



Rapport Tâche 3

Analyse de la durabilité des performances :
entre pérennité des technologies proposées et robustesse
aux sollicitations de l'occupant

07/2024

Auteurs : Ambre Marchand Moury et Adeline Mélois, Cerema
Juan Rios et Marc Legree, Aereco
Jérémy Depoorter, Anjos

Ce document est extrait des travaux réalisés dans le cadre du projet Performance 2
Les organismes présentés ci-dessous contribuent à ce projet :

Partenaires financiers du projet



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

Contacts : Etienne Marx, suivi technique du projet

Frédérique BIENVENU chargée des suivis administratifs et financiers

Ministère de la Transition Ecologique

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

Partenaires techniques du projet



Cerema

Contact : Adeline Mélois, adeline.melois@cerema.fr



Société ANJOS Ventilation

Contact : Jérémy Depoorter, jdepoorter@anjios.com



Société AERECO

Contact : Marc Legree, marc.legree@aereco.com



Université Savoie Mont Blanc - Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (USMB - LOCIE)



Contact : Evelyne Gonze, Evelyne.gonze@univ-smb.fr

Rapport établi par :

Date	Version	Commentaires
16/07/2024	v1	Rédaction du rapport par Ambre Marchand Moury et Adeline Mélois, Cerema, Juan Rios et Marc Legree, Aereco, et Jérémy Depoorter, Anjos
23/07/2024	v2	Relecture et validation par Alexandre Bacher, Cerema

Notice analytique :

Références	Informations
Commanditaire :	ADEME 500 Route des Lucioles 06560 Valbonne
Objet de l'étude :	Retour d'expérience sur des systèmes de ventilation intelligents hygro-réglables installés dans des bâtiments occupés depuis dix ans
Résumé de la commande :	Prestations réalisées dans le cadre de l'appel à projet "Vers des bâtiments responsables à l'horizon 2020" - Edition 2020. Réponse technique et financière présentée à l'ADEME
Référence du dossier :	Convention de financement ADEME / Partenaires du projet n°2004C0014 notifiée le 08/07/2020
Communicabilité :	<input type="checkbox"/> Libre (avec acceptation du commanditaire dans le contrat) <input checked="" type="checkbox"/> Contrôlée (communiquée avec l'autorisation du commanditaire) <input type="checkbox"/> Confidentielle
Pilote du projet :	Cerema: Adeline Mélois Adeline.melois@cerema.fr
Constitution de l'équipe :	Cerema, Anjos, Aereco, USMB-LOCIE
Mots clés :	Ventilation, Performance, Evaluation, Logement

Liste des destinataires :

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

Résumé :

La tâche 3 vise à analyser les données issues des différentes campagnes du projet pour plusieurs objectifs : (1) Qualifier la durabilité des performances des systèmes de ventilation hygroréglable, (2) Mieux comprendre l'interaction entre le système de ventilation et la qualité de l'air intérieur et (3) Expliquer les performances ou contre-performances observées par une analyse approfondie des comportements des occupants et des résultats de mesures.

Analyse bibliographique

L'analyse des études sur la durabilité des systèmes de ventilation révèle une absence notable de données sur ce sujet, avec seulement la Suède qui impose une inspection obligatoire tous les 3 ou 6 ans depuis 1991. Cette analyse met également en lumière l'absence d'études combinant des mesures à réception et en occupation plusieurs années après la réception, limitant ainsi l'évaluation de l'évolution des performances dans le temps. L'analyse des approches performantielles et des approches de modélisation existantes montre que la plupart des réglementations se basent sur les taux de renouvellement d'air et les débits d'air. Des indicateurs ont été identifiés comme

pertinents pour la QAI, basés sur leur impact sur la santé et la méthode de mesure définie : CO₂ et humidité relative, incontournables pour qualifier les performances des systèmes de ventilation, en particulier hygroréglable, le formaldéhyde, identifié comme polluant ubiquitaire de l'air intérieur lors des campagnes nationales logement, avec un risque de concentration importante, les COV ainsi que les particules fines (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁). L'analyse de différentes études, dont celles produites par l'Annexe 68 et celles de l'OQAI a permis de proposer différents seuils pour les divers polluants retenus, basés notamment sur des études épidémiologiques et toxicologiques, et des campagnes de mesures grande échelle dans les logements.

Durabilité des systèmes de ventilation hygroréglables

La caractérisation de l'évolution des performances repose sur la comparaison des résultats théoriques, des données à réception (Performance 1) et après 15 années d'utilisation (Performance 2). Les analyses se concentrent sur l'évolution des performances énergétiques et des paramètres de confort (CO₂ et humidité relative). Après 15 ans, les systèmes hygroréglables continuent de moduler correctement les débits d'air en fonction de l'humidité. Les terminaux répondent aux sollicitations en humidité comme initialement. Malgré des variations d'occupation et des conditions environnementales, les débits d'air extraits restent cohérents avec ceux de Performance 1 et les consommations énergétiques sont similaires. Concernant les risques de condensation, seul un appartement a dépassé les seuils d'humidité en raison d'un dégât des eaux. Pour le CO₂, seuls deux appartements montrent des concentrations élevées, avec un risque de confinement confirmé dans l'un d'eux. Globalement, les concentrations de CO₂ restent sous le seuil de 1000 ppm, comme dans Performance 1.

Caractérisation de la QAI dans les logements étudiés

Au-delà de la durabilité du système, ce projet cherche à caractériser les performances des systèmes hygroréglables B étudiés et installés sur les 2 bâtiments de l'étude en matière de QAI, en proposant des analyses complémentaires sur le CO₂ et l'humidité relative, et en apportant des résultats concernant les concentrations en COV, formaldéhyde et PM_{2.5}. Les analyses montrent une augmentation des concentrations de CO₂ en période de chauffe, particulièrement la nuit, avec quelques situations de confinement dans des chambres. L'humidité relative est généralement satisfaisante, malgré quelques cas de sécheresse dans certaines chambres et séjours. Les résultats de formaldéhyde sont globalement bons mais limités par des mesures à court terme et saisonnières. Les COV sont complexes à évaluer, avec des concentrations plus élevées dès utilisation de produits émissifs, notamment encens, désodorisants ou bougies parfumées de façon quotidienne. On identifie cependant une propagation moins importante dans les autres pièces lorsque la ventilation fonctionne correctement. Les concentrations de PM_{2.5} sont généralement inférieures aux taux extérieurs sauf dans les logements fumeurs, où les concentrations dépassent fréquemment les valeurs guides. L'utilisation de bougies et d'encens augmente également les PM_{2.5}.

Analyse des situations particulières

Chaque situation spécifique pour laquelle des concentrations élevées de certains paramètres ont été observées a été analysée en détail, en tenant compte du fonctionnement du système de ventilation, des déclarations des occupants et des diagnostics initiaux. L'analyse des débits totaux extraits montrent que la ventilation hygroréglable s'adapte au cas de sur-occupation, avec débits plus élevés, permettant un

bon renouvellement d'air et de bonnes performances en matière de QAI, malgré des concentrations élevées en COV dues à l'utilisation de produits parfumés. En revanche, la quasi-absence de production d'humidité, entraînant un logement globalement en sous-débit, entraîne un confinement et des concentrations élevées en COV. Des situations de confinement nocturne dans des chambres ont été identifiées, et correspondent soit à un fonctionnement limité de certaines entrées d'air identifiées en laboratoire, soit à une sur-occupation de la chambre. On retrouve des cas de concentrations en COV qui correspondent à une utilisation de nombreux produits parfumés, et des fortes concentrations de PM_{2.5} dans les logements fumeurs. Ces analyses montrent comment les spécificités de chaque logement et les habitudes des occupants influencent la QAI, malgré un fonctionnement majoritairement bon du système de ventilation hygroréglable.

Analyse des comportements des occupants

Le recueil d'informations auprès des occupants visait à comprendre leurs habitudes de vie influençant la QAI via des entretiens semi-directifs, préparés avec une psychologue sociale pour minimiser les biais. Les questions ouvertes et fermées visaient à identifier leurs connaissances sur la QAI et les déterminants liés à leurs activités. Les occupants devaient aussi consigner les actions ponctuelles influençant la QAI dans un carnet de bord. Une analyse des mots utilisés pour parler de la QAI a montré que les occupants mentionnent principalement des polluants extérieurs, ignorant souvent ceux générés à l'intérieur (tabac, produits d'entretien, bougies, etc.). Ceux qui estiment avoir une mauvaise QAI blâment les apports extérieurs, tandis que ceux qui pensent avoir une bonne QAI l'attribuent à un bon renouvellement d'air. La connaissance du lien entre ventilation et renouvellement d'air est bien comprise, surtout grâce aux interventions professionnelles et à la documentation reçue dans le cadre du projet. Cependant, les connaissances spécifiques sur les composantes et le fonctionnement de la ventilation restent limitées.

L'Isle d'Abeau, le 23 juillet 2024

SOMMAIRE

TABLE DES ILLUSTRATIONS	4
Liste des figures	4
Liste des tableaux	10
1 OBJECTIFS	12
2 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	13
2.1 Etat de l'art des études portant sur la durabilité des installations de ventilation : pérennité technologique des systèmes et résistance aux sollicitations de l'occupant	13
2.2 Etat de l'art des réglementations introduisant des objectifs de durabilité des installations de ventilation	15
2.3 Etat de l'art des approches performantielles de caractérisation in situ pour sélection des polluants complémentaires à mesurer en phase 3, et sélection des indicateurs portant sur la QAI (a priori indicateurs basés sur l'humidité et le CO ₂ complétés par des indicateurs sanitaires)	17
2.4 Sélection des indicateurs portant sur la performance énergétique (a priori débit déperditif et consommation électrique des ventilateurs)	30
2.5 Conclusion	31
3 DESCRIPTION DES DONNEES ANALYSEES	32
3.1 Données issues des campagnes de mesures avec les NEMos	32
3.2 Données issues des mesures en continue par des capteurs embarqués	36
3.3 Données issues des recueils d'informations auprès des occupants	41
3.4 Données issues des diagnostics ventilation réalisés en tâche 1	42
3.5 Données issues de la caractérisation en laboratoire des performances des terminaux de ventilation (tâche 2)	42
3.6 Définitions des périodes d'études	42
3.7 Synthèse	43
4 EVALUATION DE LA DURABILITE DES SYSTEMES DE VENTILATION HYGROREGLABLES ETUDIES	45
4.1 Indicateurs liés à l'énergie	46
4.2 Fonctionnement hygroréglable des systèmes de ventilation	50
4.3 Performance du système de ventilation vis-à-vis de la concentration en CO ₂	66
4.4 Conclusions	80

5	PERFORMANCE MULTICRITERE DES SYSTEMES DE VENTILATION HYGROB EN PLACE	82
5.1	Définition de la QAI	82
5.2	Etat des lieux de la QAI dans les logements au regard des connaissances actuelles	83
6	ANALYSE APPROFONDIE DES SITUATIONS PARTICULIERES	133
6.1	Site de Paris	133
6.2	Site de Villeurbanne	154
7	ANALYSE DES COMPORTEMENTS DES HABITANTS	158
7.1	Contexte	158
7.2	Résultats	161
	CONCLUSIONS	165
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	167
	ANNEXES	170
	Annexe A : caractéristiques techniques des capteurs utilisés pour les paramètres de qualité d'air intérieur	170
	Annexe B : Données techniques du caisson de ventilation – Site performance 2	174
	Annexe C : Fiches-appartement	175

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 1 : Percentage of systems in each category that conformed to the regulation that applied when the system was brought into operation – Engdahl, 1998 [1]	14
Figure 2 : Illustration d’une évolution du taux de CO ₂ et de la limite à 2000 ppm – Source : règles de calculs pour l’instruction d’un avis technique sur la VMC hygroréglable [13]	22
Figure 3 : Distributions des logements en fonction des concentrations en formaldéhyde (µg/m ³) à l’intérieur des logements (graph du haut) et à l’extérieur (graph du bas) - Source : Campagne National Logement 1, OQAI	28
Figure 4 : Distributions des logements en fonction des concentrations en particules PM ₁₀ (graph du haut) et PM _{2.5} (graph du bas) en µg/m ³ à l’intérieur des logements - Source : Campagne National Logement 1, OQAI	29
Figure 5 : Distributions des logements en fonction de la concentration en dioxyde de carbone (ppm) moyennée sur la semaine (graph du haut) et moyennes glissantes sur 1 heure (graph du bas) - Source : Campagne Nationale Logement 1, OQAI.....	30
Figure 6 : Photo chambre avec positionnement entrée d’air et capteur embarqués – logement V4	38
Figure 7 : Valeurs de saturation des capteurs CO ₂ – Villeurbanne (BR = chambre ; LV =séjour)	39
Figure 8 : Valeurs de saturation des capteurs CO ₂ - Paris.....	39
Figure 9 : Evolution temporelle de la concentration en CO ₂ – P6 en Chambre 1	39
Figure 10 : Evolution temporelle de l’ouverture du volet, détection de présence, pression et débit (Q) – P14 en Cuisine.....	40
Figure 11 : Consommation d’énergie cumulée pour le ventilateur de Paris – Performance 2	47
Figure 12 : Puissance moyenne calculée pour le ventilateur de Paris – Performance 1	48
Figure 13 : Comparaison de débits déperditifs évalués dans Performance 2 aux débits correspondants – Site de Villeurbanne.....	49
Figure 14 : Comparaison de débits déperditifs évalués dans Performance 2 aux résultats de Performance 1, aux débits correspondants autoréglables et aux débits théoriques évalués par le logiciel SIREN – Site de Paris	50
Figure 15 : Exemples de différence de pression mesurée sur une bouche cuisine à Paris (gauche) et une bouche Salle de Bain à Villeurbanne (droite)	51
Figure 16 : Distribution des différences de pression mesurées aux bouches d'extraction - Site de Paris.....	52
Figure 17 : Réponse hygroscopique d’une bouche cuisine en conditions réelles pendant 1 an – Appartement P14 – Paris	55
Figure 18 : Réponse hygroscopique d’une bouche de salle de bain en conditions réelles pendant 1 an – Appartement V1 - Villeurbanne.....	56

Figure 19 : Réponse hygroscopique d'une entrée d'air de séjour en conditions réelles pendant 1 an – Appartement P3 – Paris	57
Figure 20 : Réponse hygroscopique d'une entrée d'air de chambre en conditions réelles pendant 1 an – Appartement V5 - Villeurbanne.....	58
Figure 21 : Synthèse de l'analyse du fonctionnement des bouches d'extraction et des entrées d'air en conditions réelles –Site de Paris	58
Figure 22 : Synthèse de l'analyse du fonctionnement des bouches d'extraction (gauche) et des entrées d'air (droite) en conditions réelles – Site de Villeurbanne	59
Figure 23 : Débits d'extraction théoriques par typologie de logement (résultats de simulation selon scénarios GS14.5) réalisé par Aereco pour des appartements de type F1 à F5 en occupation maximale d'après les scénarios QAI de Mathis	60
Figure 24 : Distribution des débits extraits totaux des logements - site de Paris.....	60
Figure 25 : Débits extraits totaux des logements - site de Villeurbanne	61
Figure 26 : Distribution des occurrences d'apparition de condensation calculée pour une humidité supérieur à 85% pendant plus d'une heure - Site de Paris	62
Figure 27 : Distribution des occurrences d'apparition de condensation calculée pour une humidité supérieur à 85% pendant plus d'une heure - Site de Villeurbanne	63
Figure 28 : Photos de l'appartement avec le dégât des eaux - Paris	65
Figure 29 : Nombre d'heures de saturation de capteurs CO ₂ embarqués - site de Paris	66
Figure 30 : Nombre d'heures de saturation de capteurs CO ₂ embarqués - site de Villeurbanne	67
Figure 31 : Valeurs du 85 ^{ème} percentile des valeurs de CO ₂ mesurées par les NEMOs, ou valeurs max carte Aereco si pas de NEMO.....	68
Figure 32 : Valeurs de l'indicateur du GS 14.5 de CO ₂ cumulé en base 2000 selon l'hypothèse pessimiste pour les séjours et chambres à Paris (utilisation valeurs 85 ^{ème} percentile données NEMO).....	68
Figure 33 : Valeurs de l'indicateur du GS 14.5 de CO ₂ cumulé en base 2000 selon l'hypothèse péjorative pour les séjours et chambres à Villeurbanne (utilisation valeurs 85 ^{ème} percentile données NEMO)	69
Figure 34 : Valeur de l'indicateur du GS 14.5 de CO ₂ cumulé en base 2000 en affectant la valeur de 2100 ppm à chaque donnée de capteur saturé pour les séjours et chambres à Paris.....	70
Figure 35 : Exemple de courbes d'évolution du CO ₂ sur une année (min,max, médiane par jour) dans le séjour (haut) et la chambre (bas) – Appartement P9 - Paris	72
Figure 36 : Exemple de courbes d'évolution du CO ₂ sur une année (min,max, médiane par jour) dans le séjour (gauche) et la chambre (droite) – Appartement V3 – Villeurbanne	73
Figure 37 : Exemples de distribution des concentrations de CO ₂ sur la période de chauffe dans le logement P3 – Paris	74
Figure 38 : Exemples de distribution des concentrations de CO ₂ sur la période de chauffe dans le logement V2 – Villeurbanne	74

Figure 39 : Exemples de distribution des concentrations de CO ₂ sur la période de chauffe dans une chambre à Paris (appartement P3 - gauche) et à Villeurbanne (appartement V2 – droite).....	75
Figure 40 : Représentation des dynamiques de CO ₂ avec ou sans ventilation (suite à une panne) dans Performance 2 – Site Paris, appartement 15, cuisine.....	77
Figure 41 : Distribution des concentrations de CO ₂ par mois dans la chambre principale (dont le mois de panne de ventilation du 15 avril au 14 mai) pour tout appartement confondu	78
Figure 42 : Distribution des concentrations de CO ₂ dans les chambres par mois à Paris, intégrant la période de panne (4 ^{ème} boîte à moustache)	79
Figure 43 : Distribution des concentrations en CO ₂ sur l’année 2022 dans les différentes pièces des appartements à Paris	84
Figure 44 : Distribution des concentrations en CO ₂ sur l’année 2022 dans les chambres principales des appartements à Villeurbanne	84
Figure 45 : Distribution des concentrations de CO ₂ sur une année dans l'appartement P3 (T4) – site de Paris	85
Figure 46 : Focus sur la différence de répartition des valeurs de CO ₂ en période de chauffe et hors période de chauffe dans l'appartement P3 (T4) – site de Paris	85
Figure 47 : Distribution des concentrations en CO ₂ la nuit en période de chauffe sur l’année 2022 dans les chambres principales des appartements à Villeurbanne	86
Figure 48 : Distribution des concentrations en CO ₂ la nuit en période de chauffe sur l’année 2022 dans les chambres principales des appartements à Paris	86
Figure 49 : Focus sur la différence de répartition des valeurs de CO ₂ entre la nuit et la journée complète sur une année dans l'appartement P3 (T4) – site de Paris	87
Figure 50 : Focus sur la différence de répartition des concentrations de CO ₂ entre période de chauffe et hors période de chauffe une année dans l’appartement V5 (T2) - séjour à gauche, chambre à droite	87
Figure 51 : Focus sur la différence de répartition des valeurs de CO ₂ en période de chauffe la nuit et toute la période année 2022 dans l'appartement P3 (T4)	88
Figure 52 : Focus sur la différence de répartition des valeurs de CO ₂ entre la nuit et la journée complète sur une année dans l’appartement V5 (T2) - séjour à gauche, chambre à droite	88
Figure 53 : Répartition des valeurs par tranche de 100 ppm entre 2000 et 5000 ppm dans le séjour et la chambre de l’appartement P9 durant les deux campagnes de mesures ...	90
Figure 54: Pourcentage de temps où le CO ₂ dépasse 800 et 1000 ppm durant la 1ère campagne de mesures réalisées avec les NEMOs.....	91
Figure 55 : Pourcentage de temps où le CO ₂ dépasse 800 et 1000 ppm durant la 2ème campagne de mesures réalisées avec les NEMOs.....	92
Figure 56 : Pourcentage de temps où le CO ₂ dépasse 1500 ppm la nuit durant la saison de chauffe à Paris	94
Figure 57 : Distribution de l'humidité relative dans l'appartement P3 au cours de l'année 2022, au regard des seuils 40, 75 et 85%.....	95

Figure 58 : Distribution de l'humidité relative par pièce pour chacun des appartements suivis à Paris	96
Figure 59 : Distribution de l'humidité relative pour les séjours et chambre des appartements suivis à Villeurbanne	97
Figure 60 : Distribution de l'humidité relative pour les pièces humides des appartements suivis à Villeurbanne	97
Figure 61 : Pourcentage de temps passé avec une humidité relative inférieure à 40% - Paris	98
Figure 62 : Pourcentage de temps passé avec une humidité relative inférieure à 40% - Villeurbanne	98
Figure 63 : Evolution temporelle du formaldéhyde dans l'appartement V6 par campagne de mesures et par pièce	100
Figure 64 : Distribution des concentrations de formaldéhyde mesurées dans le logement V6, par campagne et par pièce, et comparaison au seuil de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	101
Figure 65 : Pourcentage de temps où la valeur de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est dépassée dans les pièces instrumentées de chaque logement lors de la 1 ^{ère} campagne hivernale QAI	102
Figure 66 : Pourcentage de temps où la valeur de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est dépassée dans les pièces instrumentées de chaque logement lors de la 2 ^{ème} campagne hivernale QAI	102
Figure 67 : Distribution des valeurs de formaldéhyde dans l'appartement P1 par pièce et par campagne	103
Figure 68 : Table de corrélation entre les capteurs de COV - Projet Performance 2 – Intercomparaison Tâche 2	105
Figure 69 : Distribution des écarts entre les concentrations de COV mesurées par les capteurs Aereco et NEMOs sur la campagne hivernale QAI 1 (gauche) et 2 (droite)	105
Figure 70 : Evolution des valeurs mesurées de COV légers (NEMOs) et COV totaux (Aereco) dans la chambre du P1 sur 24heures	106
Figure 71 : Evolution temporelle des COV totaux (Aereco) pour chaque pièce - Appartement P1- Site de Paris	107
Figure 72 : Evolution temporelle des COV légers (NEMOs) par pièce et par campagne - Appartement P1- Site de Paris	108
Figure 73 : Comparaison des COV légers NEMOs de la 1 ^{ère} campagne avec les COV totaux Aereco sur l'année 2022 et sur la période de chauffe	109
Figure 74 : Comparaison des COV légers NEMOs de la 2 ^{ème} campagne avec les COV totaux Aereco sur l'année 2022 et sur la période de chauffe	109
Figure 75 : Pourcentage de temps où les COV légers (NEMOs) dépassent le seuil de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par pièce et par appartement durant la 1 ^{ère} campagne QAI	111
Figure 76 : Pourcentage de temps où les COV légers (NEMOs) dépassent le seuil de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par pièce et par appartement durant la 2 ^{ème} campagne QAI	111
Figure 77 : Distribution des valeurs au-dessus de laquelle se trouvent 30% des valeurs de COV– Paris	113
Figure 78 : Distribution des concentrations en COV par mois, incluant la période de panne de la ventilation pour tout appartement confondu	114

Figure 79 : Evolution temporelle des PM _{2.5} dans le séjour de l'appartement P3 et en extérieur durant l'année 2022	116
Figure 80 : Distribution des concentrations en PM _{2.5} dans toutes les pièces de l'appartement P3 durant l'année 2022	117
Figure 81 : Comparaison des PM _{2.5} NEMOs de la 1ère campagne avec les données Aereco sur l'année 2022 et sur la période de chauffe	118
Figure 82 : Comparaison des PM _{2.5} NEMOs de la 2 ^{me} campagne avec les données Aereco sur l'année 2022 et sur la période de chauffe	118
Figure 83 : Pourcentage de temps de dépassement de la valeur de 5 µg/m ³ de PM _{2.5} pour chaque pièce des appartements de Paris en 2022	119
Figure 84 : Pourcentage de temps de dépassement de la valeur de 15 µg/m ³ de PM _{2.5} pour chaque pièce des appartements de Paris en 2022	120
Figure 85 : Moyenne glissante sur 1heure de la concentration en PM _{2.5} par pièce dans chaque appartement de Paris durant l'année 2022.....	121
Figure 86 : Moyenne des concentrations en PM _{2.5} par pièce dans chaque appartement de Paris la nuit sur l'année 2022	121
Figure 87 : Pourcentage de temps où les PM _{2.5} dépassent 5 µg/m ³ dans la campagne 1..	123
Figure 88 : Pourcentage de temps où les PM _{2.5} dépassent 5 µg/m ³ dans la campagne 2..	123
Figure 89 : Pourcentage de temps où les PM _{2.5} dépassent 15 µg/m ³ dans la campagne 1	123
Figure 90 : Pourcentage de temps où les PM _{2.5} dépassent 15 µg/m ³ dans la campagne 2	123
Figure 91 : Pourcentage de temps où les PM _{2.5} dépassent 150 µg/m ³ dans la campagne 1	124
Figure 92 : Pourcentage de temps où les PM _{2.5} dépassent 150 µg/m ³ dans la campagne 2	124
Figure 93 : Pourcentage de temps où la concentration intérieure en PM _{2.5} est inférieure à celle en extérieure pour chaque pièce des appartements instrumentés à Paris sur l'année 2022.....	126
Figure 94 : ACP sur les données NEMOs issues des campagnes 1 et 2 dans les logements non-fumeurs, axes 1 et 2	127
Figure 95 : ACP sur les données NEMOs issues des campagnes 1 et 2 dans les logements non-fumeurs, axes 3 et 4	129
Figure 96 : ACP sur les données NEMOs issues des campagnes 1 et 2 dans les logements fumeurs, axes 1 et 2	130
Figure 97 : ACP sur les données NEMOs issues des campagnes 1 et 2 dans les logements fumeurs, axes 3 et 4	131
Figure 98 : Comparaison des distributions des débits totaux extraits mesurés entre Performance 1 et Performance 2– site de Paris	133
Figure 99 : Comparaison des débits d'extraction par pièce entre un T3 sous ventilé (P7) et un T3 correctement ventilé (P9) - Site de Paris	134
Figure 100 : Comparaison des pics d'humidité relative entre les appartements P7 et P9 – site de Paris.....	135
Figure 101 : Etude du confinement de l'appartement sous-ventilé – P7 – site de Paris....	135

Figure 102 : Distribution détaillée des valeurs de CO ₂ mesurées la nuit dans la chambre – Appartement P7 – Site de Paris	136
Figure 103 : Distribution des mesures de COV réalisées par les capteurs embarqués en 2022 - site de Paris	137
Figure 104 : Evolution temporelle des concentrations de COV _{total} dans le séjour de l'appartement P7	138
Figure 105 : Distribution des COV par pièces dans l'appartement P6	139
Figure 106 : Fonctionnement réel de la bouche cuisine - Appartement P10 - Site de Paris	140
Figure 107 : Comparaison des niveaux d'humidité relative dans deux appartements de type T3 – site de Paris	140
Figure 108 : Distribution des températures relevées par pièce - Site de Paris.....	141
Figure 109 : Synthèse des temps passés avec des concentrations de CO ₂ Supérieures à 800 et 1000 ppm la nuit en période de chauffe – site de Paris	142
Figure 110 : Fonctionnement de la bouche d'extraction en salle de bain – Appartement P1 - Paris.....	143
Figure 111 : Différence de pression mesurée aux bouches d'extraction - Appartement P1 - Paris.....	143
Figure 112 : Distribution détaillée des valeurs de CO ₂ mesurées la nuit dans la chambre – Appartement P4 – Site de Paris	144
Figure 113 : Evolution temporelle du formaldéhyde durant les campagnes hivernales QAI	145
Figure 114 : Distributions des concentrations en COV dans la chambre et le séjour du P4	146
Figure 115 : Pourcentage de temps de dépassement du second seuil de CO ₂ considéré dans l'indice Icone, 1500 ppm, la nuit dans les chambres en période de chauffe à Paris...	147
Figure 116 : Distribution des concentrations de formaldéhyde dans l'appartement P8 ...	148
Figure 117 : Evolution temporelle des COV _{légers} durant la campagne de mesure NEMOs dans les pièces de vie de l'appartement P8	148
Figure 118 : Evolution temporelle des COV _{total} durant l'année 2022 dans la chambre du P8	149
Figure 119 : Comparaison des distributions de valeurs entre les COV _{légers} NEMOs sur la campagne C1 et les COV _{total} des capteurs embarqués Aereco de l'année 2022 dans l'appartement P8	150
Figure 120 : Evolution des concentrations en PM _{2.5} sur l'année 2022 dans le séjour et la chambre de l'appartement P8	151
Figure 121 : ACP sur les paramètres mesurés par le NEMO dans le séjour de l'appartement P8 à la 1 ^{ère} campagne.....	151
Figure 122 : Distribution des concentrations en CO ₂ en période de chauffe et hors chauffe dans les pièces de vie de l'appartement P9 sur l'année 2022.....	153
Figure 123 : Situation de la chambre instrumentée - Appartement V1 - Site de Villeurbanne	154

Figure 124 : Situation de la chambre instrumentée - Appartement V2 - Site de Villeurbanne	155
Figure 125 : Distribution des valeurs de formaldéhyde dans les pièces de vie de l'appartement V2	155
Figure 126 : Evolution temporelle des COVlégers NEMOs dans les pièces de vie de l'appartement V2	156
Figure 127 : Situation de la chambre instrumentée - Appartement V5 - Site de Villeurbanne	157
Figure 128 : Situation de la chambre instrumentée - Appartement V6 - Site de Villeurbanne	157

Liste des tableaux

Tableau 1 : Listes des pays européennes disposant d'exigences réglementaires pour les installations de ventilation à réception	16
Tableau 2 : Niveaux de concentration en CO ₂ et leurs effets sur la santé d'après une analyse de la littérature. Source : Poirier et al. [9]	18
Tableau 3 : Interprétation des résultats de l'indice de confinement (ICONE). Source : CSTB, Guide d'application pour la surveillance du confinement de l'air	23
Tableau 4 : Périodes d'analyse considérées pour les 2 sites.....	42
Tableau 5 : Synthèse des données recueillies dans Performance 2	43
Tableau 6 : Principales limites associées aux différentes données recueillies dans Performance 2.....	44
Tableau 7 : Synthèse de la conformité des différences de pression aux bouches d'extraction – Paris.....	52
Tableau 8 : Synthèse de la conformité des pressions aux bouches d'extraction – Villeurbanne	53
Tableau 9 : Synthèse des résultats de la caractérisation en laboratoire du fonctionnement hygrorégulables des bouches d'extraction –Site de Paris	53
Tableau 10 : Synthèse des résultats de la caractérisation en laboratoire du fonctionnement hygrorégulables des bouches d'extraction –Site de Villeurbanne.....	54
Tableau 11 : Synthèse des résultats de la caractérisation en laboratoire du fonctionnement hygrorégulables des entrées d'air –Site de Paris.....	54
Tableau 12 : Synthèse des résultats de la caractérisation en laboratoire du fonctionnement hygrorégulables des entrées d'air–Site de Villeurbanne	54
Tableau 13 : Nombre d'heures sur la période de chauffe de dépassement du seuil 75% d'humidité relative –Site de Paris	64
Tableau 14 : Nombre d'heures sur la période de chauffe de dépassement du seuil 75% d'humidité relative d'extraction –Site de Villeurbanne.....	64
Tableau 15 : Pourcentage de temps avec une concentration en CO ₂ supérieure à 1000 ppm sur la période de chauffe– Site de Paris.....	76

Tableau 16 : Pourcentage de temps avec une concentration en CO ₂ supérieure à 1000 ppm sur la période de chauffe – Site de Villeurbanne.....	76
Tableau 17 : Concentrations en CO ₂ (ppm) en dessous desquelles chaque pièce se situe durant un pourcentage de temps défini à Paris en saison de chauffe la nuit (0h – 6h)	89
Tableau 18 : Concentrations en CO ₂ (ppm) en dessous desquelles chaque pièce se situe durant un pourcentage de temps défini à Villeurbanne en saison de chauffe la nuit (0h – 6h)	90
Tableau 19 : Indice ICONNE annuels calculés de 0 à 6h pour chaque chambre - Paris.....	93
Tableau 20 : Indice ICONNE annuel calculé de 0 à 6h pour chaque chambre - Villeurbanne.	94
Tableau 21 : Coefficient de corrélation entre les COV mesurés in situ par les NEMOs et par les cartes Aereco, après recalage temporel.....	105

1 OBJECTIFS

La tâche 3 s'appuie sur les résultats de la tâche 1 - à savoir les campagnes de mesures réalisées dans les appartements in situ, et ceux issus de la tâche 2 – qui qualifient la performance des terminaux de ventilation en laboratoire et la fiabilité des capteurs utilisés pendant la tâche 1.

Cette tâche a pour objet l'analyse de l'ensemble des données citées ci-dessus, selon plusieurs objectifs :

- **Qualifier la durabilité des performances du système de ventilation**

Lors de la réception des deux bâtiments suivis dans Performance 2, il y a une quinzaine d'années, les performances des systèmes de ventilation avaient été étudiées sous les aspects énergie et Qualité d'Air Intérieur - QAI (qualifiée via l'humidité relative et le dioxyde de carbone). Il s'agit ici de caractériser leur évolution au cours du temps, en utilisant les mêmes indicateurs qu'à l'époque, lorsque les données le permettent. Afin de compléter l'étude, nous nous attachons également à comparer les performances actuelles aux performances théoriques (décrites dans l'avis technique correspondant).

- **Etendre l'étude de la performance du système de ventilation à d'autres polluants de l'air intérieur**

L'objectif est de mieux connaître l'interaction entre le système de ventilation hygroréglable B et la qualité de l'air intérieur - cette fois-ci définie plus largement qu'à travers le CO₂/humidité, avec la prise en compte de polluants comme les composés organiques volatils, en particulier le formaldéhyde, et les particules fines.

- **Expliquer les raisons des performances ou contre-performances du système**

Lorsque des dysfonctionnements de certains composants de la ventilation sont observés sur site, ou dans des cas où des niveaux de pollution intérieure significatifs sont observés, une analyse approfondie des comportements des occupants et des résultats de la phase laboratoire est réalisée, pour apporter des explications aux situations rencontrées.

2 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Etat de l'art des études portant sur la durabilité des installations de ventilation : pérennité technologique des systèmes et résistance aux sollicitations de l'occupant

L'analyse de la littérature Française, Européenne et mondiale sur la durabilité des systèmes de ventilation a mis en avant l'absence d'études et de données sur cette thématique. Seules quelques initiatives ont été identifiées, et synthétisées dans ce paragraphe.

En Suède, l'inspection des systèmes de vérification tous les 3 ans ou 6 ans (voir paragraphe 2.2), obligatoire pour la majorité des bâtiments depuis 1991, a permis de réaliser un état des lieux des performances de la ventilation dans les bâtiments existants. Engdahl [1] a analysé en 1998 les résultats des inspections, réalisées sur 5625 systèmes de ventilation dans des bâtiments de logement collectifs, des bureaux et des écoles. Cette étude concerne tous les types de systèmes de ventilation : naturelle, mécanique simple flux par extraction et double flux (avec ou sans échangeur de chaleur). Les inspections ont été réalisées en s'appuyant sur des check-lists, qui comprennent 5 catégories de vérification :

- documents (plans, instructions d'entretien et de maintenance, point de vue des habitants),
- propreté du système de soufflage,
- propreté du système d'extraction,
- état de fonctionnement du système,
- environnement intérieur (température, odeur, humidité, bruit).

Des mesures de débit aux bouches ont également été réalisées. Pour chaque type de bâtiment et chaque type de système, la extraite de l'étude d'Engdahl présente la part ayant été déclarée conforme à la réglementation en vigueur au moment de la mise en service du système de ventilation.

Pour chaque type de système de ventilation, Engdahl présente les principales causes de non-conformité des systèmes. Il montre notamment que les débits trop faibles représentent la plus grande cause de non-conformité pour les systèmes mécaniques dans les logements. Cela est souvent lié au manque d'entretien des conduits d'extraction (souvent installés en grenier, difficiles d'accès), ou à des défauts du ventilateur (courroies usées ou cassées).

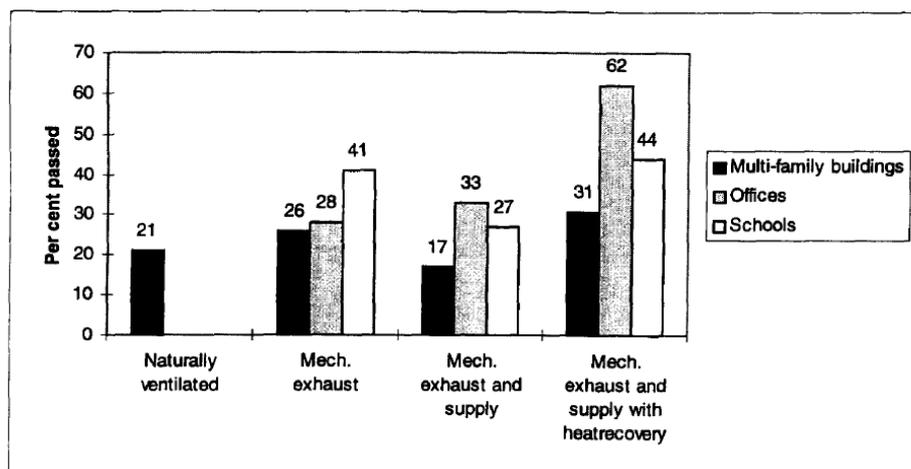


Figure 1 : Percentage of systems in each category that conformed to the regulation that applied when the system was brought into operation – Engdahl, 1998 [1]

Dans le cas des ventilations simple flux par extraction, les amenées d'air sont souvent fermées ou supprimées par les occupants, car elles engendrent du bruit, de l'humidité et de la saleté. Pour les systèmes double flux, le problème le plus souvent relevé est l'encrassement du système d'insufflation, souvent lié à un défaut d'entretien des filtres ou de la prise d'air.

En France, des campagnes menées à l'échelle nationale permettent d'obtenir des informations concernant :

- La qualité de la ventilation à réception via l'analyse des contrôles des règles de la construction (CRC). L'analyse réalisée par Jobert en 2012 [2] a mis en évidence des taux de non-conformité dans les logements très élevés : 44% des logements collectifs et 68% des maisons individuelles de cette étude, comprenant 1287 logements, ne respectent pas les exigences réglementaires à réception.
- La qualité de la ventilation dans des bâtiments existants, grâce notamment à la campagne logement menée par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) [3]. Dans cette étude, 80% des logements construits après 1975 (tout système de ventilation confondu) se sont avérés non-conformes aux réglementations en vigueur. Lorsque l'on considère le débit total minimal, c'est 58% des 81 logements analysés qui ne respectent pas l'exigence réglementaire. Les projets Exist'air 1 et 2, pour lesquels les performances des systèmes de ventilation mécanique de 73 logements [4] et 99 logements [5] construits avant 2005 ont été évaluées, met également en avant des non conformités récurrentes dans l'existant, comme l'absence de débit aux bouches d'extraction, des bouches encrassées ou

détériorées, l'absence d'entrée d'air dans les pièces de vie ou des entrées d'air en mauvais état, ou encore des rejets de ventilateur non raccordés à l'extérieur.

En revanche, aucune étude publiée à ce jour ne dispose de données à la fois sur des mesures à réception et sur des mesures en occupation, plusieurs années après la réception, afin de pouvoir évaluer l'évolution des performances des systèmes de ventilation dans le temps. C'est également vrai des systèmes de ventilation mécanique contrôlée (VMC) hygroréglable, installés dans de nombreux logements en France.

2.2 Etat de l'art des réglementations introduisant des objectifs de durabilité des installations de ventilation

2.2.1 Mesures de contrôles obligatoires sur la durée en Suède

En Suède, tous les nouveaux bâtiments et les nouveaux systèmes de ventilation doivent être vérifiés à réception depuis 1991 par des inspecteurs indépendants qualifiés [6]. La fréquence des vérifications varie selon les types de bâtiment et de système de ventilation :

- Tous les 3 ans pour :
 - les écoles, crèches, centres de loisirs, hôpitaux, maisons de retraite et centres de soins pour personnes âgées – et ce, quel que soit le système de ventilation en place ;
 - les systèmes de ventilation mécanique double flux, dans les bureaux et établissements recevant du public (magasins, hôtels, cinémas, etc.), ainsi que dans les logements collectifs ;
 - les systèmes de ventilation mécanique double flux en maisons individuelles (comprenant jusqu'à 2 logements) seule la première inspection est obligatoire.
- Tous les 6 ans pour :
 - les systèmes de ventilation mécanique simple flux et les systèmes de ventilation naturelle, dans les logements collectifs, bureaux et établissements recevant du public (magasins, hôtels, cinémas, etc.)

Durant ces inspections périodiques, le contrôleur doit vérifier que le fonctionnement et les propriétés du système de ventilation sont conformes aux exigences qui étaient en vigueur lors de son installation. Il doit également préciser les mesures qui pourraient améliorer les performances énergétiques du système de ventilation et qui n'entraîneraient pas de dégradation de la qualité d'air intérieur (c'est ensuite le propriétaire qui décide de la mise en œuvre ou non de ces mesures).

2.2.2 Autres exigences de performance

2.2.2.1 À réception

Face à l'absence de réglementation instaurant des objectifs de durabilité à proprement parler, le Tableau 1 décrit les réglementations ayant introduit des exigences sur les installations de ventilation à réception. En Europe, l'étude EPBD recensant les

réglementations et normes dans le cadre des inspections de systèmes de ventilation en 2018 [7] indique qu'en 2022, près de la moitié des Etats disposent d'une réglementation visant les systèmes de ventilation (12 sur les 27). Sept d'entre eux - à savoir la Belgique, la Finlande, la Suède, l'Irlande, la Pologne, le Royaume-Uni et la France, introduisent même des contrôles à réceptions dans le résidentiel. Ces derniers portent essentiellement sur le taux de renouvellement d'air, et dans une moindre mesure sur la consommation énergétique des ventilateurs ou l'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation. Il est très rare de mesurer des paramètres de qualité de l'air intérieur ou de bruit.

Une exception notable visant à introduire une performance de qualité de l'air intérieur se trouve en Belgique [8]. Cette dernière a intégré dans sa réglementation une exigence sur la précision des capteurs d'humidité et de CO₂ permettant de moduler les débits de ventilation. Il s'agit d'exigence à réception, sans notion de durabilité.

Un point de vigilance à avoir à l'esprit est que la notion de VMC hygro-réglable recouvre des équipements techniques différents selon les pays. En France, les terminaux sont équipés de tresse hygro-réglable, alors qu'en Belgique, l'ouverture est soumise à des capteurs d'humidité.

Tableau 1 : Listes des pays européennes disposant d'exigences réglementaires pour les installations de ventilation à réception

Pays	Bâtiments concernés	Eléments contrôlés	Fréquence de contrôle
Belgique (Flandres)	Bâtiments résidentiels neufs ou lors d'une rénovation	Performance énergétique, qualité de l'air intérieur, acoustique, confort thermique	Une fois : à réception
Finlande	Tous les bâtiments construits depuis 1992	Performance énergétique (perméabilité à l'air des réseaux) et taux de renouvellement d'air	Une fois : à réception
France	Bâtiments résidentiels neufs	Mesures de débit et vérification fonctionnelle visuelle	Une fois : à réception
Irlande	Bâtiments résidentiels neufs	Mesures de débit	Une fois : à réception
Pologne	Bâtiments résidentiels, publics et collectifs	Qualité de l'air intérieur	Contrôle régulier, a minima tous les 5 ans
Suède	Dans le neuf et l'existant / bâtiments résidentiels et tertiaires	Performance énergétique et taux de renouvellement d'air	Fréquence de surveillance en fonction du type de bâtiment
Royaume Uni	Tout bâtiment équipé d'une ventilation mécanique	Débits d'air extraits (et perméabilité à l'air des réseaux pour les bâtiments non résidentiels)	Une fois : à réception

Par ailleurs, les pays Nord-Américains (Etats-Unis et Canada) ont une tradition de fonctionnement avec des normes, non-obligatoires sur le plan réglementaire mais fortement utilisées. Il existe ainsi, aux Etats-Unis, des normes portant sur la qualité de l'air

intérieur (QAI) pour les bâtiments résidentiels, mais aussi pour les bâtiments commerciaux et les bâtiments institutionnels [7].

2.2.2.2 À travers le Code du travail

D'autre part, en dehors du cadre résidentiel, le code du travail impose des contrôles des systèmes de ventilation dans certains établissements recevant des travailleurs en Autriche, Hongrie, Italie, mais également hors Europe, au Canada.

2.3 Etat de l'art des approches performantielles de caractérisation in situ pour sélection des polluants complémentaires à mesurer en phase 3, et sélection des indicateurs portant sur la QAI (a priori indicateurs basés sur l'humidité et le CO₂ complétés par des indicateurs sanitaires)

Pour plus de cohérence dans le déroulé de la bibliographie par thématique, les aspects traitant des indicateurs de la QAI ont été intégré à cette partie (et non à la suivante, qui sera donc entièrement dédiée aux indicateurs énergétiques).

2.3.1 Approches en modélisation

2.3.1.1 Approches existantes

Comme décrit au paragraphe précédent, la majorité des réglementations et normes existantes sur la performance des systèmes de ventilation se base sur des indicateurs de taux de renouvellement d'air, ou des débits d'air. Guyot et al. [8] identifient une approche en modélisation qui va au-delà des débits d'air en Belgique. L'objectif est de quantifier le temps d'exposition à des Composés Organiques Volatils qui seraient émis à l'intérieur du logement, l'émission étant proportionnelle à la surface du logement, avant qu'ils ne soient totalement évacués par le système de ventilation.

