexécutées pour intégrer de nouveaux points de données. De plus, les algorithmes analytiques peuvent être étendus avec de nouvelles fonctionnalités, par exemple pour comparer des études individuelles à un ensemble représentatif d'autres études. Cette base offre également une solide fondation pour des procédures d'analyse de « big data », comme le **traitement des données de QAI collectées via des appareils IoT**.

La section 3.1 présente le « registre » créé dans le cadre de cette sous-tâche pour recueillir toutes les études QAI connues des participants de la ST2, susceptibles de servir de sources de données pour l'objectif fixé. Elle résume également les études effectivement utilisées pour produire les dépôts de données QAI présentés dans la section 2.3. La section 2.2 expose le processus développé et implémenté dans un package R pour générer le dépôt de données QAI. Enfin, les résultats obtenus à partir de l'analyse des données QAI dans le cadre d'une méta-analyse sont synthétisés dans la section 2.4.

2.1 Liste récapitulative des mesures pertinentes de la QAI

Cette section résume les études sur la QAI identifiées dans le cadre de cette sous-tâche comme présentant des données de mesure pertinentes issues d'études sur le terrain dans des logements résidentiels. Le tableau complet (appelé « registry » au sein du consortium du projet), contenant des informations détaillées sur les bâtiments étudiés, leurs systèmes de ventilation et les mesures effectuées, est disponible dans le dépôt Zenodo suivant : <https://doi.org/10.5281/zenodo.15399188>.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif du registre des études de mesure de la QAI dans les logements résidentiels.
Les études analysées dans le cadre de ST2 sont marquées en gras.

Country / Region or City	Project Name/Acronym (Institution)	Reference/Contact	Sample Size	Building Type	Ventilation Type
AUS / Melbourne	Indoor air project (CSIRO)	Galbally et al. (2011)	40	various	
AUS / Melbourne	- (Monash University)	Kang et al. (2021)	12	MFH	MVHR
AUT	Lueftung 3.0 (IBO)	Wallner et al. (2014)	120	SFH	Nat, MVHR
AUT / Innsbruck	Sinfonia (UIBK)	Bliem (2021)	200	MFH	MVHR (mostly)

AUT / Innsbruck	Lodenareal (UIBK)	Rojas et al. (2015)	24	MFH	MVHR, Win
BEL	Clean Air, Low Energy (VITO)	Stranger et al. (2012)	51	SFH, MFH	various
BEL	Renovair (UGENT)	Jelle Laverge		SFH, MFH	various
BEL	My Healthy Home (UGENT)	Jelle Laverge		SFH, MFH	various
BEL	- (Renson)	De Maré et al. (2019)	350	SFH, MFH	MEV
CHE	Mesqualair (EPFL, HEIA)	Shen Yang et al. (2020)	650	SFH	various
CHE	Buren (Zehnder)	Bart Cremers	4	MFH	Win, Mech
CHL	Fondecyt Iniciación (UC)	Constanza Molina	32		
CHL	RENAM (UC)	Constanza Molina	284	SFH, MFH	Nat, Win
DEU / Berlin, Leipzig	- (TROPOS)	Zhao et al. (2022)	40	various	various
DEU / Erfurt	INGA (GSF)	Schneider et al. (1999)	20		Nat
DNK / Copenhagen	CISBO (DTU)	Bekö et al. (2013)	58	various	Nat (mostly)
DNK / Odense	IECH (DTU)	Bekö et al. (2019)	500	various	Nat (mostly)
ESP / Madrid	CISC (IETCC)	Sonia Garcia	12	MFH, AB	Nat, Win
ESP / Pampl., Sevil.	ClimateReady (UNAV)	Aurora Monge-Barrio	23	MFH	various
FRA	- (CETIAT)	Laure Mouradian, Benoit Golaz	4	various	Mech
FRA	ALLO (ULR)	Marc Abadie	6		Hybrid
FRA / French Alps	Kanama (Cerema)	Gaelle Guyot	1	SFH	MVHR
GBR	AMR (STRATH)	Sharpe et al. (2020)	21	TH, AB	Nat, Mech
GBR / Scotland	dMEV (STRATH)	Sharpe et al. (2019)	41	various	MEV
GBR / Scotland	VentStd (STRATH)	Sharpe et al. (2023)	16	various	MEV, MVHR
IRL	ALIVE (UGA)	James McGrath, I. Alhindawi	9	SFH	Nat
IRL	ARDEN (UGA)	Coggins et al. (2022)	26	SFH	Win, Mech
IRL	VALIDate (MU)	James McGrath	87	SFH, TH, AB	various
ITA / Bari	- (ARPA)	De Gennaro et al. (2015)	6		
ITA	- (UNIFE)	Pietrogrande et al. (2021)	2		Nat
ITA / Lodi	- (UNIMI)	Cattaneo et al. (2011)	60		
MEX / Mexico City	- (GSA)	Moreno-Rangel et al. (2018)	1	AB	Hyb
MEX, USA, GBR	- (GSA)	Moreno-Rangel (2019)	7	various	Hyb, MVHR
NLD	Care facilities (TUE)	Kulve et al. (2017)	7		
NLD	PH renovation (TU/e)	Marcel Loomans	10	TH	MVHR

NOR / Trondheim	ZEN (NTNU)	Alonso et al. (2021)	21	various	various
PRT / Porto	- (PUV)	Ricardo Almeida, Eva Barreira	3	various	various
SGP	- (NTU)	Zhou et al. (2013)	5	MFH	Nat, Win
SVK / Samorin	Renovation (SUT)	Földvary et al. (2017)	94	MFH, AB	Nat
SWE	Swedish housing stock (IVL)	Langer and Bekö (2013)	305	various	various
SWE / Falun	- (Renson)	Ivan Pollet	1	SFH	MEV
SWE	Swedish passive house (IVL)	Langer et al. (2014)	41	SFH, TH	MVHR
USA	Particle Penetration (UT Austin)	Stephens and Siegel (2012)	19		
USA / California	HENGH (LBNL)	Singer et al. (2020)	70	SFH	Mostly EXH
USA / California	LIA (LBNL)	Zhao et al. (2020)	23	MFH	EXH
USA / California	High Perf. Homes (LBNL)	Less et al. (2015)	24		various
USA / California	Apt. Retrofits (LBNL)	Noris et al. (2013)	16		
USA / McAllen	- (GSA)	Moreno-Rangel et al. (2020)	13	SFH	Nat
USA / Washington	Weather influence (WSU)	Huangfu et al. (2019)	1		
USA / Washington	Wildfires (WSU)	Kirk et al. (2017)	2		

Dans le cadre des activités de la ST2, le consortium a eu accès à un sous-ensemble significatif des études répertoriées. Des résumés textuels de leurs objectifs, méthodes et résultats sont disponibles en Annexe 2. Pour garantir une analyse comparable et harmonisée, une méthodologie standardisée a été développée.

2.2 Description de l'analyse standardisée

2.2.1 Concept global

Pour permettre une méta-analyse des différentes mesures de QAI à travers le monde, une structure de données standardisée et des méthodes d'analyse uniformisées ont été développées. Cette approche devait pouvoir s'adapter à divers types de sources de données, comme des mesures issues de campagnes courtes ou longues, avec des fréquences d'échantillonnage et des appareils de mesure variés, tout en permettant une évaluation combinée.

Une solution aurait consisté à centraliser les séries temporelles originales issues des différentes études et à les traiter de manière standardisée et collective. Une autre approche, retenue ici, consiste à traiter les données de manière décentralisée, c'est-à-dire en laissant chaque institution responsable de ses propres jeux de données. Dans ce cas, la méthode d'analyse standardisée est appliquée par l'institution ayant collecté les données. Seuls les résultats de l'analyse statistique, enrichis des métadonnées pertinentes, sont ensuite collectés centralement pour des analyses ultérieures, comme des méta-analyses ou des comparaisons (benchmarking). La deuxième approche a été retenue, principalement pour deux raisons :

- **Protection des données** : Les séries temporelles peuvent contenir des informations détaillées et sensibles sur l'occupation des logements, les activités des occupants, etc. Depuis l'entrée en vigueur du Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD, 2016) dans l'Union européenne, des incertitudes sont apparues parmi les institutions de recherche quant à la manière de traiter les données de QAI en conformité avec le RGPD. Par conséquent, des formulaires de consentement très restrictifs ont été élaborés et utilisés dans les études sur le terrain, limitant le traitement des données originales à l'institution ayant réalisé les mesures. L'approche choisie évite ainsi de transmettre les séries temporelles brutes à une équipe tierce de traitement des données, en ne collectant centralement que des données hautement agrégées (mensuelles) et anonymisées.
- **Évolutivité et continuité** : Pour permettre une intégration continue de données supplémentaires issues de nouvelles études ou d'autres travaux sur la QAI, et ainsi étendre ou mettre à jour cette méta-analyse, les jeux de données agrégés issus de l'analyse statistique (ainsi que leurs métadonnées associées) peuvent être plus facilement stockés et traités dans un dépôt de données. Ceux-ci présentent un format standardisé et une taille considérablement réduite par rapport aux séries temporelles originales, facilitant leur gestion et leur exploitation.

2.2.2 Procédure d'analyse

La procédure d'analyse suivante a été appliquée aux données de mesure de chaque étude sur la QAI fournies par les participants de la ST2 de l'Annexe 86. Pour chaque étude, chaque logement, chaque pièce et chaque polluant (variable mesurée pertinente), des statistiques sont calculées. Afin de permettre une évaluation distincte selon la période de l'année ou le moment de la journée, les statistiques sont également calculées pour chaque mois de l'année, ainsi que pour les périodes diurnes (07:00 – 23:00) et nocturnes (23:00 – 07:00). Cela aboutit à une structure de données telle qu'illustrée dans la Figure 1, où l'analyse statistique est réalisée pour chaque branche de la structure, dès que des données sont disponibles pour cette branche. Des métadonnées pertinentes peuvent être collectées à quatre niveaux distincts de cette structure : au niveau de l'étude, du logement, de la pièce et du polluant. Pour plus de détails sur les métadonnées collectées, se référer au Tableau A3 1 en Annexe 3.

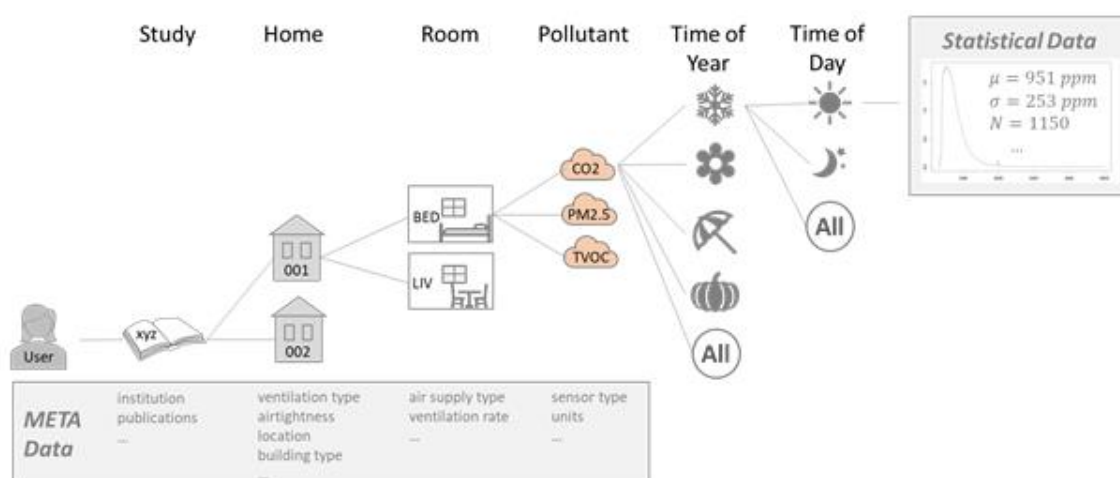


Figure 17 : Structure des données pour la procédure standardisée d'analyse des données développée dans le cadre de la ST2 de l'Annexe 86 de l'IEA EBC.

Cette procédure est conçue pour le traitement de séries temporelles collectées lors d'études de mesure de la QAI, comme les concentrations de CO₂ ou de PM_{2.5} mesurées sur plusieurs jours, semaines ou années. Cependant, la structure de données peut également (et a également été) utilisée pour intégrer des mesures ponctuelles, issues par exemple de techniques d'échantillonnage actif ou passif pour les COV.

Pour les séries temporelles, les mesures statistiques suivantes sont calculées pour chaque branche de cette structure :

- Moyenne arithmétique ;
- Écart-type ;
- Percentiles de 0 à 100 % par pas de 1 %, ainsi que 0,5 %, 2,5 %, 97,5 % et 99,5 %, soit 105 valeurs de percentiles (incluant la médiane, ainsi que les quantiles inférieur et supérieur).

En complément, les indicateurs de qualité des données suivants sont calculés :

- Dates de début et de fin ;
- Statistiques sur l'intervalle d'échantillonnage : moyenne, médiane, minimum, maximum, quantile inférieur et supérieur ;
- Nombre total de points de données et nombre de points invalides (entrées non numériques) ;
- Nombre estimé de points de données, en supposant une mesure ininterrompue entre les dates de début et de fin, avec un intervalle d'échantillonnage égal à la médiane observée ;
- Pourcentage de points de données dépassant un seuil de plausibilité inférieur ou supérieur (voir ci-dessous).

Lors du calcul, les étapes de nettoyage et de sélection suivantes sont appliquées à chaque branche :

- Les entrées non numériques invalides ou les lacunes de données sont marquées comme NA et exclues des analyses ultérieures ;
- Si le nombre de points de données valides (c'est-à-dire le total N moins les points invalides NA) est égal ou supérieur à 30, toutes les mesures statistiques et indicateurs de qualité des données décrits ci-dessus sont calculés ;
- Si le nombre de points de données valides est inférieur à 30 mais au moins égal à 2, seuls les indicateurs de qualité des données et les percentiles sont calculés. La moyenne et l'écart-type sont définis comme NA, leur pouvoir explicatif étant faible ;
- S'il n'y a qu'un seul point de données, les statistiques sur l'intervalle d'échantillonnage ainsi que le nombre estimé de points de données sont définis comme NA.

En plus de cette procédure de nettoyage, les valeurs sont vérifiées pour leur plausibilité. Pour chaque polluant intérieur possible (variable mesurée), une plage plausible est définie (voir Tableau A3.2 en Annexe 3). Les valeurs anormalement basses ou élevées sont identifiées, et l'utilisateur (du script d'exécution) est averti. Le pourcentage de dépassement (part des points de données en dessous ou au-dessus du seuil) est fourni comme métrique de qualité des données dans les résultats de l'analyse (par exemple : 1,5 % des concentrations de CO₂ mesurées < 350 ppm).

Les résultats de l'analyse statistique et leurs indicateurs de qualité associés sont fournis pour chaque branche de la structure, représentée par une ligne unique dans le fichier de sortie (voir Figure 18). Par exemple, si une étude QAI a mesuré le CO₂, la température (T) et

l'humidité relative (RH) dans une chambre et un salon pendant 6 mois consécutif, les résultats sont synthétisés en 126 lignes :

2 pièces × 3 variables/polluants × 7 (6 mois + période entière) × 3 (périodes diurne, nocturne et 24h/jour).

user	study	home	room	year	month	tod	varia			quality_start	quality_end	interval	interval	interval	interval	interval	interval	N	N	NAs	Mean	Sd	p00	p00.5	p01
							ble	ower	upper																
0010	NL_ML	H0100	BED2	2012	11	all	CO2	0	0	28-11-2012	30-11-2012	58	180	180	155.6	180	180	1440	1191	1	518.9146	92.66	368.4967	370.6336	372.9723
0010	NL_ML	H0100	BED2	2012	11	all	RH	0.08	0	28-11-2012	30-11-2012	58	180	180	155.6	180	180	1440	1191	0	39.7517	3.3566	0	34.73	34.82
0010	NL_ML	H0100	BED2	2012	11	all	T	0	0	28-11-2012	30-11-2012	58	180	180	155.6	180	180	1440	1191	0	19.8708	0.4882	4.69	19.39	19.39

Figure 18 : Exemple de trois points de données présentant les résultats de l'analyse statistique des séries temporelles pour le mois de novembre, concernant le CO₂, la température (T) et l'humidité relative (RH). La période de la journée (tod) est « toutes », c'est-à-dire 0-24 h. Note : les colonnes restantes avec tous les percentiles ne sont pas affichées ici.

2.2.3 Implémentation en R

La procédure d'analyse décrite ci-dessus a été implémentée en [R](#), un langage de programmation dédié au calcul statistique et à la visualisation de données. Pour en faciliter l'utilisation, la distribution et la maintenance, elle a été mise à disposition sous la forme d'un package R (<https://github.com/IEA-EBC-Annex86/annex>). Avant de lancer les fonctions d'analyse, l'utilisateur doit importer les données de mesure sous forme de data frames R adaptés. Il doit également assigner, pour chaque colonne du data frame, le nom du polluant, l'unité de mesure, ainsi que les identifiants du logement et de la pièce, soit via un fichier de configuration externe, soit via une variable de configuration.

Une fois les séries temporelles et le fichier de configuration importés, un ensemble de fonctions de traitement a été développé pour réaliser l'analyse standardisée en quelques étapes, comme illustré dans la Figure 19.

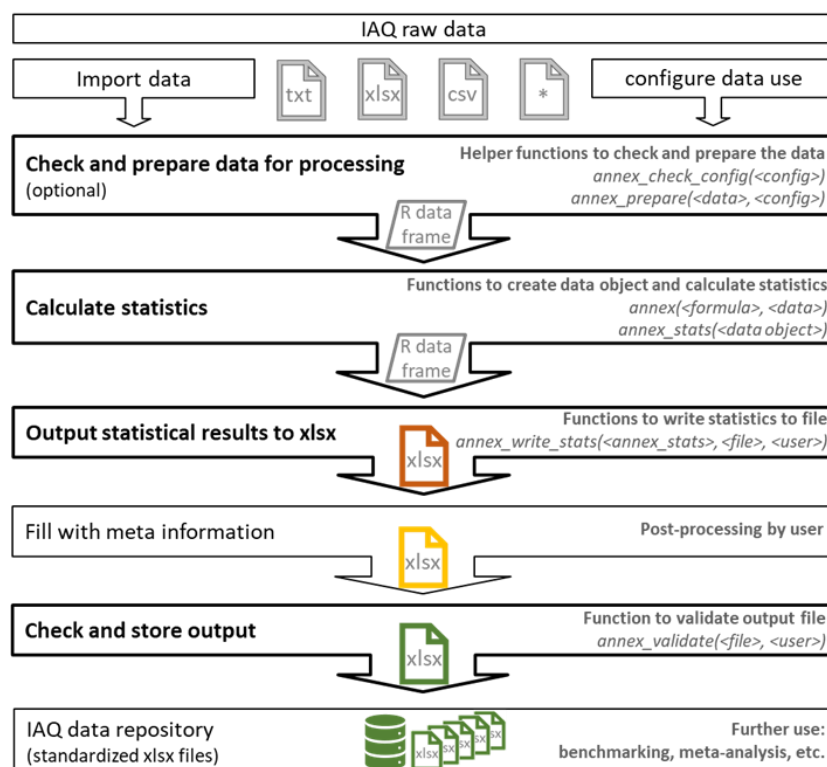


Figure 19 : Représentation schématique du flux de travail développé pour le processus standardisé d'analyse des données de mesure de la QAI. Pour les étapes encadrées en gras, des fonctions faciles à utiliser ont été programmées et mises à disposition dans le package R « annex ».

Les fonctions d'analyse prennent en charge les conversions d'unités appropriées et intègrent les fuseaux horaires ainsi que les changements d'heure lors du calcul des statistiques et des indicateurs de qualité des données, comme décrit précédemment.

Le Tableau A3 2 (en Annexe 3) présente les polluants (et autres variables) actuellement définis et traitables avec ces fonctions R. Il indique également les unités autorisées (pour lesquelles des conversions ont été définies) et les valeurs seuils inférieures et supérieures utilisées pour le calcul des indicateurs de qualité des données. La documentation inclut une description détaillée des fonctions ainsi que des tutoriels pour différentes sources de données (<https://iea-ebc-annex86.github.io/annex/>). Un exemple de benchmarking est également illustré dans le rapport de la ST4 de l'Annexe 86 comme précisé en introduction générale de ce livrable.

