

Livrable

LOT 1 : Développement d'une méthode d'évaluation de la performance des stratégies intelligentes de gestion de la Qualité de l'Air Intérieur

Le 13/01/2026

Auteur(s) : Eol Geffre (LaSIE), Raïssa Andrade (Cerema) 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
14/11/2025	v1	Rédaction par Eol Geffre – version 1
24/11/2025	v2	Développement littérature et intégration partie lot 3
25/11/2025	v3	Ecriture conclusion par rapport aux résultats du lot 3
27/11/2025	v4	Intégration références bibliographiques additionnelles
13/01/2026	v5	Intégration « application de la méthode à des données mesurées » en cours
20/01/2026	v6	Intégration « application de la méthode à des données mesurées »

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 :

Le présent livrable introduit dans une première partie la problématique d'évaluation de la qualité de l'air intérieur (QAI) avec en particulier un recensement des indicateurs utilisés pour juger du niveau de QAI et/ou pour comparer la performance des systèmes de ventilation. Les indicateurs de performance retenus dans notre approche performancielle pour les stratégies intelligentes de gestion de la QAI sont alors précisément définis et incluent la prise en compte des polluants (PM_{2.5}, formaldéhyde et CO₂), de l'humidité relative de l'air et de la consommation énergétique des systèmes de ventilation. Enfin, la méthodologie numérique et les premières conclusions quant aux choix des indicateurs qui découlent des résultats du Lot 3 sont présentées dans une dernière partie.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
1 INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR LA VENTILATION ET LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR	4
1.1 Indicateurs de performance de la qualité de l'air intérieur	4
1.2 Indicateurs liés à l'humidité	9
1.3 Indicateurs énergétiques et économiques	10
1.4 Indicateurs de performance retenus	11
1.4.1 DALYs	12
1.4.2 Concentration d'exposition cumulée au-delà de 1000 ppm normalisée	13
1.4.3 95 ^e centile de la concentration d'exposition P95 _{CO2}	13
1.4.4 Temps passé en dehors de la plage RH = [25-60%]	13
1.4.5 Indicateurs QAI basés sur les polluants (PM _{2.5} et formaldéhyde)	14
1.4.6 Renouvellement moyen de l'air	14
1.4.7 Besoins énergétiques dus à la ventilation	14
1.4.8 Consommation électrique des ventilateurs	15
2 DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE D'EVALUATION DES PERFORMANCES	16
2.1 Méthodologie numérique	16
2.2 Applicabilité de la méthodologie in situ	17
2.2.1 Systèmes de mesures à l'échelle du bâtiment	17
2.2.2 Mesures des polluants	18
2.2.3 Etude de cas	22
3 CONCLUSION	27
4 REFERENCES	29

INTRODUCTION

Le projet SmartAIR s'inscrit dans un contexte où la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments résidentiels représente un enjeu croisé de santé publique et de transition énergétique. Les occupants passant la majorité de leur temps en intérieur, leur exposition à des polluants comme le CO₂, les particules fines PM_{2,5}, le formaldéhyde ou une humidité mal maîtrisée pose des risques significatifs pour leur santé, tout en interrogeant la capacité des systèmes de ventilation actuels à y répondre de manière efficace et durable.

Les recherches menées au niveau international, notamment dans le cadre des programmes internationaux IEA-EBC Annex 68 et 86, ainsi que les travaux français du GS 14.5 « Equipements / Ventilation et systèmes par vecteur air » de la CCFAT (Commission Chargée de Formuler les Avis Techniques) et le GT ESSOC « Aération / Ventilation Résultats minimaux » avec en particulier le GT2 sur les « Aspects techniques simulation Outils, données d'entrée et critères », ont révélé des lacunes persistantes dans l'évaluation des stratégies de ventilation. Les indicateurs disponibles, souvent centrés sur des critères énergétiques ou réglementaires, ne permettent pas d'appréhender de manière globale l'impact des systèmes sur la santé, le confort ou la durabilité des bâtiments. De plus, le manque de données fiables et normalisées sur les émissions de polluants, qu'elles proviennent des matériaux, des activités humaines ou de l'environnement extérieur, complique la conception de solutions adaptées. Enfin, l'émergence de systèmes de ventilation intelligente, capables de moduler les flux d'air en fonction des besoins réels, soulève des questions sur leur performance à long terme et leur adaptabilité aux différents contextes climatiques et comportementaux.

SmartAIR propose une démarche innovante pour répondre à ces défis en développant une méthodologie d'évaluation intégrée. Cette approche s'appuie sur une analyse fine des polluants prioritaires et des indicateurs sanitaires, tels que les DALY, afin de caractériser les expositions et leurs impacts. Elle vise également à évaluer l'efficacité des stratégies de ventilation intelligente, en simulant leur comportement dans des conditions variées et en quantifiant leurs bénéfices en matière de réduction des polluants, d'économies d'énergie et d'amélioration du confort.

En combinant modélisation avancée et retours d'expérience, le projet cherche à identifier les conditions optimales pour une mise en œuvre robuste et durable de ces systèmes. Les premiers résultats ouvrent des perspectives pour concilier qualité de l'air et sobriété énergétique, tout en répondant aux attentes des occupants et des professionnels du secteur. À travers cette approche, SmartAIR contribue à poser les bases d'une gestion plus performante et plus saine de l'air intérieur dans les logements, en phase avec les enjeux de la transition écologique et des politiques publiques de santé.

Ce premier livrable du projet relatif au Lot 1 pose les fondations de la méthodologie SmartAIR en détaillant les indicateurs de performance retenus pour évaluer les stratégies de ventilation intelligente. Parmi ceux-ci, une attention particulière est portée aux indicateurs sanitaires (DALYs), aux niveaux d'exposition aux polluants (CO₂, PM_{2,5}, formaldéhyde), ainsi qu'aux critères de confort thermique et hygrométrique et d'efficacité énergétique. Ces indicateurs ont été sélectionnés pour leur pertinence vis-à-vis des enjeux de santé publique et de transition énergétique, mais aussi pour leur capacité à refléter les interactions complexes entre qualité de l'air, occupation des logements et consommation d'énergie. Leur choix s'appuie sur une revue critique des travaux antérieurs, notamment ceux menés dans le cadre de l'IEA-EBC Annex 86, ainsi que sur les recommandations du GT ESSOC, afin de combler les lacunes identifiées dans les approches existantes. Le document présente ensuite le modèle

d'évaluation développé, basé sur une approche de simulation dynamique utilisant le logiciel CONTAM. Ce modèle permet de reproduire le comportement des systèmes de ventilation dans des conditions réalistes, en intégrant des scénarios variés d'occupation, d'émissions de polluants et de conditions climatiques. Deux géométries de bâtiments représentatives, une maison individuelle et un appartement en immeuble collectif, servent de cas d'étude pour tester la robustesse des indicateurs et des stratégies proposées. Une analyse de sensibilité est également mise en œuvre pour évaluer l'influence des paramètres d'entrée sur les résultats, garantissant ainsi la fiabilité des conclusions tirées.

1 INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR LA VENTILATION ET LA QUALITE DE L’AIR INTERIEUR

L'évaluation de la performance des systèmes de ventilation dans les bâtiments s'appuie sur une série d'indicateurs permettant de garantir à la fois une qualité de l'air intérieur optimale, le confort des occupants, une efficacité énergétique maîtrisée et une durabilité des installations. Contrairement aux approches prescriptives traditionnelles, qui se limitent souvent à des règles fixes comme un taux de renouvellement d'air, les méthodes actuelles privilégient une démarche basée sur la performance. Celle-ci intègre une analyse multidimensionnelle, combinant des critères sanitaires, thermiques, énergétiques et économiques pour répondre aux enjeux contemporains de santé publique et de transition écologique. Ces indicateurs sont résumés en Figure 1.

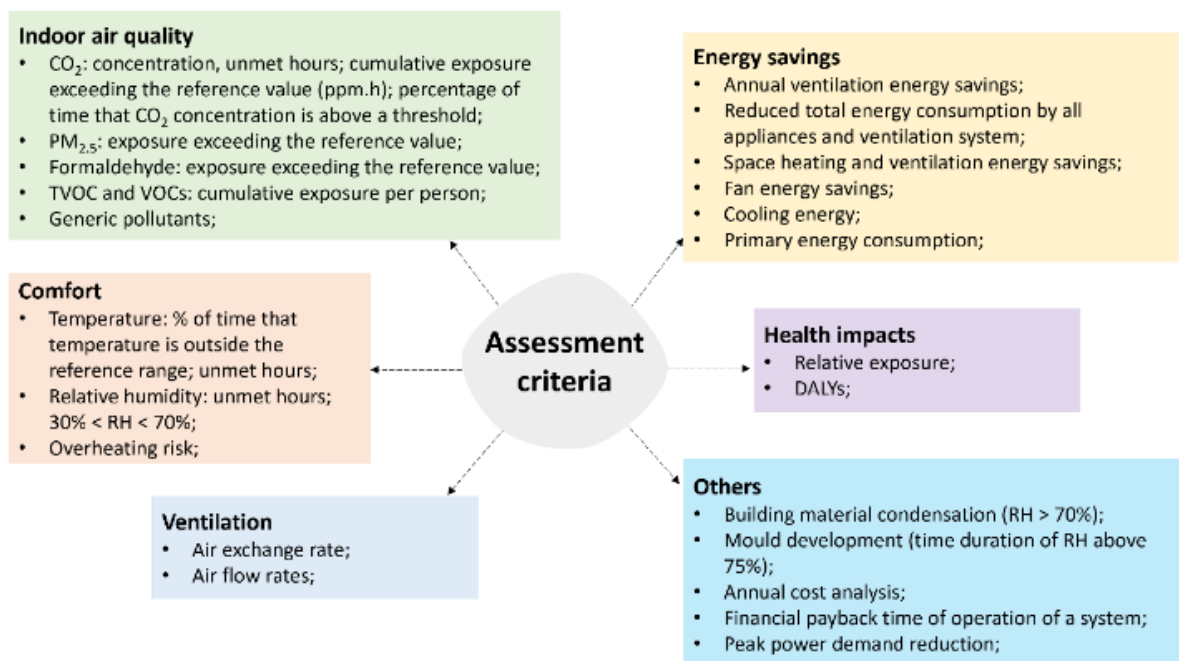


Figure 1 : Résumé des indicateurs de performances (IN74)

1.1 Indicateurs de performance de la qualité de l’air intérieur

Le dioxyde de carbone (CO₂) est l'indicateur le plus couramment utilisé pour évaluer la qualité de l'air intérieur et l'efficacité des systèmes de ventilation dans les bâtiments. Son adoption généralisée s'explique par son lien direct avec la présence et l'activité des occupants, mais aussi par la disponibilité de capteurs abordables, fiables et faciles à installer, contrairement à d'autres polluants comme les particules fines (PM_{2.5}) ou le formaldéhyde (HCHO), dont la mesure fiable exige des équipements plus onéreux et techniques. Même si dans le cas des particules fines, des capteurs bas-coûts commence à être de plus en plus utilisés (Alfano et al., 2020; Suriano et Prato, 2023; Shabbir et al., 2025). Le CO₂ permet d'évaluer le renouvellement d'air en suivant deux métriques principales : l'exposition cumulative (en ppm.h), qui reflète l'impact prolongé de concentrations élevées, et le pourcentage de temps où les niveaux dépassent 1000 ppm, seuil au-delà duquel le confort et

la santé des occupants peuvent être affectés. Le seuil de 1000 ppm, appliqué depuis longtemps, reste la référence (Von Pettenkofer, 1858) et fait aujourd'hui consensus au sein de la communauté internationale d'experts (Annexe 86). En France, le seuil de 2000 ppm est employé dans les avis techniques (Groupe Spécialisé n° 14.5, 2024) pour calculer l'exposition cumulative devant être limité à 14000 ppm.h. Le GT Critères du Club Ventilation (2018) préconise la comparaison de l'exposition cumulative sur l'ensemble des valeurs (supérieures à 400 par rapport à la concentration extérieure) par rapport à un système de référence (relevant du DTU68.3 ou faisant l'objet d'un avis technique). Le système à valider doit avoir une courbe constamment sous celle du système de référence (Figure 2). Le GT ESSOC (GT ESSOC, non encore publié), quant à lui, préconise deux indicateurs sur le CO₂ basés sur les percentiles 67 et 95 qui doivent rester respectivement inférieurs à 2000 et 2800 ppm (valeurs limites calculées statistiquement par rapport aux systèmes de référence).