Poirier et al. [9] montrent que les taux de renouvellement d'air sont établis à partir de critères de confort, et non des critères sanitaires. Dans l'habitat, les principales approches de performance se basent ainsi sur les deux indicateurs historiques que sont le dioxyde de carbone (CO₂) et l'humidité. Poirier et al. indiquent également que le postulat selon lequel évacuer les effluents humains (odeurs, etc.) suffirait à évacuer les autres polluants n'est pas solidement établi. Il existe pourtant une multitude de polluants, sans véritable consensus définissant ceux qui seraient les plus importants à prendre en compte pour qualifier la performance des systèmes de ventilation ou la qualité de l'air intérieur, encore moins sous forme de quel indicateur.

2.3.1.2 Indicateurs QAI proposés en modélisation

Après analyse de la littérature, Poirier et al. [9] proposent une sélection de 5 indicateurs de QAI jugés pertinents pour la santé des occupants et la préservation du bâti, sur la base des critères suivants :

- lien avéré sur la santé ;
- méthode de mesure définie pour le paramètre choisi ;
- seuil(s) documenté(s).

Ces 5 indicateurs sont :

1. L'exposition maximum cumulée en CO₂ au-delà d'une valeur seuil – marqueur pertinent issu des normes de la ventilation.

Le CO₂ est en effet une molécule connue et facilement mesurable, dont les effets sont documentés. Poirier et al. [9] rappellent par ailleurs le lien direct entre CO₂ et autres bioeffluents humains, qui pourraient expliquer en partie les effets sanitaires d'une exposition à une concentration importante de ce gaz comme l'illustre le Tableau 2.

*Tableau 2 : Niveaux de concentration en CO₂ et leurs effets sur la santé d'après une analyse de la littérature.
Source : Poirier et al. [9]*

Effects	CO ₂ threshold [ppm]	Comments	References
Comfort	1000	To prevent odors from bioeffluents	(Von Pettenkofer, 1858) [40]
No effect	1000 or 3000 for 4 h 15 min	Pure CO ₂	(Zhang, et al., 2016) [43]
Increasing intensity of reported headache, fatigue, sleepiness, and difficulty thinking clearly	1000 or 3000 for 4 h 15 min	Metabolic CO ₂ + human bio-effluents	(Zhang, et al., 2016) [43]
Hygienic threshold in indoor environments	5000	For 8-h exposure	(ACGIH, 2011) [37]
Respiratory acidosis for a healthy adult at a modest level of physical exertion	10,000	For 0.5 h	Several studies reviewed in (ANSES 2013) [38]
Bomb shelters	20,000		(de Gids and Heijnen, 2011) [41]
Submarine	30,000		(de Gids and Heijnen, 2011) [41]
Irreversible effects	50,000		(French Ministry for Ecology, 2007) [42]

2. L'exposition maximale cumulée en formaldéhyde - composé organique volatil omniprésent dans les logements et quasiment exclusivement émis à l'intérieur, dont l'impact sur la santé est connu et documenté¹.

3. L'exposition maximale cumulée en particules fines (PM_{2.5}) – polluant ayant un fort poids en Santé Publique dont les sources d'émissions sont à la fois intérieures et extérieures.

¹ Irritation oculaire et des voies respiratoires, cancers du nasopharynx (source : Anses <https://www.anses.fr/fr/content/formald%C3%A9hyde-vers-la-recherche-d%E2%80%99alternatives>)

Enfin, l'humidité, fait l'objet de deux indicateurs, à savoir :

4. **Pourcentage maximum de temps passé avec une humidité relative supérieure à un seuil élevé**, afin d'identifier les situations à risque de condensations, qui favorisent le développement fongique - les moisissures étant elles-mêmes à l'origine de différentes pathologies respiratoires (asthme, allergies).
5. **Pourcentage maximal de temps passé avec une humidité relative au-delà d'une plage de confort**, qui prend en compte non seulement le risque de condensation, mais également le temps passé dans une atmosphère trop sèche, ce qui est irritatif pour les voies respiratoires.

2.3.2 Approche métrologie

2.3.2.1 Approches existantes

Une méta-analyse portant sur des articles publiés dans des pays au mode de vie occidental (Amérique du Nord, Europe, Asie : Japon, Chine, Hong-Kong, etc.) dans de cadre de l'Annexe 68 [10] a choisi de retenir, parmi tous les polluants mesurés (28 au total), ceux représentant un danger dans les concentrations couramment rencontrées. L'existence du danger est définie par un ratio élevé (3^e quartile ou supérieur à 0.1) entre la valeur mesurée et la valeur de référence.

Pour les problématiques long terme, cette définition conduit à retenir douze polluants, à savoir : formaldéhyde, PM₁₀, PM_{2.5}, radon, styrène, toluène, trichloroéthylène, acétaldéhyde, alpha-pinène, benzène, naphthalène, dioxyde d'azote. Pour les problématiques de court terme, sept polluants entrent dans ce cadre : dioxyde de carbone, formaldéhyde, PM₁₀, PM_{2.5}, radon, TVOC, dioxyde d'azote.

L'Annexe 68 montre, d'autre part, que les polluants les plus retrouvés dans l'air intérieur varient en fonction du niveau de performance énergétique du bâtiment. Ainsi retrouve-t-on davantage de 1.4 dichlorobenzène, de monoxyde de carbone ou de toluène dans des bâtiments non-performants sur le plan énergétique, alors que les bâtiments très performants sur le plan énergétique présentent des concentrations plus élevées d'alpha-pinène, dodécane, ou styrène.

En France, des campagnes de mesures menées par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur [11] ont permis de recueillir des données à l'intérieur de différents types de bâtiment. Une campagne a notamment eu lieu de 2003 à 2005 sur le logement, qui a permis de recueillir des informations représentatives du parc français à travers l'instrumentation de 567 résidences principales [12].

Trois indicateurs ont été calculés concernant le confinement, à savoir :

- La concentration hebdomadaire (calculée sur l'ensemble de la semaine, que le logement soit ou non occupé) ;
- La concentration hebdomadaire en occupation ;
- La concentration maximale hebdomadaire en occupation.

Concernant les autres polluants mesurés, la médiane et le 95^E percentile sont systématiquement présentés, ainsi que le ratio concentration intérieure/concentration extérieure lorsque les données le permettent.

Les logements ayant évolué en l'espace de quinze ans, une seconde campagne de réactualisation des données est en cours sur un panel de 600 logements (publication des résultats prévue en 2023).

2.3.2.2 Indicateurs *QAI* proposés en métrologie

Plus généralement, différents types d'indicateurs peuvent être calculés suites à des mesures, comme :

- la concentration moyenne d'un polluant ;
- la concentration moyenne au-dessus d'une valeur cible ;
- l'exposition cumulée au-dessus d'une valeur cible (par exemple en ppm.h) ;
- le pourcentage de temps passé dans différentes classes de seuils

D'autre part, ils peuvent l'être à différentes échelles :

- le logement ;
- les pièces de vie – en moyenne davantage occupées que les pièces humides ;
- la chambre – pièce occupée le plus hors période de confinement ;
- la personne – si toutefois on dispose de sa localisation précise.

L'annexe 68 [10] identifie d'autres types d'indicateurs possibles, regroupant les indices par :

- polluant : ratio entre la mesure et la valeur de référence : si le résultat est supérieur à 1, il y a un risque pour la santé ;
- source ou type de polluant : on additionne les indices des polluants émis par la même source, par exemple ceux émis par la présence humaine, ceux par la cuisine, les gaz d'échappement, etc. ;
- bâtiment : l'indice se réfère à la plus haute ou plus faible valeur mesurée dans le bâtiment. Par exemple, un indice dans lequel des sous-indices sont additionnés en prenant la concentration moyenne de 8 polluants. La référence pour chacun de ces

polluants est la moyenne mesurée dans le bâtiment. Cela permet de comparer des logements à l'intérieur d'un bâtiment en prenant celui-ci pour référence ;

- l'ensemble : tous les indices par polluant sont additionnés (soit la valeur la pire systématiquement, soit une moyenne).

Trois indicateurs synthétiques sont proposés, qui restent avant tout sanitaires :

- Le Short-Term Exposure Limite (STEL) pour les problématique d'exposition à court terme. Le calcul est basé sur les valeurs guides court terme (type horaire, ou 1h, 8h, 24h), et la fréquence de dépassement estimée sur la période de mesures, lors des pics de pollution ;
- IAQ-LTEL (long term exposure limit) pour les problématiques plus long terme. Il s'agit d'un ratio de la concentration en polluant mesurée sur la valeur limite long terme (souvent sur un an). Un point de vigilance est à avoir face à ce type d'indicateur : des mesures réalisées sur 2 semaines ne sont pas forcément représentatives des données sur un an ou plus, qui seraient nécessaires à la notion de long terme ;
- IAQ-DALY, également basés sur le long terme. Cet indicateur est calculé à partir des DALY (années de vie corrigées de l'incapacité) : nombre d'années de vie en bonne santé perdues du fait des problèmes de santé, prenant en compte mortalité, la durée et le retentissement de la maladie sur chaque personne vivante qui en est atteinte. Il s'agit donc d'une évaluation du coût des maladies.

Dans le cadre de Performance 2, l'objectif est bien de trouver des indicateurs qui permettent d'évaluer la ventilation, pas nécessairement la qualité d'air intérieur dans son ensemble et encore moins l'impact sur la santé – le recours à ces indicateurs sera donc vraiment ponctuel et marginal, en lien, par exemple, avec un logement dans lequel émergerait un risque particulier au vue des concentrations mesurées.

2.3.3 Seuils proposés

2.3.3.1 Rappel général sur la construction des seuils

Les valeurs de référence sont calculées à partir d'études épidémiologiques, et/ou d'essai toxicologiques sur des animaux, auxquelles sont ajoutés des facteurs protecteurs pour intégrer la variabilité intra-spécifique et inter-spécifique. Ces valeurs sont :

- soit des VLR (valeurs limites de références), déterminées dans le cadre du travail,
- soit des valeurs guides de l'air intérieur (VGAI), davantage protectrices que les VLR puisqu'elles se veulent applicables dans l'ensemble de la population, avec pour objectif de protéger également les catégories de population vulnérables.

Le choix réalisé dans l'Annexe 68 [10] puis repris par Poirier et al. [9] pour fixer un seuil, parmi les multiples proposés par diverses institutions (OMS, Anses, etc.), consiste à retenir la plus petite valeur de référence existante. Le principe est d'avoir une valeur protectrice et de se soustraire, au moins en partie, aux variations de seuils inhérentes à l'évolution des connaissances. Dans le cadre de ce projet, les seuils français seront également pris en

compte puisqu'ils s'appliquent – a minima lorsqu'il existe un cadre réglementaire autour d'un paramètre.

2.3.3.2 Dioxyde de carbone

Différents seuils pourront être pris en compte :

- Comme proposé par Poirier et al [9], l'**exposition cumulée en CO₂** (ICO₂) sera évaluée pour des valeurs supérieures à **1000 ppm**. C'est bien la valeur maximum de l'ensemble des chambres qui sera retenue dans le cadre du calcul de cet indicateur.
- D'autre part, comme la réglementation française s'applique avec une exigence dans ce domaine, le temps cumulé par pièce au-dessus de **2000 ppm** sera également évalué. Sur une saison, la référence nationale demande à ce qu'il soit inférieur à 400 000 ppm.h, comme l'illustre la Figure 2 issue des règles de calculs pour l'instruction d'un avis technique sur la VMC hygroréglable [13].

Le seuil est fixé à 400.000 ppm.heures cumulés en base 2000.

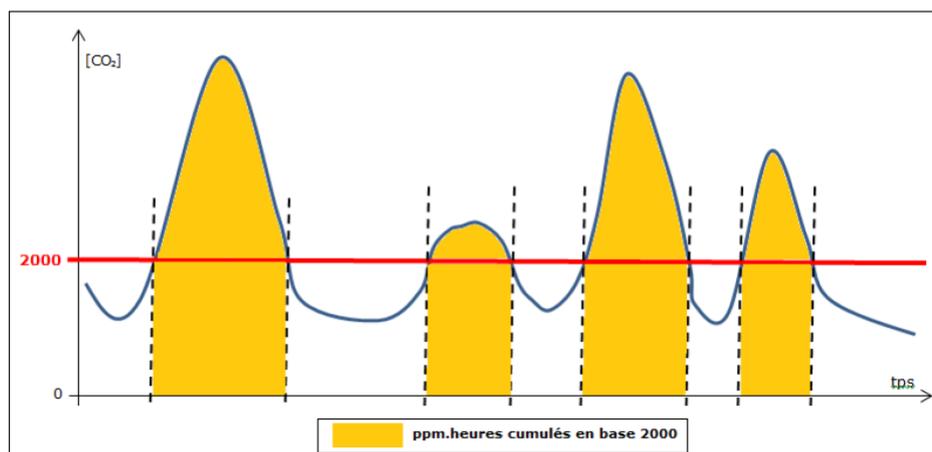


Figure 2 : Illustration d'une évolution du taux de CO₂ et de la limite à 2000 ppm – Source : règles de calculs pour l'instruction d'un avis technique sur la VMC hygroréglable [13]

Par comparaison, on peut signaler d'autres exemples de normes dans des pays voisins, comme 500 000 ppm.h en Espagne au-dessus de 1600 ppm, ou 300 000 ppm.h au-dessus de 1200 ppm en Allemagne. L'annexe 68 propose pour sa part le seuil de **1000 ppm** à utiliser pour une exposition court terme, sur 8h.

D'autres seuils d'intérêt, valables en France mais dans des contextes autre que celui du cadre réglementaire applicable à l'habitat pourront servir d'appui lors des analyses :

- 800 ppm proposé par l’OMS (proposition reprise par le HCSP dans le cadre de la pandémie de Covid19[14])
- 1000 ppm avec une tolérance à 1300 ppm proposé par le RSDT (valable dans le cas du tertiaire)

L’indice ICONÉ, calculé selon l’équation 2, est un indicateur issu de la réglementation QAI dans les ERP, qui intègre à la fois une notion de seuils, et une notion de temps, en prenant en compte la durée pendant laquelle ils sont franchis en présence des occupants.

$$ICONÉ = \frac{2.5}{\log_{10}(2)} * \log_{10}(1 + f_1 + 3 * f_2) \quad (1)$$

Avec :

f_1 : proportion de valeurs comprises entre 800 et 1500 ppm

f_2 : proportion de valeurs supérieures à 1500 ppm

Il prend des valeurs comprises entre 0 et 5 (en retenant l’entier le plus proche du résultat calculé²) qui peuvent être interprétés selon la grille fournie par le Centre Scientifique et technique du Bâtiment (CSTB), présentée dans le Tableau 3. Il est à noter que cette grille vise à apporter des repères pour faciliter l’analyse mais ses indications ne sont pas à considérer de manière stricte. Par exemple, il est possible d’être plus de 75 % du temps au-dessus de 1500 ppm (2^{ème} seuil) sans basculer dans un Indice Icone de 5, si la proportion des valeurs comprises entre 800 et 1500 ppm est inférieure ou égale à 14 %.

Tableau 3 : Interprétation des résultats de l’indice de confinement (ICONÉ). Source : CSTB, Guide d’application pour la surveillance du confinement de l’air

² Guide d’application pour la surveillance du confinement de l’air, CSTB, 2023

ICONE	Confinement de l'air	Correspondance indicative de dépassement des seuils associée à la période
0	Nul	> 85 % des valeurs mesurées en dessous de 800 ppm
1	Faible	15 % à 50 % des valeurs mesurées comprises entre 800 et 1500 ppm
2	Moyen	50 % à 99 % des valeurs mesurées comprises entre 800 et 1500 ppm
3	Elevé	1 % à 30 % des valeurs mesurées supérieures à 1500 ppm
4	Très élevé	30 % à 75 % des valeurs mesurées supérieures à 1500 ppm
5	Extrême	> 75 % des valeurs mesurées supérieures à 1500 ppm

2.3.3.3 Humidité relative

Pour l'humidité relative, le choix du seuil haut réalisé dans l'Annexe 68 [10] puis repris par Poirier et al. [9] est fixé à 70%. En France, les obligations réglementaires portent sur le temps passé au-dessus du seuil de 75% pour une VMC hygro, qui doivent être inférieures à 100 heures WC et les pièces principales, inférieures à 600 heures dans la cuisine, et inférieures à 1000 heures dans la salle de bain.

La fourchette de confort retenue pour l'**IRH30-70** est celle entre 30 et 70% d'humidité, avec le calcul du temps maximal passé au-dehors de cette plage pour l'ensemble des occupants.

2.3.3.4 Formaldéhyde

Le seuil minimal retenu par l'Annexe 68 [10] pour le calcul de l'exposition cumulée des occupants au formaldéhyde est de :

- 9 μm^3 pour le long terme (1an),
- 123 μm^3 en court terme (1h) – en prenant la valeur maximum sur l'ensemble des occupants.

En France, Dans sa révision de la Valeur Guide de l'Air Intérieur (VGAI) de 2018, l'Agence Nationale de Sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'Environnement et du travail (Anses) a retenu la valeur de **100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** comme protectrice à la fois contre risque aigu et chronique. Il s'agit d'un traitement d'exception pour un risque cancérigène, lequel fait habituellement l'objet d'une VGAI long terme dont la valeur est inférieure aux VGAI courts termes. Ce choix est justifié par l'étiologie spécifique des cancers du nasopharynx associés à une exposition au formaldéhyde. En effet, ceux-ci seraient induits par la réponse

de l'organisme³ aux lésions provoquées par la toxicité aigüe. Ne pas être exposé au risque aigue serait donc automatiquement protecteur du risque chronique, et la valeur seuil obéit à une relation dose-réponse classique de toxicité. Elle est établie à 100 µg/m³, « à respecter de manière répétée et continue sur toute la journée. »

NB : à noter que cette valeur est à respecter sur 1 h, pas de temps inférieur à celui de nos données de mesures, qui moyennent les valeurs sur 2 h. Le fait de ne pas dépasser ce seuil dans les campagnes n'est donc pas totalement garant de l'absence de situation où il serait franchi en réalité.

Le rapport de l'Anses sur la révision de la VGAI préconise de garder le seuil de **30 µg/m³** dans le cadre de la réglementation de surveillance de la QAI dans les ERP, au motif que le mode de prélèvement⁴ ne permet pas d'identifier tous les pics. Les NEMOs offrent des résultats en moyenne sur deux heures ce qui mais qui est également susceptible de masquer les pics qui interviendraient sur une heure. Par mesure de protection, il a donc été décidé de conserver l'étude de ce seuil. C'est aussi la valeur recommandée par les HCSP comme valeur de gestion provisoire.

2.3.3.5 COV

Les composés organiques volatils (COV) représentent une famille de plusieurs centaines de molécules, ayant pour caractères communs :

- leur état gazeux dans les conditions de température/pression ambiantes,
- la présence d'atomes de carbone dans leur structure moléculaire.

L'utilité de ces données repose sur le **large spectre de mesure** : il permet d'identifier globalement la quantité de molécules en présence dans l'air et l'évolution de cette pollution au cours du temps.

Sur le plan sanitaire, la toxicité vis-à-vis de la santé humaine (et les valeurs protectrices associées) s'évalue actuellement molécule par molécule pour un effet sanitaire donné. Il n'est pas possible de comparer une mesure globale à un seuil sanitaire dans l'état des connaissances actuelles. Ce dernier serait d'autant plus complexe à établir que l'effet sanitaire des différentes molécules prises isolément peut différer de ceux générés par la co-exposition, dans un effet cocktail.

D'autre part, il est probable que tous les COV mesurés ne soient pas toxiques.

Par ailleurs, l'OQAI pendant la première Campagne Nationale Logement (CNL1) n'a mesuré ni les COV_{légers} ni les COV_{totaux} mais bien chaque molécule nommément – ce qui n'est donc pas comparable non plus.

Une valeur est proposée dans l'ouvrage « bâtir pour la santé des enfants »⁵ est fixée à 300 µg/m³. Cette valeur sera utilisée dans notre projet car elle a empiriquement montré un intérêt dans le cadre de cette étude.

³ A savoir la prolifération régénérative cellulaire, à laquelle se superpose les effets génotoxiques du formaldéhyde

⁴ Prélèvement par tubes passifs posés sur 4.5jours

⁵ Suzanne Déoux, Bâtir pour la santé des enfants, Medieco Eds, 2010.

2.3.3.6 Particules fines

Les particules fines désignent « l'ensemble de la matière solide et/ou liquide en suspension dans l'air ». Elles sont réparties en différentes classes de granulométrie. On distingue conventionnellement les:

- PM_{10} , dont le diamètre est inférieur ou égal à $10\ \mu\text{m}$,
- $PM_{2.5}$, dont le diamètre est inférieur ou égal à $2.5\ \mu\text{m}$,
- PM_1 dont le diamètre est inférieur ou égal à $1\ \mu\text{m}$.

Les sources d'émission de particules fines sont multiples, mais une large partie d'entre elles est issue de phénomènes de combustion. Les rejets peuvent avoir lieu à l'extérieur (chauffage, trafic routier, etc.) ou dans l'air intérieur (tabagisme, cuisson, encens, etc.). Le chauffage, en particulier au bois, est la première source d'émission de particules fines dans les territoires urbanisés. Cela se traduit par une forte variation saisonnière des taux de particules observés - à la défaveur de l'hiver. Il existe par ailleurs des sources d'émission secondaire, résultat de réactions chimiques à partir d'autres composés présents dans l'air. Ces multiples sources d'émission influencent directement la composition chimique des particules fines, laquelle tend à se complexifier encore par l'adsorption d'autres polluants avec lesquelles elles entrent en contact.

Une fois émises, les particules ont tendance à sédimenter sous leur propre poids, et ce d'autant plus vite qu'elles sont lourdes. Elles peuvent cependant être remises en suspension à la faveur de mouvement d'air, phénomène qui semble jouer un rôle majeur dans les pics de particules observés dans l'air intérieur. Cela a notamment été mis en évidence par l'étude Scol'air⁶, lors des entrées/sorties d'élèves en classe.

Sur le plan sanitaire, la morbidité liée aux particules s'alourdit à mesure que leur diamètre diminue puisque cela leur permet de s'immiscer plus profondément dans les voies respiratoires. Elles agissent principalement sur les systèmes cardio-vasculaire et respiratoire, mais peuvent également affecter d'autres organes. Elles sont classées cancérigènes pour le poumon par le CIRC depuis 2013, au titre de la pollution de l'air.

Le seuil minimal retenu par l'Annexe 68 [10] pour le calcul de l'exposition cumulée des occupants aux PM_{10} est de :

- $20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ en long terme (sur 1 an)
- $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ en court terme (sur 24h) – en prenant la valeur maximum sur l'ensemble des occupants.

Le seuil minimal retenu par l'Annexe 68 [10] pour le calcul de l'exposition cumulée des occupants aux $PM_{2.5}$ est de :

⁶ Cerema, Scol'Air - Qualité de l'air dans les écoles à proximité des infrastructures routières, 2015.

- 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en long terme (sur 1 an). Cela correspond à l'objectif de qualité [16], exprimé en moyenne annuelle, pour l'air extérieur en France. La valeur long terme proposée par l'OMS [17] a baissé en 2021 pour s'établir à 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en court terme (sur 24h).

En France, il existe des valeurs réglementaires de gestion pour l'air extérieur, qui sont données pour des moyennes sur 24h [16] : un seuil d'information à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et un **seuil d'alerte à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** . L'**objectif de qualité** étant fixé à **30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en moyenne annuelle.

A l'heure actuelle il n'existe pas de valeur guide de qualité d'air intérieur (VGAI) définie par l'ANSES concernant les particules fines, quelle que soit la granulométrie concernée. En revanche il existe des valeurs seuils pour l'air extérieur. Même si la composition des particules, et donc leur effet sanitaire, peut varier entre l'intérieur et l'extérieur selon l'Afsset⁷, les valeurs guides extérieures seront utilisées dans ce rapport à défaut de valeurs adaptées à l'air intérieur.

- Court terme : *Ces valeurs sont présentées pour l'air extérieur sur 24 heures. Depuis 2021, l'OMS fixe un seuil à 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2.5}$, et à 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} . Les PM_1 formant un objet d'étude plus récent, elles ne répondent aujourd'hui à aucune norme.*
- Long terme : L'effet long terme considéré est celui du cancer du poumon. Selon l'OMS, « il n'existe pas de seuil en dessous duquel le risque soit inexistant ». Cet axiome est celui généralement appliqué aux agents cancérigènes, les particules fines ne faisant pas exception. Il repose sur le principe qu'il s'agit d'un risque toxicologique « sans seuil » - qui ne répond pas à la relation « dose-réponse » admise en toxicologie classique. Les valeurs guides présentées ci-dessous ne représentent donc pas des seuils en dessous desquels il n'y aurait pas de risque, mais des seuils en dessous desquels l'« excès de risque » individuel de développer un cancer du fait de l'exposition est jugé socialement acceptable. En règle générale, il se situe dans un ordre de grandeur de 1.10^{-6} . Les valeurs guides sont présentées pour un an. Depuis 2021, l'OMS propose une valeur à 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2.5}$ et à 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} . Les PM_1 formant un objet d'étude plus récent, elles ne répondent aujourd'hui à aucune norme.

2.3.4 Ordre de grandeur des valeurs qu'on peut s'attendre à trouver

Les campagnes nationales logement (CNL) menées par l'OQAI [12] ont permis d'avoir un ordre de grandeur des concentrations dans lesquelles on peut retrouver certains polluants, ou encore la fréquence de certains dysfonctionnements.

Ainsi, il a été identifié que 15% des logements présentent des moisissures visibles, mais le taux monte à 37% lorsqu'on se base sur les mesures de COV_m pour identifier un développement fongique actif. Ce taux est à rapprocher de celui des logements présentant

⁷ Afsset, valeurs guides de l'air intérieur – particules, 2010

des traces d'humidité, à savoir 38%. Les infiltrations d'eaux ont été constatées dans 11% des logements, et la présence d'un traitement contre l'excès d'humidité dans 3%.

Concernant le formaldéhyde, les concentrations mesurées lors de la CNL1 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) font l'objet de la Figure 3.

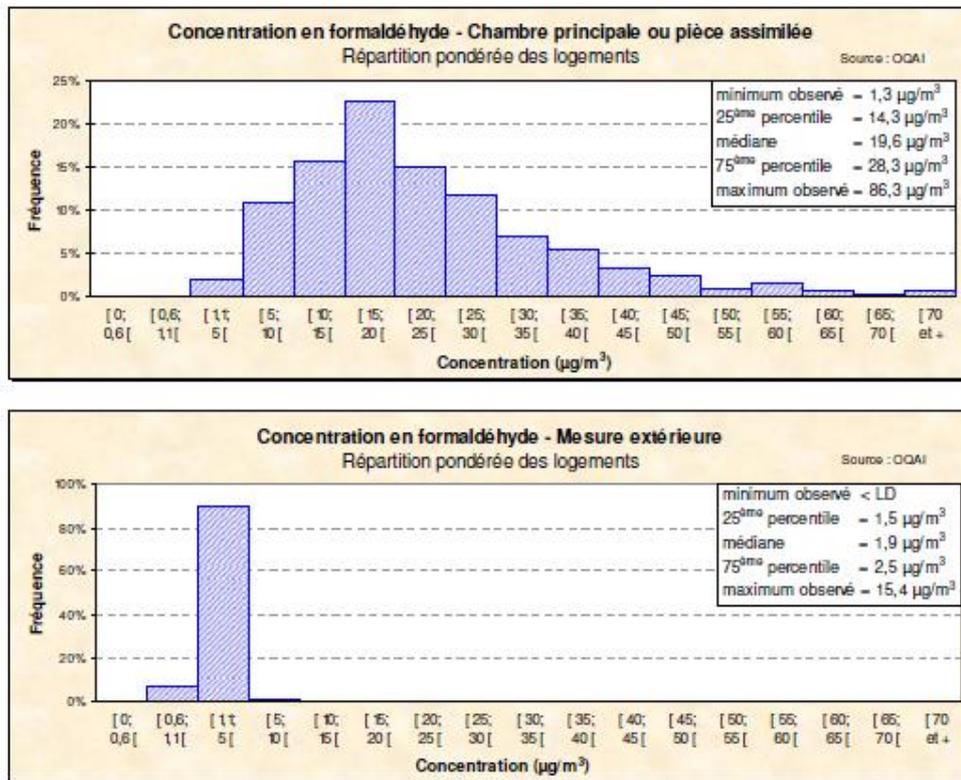


Figure 3 : Distributions des logements en fonction des concentrations en formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à l'intérieur des logements (graph du haut) et à l'extérieur (graph du bas) - Source : Campagne National Logement 1, OQAI

22% des logements dépassaient la VGAI, fixée alors à 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il s'agit d'un des COV dont les concentrations sont les plus élevées.

Concernant les PM₁₀ et PM_{2,5}, les CNL 1 a également permis d'aboutir à un histogramme des concentrations (en µg/m³) présenté en Figure 4.

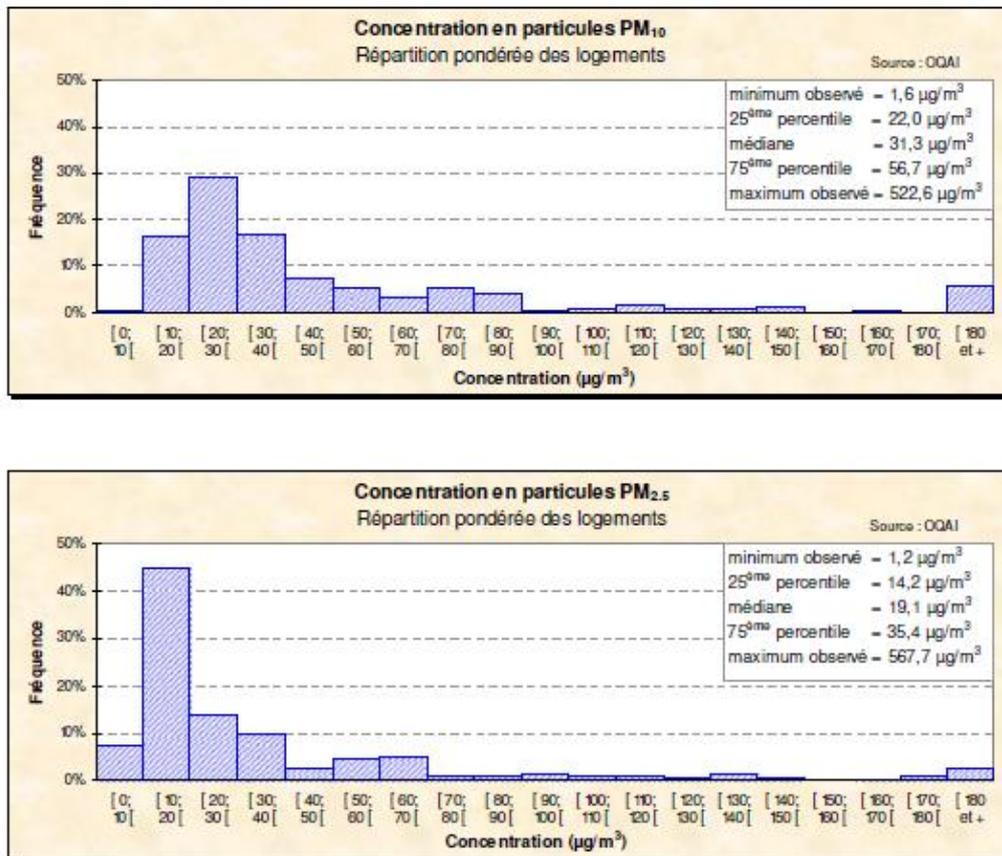


Figure 4 : Distributions des logements en fonction des concentrations en particules PM₁₀ (graph du haut) et PM_{2,5} (graph du bas) en µg/m³ à l'intérieur des logements - Source : Campagne National Logement 1, OQAI

Il est précisé que les maxima, pour les PM₁₀ comme pour les PM_{2,5} dépassent les 500µg/m³. Les médianes sont supérieures à la valeur seuil long terme, mais le protocole d'instrumentation ne permet pas de s'y comparer puisque la durée de prélèvement s'étendait de 17h à 8h en semaine avec un week-end en continu.

La distribution des concentrations de dioxyde de carbone (en ppm) a été étudiée sur différents pas de temps, comme l'illustre la Figure 5.

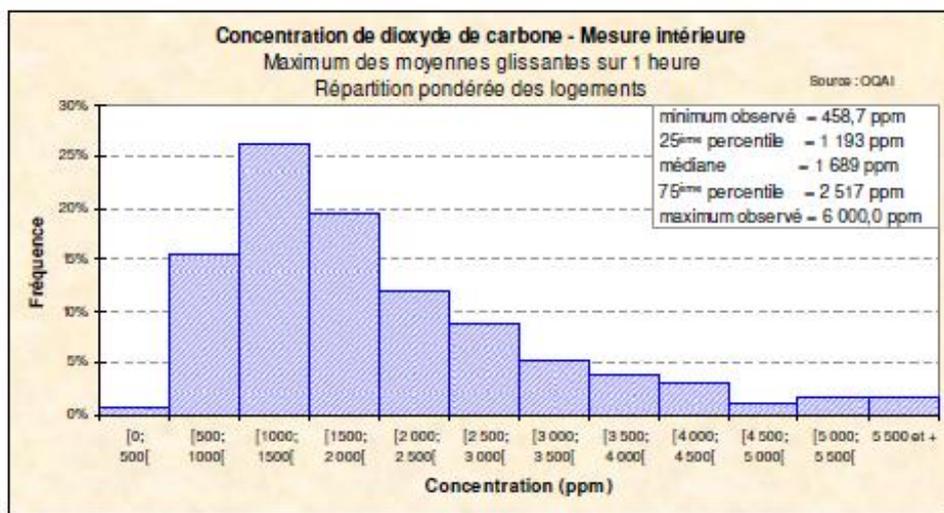
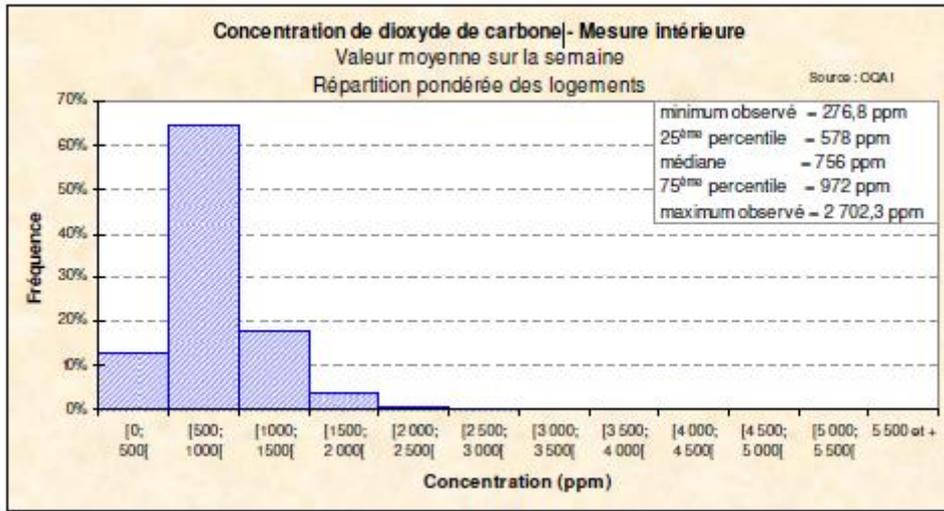


Figure 5 : Distributions des logements en fonction de la concentration en dioxyde de carbone (ppm) moyennée sur la semaine (graph du haut) et moyennes glissantes sur 1 heure (graph du bas) - Source : Campagne Nationale Logement 1, OQAI

2.4 Sélection des indicateurs portant sur la performance énergétique (a priori débit déperditif et consommation électrique des ventilateurs)

Les indicateurs retenus sont ceux mentionnés dans les règles de calcul pour l’instruction d’une demande d’avis technique de ventilation simple flux hygro réglable [13]: à savoir le débit moyen extrait déperditif, Q_{deper} . Il se dérive du C_{deper} précisé dans les réglementations thermiques (article R.172-6 du code de la construction et de l’habitation), puis dans la RE2020 et est calculé selon l’équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

$$Q_{\text{deper}} = \frac{C_{\text{deper_extrait}}}{\rho_{20^{\circ}\text{C}} C_{\text{deper}}} * 3600 \quad (2)$$

Avec :

$$C_{deper_extrait} = \sum \dot{m} C_p (T_{ext}(t) - T_{int}(t)) \Delta t \text{ pour } t \text{ tel que } T_{ext}(t) < 15^\circ C$$

$$C_{deper} = \sum C_p (T_{ext}(t) - T_{int}(t)) \Delta t \text{ pour } t \text{ tel que } T_{ext}(t) < 15^\circ C$$

La consommation électrique des auxiliaires, en l'occurrence celle associée aux ventilateurs, est également calculée dans le cadre réglementaire.

Il est également possible de calculer un coefficient d'énergie sauvée, comme proposé par Guyot et al. [8], qui correspond à la différence entre le débit déperditif associé à une ventilation simple flux autoréglable et celui lié au système hygroréglable.

2.5 Conclusion

L'objectif est bien de trouver des indicateurs qui permettent d'évaluer la ventilation, mais pas nécessairement la qualité d'air intérieur dans son ensemble. Il s'agira donc de trouver non seulement des indicateurs, mais également de réaliser des mesures dynamiques qui permettent d'approcher les performances des débits de ventilation variables/modulables que l'on peut observer sur une VMC hygroréglable. Concaténer les données pour obtenir un indicateur trop synthétique ne permettrait pas de répondre à cet objectif.

Les polluants retenus pour la campagne de mesure prennent également en compte des contraintes de coût et de faisabilité/interprétabilité de la mesure. Ainsi, au-delà CO₂ et humidité relative, incontournables pour qualifier les performances des systèmes de ventilation, en particulier hygroréglable, il a été jugé pertinent de retenir différentes mesures de polluants. En premier lieu le formaldéhyde, identifié comme polluant ubiquitaire de l'air intérieur lors des campagnes nationales logement, avec un risque de concentration importante. Le pas de temps le plus court possible, dans un budget réaliste et avec un matériel qui ne soit pas trop invasif nous permet d'obtenir des moyennes glissantes sur 2h. A défaut des COV_{totaux}, les COV_{légers} sont mesurés durant les campagnes de Performance 2, ainsi que les particules fines (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) qui le seront en intérieur comme en extérieur.

Une difficulté que l'on s'attend à rencontrer réside dans l'impossibilité de connaître précisément la quantité de polluant émise par les sources à un instant t, et donc d'attribuer dans les concentrations mesurées la part relative liée à la dilution (renouvellement d'air, et en particulier ventilation) par rapport à celle de l'émission.

3 DESCRIPTION DES DONNEES ANALYSEES

Cette partie vise à recenser et **décrire l'ensemble des données** récoltées au sein du projet, qui sont exploitées dans l'analyse, afin d'en donner une vision globale. Les caractéristiques techniques relatives à chaque paramètre de la QAI mesuré font l'objet d'un document en *Annexe A : caractéristiques techniques des capteurs utilisés pour les paramètres de qualité d'air intérieur*. Les parties ci-dessous intitulées « limites », se focalisent exclusivement sur les éléments présentant un enjeu ou une influence spécifique sur les analyses.

3.1 Données issues des campagnes de mesures avec les NEMOs

3.1.1 Paramètres mesurés avec les NEMOs

Les campagnes de mesures hivernales réalisées en tâche 1 avec des appareils de type NEMo XT ou TC (marque Ethera), comprennent des mesures de :

- Température (T°C)
- Hygrométrie (HR)
- Dioxyde de carbone (CO₂)
- Formaldéhyde (HCOH)
- Composés Organiques Volatils (COV) légers
- Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 10, 2.5, 1 micromètre (PM₁₀⁸, PM_{2.5}, PM₁)

Les campagnes ont duré environ 15 jours chacune. Elles ont été réalisées sur deux hivers successifs (2021-2022 puis 2022-2023).

Seules deux pièces par appartement ont été instrumentées : le séjour et une chambre.

Ces données sont complétées par des mesures réalisées en extérieur avec une station NEMo (marque Ethera) qui mesure :

- Température
- Humidité
- Composés Organiques Volatils légers
- Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 10, 2.5, 1 micromètres (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁)

⁸ pour certains appareils, extrapolées à partir des mesures de PM_{2.5}

3.1.2 Limites des mesures NEMo

3.1.2.1 Principaux résultats de l'intercomparaison (tâche 2)

L'intercomparaison réalisée par le LOCIE en tâche 2 a abouti aux conclusions rappelées ci-dessous à propos des NEMOs.

- PM

Les réponses temporelles des NEMOs sont cohérentes avec celles de la référence pour les transformations lentes de type échelon. Au contraire, le pas de temps de mesure important ne permet pas aux NEMOs de décrire de manière précise les transformations ponctuelles de type impulsion très courtes (pas représentative des émissions classiques en logement). L'intra-comparaison des NEMOs n'est donc pas possible dans ce cas de figure. L'analyse de ces évolutions temporelles reste qualitative puisqu'aucun coefficient de corrélation n'a pu être calculé. Concernant la précision de la mesure, la dispersion est importante. En effet lors des mesures en enceinte, des écarts avec la référence compris entre -66 % et +185 % ont pu être mesurés. Un capteur a eu des profils présentant des décalages de leur échelle de mesure (offset) à savoir le NEMo n°913 (NEMo extérieur). De plus, des variations brusques de concentration ne pouvant pas être attribuées à des concentrations réelles en enceinte ont été observées pour 3 NEMOs.

- COV légers

Les résultats de la campagne de mesure de COV légers sont plus hétérogènes que ceux associés aux autres paramètres. Les évolutions temporelles peuvent être décrites de manière satisfaisante durant certains essais (enceinte et campagne *in situ*). Sur certains autres essais, l'évolution des concentrations n'a pu être mesurée. A ce jour, aucune hypothèse permettant d'expliquer ces différences de comportement n'a pu être proposée. En termes de valeur de concentration, une dispersion significative, notamment durant la campagne *in situ*, a été observée.

- Formaldéhyde

Les réponses temporelles des NEMOs sont cohérentes avec les transformations mises en œuvre. Les ordres de grandeur des concentrations sont corrects, la dispersion est cependant non négligeable. Elle est comprise entre 10 et 30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour des concentrations cibles comprise entre environ 10 et 60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

3.1.2.2 Représentativité spatiale des mesures

Les règles de bonnes pratiques en métrologie de qualité de l'air intérieur fixent des contraintes vis-à-vis du lieu de pose des capteurs⁹. L'objectif est de rendre la mesure la plus représentative possible de l'air ambiant d'une pièce.

Les capteurs sont à situer entre 1 et 1.5 mètre de hauteur dans le salon, c'est-à-dire à hauteur de respiration d'une personne debout. Dans une chambre ils peuvent être situés

⁹ Cerema, Guide d'accompagnement à la mise en œuvre de la surveillance réglementaire de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public, 2023.

plus bas, aux alentours de 50 centimètres, hauteur de respiration d'une personne couchée¹⁰. Ils doivent par ailleurs être placés à plus d'un mètre des parois afin d'éviter toute interférence de ces dernières sur la composition de l'air, que ce soit à travers l'émission de polluants ou de singularités dans les flux d'air. Ce dernier point nécessite également d'éloigner les capteurs de toute source de chaleur, et de les préserver de l'ensoleillement.

Durant les campagnes du projet, les capteurs NEMOs nécessitant d'être branchés, ils ont été positionnés sur des meubles à proximité immédiate de prises de courant. Leur hauteur est généralement conforme aux bonnes pratiques ainsi que l'éloignement des sources de chaleur, en revanche ils n'ont pas systématiquement pu être posés à plus d'un mètre des parois.

3.1.2.3 Réserves sur les données récoltées polluant par polluant

Parmi les données récoltées grâce aux NEMOs, certaines s'avèrent inexploitable ou doivent faire l'objet de précautions particulières dans leur utilisation. Les principales réserves sont listées ci-dessous, polluant par polluant.

- CO₂

Les données de CO₂ enregistrées lors de la première campagne à Paris ne seront pas exploitées faute de pouvoir identifier les dates et l'amplitude des offset réalisés automatiquement par les appareils. En effet, lors de la première intercomparaison réalisée par le LOCIE, les NEMOs ont été testés sous différentes humidités relatives afin de vérifier leur réponse pour ce paramètre. Lors de ces essais, les capteurs de CO₂ auraient réalisé une autocalibration dans des conditions hors de leur plage d'utilisation recommandée (30-70 % d'humidité), ce qui a engendré un offset de plus de 500 ppm sur les valeurs mesurées lors de la première campagne à Paris (cette hypothèse est celle la plus probable retenue après de très nombreux échanges avec le fabricant du matériel). D'autre part, par défauts les NEMOs se recalibrent en utilisant la valeur la plus basse mesurée comme référence de 400 ppm, sans garder traces des heures et amplitudes des modifications apportées. Si toutefois le recalibrage conduit à affecter la valeur de 400 ppm à une concentration de CO₂ plus élevée, il arrive que l'appareil mesure ensuite des valeurs inférieures à 400 ppm lorsque la concentration de CO₂ est amenée à diminuer. Dans ce cas, il applique également une correction pour remonter les valeurs, sans en garder trace non plus. L'option de recalibrage automatique consistant à remonter les valeurs a été désactivée dès la campagne de Villeurbanne, en revanche celle consistant à affecter une valeur de 400 ppm à la plus petite concentration mesurée sur la semaine, inhérente au capteur de CO₂, ne peut être contournée. Le CO₂ pourra être exploité à partir des mesures de 2022.