En complément, plusieurs vidéos tutoriels ont été enregistrées, couvrant les thèmes suivants : [Installation \(mise à jour\) et documentation](#) (4 min), [Importation \(lecture\) des données](#) (11 min), [Préparation des données pour l'analyse](#) (12 min), [Calcul des statistiques](#) (9 min), [Écriture/sauvegarde des résultats](#) (12 min) et [Validation du fichier de sortie et saisie des métadonnées](#) (13 min).

2.2.4 Fourniture de métadonnées

Les fonctions d'analyse implémentées en R et décrites ci-dessus produisent les résultats dans un fichier Excel standardisé. Ce fichier contient les résultats statistiques dans une feuille principale et quatre feuilles supplémentaires pour fournir les métadonnées pertinentes. Les métadonnées sont structurées selon les quatre niveaux suivants : « étude », « logement », « pièce » et « variable », et incluent des champs tels que :

- **Étude** : contact, institution, publications, liens, informations complémentaires, etc ;
- **Logement** : pays, ville, type de ventilation, débit de ventilation au niveau du logement, étanchéité à l'air, type de bâtiment, norme énergétique, année de construction ou de rénovation, taille du logement, type d'occupants, commentaires supplémentaires, etc ;
- **Pièce** : type d'apport d'air frais, débit de ventilation, méthode de détermination du débit de ventilation, type et nombre d'occupants, commentaires supplémentaires, etc ;
- **Variable** : informations complémentaires sur la variable mesurée, unité, appareil de mesure, commentaires supplémentaires, etc.

Toutes les études ne disposent pas d'assez d'informations pour remplir tous ces champs. Par conséquent, la plupart des champs sont considérés comme optionnels, et une simple note informative sera affichée lors de l'application de la fonction de validation. Les seuls champs obligatoires pour chaque logement sont le pays et le type de ventilation. Si des variables de mesure ambiguës, telles que « VOC », « TVOC », « PMOther » ou « Other », ont été traitées, alors le champ « informations complémentaires » pour ces variables doit également être rempli. Pour des raisons de comparabilité et de compatibilité, certains champs de métadonnées n'acceptent qu'un ensemble défini de réponses (sous forme de liste déroulante). Par exemple, le type de ventilation doit être sélectionné parmi l'une des quatre catégories suivantes :

- Aération par ouvertures de fenêtres (non conçue) : logements ventilés uniquement par l'ouverture des fenêtres par les occupants (en dehors de l'infiltration/exfiltration naturelle) ;
- Ventilation naturelle (conçue) : logements conçus pour une ventilation naturelle avec des gaines dédiées, des ouvertures, un contrôle automatisé des fenêtres, etc ;
- Ventilation hybride/mixte : logements combinant ventilation naturelle et mécanique, y compris ceux équipés de ventilateurs intermittents actionnés par les occupants ;
- Ventilation mécanique : logements dotés d'une ventilation mécanique continue, par exemple ventilation mécanique par extraction (VME) ou ventilation mécanique contrôlée double flux avec récupération de chaleur (VMC double flux).

2.3 Dépôt de données et dépôt open source (Git)

2.3.1 Dépôt de la base de données QAI

Un élément clé des travaux de recherche de la ST2 de l'Annexe 86 a été la collecte et le traitement des données de mesure fournies par les participants, issus de 11 pays. Ces données ont été analysées pour obtenir les distributions statistiques des concentrations de polluants, en utilisant le processus standardisé de traitement et d'analyse (implémenté dans un nouveau package R). Les résultats sont présentés sous forme de jeux de données structurés au format Excel, classés par pays et nom d'étude. La structure des données permet de les utiliser comme une base de données rudimentaire ou de les importer facilement dans des systèmes de bases de données plus sophistiqués.

L'ensemble des données compilées regroupe les mesures de 21 études indépendantes sur la qualité de l'air intérieur (QAI), couvrant un total de 1 173 logements résidentiels et 3 268 emplacements de mesure distincts (Figure 20). Le jeu de données inclut 44 paramètres

différents liés à la QAI, offrant une évaluation exhaustive de la qualité de l'air intérieur. Parmi ces paramètres figurent notamment :

- Dioxyde de carbone (CO₂) ;
- Humidité relative (RH) ;
- Température (T) ;
- Particules fines (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀) ;
- Formaldéhyde (HCHO) ;
- Composés organiques volatils totaux (COVT) et des composés organiques volatils spécifiques (COV) ;
- Dioxyde d'azote (NO₂) ;
- Radon (Rn) ;
- D'autres indicateurs environnementaux et biologiques tels que les débits d'air, les spores fongiques, les acariens, et divers composés organiques semi-volatils (COSV).

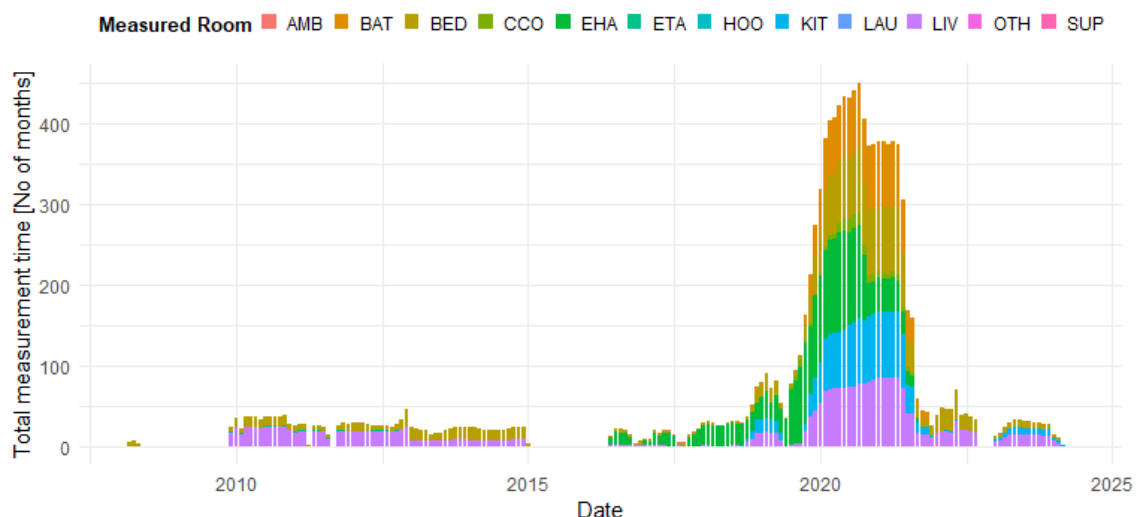


Figure 20 : Aperçu de l'ensemble des données disponibles. Répartition temporelle du nombre total de mois durant lesquels les paramètres de QAI ont été mesurés dans différentes pièces de divers logements.

En outre, le jeu de données inclut les données opérationnelles de dispositifs de ventilation mécanique, couvrant le débit d'air, le CO₂, la température et l'humidité relative, issues de plus de 8 500 logements belges.

Ce dépôt de données QAI a été rendu publiquement accessible dans un dépôt Zenodo : <https://doi.org/10.5281/zenodo.14917724>.

Remarque : Il est prévu que ce jeu de données soit également intégré dans la base de données QAI actuellement en développement (hors des activités de l'Annexe 86), disponible à l'adresse suivante : <https://iaqdb-dev.epfl.ch/>.

2.3.2 Dépôts d'analyse des données QAI

Les dépôts d'analyse incluent les scripts de programmation (principalement en R) développés pour traiter et analyser les données de mesure de la QAI fournies par les participants de la ST2. Deux dépôts Git ont été créés pour publier ces scripts :

2.3.2.1 Package R pour le traitement des données individuelles de mesure de la QAI

Dépôt GitHub du package R : <https://github.com/IEA-EBC-Annex86/annex>

Le package R *annex* (décrit dans la section 2.2.3) propose une série de fonctions et méthodes permettant de traiter facilement les données de mesure de manière standardisée, comme défini dans l'Annexe 86. Il inclut également des fonctions pour écrire et valider les fichiers finaux qui constituent le dépôt de la base de données QAI hébergée sur [Zenodo](https://zenodo.org).

2.3.2.2 Collection de scripts pour l'analyse de la QAI

Dépôt GitHub des scripts d'analyse ST2 : <https://github.com/IEA-EBC-Annex86/ST2analysis>

Ce dépôt regroupe une collection de scripts et de fonctions pour analyser les données du dépôt de la base de données QAI. Il comprend notamment les scripts utilisés pour générer les tableaux récapitulatifs et les figures présentés dans la section 2.4. Il rassemble également des scripts de pré- et post-traitement (en R et Python) développés dans le cadre de la ST2 pour traiter les séries temporelles brutes (en appliquant le package R *annex*) et produire le dépôt de la base de données QAI.

2.4 Méta-analyse de la base de données QAI

La base de données QAI présentée a été analysée dans le but d'extraire les concentrations typiques des polluants les plus pertinents en milieu résidentiel. Pour cela, les résultats provenant de différents logements et études QAI ont été agrégés, comme décrit dans la section 2.4.1. Un résumé des résultats est présenté dans la section 2.4.2.

2.4.1 Agrégation des résultats de différentes études

Les données contenues dans le dépôt de données QAI offrent plusieurs possibilités de combinaison et d'agrégation pour la méta-analyse. Chaque point de données représente la moyenne de tous les enregistrements disponibles pour une combinaison pièce-mois donnée. Autrement dit, pour chaque pièce distincte (toutes études confondues), la moyenne est disponible pour chaque mois de l'année où des mesures ont été réalisées. Cependant, la durée des mesures (par pièce) varie fortement d'une étude à l'autre, allant de deux jours à plus de deux ans. Se pose alors la question de savoir si les mesures provenant de pièces avec de nombreux points de données « représentatifs d'un mois » doivent compter davantage que celles pour lesquelles un seul point « représentatif d'un mois » est disponible. Par exemple, si l'on souhaite comparer les résultats de logements équipés de différents types de ventilation ou de différents types de bâtiments, deux approches peuvent être envisagées :

- Un diagramme en boîte à moustaches (boxplot) **des moyennes des données non agrégées** (une moyenne par combinaison pièce-mois)
- Un diagramme en boîte à moustaches **des moyennes des données agrégées par pièce** (une moyenne par pièce).

La moyenne agrégée pour chaque pièce est calculée comme une moyenne pondérée, en appliquant comme facteur de pondération (w_i) la fraction du mois pendant laquelle des données ont effectivement été collectées. Ce facteur, compris entre 0 et 1, représente la disponibilité relative des données lors de la génération de chaque point de données pièce-mois. Pour plus de détails, voir Laverge et al. (2025). Ainsi, chaque pièce aura le même poids dans l'analyse statistique méta-analytique, par exemple pour comparer différents types de ventilation. La Figure 21 présente les diagrammes en boîte à moustaches des concentrations moyennes de CO₂ dans les chambres, la nuit, pendant les mois les plus froids de l'année (d'octobre à mai), pour les jeux de données non agrégés et agrégés. Dans cet exemple, des

différences notables sont observées, en particulier pour le groupe « ventilation hybride/mixte ».

Pour éviter un biais en faveur des études avec des mesures longues, le reste du résumé des résultats se concentrera sur le jeu de données agrégé, c'est-à-dire avec une valeur moyenne par pièce distincte. Étant donné que le comportement d'aération par les fenêtres diffère considérablement pendant les mois les plus chauds, le jeu de données a été filtré pour ne conserver que les données couvrant les mois d'octobre à mai avant agrégation, comme présenté dans la section 2.4.2. Cette sélection de mois repose sur les résultats de Laverge et al. (2025), où la variation des concentrations de CO₂ au cours de l'année a été étudiée, avec des valeurs statistiquement plus basses entre juin et septembre.

Remarque : Seuls les logements situés dans l'hémisphère nord sont inclus dans cette méta-analyse.

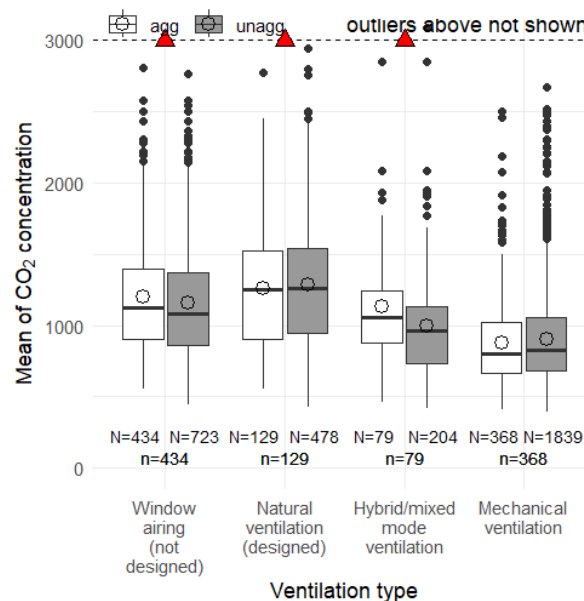


Figure 21 : Concentration moyenne de CO₂ dans les chambres la nuit (octobre – mai) pour des données agrégées (1 point de donnée par pièce) et non agrégées (1 point de donnée par pièce-mois).

Le dépôt de données QAI fournit également la fonction de répartition empirique (CDF, sous forme de percentiles) pour chaque point de données, c'est-à-dire pour chaque combinaison pièce-mois. Cela ouvre des possibilités supplémentaires pour la méta-analyse, comme la génération de :

- Boîtes à moustaches des **95^e percentiles des données (non) agrégées** ;
- Boîtes à moustaches, CDF (ou PDF) représentant la **distribution mixte des données (non) agrégées**.

La CDF du groupe agrégé est calculée comme un mélange fini des CDF des points de données agrégés, en appliquant le même facteur de pondération (w_i) que pour la moyenne pondérée.

$$P_{ag} = \sum_{i=1}^N w_i \cdot P_i$$

Ici, P_i et P_{ag} représentent respectivement la CDF pour chaque combinaison mois-pièce et pour le point de données agrégé par pièce. Cette CDF est définie numériquement par un vecteur comprenant plus de 100 intervalles sur la plage pertinente. Par exemple, pour le CO₂, chaque entrée de la CDF correspond à la fréquence cumulative relative des concentrations de CO₂ inférieures à 300, 330, 360 ppm, etc., jusqu'à 5 000 ppm. N correspond au nombre

de mois pour lesquels des mesures sont disponibles pour les pièces concernées. Pour plus de détails, voir Rojas et al. (2026b).

2.4.2 Synthèse des concentrations typiques de polluants intérieurs et des conditions intérieures

Pour estimer les concentrations typiques des polluants pertinents dans les logements résidentiels, une série de boîtes à moustache a été produite. Ceux-ci illustrent les mesures statistiques des valeurs moyennes pendant les mois non estivaux (jeu de données agrégé, c'est-à-dire une valeur par pièce distincte, représentant la période d'octobre à mai). Les résultats sont présentés dans les Figure 22 à Figure 25 et synthétisés dans les tableaux A4.1 à A4.11 en Annexe 4. Les résultats sont classés par type de ventilation et type de pièce. Selon le type de pièce, les périodes de la journée suivantes ont été filtrées pour créer les diagrammes en boîte et les tableaux récapitulatifs :

- Chambre : moyenne des heures nocturnes (23:00 – 07:00, heure locale) ;
- Salon, cuisine, bureau à domicile et autres espaces de vie non définis : moyenne des heures diurnes (07:00 – 23:00, heure locale) ;
- Couloir central et mesures dans les gaines d'extraction centrales du logement : moyenne sur 24 heures (00:00 – 24:00).

Cette approche permet d'obtenir des résultats plus représentatifs pour l'estimation de l'exposition humaine.

La Figure 22 montre que les chambres sont clairement les pièces les moins bien ventilées en milieu résidentiel, avec des concentrations moyennes et médianes de CO₂ bien supérieures à 1 000 ppm pour les concepts de ventilation reposant principalement sur des forces naturelles (aération par les fenêtres, ventilation naturelle conçue et ventilation hybride/mixte). En revanche, environ 75 % des chambres équipées de ventilation mécanique présentaient une concentration moyenne de CO₂ inférieure à 1 000 ppm pendant les nuits des mois non estivaux. Pour les salons, les différences entre les types de ventilation sont faibles, bien que la variance soit nettement plus élevée pour les logements aérés par les fenêtres. Il est cependant à noter que la taille de l'échantillon est plus réduite pour les salons ventilés naturellement par rapport à ceux équipés de ventilation mécanique.

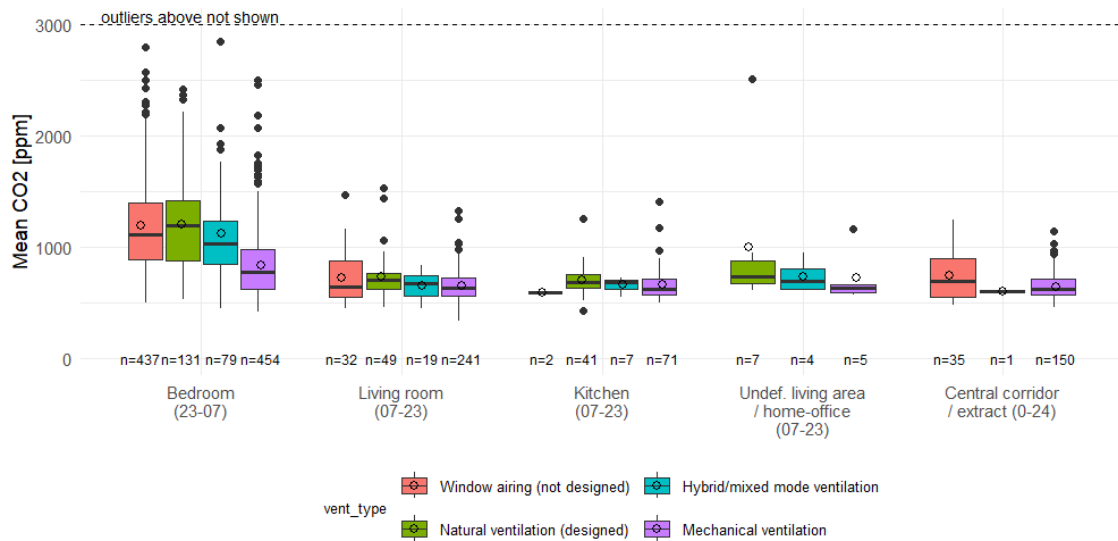


Figure 22 : Concentrations moyennes de CO₂ (octobre – mai) selon différents lieux de mesure (type de pièce, moment de la journée) et différents types de ventilation. Le nombre de points de données (n : nombre de pièces distinctes) est également indiqué.

En observant la concentration moyenne de PM_{2.5} dans la Figure 23, on constate une situation différente : la cuisine se distingue comme la pièce présentant les concentrations les plus élevées. Il est également remarquable de noter l'écart important entre la moyenne (représentée par un cercle) et la médiane (barre horizontale), ce qui indique une distribution fortement asymétrique où seule une petite fraction des logements semble présenter des concentrations relativement élevées. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les chambres et cuisines équipées de ventilation mécanique. Il est important de souligner que la taille de l'échantillon pour les mesures en cuisine est plutôt réduite, provenant de trois études de moindre envergure [AMR, SF1, SC1]. La moyenne élevée observée est le résultat de 5 logements présentant des valeurs moyennes supérieures à 100 µg/m³ (jusqu'à 376 µg/m³).