Critère CO₂

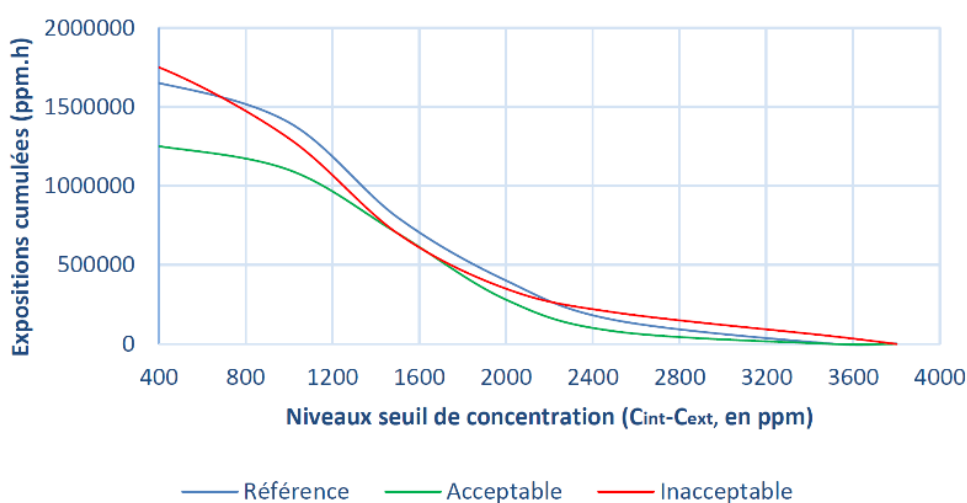


Figure 2 : Vérification de l'adéquation d'un système de ventilation vis-à-vis du confinement (CO₂)

Les particules fines (PM_{2.5}) représentent un enjeu majeur pour la qualité de l'air intérieur, en raison de leurs effets documentés sur la santé, notamment sur les systèmes respiratoire et cardiovasculaire (Feng et al., 2016; Lu et al., 2015; Sharma et al., 2020). L'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a estimé que le coût socio-économique des polluants de l'air intérieur, calculé sur la base de la mortalité précoce seule, s'élevait à 19,5 milliards d'euros par an, dont 14,5 milliards d'euros étaient directement imputables aux particules en suspension (Kopp et al., 2014). Contrairement au CO₂, leur surveillance reste moins systématique dans les approches courantes, bien qu'elles soient reconnues comme un indicateur critique pour évaluer l'efficacité des systèmes de ventilation face aux polluants issus d'activités domestiques (cuisson, chauffage, tabagisme) ou de l'infiltration de l'air pollué extérieur. Les recommandations de l'Annexe 86 de l'EBC insistent sur la nécessité de mesurer l'exposition cumulative aux PM_{2.5}, mesurée en microgrammes par mètre cube-heure (µg/m³.h), exprimée en dépassement des valeurs de référence, afin d'évaluer les risques sanitaires liés à une exposition prolongée. Un indicateur émergent est le potentiel oxydant, qui permet d'évaluer la toxicité réelle des aérosols sur l'organisme humain. En effet, un aérosol salin et un aérosol contenant du plomb n'ont pas la même dangerosité pour une même concentration donnée, ce qui fait de cet indicateur un outil pertinent pour affiner l'analyse des risques sanitaires. Cependant, sa complexité, liée à

la diversité des composés et de leurs interactions, le rend difficile à mesurer et à modéliser en conditions réelles. Malgré ces défis, son intégration dans les approches d'évaluation de la qualité de l'air intérieur pourrait offrir une vision plus précise des impacts sur la santé, au-delà des simples concentrations massiques (Tassel et al., 2025; Vida, 2024; Weber et al., 2018).

Le formaldéhyde (HCHO) figure parmi les polluants intérieurs les plus problématiques en raison de sa large diffusion dans les espaces résidentiels et de ses effets nocifs sur la santé, allant de l'irritation des voies respiratoires à des risques cancérogènes à long terme (Soni et al., 2018; Krzyzanowski et al., 1990; Quackenboss et al., 1989). Ce composé organique volatil (COV) est principalement émis par les matériaux de construction (comme les panneaux de bois aggloméré, les colles ou les peintures), les meubles, ainsi que par des activités courantes telles que le tabagisme ou l'utilisation de produits ménagers.

Le dioxyde de soufre (SO₂) est le principal précurseur des particules fines dans l'air ambiant (Arndt et al., 1997). La combustion du charbon, du pétrole et du gaz contenant du soufre constitue les principales sources de concentration de SO₂ en intérieur. En général, les concentrations de SO₂ à l'extérieur sont de 20 % à 70 % plus élevées qu'à l'intérieur (Ielpo et al., 2019; Spengler et al., 1979; Sun et al., 2025). Une exposition à court terme au SO₂ peut provoquer des maladies respiratoires, des inflammations des voies aériennes ainsi que divers symptômes toxiques (Shehu et al., 2019; Siwarom et al., 2017). Les personnes asthmatiques, les enfants et les personnes âgées sont particulièrement vulnérables à ce polluant (Arndt et al., 1997).

Si le dioxyde de carbone, les particules fines et le formaldéhyde sont les polluants les plus fréquemment mesurés pour évaluer la qualité de l'air intérieur, ils ne reflètent qu'une partie des contaminants présents dans les habitats. En effet, de nombreuses autres substances, telles que les composés organiques volatils, les allergènes, les moisissures ou les résidus de pesticides, peuvent également influencer la santé des occupants. Pourtant, leur intégration systématique dans les protocoles d'évaluation reste difficile, en raison de la complexité liée à la diversité de leurs sources, à la variabilité de leurs concentrations et au manque de méthodes standardisées pour les quantifier. Certains polluants, comme le radon, bien qu'identifiés comme dangereux, notamment pour leur potentiel cancérogène, sont souvent omis des indicateurs généraux. Leur présence dépend en effet étroitement de caractéristiques géologiques locales ou de spécificités constructives, ce qui rend leur surveillance inadaptée à une approche généralisée (Ajrouche et al., 2018; Appleton, 2007). Ainsi, les recommandations (Tableau 1) et méthodes actuelles se concentrent sur un nombre limité de marqueurs, choisis pour leur pertinence et leur faisabilité, tout en admettant que cette sélection ne couvre pas l'ensemble des risques.

Pour les paramètres autres que l'humidité et le CO₂, l'impact sur la santé dépend directement de la dose de polluant reçue, suivant une relation dose-réponse bien établie. (Agathokleous, 2022; Alahmad et al., 2023; Fuller et al., 2022; Khreis et al., 2022; Vallero, 2008). Les effets sanitaires se manifestent selon deux modalités :

- Effets chroniques : résultant d'expositions répétées, même à faibles concentrations, avec des valeurs limites à long terme à respecter (indicateur normalisé d'exposition cumulée à long-terme) ;

- Effets aigus : provoqué par des expositions brèves, avec des valeurs limites à court terme à ne pas dépasser (Indicateur d'exposition à court-terme = maximum de la concentration cumulée sur une heure).

Tableau 1 : Lignes directrices et normes communes en matière de qualité de l'air.

Polluant	OMS/EU ¹	ASHRAE ²	NAAQS/EPA ³	GB ⁴	ANSES ⁵
PM _{2.5}	Journalier : 15 µg/m ³ Annuelle : 5 µg/m ³	12 µg/m ³	Annuelle : 9 µg/m ³ Journalier : 35 µg/m ³	Journalier : 50 µg/m ³	—
PM ₁₀	Journalier : 45 µg/m ³ Annuelle : 15 µg/m ³	—	Journalier : 150 µg/m ³	1 heure : 100 µg/m ³	—
O ₃	8 heures : 100 µg/m ³ Saison haute : 60 µg/m ³	70 ppb	8 heures : 0.07 ppm	1 heure : 160 µg/m ³	—
NO ₂	Journalier : 25 µg/m ³ Annuelle : 10 µg/m ³	—	1 heure : 100 ppb Annuelle : 53 ppb	1 heure : 0.24 mg/m ³	1 heure : 200 µg/m ³ Annuelle : 20 µg/m ³
SO ₂	Journalier : 40 µg/m ³	—	1 heure : 75 ppb Annuelle : 10 ppb	1 heure : 0.5 mg/m ³	—
CO	Journalier : 4 mg/m ³	9 ppm	1 heure : 35 ppm 8 heures : 9 ppm	1 heure : 10 mg/m ³	1 heure : 30 mg/m ³ 8 heures : 10 mg/m ³
CO ₂	—	—	—	1 heure : 1000 ppm	—
HCHO	—	8 heures : 33 µg/m ³	—	1 heure : 0.1 mg/m ³	Journalier : 100 µg/m ³
TVOC	0.05 ppm 0.25 mg/m ³	—	—	8 heures : 600 µg/m ³	—

¹ Organisation mondiale de la santé (World Health Organization, 2021), appliqué en Europe.

² American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (62.1–2022)

³ National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Normes nationales de qualité de l'air ambiant établies par l'EPA (Agence américaine de protection de l'environnement)

⁴ Norme nationale de la république populaire de Chine (GB/T 18883–2022)

⁵ Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (VGA)

Trois indices de qualité de l'air intérieur ont été proposés par Cony Renaud Salis et al. (2017) pour évaluer les risques sanitaires. Le premier, l'indice IAQ-STEL (Short-Term Exposure Limit), concerne les expositions à court terme et se base sur les valeurs limites d'exposition (VLE) pour des durées brèves (1 heure, 8 heures, etc.). Il permet d'évaluer la fréquence de dépassement des concentrations de polluants sur une période donnée (1 semaine, 1 an, etc.). Pour les expositions à long terme, deux indices complémentaires sont introduits : l'indice IAQ-LTEL (Long-Term Exposure Limit), qui exprime le ratio entre la concentration du polluant et la VLE pour une exposition prolongée, et l'indice IAQ-DALY, calculé à partir des années de vie ajustées sur l'incapacité (DALY). Ces outils visent à couvrir l'ensemble des risques, qu'ils soient immédiats ou chroniques.

L'agglomération de sous-indicateurs spécifiques à chaque polluant en un indicateur unique multi-polluants pose des défis scientifiques et méthodologiques majeurs. Les polluants atmosphériques, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), les particules fines (PM_{2.5}), le formaldéhyde ou encore l'humidité, se distinguent par leurs mécanismes d'action, leurs seuils d'exposition critiques et leurs unités de mesure (ppm, µg/m³, %, etc.). Leurs effets sur la santé, qu'ils soient chroniques ou aigus, ne sont pas directement comparables, ce qui complique leur intégration dans une métrique synthétique. Une telle agrégation nécessite l'application de coefficients de pondération, dont le choix reste subjectif en l'absence de consensus scientifique sur leur détermination. Un choix de sécurité peut être de considérer les valeurs maximales (ou minimales selon la définition des sous-indicateurs par polluants) comme la valeur de l'indicateur global mais, là encore, cela peut entraîner une perte de granularité dans l'évaluation, en masquant des variations significatives entre les niveaux de performance associés à chaque polluant.

Par ailleurs, certains polluants peuvent présenter des profils d'exposition ou des dynamiques de dispersion spécifiques, rendant leur représentation par un indicateur global peu représentative de la réalité. Par exemple, un environnement peut afficher une concentration acceptable en CO₂ tout en dépassant les seuils recommandés pour les PM_{2.5} ou le formaldéhyde. Dans ce contexte, un indicateur unique risque de lisser ces disparités et de fournir une évaluation biaisée de la qualité de l'air. Ainsi, bien que séduisante par sa simplicité, cette approche peut s'avérer insuffisante pour une caractérisation fine des risques sanitaires liés à l'exposition multi-polluants. Dans ce contexte, une évaluation distincte des indicateurs par polluant s'avère plus rigoureuse pour caractériser précisément la qualité de l'air et orienter des mesures de gestion ciblées.

En définitive, seul l'indicateur DALY permet cumuler les effets sur la santé d'une exposition à plusieurs polluants. L'indicateur DALY (Disability-Adjusted Life Years), ou année de vie ajustée sur l'incapacité, est une métrique clé utilisée en santé publique pour quantifier le fardeau global des maladies et des risques environnementaux, incluant ceux liés à la qualité de l'air intérieur. Un DALY représente la somme des années de vie perdues prématurément à cause d'une mortalité précoce et des années vécues avec une incapacité due à une maladie ou une exposition à des polluants. Appliqué à l'évaluation de la qualité de l'air, cet indicateur permet d'estimer l'impact sanitaire cumulé des polluants intérieurs en intégrant à la fois les effets mortels et non mortels sur les populations exposées.