- Formaldéhyde

Il est mesuré par « lecture optique avec consommable à base de matériaux nanoporeux ¹¹ ». En pratique, cela signifie qu'un badge doit être inséré dans le NEMO, et

¹⁰ OQAI, Protocole de la première campagne nationale logement (2003-2005)

¹¹ Ethera, Catalogue produits

changé à chaque campagne. Un retard de livraison de ces consommables est à l'origine de l'absence de données pour certains appartements de la première campagne à Paris.

Malgré des valeurs affichées toutes les 10 minutes, comme pour les autres polluants, le formaldéhyde est en réalité calculé en moyenne glissante sur deux heures. Ce traitement lisse les résultats, et aura tendance à masquer les pics. La précision de la mesure diminue au cours du temps, elle est optimale seulement la première semaine (en raison de l'opacification jusqu'à saturation du badge).

D'autre part, ce pas de temps, relativement long au regard de la réactivité des composants du système de ventilation hygroréglable, complexifie les analyses dynamiques ou la recherche de corrélation avec d'autres paramètres.

- Composés Organiques Volatils légers

La mesure réalisée par le NEMo ne retient que les composés organiques volatiles dont la chaîne carbonée est comprise entre 2 et 4 carbones - sans que l'on puisse définir précisément les molécules concernées. Il est difficile d'exploiter des valeurs absolues sur des mesures types $COV_{\text{légers}}$ ou COV_{totaux} puisqu'elles ne peuvent pas être comparées à des valeurs guides de type sanitaire. Ces dernières sont en effet construites par polluant (et pour un effet sanitaire donné).

Les résultats seront tout de même mis au regard de valeurs obtenues dans d'autres campagnes (type Campagne Nationale Logement¹²). Ces dernières sont en général exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, quand les NEMos donnent des ppb (partie par billion). La conversion a été réalisée en prenant pour hypothèse que les résultats étaient exprimés en équivalent formaldéhyde.

- $PM_{2,5}$

L'incertitude de mesure inscrite dans les caractéristiques techniques des NEMos pour les $PM_{2,5}$ est de l'ordre de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ou 15 % de la valeur affichée), ce qui représente une valeur importante par rapport à celles communément rencontrées en air intérieur. À titre de comparaison, la médiane de la campagne nationale logement 1 se situe à $19.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La valeur sanitaire de long terme proposée par l'OMS est de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cette contrainte, d'ordre technologique, se retrouve sur la plupart des appareils réalisant des mesures de PM (en tous cas sur ceux qui sont portatifs), aussi n'est-ce pas une spécificité de cette étude. Par ailleurs l'intercomparaison menée entre les différents types de capteurs est plutôt rassurante vis-à-vis de la fiabilité/reproductivité des résultats. Les statistiques descriptives seront à modérer suivant ces éléments.

- PM_{10}

Les NEMos utilisés lors des campagnes (NEMo XT et NEMo TC), réalisent une extrapolation sur la base de la mesure des $PM_{2,5}$ pour fournir une valeur de PM_{10} . Les

¹² - Cette campagne, menée par l'OQAI entre 2003 et 2005 dans 567 résidences principales jugées représentatives des logements français, constitue aujourd'hui encore une référence en termes de description de l'air intérieur. Une deuxième campagne nationale logement est en cours pour actualiser les données de la première, mais les résultats ne seront pas disponibles avant la fin du projet Performance 2.

modalités de calcul ainsi que les hypothèses sur lesquelles elles reposent n'étant pas connues, ces valeurs ne seront pas exploitées.

3.1.3 Eléments de contextes spécifiques

La première campagne de mesure à Paris a été marquée par un **incendie**, qui s'est déclaré semaine 48. Suivant le jour précis de la semaine concernée, tous les logements étaient potentiellement instrumentés sauf le P9 et le P14.

Pour une raison inexplicée, les trois premiers jours de mesures de PM extérieures à Villeurbanne présentent des résultats aberrants car excessivement élevés (de l'ordre de $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Après vérification, les stations Atmo avoisinantes ne présentant pas d'événement particulier sur cette période, il a été admis que les données de notre capteur présentaient une anomalie et ne seraient pas exploitées sur cette période. Une hypothèse explicative résiderait dans le fait qu'une poussière ait pu s'immiscer dans le capteur lors des manipulations liées à la pose de celui-ci, mais rien ne permet d'en être parfaitement certain. Quoi qu'il en soit, le dysfonctionnement ne s'est pas reproduit.

3.2 Données issues des mesures en continue par des capteurs embarqués

3.2.1 Mesures réalisées par les capteurs embarqués

Les capteurs embarqués installés par les industriels à la livraison du bâtiment et étalonnés (Villeurbanne– Janvier 2022) ou remplacés / ajoutés (Paris – Novembre 2021) dans le cadre de ce projet de recherche permettent d'obtenir des données sur l'ensemble de la période du projet et pour toutes les pièces :

- Température
- Hygrométrie
- Dioxyde de Carbone (CO_2) - les capteurs embarqués du bâtiment de Villeurbanne mesurent le CO_2 uniquement dans les pièces de vie.
- Capteurs de pression et de position des volets des bouches d'extraction (sauf WC à Villeurbanne, avec uniquement capteur sur le détecteur de présence)
- Capteurs de position des volets des entrées d'air

Auxquelles s'ajoutent, pour Paris, dans toutes les pièces :

- Composés Organiques Volatils (COV)
- Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 2.5 ($\text{PM}_{2.5}$)

Ces mesures sont complétées par une station extérieure (pour Paris toujours) qui relève en continue la température, l'humidité, le CO_2 , les $\text{PM}_{2.5}$, les COV, la direction et la vitesse du vent (la station à Villeurbanne a été mise hors d'usage en début de projet).

3.2.2 Limites des mesures des capteurs embarqués

3.2.2.1 Principaux résultats de l'intercomparaison (tâche 2)

L'intercomparaison réalisée par le LOCIE en tâche 2 a abouti aux conclusions rappelées ci-dessous à propos des capteurs embarqués.

- PM

Les réponses temporelles des capteurs Aereco sont fortement corrélées et cela quel que soit le type de variation de concentration et quelle que soit la gamme de concentration mise en œuvre dans cette étude. Elles sont également fortement corrélées aux mesures de l'analyseur de référence. Ces réponses sont donc cohérentes. Les concentrations mesurées présentent une dispersion raisonnable, inférieures à 25 % par rapport à la référence pour des concentrations inférieures à 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. On notera cependant la présence de pics ponctuels qui peuvent être associés à des erreurs de mesure. Il semble donc nécessaire de traiter les résultats afin de filtrer ces valeurs qui dégradent sensiblement les paramètres calculés (valeurs maximales, coefficients de corrélation).

- COV totaux

Les réponses temporelles des capteurs Aereco sont fortement corrélées et cohérentes avec les mesures de référence. La dispersion des concentrations est d'environ 100 ppb pour des concentrations inférieures à 1000 ppb et de plusieurs centaines de ppb pour des concentrations supérieures à 2000 ppb (campagne 2 prise comme référence, capteur 155 exclu). Du fait de la nature de la mesure (concentration en COV totaux exprimée en équivalent du composé utilisé pour la calibration), la précision des valeurs de concentration ne peut pas être étudiée. Deux capteurs ont mesuré des concentrations sensiblement plus faibles que les autres capteurs : le 153 durant la campagne 1 et le 155 durant la campagne 2.

3.2.2.2 Représentativité spatiale

Comme vu précédemment le positionnement des capteurs en QAI est normalisé. Les capteurs embarqués sont, pour leur part, fixés sur la partie haute du mur comme on peut le voir sur la Figure 6. Cela ne permet pas d'établir des mesures représentatives de l'air ambiant. Ils sont en revanche plus représentatifs de la composition de l'air au niveau des terminaux, donc de l'air entrant dans les pièces de vie et de l'air extrait dans les pièces humides.



Figure 6 : Photo chambre avec positionnement entrée d'air et capteur embarqués– logement V4

3.2.2.3 Informations liées à la ventilation

Les débits d'air ne sont pas mesurés en tant que tels mais bien calculés à partir des données mesurées et d'hypothèses. Ainsi le débit traversant les entrées d'air est issu d'un abaque qui associe un débit à chaque position de volet enregistrée pour une différence de pression intérieur/extérieur de 20 Pa – cette valeur de pression résultant d'une hypothèse (utilisée dans les Avis techniques) et non d'une mesure en temps réel. Ces abaques ont été recalculées lors de la tâche 2 et de la « calibration » des capteurs de position des volets des bouches d'extraction et des entrées d'air.

3.2.2.4 Par polluant

Parmi les données récoltées grâce aux capteurs embarqués, certaines font l'objet de points de vigilance comme indiqué ci-dessous.

- CO₂

Les données de CO₂ sont enregistrées pour la plage 0-2000 ppm, au-delà de laquelle les capteurs saturent. Le point de saturation des capteurs varie d'un capteur à l'autre : les valeurs de saturation sont présentées en Figure 7 pour Villeurbanne et en Figure 8 pour Paris.

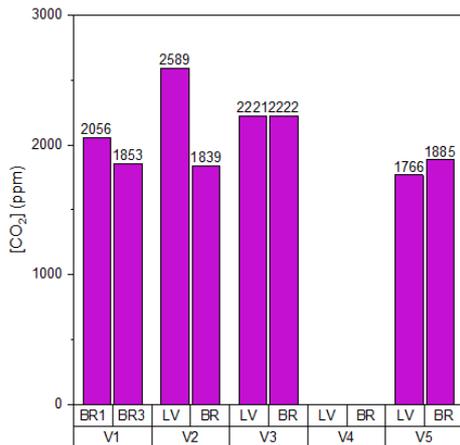


Figure 7 : Valeurs de saturation des capteurs CO₂ – Villeurbanne (BR = chambre ; LV = séjour)

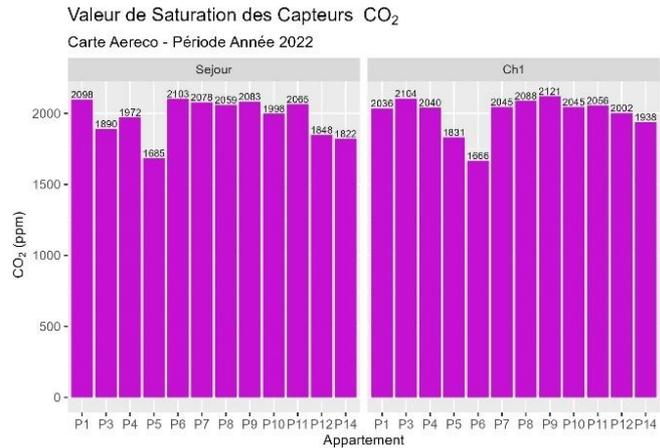


Figure 8 : Valeurs de saturation des capteurs CO₂ - Paris

Il est important de souligner que la saturation des capteurs peut varier d'un modèle à l'autre et même d'un capteur individuel à un autre. Plus précisément, les capteurs à Paris atteignent leur saturation à des niveaux de CO₂ allant jusqu'à 2121 ppm, tandis que les capteurs à Villeurbanne ont une plage de saturation allant jusqu'à 2589 ppm. Cependant, la valeur de 1666 ppm mentionnée dans le cas spécifique de la Chambre 1 de l'appartement P6 n'est pas une valeur de saturation absolue, mais plutôt une valeur maximale dans la plage de mesure des capteurs à Paris (Figure 9). La valeur haute de cette plage pouvant néanmoins être dépassée dans le cadre d'un autre usage.

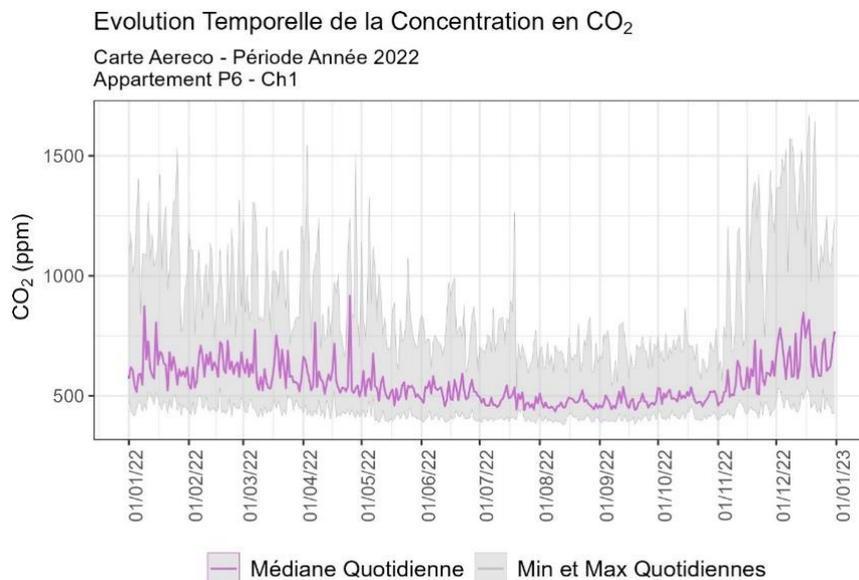


Figure 9 : Evolution temporelle de la concentration en CO₂ – P6 en Chambre 1

- COV

En l'absence de la documentation technique précise des capteurs, il n'est pas possible de lister les COV mesurés (COV totaux, exprimés en équivalent toluène ? autre ?).

Pour cette raison, les analyses réalisées sur ce paramètre seront cantonnées aux dynamiques.

Par ailleurs il est à noter que les capteurs embarqués se recalibrent pour « mimer » l'effet d'un nez humain. Celui-ci perd en sensibilité olfactive lorsqu'il est exposé dans la durée à une même molécule. Cette particularité complexifie l'interprétation des résultats.

3.2.3 Eléments de contexte spécifique

Les capteurs embarqués à Paris ont permis d'identifier une panne du système de ventilation à Paris du 12 avril au 14 mai 2023, très visible sur la mesure de pression aux bouches, comme l'illustre l'exemple d'une bouche cuisine en Figure 10.

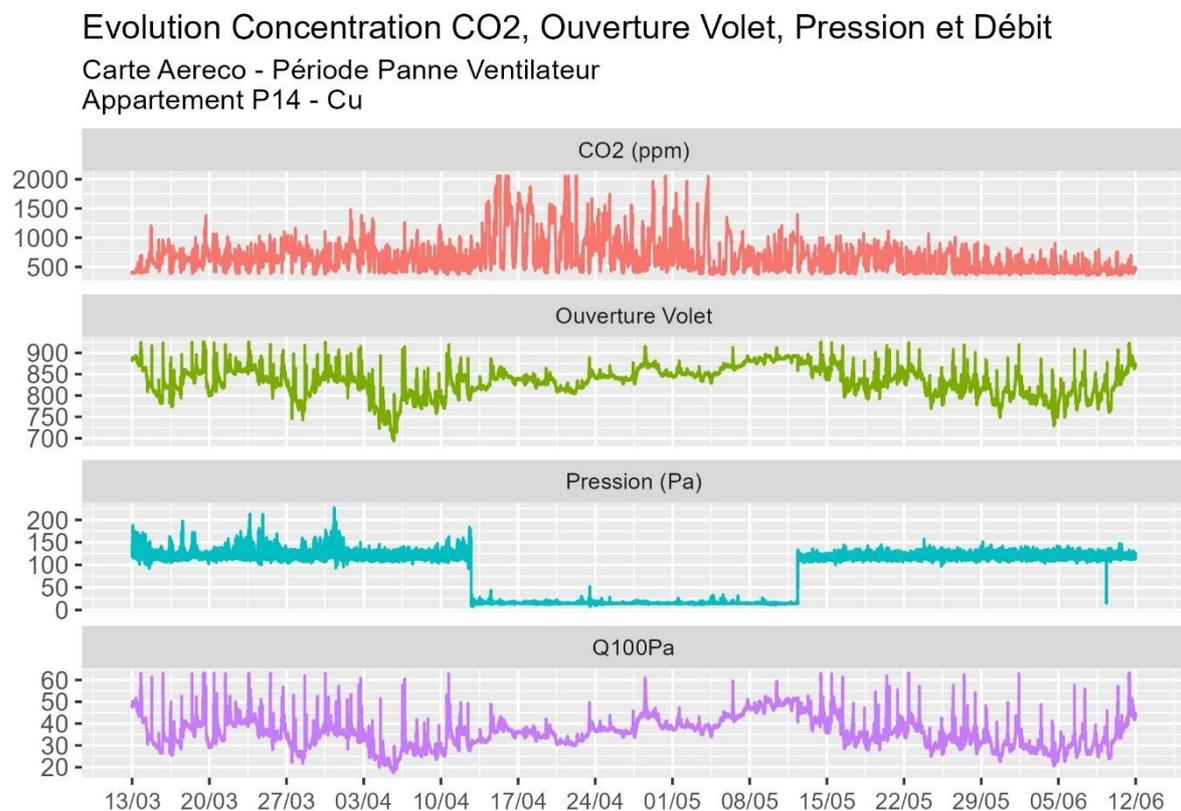


Figure 10 : Evolution temporelle de l'ouverture du volet, détection de présence, pression et débit (Q) – P14 en Cuisine

Cette panne a été attribuée à un manque de maintenance de la part de l'entreprise responsable de l'entretien, qui n'était pas au courant de la défaillance jusqu'au moment où elle s'est produite. Il est à noter que l'entreprise de maintenance n'était pas consciente de cette panne, en partie en raison de la fréquence relativement longue des visites d'entretien, qui était programmée une fois par an. Cette fréquence peut être suffisante dans des conditions normales, mais elle peut ne pas être adéquate pour détecter les problèmes potentiels qui peuvent survenir entre chaque passage. Cette situation souligne l'importance de la surveillance continue des systèmes de ventilation à l'aide de visites d'entretien périodiques. Une autre alternative pour identifier rapidement les pannes ou

les dysfonctionnements est l'installation de capteurs embarqués, permettant ainsi une réparation rapide et une amélioration de la qualité de l'air intérieur.

3.3 Données issues des recueils d'informations auprès des occupants

3.3.1 Données recueillies

Au-delà des valeurs mesurées, les échanges avec les occupants permettent d'obtenir des informations circonstanciées nécessaires à l'interprétation des résultats. Ces données déclaratives, de type qualitatives ou semi-quantitatives, ont été consignées dans les carnets de bord ou lors des entretiens menés sur la base du questionnaire occupant. On retrouve, entre autres :

- Les pratiques en termes d'aération (horaire d'ouverture des fenêtres et durée de l'aération dans le carnet de bord/habitudes générales d'aération dans l'entretien)
- Les sources d'émission de polluant (consignées dans le carnet de bord, et recensées également durant l'entretien).

Les informations sur le logement sont issues de l'observation des personnes ayant administré le questionnaire, et des données consignées dans les documents techniques ou obtenues auprès du bailleur via les fiches diagnostics.

3.3.2 Limites des données issues des occupants

Parmi les objets d'étude, on retrouve les aspects liés à la connaissance des occupants de leur système de ventilation et l'entretien qu'ils en font. Or, le calendrier du projet a pu induire chez les participants une connaissance sur ces sujets. En effet, les entretiens ayant tous eu lieu après une première phase d'intervention des industriels sur les systèmes de ventilation, les occupants ont pu préalablement échanger, de façon plus ou moins fortuite, avec des experts de la ventilation. De fait, les occupants n'étaient peut-être plus tout à fait profanes vis-à-vis de la ventilation et l'entretien de cette dernière.

Par ailleurs, le biais de désirabilité sociale, commun à toutes les études – qui est la tendance à surévaluer les comportements socialement souhaitables et à sous-évaluer les comportements socialement indésirables – a pu conduire les personnes interrogées à donner la réponse qu'ils pensaient être celle attendue au regard des connaissances potentiellement acquises auprès des industriels.

De plus, le contexte sanitaire (la première campagne ayant eu lieu en pleine crise COVID) a été propice à la diffusion et à la recherche d'informations sur l'air intérieur. Ainsi les réponses récoltées pourraient ne pas être représentatives de celles d'une population profane.

Enfin, comme toutes données auto-rapportées celles-ci étaient susceptibles d'être sujettes à différents biais cognitifs connus (effet de récence – mieux se rappeler les derniers éléments encodés en mémoire ; effet de primauté – mieux se rappeler les premiers éléments encodés en mémoire ; reconstruction a posteriori en mémoire ; activation de stéréotypes ; biais de connaissance – tendance à choisir l'option la plus

connue, etc.). Cependant, le carnet de bord et le guide de l'entretien ont été réalisés dans les règles de l'art afin d'éviter le maximum des biais connus.

3.4 Données issues des diagnostics ventilation réalisés en tâche 1

Un diagnostic des installations de ventilation a été réalisé en début de projet (description et résultats présentés dans le rapport de la tâche 1). Les informations concernant notamment les défauts identifiés dans les appartements (notamment détalonnage de porte insuffisant et présence d'élément entravant le flux d'air) sont consultées lors de l'analyse des mesures dans cette tâche 3.

3.5 Données issues de la caractérisation en laboratoire des performances des terminaux de ventilation (tâche 2)

Les terminaux de ventilation ont été caractérisés en laboratoire par Anjos et Aereco. Les courbes de fonctionnement hygroscopique sont tracées pour les bouches et entrées d'air :

- telles qu'elles ont été récupérées (sales) ;
- nettoyées (excepté pour les entrées d'air de Villeurbanne) ;
- remises en état (réparation des volets, et changement de mousse acoustique pour les entrées d'air) avant réinstallation.

Elles sont comparées aux résultats de 2007 au moment de l'installation pour le bâtiment de Paris, et aux spécifications initiales du produit pour les deux sites.

3.6 Définitions des périodes d'études

En fonction des analyses réalisées, les différentes périodes considérées sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Périodes d'analyse considérées pour les 2 sites

	Paris	Villeurbanne
Année complète	01 janvier au 31 décembre 2022	01 juin 2022 au 30 mai 2023
Période de chauffe	Du 01 janvier au 20mai 2022 et du 01 octobre au 31 décembre 2022	01 octobre 2022 au 01 février 2023

3.7 Synthèse

Les Tableau 5 et Tableau 6 offrent une synthèse des données recueillies dans le cadre du projet, et des principales limites associées à chacune d'entre elles.

Tableau 5 : Synthèse des données recueillies dans Performance 2

Type de données	Pièces de vie			Pièces humides		Extérieur	
	Capteurs embarqués (continue)	NEMo (campagnes QAI 15 jours sur 2 pièces)	déclaratif	Capteurs embarqués (continue)	déclaratif	Station météo in situ	NEMo (durant les campagnes QAI)
T°C	x	x		x		*	x
HR	x	x		x		*	x
Ouverture entrée d'air	x						
Débit d'extraction				x			
CO ₂	x	x		*		*	
Formaldéhyde		x					
COV _{totaux}	*			*		*	
COV _{légers}		x					x
PM _{2.5}	x	x		*		*	x
PM ₁₀		x					x
PM ₁		x					x
Sources d'émission			x		x		
Aération			x		x		

* données disponibles seulement pour le bâtiment de Paris

Tableau 6 : Principales limites associées aux différentes données recueillies dans Performance 2

Paramètre	Capteurs concernés	Principale(s) limite(s)	Conduite à tenir
CO ₂	NEMos	Autocalibration hebdomadaire sur valeur la plus faible non désactivable et non traçable	Résultats de la 1ère campagne à Paris inexploitable (car 2 autocalibrations non tracées)
	Capteurs embarqués	Saturation à ≤ 2000 ppm	Pas de calcul de moyenne
Formaldéhyde	NEMos	Moyenne sur 2h Dispersion des valeurs	
COV _{totaux}	Capteurs embarqués Paris	Molécules mesurées ? Mimétisme « nez humain »	Vigilance sur les résultats et les dynamiques
COV _{légers}	NEMos	Molécules mesurées ? Dispersion des valeurs	Pas de valeur seuil
PM _{2.5}	Capteurs embarqués Paris	Incertitude élevée Artefact : pic ponctuel	Vigilance sur les statistiques descriptives
	NEMos	Incertitude élevée Dispersion des valeurs	Vigilance sur les statistiques descriptives
PM ₁₀	Certains NEMos	Mesures extrapolées avec PM _{2.5}	Inexploitable
PM ₁	NEMos	Incertitude élevée	Vigilance sur les statistiques descriptives
Sources d'émission	Déclaratif (carnet de bord / entretien)	Biais cognitifs + désirabilité sociale	
Aération	Déclaratif (carnet de bord / entretien)	Biais cognitifs + désirabilité sociale	Corrélation avec baisse température/HR/CO ₂ .

4 EVALUATION DE LA DURABILITE DES SYSTEMES DE VENTILATION HYGROREGLABLES ETUDIES

Lors du projet Performance 1, l'analyse des données des deux années de monitoring des performances de la ventilation (Phase 3) avait permis de montrer que les systèmes de ventilation hygro-réglable B étudiés permettaient :

- d'assurer de faibles concentrations en CO₂ dans l'ensemble des logements, malgré de fortes occupations, indiquant « une bonne réaction des systèmes hygro-réglables à l'occupation humaine » ;
- d'éviter les risques de condensation en évacuant correctement les pics d'humidité ;
- un gain moyen de 37,6% sur les débits déperditifs par apports à un système autoréglable, et donc une diminution de la consommation d'énergie malgré des situations de sur-occupation et donc de sur-ventilation par rapport à la référence utilisée dans les calculs pour les avis techniques (en extrapolant pour une occupation « normale », les gains sur les débits déperditifs étaient estimés à 50-55%).

Performance 1 avait aussi permis d'identifier :

- L'impact négatif significatif sur les concentrations en CO₂ de l'arrêt de la ventilation (due à une panne) ;
- Que les entrées d'air réagissaient très bien à l'occupation (impact sur les niveaux de CO₂ et d'humidité).

Dans Performance 2, l'un des objectifs est d'analyser les performances de ces mêmes systèmes¹³ de ventilation 15 ans après Performance 1, afin d'évaluer sur chacune de ces conclusions l'impact du temps. Le présent chapitre décrit et explique la méthodologie retenue pour répondre à cet objectif, à partir de l'analyse des données récoltées pendant Performance 2, et les résultats de cette analyse.

Chaque appartement fait l'objet d'une fiche, accessible en Annexe C.

Caractériser l'évolution des performances d'un système de ventilation repose sur la **comparaison** de résultats théoriques (définies dans l'avis technique correspondant au système de ventilation) et/ ou à **réception** (données issues du premier projet Performance 1) puis **après plusieurs années d'utilisation** (données du projet actuel, Performance 2). Certains de ces aspects ont été traités au sein de la tâche 2. C'est le cas des questions liées à la robustesse de la technologie (pérennité des terminaux), ou encore de sa résistance à l'usage des occupants (évaluation in situ de l'état du système de ventilation en termes de propreté ou de mésusage).

Les analyses développées ici se focalisent sur l'évolution des performances du système de ventilation vis-à-vis de **l'énergie** (paragraphe 4.1) et des **paramètres de confort**

¹³ Sur le site de Villeurbanne, le ventilateur a été changé entre les deux projets (aucune trace de cette opération n'a pu être retrouvé). Le nouveau ventilateur n'est pas de la même marque donc officiellement, le système n'est plus conforme à l'Avis technique. Néanmoins, les propriétés de ce ventilateur étant similaires à celle du ventilateur d'origine, il n'y a pas d'impact de ce changement sur les résultats de cette étude.

(étudiés selon les indicateurs utilisés dans Performance 1), à savoir **humidité relative** (paragraphe 4.2) et **CO₂** (paragraphe 4.3) et, afin de permettre une comparaison avec les résultats initiaux.

NB : Dans le rapport de Performance 1, la majorité des indicateurs ne sont donnés que pour une pièce ou un appartement. Il ne sera donc pas possible de réaliser des comparaisons sur l'ensemble des appartements. Il ne sera pas toujours possible non plus de le faire dans les mêmes pièces car tous les appartements des bâtiments instrumentés n'ont pas été inclus dans le projet Performance 2. D'autre part les résultats présentés dans Performance 1 le sont généralement sous forme de graphiques et pas de tableau de valeurs. On ne peut donc avoir accès aux valeurs que par la lecture du graphique, avec les approximations que cela suppose.

4.1 Indicateurs liés à l'énergie

4.1.1 La consommation des ventilateurs

Dans Performance 1, la puissance électrique des ventilateurs avaient été mesurées sur une période de chauffe.

Sur le site du Villeurbanne, le caisson de ventilation a été changé entre Performance 1 et Performance 2. Aucune trace administrative de ce remplacement n'existe, donc nous ignorons la raison de ce changement. Le nouveau caisson, bien qu'il ne soit pas conforme à l'avis technique du système, est similaire au caisson d'origine (comparaison des performances des deux caissons en Annexe B) et assure donc correctement la ventilation des logements. En revanche, il n'a pas été instrumenté et aucune mesure au ventilateur n'a donc pu être réalisée dans Performance 2.

Pour Paris, les données de consommation du ventilateur ne sont donc disponibles qu'à partir du 21 novembre du 2022 (Figure 11). En effet, la remise en route de l'installation d'acquisition au niveau du caisson de ventilation n'a pu être réalisée que tardivement dans le projet en raison de l'indisponibilité du service de support technique.

Consommation et Puissance Ventilateur

Carte AerecoCaisson Extraction

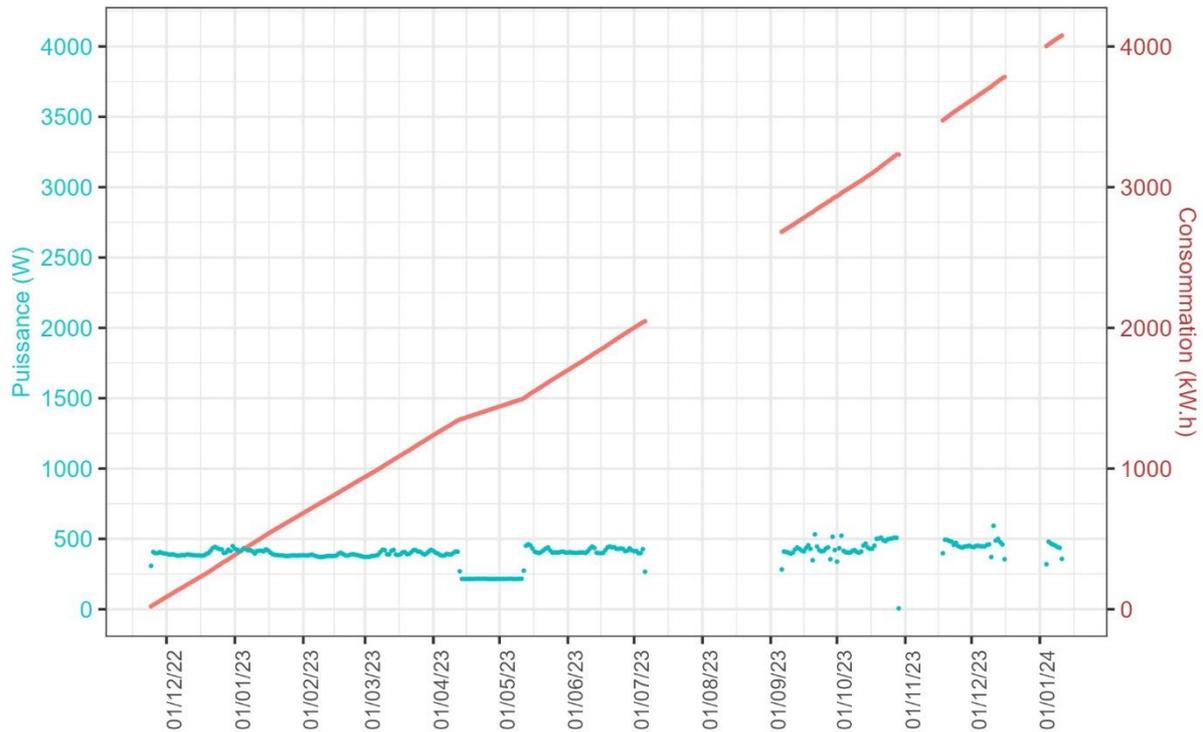


Figure 11 : Consommation d'énergie cumulée pour le ventilateur de Paris – Performance 2

Sur le site de Paris en termes de performance énergétique, il a été constaté que la consommation est relativement la même. La variation de puissance reste constante autour de 500 W. Cela montre une stabilité dans la performance énergétique du système de ventilation. Ces résultats montrent ainsi que le ventilateur et le système hygroréglable n'ont pas subi de dégradation significative en termes de performance énergétique sur les 15 ans avec une valeur similaire lors des prélèvements durant Performance 1 (Figure 12).

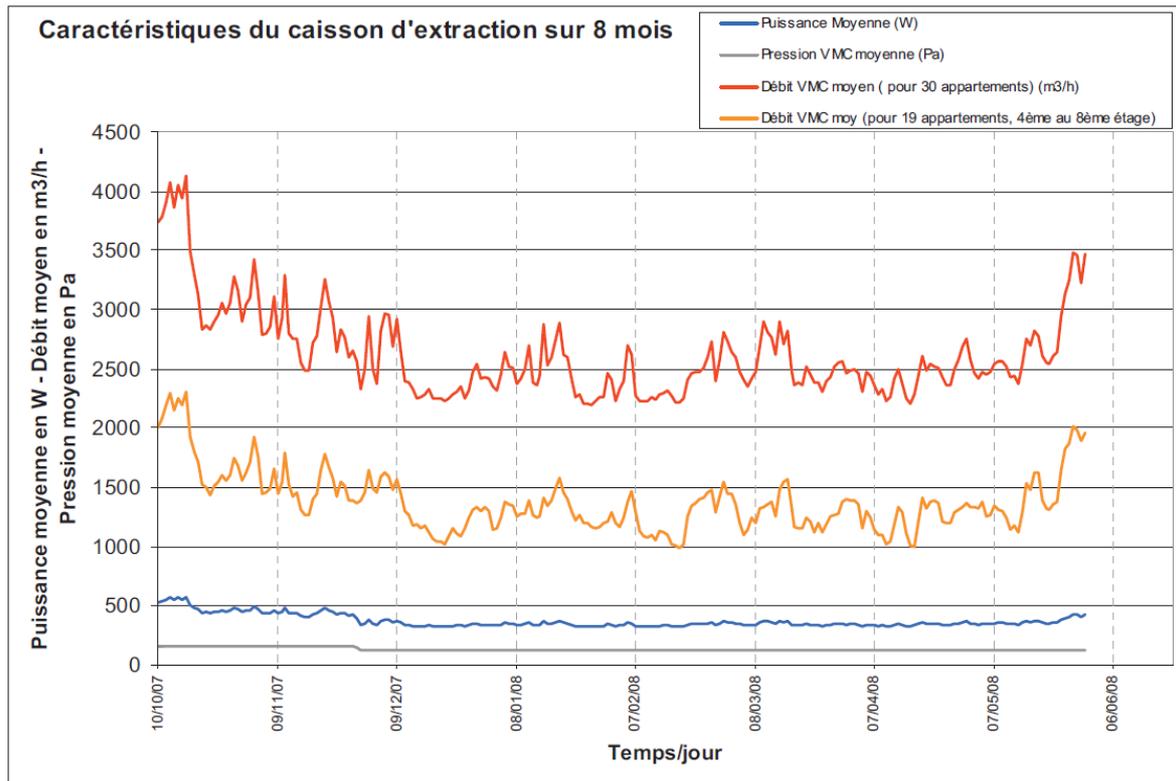


Figure 12 : Puissance moyenne calculée pour le ventilateur de Paris – Performance 1

Malgré les conditions d'utilisation qui ont pu changer (intensité de l'utilisation, conditions climatiques, etc.), cela renforce l'indication que les systèmes fonctionnent efficacement et de manière stable au cours du temps. La durabilité et la robustesse du ventilateur et du système de ventilation sont ainsi des facteurs clés qui ont permis de maintenir une performance énergétique stable sur une longue période.

La consommation énergétique des ventilateurs étant restée stable sur 15 ans, on peut conclure que le système de ventilation équipé de système hygroréglable et du même ventilateur a maintenu une bonne performance énergétique. Ceci est un indicateur de la robustesse et de la durabilité des équipements utilisés. Une telle stabilité dans la consommation énergétique sur une longue période est favorable en termes de coûts d'exploitation et de maintenance. Elle démontre également que l'utilisation de ces équipements peuvent conduire à des économies d'énergie et des coûts réduits à long terme.

4.1.2 Les débits déperditifs

Les débits déperditifs sont calculés sur la période de chauffe (d'après les références du GS 14.5 - Equipements / Ventilation et systèmes par vecteur air de la commission chargée de formuler les avis techniques¹⁴, cette période court du 1^{er} octobre au 20 mai). Par définition, le débit déperditif moyen de la ventilation hygroréglable est plus faible que celui de la

¹⁴ Dans la suite de ce document, nous utiliserons la référence GS 14.5

ventilation autoréglable, puisque les débits sont réduits lorsque les niveaux d'humidité relative sont faibles. Le débits déperditif Q_{deper} est calculé selon l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (paragraphe 2.4)

Dans Performance 1, les débits déperditifs avaient été calculés à partir des mesures réalisées dans les appartements de Paris (sur la période de chauffe 2007-2008) et de Villeurbanne (sur la période de chauffe 2008-2009), et comparés aux débits déperditifs théoriques d'un système autoréglable (selon l'Arrêté de mars 1982) et aux débits déperditifs théoriques du système hygroréglable pour l'appartement calculé avec le logiciel SIREN¹⁵ avec des scénarios d'occupation correspondant l'occupation réelle lorsque l'information était disponible. Pour 100% des logements étudiés, les débits déperditifs étaient bien inférieurs aux débits autoréglables correspondant au type de logement (Figure 13 et Figure 14).

Dans Performance 2, nous avons à nouveau évalué les débits déperditifs à partir des mesures réalisées sur une saison de chauffe pour 13 logements à Paris et 5 logements à Villeurbanne.

La Figure 13 présente une synthèse de toutes les données concernant le site de Villeurbanne. Pour les 5 logements étudiés, les débits déperditifs Performance 2 sont inférieurs à ceux d'un système équivalent autoréglable.

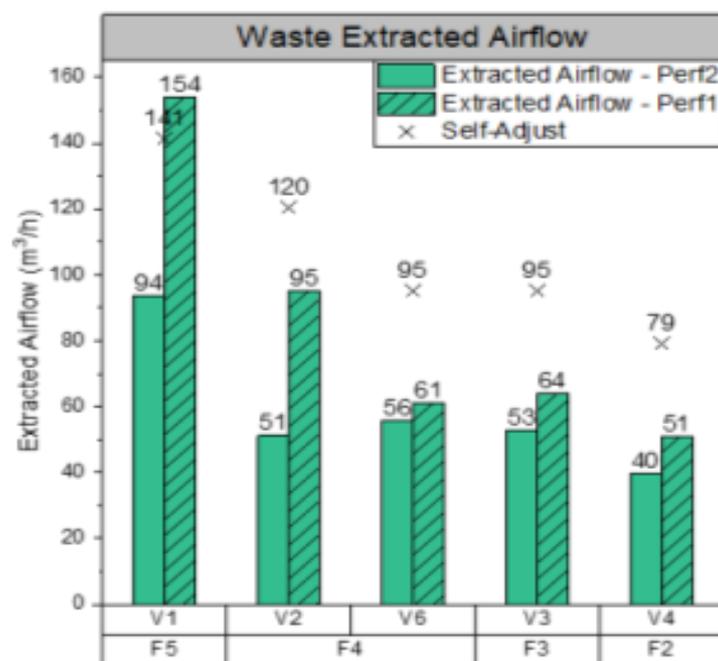


Figure 13 : Comparaison de débits déperditifs évalués dans Performance 2 aux débits correspondants – Site de Villeurbanne

La Figure 14 présente une synthèse de toutes les données concernant le site de Paris.

¹⁵ Logiciel développé par le CSTB, utilisé officiellement au moment de Performance 1 pour l'instruction des Avis Techniques des systèmes de ventilation. Il a été depuis remplacé par le logiciel Mathis.

Débit Extrait Moyen Déperditif par Logement

Carte Aereco - Année 2022 en Période de Chauffage (01 Oct au 20 Mai)

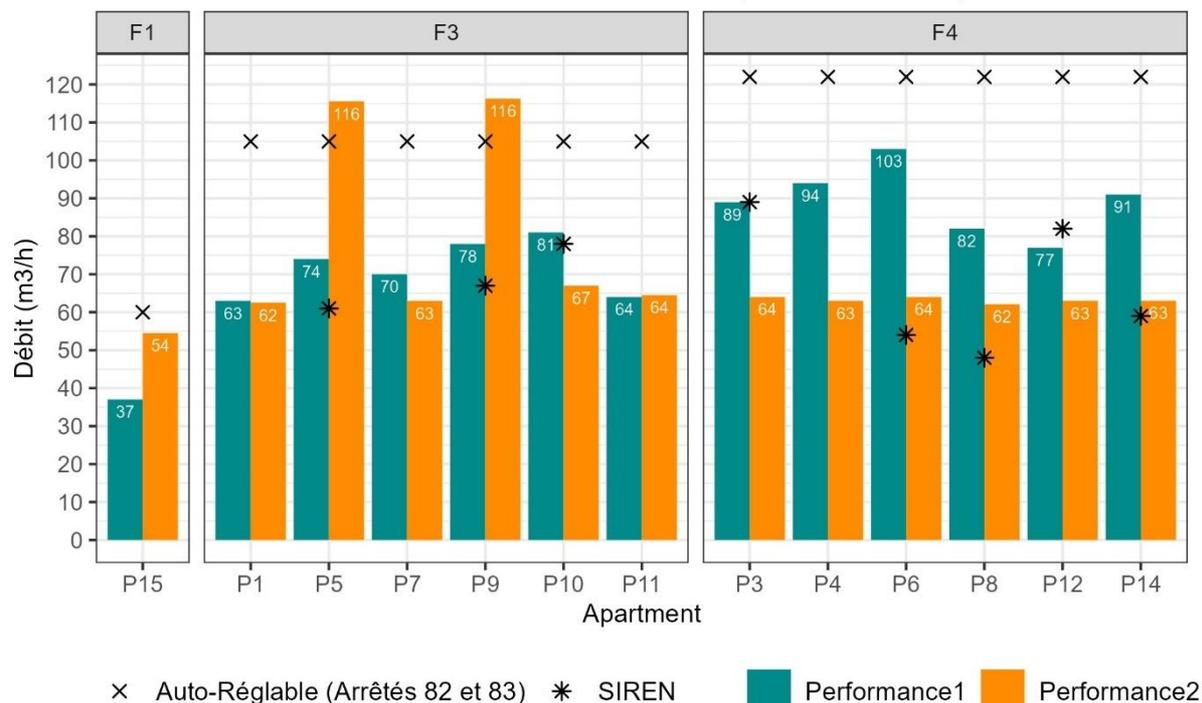


Figure 14 : Comparaison de débits déperditifs évalués dans Performance 2 aux résultats de Performance 1, aux débits correspondants autoréglables et aux débits théoriques évalués par le logiciel SIREN – Site de Paris

Pour 10 logements, les débits déperditifs Performance 2 sont inférieurs à ceux d'un système équivalent autoréglable et à ceux mesurés dans Performance 1. Pour le logement P15, le débit déperditif est plus élevé dans Performance 2 qu'il y a 15 ans, mais reste inférieur au débit d'un système autoréglable. Pour les logements P5 et P9, les débits déperditifs évalués dans Performance 2 sont très supérieurs à ceux de Performance 1, et dépassent ceux d'un système autoréglable équivalent. Une analyse détaillée de ces deux logements est proposée dans le chapitre 6 de ce rapport.

4.2 Fonctionnement hygroréglable des systèmes de ventilation

4.2.1 Fonctionnement des entrées d'air et bouches d'extraction

4.2.1.1 Pression disponible aux bouches

Pour fonctionner correctement, la première condition pour les bouches d'extraction est d'avoir suffisamment de pression disponible, pression fournie par le ventilateur et impactée par les pertes de charges dans le réseau, dues à la géométrie du réseau, à l'étanchéité du réseau et à son encrassement. Pour chacune des bouches d'extraction instrumentées, nous avons donc vérifié que la différence pression mesurée restait dans la plage de fonctionnement. Sur les deux exemples présentés en Figure 15, nous observons que la différence pression mesurée est conforme avec la plage de fonctionnement de chacune des bouches.