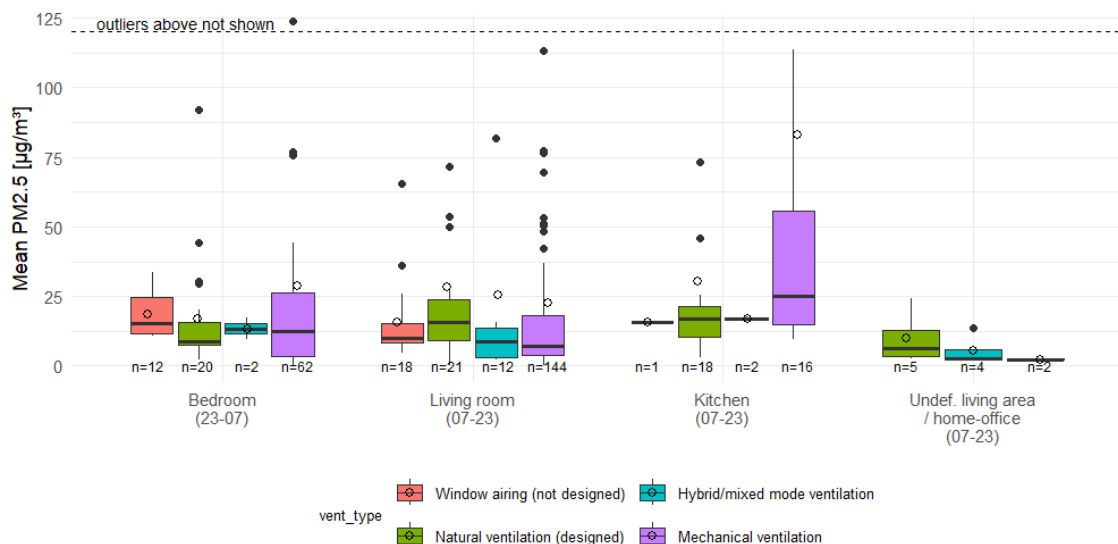


Figure 23 : Concentrations moyennes de PM_{2.5} (octobre – mai) selon différents lieux de mesure (type de pièce, moment de la journée) et différents types de ventilation. Le nombre de points de données (n : nombre de pièces distinctes) est également indiqué.

La Figure 24 (gauche) présente les résultats des concentrations de COVT obtenus à partir de mesures en série temporelle réalisées avec des capteurs bas coût, issues de huit études différentes (ARDEN, HomeOffice_COVID, VALIDate, AMR, ALIVE, MX1, SC1, SF1). En tenant compte de la taille de l'échantillon et de la plage de valeurs, les chambres semblent présenter les concentrations les plus élevées de COV (détectables par ces capteurs). Les valeurs relativement basses observées dans les chambres des logements aérés par les fenêtres sont principalement influencées par les résultats d'une étude en particulier (9 des 12 mesures proviennent de l'étude ARDEN), qui rapporte des valeurs globalement plus basses que les autres études. La Figure 24 (droite) synthétise les mesures réalisées par tubes de sorption dans le cadre d'une seule étude (Lueftung3.0), portant sur des maisons individuelles neuves 15 mois après leur occupation.

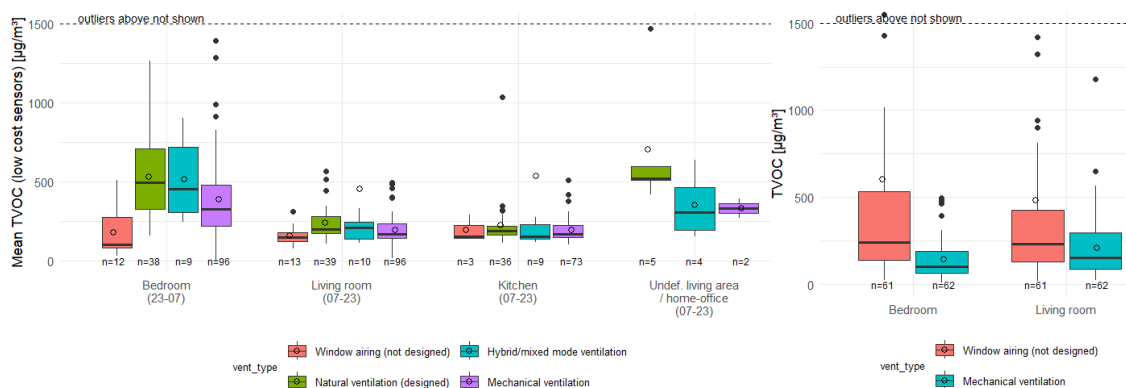


Figure 24 : Concentration en composés organiques volatils totaux (COVT) dans différentes pièces et pour différents types de ventilation. À gauche : concentration moyenne obtenue à partir de mesures continues avec des capteurs bas coût (octobre – mai, période de la journée indiquée). À droite : concentrations issues de mesures ponctuelles avec des tubes d'absorption. Le nombre de points de données (n : nombre de pièces distinctes) est également indiqué.

Les concentrations moyennes de formaldéhyde présentées dans la Figure 25 (gauche) sont clairement plus basses dans les logements équipés de ventilation mécanique. Cependant, ces données proviennent uniquement de trois études (HENGH, HomeOffice_COVID, LIA), avec une grande majorité des points de données pour les chambres et salons issus de deux études menées en Californie (respectivement 70 sur 72 et 90 sur 91 provenant des projets HENGH ou LIA). Les mesures par tubes de sorption de l'étude « Lueftung3.0 » (Figure 25, droite) montrent des valeurs similaires pour les logements ventilés mécaniquement. Une observation comparable peut être faite pour les niveaux de radon (Figure 26), avec des valeurs médianes plus basses dans les logements dotés de ventilation mécanique. À l'exception des résultats des mesures continues dans les logements aérés par les fenêtres, pour lesquels la taille très réduite de l'échantillon ne permet pas de tirer de conclusion.

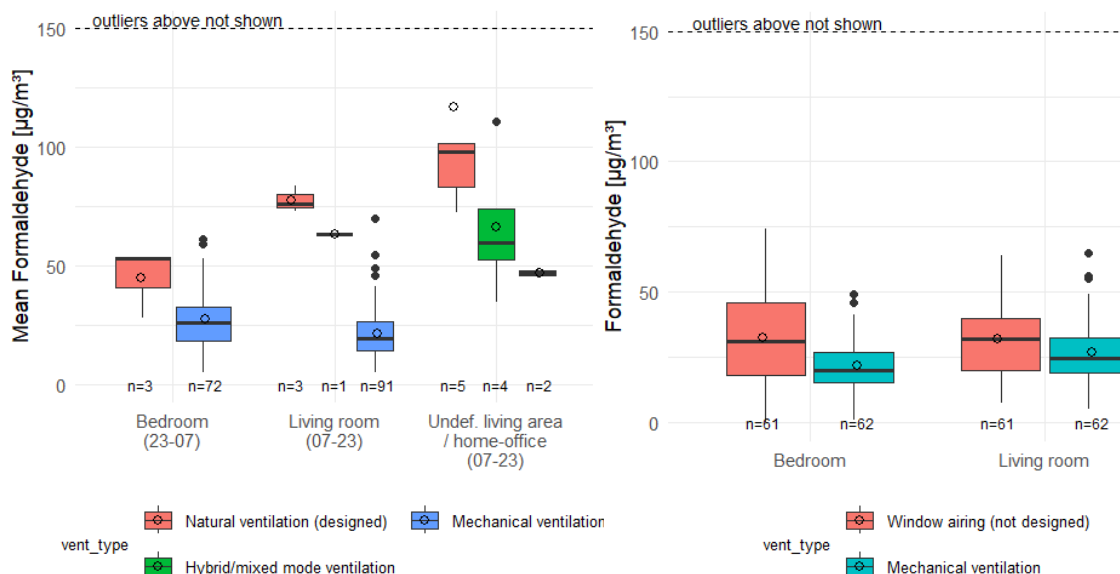


Figure 25 : Concentration en formaldéhyde dans différentes pièces et pour différents types de ventilation. À gauche : concentration moyenne obtenue à partir de mesures continues (octobre – mai, période de la journée indiquée). À droite : concentrations issues de mesures ponctuelles avec des tubes d'absorption. Le nombre de points de données (n : nombre de pièces distinctes) est également indiqué.

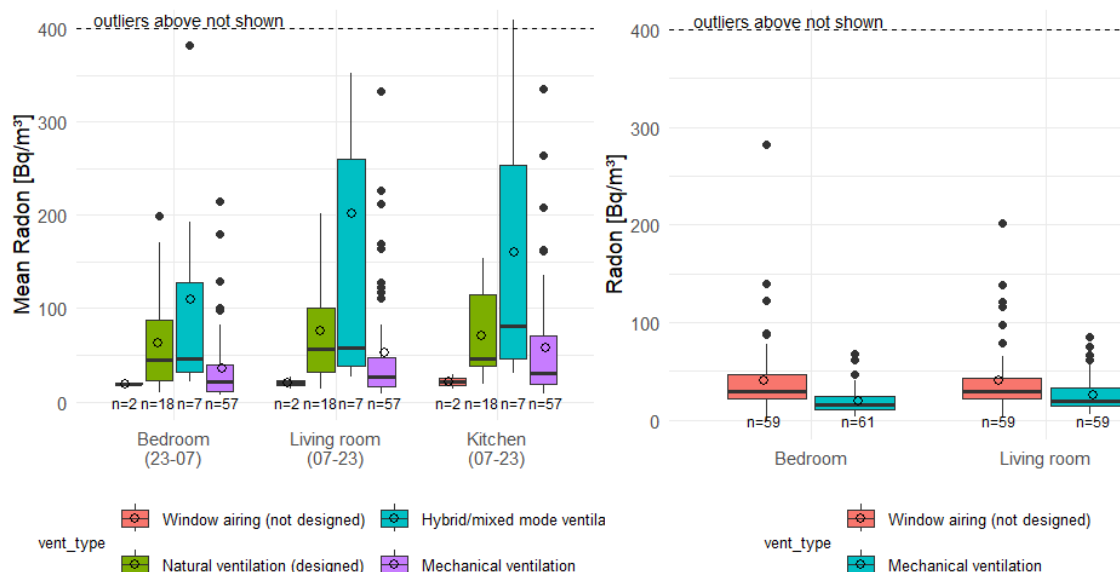


Figure 26 : Concentration en radon dans différentes pièces et pour différents types de ventilation. À gauche : concentration moyenne obtenue à partir de mesures continues (octobre – mai, période de la journée indiquée). À droite : concentrations issues de mesures ponctuelles. Le nombre de points de données (n : nombre de pièces distinctes) est également indiqué.

2.4.3 Estimation exemplaire des taux d'émission de formaldéhyde et de COVT

Pour illustrer d'autres applications possibles du dépôt de données QAI, l'intensité des sources d'émission de polluants de l'air intérieur a été estimée à partir des données de l'étude « Lueftung3.0 » (Wallner et al., 2015). Cette estimation des taux d'émission, réalisée dans le

cadre de l'Annexe 86, est documentée plus en détail dans (Rojas et al., 2025). Cette étude de cohorte autrichienne s'est avérée adaptée, car elle comprenait des mesures dans 123 logements pour le formaldéhyde (HCHO), les composés organiques volatils totaux (COVT) et les débits de ventilation, déterminés à l'aide d'une technique de gaz traceur (et d'une hotte à flux compensé en pression pour les logements ventilés mécaniquement). Les COV ont été mesurés par échantillonnage actif sur tubes de sorption (Anasorb 747) suivi d'une analyse par GC/MS. Les COVT ont été déterminés comme la surface totale des pics en utilisant le toluène comme étalon de calibration. Le formaldéhyde a été échantillonné à l'aide de cartouches DNPH et analysé par HPLC. Les données ont été collectées à deux moments distincts : trois mois après l'emménagement et un an après la première mesure. Le taux d'émission spécifique à la surface ER_{area} a été calculé pour chaque chambre (une par logement) en utilisant la concentration mesurée du polluant c_{pol} , le débit moyen d'air de ventilation $\dot{V}_{air}$ et la surface au sol de la pièce A , selon la formule suivante :

$$ER_{area} = c_{pol} \frac{\dot{V}_{air}}{A}$$

Les résultats sont synthétisés dans la Figure 27 et le Tableau A5.11. Ils montrent une diminution claire entre les deux dates de mesure. Quinze mois après l'emménagement, le taux d'émission médian de formaldéhyde par unité de surface était de 24,1 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Il est à noter que les taux d'émission de formaldéhyde sont substantiellement plus élevés dans les logements équipés de ventilation mécanique (29,0 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) par rapport aux logements aérés par les fenêtres (16,4 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $p < 0,001$). Pourtant, les concentrations intérieures de formaldéhyde restent significativement plus basses dans les chambres ventilées mécaniquement (voir Figure 25, droite). Cela s'explique par le fait que le taux d'émission de formaldéhyde augmente lorsque la ventilation est renforcée (et que la concentration diminue). Ce phénomène est décrit, par exemple, dans le modèle de taux d'émission développé par (Zhao et al., 2022).

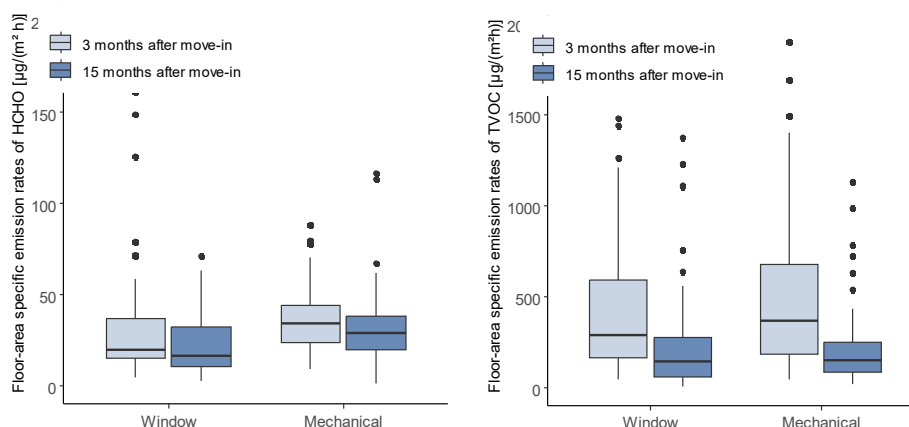


Figure 27 : Taux d'émission spécifique à la surface au sol estimé pour le formaldéhyde (à gauche) et les COVT (à droite) dans les logements ventilés naturellement ou mécaniquement, trois et quinze mois après l'emménagement des occupants.

Le taux d'émission médian de TVOC par unité de surface était d'environ 150 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ à la date la plus récente, indépendamment du type de ventilation.

3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats des activités de la ST2 de l'Annexe 86 permettent de caractériser les sources de polluants et les concentrations typiques rencontrées dans les bâtiments résidentiels. La section 1 documente la base de données PANDORA, qui contient un jeu de données riche sur les taux d'émission mesurés (principalement en laboratoire) pour une multitude de polluants et de sources. Elle peut être utilisée pour estimer et modéliser les émissions de polluants dans les logements selon une approche ascendante. La section 2, quant à elle, permet une approche descendante en s'appuyant sur des données empiriques de concentrations de polluants et de débits de ventilation dans les logements. Mais dans quelle mesure ces deux approches se recoupent-elles ? La sous-section suivante aborde cette question en se concentrant sur les émissions de formaldéhyde.

3.1 Caractérisation ascendante et descendante des émissions de formaldéhyde

En combinant les deux approches documentées dans les sections 1 et 2, il est possible de modéliser et/ou caractériser l'exposition aux polluants de l'air intérieur dans les bâtiments résidentiels, en utilisant à la fois une méthode ascendante (bottom-up) et une méthode descendante (top-down). L'exemple ascendant pour les émissions de formaldéhyde, présenté dans la section 1, montre une grande variabilité des résultats selon la sélection des produits émetteurs dans la base de données. Le taux d'émission spécifique de formaldéhyde par unité de surface après 28 jours variait ainsi entre $1\,000\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ et $70\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, reflétant l'étendue interquartile de l'approche 2 (basée sur une analyse statistique). En revanche, l'approche 1 (sélection plausible des entrées les plus récentes de la base de données) a donné un résultat d'environ $28,5\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$.

L'approche descendante s'appuie sur l'une des études du dépôt de données QAI, qui a porté sur 123 maisons individuelles neuves en Autriche, équipées ou non de ventilation mécanique. Dans le cadre de cette sous-tâche, le taux d'émission médian de formaldéhyde par unité de surface dans les chambres a été estimé à environ $29\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ trois mois après l'emménagement, et $24\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ quinze mois après.

De manière remarquable, les résultats de l'approche ascendante 1 et de l'approche empirique descendante concordent de façon surprenante. Cependant, il est important de prendre en compte les incertitudes et hypothèses (souvent arbitraires) qui entraînent une grande variabilité des résultats (par exemple, voir l'approche 2). Sachant que :

1. L'approche ascendante tend généralement à surestimer les émissions ;
2. L'analyse statistique de la base de données des sources d'émission peut inclure des produits obsolètes ;
3. Ces taux d'émission reflètent généralement l'état de produits plutôt neufs (environ 30 jours dans l'exemple présenté).

On peut recommander sous conditions d'utiliser le premier quartile lors de l'estimation des taux d'émission dans une approche ascendante, comme dans l'approche 2 de la section 1. Cette recommandation n'est cependant pas nécessairement généralisable à d'autres polluants.

3.2 Synthèse et perspectives

Les activités de la Sous-tâche 2 visaient à caractériser les sources de polluants intérieurs et les concentrations résultantes dans les bâtiments résidentiels. La section 1 présente la structure, le contenu et l'interface utilisateur de la base de données PANDORA, ainsi qu'un résumé des études de mesure des taux d'émission sous-jacentes et de son extension dans le cadre des activités de la Sous-tâche 2. Un exemple d'utilisation de cette base de données, ainsi que les résultats de son analyse, montre comment le taux d'émission de formaldéhyde dans une chambre d'enfant peut être facilement estimé, par exemple pour la modélisation de la qualité de l'air intérieur. En sélectionnant les entrées les plus récentes de la base de données, un taux d'émission spécifique de formaldéhyde par unité de surface d'environ $30 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ a été déterminé pour les constructions neuves.

La section 2 décrit le processus standardisé de traitement des données, développé dans le cadre de cette sous-tâche, pour extraire les concentrations de polluants à partir des données de mesure de plus de 1 000 logements, collectées lors d'études antérieures sur la QAI dans plusieurs pays. La création d'un dépôt de données QAI ouvert et accessible, ainsi que les outils d'analyse associés, garantit que cette recherche puisse rester une ressource évolutive pour la communauté scientifique. La méta-analyse des concentrations de CO_2 confirme et quantifie que les chambres sont clairement les pièces les moins bien ventilées en milieu résidentiel, avec des concentrations moyennes de CO_2 bien supérieures à 1 000 ppm la nuit en l'absence de ventilation mécanique. Les concentrations de formaldéhyde étaient significativement plus basses dans les logements équipés de ventilation mécanique, avec des valeurs autour de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cependant, les logements ventilés mécaniquement présentaient des concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ plus élevées que les autres types de ventilation, avec une forte variabilité, en particulier dans les cuisines. Les taux d'émission de formaldéhyde dérivés de ces mesures correspondent bien à l'approche de calcul ascendante de la section 2 (en utilisant les entrées les plus récentes de la base de données).

Pour les travaux futurs, il serait pertinent de se concentrer sur l'intégration de sources de données supplémentaires comme des fichiers typiques de pollution, l'affinement des méthodologies analytiques et l'incorporation de données issues de technologies émergentes, comme les capteurs de qualité de l'air basés sur l'IoT, afin de permettre une évaluation globale de la qualité de l'air intérieur et de ses impacts sur la santé et le confort des occupants des bâtiments.