En convertissant les risques sanitaires en une unité commune, les DALY offrent une vision globale et comparative des enjeux, facilitant ainsi la priorisation des actions de prévention et d'amélioration des systèmes de ventilation. Par exemple, les études utilisant cet indicateur ont pu mettre en évidence que l'exposition chronique à des polluants intérieurs contribue de manière significative à la charge mondiale de morbidité, justifiant des interventions ciblées pour réduire ces risques (Logue et al., 2012; Morantes et al., 2023a, 2024). Son utilisation dans les évaluations de performance permet non seulement de guider les politiques publiques, mais aussi d'orienter la conception des bâtiments vers des solutions plus protectrices pour la santé des occupants.

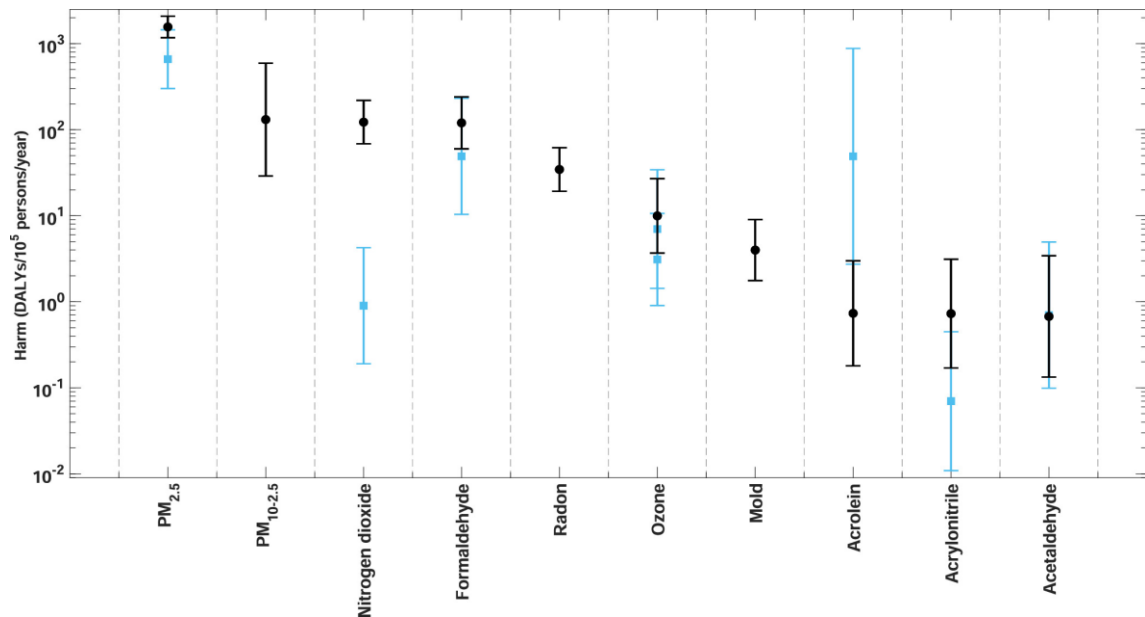


Figure 3 : Mise à jour des DALY (Disability-Adjusted Life Years) attribuables à l'exposition à l'air intérieur des résidences, d'après Morantes et al. (2024). Les valeurs en noir représentent les résultats actualisés, tandis que celles en bleu correspondent aux estimations initiales de Logue et al (2012). L'échelle logarithmique met en évidence une augmentation marquée des DALY pour les PM_{2.5}, qui dépassent significativement les autres polluants. Le formaldéhyde et le NO₂ présentent des niveaux comparables dans cette mise à jour, contrastant avec les données précédentes.

L'ASHRAE 62.2 propose d'évaluer les DALYs à partir d'un taux de contamination normalisé (Contaminant Rate, CR), qui prend en compte les polluants intérieurs les plus impactant (PM_{2.5}, NO₂ et HCHO). Le détail des calculs des coefficients de pondération ne sont pas décrits mais ils sont basés sur les indices « Harm Index » traduisant les DALYs induits par l'exposition à ces polluants (Morantes et al., 2024). Selon les recommandations de l'ASHRAE, aucune installation dont le CR dépasse une moyenne annuelle de 100 ne doit être utilisée. Ce taux est défini par l'équation suivante :

$$CR = W_{PM_{2.5}} C_{PM_{2.5}} + W_{NO_2} C_{NO_2} + W_{HCHO} C_{HCHO} \quad (\text{Équation 1})$$

où $C_{PM_{2.5}}$, C_{NO_2} et C_{HCHO} sont les concentrations en PM_{2.5}, en dioxyde d'azote et en formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) et $W_{PM_{2.5}}$, W_{NO_2} et W_{HCHO} sont les pondérations pour les PM_{2.5} ($=10,3 \text{ m}^3/\mu\text{g}$), le dioxyde d'azote ($=1,0 \text{ m}^3/\mu\text{g}$) et le formaldéhyde ($=0,7 \text{ m}^3/\mu\text{g}$).

1.2 Indicateurs liés à l'humidité

L'humidité relative est un paramètre fondamental pour évaluer la qualité de l'air intérieur et le confort des occupants, car elle influence directement la santé, la durabilité des bâtiments et l'efficacité des systèmes de ventilation. Un taux d'humidité mal maîtrisé, qu'il soit trop élevé ou trop bas, peut engendrer des problèmes majeurs : un excès d'humidité (généralement au-delà de 70 %) favorise le développement de moisissures, de bactéries et d'acariens, augmentant les risques d'allergies, de troubles respiratoires et de dégradation des matériaux (condensation, corrosion). À l'inverse, un air trop sec (en dessous de 30 %) peut irriter les voies respiratoires, altérer le confort et endommager les éléments en bois ou les revêtements intérieurs.

Les approches performanciennes, comme celles recommandées dans les normes européennes ou les travaux sur la ventilation intelligente (Tableau 2), intègrent souvent deux indicateurs clés pour surveiller ce paramètre : le pourcentage de temps où l'humidité dépasse 70 %, reflétant un risque de condensation et de prolifération microbienne, et le pourcentage de temps où elle sort de la plage idéale de 30 à 70 %, associée à un confort et une salubrité optimale. Ces métriques permettent d'ajuster les stratégies de ventilation, par exemple en modulant les débits d'air en fonction des conditions intérieures ou en combinant renouvellement d'air et humidification ou déshumidification si nécessaire. Contrairement à d'autres polluants, l'humidité est un facteur dynamique, fortement lié aux activités des occupants (cuisson, douches, séchage du linge) et aux conditions climatiques extérieures, ce qui nécessite une gestion active et adaptative pour maintenir un équilibre sain dans les espaces habités. Son contrôle est d'autant plus crucial dans les bâtiments étanches ou basse consommation, où les échanges naturels avec l'extérieur sont limités.

Tableau 2 : Indicateurs d'humidité dans la littérature (Poirier et al., 2021).

Indicateurs de performance	Seuil	Références
Humidité absolue	<12 g/kg	EN 16798-1 [11]
Nombre d'heures avec HR < 30%	<800 h	IEA ECBCS Annex 27
Période de 4 semaines avec teneur en vapeur d'eau < 7 g/kg pendant la saison de chauffage	<0	
HR - Plage habituelle	Min [20–40%] Max [60–80%]	(Koffi, 2009)
HR - Plage acceptable	[30; 70%]	TR 14788
Nombre d'heures avec HR en dessous ou au-dessus de la plage	Non précisé	EN 15665
Ratio temporel où la valeur de HR dépasse la plage pendant une période sélectionnée	Non précisé	
Diagramme de boîte à moustaches de HR	[40; 50%]	Inspiré par EN 15251 (Woloszyn et al., 2009)
Nombre d'heures avec HR > 75% pendant la période de chauffage	WC et pièce principale <100 h Cuisine <600 h Salle de bain <1000 h	Réglementation française GS14.5
Temps par mois durant lequel les ponts thermiques critiques sont exposés à HR > 80% (du 1er décembre au 1er mars)	Pas de seuil absolu	Ancienne réglementation belge (ATG, 2012)
Nombre d'heures avec HR > 45% (dans les pays nordiques)	Non précisé	(Nielsen, 1992)

1.3 Indicateurs énergétiques et économiques

L'évaluation de la performance des systèmes de ventilation ne se limite pas à la qualité de l'air intérieur, mais intègre également des indicateurs énergétiques essentiels pour garantir une approche durable et économiquement viable. Parmi ces indicateurs, la consommation annuelle d'énergie liée à la ventilation, incluant l'électricité des ventilateurs et les pertes thermiques associées au renouvellement d'air, permet de mesurer l'efficacité globale du système. Les économies réalisées sur le chauffage ou la climatisation, grâce à une gestion optimisée des flux d'air, sont également prises en compte, tout comme la réduction de la demande de puissance de pointe, qui contribue à alléger la charge sur les réseaux électriques.

D'autres critères, tels que les économies d'énergie primaires ou la consommation spécifique des auxiliaires (ventilateurs, récupérateurs de chaleur), complètent cette évaluation en offrant une vision plus fine des performances énergétiques. Les approches actuelles, comme celles développées dans le cadre des bâtiments basse consommation, cherchent à concilier ces impératifs énergétiques avec les exigences de qualité de l'air, en privilégiant des solutions comme la ventilation double flux avec récupération de chaleur ou les systèmes à débit variable. Ces technologies permettent de minimiser les pertes tout en assurant un renouvellement d'air suffisant, démontrant que performance environnementale et efficacité énergétique peuvent être complémentaires. L'intégration de ces indicateurs dans les protocoles d'évaluation permet ainsi de concevoir des systèmes équilibrés, répondant à la fois aux besoins sanitaires des occupants et aux enjeux de transition écologique.

Dans le cadre des bâtiments tertiaires, Rackes et al. (2018) identifient un indicateur économique lié aux conséquences de l'exposition des employés à un système de ventilation défaillant, qu'il s'agisse de la présence de polluants, d'un renouvellement d'air insuffisant ou de conditions inadéquates de température et d'humidité. Ces facteurs peuvent entraîner une baisse de productivité ou un accroissement de l'absentéisme, notamment en raison de maladies contractées sur le lieu de travail. Cony et Laverge (2022) propose une méthodologie permettant de quantifier les coûts induits par les problèmes de qualité de l'air intérieur dans les bureaux en incluant les coûts médicaux, les coûts en années de vie et les coûts de productivité associés aux DALY perdus, ainsi que les coûts aigus liés au Syndrome des Bâtiments Malsains (*sick building syndrome*, SBS). Les auteurs concluent que le coût total est principalement influencé par la baisse de productivité quotidienne signalée par le SBS (50,5 %), suivie du coût DALY des PM_{2.5} (45,5 %).

1.4 Indicateurs de performance retenus

La performance des systèmes de ventilation est testée principalement par leur impact sur la qualité de l'air intérieur (c'est-à-dire la concentration de polluants) et leur efficacité énergétique (consommation d'énergie). Pour cette raison, des indicateurs de performance ont été développés dans le cadre de ce travail pour refléter les deux aspects de l'influence de la ventilation (QAI et énergie). Ces indicateurs ont été présentés dans différentes études et sont résumés dans le Tableau 3.

Parmi les indicateurs de qualité de l'air intérieur, le DALY a été sélectionné pour quantifier les années de vie perdues en raison de l'exposition aux contaminants, ainsi que les contributions du CO₂ et du formaldéhyde au DALY. En ce qui concerne le CO₂, les indicateurs E_{CO2}, une exposition cumulative normalisée pour les concentrations supérieures à 1000 ppm, et P_{CO2}, qui calcule le 95ème percentile, ont également été sélectionnés. Pour le formaldéhyde et les PM_{2.5}, les expositions cumulées des occupants (E_{HCHO} et E_{PM2.5}) ont été calculées, ainsi que leurs indicateurs aigus (E_{HCHO_acute} et E_{PM2.5_acute}), définis comme l'exposition maximale sur une période d'une heure. Le dernier indicateur de qualité de l'air intérieur (QAI) était E_{RH}, qui calcule le pourcentage de temps passé en dehors de la plage d'humidité de 25 à 60 %. En ce qui concerne les indicateurs énergétiques, ACR représente les changements d'air par heure dus à la ventilation et E_{losses} quantifie les besoins énergétiques associés au taux de renouvellement d'air induit par la ventilation (ACR), tandis que E_{elec} mesure la consommation d'énergie électrique des ventilateurs. Le calcul des différents indicateurs est précisé dans les paragraphes suivants.