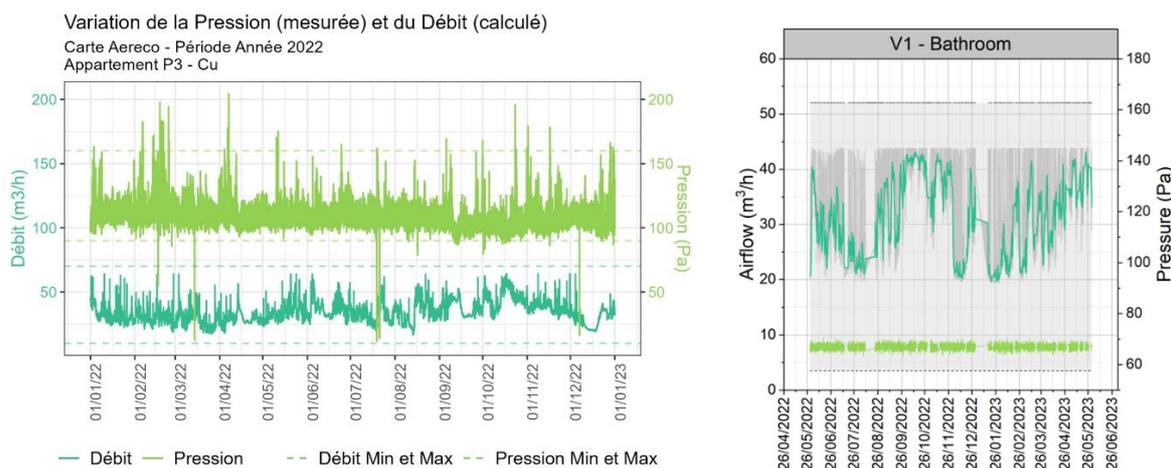


Figure 15 : Exemples de différence de pression mesurée sur une bouche cuisine à Paris (gauche) et une bouche Salle de Bain à Villeurbanne (droite)

L'analyse de la performance des bouches d'extraction du système hygroréglable a été réalisée en évaluant la conformité des pressions mesurées pour chaque bouche d'extraction étudiée. Cette analyse vise à déterminer si les bouches d'extraction fonctionnent efficacement et répondent aux critères de fonctionnement.

Les résultats de l'analyse de la conformité des pressions mesurées pour les bouches d'extraction étudiées sont présentés dans le Tableau 7 pour la zone de Paris et dans le Tableau 8 pour la zone de Villeurbanne. Dans ce tableau, les bouches d'extraction sont classées en fonction de la conformité de leurs pressions mesurées.

Les critères de conformité ont été définis comme suit :

- Différence de pression conforme ✓ si elle se maintient dans les limites définies pendant au moins 70% du temps.
- Différence de pression à une bouche d'extraction est considérée comme Non Conforme ✗ si elle ne se maintient pas dans les limites définies pendant au moins 70% du temps.

L'analyse des résultats permet de déterminer la performance globale du système hygroréglable en évaluant le pourcentage de bouches d'extraction pour lesquels la différence de pression est conforme et non conforme. Il est essentiel de souligner que pour un fonctionnement optimal du système hygroréglable, il est recommandé que la majorité des bouches d'extraction présentent une différence de pression conforme pendant au moins 70% du temps.

Les résultats présentés dans le Tableau 7 montrent que les cuisines sont les pièces pour lesquelles les différences de pression sont les plus conformes. Les salles de bain présentent souvent un déficit en pression selon le critère choisi mais avec une distribution des différences de pression qui est proche de la valeur limite de conformité sauf pour les appartements P1 et P3 (voir Figure 16). Une différence de pression insuffisante dans l'appartement P1 dans toutes les pièces humides (WC, Cu et SdB) a été déjà constatée auparavant lors de la réinstallation des terminaux de ventilation après la caractérisation au labo. L'entretien régulier est crucial pour assurer le bon fonctionnement des systèmes

de ventilation. Au fil des années, des modifications ou des réparations peuvent avoir été effectuées sans respecter les spécifications initiales du système hygroréglable. Par exemple, des travaux de rénovation ou des interventions d'urgence peuvent altérer l'équilibre du système de ventilation, créant des déséquilibres de pression. Les habitudes des occupants peuvent également influencer la performance du système. Dans un logement social, où l'occupation est souvent élevée, des comportements tels que l'ouverture prolongée des fenêtres ou le blocage des bouches d'extraction peuvent perturber le système de ventilation. Les problèmes structurels du bâtiment, tels que des fissures dans les murs, des fenêtres mal ajustées ou des portes non étanches, peuvent créer des infiltrations d'air non contrôlées. Ces infiltrations perturbent la pression interne et le flux d'air, affectant ainsi le fonctionnement des bouches d'extraction hygroréglables. Les capteurs de présence alimentés par des piles dans les toilettes peuvent également être une source de dysfonctionnement. Si les piles sont faibles ou si les capteurs ne sont pas correctement entretenus, les bouches d'extraction peuvent ne pas s'activer correctement, entraînant une non-conformité de la différence de pression.

Tableau 7 : Synthèse de la conformité des différences de pression aux bouches d'extraction – Paris

	P1	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P14	P15
Cuisine	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Salle de Bain	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✗
Salle d'eau	-	✓	✗	-	✓	-	✗	-	-	-	✓	-	-
WC	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✗

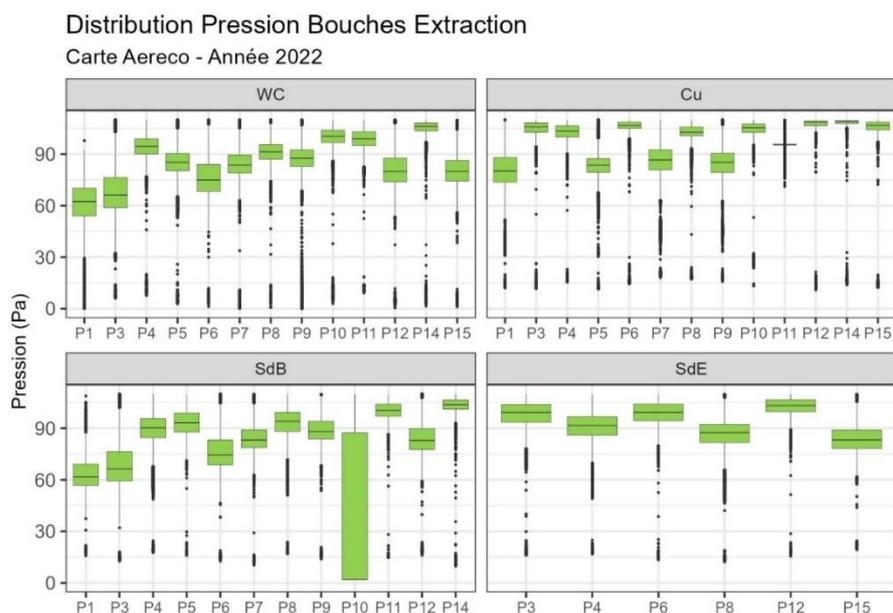


Figure 16 : Distribution des différences de pression mesurées aux bouches d'extraction - Site de Paris

Les résultats pour Villeurbanne présentés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** permettent de conclure que les bouches cuisines sont toutes conformes et une majorité des bouches WC le sont aussi. Pour les bouches présentes dans la salle de bain, des défauts de conformités sont présents. Les valeurs sont en effets souvent inférieurs aux différences de pression recommandées. Ces résultats se retrouvent dans les deux zones.

Tableau 8 : Synthèse de la conformité des pressions aux bouches d'extraction – Villeurbanne

	V1	V2	V3	V5	V6
Cuisine	✓	✓	✓	✓	✓
Salle de Bain	✗	✓	✗	✗	✓
Salle d'eau	-				
WC	✓	✓	✗	✓	✓

4.2.1.2 Fonctionnement hygroréglable de bouches d'extraction et entrées d'air

Chaque bouche d'extraction et chaque entrée d'air présente une courbe hygroscopique de référence, qui indique pour chaque valeur d'humidité relative de sa plage de fonctionnement le débit d'air correspondant. Pour chacun de ces points de fonctionnement, une tolérance est définie (dans l'avis technique correspondant) qui dépend du niveau d'humidité relative. Ainsi, pour chaque terminal de ventilation, il est possible de tracer une enveloppe de fonctionnement dans laquelle doit s'inscrire tous les couples humidité / débit. Lors de la tâche 2, la courbe hygroscopique de chaque terminal après 13 à 15 ans d'utilisation a été redéfinie en conditions standard, et comparé d'une part aux résultats des études réalisées à réception (Performance 1) et d'autre part à l'enveloppe théorique de fonctionnement.

Pour les bouches d'extraction : les Tableau 9 (Paris) et Tableau 10 (Villeurbanne) présentent le nombre de points étudiés en phase laboratoire Performance 2 qui respectent toujours l'enveloppe théorique après la remise en état (nettoyage + maintenance) des bouches d'extraction. On note à Paris 4 bouches cuisine (en rouge dans le tableau) pour lesquelles plus de 50% des points étudiés sont hors gabarit. Cette information sera analysée si des niveaux d'humidité, de CO₂ ou autre polluant élevés sont mis en avant pendant les campagnes de mesure.

Tableau 9 : Synthèse des résultats de la caractérisation en laboratoire du fonctionnement hygroréglables des bouches d'extraction – Site de Paris

App	Nb points dans l'enveloppe / Nb point total												
	P1	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P14	P15
Cuisine	19/21	19/21	18/21	19/21	7/21	21/21	21/21	16/21	7/21	7/21	10/21	15/21	
Salle de Bain	20/21	18/21	21/21	21/21	16/21	20/21	18/21	20/21	21/21	20/21	17/21	21/21	
Salle d'eau		20/21	17/21		18/21		20/21				20/21		21/21

Tableau 10 : Synthèse des résultats de la caractérisation en laboratoire du fonctionnement hygroréglables des bouches d'extraction –Site de Villeurbanne

	Nb points dans l'enveloppe / Nb point total				
App	V1	V2	V3	V5	V6
Cuisine	11/12	12/12	12/12	-	12/12
Salle de Bain	9/12	8/12	9/12	12/12	9/12

Les Tableau 11 (Paris) et Tableau 12 (Villeurbanne) présentent les résultats similaires pour les entrées d'air. On note à Paris que la majorité des entrées d'air présentent plus d'un tiers des points étudiés hors gabarit (en orange/rouge dans le tableau) dont 5 avec plus de 50% des points hors gabarit (en rouge dans le tableau). A Villeurbanne, on décompte 5 entrées d'air présentant plus d'un tiers des points étudiés hors gabarit (en orange/rouge dans la tableau) dont 3 avec plus de 50% des points hors gabarit (en rouge dans le tableau). Cette information sera analysée si des niveaux d'humidité, de CO₂ ou autre polluant élevés sont mis en avant pendant les campagnes de mesure.

Tableau 11 : Synthèse des résultats de la caractérisation en laboratoire du fonctionnement hygroréglables des entrées d'air –Site de Paris

	Nb points dans l'enveloppe / Nb point total												
App	P1	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P14	P15
Séjour	10/21	13/21	7/21	12/21	11/21	13/21	12/21	11/21	11/21	14/21	12/21	12/21	
Chambre	9/21	16/21	7/21	16/21	15/21	12/21	10/21	9/21	11/21	11/21	6/21	11/21	
Chambre 2		14/21											

Tableau 12 : Synthèse des résultats de la caractérisation en laboratoire du fonctionnement hygroréglables des entrées d'air –Site de Villeurbanne

	Nb points dans l'enveloppe / Nb point total				
App	V1	App	V1	App	V1
Séjour	4/10	6/12	7/7	6/9	5/12
Chambre	7/9	6/7	4/12	9/12	5/9

Afin d'étudier ensuite le fonctionnement en conditions réelles de ces terminaux, les couples HR / débits relevés pendant une année sur chaque site ont été comparés à nouveau aux enveloppes théoriques, ainsi qu'aux résultats de la caractérisation en laboratoire. L'humidité relative variant de façon significative au long de l'année, les résultats sont donnés pour chaque mois. En conditions réelles, les points de mesure sont relevés toutes les minutes, sans attendre la stabilisation. Le capteur mécanique hygroréglable (modulant le débit) ayant un temps de réponse plus élevé que le capteur électronique d'humidité, il existe un décalage temporel lorsqu'il y a un changement rapide d'humidité. Pour atténuer cet effet et assurer une mesure précise de l'humidité, il est nécessaire d'appliquer des critères de filtrage pour éliminer les points de mesure impactés par cette dynamique. Dans ce contexte, la règle suivante a été retenue : les points de mesure présentant un changement d'humidité relative supérieur à 80 % sur une période de 5 minutes consécutives sont filtrés. Cette règle de filtrage permet de supprimer les

points de mesure où le changement d'humidité est trop rapide pour être considéré comme représentatif de la situation réelle. En fixant un seuil de 80 % de changement d'humidité relative sur une fenêtre de 5 minutes, il s'assure de ne pas fausser les données avec des fluctuations brusques qui pourraient résulter du temps de réponse plus élevé des capteurs mécaniques. De la même manière, il est garanti que seuls les points de mesure reflétant des variations d'humidité plus lentes et plus stables sont pris en compte, ce qui permet d'obtenir une représentation plus fidèle des conditions environnementales réelles. Cela contribue à améliorer la précision des données collectées et à garantir une évaluation plus juste des performances du système de ventilation hygroréglable dans des conditions d'utilisation réelles.

La Figure 17 présente un exemple de résultat pour une bouche cuisine à Paris, la Figure 18 pour une bouche de salle de bain à Villeurbanne.

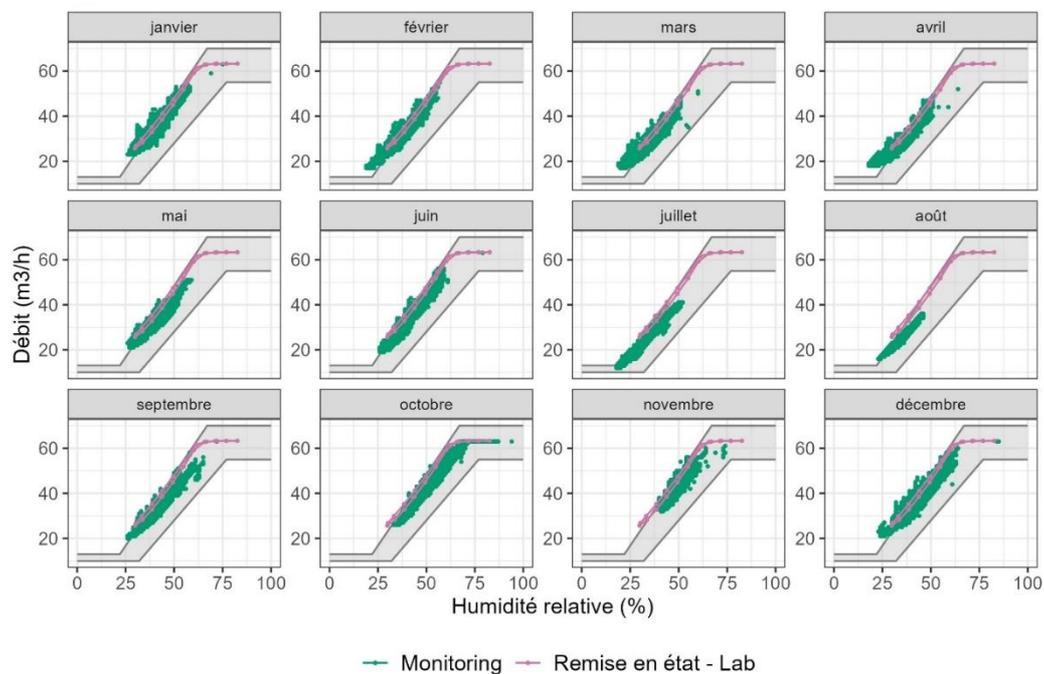


Figure 17 : Réponse hygroscopique d'une bouche cuisine en conditions réelles pendant 1 an – Appartement P14 – Paris

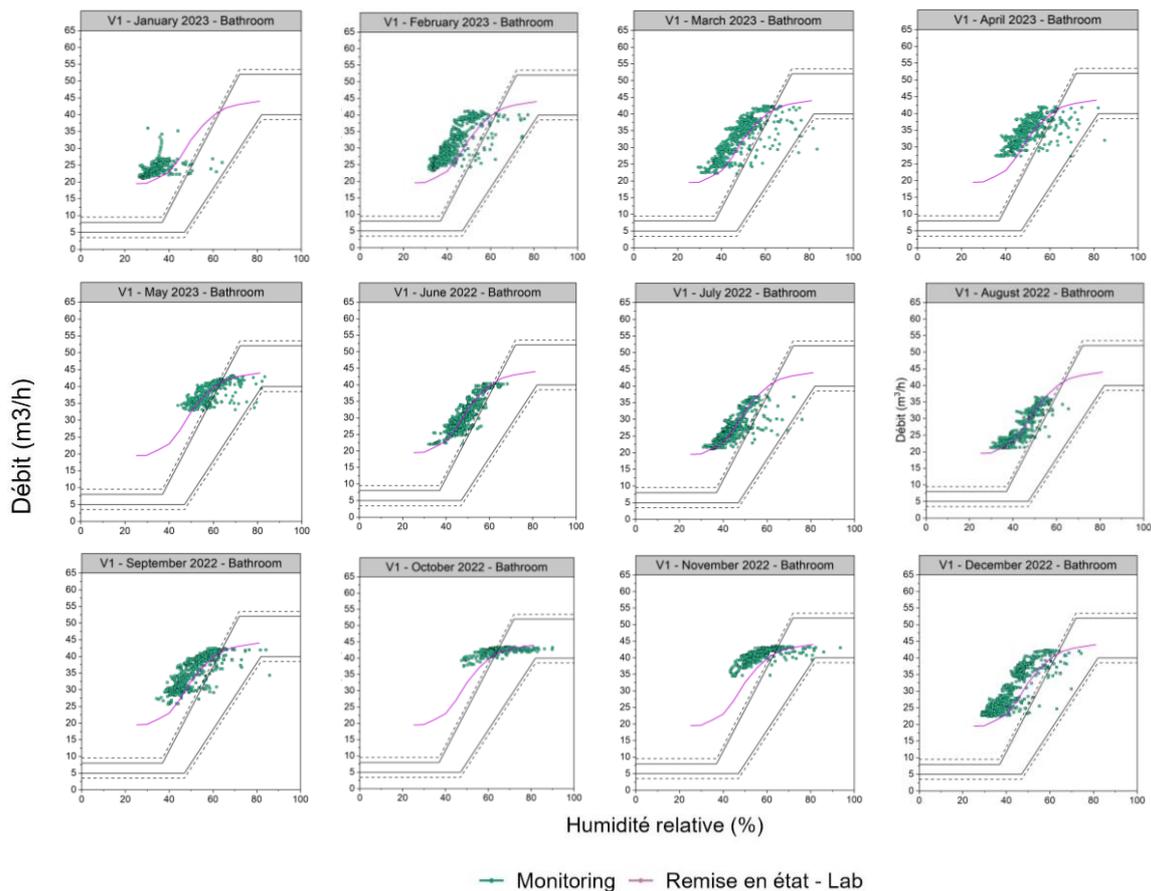


Figure 18 : Réponse hygroscopique d'une bouche de salle de bain en conditions réelles pendant 1 an – Appartement V1 - Villeurbanne

Pour les entrées d'air, l'air passant au travers étant de l'air extérieur, et donc à la température extérieure, il est nécessaire de recalculer le débit équivalent au niveau d'humidité relevé et à la température extérieure mesurées, avant de recalculer une enveloppe théorique correspondante (l'enveloppe théorique issue de l'avis technique n'est valable qu'en conditions standard). Pour chaque variation de température extérieure, le gabarit ou enveloppe théorique se décale donc. Pour la représentation graphique proposée en Figure 19 et Figure 20, les gabarits dessinés correspondent au gabarit calculé pour la température moyenne du mois. En réalité, le gabarit a été recalculé pour chaque point relevé, donc chaque minute.

Cette analyse a été réalisée sur toutes les bouches d'extraction et entrées d'air étudiées dans Performance 2. Pour chacune, nous avons évalué le nombre de point qui est bien dans le gabarit, c'est-à-dire qui correspond bien au fonctionnement hygroréglable attendu. Afin de pouvoir identifier si une tendance existait concernant les points de dysfonctionnement, nous avons identifiés pour les points hors gabarits la proportion qui correspond à un fonctionnement à basse HR (ouverture minimale), à HR moyenne (ouverture progressive) et HR élevée (ouverture maximale). Nous avons évalué la proportion de points hors gabarit dans chacune des tranches d'HR suivantes :

- HR Inférieur à 40%

- HR comprise entre 40% et 65%
- HR supérieure à 65%.

Les résultats de l'ensemble de cette analyse sont représentés en Figure 21 (Paris) et Figure 22 (Villeurbanne).

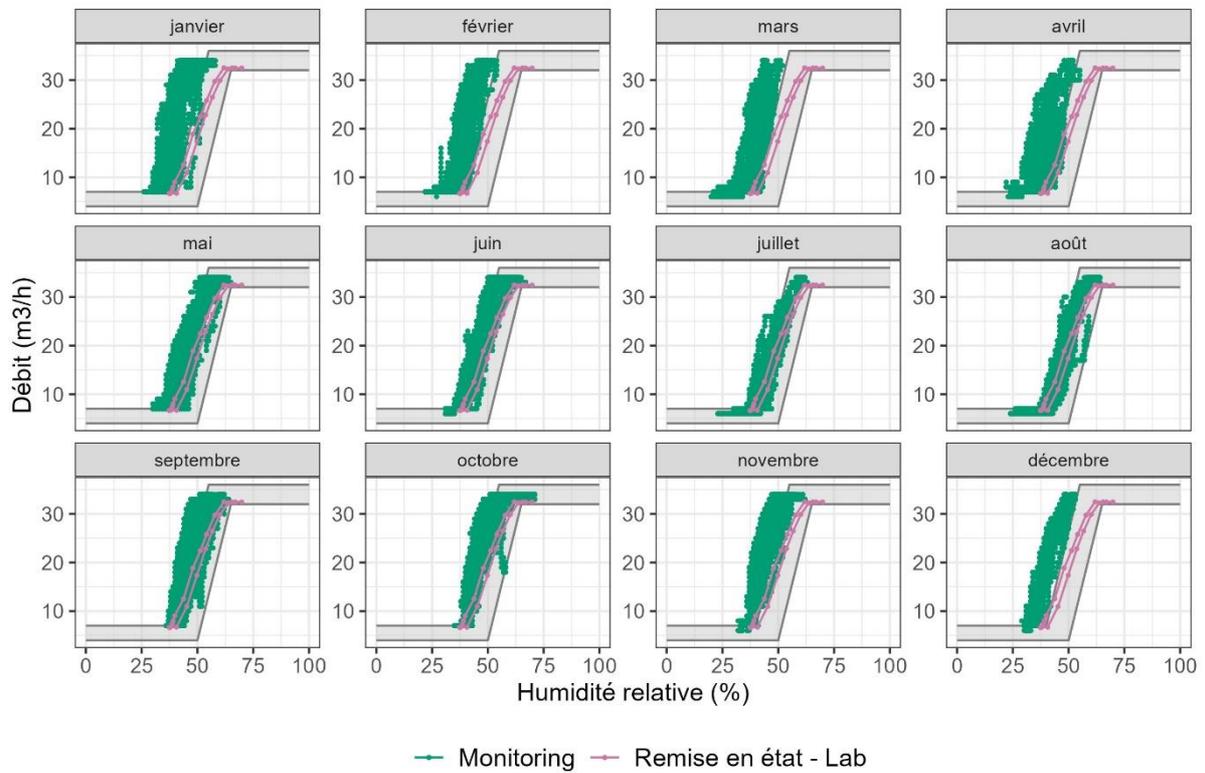


Figure 19 : Réponse hygroscopique d'une entrée d'air de séjour en conditions réelles pendant 1 an – Appartement P3 – Paris

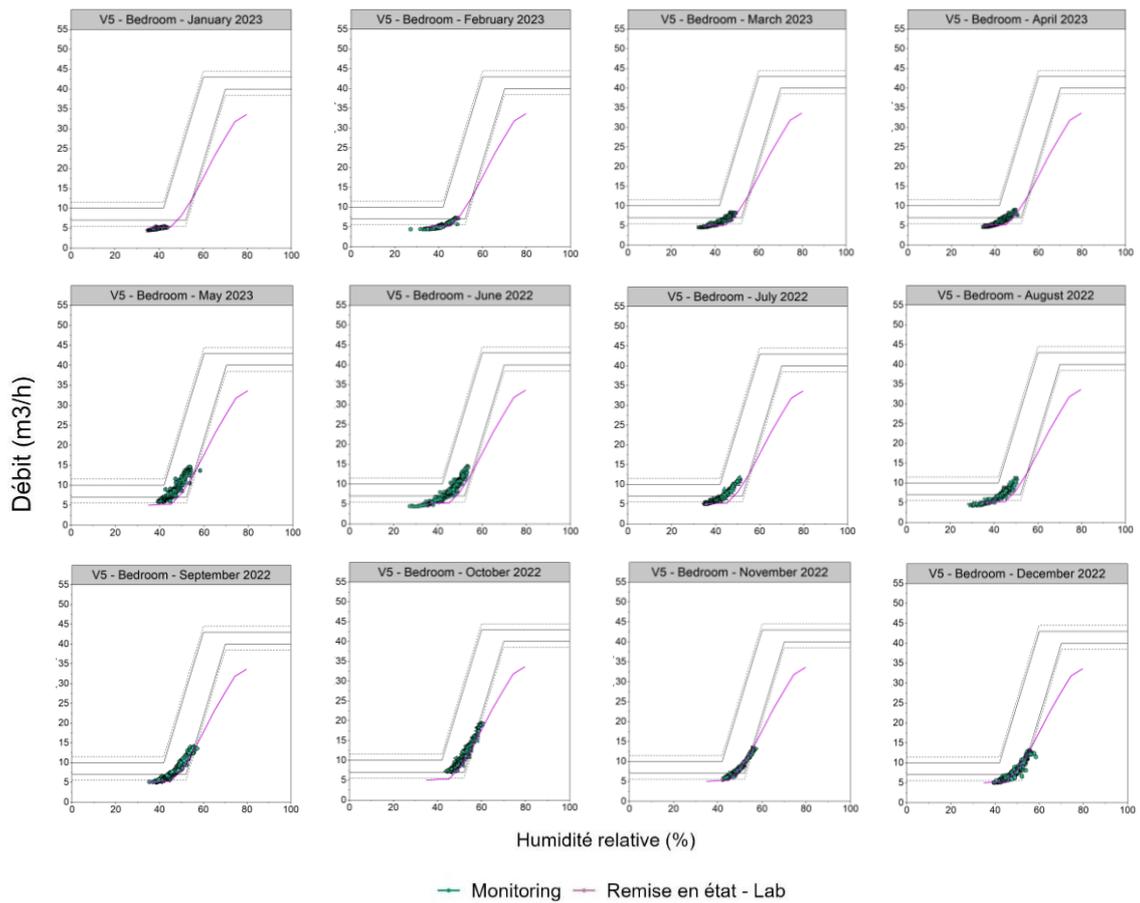


Figure 20 : Réponse hygroscopique d'une entrée d'air de chambre en conditions réelles pendant 1 an – Appartement V5 - Villeurbanne

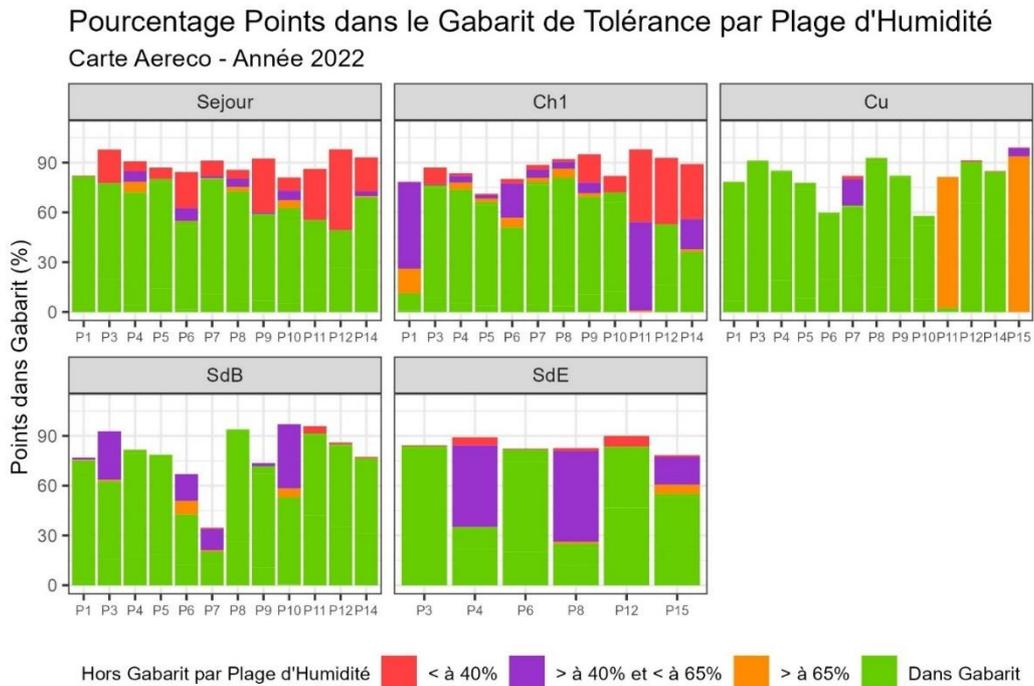


Figure 21 : Synthèse de l'analyse du fonctionnement des bouches d'extraction et des entrées d'air en conditions réelles – Site de Paris

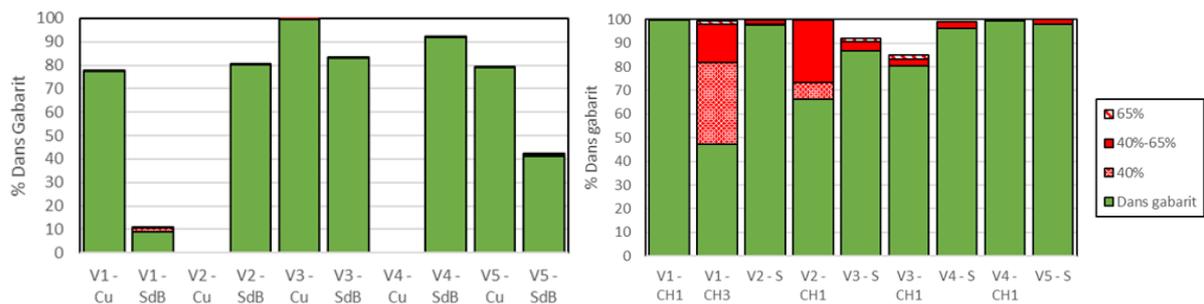


Figure 22 : Synthèse de l'analyse du fonctionnement des bouches d'extraction (gauche) et des entrées d'air (droite) en conditions réelles – Site de Villeurbanne

Sur les deux sites, les terminaux de ventilation réagissent majoritairement correctement aux sollicitations réelles, avec une grande majorité des points dans les gabarits (barres vertes sur les graphs). Pour les points hors gabarits, nous avons analysé les situations concernées. Sur Paris, dans les séjours, les points hors gabarit correspondent majoritairement à des situations d'humidité relative > 40% : les entrées d'air sont donc plus ouvertes qu'attendu, et les débits plus importants. Aucune tendance similaire ne se dégage pour les chambres. Pour les bouches d'extraction, on observe deux bouches (P11 ET P15) qui n'atteignent pas le débit maximal pour des humidités relatives > 65% : pour le P15, les résultats de la caractérisation en laboratoire montraient déjà un décalage de la bouche avec une limitation du débit ; pour le P11, l'ensemble des points mesurés sont complètement en dehors du gabarit, en raison d'un blocage du volet sur site. Pour les bouches de salle de bain et salle d'eau, les points hors gabarit sont majoritairement sur la pente, ce qui engendre un décalage du déclenchement de l'ouverture de la bouche. Sur Villeurbanne, notamment en raison du nombre plus faible de terminaux étudiés, aucune tendance n'a été identifiée.

4.2.2 Fonctionnement du système

Par définition, le débit d'extraction total du logement varie de façon à s'adapter aux besoins liés à la présence des occupants et à leurs activités émettant de l'humidité. Ainsi, en prenant des hypothèses de scénarios de présence et d'activité, les modélisations réalisées par les outils de simulation qui évaluent les systèmes de ventilation hygrorégulables selon les règles du GS 14.5, permettent de présenter une distribution du débit d'extraction pour un logement en fonction de son nombre de pièce sur la saison de chauffe (Figure 23).

Distribution Débit Total Extrait par Type de Logement - ATEC
Simulation MATHIS - Période Année 2018

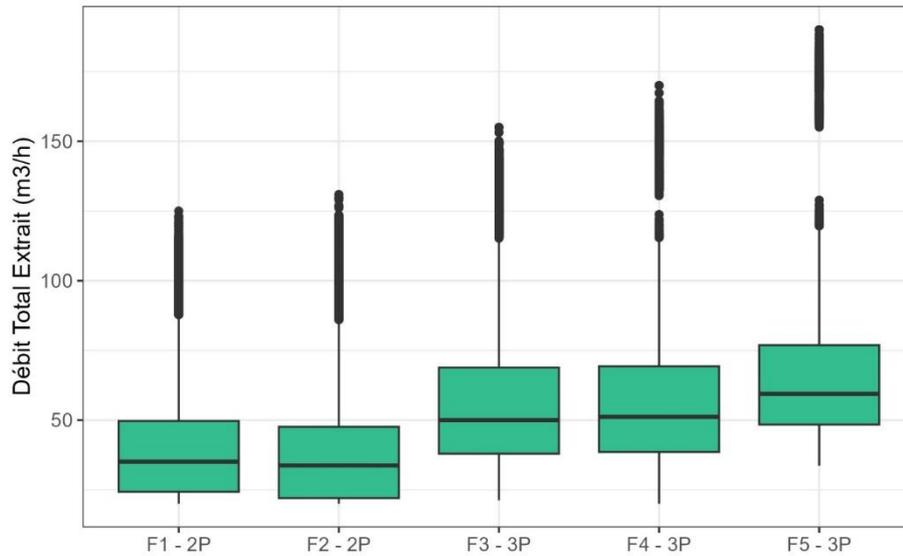


Figure 23 : Débits d'extraction théoriques par typologie de logement (résultats de simulation selon scénarios GS14.5) réalisé par Aereco pour des appartements de type F1 à F5 en occupation maximale d'après les scénarios QAI de Mathis

Dans Performance 1, nous avons pour chacun des logements étudiés ce débit total moyen, ainsi que les valeurs minimales et maximales. Dans Performance 2, nous avons également calculés ce débit total pour chacun de logements du projet. Les Figure 24 (Paris) et Figure 25 (Villeurbanne) représentent ces données sur les débits totaux logements, à savoir théorique, mesurés dans Performance 1 et mesurés dans Performance 2.

Distribution Débit Total Extrait par Logement
Carte Aereco - Période Année 2022

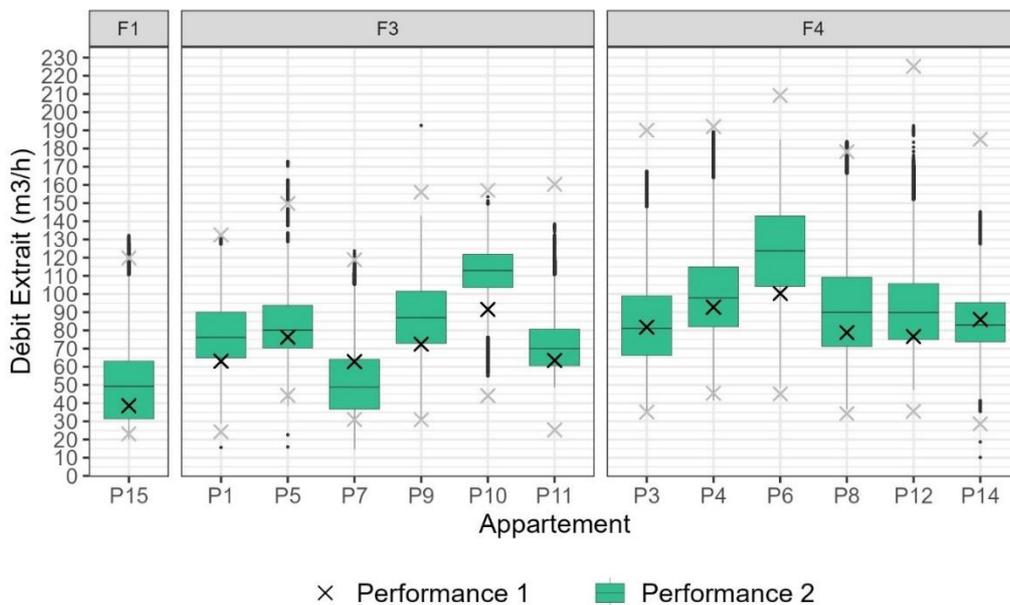


Figure 24 : Distribution des débits extraits totaux des logements - site de Paris

Figure 25 : Débits extraits totaux des logements - site de Villeurbanne

Pour Paris, la Figure 24 illustre la capacité des systèmes de ventilation hygro-réglables à s'adapter aux besoins changeants, tels que l'occupation et l'utilisation des espaces. Cette adaptabilité est essentielle pour maintenir une qualité de l'air intérieur (IAQ) optimale et le confort des occupants. En comparant les valeurs de débit d'air extrait entre les deux projets, il est possible d'analyser comment le système de ventilation s'ajuste aux schémas d'occupation au cours du temps (plus de 13 ans après). Les données recueillies lors de Performance 1, qui représentent les conditions antérieures, sont confrontées aux valeurs de débit d'air extrait enregistrées lors de Performance 2, reflétant les conditions actuelles. Cette comparaison permet d'évaluer la cohérence du fonctionnement du système de ventilation, malgré les variations d'occupation ou les conditions environnementales survenues au cours des 15 dernières années. Les résultats démontrent que les débits d'air extraits demeurent similaires, voire cohérents, quel que soit le niveau d'occupation ou les activités effectuées dans les espaces. Cette constance dans les performances atteste de l'efficacité des systèmes de ventilation hygro-réglables à s'adapter dynamiquement aux besoins changeants des occupants. Cette adaptabilité est rendue possible grâce à la régulation hygroscopique intégrée dans ces systèmes. En détectant les variations d'humidité, ils ajustent automatiquement les débits d'air extraits pour répondre à la demande réelle en ventilation, en fonction de l'occupation, de l'humidité, et d'autres facteurs influençant la qualité de l'air intérieur. En conclusion, cette analyse souligne la robustesse et l'efficacité des systèmes de ventilation hygro-réglables dans la gestion de la qualité de l'air intérieur et le maintien du confort des occupants. Elle met en évidence leur capacité à s'adapter de manière dynamique aux conditions changeantes, assurant ainsi un environnement intérieur sain et agréable tout au long de la journée et des saisons.

Pour Villeurbanne, on observe également une distribution importante des débits totaux, illustrant la capacité du système à répondre aux besoins changeant des occupants. L'absence des données issues de Performance 1 ne nous permet pas d'identifier une évolution entre les deux projets.

4.2.3 Indicateur à l'échelle du logement

Deux types indicateurs relatifs à l'humidité à l'échelle du logement ont été définis dans Performance 1 : une évaluation du risque de condensation dans chacune des pièces des logements, et l'impact de l'activation du grand débit cuisine sur l'humidité relative. Dans Performance 2, l'utilisation du grand débit cuisine étant quasiment inexistante (utilisé pour un seul logement), nous nous concentrons uniquement sur le risque de condensation.

4.2.3.1 Calcul théorique de l'occurrence et de la durée de condensation sur une vitre

Dans Performance 1, pour tous les appartements étudiés, le nombre de situation où cette situation de condensation est apparue était très faible (voire nul) devant la limite calculée par SIREN. Ces calculs avaient été réalisés pour des risques de condensation sur double-vitrage en prenant des hypothèses de caractéristiques du double-vitrage.

Il est considéré qu'à partir de 85% d'humidité relative il existe déjà un risque de condensation. Dans Performance 2, afin d'évaluer le nombre de fois une la condensation théorique (supérieur à 85% d'humidité) dépasse une heure, nous n'avons pas recalculé les risques sur double-vitrage mais directement analysé les situations où l'humidité relative dépasse 85%. Les Figure 26 et Figure 27 montrent la distribution des occurrences quand l'humidité relative est supérieure à 85% sur 1 heure pour tous les appartements confondus à Paris, et pour chaque appartement à Villeurbanne. On ne relève aucun risque de condensation sur les deux sites.

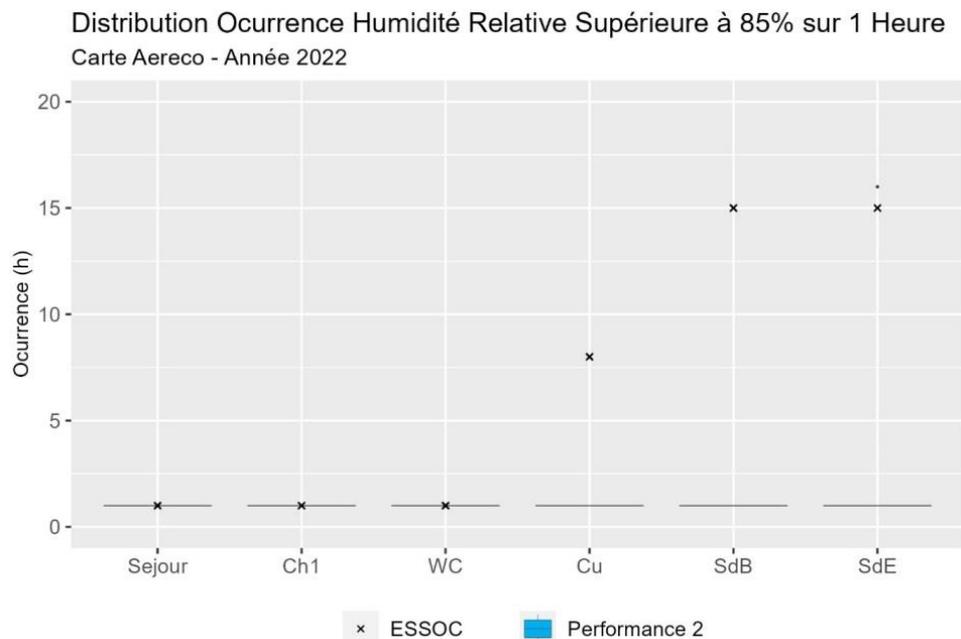


Figure 26 : Distribution des occurrences d'apparition de condensation calculée pour une humidité supérieur à 85% pendant plus d'une heure - Site de Paris

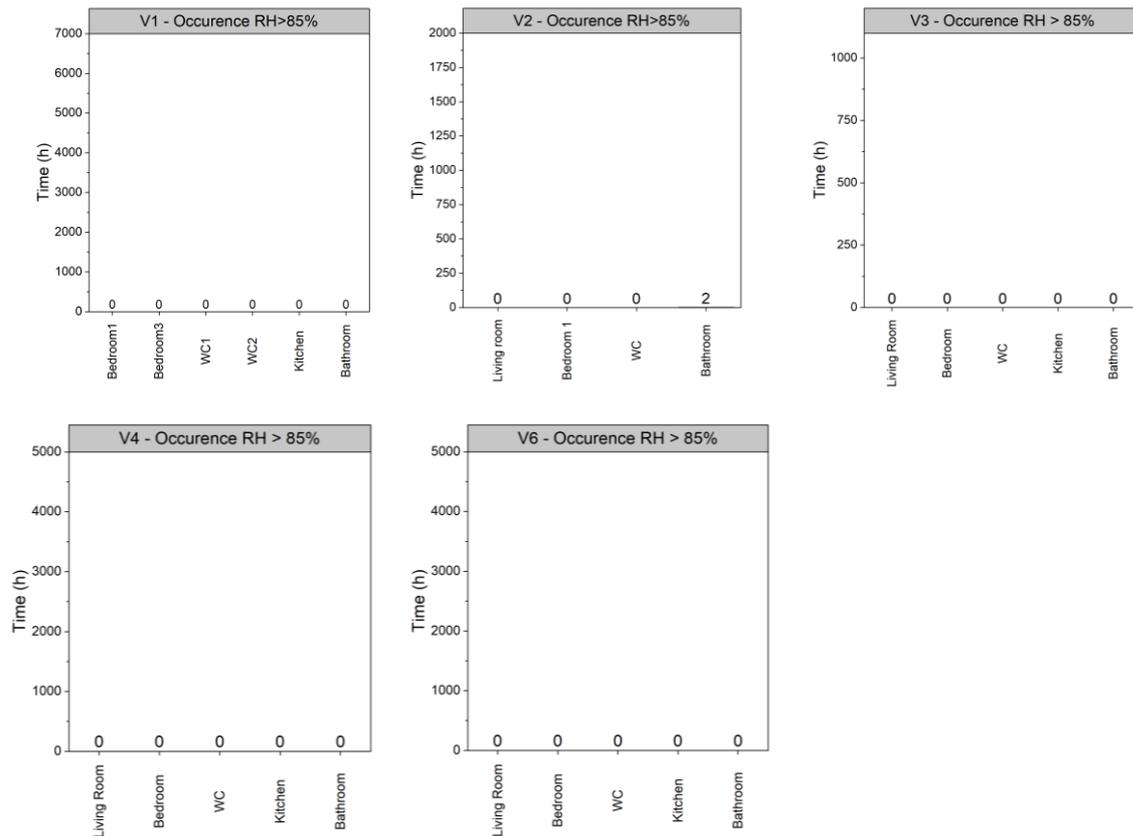


Figure 27 : Distribution des occurrences d'apparition de condensation calculée pour une humidité supérieure à 85% pendant plus d'une heure - Site de Villeurbanne

4.2.3.2 Humidité relative supérieure à 75%

Un autre indicateur du bon fonctionnement de la ventilation utilisé dans Performance 1 est le dépassement du seuil 75%. En effet, le GS 14.5 avait défini pour chaque type de pièce un nombre d'heures maximal sur la période de chauffe pendant lequel l'humidité pouvait dépasser ce seuil :

- Pièce de vie et WC : 100 heures
- Cuisine : 600 heures
- Salle de Bain / salle d'eau : 1000 heures.