4 REFERENCES

- Abadie, M., Geffre, E., Picard, C.-F., Loomans, M., Babich, F., Monge-Barrio, A., Licina, D., McGill, G., Toledo, L., Coggins, A.M., Pourkiaei, M., Casquero-Modrego, N., Molina, C., Sadrizadeh, S., McGrath, J., Rojas-Kopeinig, G., 2025. PANDORA: An open-access database of indoor pollutant emission rates for IAQ modeling. *J. Build. Eng.* 114, 114216. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114216>
- Abadie, M.O., Blondeau, P., 2011. PANDORA database: A compilation of indoor air pollutant emissions. *HVACR Res.* 17, 602–613. <https://doi.org/10.1080/10789669.2011.579877>
- Afshari, A., Lundgren, B., Ekberg, L.E., 2003. Comparison of three small chamber test methods for the measurement of VOC emission rates from paint. *Indoor Air* 13, 156–165. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00146.x>
- Afshari, A., Matson, U., Ekberg, L.E., 2005. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air* 15, 141–150. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00332.x>
- Alevantis, L., 2003. Building Material Emissions Study. Rep. Integr. Waste Manag. Board.
- Barrero, J., 2009. BUMA PROJECT: Prioritization of Building Materials as Indoor Pollution Sources.
- Bartekova, A., Lungu, C., Shmulsky, R., Huelman, P., Park, J., 2006. Laboratory evaluation of volatile organic compounds emissions from coated and uncoated oriented Strandboard. *For. Prod. J.* 56.
- Berrios, I., Zhang, J., Guo, B., Smith, J., Zhang, Z., 2005. VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS (VOCs) EMISSIONS FROM SOURCES IN A PARTITIONED OFFICE ENVIRONMENT AND THEIR IMPACT ON IAQ.
- Black, M.S., 1999. Emissions from Office Equipment. *Proc. Indoor Air'99*.
- Blondel, A., Plaisance, H., 2011. Screening of formaldehyde indoor sources and quantification of their emission using a passive sampler. *Build. Environ.* 46, 1284–1291. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.011>
- Bluyssen, P. (Ed.), 1997. Evaluation of VOC emissions from building products: solid flooring materials, EUR. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Borrazzo, J.E., Osborn, J.F., Fortmann, R.C., Keeper, R.L., Davidson, C.I., 1987. Modeling and monitoring of CO, NO and NO₂ in a modern townhouse. *Atmospheric Environ.* 1967, Characterization of Contaminant Emissions from Indoor Sources 21, 299–311. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(87\)90005-9](https://doi.org/10.1016/0004-6981(87)90005-9)
- Brown, S.K., 1999. Assessment of Pollutant Emissions from Dry-Process Photocopiers. *Indoor Air* 9, 259–267. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.00005.x>
- Cáceres, T., Soto, H., Lissi, E., Cisternas, R., 1983. Indoor house pollution: Appliance emissions and indoor ambient concentrations. *Atmospheric Environ.* 1967 17, 1009–1013. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(83\)90253-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(83)90253-6)
- Carteret, M., Pauwels, J.-F., Hanoune, B., 2012. Emission factors of gaseous pollutants from recent kerosene space heaters and fuels available in France in 2010. *Indoor Air* 22, 299–308. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00763.x>
- Caudron, C., LeMaitre, O., Deroo, L., Gosset, S., Hallemans, E., Renaud, M., Coulbaux, G., 2022. EmiBio–Emissions Des Matériaux Biosourcés–Rapport Final.

- Chan, W.R., Kim, Y.-S., Less, B.D., Singer, B.C., Walker, I.S., 2020. Ventilation and Indoor Air Quality in New California Homes with Gas Appliances and Mechanical Ventilation (No. LBNL--2001200). Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Berkeley, CA (United States). <https://doi.org/10.2172/1509678>
- Coggins, A.M., Wemken, N., Mishra, A.K., Sharkey, M., Horgan, L., Cowie, H., Bourdin, E., McIntyre, B., 2022. Indoor air quality, thermal comfort and ventilation in deep energy retrofitted Irish dwellings. *Build. Environ.* 219, 109236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109236>
- de Kort, J.M.A., Gauvin, F., Loomans, M.G.L.C., Brouwers, H.J.H. (Jos), 2023. Emission rates of bio-based building materials, a method description for qualifying and quantifying VOC emissions. *Sci. Total Environ.* 905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167158>
- Décret français du 19 avril 2011, 2011. 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.
- Derbez, M., Solal, C., 2014. Etude exploratoire: caractérisation des émissions de fournitures scolaires et de produits d'entretien utilisés dans une école et analyse des données de composition. CSTB-DSC.
- Evans, G.J., Peers, A., Sabaliauskas, K., 2008. Particle dose estimation from frying in residential settings. *Indoor Air* 18, 499–510. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00551.x>
- Funaki, R., Tanaka, H., Nakagawa, T., Tanabe, S., 2003. Measurements of Aldehydes and VOCs from Electronic Appliances by Using a Small Chamber. Presented at the Healthy Building.
- Géhin, E., Ramalho, O., Kirchner, S., 2008. Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities. *Atmos. Environ.* 42, 8341–8352. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.021>
- Girman, J.R., Apte, M.G., Traynor, G.W., Allen, J.R., Hollowell, C.D., 1982. Pollutant emission rates from indoor combustion appliances and sidestream cigarette smoke. *Environ. Int., Indoor Air Pollution* 8, 213–221. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(82\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0160-4120(82)90030-7)
- Hassan, H., Mishra, A.K., Wemken, N., O'Dea, P., Cowie, H., McIntyre, B., Coggins, A.M., 2024. Deep energy renovations' impact on indoor air quality and thermal comfort of residential dwellings in Ireland – ARDEN project. *Build. Environ.* 259, 111637. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111637>
- He, C., Morawska, L., Hitchins, J., Gilbert, D., 2004. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmos. Environ.* 38, 3405–3415. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.027>
- He, C., Morawska, L., Taplin, L., 2007. Particle Emission Characteristics of Office Printers. *Environ. Sci. Technol.* 41, 6039–6045. <https://doi.org/10.1021/es063049z>
- Health Canada, 2006. Constituents in Tobacco and Smoke Emissions from Canadian Cigarettes.
- Hetes, R., Moore, M., Norheim, C., 1995. Office equipment: Design, indoor air emissions, and pollution prevention opportunities. Final report, October 1993-January 1995 (No. PB--95-191375/XAB). Research Triangle Inst., Research Triangle Park, NC (United States). Center for Environmental Analysis.

- Howard-Reed, C., Polidoro, B., 2006. Database tools for modeling emissions and control of air pollutants from consumer products, cooking, and combustion: NIST.
- INIES, 2022. Procedure for Developing Default Environmental Data (DED) Relating to Construction Products and Equipment for Use in the Method for Assessing the Energy and Environmental Performance of New Buildings.
- Jung, C., Mahmoud, N.S.A., 2022. Extracting the Critical Points of Formaldehyde (HCHO) Emission Model in Hot Desert Climate. *Air Soil Water Res.* 15, 11786221221105082. <https://doi.org/10.1177/11786221221105082>
- Klepeis, N.E., Apte, M.G., Gundel, L.A., Sextro, R.G., Nazaroff, W.W., 2003. Determining Size-Specific Emission Factors for Environmental Tobacco Smoke Particles. *Aerosol Sci. Technol.* 37, 780–790. <https://doi.org/10.1080/02786820300914>
- Kolarik, J., 2025. D4 – Energy Efficient IAQ management strategies - applications - IEA-EBC-Annex86.
- Kozicki, M., Guzik, K., 2021. Comparison of VOC Emissions Produced by Different Types of Adhesives Based on Test Chambers. *Materials* 14. <https://doi.org/10.3390/ma14081924>
- Kozicki, M., Piasecki, M., Goljan, A., Deptuła, H., Niesłochowski, A., 2018. Emission of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Dispersion and Cementitious Waterproofing Products. *Sustainability* 10. <https://doi.org/10.3390/su10072178>
- Kurosawa, Y., Shuichi, T., Shin-ichi, T., Masafumi, M., 2008. Measurement of Chemical Pollutants Emitted from Livingware Using Chamber Method. Presented at the Indoor Air.
- Lam, S., Lee, S.C., Kin Fai, H., 2000. Characterization of VOCs, ozone, and PM10 emissions from office equipment in an environmental chamber. *Build. Environ., Ventilation for Health and Sustainable Environment* 36, 837–842. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00009-9)
- Laverge, J., 2025. D1 - A literature list for energy efficient IAQ management - IEA-EBC-Annex86.
- Laverge, J., Jones, B., Rojas, G., Abadie, M., Qin, M., Guyot, G., Kolarik, J., 2025. D3 - Methods and tools for the rating of IAQ management strategies - IEA-EBC-Annex86.
- Lee, S.-C., Wang, B., 2004. Characteristics of emissions of air pollutants from burning of incense in a large environmental chamber. *Atmos. Environ.* 38, 941–951. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.11.002>
- Liu, X., Mason, M., Krebs, K., Sparks, L., 2004. Full-Scale Chamber Investigation and Simulation of Air Freshener Emissions in the Presence of Ozone. *Environ. Sci. Technol.* 38, 2802–2812. <https://doi.org/10.1021/es030544b>
- Maupetit, F., 2014. Evaluation de La Contribution Des Matériaux de Construction à La Qualité de l'air Intérieur (Étude Préalable) (CSTB n° SC-14-044, Convention DHUP 2012-Action N°11.).
- McCrillis, R.C., Burnet, P.G., 1990. Effects of Burnrate, Wood Species, Altitude, and Stove Type on Woodstove Emissions. *Toxicol. Ind. Health* 6, 95–102. <https://doi.org/10.1177/074823379000600507>
- Moser, B., Bodrogi, F., Eibl, G., Lechner, M., Rieder, J., Lirk, P., 2005. Mass spectrometric profile of exhaled breath—field study by PTR-MS. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 145, 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2004.02.002>

- Nakagawa, T., Wargocki, P., Tanabe, S., Charles, J., Weschler, J., Baginska, S., Bako-Biro, Z., Ole Fanger, P., 2003. Chemical Emission Rates from Personal Computers. Presented at the 7th International Conference on Healthy Buildings, Healthy Buildings.
- Nicolas, M., Karr, G., Real, E., Maupetit, F., 2018. Impact des produits d'entretien sur la qualité de l'air intérieur: PEPS, Définition d'un protocole d'essais simple et harmonisé pour l'évaluation des émissions en composés volatils (PhD Thesis). ADEME.
- Nicolas, M., Meme, A., Chiappini, L., Rio, C., Nicolle, J., D'anna, B., Rossignol, S., 2013. Household products and indoor air quality: emission, reactivity and by-products in both gaseous and particulate phases.
- Nicolas, M., Quivet, E., Guillaume, K., 2017. Exposition aux polluants émis par les bougies et les encens dans les environnements intérieurs—Émissions et risques sanitaires associés. Projet EBENE (APR ADEME CORTEA). ADEME Paris Fr. 22.
- Offermann, F.J., Mueller, M., Spiegel, L., Koyama, K., Kelly, Jones, M., 2009. Ventilation and Indoor Air Quality in New Homes.
- O'Leary, C., de Kluizenaar, Y., Jacobs, P., Borsboom, W., Hall, I., Jones, B., 2019. Investigating measurements of fine particle (PM_{2.5}) emissions from the cooking of meals and mitigating exposure using a cooker hood. *Indoor Air* 29, 423–438. <https://doi.org/10.1111/ina.12542>
- Oliveira Fernandes, E., 2001. Materials for Healthy Indoor Spaces and More Energy Efficient Buildings. Final Report of EEC Project MATHIS, Non-Nuclear Energy Programme JOULE III.
- Pagels, J., Wierzbicka, A., Nilsson, E., Isaxon, C., Dahl, A., Gudmundsson, A., Swietlicki, E., Bohgard, M., 2009. Chemical composition and mass emission factors of candle smoke particles. *J. Aerosol Sci.* 40, 193–208. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.10.005>
- Persily, A., de Jonge, L., 2017. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air* 27, 868–879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>
- Plaisance, H., Blondel, A., Desauziers, V., Mocho, P., 2014. Hierarchical cluster analysis of carbonyl compounds emission profiles from building and furniture materials. *Build. Environ.* 75, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.014>
- Riess, U., Tegtbur, U., Fauck, C., Fuhrmann, F., Markewitz, D., Salthammer, T., 2010. Experimental setup and analytical methods for the non-invasive determination of volatile organic compounds, formaldehyde and NO_x in exhaled human breath. *Anal. Chim. Acta* 669, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.04.049>
- Rojas, G., Abadie, M., 2025. D2 - An open registry for the rating of IAQ management strategies - IEA-EBC-Annex86.
- Rojas, G., Mayr, L., Tappler, P., Damberger, B., 2025. Characterizing Indoor Air Pollutant Sources in Residential Homes – Empirical Determination of Emission Rates of Formaldehyde and Volatile Organic Compound Sources from over 120 Bedrooms. Presented at the Decarbonized, Healthy, and Energy-Conscious Buildings in Future Climates, Milan.
- Rojas, G., Stauffer, R., Casquero-Modrego, N., Loomans, M., Abadie, M., Alhindawi, I., Babich, F., Bekö, G., Coggins, M., Cremers, B., Damberger, B., Freundorfer, T., Garcia-Ortega, S., Hassan, H., Jones, B., Alonso, M.J., Lara-Ibeas, I., McGill, G., McGrath, J., Monge-Barrio, A., Molina, C., Moreno-Rangel, A., Tappler, P., Toledo, L., 2026a. Towards a harmonized database of indoor air contaminant concentrations:

- Methods and application to CO₂. *Build. Environ.* 292, 114297. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2026.114297>
- Rojas, G., Stauffer, R., Casquero-Modrego, N., Loomans, M., Abadie, M., Alhindawi, I., Babich, F., Bekö, G., Coggins, M., Cremers, B., Damberger, B., Freundorfer, T., Garcia-Ortega, S., Hassan, H., Jones, B., Alonso, M.J., Lara-Ibeas, I., McGill, G., McGrath, J., Monge-Barrio, A., Molina, C., Moreno-Rangel, A., Tappler, P., Toledo, L., 2026b. Towards a harmonized database of indoor air contaminant concentrations: Methods and application to CO₂. *Build. Environ.* 292, 114297. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2026.114297>
- Roux, M.L., 2012. Contribution de Mobilier à La Qualité de l'air Intérieur Dans Les Crèches (MOBAIR-C). (No. Rapport final d'étude réalisée pour le compte de la Direction Générale de la Prévention des Risques du MEDDTL, convention n°SU006694.).
- Singer, B.C., Destailats, H., Hodgson, A.T., Nazaroff, W.W., 2006. Cleaning products and air fresheners: emissions and resulting concentrations of glycol ethers and terpenoids. *Indoor Air* 16, 179–191. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00414.x>
- Tang, X., Misztal, P.K., Nazaroff, W.W., Goldstein, A.H., 2016. Volatile Organic Compound Emissions from Humans Indoors. *Environ. Sci. Technol.* 50, 12686–12694. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04415>
- Tissari, J., Lyyränen, J., Hytönen, K., Sippula, O., Tapper, U., Frey, A., Saarnio, K., Pennanen, A.S., Hillamo, R., Salonen, R.O., Hirvonen, M.-R., Jokiniemi, J., 2008. Fine particle and gaseous emissions from normal and smouldering wood combustion in a conventional masonry heater. *Atmos. Environ.* 42, 7862–7873. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.019>
- Traynor, G.W., Anthon, D.W., Hollowell, C.D., 1982. Technique for determining pollutant emissions from a gas-fired range. *Atmospheric Environ.* 1967 16, 2979–2987. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(82\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0004-6981(82)90049-X)
- Wallace, L., 2006. Indoor Sources of Ultrafine and Accumulation Mode Particles: Size Distributions, Size-Resolved Concentrations, and Source Strengths. *Aerosol Sci. Technol.* 40, 348–360. <https://doi.org/10.1080/02786820600612250>
- Wallner, P., Munoz, U., Tappler, P., Wanka, A., Kundi, M., Shelton, J.F., Hutter, H.-P., 2015. Indoor Environmental Quality in Mechanically Ventilated, Energy-Efficient Buildings vs. Conventional Buildings. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12, 14132–14147. <https://doi.org/10.3390/ijerph121114132>
- Wang, N., Ernle, L., Bekö, G., Wargocki, P., Williams, J., 2022. Emission Rates of Volatile Organic Compounds from Humans. *Environ. Sci. Technol.* 56, 4838–4848. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08764>
- Wensing, M., Kummer, T., Riemann, A., Schwampe, W., 2002. Emissions from electronic devices: Examination of computer monitors and laser printers in a 1 m³ emission test chamber. *Proc. Indoor Air* 2002 2, 554–559.
- Won, D., Shaw, C.Y., 2004. Investigation of Building Materials as VOC Sources in Indoor Air.
- Yan, M., Zhai, Y., Shi, P., Hu, Y., Yang, H., Zhao, H., 2019. Emission of volatile organic compounds from new furniture products and its impact on human health. *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.* 25, 1886–1906. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1476126>

- Yeung, L.L., To, W.M., 2008. Size Distributions of the Aerosols Emitted from Commercial Cooking Processes. *Indoor Built Environ.* 17, 220–229. <https://doi.org/10.1177/1420326X08092043>
- Zai, S., Zhen, H., Jia-song, W., 2006. Studies on the size distribution, number and mass emission factors of candle particles characterized by modes of burning. *J. Aerosol Sci.* 37, 1484–1496. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2006.05.001>
- Zhao, H., Chan, W.R., Cohn, S., Delp, W.W., Walker, I.S., Singer, B.C., 2021. Indoor air quality in new and renovated low-income apartments with mechanical ventilation and natural gas cooking in California. *Indoor Air* 31, 717–729. <https://doi.org/10.1111/ina.12764>
- Zhao, H., Walker, I.S., Sohn, M.D., Less, B., 2022. A Time-Varying Model for Predicting Formaldehyde Emission Rates in Homes. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116603>
- Zheng, H., Csemezová, J., Loomans, M., Walker, S., Gauvin, F., Zeiler, W., 2024. Species profile of volatile organic compounds emission and health risk assessment from typical indoor events in daycare centers. *Sci. Total Environ.* 918, 170734. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170734>
- Zhu, J., Cao, X.-L., Beauchamp, R., 2001. Determination of 2-butoxyethanol emissions from selected consumer products and its application in assessment of inhalation exposure associated with cleaning tasks. *Environ. Int.* 26, 589–597. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00046-0)

ANNEXE 1 : INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES SUR LES ETUDES DE LA BIBLIOGRAPHIE

Les tableaux suivants fournissent des informations complémentaires sur les études, telles que les sources étudiées, les dimensions de la chambre expérimentale, les conditions environnementales et le débit d'air neuf, la durée des mesures, le polluant sélectionné ainsi que le système de mesure utilisé, et le type de données sur les taux d'émission fournies par les auteurs.