Tableau 3 : Description des indicateurs de performance sélectionnés.

Type d'indicateur	Indicateur de performance	Unité	Description
Santé	DALY	[years.10 ⁵]	Impact total sur la santé calculé comme la somme des DALY (années de vie dynamiques corrigées de l'incapacité).
QAI	DALY _{PM2.5}	[years.10 ⁵]	Contribution des PM _{2.5} au DALY.
	DALY _{HCHO}	[years.10 ⁵]	Contribution du formaldéhyde au DALY.
	E _{CO2}	[ppm.h]	Exposition cumulée normalisée lorsque les concentrations sont supérieures à 1000 ppm dans une pièce.
	P _{CO2}	[ppm]	95th percentile des concentrations d'exposition au CO ₂ .
	E _{RH}	[%]	Pourcentage de temps passé en dehors de la plage d'humidité de 25 à 60 %.
	E _{HCHO}	[μg m ⁻³]	Exposition cumulée normalisée* des occupants au formaldéhyde normalisée par la durée d'exposition.
	E _{PM2.5}	[μg m ⁻³]	Exposition cumulée normalisée* des occupants aux PM _{2.5} normalisée par la durée d'exposition.
	E _{HCHO_acute}	[μg m ⁻³]	Maximum de l'exposition cumulée normalisée* des occupants au formaldéhyde pendant 1 heure.
	E _{PM2.5_acute}	[μg m ⁻³]	Maximum de l'exposition cumulée normalisée* des occupants des PM _{2.5} sur une durée de 1 heure.
Énergie	ACR	h ⁻¹	Renouvellement moyen de l'air du bâtiment par heure induit par la ventilation.
	E _{losses}	[kJ]	Besoins énergétiques dus à la ventilation de l'ACR
	E _{elec}	[kJ]	Consommation électrique induite par le(s) ventilateur(s)

* Normalisée par la durée des simulations.

1.4.1 DALYs

Les effets à long terme sur la santé dû à l'exposition aux contaminants de l'air intérieur peuvent être quantifiés à l'aide de l'espérance de vie corrigée de l'incapacité. L'impact total sur la santé est la somme de tous les DALYs, quelle que soit la méthode utilisée pour les calculer. Dans ce travail, la fonction linéarisée basé sur le facteur d'effet (Effect factor (EF)) est utilisé pour la simplicité de son implémentation et ne nécessite que trois données d'entrée : la concentration de polluant ($C(t)$), le débit respiratoire ($V_{br}(t)$) et le facteur d'effet (EF). Ce dernier quantifie la charge sanitaire d'un polluant et est lié à sa toxicité et à la gravité de la maladie (Morantes et al., 2023b).

$$DALYs(t) = \int_{t_0}^t \frac{DALYs}{time}(t) = EF_i \times (V_{br}(t) \times C_{exp}(t)) \quad (\text{Équation 2})$$

Pour cette équation, le débit de respiration $V_{br}(t)$ est supposé constant et égal à 16 m³/jour (US EPA, 2011). Les valeurs de EF utilisées pour le calcul des DALYs relatifs au PM_{2.5} et au formaldéhyde sont présentées Tableau 4 (Fantke et al., 2019).

Tableau 4 : Facteur d'effet (EF) utilisé pour le calcul des DALYs des polluants.

Polluant	EF (DALYs/kg _{exp})		
	Médiane	Cl _{2.5%}	Cl _{97.5%}
PM _{2.5}	118.6	28.3	502.3
Formaldéhyde	18.0	3.5	94.1

1.4.2 Concentration d'exposition cumulée au-delà de 1000 ppm normalisée

La dose d'exposition cumulée au-delà d'un seuil est un indicateur fréquemment employé dans les réglementations performanciennes sur la ventilation, y compris en France (Guyot et al., 2018), et qui s'avère particulièrement pertinent pour évaluer l'efficacité de la ventilation (Rueda López et al., 2021). Nous proposons donc l'indicateur suivant d'exposition cumulée au-delà de 1000 ppm, valeur historique et utilisée de manière plus général à l'ensemble des environnements intérieurs, à normaliser et calculer pour chaque pièce de vie d'un bâtiment :

$$E_{CO2r}(ppm) = \frac{\sum_{t=0}^d (C_{CO2r}(t) - 1000) \times i_{occ_r} \times \Delta t}{\sum_{t=0}^d i_{occ_r} \times \Delta t} \quad (\text{Équation 3})$$

$$i_{occ_r} = \begin{cases} 1 & \text{si occupants présents dans pièce } r \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

où $C_{CO2r}(t)$ est la concentration d'exposition au CO₂ (ppm) dans la pièce r au pas de temps t (uniquement durant les pas de temps avec présence d'occupants), d est la durée totale de simulation et Δt le pas de temps de simulation.

1.4.3 95^e centile de la concentration d'exposition P95_{CO2}

Les experts de l'Annexe 86 ont également retenu le 95^e centile des concentrations comme indicateur complémentaire. Le P95, outil statistique largement utilisé, offre l'avantage de fournir une valeur représentative tout en éliminant les pics extrêmes observés sur de très courtes périodes.

1. Trier les n valeurs par ordre croissant :

$$C_{CO2r_1} < C_{CO2r_2} < \dots < C_{CO2r_i} < \dots < C_{CO2r_{n-1}} \dots < C_{CO2r_n} \quad (\text{Équation 4})$$

2. Le 95^e percentile est la valeur du k -ième élément :

$$P95_{CO2,r} = C_{CO2,r,k}$$

Avec $k = 0.95 \times n$ (la valeur de P95 est arrondie au nombre entier supérieur le plus proche).

1.4.4 Temps passé en dehors de la plage RH = [25-60%]

Le temps passé en dehors des plages considérées "à risque" pour la santé et le confort thermique constitue un indicateur fréquemment utilisé pour évaluer la salubrité et le confort

de l'air intérieur, notamment vis-à-vis de l'humidité relative, comme le recommandent plusieurs normes en vigueur (CEN, 2006, 2009, 2016). La littérature présente diverses plages de référence selon qu'elles concernent la santé ou le confort thermique. Les autorités sanitaires préconisent généralement une fourchette plus restrictive pour l'humidité relative (40-60 %), tandis que les normes de confort thermique, comme l'EN 16798-1 adoptée dans cette étude, autorisent des intervalles plus larges (25-60 %), qui est retenue pour l'étude suivante :

$$E_{RH,r} = \frac{100}{d} \sum_{t=0}^d i_{occ,r} \cdot \Delta t \begin{cases} \text{if } RH,r(t) > 60 \% \\ \text{if } RH,r(t) < 25 \% \end{cases} \quad (\text{Équation 5})$$

Avec $RH,r(t)$ (%) l'humidité relative de la pièce r au temps t .

1.4.5 Indicateurs QAI basés sur les polluants (PM_{2.5} et formaldéhyde)

Pour chaque polluant P , nous proposons deux indicateurs spécifiques par occupant o : Indice d'exposition cumulée normalisée pour risque chronique ($E_{P,o}$) et immédiat ($E_{P_{acute},o}$) :

$$E_{P,o} = \frac{\sum_{t=0}^d C_{P,r,o}(t) \cdot \Delta t}{d} \quad (\text{Équation 6})$$

$$E_{P_{acute},o} = \max \left(\sum_{t=0}^{1h} C_{P,r,o}(t) \cdot \Delta t \right) \quad (\text{Équation 7})$$

Avec $C_{P,r,o}(t)$ (µg/m³) la concentration du polluant P dans la pièce r où l'occupant o se trouve au temps t .

1.4.6 Renouvellement moyen de l'air

Le premier indicateur de performance énergétique consiste du taux de renouvellement d'air neuf ACH (h⁻¹) portant sur la caractérisation de l'aéraulique du bâtiment. Il permet de comparer objectivement les performances aérauliques entre différents logements et stratégies de ventilation, indépendamment des variations d'occupation et d'émissions de polluants. Il constitue également un outil d'analyse précieux pour interpréter les indicateurs calculés précédemment, en distinguant clairement l'influence du bâtiment lui-même de celle des comportements des occupants. Son principal avantage réside dans sa capacité à évaluer l'efficacité intrinsèque du système de ventilation, offrant ainsi une base d'analyse neutre et standardisée pour des comparaisons fiables.

1.4.7 Besoins énergétiques dus à la ventilation

Le second indicateur de la performance énergétique, on considère les besoins thermiques sensibles de chauffage par renouvellement d'air du logement (en l'absence de système d'humidification/déshumidification, nous ne tenons pas compte des besoins de chaleur latente) :

$$E_{loss} = \frac{C_{p,air}}{3600} (1 - \varepsilon_{ET}) \int \rho_{air,i}(t) Q_{exh}(t) \times (T_{air,i}(t) - T_{air,e}) \times dt \quad (\text{Équation 8})$$

Avec $C_{p,air}$ (J/kg·K), $\rho_{air,i}$ (kg/m³) et $T_{air,i}$ (K) sont la capacité calorifique spécifique de l'air intérieur, sa masse volumique et température, respectivement, $Q_{exh}(t)$ est le débit d'extraction total et $T_{air,e}(t)$ est la température de l'air extérieur au temps t .

1.4.8 Consommation électrique des ventilateurs

Pour le dernier indicateur de performance énergétique, Nous proposons d'utiliser le calcul de consommation des ventilateurs selon le standard ASHRAE Standard 90.1 (ANSI/ASHRAE/IES) :

$$E_{elec} = \int (P_{fan}(t) \times P_{nom}) dt$$

$$P_{nom} = Q_{max} \times SFP$$

$$P_{fan}(t) = 0.0013 + 0.1470 \times PLR_{fan} + 0.9506 \times PLR_{fan}^2 - 0.0998 \times PLR_{fan}^3 \quad (\text{Équation 9})$$

$$PLR_{fan} = \frac{Q(t)}{Q_{max}}$$

Avec P_{nom} (W) la puissance nominale, Q_{max} (m³/h) le débit maximal de conception, SFP la puissance spécifique du ventilateur (supposée égale à 0.935), PLR_{fan} (-) est le taux de charge partielle du ventilateur, et $Q(t)$ le débit total extrait en m³/h au temps t . Il est à noter que lorsque plusieurs ventilateurs fonctionnent simultanément, la consommation totale d'énergie électrique augmente en conséquence.

2 DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE D'EVALUATION DES PERFORMANCES

2.1 Méthodologie numérique

Le développement du présent travail s'est basé sur les résultats du premier exercice commun de l'Annexe 86 de l'IEA-EBC, qui a évalué différents systèmes de ventilation, chacun adapté à un pays participant. La plupart des cas ont choisi les mêmes valeurs d'entrée, telles que les émissions de CO₂ et d'humidité, tandis que les horaires d'occupation, les temps de cuisson et de douche et la durée variaient pour mieux représenter les habitudes du pays.

Les systèmes de ventilation développés par les groupes de recherche du Cerema (France), de DTU (Danemark), de PUCPR (Brésil), UGent (Belgique), de l'UIBK (Autriche) et du CETIAT (France) ont été sélectionnés pour une étude plus approfondie dans le cadre du 2^{ème} exercice commun et du projet français SmartAIR, qui vise à améliorer l'efficacité énergétique des stratégies de gestion de la QAI en vigueur et se concentre sur l'adaptation des outils développés à l'Annexe 86. Cet exercice a abouti à la sélection de 11 systèmes différents, comprenant à la fois des technologies conventionnelles et des technologies intelligentes.

Comme chaque groupe de recherche a utilisé des logiciels de modélisation, des géométries et d'autres conditions d'entrée différents, il était difficile de comparer les performances des différents systèmes de ventilation testés. Pour y remédier, le présent travail a repris la simulation des systèmes tout en conservant la même base de comparaison en ce qui concerne l'outil de modélisation adopté, ses hypothèses et ses conditions limites. Cela permet de créer un cadre fixe pour la comparaison entre les systèmes afin de tirer des conclusions sur les avantages et les inconvénients de chaque système.