L'analyse des heures d'humidité relative supérieure à 75% permet de compléter l'évaluation de la performance du système hygro-réglable en termes de confort hygrothermique. Un nombre élevé d'heures avec une humidité relative élevée peut indiquer des inefficacités dans le système d'extraction ou des problèmes d'étanchéité du bâtiment. En complément de l'analyse des pressions mesurées et du suivi de l'humidité relative, l'évaluation du confort hygrothermique est essentielle pour garantir un environnement intérieur sain et confortable pour les occupants. La présence prolongée d'une humidité relative supérieure à 75 % dans un environnement intérieur présente un risque accru de condensation, ce qui peut conduire à des problèmes d'humidité et de moisissures. Les seuils du GS 14.5 ont été établis afin de minimiser les risques de condensation et de maintenir des conditions de vie saines. Le fait que les niveaux d'humidité relevés dans les pièces restent en-dessous de ces seuils suggère que le système

de ventilation est efficace pour maintenir une humidité relative acceptable à l'intérieur de chaque logement.

À Paris, les résultats de Performance 1 montraient que le nombre d'heures pendant lesquelles l'humidité relative dépasse 75 % est toujours inférieur à celui calculé par SIREN dans les pièces techniques. Dans les chambres et les séjours où ce nombre d'heures est important (supérieur à 25), la sur-occupation des appartements avait été identifiée comme l'explication de cette humidité relative plus importante. Sur le site de Villeurbanne, le nombre d'heures mesurées où l'humidité relative dépasse 75 % était toujours très inférieur à celui calculé par SIREN, à la fois pour les pièces techniques et pour les pièces de vie, malgré un nombre d'heures d'occupation beaucoup plus important.

La même analyse a été reconduite pour Performance 2. Le nombre d'heure où l'humidité relative dépasse 75 % est indiqué pour chaque pièce de chaque logement dans le Tableau 13 pour Paris, et le Tableau 14 pour Villeurbanne.

Pour chaque pièce de chaque logement étudié, le nombre d'heures où l'humidité relative dépasse 75% est indiqué dans le Tableau 12 pour Paris. Dans ce tableau, les valeurs apparaissent en rouge lorsque le nombre d'heures est supérieur à la limite GS 14,5, indiquant un risque de surhumidification et un potentiel problème de confort hygrothermique.

Il est à noter que les informations relatives à Performance 1 ne sont pas disponibles pour cette étude.

Tableau 13 : Nombre d'heures sur la période de chauffe de dépassement du seuil 75% d'humidité relative –Site de Paris

App	P1	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P14	P15
Séjour	15	0	63	0	0	0	0	1	81	0	0	1	
Chambre 1	185	0	13	10	1	0	0	14	68	0	0	0	
Chambre 2		0											
WC	120	0	1	6	1	0	0	18	72	0	0	13	0
Cuisine	8	0	22	66	1	0	0	11	368	0	6	30	0
Salle de Bain	499	0	226	228	12	0	0	433	38	0	28	32	1
Salle d'eau		0	76		2		4				70		

Tableau 14 : Nombre d'heures sur la période de chauffe de dépassement du seuil 75% d'humidité relative d'extraction –Site de Villeurbanne

App	V1	V2	V3	V4	V6
Séjour	0	0	123	0	0
Chambre 1	0	0	0	0	0
WC	0	0	0	0	1
Cuisine	1	-	0	0	0
Salle de Bain	0	0	14	4	0
Salle d'eau	0				

Pour le site de Paris, l'appartement P1 en Ch1 et WC présent des valeurs élevées des nombre d'heures avec une humidité supérieure à 75% associé au constat pendant la réinstallation des terminaux de ventilation fin 2021 d'un problème de moisissure sur la paroi de la chambre principale (Ch1), comme il est montré sur la Figure 28.



Ch2 : Chambre enfants



Séjour

Figure 28 : Photos de l'appartement avec le dégât des eaux - Paris

D'autres pièces de l'appartement présentent également des problèmes d'humidité et de moisissures. La salle de bain (SdB) est une zone particulièrement concernée par l'humidité persistante, ce qui favorise la présence continue des moisissures. Dans le séjour et la chambre instrumentée (Ch1), des moisissures sont apparues entre février et octobre 2021, notamment en haut des murs, entre les fenêtres et le plafond, ainsi qu'en bas des vitres où de la condensation a été observée. Ces signes indiquent un problème de pont thermique et une mauvaise circulation de l'air, probablement dû à un manque de pression au niveau des bouches de ventilation car en SdB et WC des valeurs faibles de pression ont été prélevées (pas d'évidence de faible débit d'après le monitoring en 2022). Dans la chambre 2, non instrumentée et occupée par des enfants, les moisissures sont toujours présentes mais n'ont pas empiré selon le constat à la réinstallation des terminaux de ventilation fin 2021, probablement associé un dégât des eaux. Les murs et le plafond peuvent rester humides longtemps après un tel incident, favorisant ainsi la croissance des moisissures en l'absence d'instruments de mesure pour surveiller et gérer précisément l'humidité. Un autre facteur aggravant est la fuite d'eau à l'étage supérieur, qui pourrait causer des infiltrations et augmenter l'humidité dans les murs et plafonds de l'appartement, favorisant encore plus la croissance des moisissures. De plus, comme il a été mentionné auparavant, un problème de pression des bouches de ventilation dans tout l'appartement semble compromettre la circulation de l'air, empêchant ainsi une évacuation efficace de l'humidité. Finalement, un problème de mouches en cuisine, similaire à celui de l'appartement P4, a été signalé. Les mouches peuvent être attirées par des zones humides et des matières organiques en décomposition, souvent associées à des problèmes d'humidité et de moisissures.

4.3 Performance du système de ventilation vis-à-vis de la concentration en CO₂

Le dioxyde de carbone est directement corrélé à la présence humaine puisque c'est la respiration qui en est la source majeure dans un bâtiment. Il s'agit donc d'un paramètre sur lequel l'évolution de l'occupation entre les projets Performance 1 et 2 aura un fort impact, complexifiant la comparaison. Dans Performance 1, plusieurs types analyses concernant le CO₂ ont été réalisés. Nous présentons ici les conclusions de ces analyses, et les résultats des analyses similaires que nous avons réalisées avec les données de Performance 2. Pour l'ensemble des analyses présentées dans cette section, les informations sur l'occupation heure par heure de chaque pièce des logements de l'étude n'étant pas disponible, il n'y est pas question de valeurs d'exposition, mais uniquement de concentration de CO₂ mesurée.

4.3.1 Indicateur GS 14.5

Il nous est impossible de vérifier le critère du GS 14.5 avec une valeur de 400 000 ppm.h cumulés en base 2000 à ne pas dépasser sur l'ensemble de la saison de chauffe (paragraphe 2.3.3.2) dans le cadre du projet Performance 2 puisque les capteurs embarqués saturent aux alentours de 2000 ppm (Figure 7 pour Villeurbanne et Figure 8 pour Paris en chapitre 2). En revanche il est possible de relever le nombre d'heures passées en saturation pour chaque capteur embarqué (Figure 29 pour Paris et Figure 30 pour Villeurbanne).

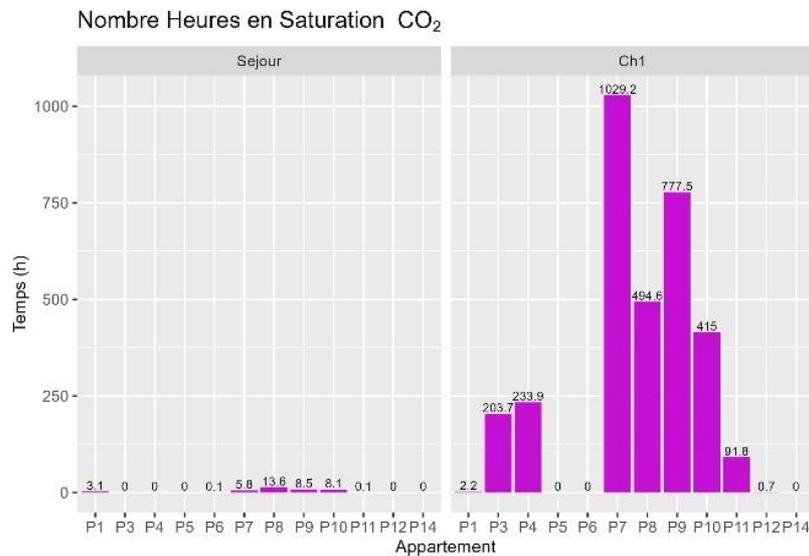


Figure 29 : Nombre d'heures de saturation de capteurs CO₂ embarqués - site de Paris

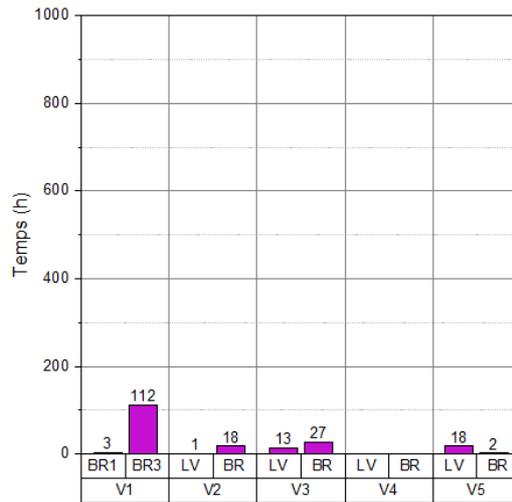


Figure 30 : Nombre d'heures de saturation de capteurs CO₂ embarqués - site de Villeurbanne

D'autre part, les NEMOs, dont le seuil de saturation est de 5000 ppm, permettent d'avoir des mesures sur cette plage d'intérêt durant les deux semaines de campagne pendant la période de chauffe.

S'il est impossible d'affirmer que les résultats enregistrés sont représentatifs de l'ensemble de la période de chauffe, ils peuvent tout de même être utilisés afin de calculer l'indicateur du GS 14.5 selon différentes hypothèses :

- 1) Hypothèse pessimiste : affecter la valeur du 85^e percentile atteinte sur deux semaines par les NEMOs à toute valeur de saturation enregistrée sur la période de chauffe par les capteurs embarqués (Figure 31). Pour les logements n'ayant pas été instrumentés par les NEMOs (P3, P7, P10, P11, P12), les valeurs utilisées en remplacement de la valeur du 85^e percentile (non disponible) sont les valeurs de saturation des capteurs Aereco, ou la valeur maximale atteinte par le capteur lorsque la saturation n'est pas atteinte. La valeur du critère du GS 14.5 avec cette hypothèse est présentée en Figure 32 pour Paris, et Figure 33 pour Villeurbanne

Valeur de Saturation des Capteurs CO₂

Carte Aereco - Période Année 2022



Figure 31 : Valeurs du 85^{ème} percentile des valeurs de CO₂ mesurées par les NEMOs, ou valeurs max carte Aereco si pas de NEMO

Valeur CO₂ Base 2000

Carte Aereco - Période Année 2022

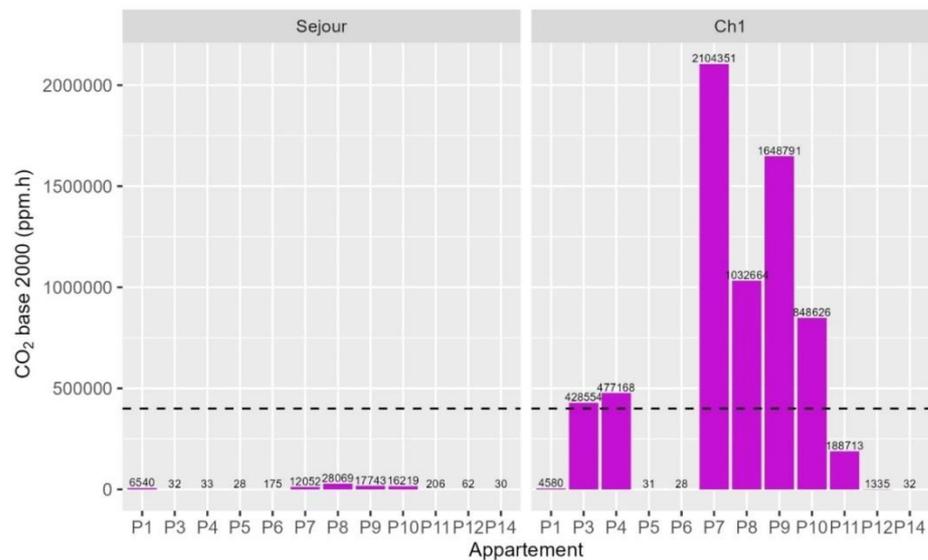


Figure 32 : Valeurs de l'indicateur du GS 14.5 de CO₂ cumulé en base 2000 selon l'hypothèse pessimiste pour les séjours et chambres à Paris (utilisation valeurs 85^{ème} percentile données NEMO)

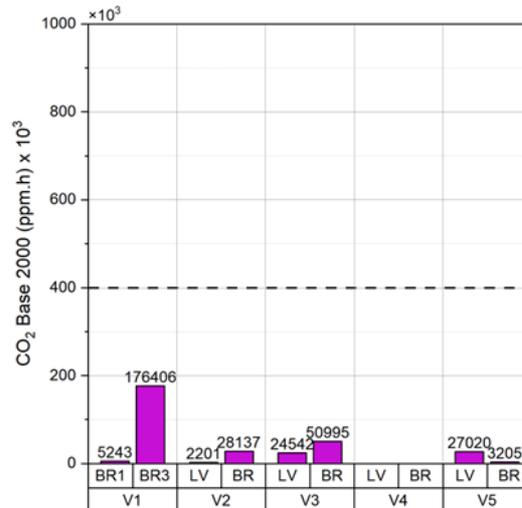


Figure 33 : Valeurs de l'indicateur du GS 14.5 de CO₂ cumulé en base 2000 selon l'hypothèse péjorative pour les séjours et chambres à Villeurbanne (utilisation valeurs 85^{ème} percentile données NEMO)

Malgré les choix de calcul de cette hypothèse, fortement pénalisants, les histogrammes ci-dessus montrent que la majorité des pièces instrumentées respectent le seuil du GS 14.5 (matérialisé par les pointillés). Villeurbanne ne souffre aucune exception. A Paris, les séjours sont conformes, ainsi que la moitié les chambres. Deux chambres (appartements P3 et P4) présentent un très léger dépassement. Quatre sont en revanche en fort dépassement selon ces modalités de calcul. Comme expliqué ci-dessus, ces dernières étant très fortement pénalisantes, le calcul est repris selon des modalités plus réalistes pour le site de Paris.

2) Hypothèse avec seuil fixe à 2100 ppm : le calcul est réalisé en affectant à chaque donnée de saturation du capteur embarqué la valeur de 2100 ppm. Cette valeur de 2100 ppm correspond à la moyenne des valeurs maximales observées sur l'ensemble des capteurs. Il s'agit d'un scénario plus réaliste et plus proche des conditions réelles d'occupation et d'utilisation des logements.

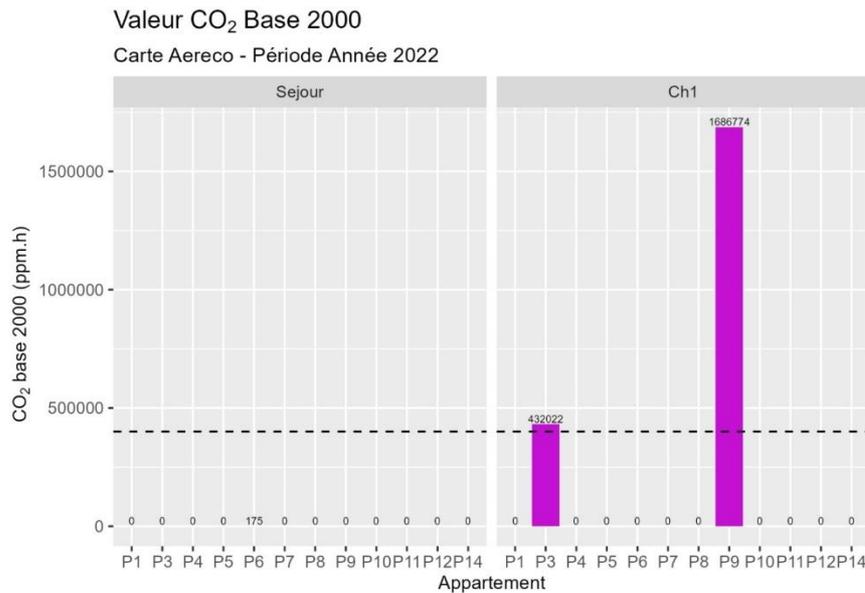


Figure 34 : Valeur de l'indicateur du GS 14.5 de CO₂ cumulé en base 2000 en affectant la valeur de 2100 ppm à chaque donnée de capteur saturé pour les séjours et chambres à Paris

Selon ces nouvelles modalités de calcul, la Figure 34 montre que les chambres des appartements P7, P8 et P10, qui présentaient un fort dépassement en prenant l'hypothèse pénalisante, sont maintenant bien en deçà de la valeur réglementaire. On peut donc raisonnablement supposer que cette dernière soit respectée en pratique. En effet, avec la valeur de 2100 ppm il reste une réelle marge avant d'aboutir au 400 000 ppm.h en base 2000 ce qui signifie que le seuil serait respecté même avec des valeurs plus hautes.

Pour P3 et P9, les valeurs augmentent, car cette modalité de calcul revient à affecter aux données manquantes une valeur plus basse que celle de saturation du capteur - à savoir 2104 ppm pour la chambre de P3, et 2121 ppm pour la chambre de P9 (cf Figure 7). On peut admettre que ce mode de calcul n'est pas pertinent pour ces deux cas. L'appartement P9, le plus problématique dans cette étude, fait l'objet d'une analyse approfondie dans le chapitre 133.

4.3.2 Evolution des concentrations en CO₂ dans les pièces de vie

4.3.2.1 Analyse comparative des concentrations en CO₂ mesurées dans les chambres et les séjours

Les analyses de Performances 1 s'appuient sur une représentation graphique des concentrations de CO₂ (pour 3 chambres uniquement à Paris, appartements P3, P9, P10, et pour les appartements V2 et V3 – chambre et séjour - à Villeurbanne). Elle est donnée pour une année complète, puis sur une semaine type. Les conclusions de Performance 1 indiquaient que les concentrations en CO₂ restaient en moyenne inférieures à 1000 ppm, avec ponctuellement des valeurs extrêmes pouvant atteindre 1900 ppm et plus (attention saturation des capteurs) en fin de nuit. Ces concentrations sont très largement inférieures à celles obtenues par simulation pour des systèmes autoréglables. Les analyses un peu plus détaillées, mais limitées, retrouvées dans les rapports de Performance 1, indiquent

tout de même une disparité entre les logements avec pour certains des valeurs mesurées très majoritairement inférieures à 1000 ppm, alors que pour d'autres la médiane se trouve autour de 1000 ppm. Les courbes annuelles ont permis de mettre en évidence l'impact très significatif de l'occupation, avec des valeurs très basses mesurées par exemple pendant l'absence supposées des habitants en août, ou l'augmentation importante du CO₂ pendant les fêtes de fin d'années avec une suroccupation supposée. Seules ces tendances étant disponibles sur Performance 1, et avec une occupation des logements ayant évolué en 15 ans, les analyses suivantes ne sont pas des comparaisons logement à logement entre les deux projets. En revanche, une analyse plus détaillée des valeurs de CO₂, notamment au regard du seuil de 1000 ppm, est proposée. Seuls certains exemples sont illustrés dans ce rapport, mais l'ensemble des graphiques pour tous les logements analysés sont disponibles en annexes.

Les courbes d'évolution temporelle sur une année ont été à nouveau générées avec les valeurs de CO₂ mesurées pendant Performance 2. Les Figure 35 (Exemple Paris) et Figure 36 (Exemple Villeurbanne) représentant les valeurs médianes, minimales et maximales quotidiennes permettent de se représenter graphiquement l'évolution des mesures en fonction du temps.

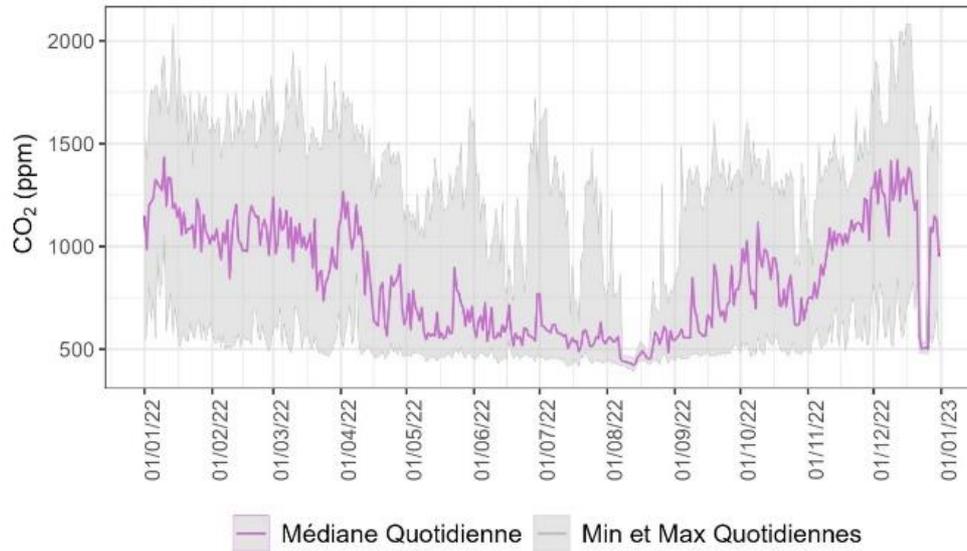
Ces courbes permettent d'avoir un premier type d'analyse, visuel, des grandes tendances. On voit ainsi que le capteur atteint régulièrement son seuil de saturation dans la chambre de l'appartement P9, ce qui n'est pas le cas dans le séjour. On repère également les tendances saisonnières, avec la baisse des concentrations en saison plus chaude lorsque le recours à l'aération est plus important, ainsi que les absences prolongées, comme c'est ici le cas probablement pendant les congés d'août, avec un retour de la courbe aux concentrations observées en extérieur.

Sur la Figure 36, les données ont fait l'objet d'un pré-traitement. Les relevés fournis chaque minute par les capteurs ont été moyennés par heure, ce qui lisse quelque peu les résultats et explique que les minimas et maximas soient beaucoup plus proches de la médiane que dans la figure précédente, sur Paris.

Dans l'exemple présenté pour Villeurbanne (appartement V3), le séjour présente un pic de CO₂ particulièrement élevé le 8 décembre, que l'on retrouve dans une moindre mesure dans la chambre. Comme il s'agit du jour de la fête des lumières à Lyon, qui attire de nombreux visiteurs, on peut émettre l'hypothèse que l'appartement accueillait plus de personnes qu'habituellement. Dans la chambre, on distingue assez facilement des périodes d'inoccupation et les périodes d'occupation. Il s'agit en effet d'une pièce occupée par intermittence par le fils de l'occupant principal, qui est adulte et ne réside pas systématiquement dans cet appartement.

Evolution Temporelle de la Concentration en CO₂

Carte Aereco - Période Année 2022
Appartement P9 - Séjour



Evolution Temporelle de la Concentration en CO₂

Carte Aereco - Période Année 2022
Appartement P9 - Ch1

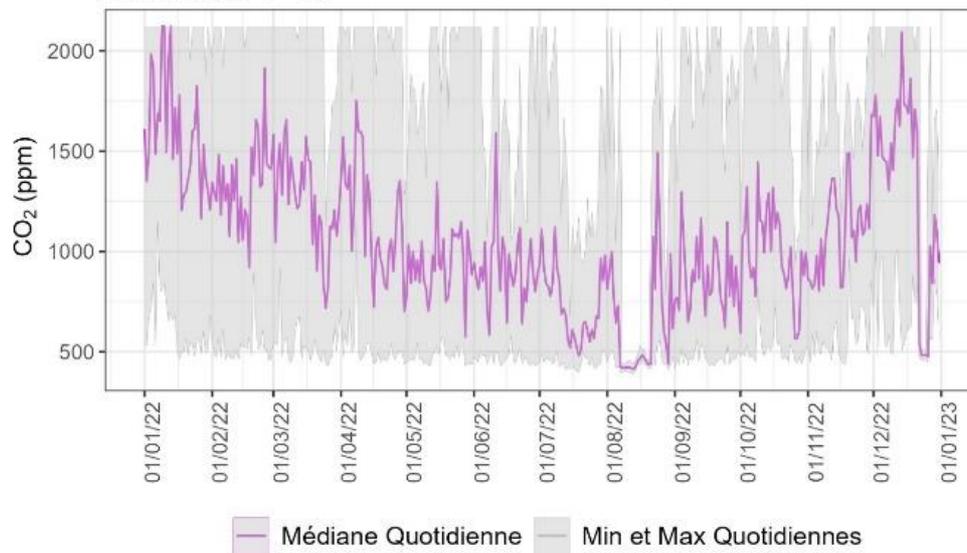


Figure 35 : Exemple de courbes d'évolution du CO₂ sur une année (min,max, médiane par jour) dans le séjour (haut) et la chambre (bas) – Appartement P9 - Paris

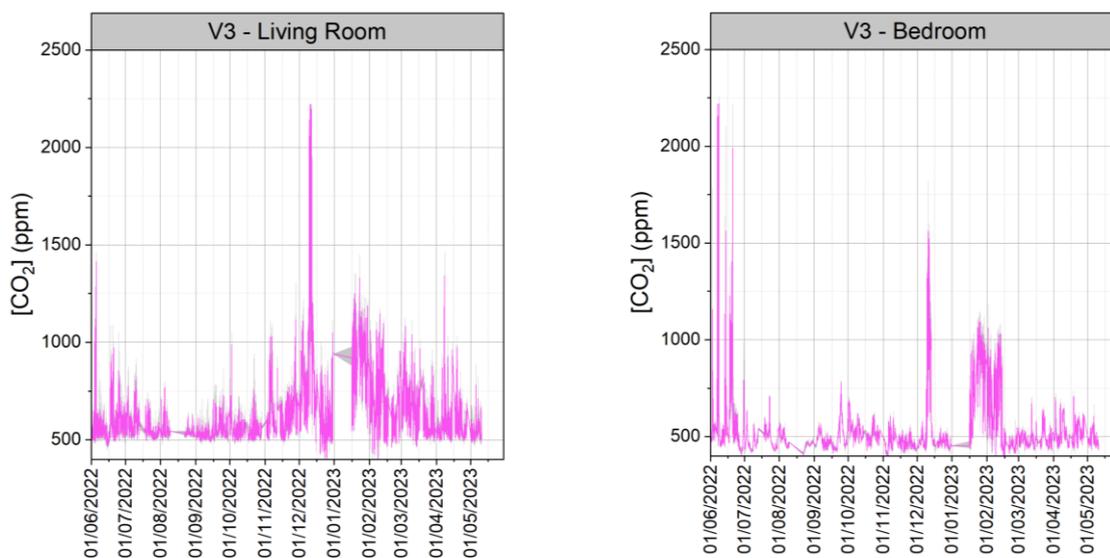


Figure 36 : Exemple de courbes d'évolution du CO₂ sur une année (min,max, médiane par jour) dans le séjour (gauche) et la chambre (droite) – Appartement V3 – Villeurbanne

Afin d'identifier plus précisément les risques de confinement dans les pièces de vie, les valeurs mesurées ont été classifiées par chaque tranche de 100 ppm de CO₂ pendant la période de chauffe. Les Figure 37 (Paris) et Figure 38 (Villeurbanne) illustrent deux exemples de répartition du pourcentage de temps pour lesquelles les valeurs mesurées appartiennent à chacune de ces tranches. Les études sont réalisées :

- sur la période de chauffe sur la base des valeurs issues des capteurs embarqués,
- sur la durée des campagnes QAI avec les résultats des NEMOs.

Pourcentage de Temps par Concentration Moyenne de CO₂

Carte Aereco - Période Année 2022
Appartement P3

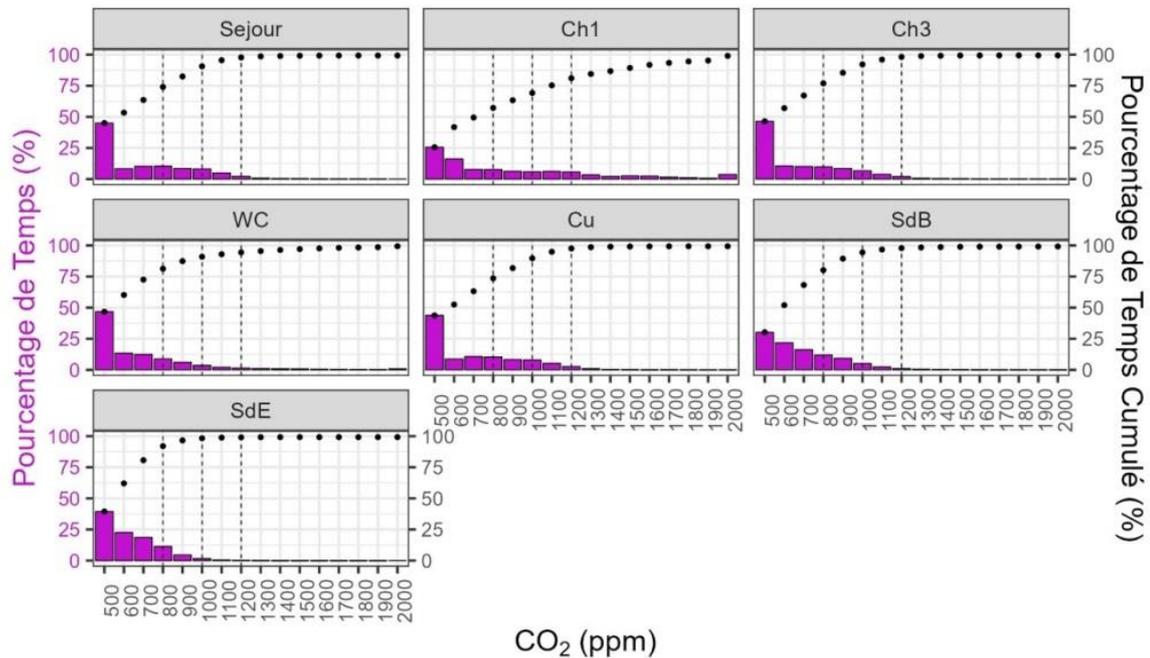


Figure 37 : Exemples de distribution des concentrations de CO₂ sur la période de chauffe dans le logement P3 – Paris

Figure 38 : Exemples de distribution des concentrations de CO₂ sur la période de chauffe dans le logement V2 – Villeurbanne

Sur l'exemple de Paris, la distribution des valeurs dans les différentes pièces permet d'avoir une approximation des durées d'occupation relative d'une pièce par rapport à une autre. La première barre de l'histogramme, qui correspond à une tranche de CO₂ de 450 à 550 ppm, soit les concentrations extérieures, peut être considérée comme indicatrice d'une pièce inoccupée. Cette durée dans la tranche est plus élevée dans les pièces de services (WC, cuisine, SdB et SdE) comme on pouvait s'y attendre, et moins dans les pièces les plus occupées, comme la chambre 1. La valeur relevée dans la chambre 3 pourrait

traduire une durée d'occupation moindre. Lorsqu'elle semble occupée, les taux de CO₂ restent bien maîtrisés avec 100 % des valeurs en dessous de 1200 ppm. La dynamique est différente dans la chambre 1 avec une distribution des taux qui doit dépasser 2000 ppm, comme le suggère la dernière barre de l'histogramme de cette pièce, puisqu'aucune autre explication physique n'explique qu'elle ne respecte pas la décroissance observée sur la queue de distribution. On observe que le seuil de 1000 ppm est dépassé dans plus de 2 à 3 % du temps pour cette chambre. Une analyse détaillée du dépassement de ce seuil est proposée dans les sections suivantes.

Comme pour Paris, on observe des valeurs de concentration de CO₂ globalement sous le seuil de 1000 ppm, dans 93% du temps dans le séjour et 89% du temps dans la chambre.

4.3.2.2 Focus sur l'évolution des concentrations en CO₂ mesurées dans les chambres la nuit (période d'occupation a priori)

Les pièces de vie les plus sujettes à des concentrations élevées de CO₂ sont les chambres pendant la nuit. Cela représente de longues durées de présence continue, souvent porte fermée, ce qui peut amener à des situations de confinement.

La répartition du temps mesuré pour des concentrations moyennes de CO₂ a été enrichie d'un focus sur les chambres la nuit, dans un souci d'être au plus près de l'exposition réelle en sélectionnant une période d'occupation a priori. La Figure 39 ci-dessous présente, pour Paris et pour Villeurbanne, ce focus la nuit pour deux exemples.

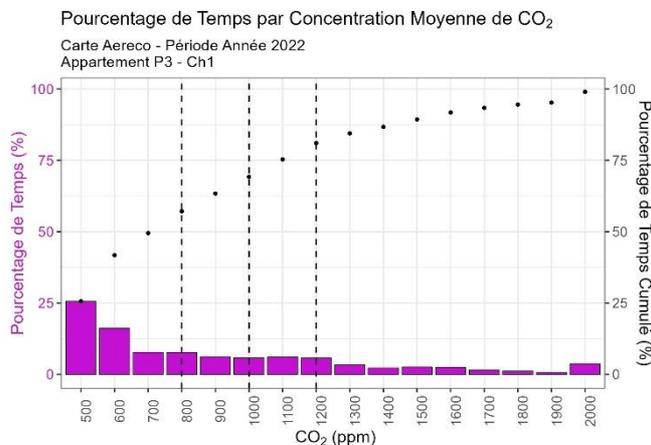


Figure 39 : Exemples de distribution des concentrations de CO₂ sur la période de chauffe dans une chambre à Paris (appartement P3 - gauche) et à Villeurbanne (appartement V2 - droite)

Pour l'appartement V2, de manière prévisible, l'histogramme est décalé vers la droite par rapport au même graphique prenant en compte les journées entières. En effet, les niveaux de CO₂ pendant 24 heures sont impactés par diverses activités intérieures ainsi que par les périodes d'inoccupation. En revanche, les niveaux de CO₂ pendant la nuit reflètent principalement la production métabolique de CO₂ résultant de la respiration des occupants pendant le sommeil. Durant l'occupation les pièces présentent peu de valeurs équivalentes à l'extérieur, aussi la barre des 400 ppm est-elle fortement réduite. La plage totale des valeurs atteinte ne varie pas puisque les 24 h englobaient la nuit, en revanche le temps mesuré cumulé évolue un peu, avec 80 % du temps en dessous de

800 ppm sur l'ensemble de la journée qui monte à 80 % du temps en dessous de 1000 ppm si on prend seulement la nuit. De même sur Paris, alors que le seuil de 1000 ppm n'était dépassé que dans environ 10 % du temps dans la chambre sur l'ensemble de la période de chauffe, on observe qu'il est dépassé dans plus de 25 % du temps lorsque l'on considère uniquement la période de nuit. Deux phénomènes expliquent ces observations : l'occupation a priori en continue pendant la période de nuit (ce qui n'est pas le cas lorsqu'on considère l'ensemble de la période de chauffe), et pour certains appartements, l'habitude de dormir porte de chambre fermée. Cette deuxième explication avait été analysée dans Performance 1, qui montrait l'augmentation significative du confinement dans cette situation.

4.3.2.3 Dépassement du seuil de 1000 ppm dans les pièces de vie

Afin d'analyser en détail ce dépassement de seuil de 1000 ppm en lien avec la présence a priori des occupants et l'habitude de la porte fermée, pour chaque logement, les pourcentages de temps mesuré au-dessus de 1000 ppm ont été calculés et sont présentées dans les Tableau 15 (Paris) et Tableau 16 (Villeurbanne). Les situations pour lesquelles ce pourcentage est supérieur à 80 % sont notées en rouge dans les tableaux.

Tableau 15 : Pourcentage de temps avec une concentration en CO₂ supérieure à 1000 ppm sur la période de chauffe – Site de Paris

App	Pourcentage de temps avec une concentration en CO ₂ supérieure à 1000 ppm												
	P1	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P14	P15
Séjour (24h/24)	41	19	50	6	2	50	34	50	38	19	8	10	
Chambre (24h/24)	53	45	62	13	5	74	53	63	45	21	17	21	
Chambre (0h-6h uniquement)	91	82	91	27	2	98	86	90	75	37	22	26	
Porte de chambre fermée la nuit	Non		Non	Oui	Oui		Oui	Non (parents) Oui (enfants)				Non (parents) Oui (enfants)	

Tableau 16 : Pourcentage de temps avec une concentration en CO₂ supérieure à 1000 ppm sur la période de chauffe – Site de Villeurbanne

	Pourcentage de temps avec une concentration en CO ₂ supérieure à 1000 ppm				
	V1	V2	V3	V4	V5
Séjour (24h/24)	-	11	2	3	7
Chambre 1 (24h/24)	21	16	3	1	3
Chambre 3 (24h/24)	23				
Chambre 1 (0h-6h uniquement)	36	23	4	1	3
Chambre 3 (0h-6h uniquement)	32				
Porte de chambre fermée la nuit	Oui		Non	Non	

On note que seules les chambres sur Paris peuvent présenter des temps au-dessus de 1000 ppm importants. L'analyse détaillée de chaque cas est présentée en chapitre 6.

4.3.3 Analyse de l'impact de la coupure de la ventilation sur le CO₂

La panne fortuite d'un ventilateur durant la période hivernale suivie dans Performance 1 a permis une comparaison des valeurs de CO₂ avec ou sans ventilation. Le rôle de la ventilation avait clairement été identifié, avec des concentrations en CO₂ beaucoup plus importantes pendant la période de la coupure.

Un incident similaire s'est produit lors de la Performance 2 à Paris. Une panne a de nouveau permis la comparaison des situations avec ou sans ventilation. Comme le montrent les graphes ci-dessous, la répercussion sur les concentrations en CO₂ voire sur d'autres polluants (comme les COV) est évidente.

La Figure 40 illustre les répercussions de la panne du système de ventilation dans l'appartement 15. Les mesures présentées sont celles effectuées dans la cuisine. Le CO₂, l'ouverture du volet, la pression sont des valeurs mesurées, alors que la pression disponible au ventilateur Q100Pa (courbe violette) est issue d'une modélisation. L'absence de pression du 12 avril au 13 mai (courbe bleue) indique la période de panne du système. Elle correspond à une période où les concentrations de CO₂ augmentent très significativement, avec des pics aux alentours de 1800 ppm contre 1000 sur le reste de la période, et un retour aux 400 ppm plus ponctuel et marginal, alors que ce seuil est visiblement usuel lorsque la ventilation fonctionne.

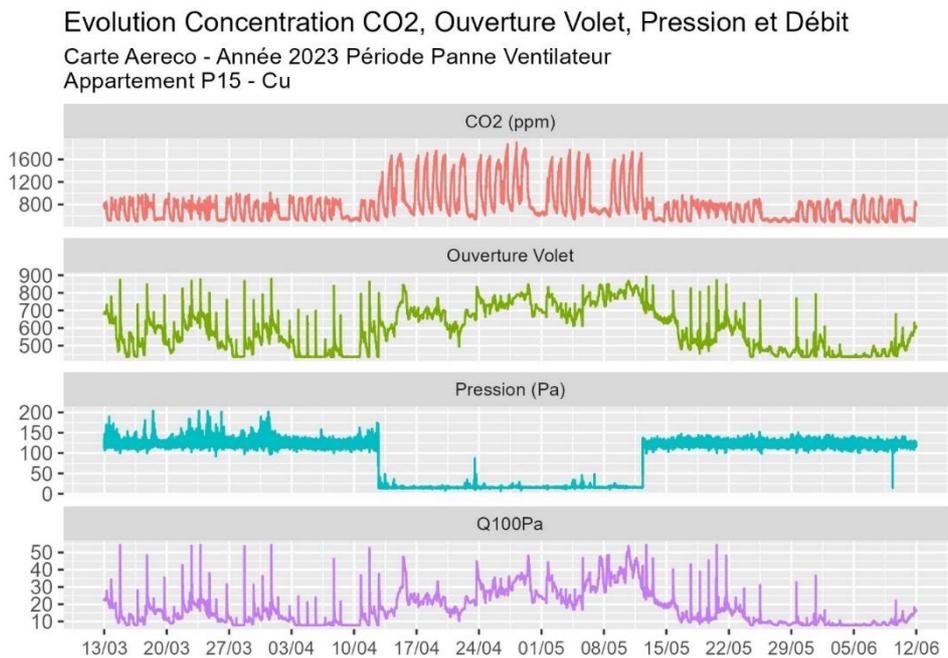


Figure 40 : Représentation des dynamiques de CO₂ avec ou sans ventilation (suite à une panne) dans Performance 2 – Site Paris, appartement 15, cuisine

La panne se traduit directement sur la distribution des concentrations de CO₂ comme l'illustre la Figure 41. Le 4^{ème} mois, qui comprend la période sans système de ventilation, présente une dispersion de ses valeurs largement plus marquée que les autres. Le fort déplacement du 3^{ème} quartile vers le haut, de près de 500 ppm entre mars et avril, illustre

en particulier l'impact de la ventilation en termes d'écrêtage des concentrations de CO₂. Bien que plus légère, on remarque également l'augmentation de la médiane de concentrations en CO₂ durant la panne, qui reflète le rôle de la ventilation dans la dilution constante des émissions.

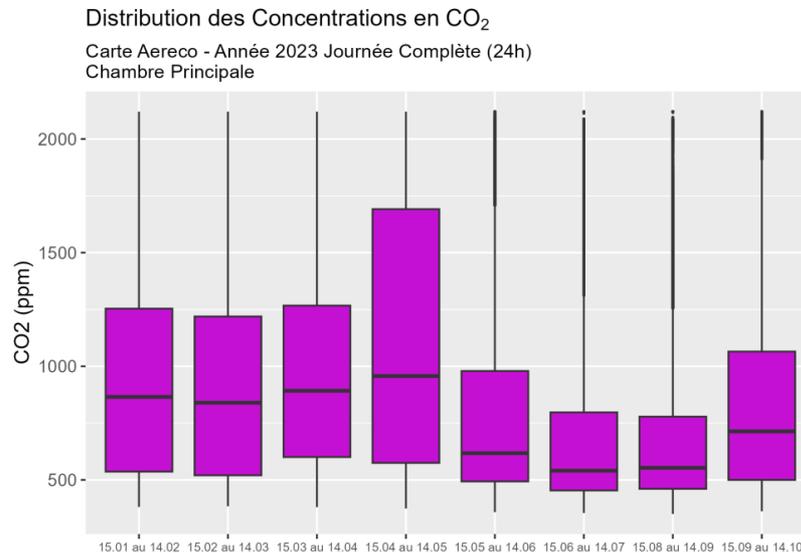


Figure 41 : Distribution des concentrations de CO₂ par mois dans la chambre principale (dont le mois de panne de ventilation du 15 avril au 14 mai) pour tout appartement confondu

La panne de ventilation ne se traduit pas strictement de la même manière dans chaque appartement (Figure 42). Ses rôles en termes d'écrêtage des pics de CO₂ et de dilution sur l'ensemble des émissions semblent varier suivant les situations. Cela est illustré ci-dessous par l'analyse de trois chambres rangées par confinement croissant : P14 (peu confinés), P1 (confinée) et P8 (très confinée).

La panne ne semble pas se traduire par une augmentation significative de CO₂ dans les chambres de cinq appartements sur douze (P3, P6, P7, P9 et P10). Néanmoins l'arrêt du système est très clairement préjudiciable pour la majeure partie des cas, justifiant pleinement d'investir dans sa maintenance et son entretien pour assurer ses performances.

Distribution des Concentrations en CO₂

Carte Aereco - Année 2023 Journée Complète (24h)
Chambre Principale

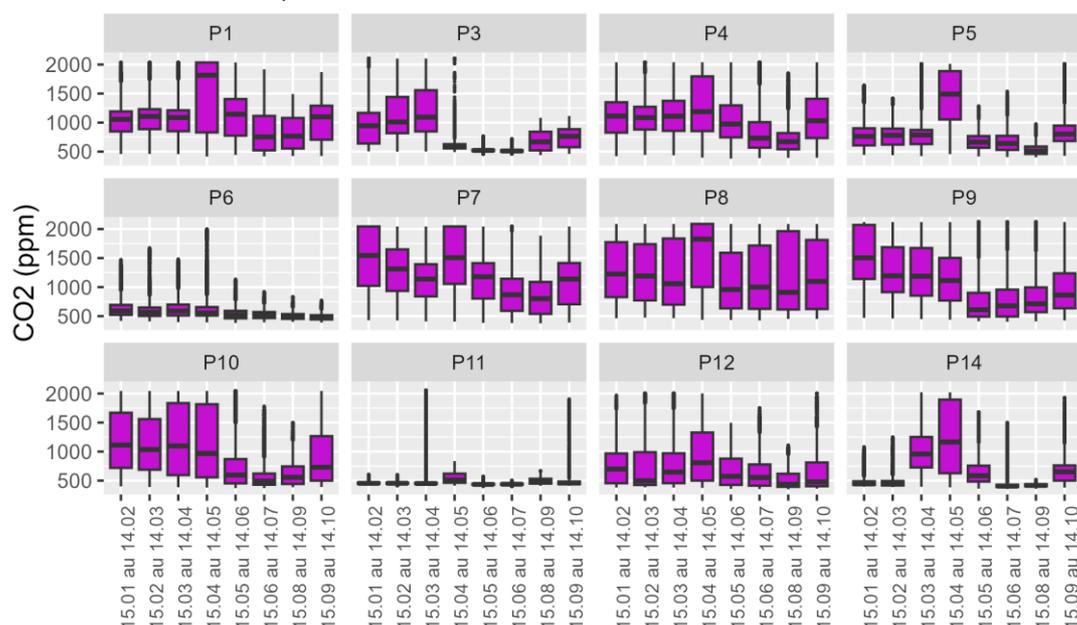


Figure 42 : Distribution des concentrations de CO₂ dans les chambres par mois à Paris, intégrant la période de panne (4^{ème} boîte à moustache)

La chambre de l'appartement P14, qui bénéficie d'un bon renouvellement d'air avec un indice Icone de 1 sur la saison de chauffe, illustre un cas où le système de ventilation est bien adapté à l'occupation. La panne de la ventilation est particulièrement visible avec une augmentation drastique de la distribution des valeurs (Q3-Q1 de plus de 1000 ppm sur le 4^e mois alors qu'elle est en général inférieure à 250 ppm). Elle se traduit aussi par une forte augmentation de la proportion des valeurs de CO₂ très élevées : 25 % de concentrations supérieures à 1750 ppm, alors que seules 5 % des valeurs dépassent 1258 ppm durant la nuit (donc période la plus propice au confinement) sur le reste de la période de chauffe.