Tableau S 1 : Construction and Decoration Materials (1/4)

Reference	(Bluyssen, 1997)	(Oliveira Fernandes, 2001)	(Alevantis, 2003)	(Afshari, Lundgren, and Ekberg, 2003)
Category	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials
Sub-Category	Finishes, Flooring	Acoustic Materials, Carpeting, Finishes, Flooring, Installation Materials, Insulation Materials, Interior Panels, Openings, Structural Materials, Wall Covering	Acoustic Materials, Carpeting, Finishes, Flooring, Insulation Materials, Interior Panels, Structural Materials	Finishes
Sources	Solid flooring materials	Building materials (SOPHIE database)	Construction and Decoration Materials (BUMA database)	Solvent-based alkyd paint
Exp. Chamber	Small test chambers ($\leq 2 \text{ m}^3$)	Various (from small chambers to rooms)	Large chamber (85 x 131 x 82 in) and 11.5-L stainless-steel canisters for specimen testing	Three types of chambers: a 1-m ³ chamber, a Field and Laboratory Emission Cell (FLEC), and a CLIMPAQ (chamber for laboratory investigation of materials pollution and air quality).
Controlled Temperature and RH	23 $\pm$ 0.5 °C, 45 $\pm$ 5 %RH	23 $\pm$ 1 °C, 45 $\pm$ 5 %RH	23 $\pm$ 2 °C, 50 $\pm$ 10 %RH	23 $\pm$ 1 °C, 49 $\pm$ 2 %RH
Fresh air supply rate (ACH)	0.5 ACH for standard tests	Various	0.625, 1.25 or 2.5 m ³ /(h.m ² _{sample})	0.5 – 4.0 ACH
Duration of measurement	24 h, 72 h, and 28 d after placing the samples in the chambers	1, 3 and 30 d	24, 48, and 96 h intervals after placing the samples in the mini chambers	24 h
Pollutants	Total VOCs (TVOC), individual VOCs	Various COVs and aldehydes	VOCs (up to C-15—pentadecane) and aldehydes (up to C10—decanal).	Pentanal, hexanal, octanal, and decanol
PM measurement system	-	-	-	-
VOC measurement system	GC-FID and GC-MS for VOC detection	Gas chromatography and mass spectrometry (GC/MS/FID) for VOCs, a specific formaldehyde analyzer	Stainless-steel desorption tube filled with Tenax™ sorbent for VOCs, and Waters Sep-Pak® XpoSure™ Aldehyde Sampler cartridges for aldehydes	Tenax tubes followed by GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) analysis
Other gas measurement system	-	-	-	-
Emission Rate Data	Model #11	Model #11	Model #11	Model #03

Tableau S 2 : Construction and Decoration Materials (2/4)

Reference	(Won and Shaw, 2004)	(Berrios <i>et al.</i> , 2005)	(Bartekova <i>et al.</i> , 2006)	(Barrero, 2009)
Category	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials
Sub-Category	Acoustic Materials, Carpeting, Finishes, Flooring, Furnishing Materials, Installation Materials, Interior Panels, Structural Materials	Carpeting, Furnishing Materials	Structural Materials	Finishes, Flooring, Furnishing Materials, Structural Materials
Sources	Building materials in Canada (NSC-NRC database)	Partition panels, carpet	Coated and uncoated oriented strandboard	Finishes, Flooring, Furnishing Materials, Structural Materials
Exp. Chamber	0.0063 – 33.6 m ³	Mid- and full-scale stainless-steel chambers	55L chamber	-
Controlled Temperature and RH	23 °C, 50 %RH	23 °C, 50 %RH	23 °C ± 5 %, 50 %RH ± 5%	-
Fresh air supply rate (ACH)	0.25 – 2 ACH (max 53 ACH for small chamber)	0 – 1 ACH	1 ACH	-
Duration of measurement	4 h – several weeks	Each test was 120 h (samples every 24 h)	28 d (only 3 d reported for all pollutants)	1, 3, 7, 14, 21 and 28 d
Pollutants	90 target VOCs	VOCs: m-xylene, p-xylene, pentadecane, phenol, toluene, styrene, d-limonene	Most prevalent VOCs	VOCs
PM measurement system	-	-	-	-
VOC measurement system	Multi-sorbent tubes and DNPH cartridges. Chromatographs obtained from GC/MS and HPLC	Thermal desorber - GC/MS system	Activated charcoal tubes attached to personal sampling pumps at the chamber outlets. Analysis using GC/MS	-
Other gas measurement system	-	-	-	-
Emission Rate Data	Models #03, #14 and #15	Model #11	Model #11	Model #11

Tableau S 3 : Construction and Decoration Materials (3/4)

Reference	(Plaisance <i>et al.</i> , 2014)	(Maupetit, 2014)	(Kozicki <i>et al.</i> , 2018)	(Kozicki and Guzik, 2021)
Category	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials
Sub-Category	Acoustic Materials, Flooring, Installation Materials, Insulation Materials, Interior Panels, Wall Covering	Carpeting, Finishes, Flooring, Installation Materials, Interior Panels	Installation Materials	Installation Materials
Sources	Building materials and furnishings (e.g., chipboards, MDF, OSB, plywood, finishing plaster)	Construction and Decoration Materials	Waterproofing products used in construction	Adhesives: flooring, finishing walls and ceilings, and for other applications
Exp. Chamber	35-liter glass cylindrical chamber	51-liter chamber	0.1 m ³ stainless steel	0.1 m ³ chamber
Controlled Temperature and RH	23 ± 2 °C, 50 ± 5 %RH	23 ± 2 °C, 50 ± 5 %RH	23 ± 1°C, 50 ± 5 %RH	23 ± 1°C, 50 ± 5 %RH
Fresh air supply rate (ACH)	0.5 ACH	1.2 and 2.4 ACH	0.5 ACH	0.5 ACH
Duration of measurement	Sampling duration varied (typical: 2 h)	42 d	3- and 28-day averages	3- and 28-day averages
Pollutants	Formaldehyde, acetaldehyde, acetone, propanal, benzaldehyde, hexanal	Aldehydes and VOCs	Range of VOCs, alcohols, benzene derivatives, aldehydes, ketones, ethers, esters	VOCs
PM measurement system	-	-	-	-
VOC measurement system	High-performance liquid chromatography (HPLC) for carbonyls	High-performance liquid chromatography (HPLC) for aldehydes, and a thermal desorption system (TDS) combined with GC/FID for VOCs	Sample onto Tenax TA and analyzed using TD-GC/MS	Glass tubes with Tenax TA adsorbent, thermal desorption, GC/MS for separation and analysis
Other gas measurement system	-	-	-	-
Emission Rate Data	Model #11	Model #11	Model #11	Model #11

Tableau S 4 : Construction and Decoration Materials (4/4)

Reference	(Caudron <i>et al.</i> , 2022)	(Jung and Mahmoud, 2022)	(de Kort <i>et al.</i> , 2023)	
Category	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials	Construction and Decoration Materials	
Sub-Category	Insulation Materials, Structural Materials	Wall Covering	Insulation Materials, Interior Panels	
Sources	Bio-based materials for construction	Flooring and wallpaper materials	Fully biobased, semi-synthetic and fully synthetic materials	
Exp. Chamber	50 and 225-liter chambers	35-liter chamber system	20-liter stainless steel cylinder	
Controlled Temperature and RH	23 ± 1 °C, 50 and 85 ± 5 %RH	25 °C, 50 %RH	~22 °C, ~30 %RH	
Fresh air supply rate (ACH)	Not mentioned	0.5 ACH	-	
Duration of measurement	28 d	Varied by material (typical: 24 h)	Qualitative measurements: 72 h in total (samples at 24/48/72h); quantitative measurements (MDF cork, particle board, EPS only): 28 d	
Pollutants	Aldehydes and VOCs	Formaldehyde	Furfural, toluene, acetic acid, phenol, acetone and various terpene emissions. TVOC is the sum of all VOC components between C6- C12-C14/C15	
PM measurement system	-	-	-	
VOC measurement system	High-performance liquid chromatography (HPLC) for aldehydes, and a thermal desorption system (TDS) combined with GC/MS/FID for VOCs	HPLC with DNPH derivatization for formaldehyde quantification	Thermal desorption tubes for 10-30 min + GC/MS post-analysis	
Other gas measurement system	-	-	-	
Emission Rate Data	Model #11	Model #11	Model #11	

Tableau S 5 : Furniture (1/2)

Reference	(Oliveira Fernandes, 2001)	(Berrios <i>et al.</i> , 2005)	(Roux, 2012)	(Yan <i>et al.</i> , 2019)
Category	Furniture	Furniture	Furniture	Furniture
Sub-Category	Cushions	Printers, Chairs, Drawers, Tables	Day-nursery furniture	Tables
Sources	Cushions (vinyl) (SOPHIE database)	Chairs, Drawers, Tables	Pieces of nursery and kindergarten furniture and furniture components	Foot stool made of rubber wood, bedside table made from paulownia wood, MDF and high density board
Exp. Chamber	Various small chambers	Mid- and full-scale stainless-steel chambers	1 m ³ small chamber and 30 m ³ room	stainless steel 1m3
Controlled Temperature and RH	23 ± 1 °C, 45 ± 5 %RH	23 °C, 50 %RH	23 ± 2 °C, 50 ± 5 %RH	23 ± 1 °C, 45 ± 5 %RH
Fresh air supply rate (ACH)	Various	0 – 1 ach	0.5 ACH	1.0 ACH
Duration of measurement	1, 10, 14 and 30 d	Each test was 120 h (samples every 24 h)	28 d	3 d
Pollutants	Various COVs	VOCs: m-xylene, p-xylene, pentadecane, phenol, toluene, styrene, d-limonene	Aldehydes and VOCs	Benzene, toluene, m-xylene, o-xylene, ethyl benzene, n-undecane, styrene, n-butyl acetate
PM measurement system	-	-	-	-
VOC measurement system	Gas chromatography and mass spectrometry (GC/MS/FID) for VOCs, a specific formaldehyde analyzer	Thermal desorber - GC/MS system	High-performance liquid chromatography (HPLC) for aldehydes, and a thermal desorption system (TDS) combined with GC/FID for VOCs	Sampled onto Tenax TA, thermally desorbed and analyzed by GC with FID
Other gas measurement system	-	-	-	-
Emission Rate Data	Model #11	Model #11	Model #11	Model #11

Tableau S 6: Furniture (2/2)

Reference	(Zheng <i>et al.</i> , 2024)			
Category	Furniture			
Sub-Category	Mattress			
Sources	New and used mattresses			
Exp. Chamber	52.5 m ³ climate chamber			
Controlled Temperature and RH	~20.5 °C, ~45 %RH or ~35.7 °C, ~62.5 %RH			
Fresh air supply rate (ACH)	0.3 – 0.4 ACH			
Duration of measurement	6 h			
Pollutants	Isopropyl Alcohol, Trichloroethylene, n-Hexane, p-Xylene, 1,2,3-Trimethylbenzene, o-Xylene, 2-Butanone, Toluene, Styrene, AcetaldehydeMethyl isobutyl ketone, Ethylbenzene, Benzene, Ethylene oxide, m-Xylene, 1,4-Dichlorobenzene (96 VOCs analyzed in total)			
PM measurement system	-			
VOC measurement system	Thermal desorption tubes, GC/MS post-analysis			
Other gas measurement system	-			
Emission Rate Data	Model #03			

Tableau S 7 : Cleaning Products and Air Fresheners (1/2)

Reference	(Zhu, Cao, and Beauchamp, 2001)	(Liu <i>et al.</i> , 2004)	(Afshari, Matson, and Ekberg, 2005)	(Singer <i>et al.</i> , 2005)
Category	Cleaning Products and Air Fresheners	Cleaning Products and Air Fresheners	Cleaning Products and Air Fresheners	Cleaning Products and Air Fresheners
Sub-Category	Cleaning Products	Air Fresheners	Air Fresheners	Air Fresheners, Cleaning Products
Sources	Household cleaning products	Pine-scented electrical plug-in air freshener	Air-freshener spray	Cleaning products and air fresheners
Exp. Chamber	Small environmental chamber, specific volume not mentioned	29.8 m ³ chamber	32 m ³ chamber	50 m ³ chamber
Controlled Temperature and RH	23 °C, 50 %RH	23 ± 0.5 °C, 50 ± 5 %RH	No control, 22 – 28 °C	No control, 20.8 – 23.3 °C, 40 – 70 % H
Fresh air supply rate (ACH)	1 ACH	0.5 ACH	1.7 ± 0.1 ACH	0.5 ACH
Duration of measurement	1 – 8 h, varying by product type	160 h	Until peak decayed, typically around 3-4 h	Various, 10 min – 24 h
Pollutants	2-butoxyethanol	VOC, terpenes (aldehydes and PM also measured but no emission rates were associated)	PM 0.02-1µm (CPC), PM 0.3-1µm (OPC)	Terpene hydrocarbons, terpene alcohols, other VOCs - p-cymene and Eucalyptol
PM measurement system	-	-	CPC (TSI P-Trak 8525), OPC (TSI APC 300)	-
VOC measurement system	GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) used for VOC detection	Thermal desorption system (TDS) combined with GC/FID	-	Tenax sorbent TA and carbosieve S111, analyzed by thermal desorption GC with mass selective detection and quantitation
Other gas measurement system	-	-	-	-
Emission Rate Data	Model #03	Models #16 and #18	Models #16 and #18	Models #02 and #03

Tableau S 8 : Cleaning Products and Air Fresheners (2/2)

Reference	(Géhin, Ramalho, and Kirchner, 2008)	(Nicolas <i>et al.</i> , 2013)	(Nicolas <i>et al.</i> , 2018)	(Zheng <i>et al.</i> , 2024)
Category	Cleaning Products and Air Fresheners	Cleaning Products and Air Fresheners	Cleaning Products and Air Fresheners	Cleaning Products and Air Fresheners
Sub-Category	Air Fresheners	Cleaning Products	Cleaning Products	Cleaning Products
Sources	Air-freshener spray, cleaning spray	Household products	Household products	Table cleaning activity
Exp. Chamber	2.36 ± 0.05 m ³ chamber	29-liter chamber	1 m ³ chamber (x2), 51-liter and 339-liter chamber	52.5 m ³ climate chamber
Controlled Temperature and RH	No control, recorded	23 ± 1 °C, 50 ± 5 %RH	23 ± 2 °C, 50 ± 5 %RH	~20.5 °C, ~45 %RH or ~35.7 °C, ~62.5 %RH
Fresh air supply rate (ACH)	47 ± 11 ACH	2.0 ± 0.3 ACH	0.25 – 2 ACH	0.3 – 0.4 ACH
Duration of measurement	10 s – 1 h	0 – 30 min and 30 – 60 min after product application	180 min	6 h
Pollutants	PM: 5 – 1000 nm and 0.3 – 20 µm	Various VOCs, PM and secondary organic aerosols (SOAs)	Aldehydes and VOCs	Isopropyl Alcohol, Trichloroethylene, n-Hexane, p-Xylene, 1,2,3-Trimethylbenzene, o-Xylene, 2-Butanone, Toluene, Styrene, AcetaldehydeMethyl isobutyl ketone, Ethylbenzene, Benzene, Ethylene oxide, m-Xylene, 1,4-Dichlorobenzene (96 VOCs analyzed in total)
PM measurement system	DMS500 (CAMBUSTION) and a Portable Dust Monitor	Aerosol Mass Spectrometer (AMS) and Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)	-	-
VOC measurement system	-	Thermo-desorption, Gas Chromatography, Mass Spectrometry Flame Ionization Detection system (TD/GC/MS/FID)	High-performance liquid chromatography (HPLC) for aldehydes, and a thermal desorption system (TDS) combined with GC/FID for VOCs	Thermal desorption tubes, GC/MS post-analysis
Other gas measurement system	-	-	-	-
Emission Rate Data	Model #23	Model #13	Model #13	Model #13

Tableau S 9 : Occupants and Occupant Activities (1/6)

Reference	(Klepeis <i>et al.</i> , 2003)	(He <i>et al.</i> , 2004)	(Lee and Wang, 2004)	(Moser <i>et al.</i> , 2005)
Category	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities
Sub-Category	Smoking Cigarettes	Cooking, Sweeping Floor, Using Candles, Using Vacuum Cleaners	Using Incenses	Breathing
Sources	Environmental Tobacco Smoke (ETS) particles from cigars and cigarettes	Various occupant activities	Various types of incense	Exhaled breath
Exp. Chamber	20 m ³ stainless steel chamber	Residential homes	18 m ² stainless steel chamber	No chamber (sample bag for exhalation)
Controlled Temperature and RH	No control, but recorded	No control, but recorded	23 ± 0.5 °C, 50 %RH	No control
Fresh air supply rate (ACH)	0.03 – 0.1 ACH	Measured using tracer gas technique (CO ₂) but not reported	0.5 ACH	-
Duration of measurement	12 – 24 h	48 h (mostly)	0.5 – 1 h (VOC, carbonyls), 25 – 50 min (PM during burning)	-
Pollutants	PM: 12 aggregated sizes from about 0.009 to 1.154 µm. CO	PM _{2.5} (DustTrak), PM 0.007-0.808µm (CPC)	CO ₂ , CO, NO _x , CH ₄ , NMHC, PM _{2.5} , PM ₁₀ carbonyls	Aldehydes and VOCs
PM measurement system	Differential Mobility Particle Sizer (DMPS) and a LASAIR particle counter.	DustTrak (TSI 8520), CPC (TSI 3022A)	TSI Dust Trak air monitors Moduel 8520	-
VOC measurement system	-	-	TVOC - GC/MSD	Proton transfer reaction-mass spectrometry (PTR-MS)
Other gas measurement system	Langan CO Personal Measurer connected to a Langan DataBear digital logger.	-	Methane - FID, TSO Q-Trak Model 8550 for CO ₂ , Chemiluminescence for NO _x , carbonyls - silica gel - HPLC	-
Emission Rate Data	Model #24	Models #20 and 22	Models #19 and 25	Model #05

Tableau S 10 : Occupants and Occupant Activities (2/6)

Reference	(Afshari, Matson, and Ekberg, 2005)	(Wallace, 2006)	(Health Canada, 2006)	(Zai, Zhen, and Jia-song, 2006)
Category	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities
Sub-Category	Cooking, Smoking Cigarettes, Using Candles, Using Irons, Using Vacuum Cleaners	Cooking	Smoking Cigarettes	Using Candles
Sources	Cigarette side-stream smoke, pure wax candles, scented candles, vacuum cleaner, ironing a cotton sheet	Cooking events (Tea, toast, tortillas and broiled fish)	Mainstream and side stream cigarette smoke	Paraffin candles in various burning modes (steady, unsteady, smoldering)
Exp. Chamber	32 m ³ chamber	House	-	1.07 m ³ wooden chamber
Controlled Temperature and RH	No control, 22 – 28 °C	No control, recorded	-	20 – 24.7 °C, 48 – 66 %RH
Fresh air supply rate (ACH)	1.7 ± 0.1 ACH	Regularly measured using tracer gas technique (SF6) but not reported	-	Ventilation not specified; chamber airflow maintained via calibrated air pump
Duration of measurement	Until peak decayed, typically around 3-4 h	37 months	-	Varies by mode (steady burn: 10 min, unsteady: 6 min, smoldering: 10 s)
Pollutants	PM 0.02-1µm (CPC), PM 0.3-1µm (OPC)	PM: 0.01 – 0.95 µm	VOCs and particles	PM ₁₀ , ultrafine particles in specific size ranges (10 – 500 nm)
PM measurement system	CPC (TSI P-Trak 8525), OPC (TSI APC 300)	SMPS (TSI 3077)	-	DustTrak (PM ₁₀) calibrated against TEOM
VOC measurement system	-	-	-	-
Other gas measurement system	-	-	-	-
Emission Rate Data	Model #20	Models #20 and #22	Models #01 and #21	Models #20 and #22

Tableau S 11 : Occupants and Occupant Activities (3/6)

Reference	(Yeung and To, 2008)	(Evans, Peers, and Sabaliauskas, 2008)	(Kurosawa <i>et al.</i> , 2008)	(Géhin, Ramalho, and Kirchner, 2008)
Category	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities
Sub-Category	Cooking	Cooking	Televisions, Shoes	Using Candles, Using Incenses, Using Insecticidal Spray, Using Vacuum, Cleaners
Sources	Different cooking processes (Chinese style, western style and heating oil)	Frying various foods (bacon, eggs, vegetables) and vegetable oil	Televisions, shoes	Burning candles or incense, cooking (frying meat or fish, cooking pasta, meat or fish), insecticidal spray, vacuum cleaning
Exp. Chamber	168 m ³ commercial kitchen mock-up	Real Homes	1 m ³ chamber	2.36 ± 0.05 m ³ chamber
Controlled Temperature and RH	No control	No control	23 ± 1 °C, 50 ± 5 %RH	No control, recorded
Fresh air supply rate (ACH)	24 ACH	-	0.5 ACH	47 ± 11 ACH
Duration of measurement	~ 5 min	-	24 h	10 s – 1 h
Pollutants	PM: 0.016 – 0.674 µm	UFP and PM _{2.5}	Aldehydes, VOCs and SVOCs	PM: 5 – 1000 nm and 0.3 – 20 µm
PM measurement system	SMPS (TSI 3734)	TSI 8520 DUSTTRAK Aerosol Monitors TSI 8525 P-TRAK Ultrafine Particle Counters	-	DMS500 (CAMBUSTION) and a Portable Dust Monitor
VOC measurement system	-	-	Sampling + Thermal Desorption for VOCs and SVOCs + High-performance liquid chromatography (HPLC) Sampling + solvent extraction for Aldehydes + High-performance liquid chromatography (HPLC)	-
Other gas measurement system	-	-	-	-
Emission Rate Data	Model #24	Model #24	Model #10	Model #23

Tableau S 12 : Occupants and Occupant Activities (4/6)

Reference	(Pagels <i>et al.</i> , 2009)	(Riess <i>et al.</i> , 2010)	(Derbez and Solal, 2014)	(Tang <i>et al.</i> , 2016)
Category	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities
Sub-Category	Using Candles	Breathing	Painting, drawing, doing plastic arts	Body
Sources	Candles (different types and burn modes)	Exhaled breath	School supplies and cleaning products	Exhaled breath and skin
Exp. Chamber	22 m ³ stainless-steel chamber	Glass cylinder connected to a face mask for exhalation	51-liter chamber	Classroom
Controlled Temperature and RH	23 – 28 °C, 30 ± 5 %RH	42 °C	23 ± 2 °C, 50 ± 5 %RH	No control, monitored
Fresh air supply rate (ACH)	0.5 ACH	-	0.06 – 1.67 ACH	5 ± 0.5 ACH
Duration of measurement	10 – 20 min (sooting), 60 – 80 min (steady) and 45 min (smoldering)	10 – 30 min	120 min	12 h daily
Pollutants	UFP and PM _{2.5}	Formaldehydes and VOCs	Aldehydes and VOCs	Aldehydes and VOCs
PM measurement system	Electrical mobility spectrometer – SMPS (16-1000µm) + Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM) for PM _{2.5}	-	-	-
VOC measurement system	-	Proton transfer reaction-mass spectrometry (PTR-MS)	High-performance liquid chromatography (HPLC) for aldehydes, and a thermal desorption system (TDS) combined with GC/FID for VOCs	Proton transfer reaction-mass spectrometry (PTR-MS)
Other gas measurement system	-	NO and CO ₂	-	CO ₂ , O ₃
Emission Rate Data	Model #22	Model #05	Models #12 and #13	Model #05