Deux cas d'études ont été sélectionnés pour réaliser cette analyse : une maison individuelle avec 5 occupants et un appartement en immeuble collectif avec 3 occupants. Tout d'abord, toutes les simulations ont été réalisées avec le logiciel CONTAM en utilisant les mêmes paramètres : les scénarios d'occupation, les taux d'émissions et la période simulée (du 15 octobre au 15 avril, correspondant à la saison de chauffage en France). Pour généraliser les résultats pour différentes conditions climatiques, six climats sont sélectionnés des cinq pays participants et un climat supplémentaire (Phoenix, États-Unis) représentant des conditions extérieures sèches, nécessaire pour établir les limites de performance des systèmes.

Neuf variables au total ont été jugées particulièrement influentes sur les résultats du modèle : les taux d'émission de PM_{2.5} et formaldéhyde, la vitesse de dépôt et le taux de remise en suspension de PM_{2.5}, la concentration de PM_{2.5} de l'air extérieur, le débit total d'extraction, la perméabilité à l'air du logement et les heures de coucher et de départ de l'un des occupants. Ainsi, des plages de variation de ces variables couvrant les conditions de fonctionnement pratiques ou communes ont été définies. Une étude spécifique a été effectuée par la variabilité des taux d'émission à partir de la base de données PANDORA développée au Lot 2. Pour chaque cas de l'échantillon obtenu, les systèmes choisis sont simulés pour les deux géométries sous l'effet de tous les climats pour calculer des indicateurs de performance en rapport avec la qualité de l'air intérieur et de la consommation d'énergie. **La méthode, les cas étudiés et les résultats sont détaillés dans le rapport du Lot 3.** Une étude de sensibilité pour évaluer l'amplitude de l'incertitude des valeurs d'entrée sur celle des sorties calculées est également incluse dans ce travail.

2.2 Applicabilité de la méthodologie in situ

L'évaluation des indicateurs de performance définis dans le Tableau 3 nécessite une approche méthodologique adaptée aux contraintes réelles des bâtiments. Cette section détaille les stratégies de mesure, les technologies de capteurs et les protocoles d'application permettant une évaluation robuste de la qualité de l'air intérieur et des performances énergétiques dans des conditions opérationnelles.

Pour les paramètres tels que le CO₂ et l'humidité relative, une mesure en continu est indispensable, car le calcul de l'exposition cumulative au-delà de 1000 ppm pour le CO₂ et du temps passé en dehors de la plage [25 – 60 %] pour l'humidité repose sur des données horaires ou infra-horaires. En revanche, pour des polluants comme le formaldéhyde et les particules fines (PM_{2.5}), une mesure long-terme peut suffire, bien que les capteurs modernes permettent désormais un suivi en continu. Les pics de concentration courts, notamment pour le formaldéhyde et les PM_{2.5}, peuvent être mesurés, mais leur intégration dans les indicateurs d'exposition cumulée ne nécessite pas une résolution temporelle aussi fine que pour le CO₂ ou l'humidité, car ces indicateurs reposent sur des moyennes ou des valeurs intégrées sur des périodes plus longues.

Les systèmes de mesure déployés peuvent être de différentes natures, allant des solutions autonomes aux architectures connectées, en passant par des systèmes hybrides. Chaque approche présente des avantages et des limites en termes de coût, de précision, de résolution temporelle et de facilité de déploiement.

2.2.1 Systèmes de mesures à l'échelle du bâtiment

Pour évaluer les indicateurs de performance, plusieurs types de systèmes de mesure peuvent être déployés, allant des solutions autonomes (stand-alone) aux architectures connectées (IoT, Wireless Sensor Networks - WSN), en passant par des systèmes hybrides. Chaque approche présente des avantages et des limites en termes de coût, de précision, de résolution temporelle et de facilité de déploiement. La structure se divise principalement en quatre parties : système de mesure, stockage des données, services d'analyse des données et système de visualisation des données. Le système de mesure comprend divers capteurs de qualité de l'air intérieur, des microcontrôleurs et des systèmes de communication. Les données collectées par les capteurs sont ensuite stockées dans un système de stockage de données, qu'il s'agisse d'un stockage en ligne ou physique. Par ailleurs, les services d'analyse des données permettent d'analyser l'impact des polluants dans les locaux concernés. Enfin, le système de visualisation permet aux utilisateurs finaux de recevoir des mises à jour instantanées sur les niveaux de QAI.

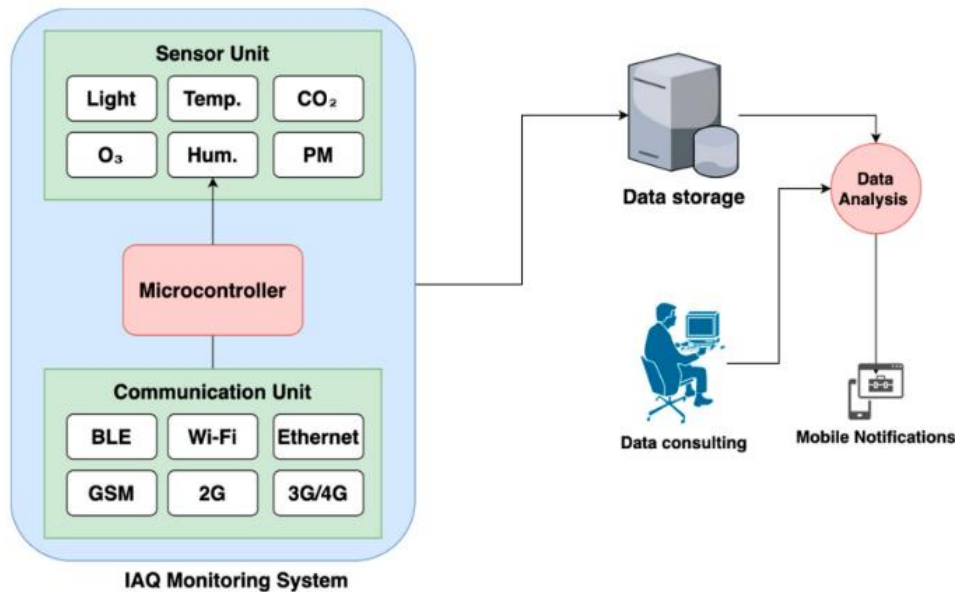


Figure 4 : Schéma d'un système de mesures de la qualité de l'air dans un bâtiment (Saini et al., 2020).

Les systèmes autonomes (stand-alone) sont des solutions locales, souvent basées sur des capteurs portables ou des stations de mesure indépendantes. Ils sont généralement simples à installer et à utiliser, mais nécessitent une intervention manuelle pour la collecte des données et leur analyse. Ces systèmes sont adaptés pour des campagnes de mesure ponctuelles ou des évaluations ciblées, mais leur absence de connectivité limite leur intégration dans des stratégies de gestion dynamique de la qualité de l'air intérieur (QAI).

Les systèmes IoT (Internet des Objets) représentent une solution plus avancée, permettant une surveillance en temps réel et une transmission automatique des données vers des plateformes centralisées. Ces systèmes intègrent des capteurs connectés (CO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, HCHO, humidité, température, etc.) reliés à des microcontrôleurs (Arduino, Raspberry Pi, ESP8266) et communiquent via des protocoles sans fil (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa). Ils offrent une résolution temporelle élevée, une analyse centralisée des données et la possibilité de déclencher des alertes ou d'ajuster automatiquement les systèmes de ventilation en fonction des seuils définis. Leur principal avantage réside dans leur capacité à fournir une vision globale et continue de la QAI, tout en permettant une maintenance et une calibration à distance.

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN, Wireless Sensor Networks) sont une autre approche, souvent utilisée pour couvrir de grandes surfaces ou des bâtiments complexes. Ces réseaux permettent une collecte distribuée des données, avec une transmission centralisée vers une passerelle (gateway). Ils sont particulièrement utiles pour des applications nécessitant une haute densité de capteurs ou une couverture étendue, mais peuvent être plus complexes à déployer et à maintenir que les solutions IoT.

2.2.2 Mesures des polluants

Il existe sur le marché des appareils intégrant plusieurs capteurs pour mesurer simultanément différents polluants (CO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, COV, etc.), offrant une solution compacte et pratique pour une évaluation globale de la qualité de l'air intérieur. Cependant, pour garantir une précision optimale et une adéquation avec les indicateurs de performance spécifiques définis, cette section se concentre sur les capteurs dédiés à un seul polluant. Ces

capteurs, souvent plus précis et mieux calibrés pour leur cible, permettent une mesure fiable des paramètres critiques nécessaires au calcul des indicateurs retenus.

2.2.2.1 CO₂ et humidité relative (HR)

Pour le CO₂ et l'humidité relative, une mesure en continu est indispensable. Des capteurs infrarouges non dispersifs (NDIR), comme le SCD30 (Sensirion), ou des capteurs capacitifs, comme le DHT22, sont couramment utilisés pour ces mesures. Leur précision (± 30 ppm pour le CO₂ et $\pm 2 - 5$ % pour l'humidité) et leur stabilité sur le long terme en font des outils adaptés pour un suivi continu, permettant d'évaluer finement les périodes de dépassement des seuils critiques et d'ajuster les stratégies de ventilation en conséquence.

Le taux de renouvellement d'air (ACR) peut être estimé indirectement à partir des profils de CO₂, en exploitant la décroissance de la concentration après une période d'occupation ou en utilisant des traceurs gazeux. Des études ont validé l'utilisation de capteurs CO₂ continus pour estimer l'ACR dans divers environnements intérieurs, avec une précision de l'ordre de 90 à 120 % par rapport aux méthodes de référence.

2.2.2.2 Particules fines

La concentration en particules fines (PM_{2.5}), permettant d'obtenir les indicateurs DALY_{PM2.5}, E_{PM2.5} et E_{PM2.5_acute}, est principalement mesurée à l'aide de capteurs optiques. Ces capteurs exploitent la diffusion de la lumière par les particules lorsqu'elles traversent un faisceau laser, permettant de détecter des particules supérieures à 0,3 µm. Les instruments de référence, comme par exemple les spectromètres GRIMM (Modèle 1.108), offrent une précision maximale (de l'ordre de $\pm 2\%$) couplé à une haute sensibilité (10^{-3} part/cm³) et sont utilisés pour des mesures de calibration ou des études scientifiques. Cependant, leur coût élevé et leur complexité d'utilisation les rendent inadaptés à un déploiement permanent dans des environnements résidentiels ou tertiaires.

Face à ces limitations, les capteurs bas coût (ex. : SDS011, Plantower PMS5003) ont émergé comme une alternative viable (Gingrich et al., 2025; Morawska et al., 2025; Sousan et al., 2017). Bien que leur précision soit généralement inférieure à celle des instruments de référence (de l'ordre de $\pm 10-15$ µg/m³ après calibration), ils offrent un compromis intéressant entre coût, facilité de déploiement et intégration dans des systèmes IoT. Leur sensibilité aux variations d'humidité et de température nécessite une calibration régulière pour maintenir leur fiabilité (Gautam et al., 2025; Jayaratne et al., 2020). Malgré ces défis, leur déploiement massif et leur intégration dans des réseaux de capteurs sans fil permettent une surveillance continue et une transmission automatique des données, facilitant ainsi le suivi en temps réel des PM_{2.5} et l'identification de pics de pollutions grâce à des mesures à faible pas de temps (seconde, minute ou heure) (Sugiarto et al., 2025).

2.2.2.3 Formaldéhyde

La mesure du formaldéhyde (HCHO) repose sur différentes technologies de capteurs, allant des solutions bas coût aux instruments de référence hautement précis. Les capteurs électrochimiques (ex : Winzen ZE08-CH₂O) se distinguent par leur robustesse face aux variations d'humidité et de température, ainsi que par leur faible consommation énergétique, ce qui les rend particulièrement adaptés à une intégration dans des systèmes IoT ou des nœuds de mesure mobiles. Leur principe de fonctionnement repose sur la détection du courant généré par une réaction électrochimique spécifique au HCHO, permettant une sensibilité accrue même à de faibles concentrations (dès 10 ppb/12 µg/m³), avec une réponse rapide et une bonne répétabilité entre unités (Chattopadhyay et al., 2022). Cependant, leur

durée de vie peut être limitée par le dessèchement de l'électrolyte en conditions extrêmes (température élevée et faible humidité), et leur précision est généralement inférieure à celle des instruments de référence, avec des erreurs moyennes de mesure pouvant atteindre ± 70 ppb/84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avant calibration. Malgré ces limites, leur déploiement massif et leur intégration dans des réseaux de capteurs sans fil permettent une surveillance continue et une transmission automatique des données, facilitant ainsi le suivi en temps réel de la qualité de l'air intérieur.