Dans une chambre avec un renouvellement d'air légèrement moins performant, comme la chambre P1, dont l'Indice Icone s'élève à 3, le mois concerné par la panne produit des effets similaires sur l'étendue de la distribution des concentrations de CO₂ et les maximums très élevés (25 % de valeurs supérieures à 2000 ppm). On notera également l'augmentation flagrante de sa médiane, aux alentours de 1000 ppm sur le reste de la période de chauffe, qui monte à plus de 1700 ppm durant la panne. Au-delà de l'écrêtage des valeurs maximales en CO₂, cela indique le rôle de la ventilation dans la dilution constante des émissions.

Cette caractéristique ressort particulièrement lorsqu'une problématique de renouvellement d'air préexiste, comme dans la chambre de l'appartement P8 (résultat du GS14 et indice Icone de 4). Dans ce cas, la ventilation ne peut pas s'illustrer par l'écrêtage des concentrations de CO₂, puisqu'elles atteignent couramment les valeurs de saturation du capteur. L'étendue de la distribution des valeurs n'est donc guère modifiée en son

absence. En revanche, la médiane augmente très sensiblement lorsque le système s'arrête (de plus de 500 ppm là encore).

4.4 Conclusions

Dans Performance 2, l'un des objectifs était d'analyser les performances des systèmes de ventilation hygroréglables jusqu'à 15 ans après Performance 1, afin d'évaluer sur chacune des conclusions du projet initial l'impact du temps. La caractérisation de l'évolution des performances des systèmes étudiés a reposé sur la comparaison de résultats théoriques (définies dans l'avis technique correspondant au système de ventilation) et/ ou à réception (données issues du projet Performance 1) puis après plusieurs années d'utilisation (données du projet actuel, Performance 2). Certains de ces aspects ont été traités au sein de la tâche 2. C'est le cas des questions liées à la robustesse de la technologie (pérennité des terminaux), ou encore de sa résistance à l'usage des occupants (évaluation in situ de l'état du système de ventilation en termes de propreté ou de mésusage). Les analyses développées ici se focalisaient sur l'évolution des performances du système de ventilation vis-à-vis de l'énergie et des paramètres de confort (étudiés selon les indicateurs utilisés dans Performance 1), à savoir le CO₂ et l'humidité relative, afin de permettre une comparaison avec les résultats initiaux.

Concernant l'évolution des performances énergétiques des systèmes de ventilation, l'analyse des consommations de la ventilation sur Paris (donnée manquante sur Villeurbanne) montre que le système de ventilation équipé de système hygroréglable et du même ventilateur a maintenu une bonne performance énergétique. Ceci est un indicateur de la robustesse et de la durabilité des équipements utilisés. Une telle stabilité dans la consommation énergétique sur une longue période est favorable en termes de coûts d'exploitation et de maintenance. Elle démontre également que l'utilisation de ces équipements peuvent conduire à des économies d'énergie et des coûts réduits à long terme par rapport à des systèmes de ventilation non modulants. L'analyse des débits déperditifs calculés pendant Performance 2 montrent que pour la très grande majorité des logements étudiés, les débits déperditifs sont inférieurs à ceux d'un système équivalent autoréglable et à ceux mesurés dans Performance 1.

Concernant le fonctionnement hygroréglable des systèmes de ventilation, les résultats à la fin des campagnes en laboratoire et in-situ montre qu'après 15 ans d'utilisation en conditions réelles, les deux systèmes de ventilation hygroréglable étudié continue à moduler correctement les débits dans chaque pièce en fonction de l'humidité grâce au dispositif hygroscopique équipant les entrées d'air, ainsi que les bouches d'extraction de cuisine et salle de bain / salle d'eau. A l'échelle des terminaux (entrées d'air et bouches d'extraction), la réponse de la grande majorité des terminaux aux sollicitation sen humidité correspond aux performance initiales des produits. A l'échelle du logement, l'analyse de la capacité du débit d'extraction total du logement à varier de façon à s'adapter aux besoins liés à la présence des occupants et à leurs activités émettant de l'humidité montre que, malgré les variations d'occupation ou les conditions environnementales survenues au cours des 15 dernières années, les débits d'air extraits

demeurent similaires, voire cohérents, quel que soit le niveau d'occupation ou les activités effectuées dans les espaces, à ceux évalués dans Performance 1.

Concernant les risques de condensation et le nombre d'heure au-dessus de 75% d'humidité, seul un appartement de Paris dépassent les seuils limite définis par le GS 14.5. Il s'agit d'un appartement dans lequel il y a eu récemment un dégât des eaux important, entraînant une contamination fongique des murs et plafond, ce qui explique les niveaux d'humidité mesurés.

Pour le CO₂, malgré les incertitudes significatives pour le calcul du critère du GS 14.5 et les hypothèses « péjoratives » que nous avons considérées, seuls deux appartements à Paris montrent des concentrations en CO₂ dans les chambres qui pourraient ne pas respecter la limite de 400 000 ppm.h. Pour un de ces appartements, le risque de confinement dans la chambre a été confirmé lors d'une analyse approfondie, avec une situation probable de suroccupation de la chambre instrumentée. Comme pour Performance 1, pour les deux sites, on observe des valeurs de concentration de CO₂ globalement sous le seuil de 1000 ppm.

5 PERFORMANCE MULTICRITERE DES SYSTEMES DE VENTILATION HYGROB EN PLACE

5.1 Définition de la QAI

Au-delà de la durabilité du système, ce projet cherche à caractériser les performances des systèmes hygroréglables B étudiés et installés sur les 2 bâtiments de l'étude en matière de qualité d'air intérieur.

- **CO₂ et humidité – compléments**

La définition d'une « bonne QAI » évolue au cours du temps. Les critères retenus dans Performance 1 vis-à-vis de l'humidité relative ou du CO₂ méritent d'être **complétés** au regard des **connaissances et recommandations actuelles**.

- **Autres polluants de l'air intérieur**

D'autre part, l'air intérieur est considéré de qualité « acceptable » selon l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur s'il « ne contient aucun polluant connu à des concentrations dangereuses [...] ». Pour caractériser la QAI, il est nécessaire d'étudier les **polluants physico-chimiques** qui **affectent la santé humaine**. Il n'est pas possible d'être exhaustif en la matière car il existe plusieurs centaines de molécules. Néanmoins, après étude de la bibliographie et des possibilités techniques offertes par les appareils de métrologie actuels, il a été décidé d'en retenir un nombre limité, qui présentent un intérêt particulier.

- Le formaldéhyde : en tant que composé ubiquitaire dans l'air intérieur, qui sert d'indicateur des sources d'émission intérieures dans le cadre de la réglementation applicable aux établissements recevant du public (ERP) ;
- Les composés organiques volatils : pour avoir une connaissance plus générale sur la dynamique des pollutions chimiques, même si la mesure ne permet pas d'identifier les polluants incriminés ;
- Les particules fines : en tant que polluant de l'air intérieur et extérieur ayant un fort impact en termes de santé publique.

Pour chacun de ces polluants, il sera présenté :

- Un ou plusieurs exemple(s) issu(s) des fiches appartement représentant **l'évolution temporelle** des données mesurées. Cette première approche est complétée par des **statistiques descriptives**, représentées sous forme de boîte à moustaches, afin d'obtenir une représentation globale et schématique des concentrations retrouvées dans les pièces (médiane, dispersion des valeurs, extrêmes). La moyenne est présentée sous forme de carré blanc à l'intérieur de la distribution.
- Des éléments de synthèse collectés à l'échelle de l'appartement ou du bâtiment, qui s'appuient sur des **valeurs seuils, et/ou un indicateur**. Les valeurs seuils permettent d'identifier un risque sanitaire sur le court ou le long terme, faisant directement écho à la définition de la qualité de l'air intérieur citée ci-dessus. A défaut de valeurs seuils sanitaires ou réglementaires lorsque celles-ci font défaut, la distribution des valeurs issues de la Campagne Nationale Logement 1 menée par

l'OQAI en 2005 pourront être présentées. Les indicateurs permettent de rendre compte d'un ensemble de données sous une forme synthétique. Plus complexes d'interprétation, ils peuvent néanmoins représenter un intérêt pour une lecture rapide des résultats. **Attention, en raison des incertitudes de mesures parfois très élevées par les capteurs utilisés, la comparaison des valeurs mesurées à des valeurs seuils reste très délicate et doit être considérée en tenant compte de cette limite importante.**

Attention, il n'existe aucune exigence réglementaire à respecter pour les systèmes de ventilation dans les logements concernant l'ensemble de ces polluants étudiés ici. En aucun cas, les résultats présentés dans ce rapport ne pourront être utilisés pour valider une conformité des systèmes de ventilation étudiés. Il s'agit ici uniquement de connaissances nouvelles entre le renouvellement d'air assuré par ces systèmes et les mesures de polluants réalisées sur ces deux bâtiments, pendant la période du projet Performance 2.

5.2 Etat des lieux de la QAI dans les logements au regard des connaissances actuelles

5.2.1 CO₂

Le dioxyde de carbone n'a pas d'effet toxique dans les proportions rencontrées en logement. Il n'en reste pas moins un excellent **indicateur de l'adéquation occupation/renouvellement d'air**- rôle pleinement institué lors de la crise sanitaire liée à la Covid 19. Sur la base de ces éléments, différents compléments aux analyses de Performance 1 sont jugés pertinents pour Performance 2. Les courbes à l'échelle d'un logement sont présentées dans le paragraphe 4.3.2.

En termes de valeurs seuils, le Règlement Sanitaire Départemental Type¹⁶, toujours en vigueur à l'heure actuelle, juge le renouvellement d'air suffisant lorsque le taux de CO₂ est inférieur à 1000 ppm. La crise Covid a conduit le Haut Conseil de Santé Publique comme l'Organisation Mondiale de la Santé à ré-évaluer le seuil admis comme protecteur vis-à-vis des transmissions aéropartées. Ce dernier est désormais fixé à **800 ppm**. Cette valeur a d'ailleurs pris un poids réglementaire au titre du code de l'environnement dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les ERP. Il est notamment utilisé comme premier seuil de l'Indice ICONNE, avec celui de 1500 ppm qui fait désormais office de second seuil (contre 1000 ppm et 1700 ppm précédemment).

D'autres valeurs seuils peuvent être considérées, notamment en lien avec les travaux en cours du GT ESSOC.

¹⁶ Même si le RSDT n'est pas applicable au résidentiel, en l'absence de seuil pour les logements, cette référence sera utilisée ici

5.2.1.1 Analyse de la distribution des valeurs de CO₂ mesurées en fonction de la période considérée

La distribution des valeurs de CO₂ mesurées est analysée sur l'ensemble de la période de monitoring, puis plusieurs focus viennent enrichir l'information sur des **périodes d'intérêt** : comparaison jour/nuit¹⁷, saison de chauffe/hors saison de chauffe, et enfin, pour les chambres, focus sur la nuit en période de chauffe (conditions supposées les plus pénalisantes). Une synthèse de ces distributions est proposée sur l'année entière pour l'ensemble des appartements de Paris (Figure 43) et de Villeurbanne (Figure 44).

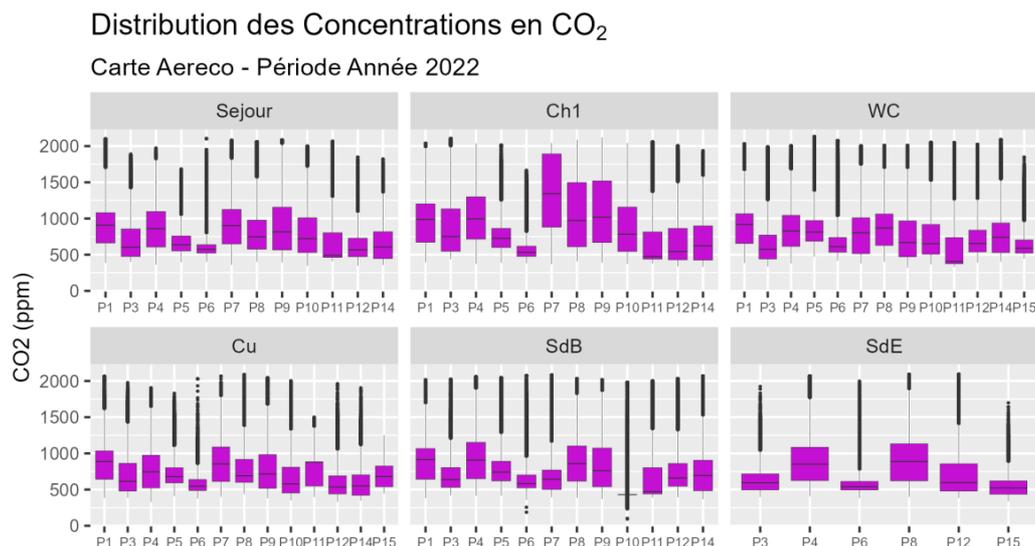


Figure 43 : Distribution des concentrations en CO₂ sur l'année 2022 dans les différentes pièces des appartements à Paris

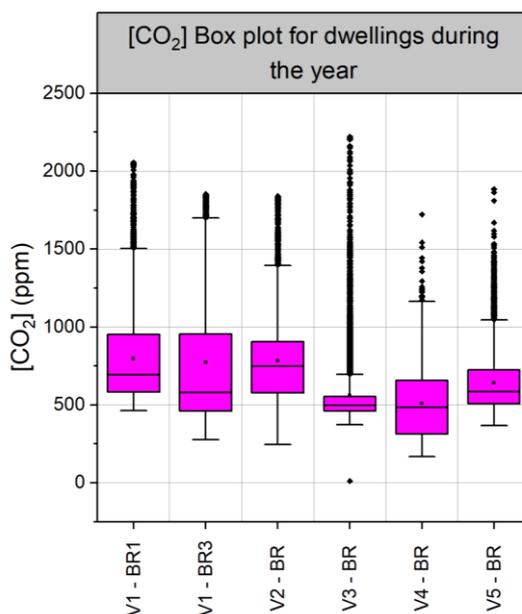


Figure 44 : Distribution des concentrations en CO₂ sur l'année 2022 dans les chambres principales des appartements à Villeurbanne

¹⁷ La nuit étant définie selon les critères établis dans performance 1, par la plage s'étendant de minuit à 6 heures du matin.

Illustration de l'écart entre année complète et période de chauffe

Dans l'exemple présenté ci-dessous (Figure 45), on constate que **sur l'année** et pour toutes pièces confondues, les valeurs mesurées sont inférieures au seuil de 800 ppm plus de la moitié du temps. De plus, seul le 3^e quartile de la chambre 1 dépasse la valeur des 1000 ppm.

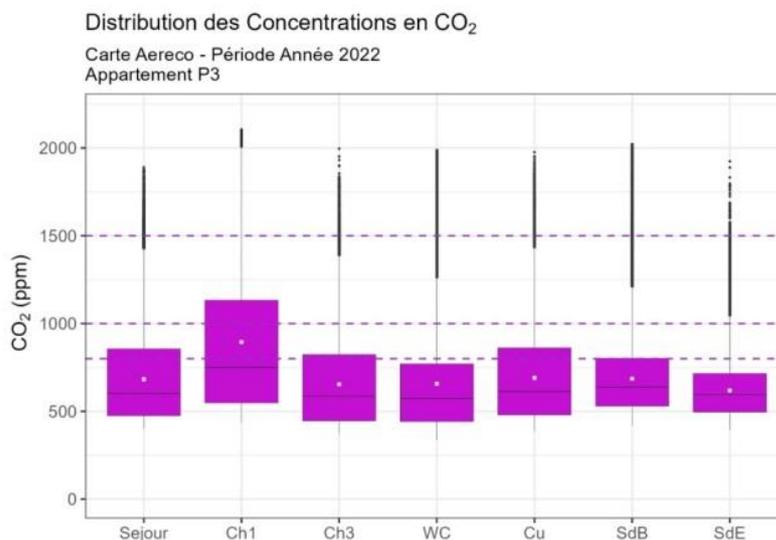


Figure 45 : Distribution des concentrations de CO₂ sur une année dans l'appartement P3 (T4) – site de Paris

La Figure 46 montre une nette augmentation des valeurs **en période de chauffe**, comme on pouvait s'y attendre dans une période où le recours à l'aération diminue largement. Pour le séjour du P3 par exemple, le 3^e quartile hors chauffe, situé aux alentours de 500 ppm, est inférieur au 1^{er} quartile en période de chauffe. La période de chauffe amplifie les tendances entre pièces repérables sur l'année complète. D'autre part les écarts entre médiane (trait noir) et moyenne (carré blanc) sont bien plus faibles en période de chauffe car c'est l'ensemble des valeurs qui sont plus élevées, avec une répartition plus homogène.

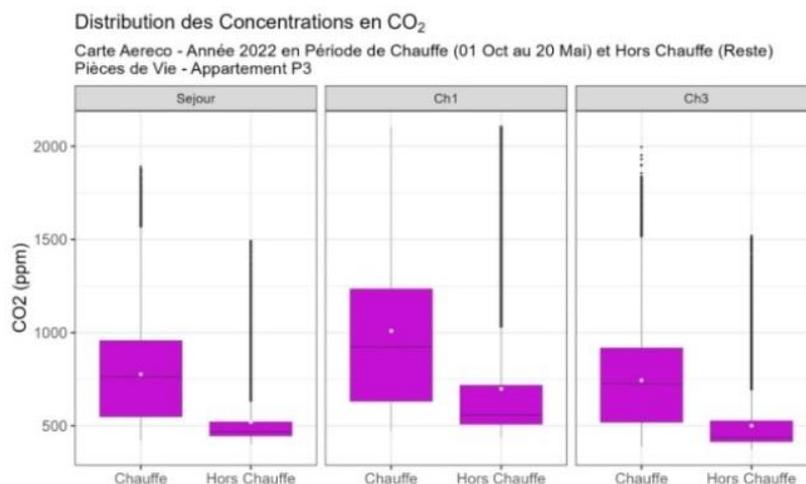


Figure 46 : Focus sur la différence de répartition des valeurs de CO₂ en période de chauffe et hors période de chauffe dans l'appartement P3 (T4) – site de Paris

Illustration de l'écart entre journée complète et nuit

Les données relevées ne permettent pas d'aboutir à une estimation de l'exposition des occupants car il est trop difficile (et peu fiable) de juger de leur période de présence exacte dans une pièce. L'intérêt des focus successifs est d'obtenir les informations vis-à-vis du renouvellement d'air sur les périodes où l'occupation est quasi-certaine (la nuit dans la chambre), et où le risque de confinement est le plus élevé (en période de chauffe) sans noyer ces valeurs au milieu de celles durant lesquelles la présence est beaucoup moins garantie. Une synthèse de ces distributions nocturnes est proposée sur la période de chauffe pour l'ensemble des chambres principales de Villeurbanne (Figure 47) et de Paris (Figure 48). Lorsqu'on compare ces graphs qui ne considère **que la nuit en période de chauffe avec les synthèses précédentes qui considère toutes les données sur une année complète**, on observe des écarts importants.

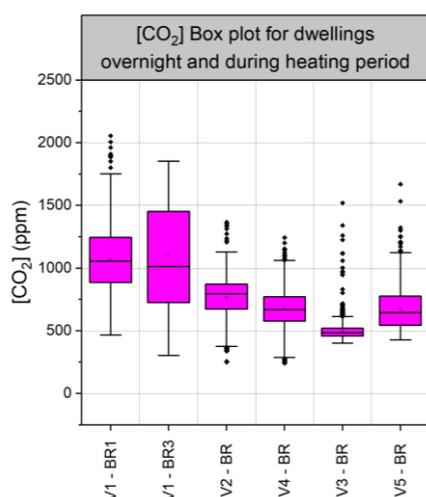


Figure 47 : Distribution des concentrations en CO₂ la nuit en période de chauffe sur l'année 2022 dans les chambres principales des appartements à Villeurbanne

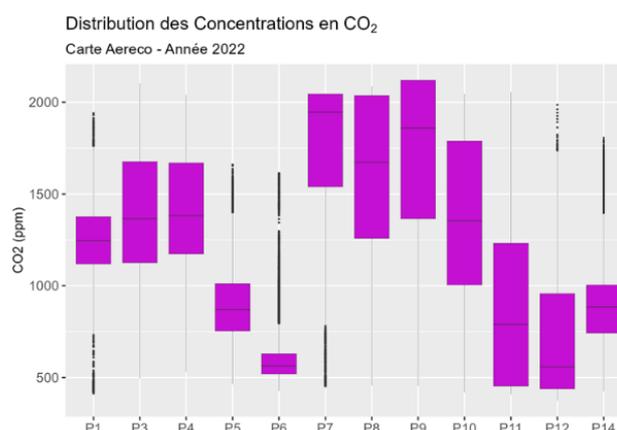


Figure 48 : Distribution des concentrations en CO₂ la nuit en période de chauffe sur l'année 2022 dans les chambres principales des appartements à Paris

Reprenant pour mieux illustrer cet écart l'exemple précédent : appartement P3 – Paris. La séparation des résultats entre jour et nuit (0-6h), présentée en Figure 49 influe principalement sur la chambre 1. Dans les autres pièces, à savoir le salon et la chambre 3, les moyennes sont sensiblement les mêmes que sur 24 h. Ceci s'explique aisément dans le salon, majoritairement occupé de jour. Dans la chambre 3, les photos prises par Aereco tendent à montrer que la pièce a été aménagée en bureau/chambre d'ami, usage qui expliquerait un comportement assez proche de celui salon.

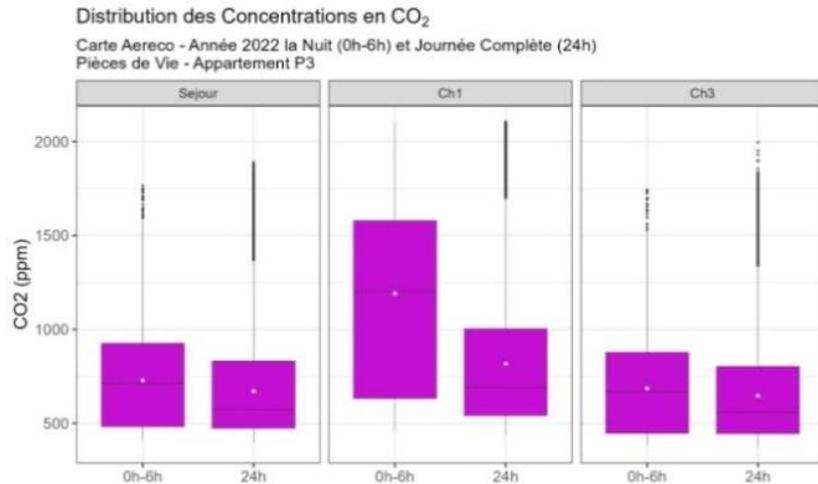


Figure 49 : Focus sur la différence de répartition des valeurs de CO₂ entre la nuit et la journée complète sur une année dans l'appartement P3 (T4) – site de Paris

Sur Villeurbanne, la Figure 50 montre moins d'impact de la période de chauffe sur les concentrations de CO₂ que dans l'exemple développé sur Paris. Cela peut en partie s'expliquer car l'occupation est moindre. Il s'agit ici d'un T2 occupé par une seule personne qui a des habitudes d'aération marquées, hiver comme été, ce qui pourrait contribuer à l'homogénéité des résultats entre saisons, quand le P3 sur Paris est un T4, dont on ne connaît pas l'occupation précise faute d'entretien mené sur place, les résidents n'ayant pas souhaité intégrer la campagne de mesures QAI.

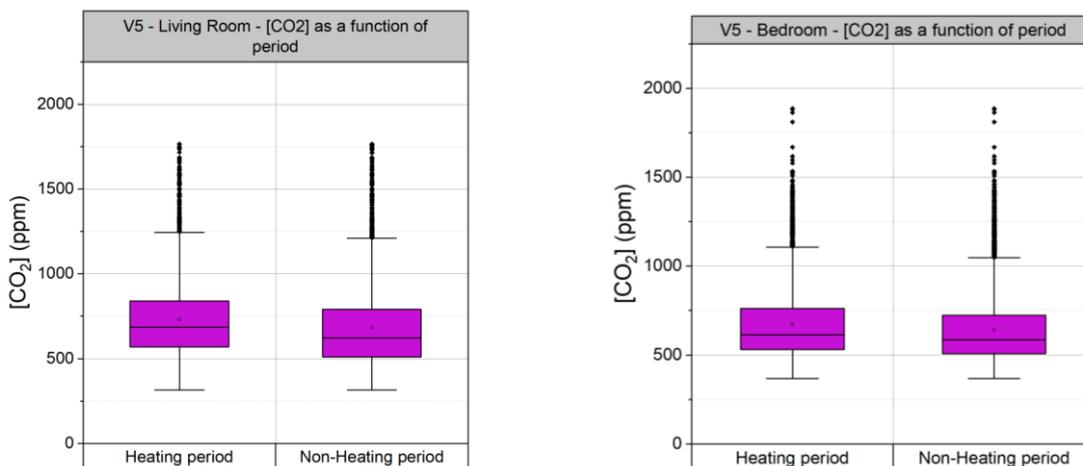


Figure 50 : Focus sur la différence de répartition des concentrations de CO₂ entre période de chauffe et hors période de chauffe une année dans l'appartement V5 (T2) - séjour à gauche, chambre à droite

La période la plus critique sur le plan du CO₂ se situe la nuit en période de chauffe puisqu'il s'agit du plus long temps récurrent d'occupation d'une pièce, durant lequel seule la ventilation assure le renouvellement d'air. En termes de valeur absolue, la Figure 51 montre que la médiane comme la moyenne dépassent peu la valeur de 1000 ppm dans la chambre la plus critique de l'exemple de Paris, appartement P3 (chambre 1). Les valeurs sont néanmoins plus faibles que celles de la nuit sur l'ensemble de l'année (Figure 49), ce

qui pourrait être expliqué par des débits de ventilation plus importants (les émissions n'ayant pas de raison de varier, et l'aération ayant plutôt tendance à produire l'effet inverse puisqu'elle est un recours plus commun hors chauffe). Pour l'exemple de Villeurbanne, appartement V5, la Figure 52 permet également de constater le peu d'écart dans les concentrations de CO₂ entre le jour et la nuit. L'occupante a indiqué dormir avec la porte ouverte lors de l'entretien, ce qui peut contribuer à la dilution du CO₂.

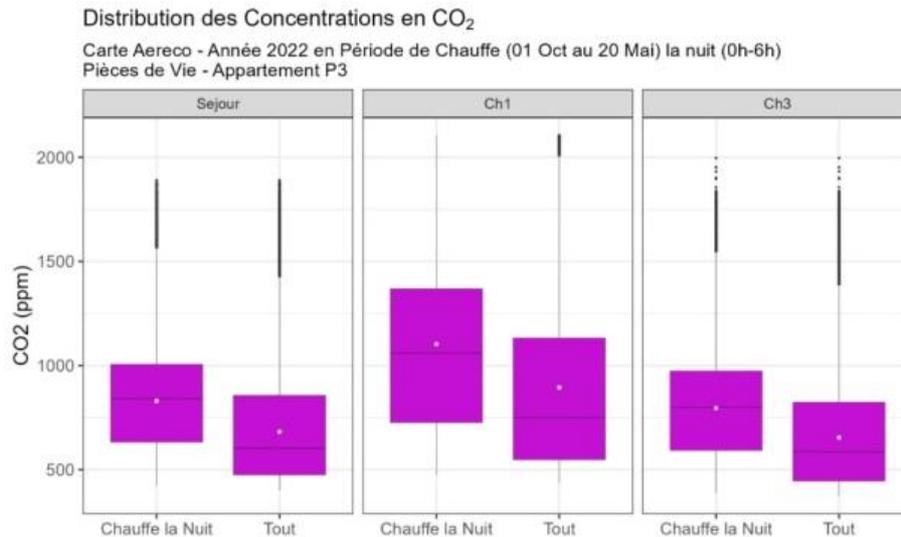


Figure 51 : Focus sur la différence de répartition des valeurs de CO₂ en période de chauffe la nuit et toute la période année 2022 dans l'appartement P3 (T4)

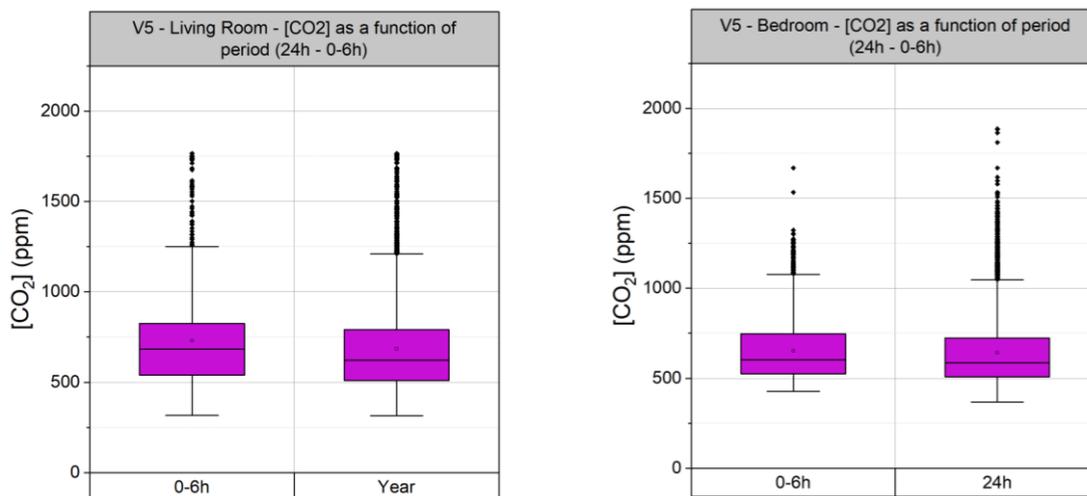


Figure 52 : Focus sur la différence de répartition des valeurs de CO₂ entre la nuit et la journée complète sur une année dans l'appartement V5 (T2) - séjour à gauche, chambre à droite

Dans la suite des analyses sur le CO₂, la période de la nuit (0h-6h) sera considérée comme période de présence des occupants dans les chambres, à défaut de données sur l'occupation des pièces.

5.2.1.2 Comparaison des valeurs de CO₂ mesurées aux exigences proposées par le GT ESSOC

Les tableaux ci-dessous synthétisent les valeurs de CO₂ en-dessous desquelles se situent les concentrations de CO₂ mesurées dans les pièces de vie pour chaque appartement par bâtiment dans 67 % et 95 % du temps. Il s'agit d'un indicateur issu du GT ESSOC, qui propose un seuil pour chacun de ces indicateurs : **1900 ppm pour 67 %**, et **2700 ppm pour 95 %**. Ces valeurs peuvent encore être amenées à évoluer, il s'agit des arbitrages à date (mai 2024). Le calcul se fait exclusivement sur les périodes d'occupation. Compte tenu de l'incertitude entourant ce paramètre au sein de Performance 2, l'indicateur sera calculé sur la nuit (entre 0 et 6 h), et dans les chambres exclusivement.

Les Tableau 17 et Tableau 18 recensent, respectivement, les valeurs en dessous desquels les concentrations en CO₂ mesurées dans les appartements de Paris et de Villeurbanne se trouvent 67 % et 95 % du temps. Les dépassements avérés sont colorés en orange (> 1900 ppm), les dépassements probables en tenant compte des caractéristiques des capteurs le sont en jaune (> 2700 ppm).

Tableau 17 : Concentrations en CO₂ (ppm) en dessous desquelles chaque pièce se situe durant un pourcentage de temps défini à Paris en saison de chauffe la nuit (0h – 6h)

	P1		P3		P4		P5		P6		P7		P8	
% temps considéré	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %
Concentration CO ₂ (ppm) max Chambre 1	1331	1556	1579	2104	1556	2040	965	1151	602	849	2045	2045	1922	2088
Concentration CO ₂ (ppm) max Chambre 2			897	1114										
	P9		P10		P11		P12		P14					
% temps considéré	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %				
Concentration CO ₂ (ppm) max Chambre 1	2121	2121	1565	2045	1077	2036	856	1283	962	1258				

Le Tableau 17 permet d'identifier 3 appartements dépassant le seuil proposé par le GT ESSOC en-dessous duquel 67 % des valeurs doivent se situer, à savoir 1900 ppm. Il s'agit des appartements P7, P8 et P9.

S'ils semblent tous respecter la valeur de 2700 ppm en-dessous de laquelle se situent 95 % du temps, les valeurs des trois appartements pré-cités doivent être prises avec circonspection car la valeur indiquée est en fait leur valeur de saturation (Figure 8 – chapitre 2). L'analyse de la plage entre 2000 ppm et 5000 ppm réalisée dans le cadre des mesures NEMOs dans l'appartement P9 par exemple, permet visuellement d'identifier le seuil de 95 % pour chaque campagne (Figure 53).

Pourcentage de Temps par Concentration Moyenne de CO₂ entre 2000 et 5000 ppm
Appareil NémO - Campagne de mesure 2022 (C1) et 2023 (C2)
Appartement P9

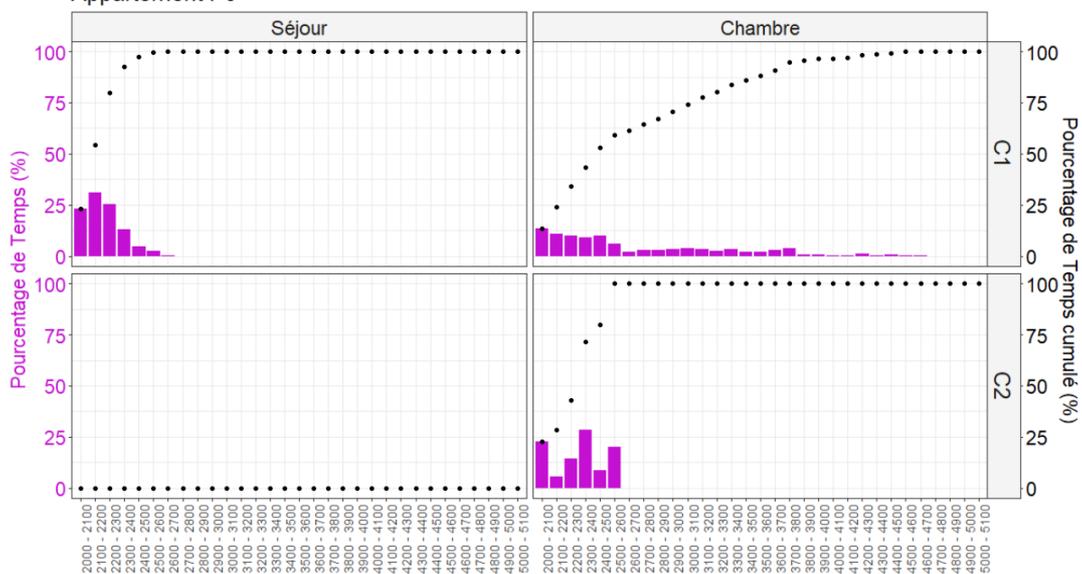


Figure 53 : Répartition des valeurs par tranche de 100 ppm entre 2000 et 5000 ppm dans le séjour et la chambre de l'appartement P9 durant les deux campagnes de mesures

La lecture du graphe permet d'identifier l'importance de la variabilité des concentrations de CO₂ dans une même pièce suivant les campagnes. On relève néanmoins que la valeur correspondant au cumul de 95% des données se situe au-dessus de 2700 ppm. Ce seuil est largement dépassé dans la campagne 1 avec une valeur aux alentours de 3900 ppm lors la campagne 1, et une valeur nettement plus faible aux alentours de 2500 ppm sur la campagne 2, qui respecte le seuil.

Sur l'ensemble des chambres instrumentées et selon cet indicateur, trois situations de confinement semblent se dégager à Paris durant la période de chauffe. Des analyses plus poussées sont proposées en chapitre 5, mais il est à noter qu'il s'agit de chambres avec deux adultes qui dorment portes fermées.

Tableau 18 : Concentrations en CO₂ (ppm) en dessous desquelles chaque pièce se situe durant un pourcentage de temps défini à Villeurbanne en saison de chauffe la nuit (0h – 6h)

	V1		V2		V3		V5		V6	
	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %	67 %	95 %
Concentration CO ₂ (ppm) max Séjour	-	-	787	1555	868	1226	507	889	538	842
Concentration CO ₂ (ppm) max Chambre 1	707	1042	909	1341	618	984	720	1007	781	1178
Concentration CO ₂ (ppm) max Chambre 2	770	1218	-	-	-	-	-	-	-	-

Le Tableau 18 montre que les valeurs proposées par le GT ESSOC sont largement respectées dans les appartements de Villeurbanne.

5.2.1.3 Focus sur les périodes de campagnes QAI

Durant les campagnes hivernales QAI, des informations sont disponibles dans les chambres instrumentées avec les balises NEMOs, avec une saturation autour de 5000 ppm. Des informations sur la présence des occupants dans le logement sont également disponibles. Ainsi, pour chacune des deux campagnes réalisées hivernales QAI, les Figure 54 et Figure 55 indiquent le pourcentage de temps où les seuils de 800 ppm (en rouge) et 1000 ppm (en bleu) sont dépassés, pour le séjour et la chambre principale pour l'ensemble des appartements ayant participé aux campagnes QAI (certains n'ayant participé qu'à la première campagne).

NB : Comme indiqué plus haut, pour des raisons de recalibrage qui rendent les données ininterprétables lors de la 1^{ère} campagne de mesures CO₂ à Paris, seules les valeurs de Villeurbanne sont présentées.

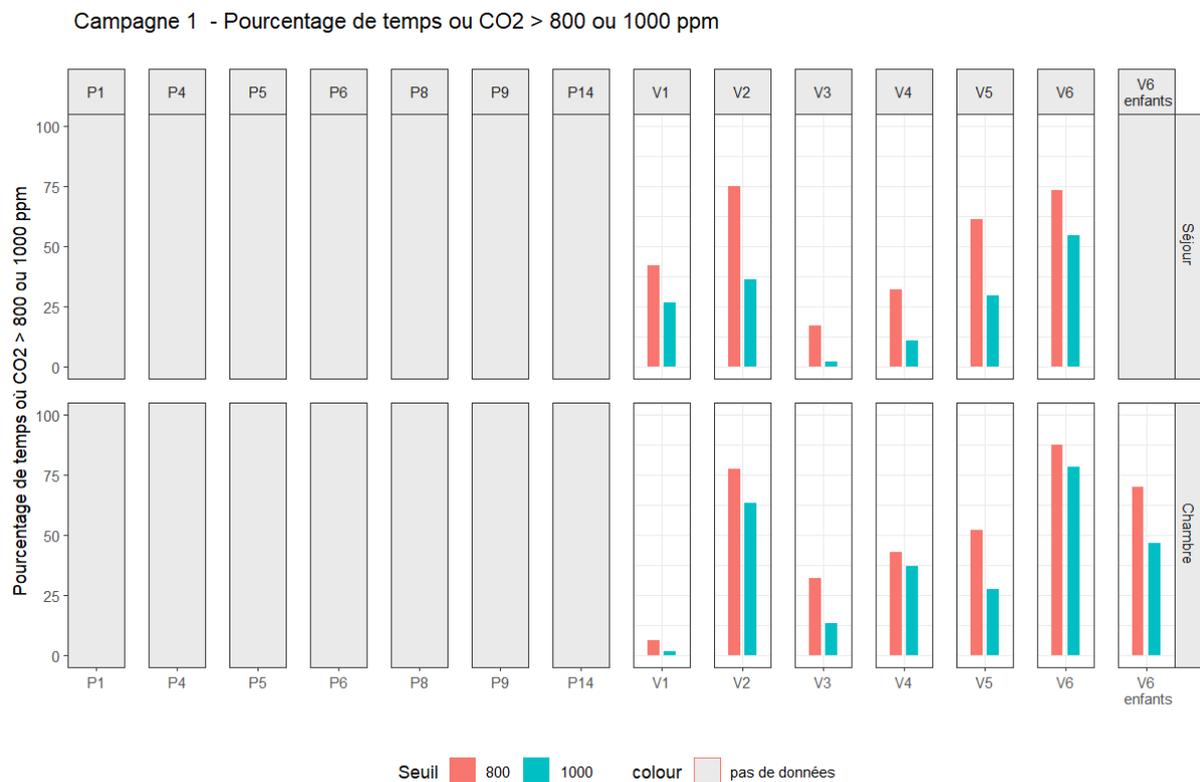


Figure 54: Pourcentage de temps où le CO₂ dépasse 800 et 1000 ppm durant la 1^{ère} campagne de mesures réalisées avec les NEMOs

Campagne 2 - Pourcentage de temps où CO₂ > 800 ou 1000 ppm

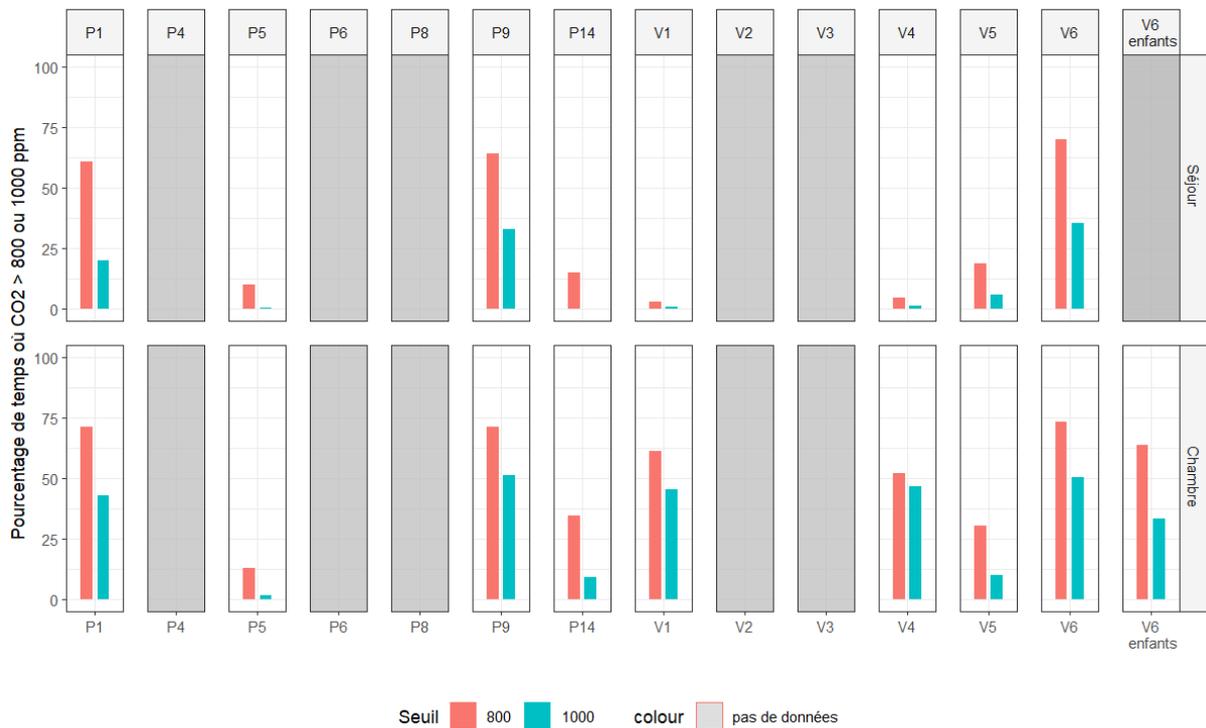


Figure 55 : Pourcentage de temps où le CO₂ dépasse 800 et 1000 ppm durant la 2^{ème} campagne de mesures réalisées avec les NEMos

Cette synthèse des données de la 1^{ère} campagne avec un seuil plus exigeant que ceux précédemment utilisés fait émerger une problématique de renouvellement d'air dans les appartements V2 et V6. Il s'agit des deux T4 intégrés au projet Performance 2 sur Villeurbanne. Le V2 est occupé par 6 personnes, et le V6 par 7, soit plus que les scénarios de références utilisés actuellement pour le dimensionnement des systèmes sous Mathis. Les locataires de l'appartement V2 ayant souhaité se retirer du dispositif à la fin de la 1^{ère} campagne, nous n'avons pas de seconde mesure pour qualifier l'évolution. La seconde campagne menée dans le V6 confirme les résultats de la 1^{ère} (Figure 55).