Tableau S 13 : Occupants and Occupant Activities (5/6)

Reference	(Persily and De Jonge, 2017)	(Nicolas <i>et al.</i> , 2017)	(O'Leary <i>et al.</i> , 2019)	(Zhao <i>et al.</i> , 2021)
Category	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities
Sub-Category	Breathing	Using Candles, Using Incenses	Cooking	Cooking, Fireplace, Using Candles, Using Vacuum Cleaners
Sources	Exhaled breath	Incense products and scented candles	Complete meals	Houses
Exp. Chamber	Data from literature	1 m ³ chambers	26 m ³ chamber	-
Controlled Temperature and RH	Temperature correction possible	23 ± 2 °C, 50 ± 5 %RH	No control	No control
Fresh air supply rate (ACH)	-	0.7 ACH	3 and 12 ACH	-
Duration of measurement	-	60 min	17 – 28 min	3 – 25 d (per house)
Pollutants	CO ₂	Aldehydes and VOCs	PM _{2.5}	PM: particle number size distribution for 10 – 800 nm and total particle number concentration
PM measurement system	-	-	Optical particle counter (OPC), and gravimetric sampling	TROPOS-type mobility particle size spectrometer (MPSS)
VOC measurement system	-	High-performance liquid chromatography (HPLC) for aldehydes, and a thermal desorption system (TDS) combined with GC/MS/FID for VOCs	-	-
Other gas measurement system	-	-	-	-
Emission Rate Data	Model #08	Model #19	Model #22	Model #20

Tableau S 14 : Occupants and Occupant Activities (6/6)

Reference	(Wang <i>et al.</i> , 2022)	(Zheng <i>et al.</i> , 2024)		
Category	Occupants and Occupant Activities	Occupants and Occupant Activities		
Sub-Category	Body, Breathing	Painting, drawing, doing plastic arts		
Sources	Exhaled breath and skin	Liquid and stick gluing, acrylic and poster painting, sand and plasticine modeling		
Exp. Chamber	22.5 m ³ stainless-steel chamber	52.5 m ³ climate chamber		
Controlled Temperature and RH	Set points: 25 and 31 °C and 25 % and 65 %	~20.5 °C, ~45 %RH or ~35.7 °C, ~62.5 %RH		
Fresh air supply rate (ACH)	3.2 ± 0.11 ACH	0.3 – 0.4 ACH		
Duration of measurement	3 h or 2.5 h	6 h		
Pollutants	Aldehydes and VOCs	Isopropyl Alcohol, Trichloroethylene, n-Hexane, p-Xylene, 1,2,3-Trimethylbenzene, o-Xylene, 2-Butanone, Toluene, Styrene, AcetaldehydeMethyl isobutyl ketone, Ethylbenzene, Benzene, Ethylene oxide, m-Xylene, 1,4-Dichlorobenzene (96 VOCs analyzed in total)		
PM measurement system	-	-		
VOC measurement system	Proton transfer reaction-mass spectrometry (PTR-MS)	Thermal desorption tubes, GC/MS post-analysis		
Other gas measurement system	OH reactivity, CO ₂ , ammonia, CO, CH ₄ , water vapor, O ₃	-		
Emission Rate Data	Model #05	Model #13		

Tableau S 15 : Heating and Cooking Appliances (1/3)

Reference	(Traynor, Anthon, and Hollowell, 1982)	(Girman <i>et al.</i> , 1982)	(Cáceres <i>et al.</i> , 1983)	(Borrazzo <i>et al.</i> , 1987)
Category	Heating and Cooking Appliances	Heating and Cooking Appliances	Heating and Cooking Appliances	Heating and Cooking Appliances
Sub-Category	Cooking Appliances	Heaters	Heaters	Cooking Appliances
Sources	Gas stoves (oven and top burners)	Gas stoves, kerosene heaters, natural gas heaters, side stream cigarette smoke	Kerosene fired heaters (radiant and wick type), liquified gas heaters (radiant)	Gas-fired appliances
Exp. Chamber	27 m ³ environmental chamber	27 m ³ environmental chamber	Combustion exhaust measured directly from burner using high volume pump. Modelled concentrations in 20 m ³ room and 150 m ³ house.	No
Controlled Temperature and RH	No control, measured	No control, measured	No	No control
Fresh air supply rate (ACH)	0.24 – 0.42 ACH (infiltration), 7.0 ACH (range hood)	< 0.5 ACH (infiltration), up to 1.9 ACH (infiltration), and specific tests at 0.3 – 0.5 ACH	0.5 and 2 ACH	0.15 to 1.4 ACH
Duration of measurement	1 hour (variable)	~1 hour (variable)	-	60 – 90 min + several hours after end of emission
Pollutants	CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , SO ₂ , formaldehyde, and particulates (primarily carbon-based)	CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , SO ₂ , formaldehyde, and particulate matter from side stream smoke	CO, NO, NO ₂ , formaldehyde	CO, NO, NO ₂
PM measurement system	Electrical aerosol analyzer and tandem filtration for particulates < 0.5 µm	10-stage piezoelectric cascade impactor for measuring particulate sizes from cigarette smoke	-	-
VOC measurement system	Measurements for formaldehyde used a modified pararosaniline method	CO and other gases were measured at different chamber points using Lawrence Berkeley Laboratory's Mobile Atmospheric Research Laboratory (MARL)	Formaldehyde measured by chromotropic acid method	-
Other gas measurement system	MARL (Mobile Atmospheric Research Lab) with probes for various gases including CO, CO ₂ , SO ₂ , and NO _x	MARL (Mobile Atmospheric Research Lab) with probes for various gases including CO, CO ₂ , SO ₂ , and NO _x	NO/NO ₂ : Saltman's method. CO: directly with Ecolyzer CO meter. SO ₂ : West and Gaeke's method	Teflon tubing, Thermo-Electron 4B/E chemiluminescent NO/NO ₂ analyzer and a Bendix 8501.5CA infrared CO analyzer
Emission Rate Data	Models #02 and #22	Models #02 and #22	Model #02	Model #02

Tableau S 16 : Heating and Cooking Appliances (2/3)

Reference	(McCrillis and Burnet, 1990)	(Afshari, Matson, and Ekberg, 2005)	(Géhin, Ramalho, and Kirchner, 2008)	(Tissari <i>et al.</i> , 2008)
Category	Heating and Cooking Appliances	Heating and Cooking Appliances	Heating and Cooking Appliances	Heating and Cooking Appliances
Sub-Category	Heaters	Cooking Appliances, Heaters	Cooking Appliances, Cooking	Heaters
Sources	Conventional and catalytic wood-fired space heaters (radiant type) at different burn rates	Electric radiators, electric stove, gas stove	Electric stove, electric oven, pyrolysis cleaning of oven	Conventional masonry heaters under normal and smoldering conditions
Exp. Chamber	Laboratory	32 m ³ chamber	2.36 ± 0.05 m ³ chamber	Laboratory setup with a flue gas fan and controlled exhaust
Controlled Temperature and RH	No control	No control, 22 – 28 °C	No control, recorded	Temperature monitored, no specific RH control
Fresh air supply rate (ACH)	-	1.7 ± 0.1 ACH	47 ± 11 ACH	Not specified; airflow was controlled via a flue gas fan.
Duration of measurement	8 h	Until peak decayed, typically around 3-4 h	10 s – 1 h	75 – 85 min per combustion test
Pollutants	Naphthalene, Pyrene and Benzo(a)pyrene	PM 0.02-1µm (CPC), PM 0.3-1µm (OPC)	PM: 5 – 1000 nm and 0.3 – 20 µm	CO, CO ₂ , PM ₁ , PM ₁₀ , VOCs including methane, ethylene, benzene, and acetylene
PM measurement system	-	CPC (TSI P-Trak 8525), OPC (TSI APC 300)	DMS500 (CAMBUSTION) and a Portable Dust Monitor	Electrical Low-Pressure Impactor (ELPI) and Dekati Low Pressure Impactor (DLPI)
VOC measurement system	Liquid Chromatography	-	-	FTIR for VOCs and OGC analysis
Other gas measurement system	-	-	-	ABB Cemas gas analyzing rack for CO, CO ₂ , and O ₂
Emission Rate Data	Model #02	Model #20	Model #23	Models #02, #22 and #23

Tableau S 17 : Heating and Cooking Appliances (3/3)

Reference	(Carteret, Pauwels, and Hanoune, 2012)			
Category	Heating and Cooking Appliances			
Sub-Category	Heaters			
Sources	Kerosene space heaters (wick and injector) with different fuels			
Exp. Chamber	8 m ³ environmental chamber			
Controlled Temperature and RH	Setpoint: 28 °C			
Fresh air supply rate (ACH)	7.4 ACH			
Duration of measurement	120 min			
Pollutants	CO ₂ , CO, NO, NO ₂ , and VOCs			
PM measurement system				
VOC measurement system	Tenax TA 60/80 sampling tubes			
Other gas measurement system	Chemiluminescence analyzer (NO _x), Fluorescence analyzer (SO ₂), Infrared absorption analyzer (CO), NDIR (CO ₂)			
Emission Rate Data	Model #04			

Tableau S 18 : Electrical equipment (1/3)

Reference	(Hetes, Moore, and Northeim, 1995)	(Black, 1999)	(Brown, 1999)	(Lam and Lee, 2000)
Category	Electrical Equipment	Electrical Equipment	Electrical Equipment	Electrical Equipment
Sub-Category	Computers, Copy Machines, Printers	Computers, Copy Machines, Printers	Copy Machines	Printers
Sources	Dry and wet process photoimaging machines (copiers, printers, faxes), spirit duplicators, mimeograph machines, digital duplicators, diazo blueprint machines, computers and computer terminals, impact matrix printers, other equipment types	Laser printers, photocopiers, computers	Dry process photocopiers	Laser printers, ink-jet printers, all-in-one office machine
Exp. Chamber	Data from literature	6 m ³ chamber	33 m ³ room	2.4 m ³ room
Controlled Temperature and RH	-	23 ± 2 °C , 50 ± 5 %RH	23, 26 and 32 ± 0.5 °C/ 50 ± 5 %RH	23.0 °C ± 0.5 °C, 55 ± 5 %RH
Fresh air supply rate (ACH)	-	1.0 ACH	2.0 ± 0.05 ACH	-
Duration of measurement	-	45 min for printers/photocopiers, 4h for computers	off for 2 h and on “idle” for 2 h	Few hours
Pollutants	Ozone, particulate, TVOC, heavy and light naphthenic distillate, ammonia, CO, methanol, ethanol, trinitrofluorene, trichloroethane, aliphatic HCs	TVOC, PM ₁₀ and Ozone	Ethylbenzene, 1,4-Dimethylbenzene, Styrene, TVOC, Ozone, PM ₁₀ and Nitrogen dioxide	VOCs, TVOC, PM ₁₀
PM measurement system	-	Continuous (OPC)	Aerosol Monitor	Aerosol monitor with 100mm cellulose ester filter
VOC measurement system	-	Passive (multisorbent tubes) + GC/MS post-analysis	Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC- FID)	Canister and cryogenic preconcentrator with gas chromatograph / mass spectrometry
Other gas measurement system	-	Continuous (UV absorbance)	Ozone Analyzer and Nitrogen dioxide by UV spectrophotometer analysis of sampling	Ozone was monitored continuously by Thermo Environmental Instruments ozone analyzer
Emission Rate Data	Models #01, #02 and #22	Models #02 and #22	Models #01 and #21	Models #01 and #21

Tableau S 19 : Electrical equipment (2/3)

Reference	(Wensing, 2002)	(Nakagawa <i>et al.</i> , 2003)	(Funaki <i>et al.</i> , 2003)	(Berrios <i>et al.</i> , 2005)
Category	Electrical Equipment	Electrical Equipment	Electrical Equipment	Electrical Equipment
Sub-Category	Monitors, Printers	Computers	Computers, Telephones, Televisions, Books	Computers, Copy Machines, Printers
Sources	Computer monitors, laser printers	Personal computers with cathode-ray tube (CRT) or thin-film transistor (TFT) monitors	Portable PC, TV remote controller, low-frequency current massager, cellular phone, photo journal	Office equipment (computers, printers, copiers)
Exp. Chamber	1 m ³ emission test chamber with inner walls of electropolished stainless-steel.	1 m ³ glass chamber	20-liter chamber	Mid and full-scale stainless-steel chambers
Controlled Temperature and RH	23 °C, 50 %RH	22 °C	25 ± 1 °C, 50 ± 4 %RH	23 °C, 50 %RH
Fresh air supply rate (ACH)	0.5 ACH	1 ACH	0.5 ACH	0-1 ach
Duration of measurement	Monitors: acclimatized in standby mode overnight (16 h). Air samples taken after 6 h of operation. Laser Printers: samples taken after 30 min of continuous printing at a speed of approximately 4 pages/min	-	>20h	Computer (2 periods each of 12 h, on /off); copier and printers (3 periods, 1-2 of 12h and 3 of 4h (off/idle)
Pollutants	TVOC, Toluene, Phenol	Formaldehyde, Acetaldehyde, Propionaldehyde, n-Butyraldehyde, Valeraldehyde, Hexaldehyde Aromatic hydrocarbons, TVOC. Specific VOCs such as benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, and styrene	Aldehydes and VOCs	Benzene, toluene, m-xylene, o-xylene, ethyl benzene, n-undecane, styrene, n-butyl acetate
PM measurement system	-	-	-	-
VOC measurement system	Enrichment with Tenax TA, Thermal desorption (PE-ATD 400), Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) with a DB-5MS separation column	Sampling tubes: Sep-Pak DNPH-Silica for aldehydes and Tenax TA for VOCs. Analysis: Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) for VOCs, High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) for Aldehydes	Thermal Desorption System (TDS) combined with GC/MS, High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) for aldehydes	Sampled onto Tenax TA, thermally desorbed and analyzed by GC with FID
Other gas measurement system	Toluene: enrichment with activated carbon type NIOSH, solvent desorption (CS ₂) and GC/MS evaluation. Phenol: enrichment with silica gel type, solvent desorption (acetone) and GC/MS evaluation.	-	-	-
Emission Rate Data	Model #02	Model #02	Model #02	Model #02

Tableau S 20 : Electrical equipment (3/3)

Reference	(He, Morawska, and Taplin, 2007)	(Géhin, Ramalho, and Kirchner, 2008)		
Category	Electrical Equipment	Electrical Equipment		
Sub-Category	Printers	Printers		
Sources	Printers	Laser printer		
Exp. Chamber	1 m ³	2.36 ± 0.05 m ³ chamber		
Controlled Temperature and RH	-	No control, recorded		
Fresh air supply rate (ACH)	0.138 ACH	47 ± 11 ACH		
Duration of measurement	-	10 s – 1 h		
Pollutants	UFP (and PM _{2.5})	PM: 5 – 1000 nm and 0.3 – 20 µm		
PM measurement system	Condensation Particle Counter – CPC (0.007 to 3 µm, sample time of 20s) and a Scanning Mobility Particle Sizer – SMPS (0.015 to 0.685 µm, sample time of 180s).	DMS500 (CAMBUSTION) and a Portable Dust Monitor		
VOC measurement system	-	-		
Other gas measurement system	-	-		
Emission Rate Data	Model #20	Model #23		

Tableau S 21 : Whole room or building (1/1)

Reference	(Offermann <i>et al.</i> , 2009)	(Blondel and Plaisance, 2011)	(Chan <i>et al.</i> , 2020)	(Zhao <i>et al.</i> , 2022)
Category	Whole room or building	Whole room or building	Whole room or building	Whole room or building
Sub-Category	Homes	Bedrooms	Homes	Homes
Sources	Various detached homes	Bedroom materials: floor, walls, ceiling, desks, doors, closets, shelves, bed and chair	Houses with gas appliances (natural gas stoves, ovens, water heaters, and furnaces), cooking activities, and building materials	Building materials and furnishings in homes
Exp. Chamber	-	Dorm room (average 26m ³)	-	63 single-family homes in California
Controlled Temperature and RH	-	Measured but not controlled	-	Variable, 18 – 27 °C, 28 – 63 %RH
Fresh air supply rate (ACH)	-	Variable	Variable	0.08 - 1.14 ACH
Duration of measurement	24 h period in different seasons	6 h	1 week per home	1 week per home
Pollutants	22 VOCs, PM _{2.5} , NO ₂ , CO ₂ , CO	Formaldehyde	PM _{2.5} , VOCs, CO ₂ , CO, NO ₂ , Formaldehyde	Formaldehyde
PM measurement system	Particulate matter (PM _{2.5}) was collected using gravimetric analyses according to NIOSH 500		MetOne BT-645 for real-time measurement in indoor locations and MetOne ES-642 for outdoor monitoring	-
VOC measurement system	Thermal Desorption System (TDS) combined with GC/MS, High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) for aldehydes	Passive flux sampler and active sampling using DNPH-silica Sep-Pack cartridges	Shinyei formaldehyde monitors and passive DNPH cartridges	Real-time photoelectric photometry meters and passive samplers
Other gas measurement system	Chemiluminescence analyzer (NO _x), Infrared absorption analyzer (CO), NDIR (CO ₂)		CO ₂ Extech SD-800 sensors; CO Lascar USB-EL-300 sensors; Aeroqual NO ₂ monitors	-
Emission Rate Data	Model #03	Model #03	Model #03	Model #09

ANNEXE 2 : INFORMATIONS SUR LES CONDITIONS DE MESURE DES DONNEES COMPILEES

Autriche : Lüftung 3.0, Lodenareal

L'étude « Lüftung 3.0 » a examiné les différences de QAI dans de nouveaux logements résidentiels en Autriche, équipés ou non de ventilation mécanique double flux. Des mesures de QAI ont été réalisées à deux reprises (environ 3 mois et 12 mois après l'emménagement) dans 123 logements construits entre 2010 et 2012, situés dans différentes régions d'Autriche. Parmi eux, 62 logements étaient des habitations très énergivores équipées de systèmes de ventilation mécanique avec récupération de chaleur (VMC double flux), tandis que 61 étaient des logements « conventionnels » construits selon la norme autrichienne (OIB RL6), dépendant de l'aération par ouverture des fenêtres par les occupants. Lors des deux campagnes de mesure, les polluants de l'air intérieur (composés organiques volatils, aldéhydes, spores de moisissures, allergènes d'acariens, radon) ont été mesurés dans les salons et les chambres, et les paramètres climatologiques (CO₂ comme indicateur de ventilation, température, humidité) ont été enregistrés sur une semaine dans les chambres. En outre, les débits d'air et les niveaux sonores ont été mesurés dans les bâtiments équipés de systèmes de ventilation. Les mesures ont été effectuées uniquement en automne, en hiver et au printemps.

Dans l'étude « Lodenareal », la consommation d'énergie et les données environnementales intérieures ont été collectées lors d'un suivi à long terme d'un projet de logements sociaux construits et certifiés selon la norme Passive House (PH) à Innsbruck, en Autriche. La température intérieure, la concentration en CO₂ et l'humidité relative (%) ont été enregistrées en continu dans 18 des 354 appartements sur une période de trois ans (2010-2012). Les concentrations en composés organiques volatils ont également été mesurées avant l'emménagement des locataires. Pour une comparaison directe avec un bâtiment basse consommation sans ventilation mécanique, les mesures ont été étendues à six des 18 appartements d'un immeuble résidentiel construit aux mêmes années (2008-2009) par le même bailleur social dans la ville voisine de Kufstein. Ces logements dépendaient de l'aération par ouverture des fenêtres par les occupants.