Les capteurs à oxyde métallique (MOS) offrent une alternative compacte et économique, mais leur précision est souvent affectée par les fluctuations environnementales, notamment l'humidité relative supérieure à 40 %, qui peut induire des erreurs significatives (jusqu'à plusieurs centaines de ppb). Leur calibration, souvent complexe, peut être améliorée par des algorithmes, réduisant ainsi leur erreur moyenne de mesure (Chattopadhyay et al., 2022). Ces capteurs, bien que moins sélectifs que les capteurs électrochimiques, sont capables de détecter des concentrations modérées à élevées de HCHO (100 - 800 ppb/120 - 960 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et sont adaptés aux systèmes IoT grâce à leur petite taille et leur coût réduit. Cependant, ils nécessitent une maintenance régulière et une calibration fréquente pour compenser leur dérive, ce qui peut compliquer leur utilisation dans des systèmes autonomes à l'échelle d'un bâtiment.

Les capteurs optiques bas coût, comme ceux développés par Lin et al. (2019), utilisent des méthodes colorimétriques couplées à des photodétecteurs organiques pour une détection sensible et miniaturisée du HCHO, avec une plage de détection allant de 40 à 1000 ppb/48 à 1200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces capteurs, bien que prometteurs pour des applications portables ou distribuées, restent moins précis que les instruments de référence et nécessitent également des calibrations régulières pour maintenir leur fiabilité.

Enfin, les instruments de référence, comme les spectromètres laser (ex. : Aeris Technologies) ou photo-acoustiques (ex. : Gasera One), offrent une précision maximale (de l'ordre de $\pm 0,3$ ppb/0,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et une excellente stabilité, mais leur coût élevé, leur taille et leur complexité d'utilisation les rendent inadaptés à un déploiement permanent dans des environnements résidentiels ou tertiaires. Leur utilisation est plutôt réservée à des campagnes de calibration ponctuelles ou à des études scientifiques.

En résumé, les capteurs électrochimiques et MOS bas coût représentent une solution accessible pour une surveillance continue du HCHO dans les bâtiments, notamment dans le cadre de solutions IoT, à condition de mettre en place des protocoles de calibration et de maintenance adaptés. Leur intégration dans des réseaux de capteurs connectés permet une gestion réactive de la qualité de l'air, par exemple en ajustant dynamiquement les débits de ventilation ou en activant des systèmes de purification en cas de dépassement des seuils de concentration. Cependant, pour des applications critiques ou nécessitant une précision absolue, les instruments de référence restent indispensables.

2.2.2.4 Consommation énergétique

La consommation énergétique des ventilateurs et les besoins thermiques sont évalués à partir de mesures de débit d'air (par mesure de la vitesse d'écoulement d'air à l'aide d'anémomètre ou tubes de Pitot) et de puissance électrique (wattmètres), intégrées dans des systèmes de monitoring centralisés. Ces données permettent de calculer les indicateurs E_{loss} (besoins thermiques) et E_{elec} (consommation électrique des ventilateurs) avec une bonne fiabilité.

2.2.2.5 Conclusion

La plupart des indicateurs clés (basés sur CO₂, HR, température, PM_{2.5}, consommation énergétique) peuvent être mesurés à moindre coût avec des capteurs commerciaux, permettant un suivi en continu et une intégration dans des systèmes IoT. Cependant, la mesure du formaldéhyde reste un défi en raison de la complexité des capteurs (coût, calibration, sensibilité aux interférences). Pour ce polluant, les instruments de référence (spectromètres) sont recommandés pour des campagnes ponctuelles, tandis que les capteurs bas coût (électrochimiques ou MOS) nécessitent des protocoles de calibration rigoureux et une maintenance régulière.

L'estimation du taux de renouvellement d'air (ACR) peut être réalisée indirectement via les profils de CO₂, mais cette méthode dépend fortement des hypothèses sur l'occupation et les émissions. Une instrumentation complémentaire (capteurs de présence, ouverture des fenêtres) serait nécessaire pour affiner les résultats, notamment pour les indicateurs énergétiques et les pics de pollution.

Cette analyse introduit l'étude de cas suivante, où les limites des capteurs bas coût (ex. saturation pour les PM_{2.5}) et l'absence de données d'occupation soulignent l'importance d'une stratégie de mesure adaptée aux objectifs d'évaluation.

Tableau 5 : Synthèse des moyens de mesure des indicateurs de performance.

Indicateur	Méthode de mesure	Précision/Coût	Remarques
CO₂	Capteurs NDIR	±30 ppm, coût modéré	Mesure en continu possible, fiabilité élevée
Humidité relative	Capteurs capacitifs	±2-5%, coût faible	Intégration facile dans les systèmes IoT
Température	Thermistances ou capteurs numériques	±0,1-1°C, coût faible	Souvent couplé aux capteurs d'HR
PM_{2.5}	Capteurs optiques	±10-15 µg/m ³ (bas coût) / ±2% (référence), coût variable	Calibration nécessaire pour les capteurs bas coût
Formaldéhyde	Capteurs électrochimiques ou MOS	±70 ppb (électrochimique), coût élevé pour les instruments de référence	Sensibilité aux conditions environnementales ; calibration complexe
Débit d'air	Anémomètres, tubes de Pitot, ou estimation via profils de CO ₂	90-120% de précision (méthode CO ₂)	Méthode indirecte via CO ₂ moins coûteuse mais moins précise
Consommation énergétique	Wattmètres, mesure de débit et puissance des ventilateurs	Précision élevée si instruments calibrés	Nécessite un monitoring centralisé pour une évaluation globale
Occupation	Capteurs de mouvement ou déclaratif (scénarios)	Précision variable selon la méthode	-

2.2.3 Etude de cas

Cette section présente un exemple d'utilisation des indicateurs sur un cas réel, mettant en lumière les points de surveillance liés au choix du système de mesure. Les mesures ont été réalisées dans un logement situé dans la ville de La Rochelle. Une description complète de l'étude et des résultats concernant l'évaluation de paramètres de simulation de la QAI tels que les débits de ventilation, les sources d'émission de CO₂ et de PM_{2,5} ainsi que des vitesses de dépôt des particules ont été publiées par Abadie et Cordeiro Mendonça (2024). Le logement de 83,5 m² se compose d'un rez-de-chaussée comprenant un salon, une cuisine/salle à manger, des toilettes et un espace escalier/couloir, ainsi que d'un premier étage composé de trois chambres, d'une salle de bain et d'un espace escalier/couloir (Figure 5). Le Tableau 6 indique les caractéristiques géométriques des pièces où les capteurs de qualité de l'air intérieur (QAI) ont été installés, ainsi que le volume d'air à l'intérieur de celles-ci, en tenant compte des principaux meubles.



Figure 5 : Schéma du logement.

Tableau 6 : Géométrie des pièces.

Pièces	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Air volume (m ³)
Salon	14	36	34,8
Cuisine/Salle à manger	20	50	44,9
Chambre 1	12	29	24
Chambre 2	9	22	21
Chambre 3	9	22	20,6
Couloir	5	12	12

Le logement est équipé d'un système de ventilation par extraction dont les débits d'air, fournis par le fabricant, sont précisés dans le Tableau 7. Les bouches d'extraction d'air sont situées dans la cuisine, le salon, les toilettes, la salle de bain et le couloir. L'air extérieur pénètre dans le logement par une grille d'entrée d'air (8 cm de diamètre) située sur le mur nord de la cuisine et par des entrées d'air autoréglables dans les chambres (30 m³/h à 20 Pa). La cuisine est équipée d'une hotte d'extraction mécanique (300 m³/h).

Tableau 7 : Débits d'extraction du caisson de ventilation (Données du fabricant).

Pièces	Débit d'air (m³/h)	
	Débit de base	Débit de pointe
Cuisine/Salle à manger	43-60	>131
Autres (SdB, WC, salon, couloir)	13-20	14,5-21,5

Le chauffage de l'air et de l'eau est assuré par une chaudière à gaz située dans le sous-sol. Le conduit d'évacuation de la chaudière à gaz se trouve à 2 mètres de la grille d'entrée d'air, sur le mur nord de la cuisine. La maison est habitée par une famille non-fumeuse composée de trois personnes, deux adultes et un adolescent.

2.2.3.1 Equipements

Deux types de capteurs à bas coût ont été utilisés pour surveiller les variables de qualité de l'air : un pour les mesures intérieures (ELLONA POD2) et un autre pour les mesures extérieures (ELLONA WT1). Les variables d'intérêt mesurées par les capteurs, avec leurs plages de mesure, limites de détection (LOD), exactitude (R^2) et précision, sont présentées dans le Tableau 8 et le Tableau 9 pour le POD2 et le WT1, respectivement.

Tableau 8 : Caractéristiques du POD2.

Variables	Intervalle	Limite de détection	Exactitude (R^2)	Précision
Pression	300-1100 hPa	1 hPa	0,0025	1 hPa
Humidité relative	0-100 %	0,01 %	0,03	0,01 %
Température	-40°C- +85°C	0,1°C	±1	0,1°C
CO ₂	0-10000 ppm	N/A	20 ppm +3%	1 ppm
Concentration en masse PM (1/2,5/4/10)	0-1000 mg/m³	N/A	10 mg/m³	0,1 mg/m³
Concentration en nombre PM (0,5/1/2,5/10)	0-1000 1/cm³	N/A	10% (25% PM ₄ , PM ₁₀)	N/A
COVT	1-1000 ppm	N/A	N/A	0,1 ppm

Tableau 9 : Caractéristiques du WT1

Variables	Intervalle	Limite de détection	Exactitude (R^2)	Précision
Pression	300-1100 hPa	1 hPa	0,0025	1 hPa
Humidité relative	0-100 %	0,01	0,03	0,1 %
Température	-40°C- +60°C	0,1°C	±1	0,1°C
NO ₂	0-100 ppm	0,009 ppm	N/A	0,003 ppm
Concentration en masse PM (1/2,5/4/10)	0-1000 mg/m³	0,1 mg/m³	10 mg/m³	0,1 mg/m³
Concentration en nombre PM (0,5/1/2,5/10)	1-10000 p	1 p	N/A	1 p

2.2.3.2 Période de mesures et occupation

Les données collectées lors de la campagne de mesure sont divisées en deux périodes :

- **Période 1** (du 23/12/2023 au 14/01/2024) ventilateur vitesse 1 ;
- **Période 2** (du 14/01/2024 au 28/01/2024) ventilateur vitesse 2.

Ainsi, la comparaison des indicateurs évalués au cours de ces deux périodes revient à comparer deux systèmes de ventilation à débit constant.

L'occupation des pièces n'ayant pas été enregistrée, nous faisons les hypothèses suivantes pour les besoins de l'exercice :

Tableau 10 : Scénario d'occupation du logement.

Pièce	Adulte 1	Adulte 2	Adolescent
Salon	18h00-20h00	18h00-20h00	18h00-20h00
Cuisine/Salle à manger	07h00-08h00	07h00-08h00	07h00-08h00
	12h00-14h00	12h00-14h00	12h00-14h00
	20h00-22h00	20h00-22h00	20h00-22h00
Chambre	22h00-07h00 (CH1)	22h00-07h00 (CH3)	22h00-07h00 (CH2)

2.2.3.3 Résultats et discussions

Tableau 11 : Indicateurs santé et QAI de l'étude pour chaque occupant.

Type d'indicateur	Indicateur de performance	Unité	Vitesse 1			Vitesse 2		
			A1	A2	Ado	A1	A2	Ado
Santé	DALY	[years.10 ⁵]	-	-	-	-	-	-
	DALY _{PM2.5}	[years.10 ⁵]	529	550	544	555	600	547
	DALY _{HCHO}	[years.10 ⁵]	-	-	-	-	-	-
QAI	E _{CO2}	[ppm.h]	531	375	1217	451	184	1082
	P _{CO2}	[ppm]	1491	1503	3372	1388	1280	2913
	E _{RH}	[%]	13,0	13,2	60,3	0,0	0,0	34,1
	E _{HCHO}	[µg m ⁻³]	-	-	-	-	-	-
	E _{PM2.5}	[µg m ⁻³]	7,6	7,9	7,9	8,0	8,7	7,9
	E _{HCHO_acute}	[µg m ⁻³]	-	-	-	-	-	-
	E _{PM2.5_acute}	[µg m ⁻³]	226,4	226,4	226,4	43,6	43,6	43,6

A1 : Adulte 1, A2 : Adulte 2, Ado : Adolescent

Tableau 12 : Indicateurs énergie de l'étude.