On observe, dans une moindre mesure, des résultats relativement élevés dans le séjour de l'appartement V5 lors de la 1^{ère} campagne, qui ne se retrouvent pas lors de la seconde (Figure 55). Il s'agit d'un T2, qui n'est pas sur-occupé (une à deux personnes), mais dont l'occupant principal bénéficiait d'une forte proportion de télétravail lors de la 1^{ère} campagne.

On remarque sur la Figure 55 que les concentrations de CO₂ mesurées dans la chambre du V1 ont fortement augmenté. Cela s'explique par deux raisons. D'une part la chambre instrumentée n'est pas la même, car l'occupante principale dont la chambre était instrumentée lors de la 1^{ère} campagne a été gênée par le bruit de l'appareil et ne souhaitait pas le voir posé de nouveau lors de la seconde. Elle s'est par ailleurs déclarée sujette à des insomnies récurrentes durant la première campagne, qui ont pu l'amener à quitter sa chambre, diminuant d'autant les émissions de CO₂. Durant la seconde campagne le capteur a été posé dans la chambre où était hébergé un jeune, qui s'enfermait dans cette pièce dès son arrivée à l'appartement.

Concernant Paris, la Figure 55 permet d'identifier une problématique autour du CO₂ dans les logements P1 et P9. Il s'agit de deux T3, occupés par 4 personnes chacun. Le P9 ressort systématiquement quel que soit l'indicateur CO₂ retenu. Il sera analysé en chapitre 5. Les appartements P7 et P8, voire P3, P4, P10, plus ou moins sujets à dépassements récurrents selon les indicateurs testés n'apparaissent pas ici car les occupants n'ont pas participé à la seconde campagne de mesurage avec les NEMOs.

5.2.1.4 Indice ICONE

Dans le cadre de Performance 2, l'indice ICONE (détail au paragraphe 2.3.3.2) est calculé pour chaque chambre la nuit, soit entre 0 et 6 heures, sur l'ensemble de l'année. Ces résultats sont présentés pour chaque site dans le Tableau 19 pour Paris et Tableau 20 pour Villeurbanne.

Tableau 19 : Indice ICONE annuels calculés de 0 à 6h pour chaque chambre - Paris

5													
4						x/o	x	x					
3	x	x	x/o					o	o	x			
2	o	o								o			
1				x/o						x/o	x	x/o	
0					x/o						o		
ICONE	P1	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P14	

X résultat selon les seuils actuels (800 et 1500 ppm)

O résultat selon les seuils initiaux (1000 et 1700 ppm)

Sur Paris, l'ICONE (Tableau 19) calculé selon les seuils actuels (avec un « x ») fait ressortir trois cas de confinement « très élevé » : les chambres des appartements P7, P8 et P9. Ces résultats sont cohérents avec les résultats du GT ESSOC (Tableau 17). Les appartements P1, P3, P4 et P10 apparaissent également avec un confinement « élevé ». Ces derniers ne ressortaient pas via les indicateurs du GT ESSOC, et seulement pour partie avec les calculs du GS14 (Figure 32). Comme tout indice, l'ICONE n'est pas exempt d'effets de seuils, comme cela est illustré par le symbole 0 qui donne les résultats selon les anciennes modalités de calcul. En décalant les seuils vers le haut de 200 ppm seulement, on obtient une classification assez différente où seul le P7 est « très confiné » et où 8 appartements au lieu de 5 sont dans des gammes de valeurs allant de 0 à 2. L'abaissement du seuil haut de 1700 ppm (seuil d'avant la révision) à 1500, valable dans les ERP, dans un contexte spécifique de recherche de lutte contre la transmission des infections aéroportées, attire d'avantage la vigilance sur des cas largement satisfaisants vis-à-vis des critères du GT ESSOC par exemple (P1, P3, P10) qu'avec les anciens seuils.

Afin de considérer la variabilité des réalités au sein de chaque catégorie de l'indice ICONE calculé avec les seuils actuels, la Figure 56 présente le pourcentage de temps de dépassement du seuil de 1500 ppm la nuit pour chaque appartement.

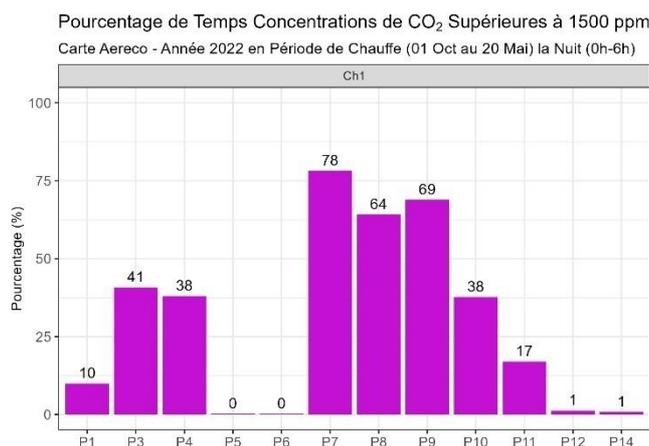


Figure 56 : Pourcentage de temps où le CO₂ dépasse 1500 ppm la nuit durant la saison de chauffe à Paris

On voit ainsi que dans l'appartement P7, le seuil est franchi plus des trois-quarts du temps la nuit, ce qui le distingue des appartements P8 et P9 avec a minima 10 points de plus. L'écart entre l'appartement P1 et les appartements P3, P4 et P10 est également particulièrement visible sur ce graphe. Le P1 ne franchit le seuil de 1500 ppm « que » 10% de la nuit, soit de façon relativement marginale. Compte tenu de ses résultats selon les deux modalités d'ICONE ce résultat permet de supposer que la proportion de ses valeurs entre 800 et 1500 ppm est conséquente mais que la distribution ne doit pas dépasser ce seuil de beaucoup. Ceci est d'ailleurs confirmé par ce qui a été vu précédemment sur la Figure 48. Sur Villeurbanne, le calcul des indices ICONES montre une situation favorable.

Tableau 20 : Indice ICONES annuel calculé de 0 à 6h pour chaque chambre - Villeurbanne

5						
4						
3						
2						
1	X					
0		X	X	X	X	X
ICONE	V1	V2	V3	V4	V5	V6

5.2.1.5 Conclusion CO₂

Les différentes analyses des concentrations en CO₂ mesurées sur les deux sites montrent tout d'abord une nette augmentation des valeurs en période de chauffe par rapport à l'année entière, comme on pouvait s'y attendre dans une période où le recours à l'aération diminue largement. La période la plus critique sur le plan du CO₂ se situe la nuit (0h-6h) en période de chauffe puisqu'il s'agit du plus long temps récurrent d'occupation d'une pièce, durant lequel seule la ventilation assure le renouvellement d'air.

Une comparaison avec les seuils proposés par le GT ESSOC montre que la grande majorité des pièces instrumentées respecteraient cette nouvelle exigence, avec trois exceptions constituées de trois chambres occupées par 2 adultes, dormant portes fermées.

A Paris, l'indice ICONE fait ressortir trois cas de confinement « très élevé », en cohérence avec les résultats précédents. A Villeurbanne, le calcul des indices ICONE montre une situation favorable pour tous les logements.

5.2.2 Humidité relative

Tout comme le CO₂, l'humidité n'a pas d'effet toxique direct. Cependant une humidité trop élevée favorise le développement de moisissures, quand une sécheresse excessive est inconfortable pour les voies respiratoires. L'excès d'humidité faisant déjà l'objet d'obligations dans le cadre du GS 14.5, seule la sécheresse est étudiée en complément dans cette partie. À noter que cette dernière n'est pas nécessairement attribuable à la ventilation en tant que telle, la cause n'étant pas systématiquement à rechercher du côté d'un excès de renouvellement d'air.

Il n'y a pas d'exigence réglementaire en termes de seuil bas, mais la valeur de 40 % est couramment admise comme celle en-dessous de laquelle un inconfort se fait ressentir. En complément des distributions complètes vues précédemment, un focus a été fait ci-dessous sur le pourcentage de temps **en dessous de 40 % d'humidité**.

La distribution de l'humidité relative au cours du temps est présentée pièce par pièce pour chaque logement au sein des fiches-appartement (Annexe C). A titre d'exemple, la Figure 57 représente ces distributions pour chaque pièce du logement P3, au regard des valeurs d'intérêt (40 %, 75 % et 85 %).

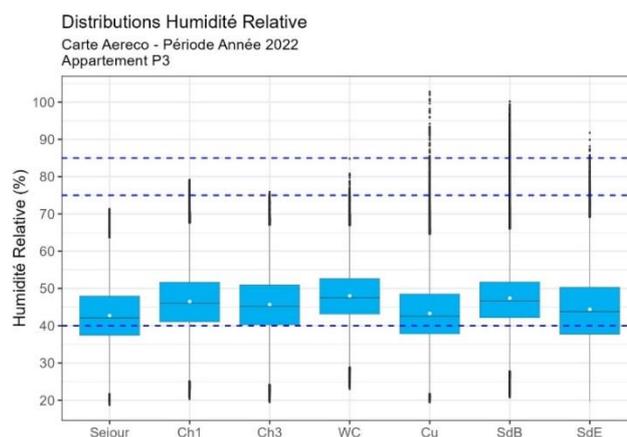


Figure 57 : Distribution de l'humidité relative dans l'appartement P3 au cours de l'année 2022, au regard des seuils 40, 75 et 85%

Les pièces qui ont tendance à être les plus sèches dans le P3 sont le séjour, la cuisine et la salle d'eau, avec une humidité relative inférieure à 40 % plus de 25 % du temps. Les répercussions sur le confort des occupants sont toutes relatives dans les pièces de

services, dont l'occupation est faible, mais peuvent être plus sensibles dans les pièces de vie. Les seuils hauts sont largement respectés.

La synthèse des distributions de l'humidité relative pour chaque pièce dans chaque appartement de Paris est représentée Figure 58. Elle permet d'identifier visuellement que la majorité des pièces de vie se situe dans la zone de confort (entre 40 et 60 % d'humidité relative). Les écarts dans les séjours des différents logements peuvent néanmoins être relativement élevés, compte tenu de la plage prise par ce paramètre. Ainsi le séjour des appartements P3, P9, P11, P12 et P14 est-il plus sec – tout en restant dans la gamme de confort la majeure partie du temps. La répartition est plus homogène dans les chambres, à l'exception de celle du P1 qui dénote par une gamme de valeurs relativement élevées.

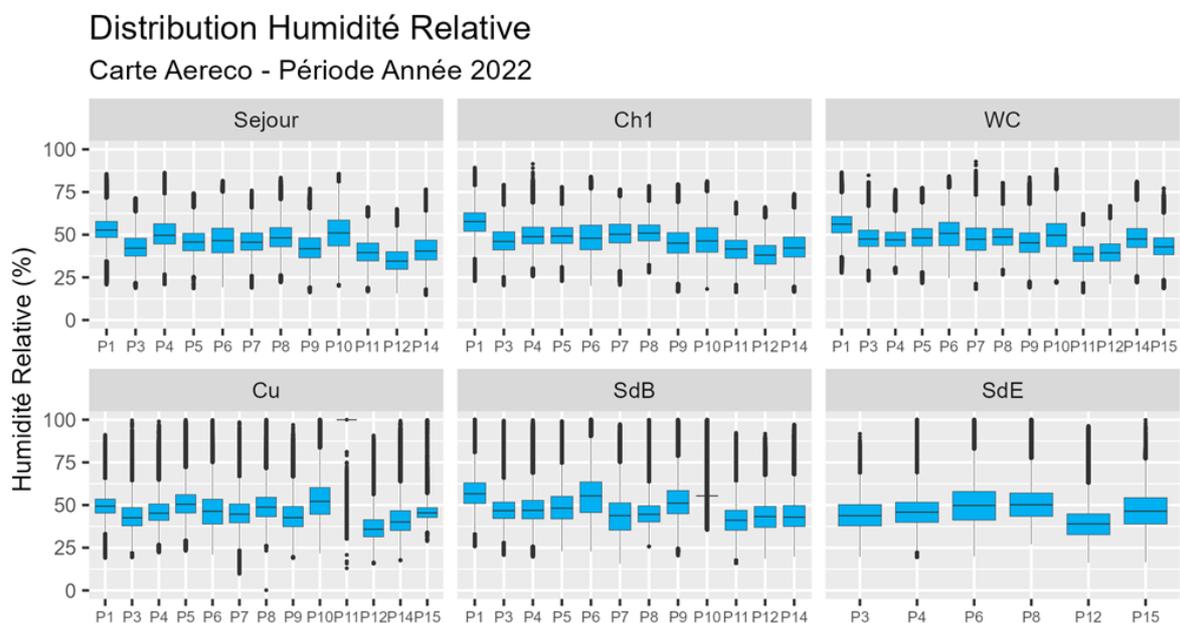


Figure 58 : Distribution de l'humidité relative par pièce pour chacun des appartements suivis à Paris

La Figure 59 (pièces de vie) et la Figure 60 (pièces humides) représentent la synthèse des distributions de l'humidité relative à Villeurbanne. La Figure 59 permet d'identifier deux appartements dont le séjour est plus de 50 % du temps en dessous de 40 % d'humidité, à savoir le V3 et le V5. Pour ce dernier, c'est également le cas de la chambre. Les chambres du V1 sont également particulièrement sèches, avec 50 % des valeurs inférieures à 35 % et presque 50 % des valeurs sous le seuil de 40 % dans la première chambre, ce qui doit attirer la vigilance. La Figure 60 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les distributions dans les pièces de services à Villeurbanne. Elles ont moins de sens sur le plan du confort puisque l'occupation y est très ponctuelle.

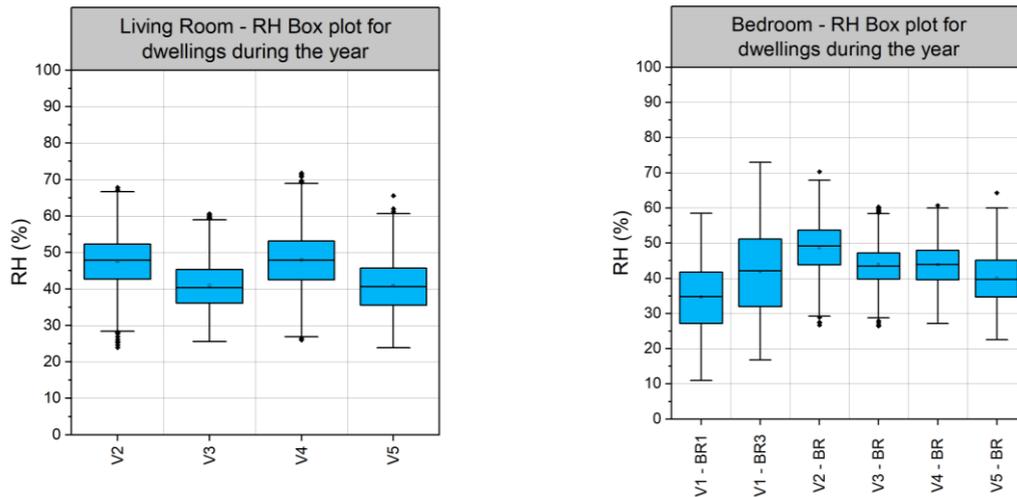


Figure 59 : Distribution de l'humidité relative pour les séjours et chambre des appartements suivis à Villeurbanne

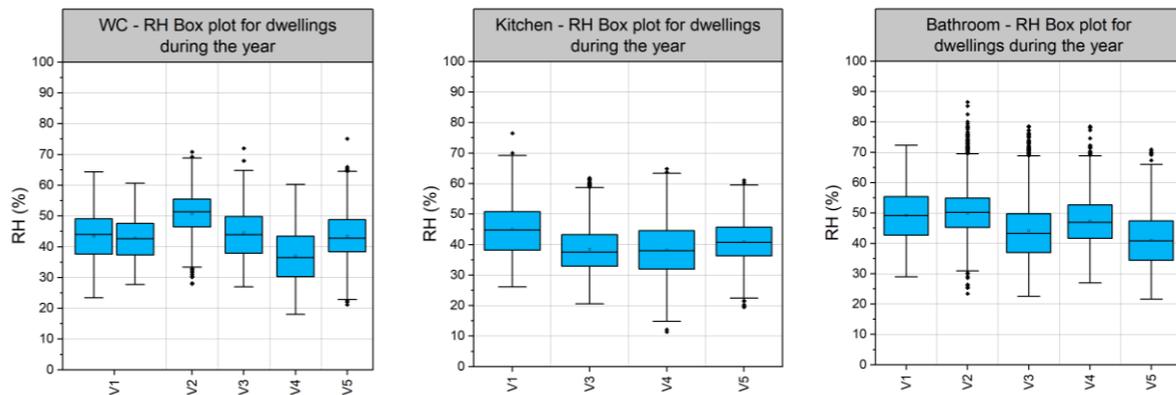


Figure 60 : Distribution de l'humidité relative pour les pièces humides des appartements suivis à Villeurbanne

Afin de quantifier avec précision le pourcentage de temps pour lequel l'humidité relative est sous le seuil de 40 %, les Figure 61 (Paris) et Figure 62 (Villeurbanne) présentent ces résultats par pièce dans chaque appartement du projet.

Pourcentage Temps avec une Humidité Relative Inférieure à 40%
Carte Aereco - Période Année 2022

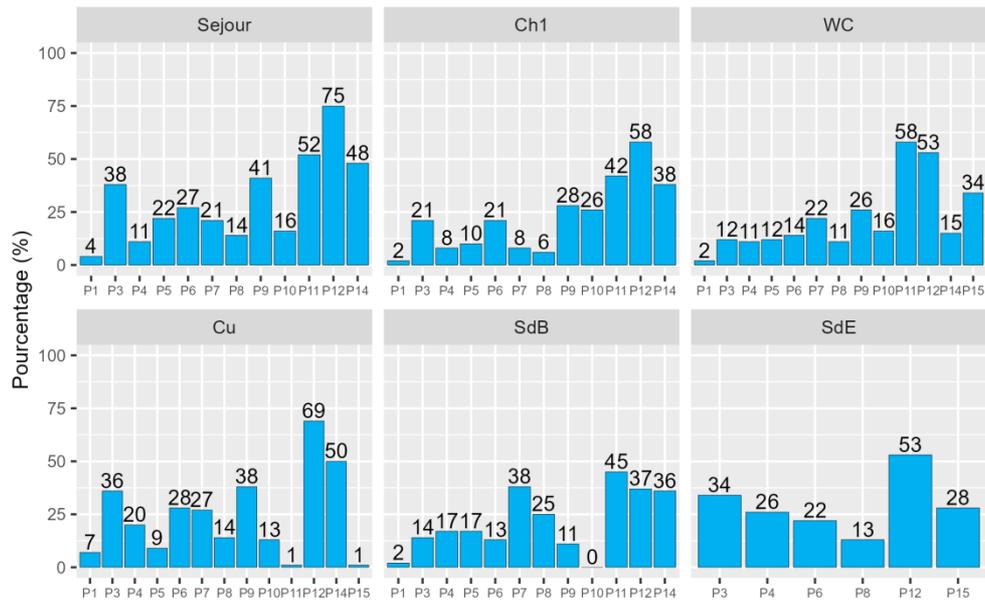


Figure 61 : Pourcentage de temps passé avec une humidité relative inférieure à 40% - Paris

A Paris, l'appartement P12 interpelle par la sécheresse de ses ambiances. Cette dernière concerne toutes les pièces, avec cependant une plus forte occurrence dans le séjour qui est plus des trois quarts du temps en dessous de 40 % d'HR. Les appartements P11 et P14 présentent également des temps importants de dépassement de ce seuil bas, avec une atmosphère trop sèche qui approche la moitié du temps dans le séjour et dépasse un tiers du temps dans la chambre.

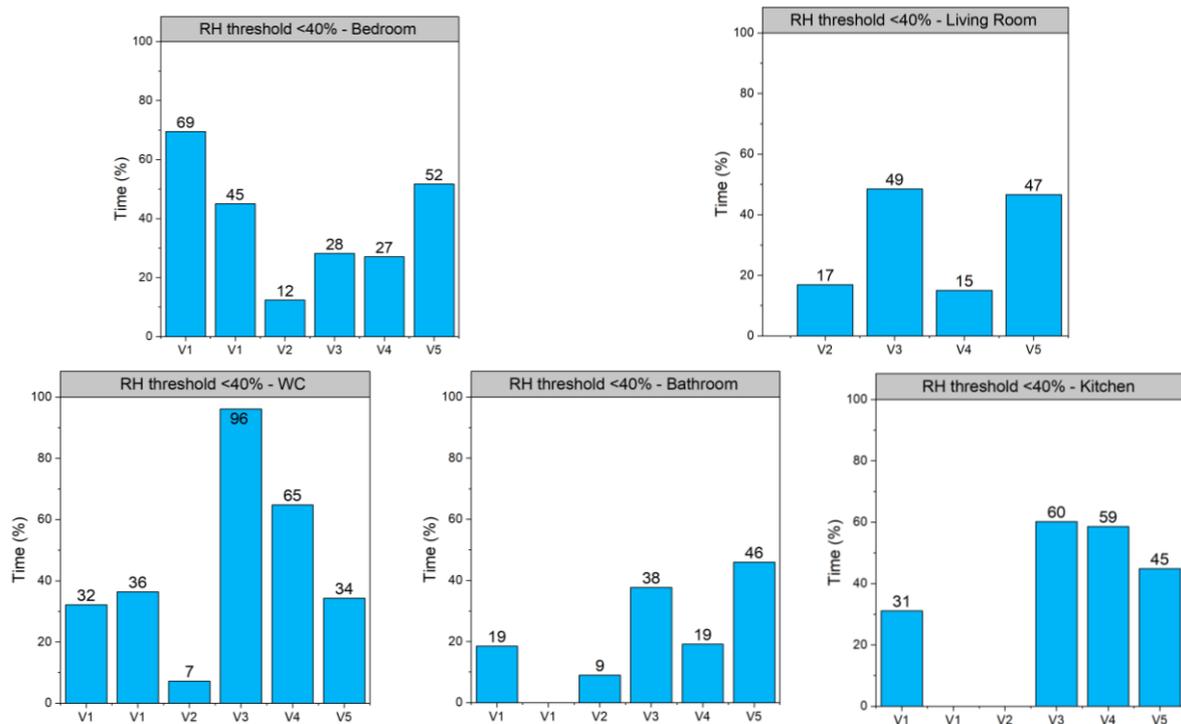


Figure 62 : Pourcentage de temps passé avec une humidité relative inférieure à 40% - Villeurbanne

A Villeurbanne, les résultats interpellent sur la problématique de sécheresse dans le V1, avec en particulier une chambre qui est plus de deux tiers du temps en dessous du seuil de 40 %. La seconde chambre est également concernée près de 45 % du temps, ce qui n'est pas le cas des pièces de services.

Le V5 se distingue également par une sécheresse, relativement homogène entre les pièces. L'occupante se plaint d'ailleurs de sécheresse ORL au réveil.

La chambre du V3 présente des résultats similaires. Si la problématique semble moindre dans le salon, elle est particulièrement marquée dans les sanitaires et dans la cuisine. Les occupants ont identifié des moisissures dans la salle de bain avant l'intervention d'Anjos, et ont demandé de bloquer en ouverture les bouches d'extraction de manière à extraire le maximum d'air en continu. Dans le questionnaire ils décrivent une sécheresse au niveau de la sphère ORL le matin, et s'interrogent sur la pertinence d'installer un humidificateur d'air. Ils font également remarquer que le linge sèche particulièrement vite, et qu'ils ressentent par moment des courants d'air, ce qu'ils attribuent à la hauteur de leur logement dans l'immeuble et à l'entrée d'air extérieur.

5.2.2.1 Conclusion humidité

Si tous les appartements respectaient les valeurs seuil pour la fourchette haute de l'humidité relative, définies réglementairement, on s'aperçoit que la valeur de confort basse est bien moins respectée. Cette valeur, à 40 % n'a pas de poids réglementaire et les résultats situés en dessous ne posent problème que lorsqu'ils sont récurrents, dans des pièces à l'occupation élevée (pièce de vie). Dans les exemples précisés ci-dessus, c'est le cas pour 2 voire 3 chambres à Villeurbanne (jusqu'à 70% du temps en dessous de 40% d'humidité dans le V1), et 1 voire 3 séjours pour Paris (jusqu'à 75% du temps en dessous de cette valeur dans le P12). Les causes d'un tel niveau de sécheresse ne sont pas facilement identifiables.

5.2.3 Le formaldéhyde

Le formaldéhyde (CHOH) appartient à la famille des composés organiques volatils, dont il représente l'aldéhyde à la chaîne carbonée la plus courte. Présent aussi bien dans les matériaux de construction ou le mobilier, qui représentent des sources d'émission en continu, que dans des produits d'entretien ou d'hygiène utilisés ponctuellement (liste non exhaustive), c'est une molécule ubiquitaire des environnements intérieurs. En revanche l'air extérieur en est quasi-exempt, sauf cas particulier. Cela en fait un **indicateur des polluants intérieurs**, rôle qui lui est d'ailleurs reconnu dans le cadre de la réglementation de surveillance de QAI dans les ERP.

Sur le plan sanitaire, la toxicité aigüe du formaldéhyde engendre irritation des muqueuses et voies respiratoires, fatigue et céphalées. Sur le long terme, il est reconnu cancérigène certain pour le nasopharynx depuis 2004 par le Centre International de Recherche sur le Cancer.

Pour mémoire, seuls les NEMOs mesurent le formaldéhyde dans le cadre de Performance 2, aussi ne dispose-t-on de données que sur la durée des campagnes QAI.

NB : Il est à noter que le formaldéhyde atteint généralement ses valeurs les plus importantes en été car le dégazage augmente avec la température. Les campagnes de mesures ayant lieu sur la période de chauffe, il est probable que les valeurs enregistrées minimisent l'exposition réelle sur une année.

5.2.3.1 Evolution temporelle sur les campagnes

Pour chaque pièce instrumentée lors des campagnes QAI, l'évolution des valeurs de formaldéhyde mesurées en fonction du temps ont été tracées, en incluant les médianes, minimums et maximums quotidiens. Ces représentations sont disponibles pour chaque appartement en Annexe C. La Figure 63 illustre l'exemple de l'appartement V6 à Villeurbanne.

Evolution Temporelle du Formaldéhyde
Appartement V6 - Appareil NémO Campagne de mesure 2022 (C1) et 2023 (C2)

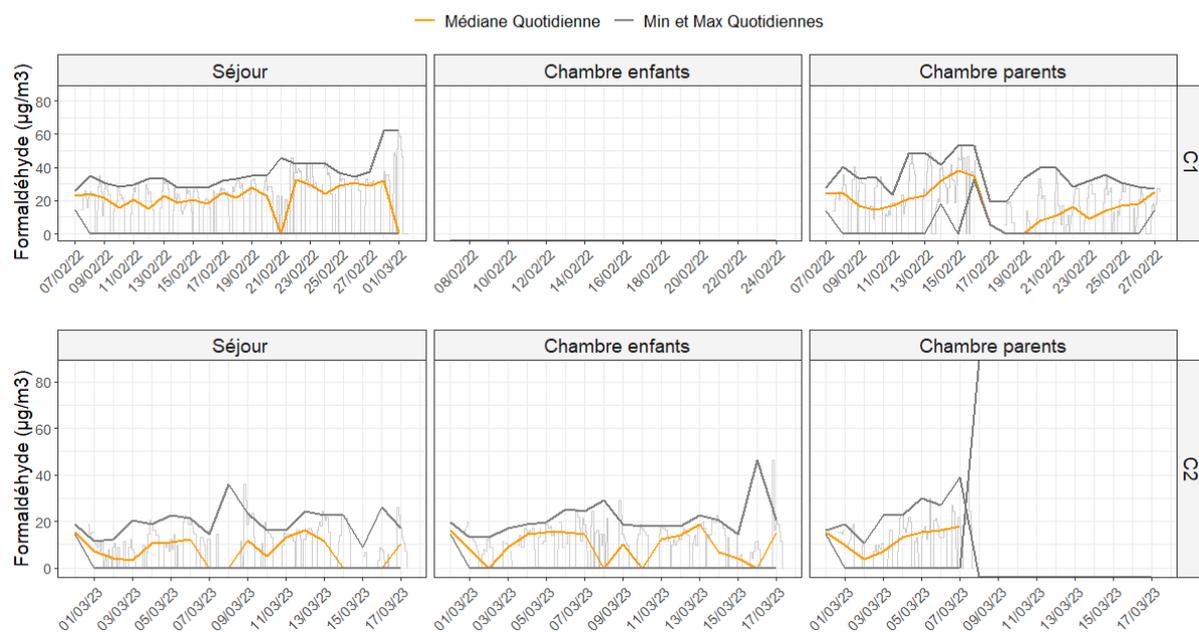


Figure 63 : Evolution temporelle du formaldéhyde dans l'appartement V6 par campagne de mesures et par pièce

Cet exemple permet de visualiser les fluctuations quotidiennes de formaldéhyde. On identifie ainsi une médiane journalière relativement stable dans le séjour lors de la 1^{ère} campagne, qui fluctue davantage dans la chambre parentale, même si elles peuvent être proches moyennées sur deux semaines. D'autre part les maximums sont quotidiennement relativement élevés, entre 40 µg/m³ et 60 µg/m³. En considérant que les données représentées sont des moyennes réalisées sur deux heures (cf mode de prélèvement), ce qui écrête les valeurs des pics, ces résultats appellent à la vigilance.

La 2^{nde} campagne montre une évolution encourageante, avec médianes et maximums largement inférieurs – ce qui peut être rapproché d'un changement de pratiques ménagères rapporté lors de l'entretien. Suite à la 1^{ère} campagne, la personne qui a répondu à nos questions a suivi une formation sur l'air intérieur et modifié ses habitudes,

en particulier en termes de produits de ménage. On remarque cette fois encore que l'ordre de grandeur des médianes par pièce est similaire.

5.2.3.2 Distribution des valeurs mesurées pendant les campagnes QAI

Une autre analyse des valeurs mesurées pour le formaldéhyde consiste à étudier leurs distributions pendant la période des campagnes QAI avec les NEMOs.

La Figure 64 représente la distribution des valeurs dans le même appartement V6.

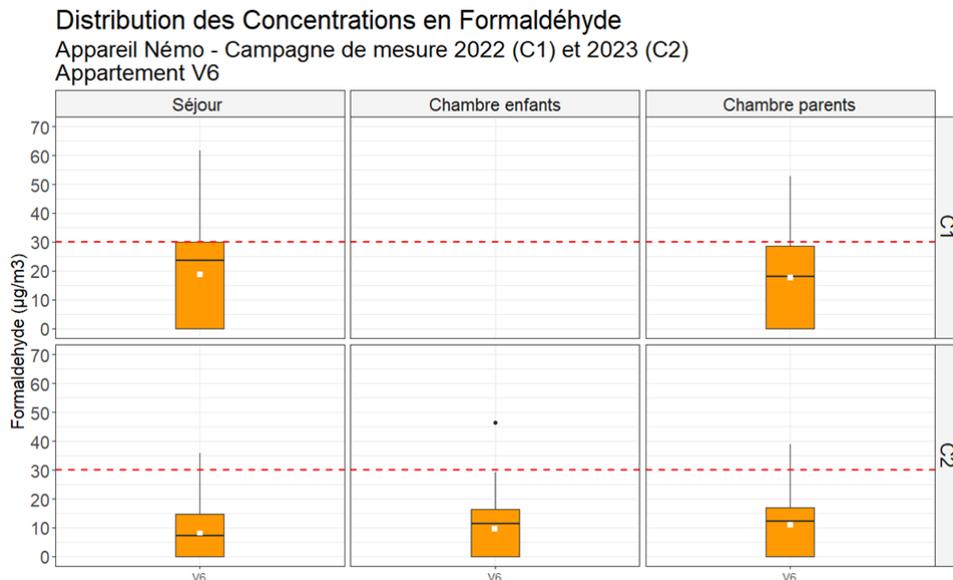


Figure 64 : Distribution des concentrations de formaldéhyde mesurées dans le logement V6, par campagne et par pièce, et comparaison au seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$

La médiane et la moyenne des concentrations en formaldéhyde dans la chambre de l'appartement V6 lors de la 1^{ère} campagne de mesures Performance 2 correspondent à celles le plus couramment observées dans les foyers français lors de la campagne logement 1 de l'OQAI : entre 15 et $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La baisse des valeurs visuellement repérée sur la Figure 63 entre les deux campagnes, est ici objectivée. La plus drastique a lieu dans le séjour, ce qui paraît assez cohérent avec la modification des pratiques de ménage puisque c'est la pièce la plus concernée par ce dernier. À la lecture, la médiane du séjour de la 1^{ère} campagne s'établirait aux alentours de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, contre environ $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la seconde, soit une division d'un facteur 3 (a minima). On passe d'une situation où la valeur seuil proposée par la réglementation française sur le long terme en ERP, $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en pointillé rouge sur la Figure 64) était dépassée près d'un quart du temps dans le salon et presque autant dans la chambre, à une situation particulièrement favorable au regard des seuils sanitaires, mais également par rapport à la distribution des concentrations observables dans le parc français.

5.2.3.3 Synthèse des mesures de formaldéhyde pour l'ensemble des campagnes QAI

La Figure 65 permet d'identifier le temps passé au-dessus de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de formaldéhyde dans le séjour et la chambre instrumentée de chaque appartement lors de la 1^{ère} campagne de mesure avec les NEMOs. Le temps de dépassement du seuil est donné en

heures (en bleu), ainsi que la moyenne du formaldéhyde sur l'ensemble de la campagne (en rouge). La Figure 66 représente ces mêmes informations lors de la seconde campagne.

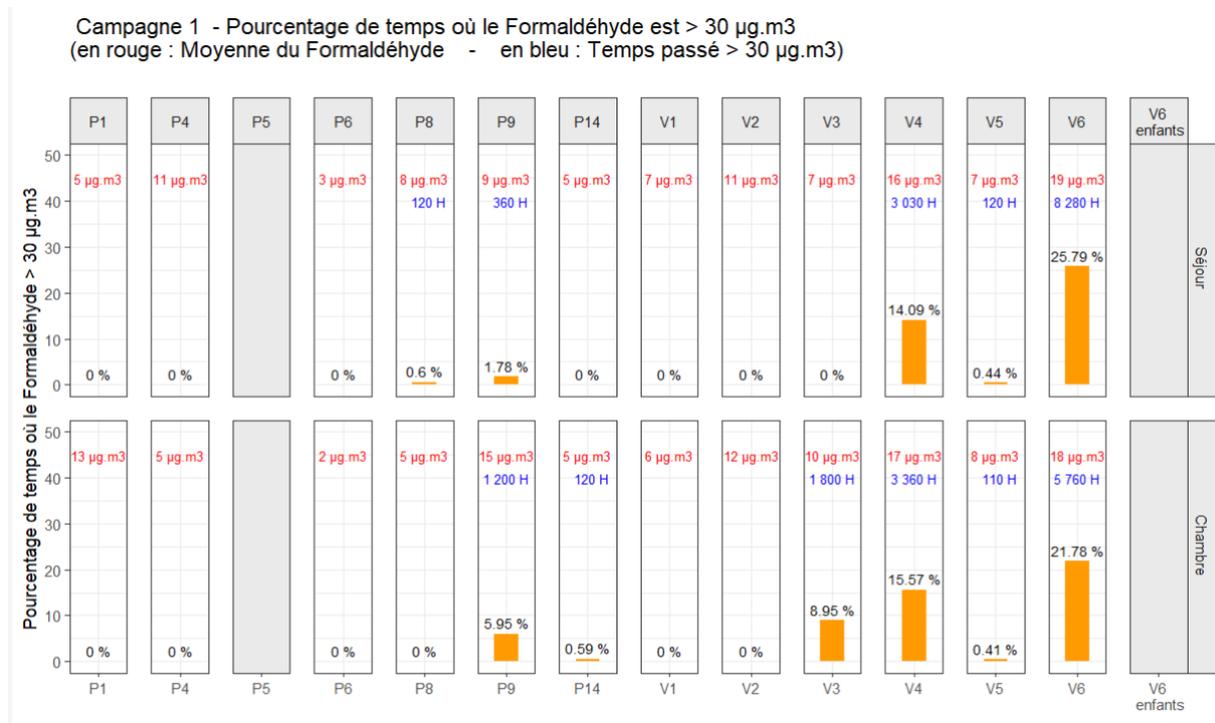


Figure 65 : Pourcentage de temps où la valeur de 30 µg/m³ est dépassée dans les pièces instrumentées de chaque logement lors de la 1^{ère} campagne hivernale QAI

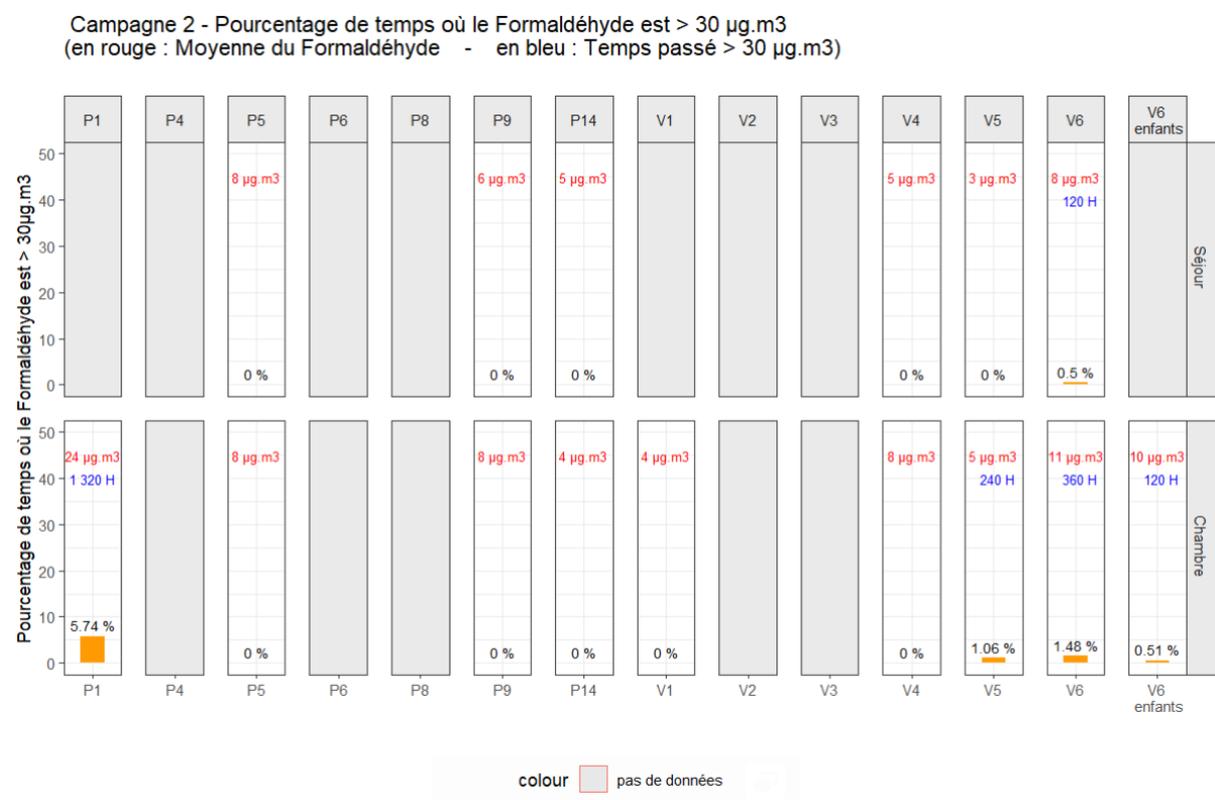


Figure 66 : Pourcentage de temps où la valeur de 30 µg/m³ est dépassée dans les pièces instrumentées de chaque logement lors de la 2^{ème} campagne hivernale QAI

Les appartements V4 et V6 ressortent particulièrement au sein de la première campagne (Figure 65), beaucoup moins à la seconde (Figure 66). Une piste d'explication est donnée au paragraphe précédent pour l'appartement V6. Concernant l'appartement V4, on peut prendre comme hypothèse explicative la réfection du sol et des peintures murales en juin 2021, soit moins d'un an avant la 1^{ère} campagne de mesure.

Pour Paris, on remarque également que l'appartement P9 dépasse le seuil près de 20 % du temps lors de la 1^{ère} campagne, et que cela ne se produit plus du tout à la seconde. L'ordre de grandeur de la moyenne est comparable à celui du V4, en revanche la durée de dépassement est deux fois moins importante, aussi peut-on imaginer une ou des source(s) ponctuel(le)s, qui émettraient de façon intense mais non continue. Les réponses consignées dans les entretiens ne permettent pas d'avancer d'hypothèse explicative sur la différence entre 1^{ère} et 2^{ème} campagne.

Lors de la seconde campagne, on voit émerger une problématique de formaldéhyde dans l'appartement P1, avec une moyenne de 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, soit plus que dans n'importe quelle autre pièce en campagne 1. La durée de dépassement de la valeur de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ n'est cependant « que » de 5 % du temps, ce qui invite à analyser la distribution des valeurs par campagne et par pièce (Figure 67).

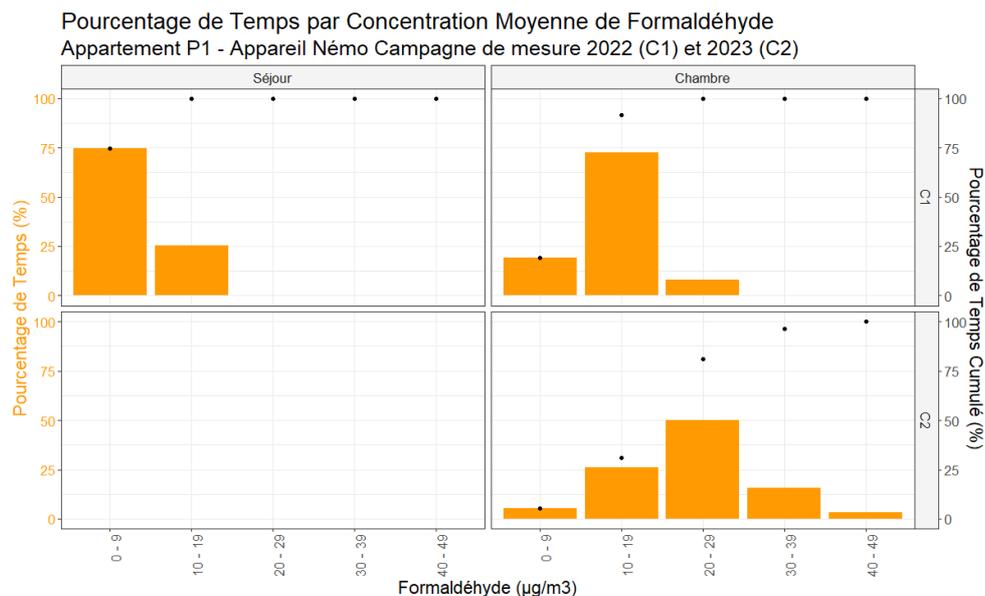


Figure 67 : Distribution des valeurs de formaldéhyde dans l'appartement P1 par pièce et par campagne

La distribution des valeurs de formaldéhyde par tranche de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans l'appartement P1 montre une augmentation générale des niveaux de formaldéhyde dans la chambre lors de la seconde campagne. Le questionnaire offre une hypothèse explicative, à savoir la réfection des peintures des deux chambres et du couloir durant l'été. La source d'émission serait donc continue, avec des valeurs plus élevées sur l'ensemble de la campagne même s'il y a peu de temps au-dessus de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Toutefois la faible proportion de données enregistrées par le NEMO sur la 2^{ème} campagne, à savoir seulement 30 % contre près de 90 % lors de la 1^{ère}, incite à la réserve sur les résultats observés. L'évolution des valeurs de CO_2 entre les deux campagnes, qui aurait permis d'identifier une éventuelle modification

dans les habitudes d'aération, n'a pas pu être réalisée puisque les valeurs mesurées par les NEMOs lors de la 1^{ère} campagne à Paris sont inexploitable.

5.2.3.4 Conclusion formaldéhyde

Les résultats en formaldéhyde ne sont pas les plus facilement exploitables car il s'agit de moyenne sur 2 heures, qui écrêtent donc les valeurs hautes alors que ce sont ces dernières qui sont les plus impactantes en terme de santé. De manière générale les résultats sont plutôt bons par rapport à ceux observés dans la campagne nationale logement – comparaison dont la limite réside dans la différence d'instrumentation entre les deux études. D'autre part il s'agit d'un paramètre mesuré exclusivement durant les campagnes de mesures hivernales et non sur l'année, il se peut donc que les résultats ne soient pas représentatifs du long terme, et qu'ils sous-estiment l'exposition puisque le formaldéhyde est majoritairement émis en été.

Le logement V6 ressort de manière préoccupante sur le formaldéhyde lors de la 1^{ère} campagne, problématique résorbée à la seconde. Le changement de pratique dans les habitudes ménagères pourrait expliquer cette évolution.

Les logements ayant fait l'objet de travaux présentent également des résultats plus élevés, mais cela semble naturellement se résoudre entre deux campagnes de mesure.