Dans le cadre du projet « Sinfonia », financé par l'UE, des mesures de rénovation visant à réduire la demande énergétique dans les villes d'Innsbruck (Autriche) et de Bolzano (Italie) ont été étudiées. Dans le cadre des activités de suivi des performances, des paramètres de qualité de l'environnement intérieur (CO₂, température, humidité relative) ont été mesurés dans 185 logements, avec ou sans rénovation incluant une ventilation mécanique, sur une période d'au moins un an chacun. Pour minimiser les perturbations, les mesures de CO₂ ont été effectuées dans le conduit d'extraction (représentant la concentration moyenne du logement pour les habitations ventilées mécaniquement) et dans le couloir central pour les logements aérés par les fenêtres.

Belgique : Renson

Le système central de ventilation mécanique par extraction (MEV) mesure le niveau local de QAI dans les pièces en analysant le CO₂, HR ou les COV, selon le type de pièce. En fonction du niveau de contamination, le débit d'extraction local souhaité est ajusté. La version standard de ce système couvre les pièces humides, tandis que la version étendue inclut également les pièces sèches. Parmi tous les systèmes MEV installés de ce type, ceux connectés à Internet envoient leurs données vers le Cloud. À ce jour, plus de 8 500 systèmes

transmettent régulièrement des données. Les données étudiées sur la QAI et les débits d'air s'étendent du 1er mai 2022 au 30 juin 2023, avec un intervalle d'échantillonnage de 5 minutes. Ce système MEV est généralement installé dans des logements neufs ou en cours de rénovation majeure en Belgique. Selon la réglementation belge EPB (Exigences de Performance Énergétique), ces bâtiments doivent obtenir un label énergétique A. Aucune information n'est disponible pour indiquer si les bâtiments sont situés en zone rurale ou urbaine.

Suisse : Büren

Les appartements comparés dans cette étude font partie d'un immeuble construit en 2017 à Büren, en Suisse. Il y a deux appartements au premier étage et deux appartements au deuxième étage. À chaque niveau, l'un des appartements a une surface de 80 m² et l'autre de 113 m². Les appartements situés à l'étage supérieur ne disposent que de fenêtres pour ventiler les pièces. Les deux appartements du rez-de-chaussée sont chacun équipés d'un système de ventilation mécanique double flux Zehnder avec échangeur enthalpique. L'étude, menée sur une année entière, compare le type de ventilation utilisé (uniquement par fenêtres ou ventilation mécanique double flux), la qualité de l'air intérieur qui en découle et la consommation énergétique nécessaire pour chauffer et climatiser les appartements. Comme indicateur de la qualité de l'air intérieur, les valeurs de CO₂ ont été mesurées en parties par million (ppm).

Danemark : IECH

L'étude « Indoor Environment and Children's Health » (IECH) s'est concentrée sur l'impact de l'environnement intérieur sur l'asthme et les allergies chez les enfants à Odense, au Danemark. Un sous-groupe de 500 enfants âgés de 3 à 5 ans a été sélectionné pour la deuxième phase de l'étude, qui était une investigation cas-base incluant 200 enfants symptomatiques (cas) et 300 enfants choisis aléatoirement (témoins). Les logements étaient situés dans un rayon de 20 kilomètres autour du centre d'Odense, la troisième plus grande ville du Danemark. Les types de logements comprenaient des appartements (11,4 %), des maisons individuelles (69,2 %) et des maisons mitoyennes (18,3 %). 58,8 % des logements étaient équipés de ventilation naturelle, tandis que les autres disposaient de ventilation mécanique, principalement par extraction. Seuls 4 logements étaient dotés d'un système de ventilation mécanique double flux (alimentation et extraction). La température, l'humidité relative et la concentration en CO₂ ont été mesurées en continu pendant au moins 2 jours et 2 nuits dans les chambres des enfants. Les familles ont été invitées à maintenir leurs habitudes habituelles concernant l'ouverture des portes et des fenêtres. Les mesures ont été réalisées entre le 10 mars et le 18 mai 2008.

France : ALLO

Le projet ALLO (2018-2021) a souhaité innover dans la manière d'aborder l'information et sa diffusion auprès des résidents d'un bâtiment social récemment rénové. Les dix logements volontaires étaient représentatifs des locataires de l'immeuble sélectionné et équilibrés en termes de répartition homme/femme, avec une présence plus ou moins continue tout au long de la journée. Certains occupants présentaient des prérequis liés à des aspects hygiéniques ou sanitaires en raison de leur activité professionnelle. Quatre paramètres ont été mesurés dans le salon : température, humidité relative, CO₂, particules fines (PM₁, PM_{2,5} et PM₁₀). Les valeurs de ces variables ont été collectées et traitées toutes les 5 minutes afin d'informer les occupants, via des indicateurs simplifiés, sur la qualité de leur

environnement intérieur. Cela leur permettait d'agir en cas d'alerte de mauvaise qualité de l'air. Les données disponibles couvrent la période de décembre 2020 à avril 2022 pour tous les paramètres, à l'exception des PM, dont l'instrumentation a été déployée plus tardivement (de septembre 2021 à avril 2022) dans six appartements.

Grande-Bretagne : AMR, norme BSD 3.14 (VentStdStudy)

L'étude AMR avait pour objectif d'examiner l'impact de la ventilation des bâtiments sur le type et la nature des micro-organismes présents dans les logements. Cela a impliqué un suivi environnemental dans 21 foyers sur une période de 6 à 9 mois (d'octobre 2018 à juin 2019). La température, HR et le CO₂ ont été enregistrés toutes les 10 minutes dans le salon, la chambre principale et la cuisine de chaque logement (à l'aide de capteurs Gemini Tiny Tags). Pour fournir un contexte supplémentaire sur la ventilation, des capteurs Foobot (bas coût) ont été installés afin d'indiquer les niveaux de qualité de l'air, d'enregistrer la présence de COV et de PM_{2.5}, et pour tester l'efficacité de ces capteurs en vue d'études à grande échelle. Ces capteurs étaient placés à côté des capteurs Tinytag (lorsque cela était possible) à des fins de comparaison. Un capteur Tinytag externe mesurant la température et l'humidité relative a été installé dans chaque ensemble résidentiel pour enregistrer les niveaux ambiants toutes les 10 minutes (en parallèle avec le suivi intérieur).

L'objectif global de l'étude BSD Standard 3.14 était d'évaluer l'impact des modifications apportées aux normes de construction écossaises en 2015 — qui imposent l'installation de détecteurs de dioxyde de carbone dans tous les nouveaux logements — sur la ventilation et la qualité de l'air intérieur. La température, HR et les niveaux de CO₂ ont été surveillés toutes les 15 minutes dans le salon et la chambre de 16 logements (de décembre 2021 à août 2022), à l'aide de capteurs environnementaux HomeLINK Ei1025. Une enquête sur le bâtiment et un audit de ventilation ont été réalisés, incluant la mesure des débits d'air des systèmes mécaniques (à l'aide d'un SwemaFlow 126). Neuf logements ont été sélectionnés pour un suivi détaillé sur une période de deux semaines (mars-avril 2022), incluant la mesure de la température, HR, le CO₂, la pression, les COVT, les PM₁, PM_{2.5} et PM₁₀ toutes les 5 minutes dans l'espace de vie principal (à l'aide de capteurs LoRaWAN sans fil de Duomo Ltd.). Un journal des occupants a été utilisé pour recueillir des informations sur les niveaux d'occupation et les comportements pendant la période de mesure.

Irlande : VALIDate, ALIVE, ARDEN

The VALIDate project (2019–2021) a mené une étude longitudinale pour surveiller la qualité de l'environnement intérieur (QEI) dans des logements irlandais énergivores, comblant ainsi les lacunes en matière de données à long terme sur les polluants atmosphériques. Contrairement aux études de surveillance à court terme, cette recherche s'est concentrée sur la performance de la ventilation de toute la maison, en collectant en continu des données sur la QEI pendant 18 mois durant les saisons de chauffage et de refroidissement. Les logements participants avaient une consommation d'énergie primaire conçue inférieure à 75 kWh/m²·an et comprenaient 87 foyers, répartis de manière égale entre zones urbaines et rurales : 60 ventilés mécaniquement, 23 ventilés naturellement et 4 avec ventilation contrôlée à la demande. Des capteurs grand public ont enregistré la température, l'humidité, le CO₂, les COV (toutes les cinq minutes) et le radon (toutes les heures) dans les salons, chambres, cuisines et salles de bain. La surveillance continue a permis d'étudier la dispersion des polluants, la variabilité de la ventilation et l'exposition à la pollution

atmosphérique, tout en minimisant les incertitudes liées au comportement des occupants et aux changements à court terme.

The ALIVE project a évalué la performance de la ventilation naturelle pour maintenir une qualité acceptable de l'environnement intérieur dans des logements irlandais énergivores. L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments nécessite souvent une meilleure isolation thermique, ce qui augmente le risque de surchauffe. La ventilation naturelle offre l'avantage de réduire la consommation d'énergie de refroidissement pendant les saisons plus chaudes. Dans ce contexte, la ventilation naturelle fait référence à une ventilation passive assurée par des ventilateurs de fond dans les pièces habitables et des ventilateurs mécaniques intermittents dans les pièces humides. Les $PM_{2.5}$, CO_2 , COVT, NO_2 , CO, la température et l'humidité relative ont été surveillés dans les chambres, salons et cuisines de neuf logements mitoyens pendant l'été et l'hiver, de 2021 à 2023. Ces logements avaient une consommation d'énergie primaire maximale de 75 kWh/m^2 par an et une perméabilité à l'air allant jusqu'à $7,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Des logements en zones rurales et urbaines ont été sélectionnés, avec une comparaison appariée au sein de chaque lotissement. Des journaux d'activités temporelles et des enquêtes sur le confort thermique ont permis de recueillir des informations détaillées sur le confort des occupants pendant la période de mesure.

Tous les logements ayant participé au projet de recherche ARDEN étaient des participants au programme pilote Deep Energy de l'Autorité irlandaise pour l'énergie durable. Vingt-six logements ont été recrutés et des mesures de jusqu'à dix polluants de l'air intérieur (CO , CO_2 , $PM_{2.5}$, NO_2 , radon, formaldéhyde et BTEX) et de paramètres thermiques (température intérieure et humidité relative) ont été effectuées avant et après (dans 12 logements uniquement) ou uniquement après (dans 15 logements) la rénovation énergétique, dans le salon principal et la chambre. L'objectif était de collecter 48 heures de données (température, HR, CO , CO_2 , $PM_{2.5}$) pendant les enquêtes, mais pour diverses raisons, des temps d'échantillonnage plus courts ont parfois été obtenus. Une description des méthodologies utilisées pour collecter les données sur les polluants et les paramètres thermiques est présentée dans Coggins et al. (2022) et Hassan et al. (2024). Les logements étaient situés en zones urbaines et rurales à travers l'Irlande. Les enquêtes ont été menées entre 2019 et 2020 et à travers différentes saisons. Tous les logements étaient de type construction à double paroi. Avant la rénovation, tous les logements étaient ventilés naturellement, âgés de 14 à 60 ans, avec des surfaces au sol comprises entre $87,3$ et 300 m^2 . Avant la rénovation, les logements avaient des valeurs d'intensité énergétique comprises entre $218,54$ et $547,29 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{an})$, et des niveaux d'étanchéité à l'air des bâtiments $> 3,68 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ à 50 Pa .

La rénovation énergétique approfondie a impliqué le remplacement des systèmes de chauffage à combustibles fossiles par une pompe à chaleur air-eau, ainsi que des améliorations de l'isolation nécessaires pour atteindre une enveloppe performante, réduire les ponts thermiques et augmenter l'étanchéité à l'air du bâtiment ($\leq 5 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ à 50 Pa). Des détails spécifiques sur les mesures de rénovation sont publiés dans Coggins et al. (2022) et Hassan et al. (2024). Après la rénovation, tous les logements étaient ventilés mécaniquement, incluant une ventilation contrôlée à la demande (DCV, contrôlée par l'humidité) ou une ventilation mécanique avec récupération de chaleur (VMC double flux). Après la rénovation, les logements avaient des valeurs d'intensité énergétique comprises entre $-3,06$ et $74,38 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{an})$.

Norvège : HomeOffice-COVID

Cette étude a surveillé la qualité de l'air intérieur dans 21 logements en mesurant le formaldéhyde, les COVT, le CO₂, les PM₁, les PM_{2.5}, l'humidité relative et la température pendant l'hiver (8 décembre 2020 – 28 février 2021) et l'été (21 mai 2021 – 21 juin 2021) dans des pièces utilisées comme bureaux à domicile. Lorsque ces pièces n'étaient pas utilisées comme bureaux, elles servaient de cuisines, chambres et/ou salons. L'étude portait sur des logements construits entre 1900 et 2019, incluant des maisons mitoyennes, des maisons individuelles et des appartements. Les participants, recrutés dans un milieu académique et tenus de télétravailler au moins quatre jours par semaine, ont été invités à maintenir leurs comportements habituels, y compris leurs pratiques d'ouverture des fenêtres. La collecte de données a été réalisée à l'aide d'un système de capteurs bas coût placé dans la zone de respiration, près du clavier de l'ordinateur, avec un enregistrement des données toutes les 5 minutes. Cette étude, intégrée à une thèse de doctorat au Centre de recherche sur les quartiers à zéro émission, a également impliqué la collecte d'informations sur les activités et habitudes de travail des participants. Au moins trois maisons ont été mesurées simultanément dans la même zone urbaine pour contrôler les biais liés à la qualité de l'air extérieur.

Pays-Bas : Kroeven (NL ML)

Ten terraced houses ont été suivies en détail sur une période de deux ans (janvier 2013 - décembre 2014) dans le cadre d'un grand projet de rénovation dans le quartier Kroeven de Roosendaal, et dans le contexte du projet européen 7e PC E2ReBuild (Loomans et Boxem, 2015). Ces maisons individuelles ont été rénovées selon le standard Passive House, en mettant l'accent sur une isolation thermique externe extensive, l'ajout d'un capteur solaire et d'un ballon de stockage d'eau chaude, ainsi que sur un système de ventilation mécanique avec récupération de chaleur. L'objectif principal était d'évaluer si les exigences énergétiques du concept Passive House étaient atteintes tout en garantissant des conditions climatiques intérieures acceptables. En plus du suivi détaillé des flux énergétiques de chaque maison, l'environnement intérieur (température, HR, concentration de CO₂) a été surveillé dans trois pièces (salon et deux chambres). Des informations plus détaillées sur les débits d'air étaient également disponibles. Selon la campagne de mesure, les objectifs énergétiques du concept Passive House ont été atteints pour la plupart des maisons. Un effet clair du comportement des utilisateurs est visible. Il en va de même pour les paramètres climatiques intérieurs surveillés, avec un risque potentiel de surchauffe. L'occupation et le comportement des occupants sont des paramètres importants pour les résultats obtenus. Loomans, M.G.L.C. et Boxem, G. 2015. Rapportage Monitoring Kroeven 2013-2014. Rapport BWK2015-1580648. p.88. Department of the Built Environment, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Pays-Bas (en néerlandais : Rapport Monitoring Kroeven 2013-2014).

Espagne : ClimaReady, CISC

L'objectif principal du projet CLIMAREADY (2020-2023) était d'évaluer l'adaptabilité des bâtiments résidentiels au changement climatique, en identifiant les principaux paramètres clés pour minimiser le risque de surchauffe dans les environnements intérieurs lors de conditions plus chaudes et d'épisodes de canicule. Dans le cadre des tâches du projet, 23 logements ont été surveillés dans deux localités espagnoles distinctes : i) Pampelune, située en zone climatique Cfb et 4A, où tous les logements étaient conditionnés naturellement en été ; ii) Séville, située en zone climatique Csa et 3A, où les logements étaient équipés de climatisation, mais utilisés selon les préférences particulières des occupants. Bien que l'objectif principal de l'étude fût d'analyser la surchauffe intérieure, le CO₂ et les PM_{2.5} ont également été surveillés pendant 15 mois, couvrant deux étés (2021, 2022), le premier avec

des conditions typiques et le second avec le plus grand nombre de jours de canicule jamais enregistré (2022). Les logements ont été sélectionnés pour couvrir différents codes énergétiques espagnols et étaient situés aux étages intermédiaires et supérieurs. Le suivi comprenait la température de l'air, l'HR et la concentration de CO₂ dans le salon et une chambre de chaque logement. Les logements étaient principalement ventilés naturellement, à l'exception de trois d'entre eux à Pampelune, équipés de VMC double flux.

Les données collectées dans le cadre du CISC font partie de la campagne menée par l'[IETcc](#) du [CSIC](#), avec le soutien du [ministère du Logement](#), afin d'améliorer les connaissances sur la QAI dans les logements existants dotés de systèmes de ventilation naturelle. Un total de 12 logements bien entretenus a été surveillés, avec des mesures prises à différentes périodes de l'année, sur des durées moyennes de 16 jours. Le suivi a été réalisé entre le 6 décembre 2017 et le 9 mars 2020. Les niveaux de CO₂, d'HR et de température ont été mesurés à l'intérieur de différents salons. Tous les logements disposaient de systèmes de ventilation naturelle, et des conduits de ventilation naturelle verticaux (shunts) ont été observés dans 83 % des cas. Les logements présentaient une variété de typologies de construction courantes en Espagne, notamment des structures en béton armé et des façades en brique avec murs creux. Les logements étaient situés à Madrid, une ville au climat continental, qui illustre les conditions climatiques d'une grande partie de l'Espagne. Pour plus d'informations, consulter [Garcia-Ortega & Linares-Alemparte \(2023\)](#) et [Garcia-Ortega \(2024\)](#).

États-Unis : HENGH, LIA

L'étude HENGH évalue l'impact des exigences de ventilation mécanique du Title 24 de la Californie sur la QAI dans 70 logements construits entre 2011 et 2017, en se concentrant sur l'efficacité énergétique et l'exposition aux polluants. La ventilation mécanique, obligatoire pour répondre aux problèmes de QAI liés à une meilleure étanchéité à l'air, a été évaluée par le biais de la surveillance des polluants, du suivi des activités et de tests de performance des systèmes. La plupart des logements répondaient ou dépassaient les exigences de ventilation, avec des niveaux médians de formaldéhyde inférieurs de 38 % à ceux rapportés dans une étude de 2007–2008, et des concentrations de polluants largement inférieures aux directives sanitaires. Cependant, des défis opérationnels ont été relevés : les ventilateurs de ventilation ne fonctionnaient que dans 25 % des logements lors de la première inspection, et l'étiquetage des commandes était insuffisant. Les résultats soulignent la nécessité d'améliorer l'étiquetage et les mécanismes de contrôle pour garantir une utilisation cohérente des systèmes de ventilation et le respect des normes.

L'étude LIA met en lumière l'insuffisance des systèmes de ventilation de cuisine pour répondre aux normes du Code du bâtiment résidentiel de la Californie en matière de contrôle des polluants intérieurs, en particulier dans les appartements à faible revenu. Elle a inclus des études sur le terrain dans 23 appartements, une analyse de l'utilisation de la ventilation dans 71 logements, des tests de performance sur des fours à micro-ondes avec hottes intégrées, ainsi que des simulations d'exposition aux polluants. Les résultats ont révélé des défaillances opérationnelles fréquentes dans les systèmes de ventilation mécanique, entraînant des niveaux élevés de NO₂ pendant la cuisson au gaz. L'utilisation des hottes de cuisinière était faible, en particulier dans les appartements, et dépendait de la fréquence de cuisson et de la génération de polluants. Les fours à micro-ondes avec hottes ont montré des performances comparables à celles des hottes de prix similaire. Les conclusions insistent sur la nécessité de mettre à jour les normes de performance pour assurer une ventilation efficace, notamment lors d'activités de cuisson importantes dans les logements de petite taille et à faible revenu.