Type d'indicateur	Indicateur de performance	Unité	Vitesse 1	Vitesse 2
Énergie	ACR	[h ⁻¹]	0,5	0,7
	Elosses ¹	[kWh/an]	1505	2107
	Eelec	[kWh/an]	307	403

¹ Déperditions évaluées en considérant 2200 DJU (base 20°C) pour la saison de chauffage à La Rochelle en 2023

Les résultats, comparant deux vitesses de ventilation, révèlent des différences significatives entre les expositions individuelles des occupants, identifiés comme Adulte 1 (A1), Adulte 2 (A2) et un adolescent (Ado). Étant donné que les trois occupants partagent les mêmes espaces communs (cuisine, salon, salle à manger) et ne diffèrent que par la

chambre qu'ils occupent, les variations observées dans les indicateurs de qualité de l'air sont principalement attribuables aux conditions spécifiques de chaque chambre.

L'augmentation du débit de ventilation, passant de la vitesse 1 à la vitesse 2, entraîne une réduction notable de l'exposition cumulée au CO₂ pour tous les occupants. Pour l'Adulte 1, l'indicateur E_{CO2} diminue de 531 ppm.h à 451 ppm.h (-15%), tandis que pour l'Adulte 2, cette réduction est encore plus marquée, passant de 375 ppm.h à 184 ppm.h (-51%). Pour l'adolescent, bien que l'exposition diminue de 1217 ppm.h à 1082 ppm.h (-11%), elle reste plus élevée que pour les adultes. Cette différence suggère que la chambre de l'adolescent est moins bien ventilée que celles des adultes, entraînant une accumulation plus importante de CO₂ pendant les périodes d'occupation nocturne.

Le 95e percentile des concentrations de CO₂ (P_{CO2}) confirme cette tendance. Pour l'Adulte 1, les valeurs passent de 1491 ppm à 1388 ppm (-7%), et pour l'Adulte 2, de 1503 ppm à 1280 ppm (-15%). Cependant, pour l'adolescent, bien que les concentrations diminuent de 3372 ppm à 2913 ppm (-14%), elles restent bien au-dessus du seuil recommandé de 1000 ppm. Cela indique que la chambre de l'adolescent présente des conditions de ventilation moins optimales, probablement en raison d'un débit d'air insuffisant ou d'une étanchéité plus marquée, ce qui favorise l'accumulation de CO₂ pendant la nuit.

En ce qui concerne les particules fines (PM_{2.5}), les concentrations moyennes (E_{PM2.5}) restent relativement stables entre les deux vitesses de ventilation, oscillant entre 7,6 µg/m³ et 8,7 µg/m³ pour tous les occupants. Cependant, les pics aigus (E_{PM2.5_acute}) particulièrement préoccupants pour la santé, sont significativement réduits en vitesse 2, passant de 226,4 µg/m³ à 43,6 µg/m³ (-81%). Dans notre étude, ces pics sont clairement liés à l'activité de cuisson, commune aux trois occupants. Toutefois, leur comparaison reste délicate, car les émissions de particules fines varient considérablement d'une cuisson à une autre et donc d'une période à une autre. Cela met en évidence la difficulté d'évaluer les systèmes de ventilation dans des conditions où les sources de PM_{2.5} ne sont pas standardisées ou, plus généralement, sous des conditions limites différentes ; la simulation numérique permet de s'astreindre de cette limitation pour l'évaluation des systèmes de ventilation.

L'augmentation du débit d'air a également un impact positif sur la gestion de l'humidité relative (E_{RH}). Le temps passé en dehors de la plage idéale de 25 à 60 % d'humidité relative diminue drastiquement pour les adultes, passant de 13 à 13,2 % à 0 %, et pour l'adolescent, de 60,3 % à 34,1 % (-43%). Cette amélioration est cruciale pour prévenir les risques de moisissures et d'inconfort, mais les disparités entre les chambres restent évidentes. La chambre de l'adolescent semble plus sujette à des problèmes d'humidité, ce qui peut être lié à une ventilation insuffisante ou à des caractéristiques spécifiques de la pièce (orientation, isolation, etc.).

Du point de vue énergétique, l'augmentation du taux de renouvellement d'air (ACR) de 0,5 h⁻¹ à 0,7 h⁻¹ s'accompagne d'une légère hausse des pertes thermiques (E_{loss}), passant de 1505 kWh/an à 2107 kWh/an (+40%). Cette augmentation reste modérée comparée aux gains significatifs en termes de qualité de l'air. La consommation électrique des ventilateurs (E_{elec}) varie de 307 kWh/an à 403 kWh/an (+30%).

Cette étude met en évidence plusieurs points clés pour l'évaluation et l'optimisation des stratégies de ventilation intelligente dans les logements résidentiels. Les capteurs de type POD2, bien que pratiques pour leur compacité et leur capacité à mesurer plusieurs paramètres comme le CO₂, les PM_{2.5}, la température et l'humidité, présentent des limites significatives pour une évaluation complète de la qualité de l'air intérieur. En effet, certaines mesures, telles que les COV, ne sont pas exploitées dans notre étude, et le formaldéhyde, nécessaire au calcul des DALYs, est absent. Cela peut conduire à une sous-estimation des

risques sanitaires ou à une évaluation incomplète des performances des systèmes de ventilation. Pour une approche robuste, il est donc nécessaire de compléter ces dispositifs avec des capteurs dédiés ou des instruments de référence pour les polluants non couverts, en réfléchissant en amont aux indicateurs prioritaires et aux méthodes de mesure adaptées.

Les résultats soulignent également l'importance cruciale des données d'occupation et des comportements des occupants, comme l'ouverture des portes et fenêtres, pour affiner les indicateurs de performance. Les scénarios d'occupation utilisés reposent souvent sur des hypothèses qui ne reflètent pas toujours la réalité, introduisant des incertitudes dans l'évaluation des expositions réelles. L'intégration de capteurs de présence dans les pièces et de capteurs d'ouverture des portes et fenêtres permettrait de suivre en temps réel l'occupation et les flux d'air naturels, améliorant ainsi la précision des analyses. Des systèmes de déclaration, comme des applications mobiles, pourraient également compléter ces données automatiques pour une meilleure compréhension des usages réels des espaces.

Cette étude révèle également la nécessité de mesurer précisément chaque indicateur, en particulier pour les aspects énergétiques. Par exemple, la consommation énergétique des ventilateurs a été évaluée de manière globale, mais une mesure plus fine, incluant la puissance instantanée et les variations de débit, permettrait une analyse plus précise des performances énergétiques. Une instrumentation complète, incluant des wattmètres et des anémomètres, est essentielle pour évaluer les besoins thermiques et optimiser les compromis entre qualité de l'air et efficacité énergétique.

Enfin, cette évaluation a permis de mettre en relief la difficulté d'évaluer les performances de deux systèmes de ventilation (ici, à débit constant, se différenciant par le débit total extrait) in-situ puisque les conditions limites et d'usages (occupation, sources internes de polluants...) ne sont pas statistiquement identiques sur de si courtes périodes (quelques semaines). Ainsi, seul l'outil numérique permet de comparer la performance intrinsèque des systèmes de ventilation selon des conditions identiques. C'est l'objet du lot 3.

3 CONCLUSION

Le présent livrable du Lot 1 du projet SmartAIR marque une étape clé dans le développement d'une méthodologie intégrée pour l'évaluation des stratégies intelligentes de gestion de la Qualité de l'Air Intérieur (QAI) dans les bâtiments résidentiels. En s'appuyant sur une analyse multidimensionnelle, combinant indicateurs sanitaires (DALYs), exposition aux polluants (CO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, formaldéhyde), confort et performance énergétique, cette étude propose une approche innovante pour répondre aux défis croisés de la santé publique et de la transition écologique. Les travaux menés ont permis de définir un cadre méthodologique robuste, fondé sur des simulations dynamiques (logiciel CONTAM) et une analyse de sensibilité rigoureuse afin d'évaluer objectivement l'efficacité des systèmes de ventilation dans des conditions variées.

D'après l'analyse effectuée (voir le rapport du Lot 3 pour l'ensemble des résultats), les performances des systèmes varient bien en fonction des indicateurs. Cependant certains d'entre eux présentent des informations similaires et sont donc jugés comme non discriminants vis-à-vis de la performance des systèmes de ventilation. Dans notre approche, les indicateurs DALY, P_{CO_2} , $E_{\text{HCHO_acute}}$, $E_{\text{PM}_{2.5_acute}}$ et ACR ont été écartés puisque ceux préservés permettent à eux seuls de juger de la performance des systèmes. Ces derniers permettent de caractériser la QAI ($E_{\text{PM}_{2.5}}$, E_{HCHO} , E_{CO_2} , E_{RH}) et la consommation d'énergie (E_{HIL} et E_{fan}).

Cependant, on notera que, mis à part le DALY qui dépend directement des indicateurs $E_{\text{PM}_{2.5}}$ et E_{HCHO} (donc redondant) et l'ACR qui reste une valeur globale moyenne du taux de renouvellement d'air (donc pas assez sensible aux différences sur des plus petites périodes), les trois autres indicateurs sont tous relatifs à des pics de concentration de courtes durées de CO_2 , des $\text{PM}_{2.5}$ et du formaldéhyde. Le fait que ces indicateurs ne permettent pas de différencier les performances des systèmes de ventilation montrent en fait que les systèmes sont tous limités dans leurs réponses à ces pics de concentration car les débits de pointe sont tous plus ou moins les mêmes, et surtout trop faibles pour avoir un réel impact. Il faudrait ainsi prévoir des débits bien plus élevés que ce que prévoient les systèmes intelligents actuels.

Enfin, nous avons montré que même si certains indicateurs pouvaient être évalués à travers la mesure in-situ, la comparaison de l'efficacité de systèmes de ventilation ne peut être effectuée qu'avec des conditions limites et d'usages (occupation, sources de polluants...) identiques ; conditions ne pouvant être obtenues qu'à travers la simulation numérique.

4 REFERENCES

- Abadie, M.O., Cordeiro Mendonça, K., 2024. Comprehensive analysis of indoor air quality in a real home using low-cost sensors, in: 44th AIVC Conference - Retrofitting the Building Stock: Challenges and Opportunities for Indoor Environmental Quality. Dublin (IR), Ireland.
- Agathokleous, E., 2022. Environmental pollution impacts: Are p values over-valued? *Sci. Total Environ.* 850, 157807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157807>
- Ajrouché, R., Roudier, C., Cléro, E., Ielsch, G., Gay, D., Guillevic, J., Marant Micallef, C., Vacquier, B., Le Tertre, A., Laurier, D., 2018. Quantitative health impact of indoor radon in France. *Radiat. Environ. Biophys.* 57, 205–214. <https://doi.org/10.1007/s00411-018-0741-x>
- Alahmad, B., Khraishah, H., Althalji, K., Borchert, W., Al-Mulla, F., Koutrakis, P., 2023. Connections Between Air Pollution, Climate Change, and Cardiovascular Health. *Can. J. Cardiol.* <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2023.03.025>
- Alfano, B., Barretta, L., Del Giudice, A., De Vito, S., Di Francia, G., Esposito, E., Formisano, F., Massera, E., Miglietta, M.L., Polichetti, T., 2020. A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives. *Sensors* 20, 6819. <https://doi.org/10.3390/s20236819>
- ANSI/ASHRAE/IES, n.d. ASHRAE Standard 90.1-2019 : Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.
- Appleton, J.D., 2007. Radon: Sources, Health Risks, and Hazard Mapping. *AMBIO J. Hum. Environ.* 36, 85–89. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36%255B85:RSHRAH%255D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36%255B85:RSHRAH%255D2.0.CO;2)
- Arndt, R.L., Carmichael, G.R., Streets, D.G., Bhatti, N., 1997. Sulfur dioxide emissions and sectorial contributions to sulfur deposition in Asia. *Atmos. Environ.* 31, 1553–1572. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(96\)00236-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(96)00236-1)
- ATG, B., 2012. Goedkeuringsleiddraad voor de energetische karakterisatie van vraaggestuurde residentiele ventilatiesystemen.
- CEN, 2016. EN 16798-1 Energy performance of buildings - Part 1 : Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6.
- CEN, 2006. EN FD/TR 14788. Ventilation des bâtiments - Conception et dimensionnement des systèmes de ventilation résidentiels.
- CEN, (Prénom), 2009. EN 15665 - Ventilation for buildings Determining performance criteria for residential ventilation systems.
- Club Ventilation, 2018. Critères d'équivalence des systèmes modulant le renouvellement d'air Recommandations.
- Cony, L., Laverge, J., 2022. A Methodology to assess economical impacts of poor IAQ in office buildings from DALY and SBS induced costs. *CLIMA 2022 Conf.* <https://doi.org/10.34641/clima.2022.297>
- Cony Renaud Salis, L., Abadie, M., Wargocki, P., Rode, C., 2017. Towards the definition of indicators for assessment of indoor air quality and energy performance in low-energy residential buildings. *Energy Build.* 152, 492–502. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.054>

- Fantke, P., McKone, T.E., Tainio, M., Jolliet, O., Apte, J.S., Stylianou, K.S., Illner, N., Marshall, J.D., Choma, E.F., Evans, J.S., 2019. Global Effect Factors for Exposure to Fine Particulate Matter. *Environ. Sci. Technol.* 53, 6855–6868. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01800>
- Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F., Wang, X., 2016. The health effects of ambient PM_{2.5} and potential mechanisms. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 128, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.030>
- Fuller, R., Landrigan, P.J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G., Hanna, J., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., Kupka, R., Lanphear, B., Lichtveld, M., Martin, K., Mustapha, A., Sanchez-Triana, E., Sandilya, K., Schaeffli, L., Shaw, J., Seddon, J., Suk, W., Téllez-Rojo, M.M., Yan, C., 2022. Pollution and health: a progress update. *Lancet Planet. Health* 6, e535–e547. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0)
- Gautam, P., Ramirez, A., Bair, S., Arnott, W.P., Chow, J.C., Watson, J.G., Moosmüller, H., Wang, X., 2025. Sizing Accuracy of Low-Cost Optical Particle Sensors Under Controlled Laboratory Conditions. *Atmosphere* 16, 502. <https://doi.org/10.3390/atmos16050502>
- Gingrich, J.D., Graham, E., Boedicker, E., Patel, S., Corsi, R.L., Farmer, D.K., Vance, M.E., 2025. Performance of low-cost PM_{2.5} monitors during the HOMEChem experiment. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 75, 917–931. <https://doi.org/10.1080/10962247.2025.2552252>
- Groupe Spécialisé n° 14.5, 2024. VMC SIMPLE FLUX HYGROREGLABLE REGLES DE CALCULS POUR L'INSTRUCTION D'UNE DEMANDE D'AVIS TECHNIQUE (révision 03).
- GT ESSOC, non encore publié. Annexes Arrêté Résultats Minimaux QAI.
- Guyot, G., Walker, I.S., Sherman, M.H., 2018. Performance based approaches in standards and regulations for smart ventilation in residential buildings: a summary review. *Int. J. Vent.* 0, 1–17. <https://doi.org/10.1080/14733315.2018.1435025>
- Ielpo, P., Mangia, C., Marra, G.P., Comite, V., Rizza, U., Uricchio, V.F., Fermo, P., 2019. Outdoor spatial distribution and indoor levels of NO₂ and SO₂ in a high environmental risk site of the South Italy. *Sci. Total Environ.* 648, 787–797. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.159>
- Jayarathne, R., Liu, X., Ahn, K.-H., Asumadu-Sakyi, A., Fisher, G., Gao, J., Mabon, A., Mazaheri, M., Mullins, B., Nyaku, M., Ristovski, Z., Scorgie, Y., Thai, P., Dunbabin, M., Morawska, L., 2020. Low-cost PM_{2.5} Sensors: An Assessment of their Suitability for Various Applications. *Aerosol Air Qual. Res.* 20, 520–532. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.10.0390>
- Khreis, H., Bredell, C., Wai Fung, K., Hong, L., Szybka, M., Phillips, V., Abbas, A., Lim, Y.-H., Jovanovic Andersen, Z., Woodcock, J., Brayne, C., 2022. Impact of long-term air pollution exposure on incidence of neurodegenerative diseases: A protocol for a systematic review and exposure-response meta-analysis. *Environ. Int.* 170, 107596. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107596>
- Koffi, J., 2009. Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles.
- Kopp, P., Kirchner, S., Boulanger, G., Pernelet-Joly, V., Bayeux, T., Vergriette, B., Mandin, C., 2014. Étude exploratoire du coût socio-économique des polluants de l'air intérieur. ANSES Ed.

- Krzyzanowski, M., Quackenboss, J.J., Lebowitz, M.D., 1990. Chronic respiratory effects of indoor formaldehyde exposure. *Environ. Res.* 52, 117–125. [https://doi.org/10.1016/S0013-9351\(05\)80247-6](https://doi.org/10.1016/S0013-9351(05)80247-6)
- Logue, J.M., Price, P.N., Sherman, M.H., Singer, B.C., 2012. A method to estimate the chronic health impact of air pollutants in US residences. *Environ. Health Perspect.* 120, 216–222.
- Lu, F., Xu, D., Cheng, Y., Dong, S., Guo, C., Jiang, X., Zheng, X., 2015. Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in the Chinese population. *Environ. Res.* 136, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.06.029>
- Morantes, G., Jones, B., Molina, C., Sherman, M.H., 2024. Harm from Residential Indoor Air Contaminants. *Environ. Sci. Technol.* 58, 242–257. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07374>
- Morantes, G., Jones, B., Sherman, M., Molina, C., 2023a. A preliminary assessment of the health impacts of indoor air contaminants determined using the DALY metric. *Int. J. Vent.* 22, 307–316. <https://doi.org/10.1080/14733315.2023.2198800>
- Morantes, G., Jones, Benjamin, Sherman, Max, and Molina, C., 2023b. A preliminary assessment of the health impacts of indoor air contaminants determined using the DALY metric. *Int. J. Vent.* 22, 307–316. <https://doi.org/10.1080/14733315.2023.2198800>
- Morawska, L., Asbach, C., Patel, H., 2025. Application of PM_{2.5} low-cost sensors for indoor air quality compliance monitoring. *Aerosol Sci. Technol.* 59, 1210–1220. <https://doi.org/10.1080/02786826.2025.2457326>
- Nielsen, J.B., 1992. A new ventilation strategy for humidity control in dwellings.
- Poirier, B., Guyot, G., Woloszyn, M., Geoffroy, H., Ondarts, M., Gonze, E., 2021. Development of an assessment methodology for IAQ ventilation performance in residential buildings: An investigation of relevant performance indicators. *J. Build. Eng.* 43, 103140. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103140>
- Quackenboss, J.J., Lebowitz, M.D., Michaud, J.P., Bronnimann, D., 1989. Formaldehyde exposure and acute health effects study. *Environ. Int., Indoor Air Quality* 15, 169–176. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(89\)90023-8](https://doi.org/10.1016/0160-4120(89)90023-8)
- Rackes, A., Ben-David, T., Waring, M.S., 2018. Outcome-based ventilation: A framework for assessing performance, health, and energy impacts to inform office building ventilation decisions. *Indoor Air* 28, 585–603. <https://doi.org/10.1111/ina.12466>
- Rueda López, M.J., Guyot, G., Golly, B., Ondarts, M., Wurtz, F., Gonze, E., 2021. Relevance of CO₂-based IAQ indicators: Feedback from long-term monitoring of three nearly zero-energy houses. *J. Build. Eng.* 44, 103350. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103350>
- Saini, J., Dutta, M., Marques, G., 2020. Indoor Air Quality Monitoring Systems Based on Internet of Things: A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17, 4942. <https://doi.org/10.3390/ijerph17144942>
- Shabbir, M., Saeed, T., Saleem, A., Bhawe, P., Bergin, M., Khokhar, M.F., 2025. A paradigm shift: Low-cost sensors for effective air quality monitoring and management in developing countries. *Environ. Int.* 200, 109521. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109521>

- Sharma, S., Chandra, M., Kota, S.H., 2020. Health Effects Associated with PM_{2.5}: a Systematic Review. *Curr. Pollut. Rep.* 6, 345–367. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00155-3>
- Shehu, M.S., Umaru, I., Tukura, B.W., 2019. Health Impact Analysis of Some Outdoor Atmospheric Aerosols (Pm_{2.5}, SO₂, CO & CH₄) in F.C.T Abuja and Environs, Nigeria.
- Siwarom, S., Puranitee, P., Plitponkarnpim, A., Manuyakorn, W., Sinitkul, R., Vallipakorn, S.A.-O., 2017. Association of indoor air quality and preschool children's respiratory symptoms. *Asian Pac. J. Allergy Immunol.* 35, 119–126.
- Soni, V., Singh, P., Shree, V., Goel, V., 2018. Effects of VOCs on Human Health, in: Sharma, N., Agarwal, A.K., Eastwood, P., Gupta, T., Singh, A.P. (Eds.), *Air Pollution and Control*. Springer, Singapore, pp. 119–142. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7185-0_8
- Sousan, S., Koehler, K., Hallett, L., Peters, T.M., 2017. Evaluation of consumer monitors to measure particulate matter. *J. Aerosol Sci.* 107, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.02.013>
- Spengler, J.D., Ferris, B.G., Dockery, D.W., Speizer, F.E., 1979. Sulfur dioxide and nitrogen dioxide levels inside and outside homes and the implications on health effects research. *Environ. Sci. Technol.* 13, 1276–1280. <https://doi.org/10.1021/es60158a013>
- Sugiarto, E., Dwi Sundari, C., Chandra, I., Anugrahta Bangun, T., Ahmad Saefullah Sidik, D., Muhammad Rabbani, S., 2025. An Implementation of PM_{2.5} Microsensors in an Indoor Air Quality Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1448, 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1448/1/012010>
- Sun, J., Chen, Z., Gao, X., Yang, K., Niu, Z., Yan, C., Chen, H., Tang, H., Du, S., Fang, X., Hao, Y., Su, C., Cai, Y., Liu, N., Zhao, Z., 2025. Indoor concentrations and exposure levels of CO, SO₂, NO₂, and O₃ in Chinese residences, schools, and offices (2000–2021): A systematic review. *J. Hazard. Mater.* 494, 138452. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138452>
- Suriano, D., Prato, M., 2023. An Investigation on the Possible Application Areas of Low-Cost PM Sensors for Air Quality Monitoring. *Sensors* 23, 3976. <https://doi.org/10.3390/s23083976>
- Tassel, C., Jaffrezo, J.-L., Dominutti, P., Daellenbach, K.R., Darfeuil, S., Elazzouzi, R., Laj, P., Marsal, A., Mhadhbi, T., Dinh, V.N.T., Voiron, C., Houdier, S., Durif, M., Chatain, M., Francony, F., Cozic, J., Salque Moreton, G., Le Quilleuc, M., Gherzi, V., Gille, G., Mesbah, B., Stratigou, E., Zublena, M., Diémoz, H., Alastuey, A., D'Anna, B., Marchand, N., Conil, S., Gros, V., van Os, M.F., Salma, I., Mihalopoulos, N., Močnik, G., Džepina, K., Styszko, K., Hüglin, C., Querol, X., Prévôt, A.S.H., Favez, O., Siroux, V., Uzu, G., 2025. Oxidative potential of atmospheric particles in Europe and exposure scenarios. *Nature* 647, 109–114. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09666-9>
- US EPA, O., 2011. Exposure Factors Handbook (2011 Edition) [WWW Document]. URL (accessed 11.26.25).
- Vallero, D.A., 2008. 11 - Effects on Health and Human Welfare, in: Vallero, D.A. (Ed.), *Fundamentals of Air Pollution* (Fourth Edition). Academic Press, Burlington, pp. 359–396. <https://doi.org/10.1016/B978-012373615-4/50012-1>

- Vida, M., 2024. Modélisation du potentiel oxydant des aérosols : un indicateur du risque sanitaire (Theses). Université Paris Cité.
- Von Pettenkofer, M., 1858. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden.
- Weber, S., Uzu, G., Calas, A., Chevrier, F., Besombes, J.-L., Charron, A., Salameh, D., Ježek, I., Močnik, G., Jaffrezo, J.-L., 2018. An apportionment method for the oxidative potential of atmospheric particulate matter sources: application to a one-year study in Chamonix, France. *Atmospheric Chem. Phys.* 18, 9617–9629. <https://doi.org/10.5194/acp-18-9617-2018>
- Woloszyn, M., Kalamees, T., Olivier Abadie, M., Steeman, M., Sasic Kalagasidis, A., 2009. The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings. *Build. Environ.* 44, 515–524. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.017>
- World Health Organization, 2021. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.