Divers pays : Passivhaus (SF1, SC1, MX1)

Cette étude explore l'adéquation des maisons Passivhaus pour offrir et maintenir des niveaux élevés de qualité de l'air intérieur (QAI) dans trois environnements contrastés : Mexico (climat chaud et humide), San Francisco (climat tempéré) et Dunfermline (climat froid). L'un des défis dans ce domaine est la faisabilité de la collecte de suffisamment de données sur la QAI dans les logements. Les PM_{2.5}, les COVT, le CO₂, la température et l'humidité relative ont été mesurés dans des logements Passivhaus et non-Passivhaus (témoins) à des intervalles de cinq minutes. Les données ont été collectées simultanément dans le salon, la cuisine et la chambre pendant douze mois à Mexico, neuf mois à San Francisco et six mois à Dunfermline. Les données des logements Passivhaus et témoins ont été comparées aux niveaux ambiants, ce qui a permis d'évaluer le niveau de protection des logements contre les sources de pollution extérieures et intérieures. L'analyse des facteurs environnementaux suggère que les logements Passivhaus offrent un degré de protection plus élevé contre la pollution atmosphérique par rapport aux logements témoins. Cependant, le niveau relatif de protection dépend de la pollution extérieure et des comportements des occupants. Aucune différence significative n'a été observée entre la prévalence de la surchauffe dans les logements Passivhaus et les logements témoins. Toutefois, des températures plus élevées pouvant entraîner un risque accru de surchauffe et des environnements plus secs pourraient être perçus comme des conséquences involontaires de cette approche. Bien que les résultats de cette étude ne puissent pas être généralisés, ils fournissent néanmoins des preuves nécessaires sur la performance de la QAI des logements Passivhaus, améliorent nos connaissances sur la QAI dans ces logements et favorisent leur développement futur dans différents lieux.

ANNEXE 3 : CHAMPS STANDARDISES DES INFORMATIONS CONCERNANT LES ETUDES ANALYSEES

Tableau A3 1 : Meta information fields with predefined entries for standardized IAQ measurement analysis

Ventilation type
Window airing (not designed)
Natural ventilation (designed)
Hybrid/mixed mode ventilation
Mechanical ventilation
Method of vent. rate determination
Active tracer gas measurement (in context of study)
Pressure-drop compensated Flow-hood measurement (in context of study)
Flow-hood / anemometer measurement (in context of study)
Measurement not in context of study (e.g. from ventilation system commissioning)
Design values (from ventilation system design)
Calculated (e.g. from CO ₂ , passive tracer gas)
Other (comment reqd)
Airtightness normalization value
Building volume specific [1/h]
Envelope area specific / [m ³ /hm ²]
Floor area specific / [m ³ /hm ²]
Type of building
Single family house (SFH)
Terraced house (TH)
Multi-family house (MFH)
Apartment block (AB)
Undefined/Not known
Type of room / measurement location
Ambient
Bedroom
Living room
Bathroom / Toilet
Kitchen
Living area undefined
Central corridor

Home office
Exhaust air (vent. Sys.)
Outdoor air (vent. Sys.)
Extract air (vent. Sys.)
Supply air (vent. Sys.)
Other
Type of occupancy (in room)
adult
child
elderly
mixed
unknown
Fresh air supply (in room)
Through occupant operated window only
Through automatic operated window
Through permanent opening to the exterior (grille, ...)
Through mechanically driven supply air (no recirculated air)
Through mechanically driven overflow (or recirculated air) from adjacent zones
Other

Tableau A3 2 : Variables / Pollutants and defined lower and upper bound, as well as allowed units, that can be processed within the developed analysis procedure. For the variables identified in the second column, additional information is obligatory when filling out the meta-information

Measured Variable	Additional info. req'd	Lower bound	Upper bound	Default (allowed) units
CO ₂	No	350	10000	ppm (%)
CO	No	0	1.0E+02	ug/m3 (mg/m3, ppm, ppb)
HCHO	No	0	1.0E+03	ug/m3, mg/m3, ppm, ppb
UFP	No	0	1.0E+09	#/cm3
PM1	No	0	1.0E+04	ug/m3, mg/m3
PM25	No	0	1.0E+04	ug/m3, mg/m3
PM10	No	0	1.0E+04	ug/m3, mg/m3
PMOther	Yes	n.a.	n.a.	n.a.
NO2	No	0	1.0E+04	ug/m3, mg/m3
NOx	No	0	1.0E+04	ug/m3, mg/m3
TVOC	Yes	0	1.0E+04	ug/m3, mg/m3
VOC	Yes	0	1.0E+04	ug/m3, mg/m3
O3	No	0	1.0E+02	ug/m3, mg/m3, ppm, ppb
RH	No	5	105	%, -

Radon	No	0	1.0E+04	Bq/m3, pCi/L
Fungi	No	0	1.0E+09	CFU/m3
Ions	No	0	1.0E+09	1/cm3
Other	Yes	n.a.	n.a.	n.a.
T	No	-50	50	C, K, F
Pressure	No	500	1100	hPa, Pa, mbar, mmHg
SolRad	Yes	0	1500	W/m2
Flow	No	0	500	l/s, m3/h, cfm

ANNEXE 40 : SYNTHÈSE DES RESULTATS DE LA META-ANALYSE

Tableau A4. 1 Summary of meta-analysis results for temperature

Temperature [°C]	Overall ¹	Hybrid/mixed mode ventilation ¹	Mechanical ventilation ¹	Natural ventilation (designed) ¹	Window airing (not designed) ¹
Bedroom (23-07)	21.6 (2.4), N=1,095	22.1 (2.0), N=80	21.9 (2.5), N=448	21.5 (2.3), N=132	21.3 (2.3), N=435
Living room (07-23)	22.2 (2.3), N=328	22.2 (1.5), N=20	22.3 (2.3), N=228	22.1 (2.3), N=49	21.9 (2.2), N=31
Kitchen (07-23)	22.0 (1.7), N=127	21.3 (1.4), N=9	22.0 (1.7), N=73	22.3 (1.8), N=42	21.7 (1.4), N=3
Undef. living area / home-office	23.0 (3.5), N=16	22.3 (2.8), N=4	21.7 (1.8), N=5	24.3 (4.5), N=7	NA (NA), N=0
central corridor / extract (0-24)	22.7 (2.0), N=188	NA (NA), N=0	22.7 (2.2), N=152	24.2 (NA), N=1	22.7 (1.1), N=35

¹Mean (SD), N=N Non-missing

Tableau A4. 2 Summary of meta-analysis results for relative humidity

Relative Humidity [%]	Overall ¹	Hybrid/mixed mode ventilation ¹	Mechanical ventilation ¹	Natural ventilation (designed) ¹	Window airing (not designed) ¹
Bedroom (23-07)	46 (8), N=1,092	43 (8), N=80	47 (8), N=445	46 (9), N=132	45 (7), N=435
Living room (07-23)	46 (8), N=326	47 (9), N=20	46 (7), N=226	47 (9), N=49	49 (9), N=31
Kitchen (07-23)	49 (7), N=127	55 (7), N=9	48 (6), N=73	49 (7), N=42	52 (8), N=3
Undef. living area / home-office (07-23)	37 (10), N=16	30 (1), N=4	38 (15), N=5	39 (10), N=7	NA (NA), N=0
central corridor / extract (0-24)	46 (52), N=188	NA (NA), N=0	46 (58), N=152	49 (NA), N=1	45 (5), N=35

¹Mean (SD), N=N Non-missing

Tableau A4. 3 Summary of meta-analysis results for Carbon dioxide (CO₂)

CO ₂ [ppm]	Overall ¹	Hybrid/mixed mode ventilation ¹	Mechanical ventilation ¹	Natural ventilation (designed) ¹	Window airing (not designed) ¹
Bedroom (23-07)	966 (422, 552, 751, 1,263, 1,815, 3,640), N=1,101	1,034 (458, 631, 843, 1,246, 1,934, 3,301), N=79	784 (422, 495, 630, 985, 1,384, 2,501), N=454	1,194 (533, 585, 879, 1,431, 1,883, 3,472), N=131	1,116 (509, 661, 896, 1,404, 1,991, 3,640), N=437
Living room (07-23)	654 (341, 484, 572, 749, 943, 1,538), N=341	678 (449, 449, 566, 753, 837, 837), N=19	640 (341, 484, 570, 732, 871, 1,335), N=241	712 (460, 523, 624, 768, 1,065, 1,538), N=49	643 (453, 491, 553, 892, 1,171, 1,472), N=32
Kitchen (07-23)	653 (429, 524, 585, 737, 902, 1,411), N=121	692 (553, 553, 597, 721, 729, 729), N=7	628 (505, 519, 575, 729, 972, 1,411), N=71	689 (429, 547, 635, 757, 849, 1,260), N=41	597 (589, 589, 589, 606, 606, 606), N=2
Undef. living area / home-office (07-23)	698 (572, 572, 624, 887, 2,518, 2,518), N=16	698 (616, 616, 626, 856, 951, 951), N=4	642 (572, 572, 598, 671, 1,169, 1,169), N=5	737 (616, 616, 632, 950, 2,518, 2,518), N=7	NA (Inf, NA, NA, NA, NA, -Inf), N=0
central corridor / extract	630 (466, 502, 569, 734, 963, 1,248), N=186	NA (Inf, NA, NA, NA, NA, -Inf), N=0	625 (466, 506, 571, 716, 920, 1,144), N=150	611 (611, 611, 611, 611, 611, 611), N=1	696 (484, 491, 542, 910, 1,206, 1,248), N=35

¹Median (Min, 5% Centile, Q1, Q3, 95% Centile, Max), N=N Non-missing

Tableau A4. 4 Summary of meta-analysis results for particulate matter (PM_{2.5})

PM _{2.5} [µg/m ³]	Overall ¹	Hybrid/mixed mode ventilation ¹	Mechanical ventilation ¹	Natural ventilation (designed) ¹	Window airing (not designed) ¹
Bedroom (23-07)	12 (0, 2, 6, 25, 124, 288), N=96	13 (9, 9, 9, 17, 17, 17), N=2	12 (0, 2, 3, 27, 128, 288), N=62	9 (2, 2, 7, 17, 68, 92), N=20	15 (11, 11, 12, 26, 33, 33), N=12
Living room (07-23)	9 (0, 1, 4, 20, 77, 312), N=195	9 (2, 2, 3, 14, 153, 153), N=12	7 (0, 1, 4, 18, 76, 312), N=144	16 (0, 6, 9, 24, 72, 189), N=21	10 (5, 5, 8, 16, 65, 65), N=18
Kitchen (07-23)	18 (3, 7, 14, 31, 301, 376), N=37	17 (16, 16, 16, 18, 18, 18), N=2	25 (10, 10, 15, 75, 376, 376), N=16	17 (3, 3, 10, 21, 210, 210), N=18	16 (16, 16, 16, 16, 16, 16), N=1
Undef. living area / home-office (07-23)	3 (2, 2, 2, 13, 24, 24), N=11	3 (2, 2, 2, 8, 14, 14), N=4	2 (2, 2, 2, 3, 3, 3), N=2	6 (3, 3, 3, 13, 24, 24), N=5	NA (Inf, NA, NA, NA, NA, -Inf), N=0

¹Median (Min, 5% Centile, Q1, Q3, 95% Centile, Max), N=N Non-missing

Tableau A4. 5 Summary of meta-analysis results for Formaldehyde (HCHO)

Formaldehyde [µg/m³]	Overall ¹	Hybrid/mixed mode ventilation ¹	Mechanical ventilation ¹	Natural ventilation (designed) ¹
Bedroom (23-07)	26 (5, 10, 19, 34, 54, 62), N=75	NA (Inf, NA, NA, NA, NA, -Inf), N=0	26 (5, 10, 19, 33, 53, 62), N=72	54 (28, 28, 28, 54, 54, 54), N=3
Living room (07-23)	21 (5, 7, 14, 28, 63, 84), N=95	63 (63, 63, 63, 63, 63, 63), N=1	20 (5, 7, 14, 27, 41, 70), N=91	76 (73, 73, 73, 84, 84, 84), N=3
Undef. living area / home-office (07-23)	73 (35, 35, 49, 102, 229, 229), N=11	60 (35, 35, 47, 86, 111, 111), N=4	47 (45, 45, 45, 49, 49, 49), N=2	98 (73, 73, 84, 102, 229, 229), N=5

¹Median (Min, 5% Centile, Q1, Q3, 95% Centile, Max), N=N Non-missing

Tableau A4. 6 Summary of meta-analysis results for total volatile organic compounds (TVOC)

TVOC (incl. low cost sensor) [µg/m³]	Overall ¹	Hybrid/mixed mode ventilation ¹	Mechanical ventilation ¹	Natural ventilation (designed) ¹	Window airing (not designed) ¹
Bedroom (23-07)	351 (4, 70, 225, 577, 906, 1,396), N=155	457 (249, 249, 308, 722, 906, 906), N=9	329 (4, 63, 219, 481, 828, 1,396), N=96	498 (160, 199, 323, 727, 1,002, 1,266), N=38	107 (33, 33, 86, 301, 512, 512), N=12
Living room (07-23)	180 (20, 105, 145, 243, 405, 2,808), N=158	210 (114, 114, 142, 250, 2,808, 2,808), N=10	172 (20, 97, 143, 239, 403, 499), N=96	203 (108, 131, 177, 289, 516, 570), N=39	149 (81, 81, 125, 182, 316, 316), N=13
Kitchen (07-23)	177 (107, 123, 154, 230, 326, 3,409), N=121	157 (118, 118, 143, 230, 3,409, 3,409), N=9	173 (107, 122, 150, 229, 312, 513), N=73	192 (114, 123, 165, 225, 352, 1,040), N=36	154 (139, 139, 139, 295, 295, 295), N=3
Undef. living area / home-office (07-23)	422 (157, 157, 274, 600, 1,472, 1,472), N=11	307 (157, 157, 182, 524, 639, 639), N=4	334 (274, 274, 274, 395, 395, 395), N=2	520 (422, 422, 513, 600, 1,472, 1,472), N=5	NA (Inf, NA, NA, NA, NA, -Inf), N=0

¹Median (Min, 5% Centile, Q1, Q3, 95% Centile, Max), N=N Non-missing

Tableau A4. 7 Summary of meta-analysis results for Radon (Radon)

Radon [Bq/m ³]	Overall ¹	Hybrid/mixed mode ventilation ¹	Mechanical ventilation ¹	Natural ventilation (designed) ¹	Window airing (not designed) ¹
Bedroom (23-07)	24 (7, 9, 14, 57, 179, 383), N=84	47 (21, 21, 23, 193, 383, 383), N=7	22 (7, 8, 11, 40, 129, 215), N=57	45 (10, 10, 21, 88, 199, 199), N=18	19 (18, 18, 18, 20, 20, 20), N=2
Living room (07-23)	34 (9, 10, 18, 76, 212, 731), N=84	58 (27, 27, 30, 352, 731, 731), N=7	26 (9, 10, 16, 48, 212, 333), N=57	57 (14, 14, 32, 101, 202, 202), N=18	20 (14, 14, 14, 26, 26, 26), N=2
Kitchen (07-23)	43 (9, 13, 22, 81, 208, 409), N=84	81 (31, 31, 43, 396, 409, 409), N=7	30 (9, 11, 18, 71, 208, 335), N=57	47 (19, 19, 38, 116, 154, 154), N=18	21 (13, 13, 13, 29, 29, 29), N=2

¹Median (Min, 5% Centile, Q1, Q3, 95% Centile, Max), N=N Non-missing

Tableau A4. 8 Summary of 1-pt measurements in study "Lueftung3.0" for Formaldehyde (HCHO)

Formaldehyde [µg/m ³]	Overall ¹	Mechanical ventilation ¹	Window airing (not designed) ¹
BED	23 (0, 9, 16, 36, 53, 74), N=123	20 (1, 8, 15, 27, 41, 49), N=62	31 (0, 12, 18, 46, 65, 74), N=61
LIV	28 (5, 13, 19, 38, 55, 65), N=123	25 (5, 12, 19, 33, 49, 65), N=62	32 (7, 13, 20, 40, 56, 64), N=61

¹Median (Min, 5% Centile, Q1, Q3, 95% Centile, Max), N=N Non-missing

Tableau A4. 9 Summary of 1-pt measurements in study "Lueftung3.0" for TVOC

TVOC [µg/m ³]	Overall ¹	Mechanical ventilation ¹	Window airing (not designed) ¹
BED	155 (10, 30, 73, 354, 1,549, 4,016), N=123	101 (10, 29, 63, 189, 462, 495), N=62	240 (22, 40, 139, 533, 2,857, 4,016), N=61
LIV	170 (15, 45, 96, 340, 1,179, 3,487), N=123	152 (20, 45, 84, 296, 507, 1,179), N=62	231 (15, 50, 130, 426, 2,453, 3,487), N=61

¹Median (Min, 5% Centile, Q1, Q3, 95% Centile, Max), N=N Non-missing

Tableau A4. 10 Summary of 1-pt measurements in study "Lueftung3.0" for Radon

Radon [Bq/m ³]	Overall ¹	Mechanical ventilation ¹	Window airing (not designed) ¹
BED	23 (0, 6, 16, 35, 73, 282), N=120	16 (3, 6, 11, 24, 41, 68), N=61	30 (0, 9, 22, 48, 122, 282), N=59
LIV	24 (4, 9, 16, 42, 85, 201), N=118	20 (6, 8, 14, 37, 67, 85), N=59	29 (4, 14, 22, 44, 121, 201), N=59

¹Median (Min, 5% Centile, Q1, Q3, 95% Centile, Max), N=N Non-missing

Tableau A4. 11 Summary of emission rate estimates based on measurements in “Lueftung3.0”

	Ventilation type			p-value ²
	Overall N = 123 ¹	Window N = 61 ¹	Mechanical N = 62 ¹	
3 months after move-in				
Formaldehyde [µg/(m² h)]	29.3 (17.9, 42.7)	19.8 (15.0, 38.2)	34.5 (24.2, 44.6)	<0.001
TVOC [µg/(m² h)]	388 (186, 983)	355 (183, 894)	432 (189, 1,037)	0.68
15 months after move-in				
Formaldehyde [µg/(m² h)]	24.1 (13.8, 36.7)	16.4 (10.9, 32.7)	29.0 (19.8, 38.6)	<0.001
TVOC [µg/(m² h)]	154 (70, 280)	153 (62, 289)	154 (88, 250)	0.79

¹Median (Q1, Q3)

²Wilcoxon rank sum test

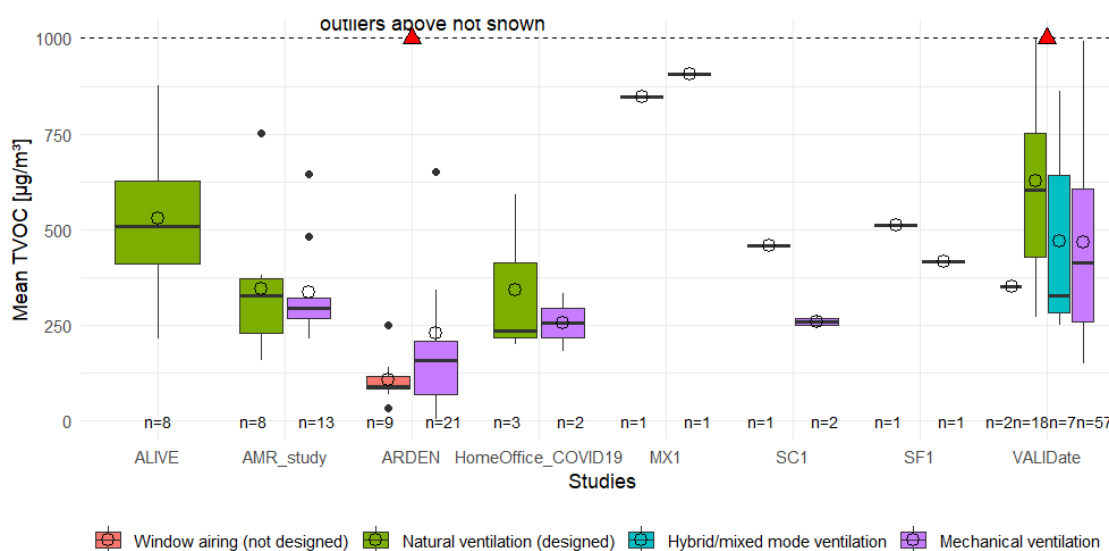


Figure A4. 1 Boxplots of mean total volatile organic compound (TVOC) concentration in bedrooms obtained from low-cost sensors (Oct – May, 23-07) for different ventilation types and studies. (n: nr of distinct rooms).