5.2.4 Composés Organiques Volatils

Pour mémoire, les NEMOs mesurent les COV_{légers} (entre 2 et 4 carbones). Les capteurs embarqués sur les cartes Aereco mesurent les COV_{totaux} sans que la documentation technique associée ne permette de déterminer avec certitude la gamme de mesure. Comme le montre la Figure 68, il n'y a pas de corrélation entre les NEMOs et les Aereco. Comme les niveaux de concentration sont également très différents, aucune inter-comparaison ne semble pouvoir être faite entre ces deux catégories d'appareil pour l'étude des COV. Outre les réponses des capteurs, cette observation pose question sur la pertinence de la mesure de COV légers pour qualifier la qualité de l'air intérieur, puisqu'elle ne semble pas corrélée à la mesure de COV totaux.

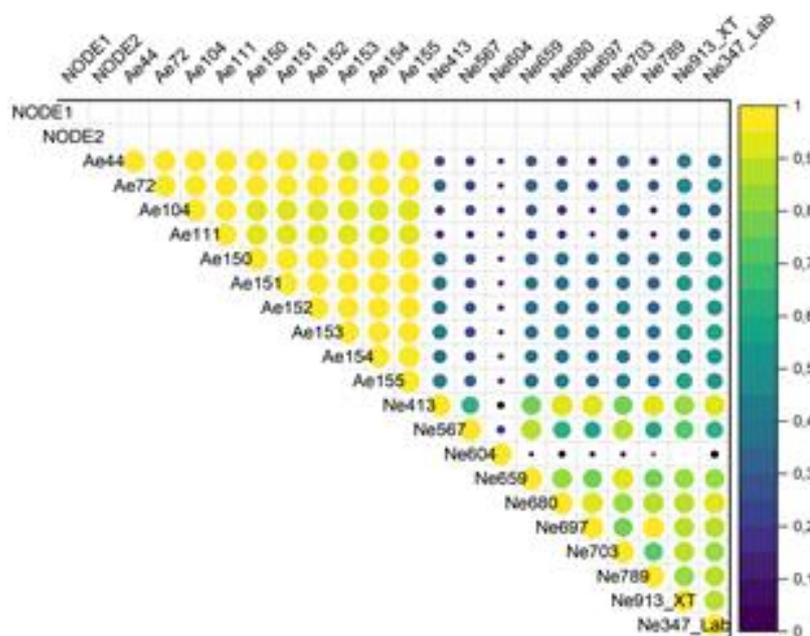


Figure 68 : Table de corrélation entre les capteurs de COV - Projet Performance 2 – Intercomparaison Tâche 2

Une intercomparaison a été réalisée in situ entre les données mesurées par les NEMOs lors des campagnes de mesures et celles issues des cartes Aereco durant les mêmes périodes, sur le site de Paris (seuls les appartements parisiens sont équipés de capteurs COV embarqués). Après un recalage temporel des courbes, nécessaire du fait du pas de temps de mesure distinct et de l'impact potentiel du placement des capteurs, nous avons calculé l'écart entre les deux types de capteurs pour les deux campagnes hivernales QAI (Figure 70) et les coefficients de corrélation entre les valeurs mesurées par ces capteurs (Tableau 21) pour chaque pièce instrumentée avec un NEMo. On obtient de manière inexplicable de très bon résultats, comme dans le P9 dans le séjour en campagne 1 ($R^2 = 0.94$) et dans la chambre en campagne 2 ($R^2 = 0.82$), et d'autres très mauvais, même au sein des même pièces ($R^2=0.33$ dans le séjour du P9 à la 2^{ème} campagne).

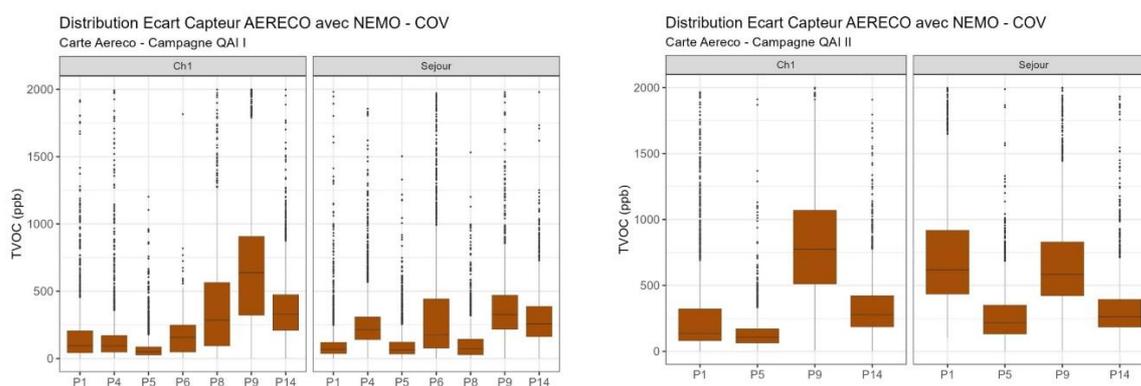


Figure 69 : Distribution des écarts entre les concentrations de COV mesurées par les capteurs Aereco et NEMOs sur la campagne hivernale QAI 1 (gauche) et 2 (droite)

Tableau 21 : Coefficient de corrélation entre les COV mesurés in situ par les NEMOs et par les cartes Aereco, après recalage temporel

Coefficients de corrélation COV légers (Némo) et COV totaux (Aereco)				
Appartement	Chambre		Séjour	
	C1	C2	C1	C2
P1	0.58	0.77	0.16	0.78
P4	0.29		0.61	
P5	0.55	0.71	0.82	0.26
P6	0.33		0.74	
P8	0.057		0.47	
P9	0.55	0.82	0.94	0.33
P14	0.8	0.69	0.53	0.7
Absence de données en C2				

Malgré cela, des dynamiques communes sur les courbes durant certaines périodes de campagnes de mesures sont visuellement bien établies, comme on peut le voir sur l'exemple du P1 présenté en Figure 70.

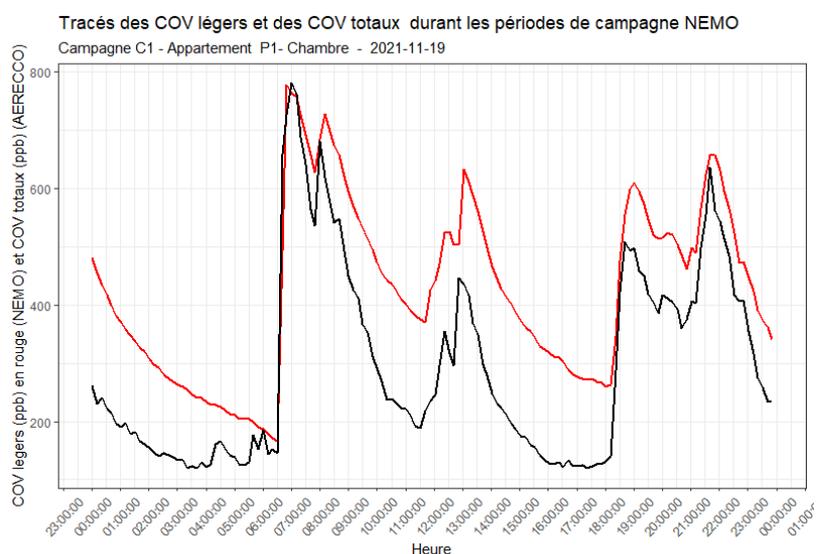


Figure 70 : Evolution des valeurs mesurées de COV légers (NEMOs) et COV totaux (Aereco) dans la chambre du P1 sur 24heures

5.2.4.1 Evolution temporelle sur les campagnes

Pour chaque pièce instrumentée lors des campagnes QAI, l'évolution des valeurs de COV mesurées en fonction du temps ont été tracées, en incluant les médianes, minimums et maximums quotidiens. Ces représentations sont disponibles pour chaque appartement en Annexe C. Elles permettent de visualiser le niveau de base, liés à l'équilibre entre émissions continues et renouvellement d'air par défaut, ainsi que des pics, associés aux comportements émissifs des usagers (ménage, désodorisant, tabac, etc.). Les Figure 71 et Figure 72 présentent un exemple pour l'appartement P1, respectivement sur l'année complète (capteurs Aereco), et sur les campagnes de mesures hivernales QAI (capteur NEMO).

La Figure 71 illustre l'extrême variabilité des concentrations d'une pièce à l'autre. Les plages de valeurs diffèrent, en particulier entre la chambre et les autres pièces, et les pics ne concordent que très peu dans le temps d'une pièce à l'autre. Dans la chambre, où les concentrations semblent assez stables avec potentiellement surtout du bruit de fond, l'élévation estivale des valeurs est assez visible, avec des concentrations presque deux fois

plus élevées de mai à septembre. Dans les autres pièces, les fluctuations sont d'avantage marquées tout au long de l'année. Elles couvrent une gamme de valeurs supérieure, ce qui pourrait illustrer la présence de sources ponctuelles supplémentaires. C'est particulièrement vrai dans les sanitaires, sur l'ensemble de l'année, ce qui pourrait être expliqué par l'utilisation de désodorisant. Une baisse semble par ailleurs s'amorcer dans le séjour, la cuisine, voire la salle de bain, sur le dernier quart de l'année, sans donnée explicative particulière.

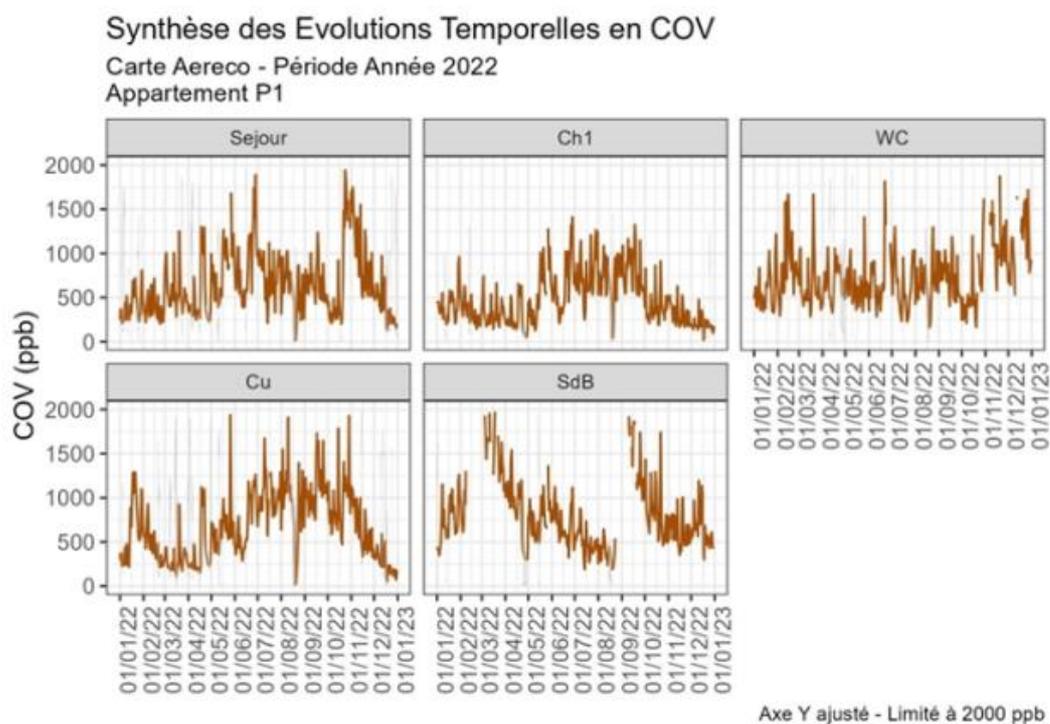


Figure 71 : Evolution temporelle des COV totaux (Aereco) pour chaque pièce - Appartement P1- Site de Paris

Pour ce même appartement P1, La Figure 72 présente les médianes, maximums et minimums à la journée, pour toute la durée des campagnes de mesure. À cette échelle de temps, on constate que les médianes varient peu, contrairement aux maximas. La modification de l'échelle entre les deux campagnes ne masque pas ce qui paraît une relative baisse lors de la seconde campagne.

Synthèse des Evolutions Temporelles en COV
Appareil NémO - Campagne de mesure 2022 (C1) et 2023 (C2)
Appartement P1

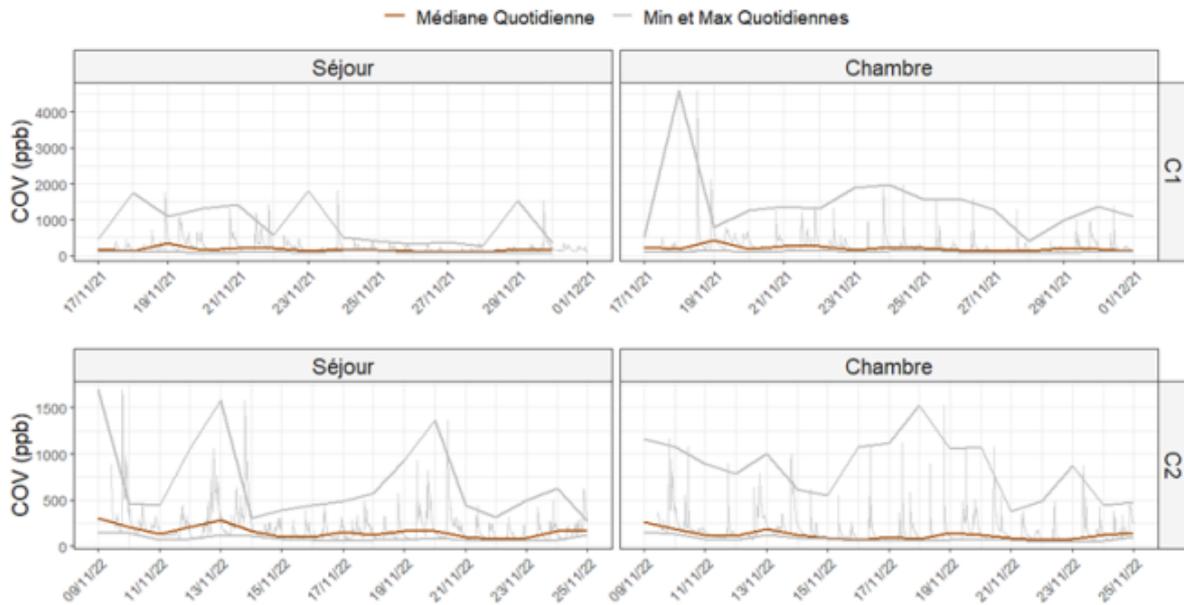


Figure 72 : Evolution temporelle des COV légers (NEMOs) par pièce et par campagne - Appartement P1- Site de Paris

5.2.4.2 Distribution des valeurs de COV mesurées

Comme indiqué précédemment, les capteurs embarqués Aereco, sur Paris, remontent des données de COV_{total} non seulement durant les périodes de campagnes de mesures, mais sur l'année complète. Il a donc été décidé de mettre en perspective les valeurs NEMOs, au regard de celles mesurées sur l'année complète et sur la saison de chauffe sous forme de boîte à moustache (Figure 73 et Figure 74).

Ces mesures n'étant pas directement comparables, comme cela a été vu auparavant, elles ne permettent pas de juger de la pertinence ou de la représentativité des campagnes de mesures. Elles apportent simplement une information complémentaire, et une comparaison entre pièces sans toutefois pouvoir se référer à un seuil qui permettrait de juger d'une pollution avérée.

D'autre part, pour la Figure 73 l'année considérée pour les capteurs Aereco reste 2022, seule année complète de recueil de données, alors que la campagne QAI 1 se déroule en 2021. Cela apporte une source de comparaison entre une campagne sur le temps court et un enregistrement sur le temps long même si la première n'est pas comprise dans la seconde ; sachant par ailleurs que nous ne sommes pas en capacité de qualifier la variation entre les années.

Comparaison Distribution Monitoring avec Campagne QAI I - COV Carte Aereco - Période Année 2022

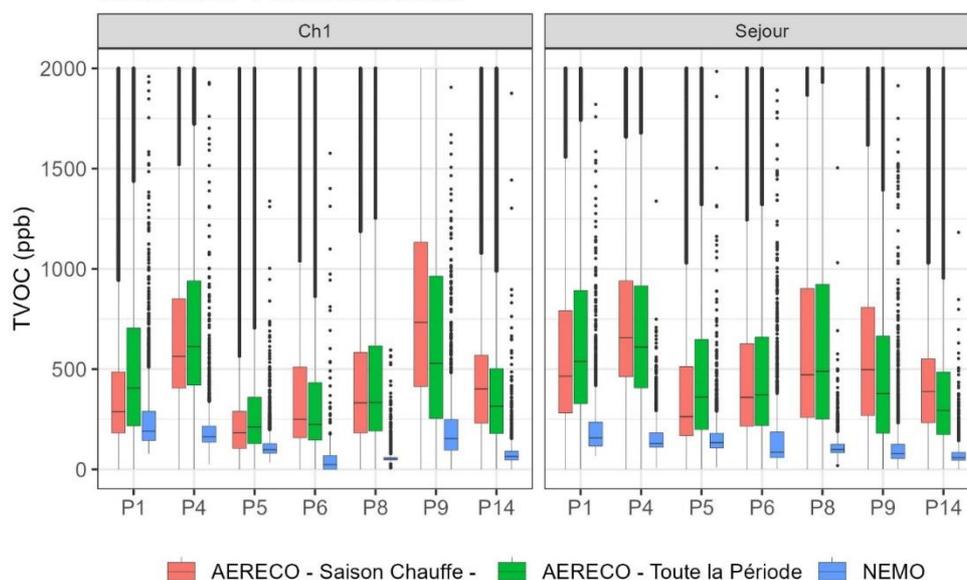


Figure 73 : Comparaison des $COV_{légers}$ NEMOs de la 1^{ère} campagne avec les COV_{totaux} Aereco sur l'année 2022 et sur la période de chauffe

Comparaison Distribution Monitoring avec Campagne QAI II - COV Carte Aereco - Période Année 2022

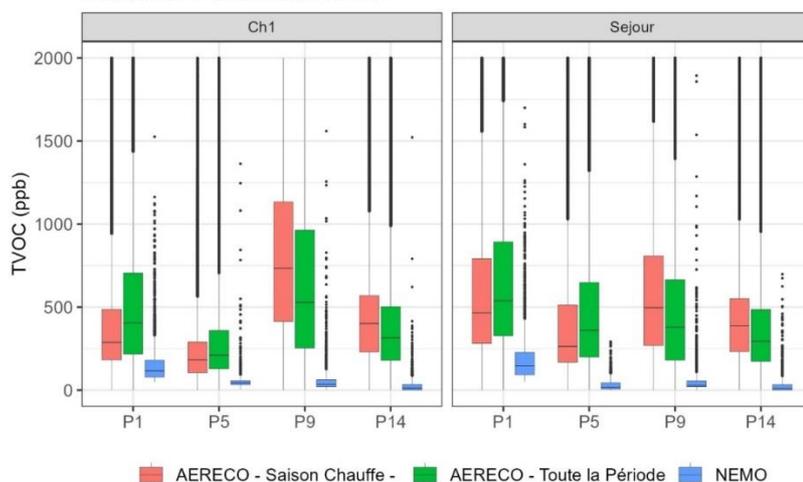


Figure 74 : Comparaison des $COV_{légers}$ NEMOs de la 2^{ème} campagne avec les COV_{totaux} Aereco sur l'année 2022 et sur la période de chauffe

Une première lecture de la Figure 73 permet de constater la relative homogénéité des concentrations en COV_{totaux} entre la saison de chauffe (en rose) et l'année complète (en vert), pour plus de deux tiers des cas. L'échelle de valeur peut paraître importante (de 0 à 2000 ppb) mais compte tenu de l'incertitude des mesures (aux alentours de 15%) et du fait que plusieurs molécules soient mesurées en même temps, les écarts en valeurs absolues sont à relativiser.

Une différence significative entre la période de chauffe et le reste de l'année se dessine dans l'appartement P1 voire le séjour du P5, où les valeurs de l'année dépassent celles de la saison de chauffe - comme on pourrait s'y attendre au vu de l'augmentation des capacités de relargages des matériaux avec la chaleur.

La tendance inverse est pourtant observable dans l'appartement P9, où les valeurs sont sensiblement supérieures en saison de chauffe. Deux facteurs pourraient expliquer ces résultats: la présence de sources d'émissions supplémentaires en période de chauffe, et/ou un déficit de renouvellement d'air durant cette période par rapport à la saison chaude. La problématique de confinement, identifiée notamment via l'indicateur du GS 14.5, tend à accréditer la thèse selon laquelle le déficit de renouvellement d'air marqué lors de la saison de chauffe serait, au moins en partie, incriminable dans les fortes concentrations de COV qui caractérisent cette période. La contribution relative d'émissions supplémentaires hivernales ne peut cependant être écartée avec certitude au vu des données dont nous disposons.

En termes de valeurs, la distribution des valeurs mesurées par les capteurs Aereco permettent d'identifier que les séjours sont globalement plus concernés par la pollution aux COV_{totaux} que les chambres. Cela n'apparaît pas évident à la lecture avec les distributions des valeurs issues des campagnes QAI (en bleu dans la Figure 73 et la Figure 74). La durée des mesures et l'augmentation du nombre de pièces concernées permettent de dégager des tendances difficilement perceptibles sur un échantillon plus restreint.

Les pièces les plus concernées, à la lecture de la Figure 73, sont les chambres P9 et P4 ainsi que les séjours de P1, P4, P8, voire P9 en saison de chauffe. Si ces pièces sont également identifiables à travers l'analyse NEMOs, la comparaison avec les données Aereco tend à indiquer qu'une plus grande plage de mesures modifie le classement des pièces les plus polluées.

La modification de la classification des pièces les plus polluées en fonction des molécules mesurées est notamment bien visible dans les chambres lors de la 2^{ème} campagne (Figure 74), où le NEMOs donne des valeurs inférieures dans le P9 par rapport au P3 alors que c'est très clairement l'inverse avec les cartes Aereco. Ceci représente un enseignement d'intérêt en métrologie de la QAI, au-delà de ce projet. En effet, dans le tertiaire et particulièrement dans les écoles soumises à la réglementation de surveillance QAI, le recours aux NEMOs est largement répandu, il importe de mettre ces résultats en perspective.

5.2.4.3 Comparaison aux valeurs seuils d'étude

Comme pour le formaldéhyde, une synthèse des données mesurées durant les campagnes QAI par les NEMOs est proposée sous forme de temps de dépassement d'un seuil, fixé ici à $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par pièce et par appartement, pour la campagne QAI 1 (Figure 75) puis la campagne QAI 2 (Figure 76). **Attention, en raison des fortes incertitudes de mesures, les résultats de cette analyse sont à considérer avec beaucoup de précautions.**

Campagne 1 - Pourcentage de temps où les COV sont > 300 µg.m3
(en rouge : Moyenne des COV (µg/m3) - en bleu : Temps passé > 300 µg.m3)

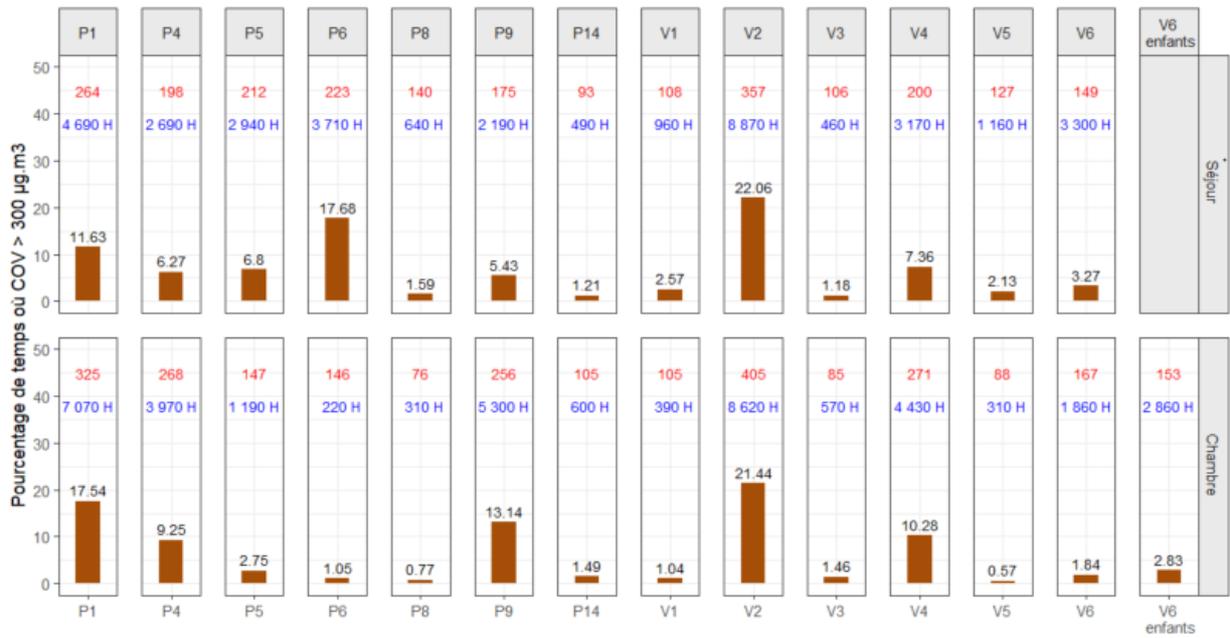


Figure 75 : Pourcentage de temps où les COV légers (NEMOs) dépassent le seuil de 300 µg/m³ par pièce et par appartement durant la 1^{ère} campagne QAI

Campagne 2 - Pourcentage de temps où les COV sont > 300 µg.m3
(en rouge : Moyenne des COV (µg/m3) - en bleu : Temps passé > 300 µg.m3)

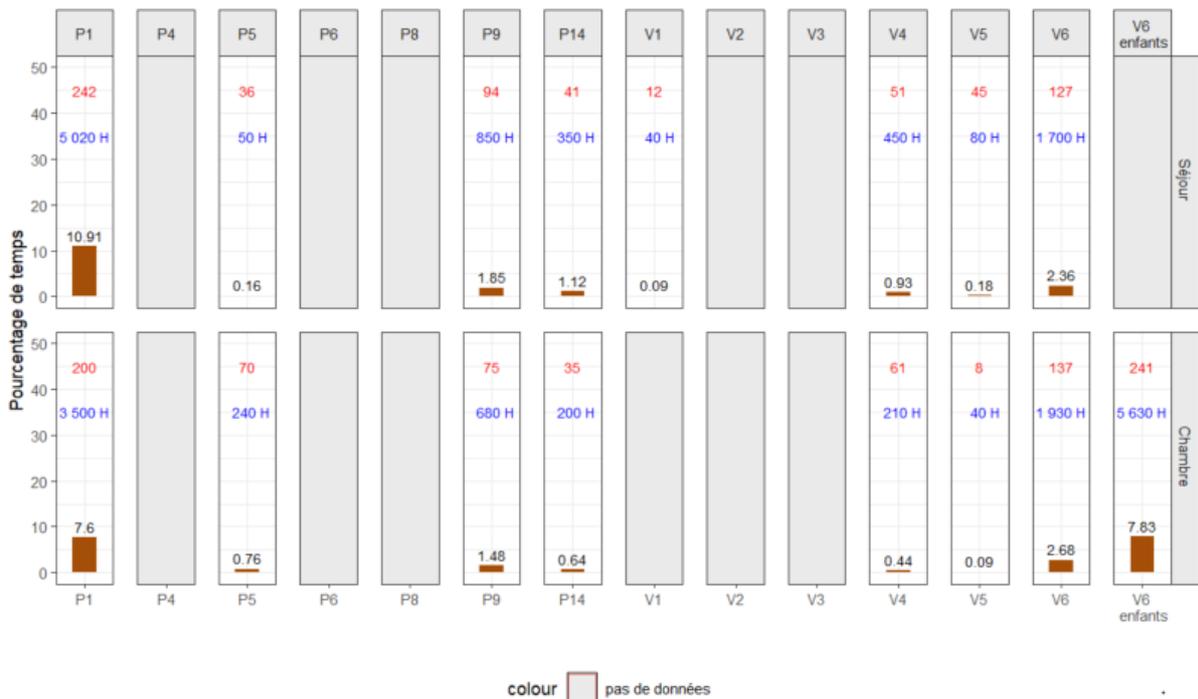


Figure 76 : Pourcentage de temps où les COV légers (NEMOs) dépassent le seuil de 300 µg/m³ par pièce et par appartement durant la 2^{ème} campagne QAI

Un premier élément marquant dans l'analyse de résultats est que les pièces qui ressortent avec les plus fortes valeurs ne sont pas nécessairement les mêmes pour les COV légers et le formaldéhyde.

Pour le formaldéhyde, c'étaient les appartements V4 et le V6 qui étaient les plus touchés alors qu'ils ne montrent pas de spécificité particulière avec les COV légers. En revanche l'appartement P1, identifié sur la problématique formaldéhyde lors de la campagne 2 (Figure 66), ressort également avec les COV légers. Cela se vérifie dans les deux campagnes, avec une prédominance lors de la première.

Concernant les COV_{légers}, les appartements qui s'illustrent par leurs valeurs élevées lors de la campagne 1 (Figure 75) sont le V2, toutes pièces confondues, suivi de séjour du P6, et de la chambre du P1. Ces pièces dépassent toutes 300 µg/m³ de COV_{légers} plus de 15 % du temps. Les séjours V2, chambre V2 et chambre P1 présentent même une moyenne des valeurs sur les deux semaines de la campagne 1 supérieure à ce seuil. D'après les questionnaires, le point commun entre ces appartements est l'utilisation de sprays désodorisants. Dans l'appartement V2, qui présente les plus forts dépassements, les occupants déclarent utiliser de nombreux produits de senteur (sprays désodorisant, encens, bougies parfumées, huiles essentielles, parfum, etc.).

On remarque enfin que le changement de pratiques ménagères décrit par l'occupante de l'appartement V6, qui s'est traduit par une baisse drastique des concentrations de formaldéhyde, semble à peine perceptible sur les COV_{légers}.

La synthèse des données issues des mesures par les capteurs Aereco est présentée sous forme de dépassement d'un seuil, ici celui correspondant à 30 % des valeurs les plus hautes, pour chaque pièce (Figure 77).

Valeur au-dessus de la quelle se trouvent 30% des valeurs de COV

Carte Aereco - Période Année 2022

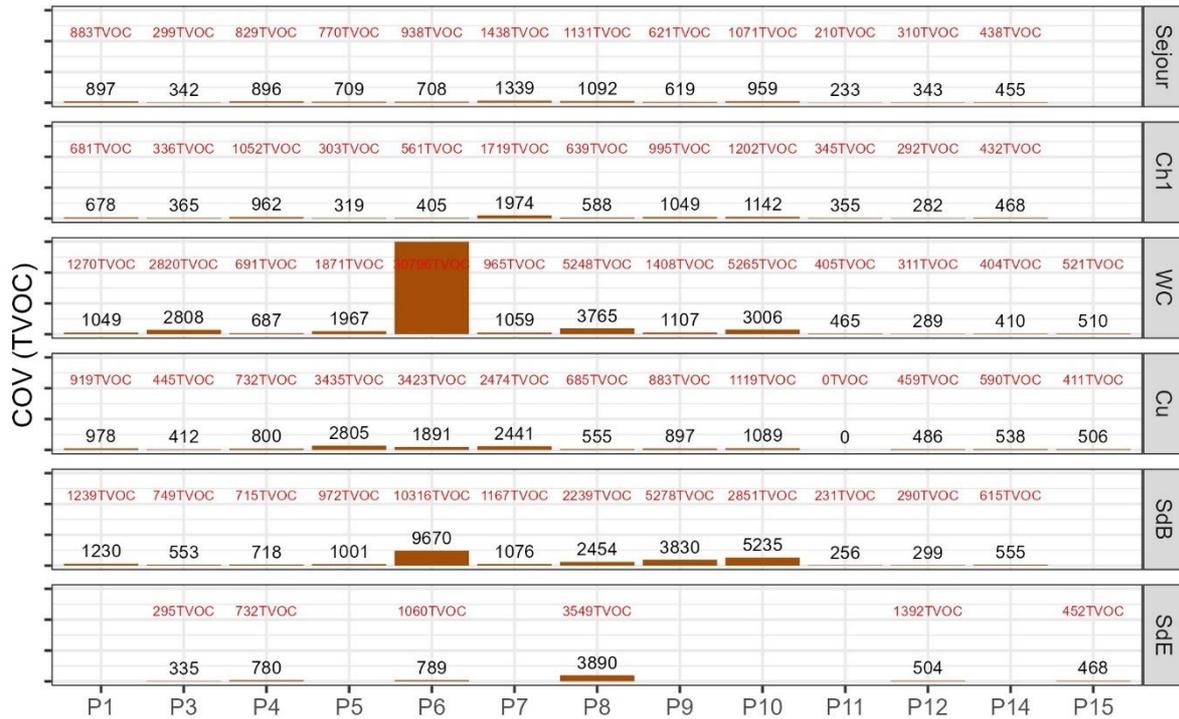


Figure 77 : Distribution des valeurs au-dessus de laquelle se trouvent 30% des valeurs de COV– Paris

Si les analyses précédentes se focalisaient sur la chambre principale et le séjour, pièce de vie où la durée d'exposition est la plus importante, la Figure 77 indique clairement que les pièces aux valeurs les plus élevées sont les sanitaires, salles de bain et salles d'eau. Il s'agit en effet des locaux au sein desquels l'usage de produits de senteur, notamment sous forme de spray, est le plus répandu.

L'appartement P6 fait l'objet de concentrations particulièrement élevées dans ses sanitaires (utilisation massive de désodorisant), et dans une moindre mesure, dans la salle de bain (utilisation de cosmétique). Cela ne se répercute pas dans les pièces de vie. Celles-ci présentent des valeurs relativement basses, malgré l'utilisation de bougies parfumées, ce qui peut être rapproché de la très bonne performance de la ventilation dans ce logement, qui ressort dans toutes les analyses réalisées sur le paramètre du CO₂ (chapitre 5.2.1). Au-delà des débits d'air, le sens de circulation engendré par la ventilation est particulièrement favorable dans le cas de polluant émis principalement dans les pièces humides.

On remarque *a contrario* que dans les logements où la ventilation dysfonctionne, même des émissions relativement faibles dans les pièces de services peuvent engendrer des concentrations relativement élevées dans les pièces de vie. C'est particulièrement visible dans l'appartement P7, ciblé lors de l'analyse du CO₂, dont les concentrations dans les pièces de services sont plutôt basses par rapport aux autres logements, mais qui présentent la valeur la plus haute dans les pièces de vie. Il serait abusif de conclure que seule la ventilation explique cette spécificité puisque l'absence de questionnaire ne permet pas de connaître les sources d'émission et usages des locataires ; néanmoins les résultats observés sont parfaitement cohérents avec une problématique de ventilation. Il

est à noter, par ailleurs, que les appartements les plus sujets aux valeurs hautes en CO₂ sont également ceux avec les résultats de COV les plus élevés dans les pièces de vie, plaidant en faveur de l'interaction étroite entre exposition aux COV et renouvellement d'air.

L'appartement P8 arrive en second au classement des valeurs dans le séjour, ce qui peut être rapproché de l'usage quotidien d'huiles essentielles et de bougies parfumées. Les sanitaires sont également concernés par des valeurs hautes, à mettre en relation avec le recours systématique d'eau de Cologne après leur utilisation.

5.2.4.4 Impact du dysfonctionnement du ventilateur sur les concentrations en COV – Paris

Comme cela a été précisé au chapitre 4.3.3, le système de ventilation à Paris est tombé en panne durant la période de monitoring (12 avril au 13 mai 2022). Au-delà de l'impact sur le CO₂, qui révèle le confinement des espaces clos sans directement préjuger de leur qualité sanitaire, la panne du système de ventilation a également des répercussions notoires sur les composés organiques volatils (Figure 78).

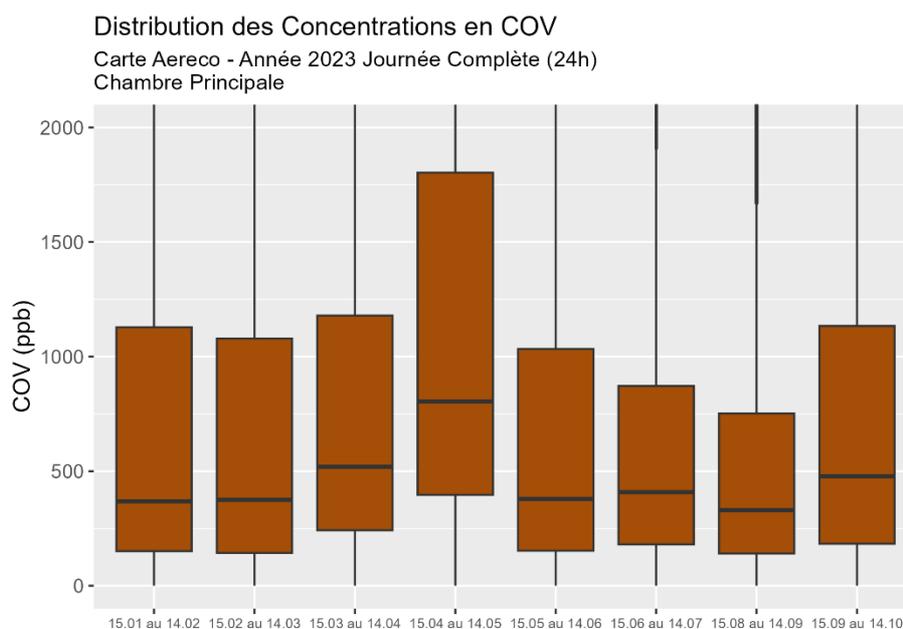


Figure 78 : Distribution des concentrations en COV par mois, incluant la période de panne de la ventilation pour tout appartement confondu

De manière à minima aussi évidente que pour le CO₂ (Figure 41), la Figure 78 illustre clairement l'impact d'un arrêt du système de ventilation sur les concentrations en COV totaux. Le mois concerné voit également la distribution des concentrations de COV quasiment doubler, les maximas s'envoler (25 % de valeurs au-dessus de 1750 ppb contre un Q3 situé aux alentours de 1200 ppb sur la saison de chauffe), et même la médiane augmenter significativement. S'il est complexe de traduire ces chiffres en impact sanitaire compte tenu des spécificités de mesures de COV totaux, le rôle de la ventilation dans la dilution de ces polluants est visuellement établi.

Ces résultats soulignent l'importance cruciale du bon fonctionnement de la ventilation sur le long terme pour maintenir un air intérieur de qualité.

5.2.4.5 Conclusions sur les COV

La pollution aux COV reste complexe à définir, et les résultats peuvent fortement varier selon les molécules étudiées. Cette étude ne permet pas d'établir de lien univoque et solide entre une pollution au formaldéhyde, aux COV légers (C2 à C4) et aux COV totaux. Cette limite peut en partie être imputée à la métrologie, qui différerait ici selon le ou les composés recherchés. Plusieurs enseignements peuvent néanmoins être tirés:

- Les pièces les plus concernées par des concentrations élevées en COV sont les pièces de service ;
- Les pièces de service sont par ailleurs celles où les émissions de COV sont les plus intenses à travers les produits de senteur sous forme de spray ;
- Au sein des pièces de vie, les séjours sont, en moyenne, plus pollués aux COV que les chambres ;
- Le changement de produit ménager a un impact direct en terme de baisse de concentration de formaldéhyde, qui est bien moins évident sur les COV légers (pour les COV totaux nous n'avons pas de mesure dans cet appartement) ;
- Il n'y a pas de différence significative et systématique entre les concentrations de COV en saison de chauffe et hors chauffe ;
- Une problématique de renouvellement d'air en période de chauffe, lorsqu'elle est cumulée à la présence de sources, se traduit par une augmentation de l'exposition aux COV même dans les pièces de vie ;
- L'interaction entre renouvellement d'air et COV se trouve confortée. Il semble, dans les cas étudiés ici, que même de fortes émissions soient diluées grâce à la ventilation sans générer de pollution dans les pièces de vies.

5.2.5 Les particules fines

Dans le cadre de Performance 2, les $PM_{2.5}$ sont mesurées en continu dans les pièces de vie (et les pièces humides pour le bâtiment de Paris). Elles sont mesurées en intérieur (2 pièces) et en extérieur durant les campagnes de mesures réalisées avec les NEMOs. Ces derniers mesurent également les PM_1 (mais les caractéristiques techniques de la mesure ne sont pas suffisamment connues pour en permettre l'exploitation - l'incertitude n'est notamment pas renseignée) et présentent une valeur extrapolée pour les PM_{10} . Pour le bâtiment de Paris, les $PM_{2.5}$ sont mesurées en extérieur en continue avec la station d'Aereco.

5.2.5.1 Evolutions temporelles

Pour chaque pièce instrumentée lors des campagnes QAI, l'évolution des valeurs de COV mesurées en fonction du temps ont été tracées, en incluant les médianes, minimums et maximums quotidiens. Ces représentations sont disponibles pour chaque appartement en Annexe C. En mettant les valeurs mesurées en intérieur au regard des données en extérieur, elles permettent de visualiser les dynamiques de ces deux milieux. La Figure 79 présente un exemple pour l'appartement P3 à Paris.

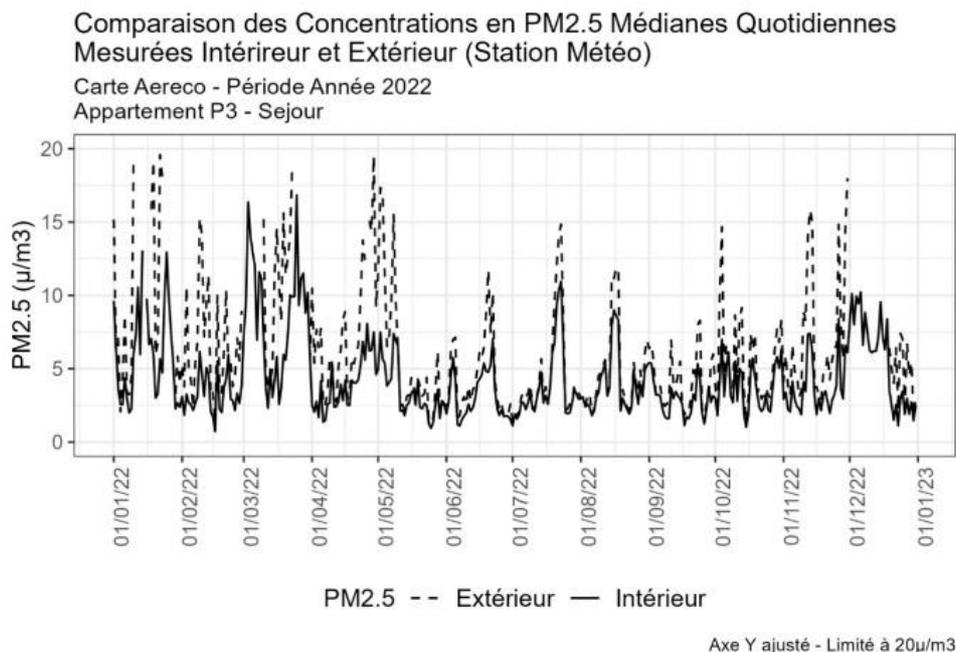


Figure 79 : Evolution temporelle des $PM_{2.5}$ dans le séjour de l'appartement P3 et en extérieur durant l'année 2022

La dynamique saisonnière de ce polluant est bien identifiable, avec des concentrations de $PM_{2.5}$ plus élevées sur les périodes froides. Certains pics entre intérieur et extérieur sont concomitants, mais ce n'est pas systématiquement le cas. La Figure 79 permet de constater que les concentrations sont globalement plus élevées en extérieur qu'en intérieur dans l'appartement P3. C'est d'ailleurs un phénomène remarqué sur l'ensemble des appartements, comme l'illustre plus tard la Figure 93.

5.2.5.2 Distribution des valeurs mesurées

Les distributions des valeurs mesurées sur l'ensemble de l'année sont mises au regard des valeurs OMS court terme ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et long terme ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). **Attention, en raison de l'incertitude importante des valeurs mesurées, les résultats de cette analyse doivent être considérés avec précaution.** La Figure 80 présente ces distributions, toujours pour l'exemple du P3 à Paris.

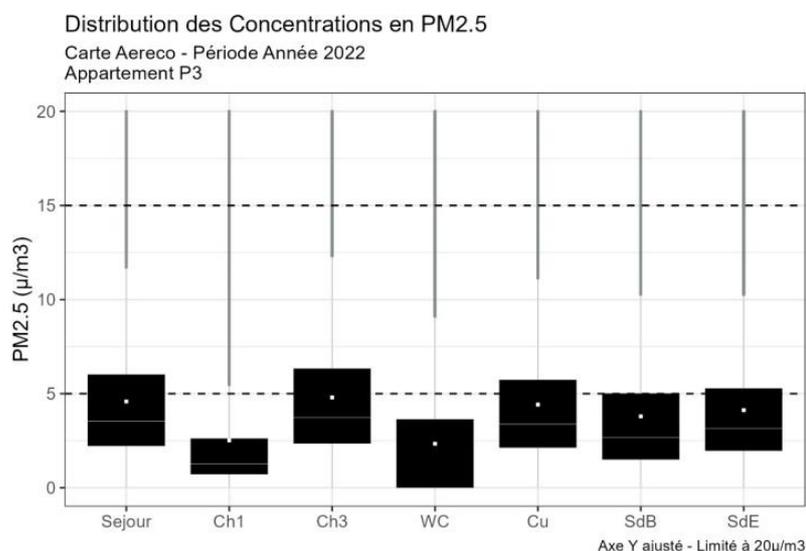


Figure 80 : Distribution des concentrations en $\text{PM}_{2.5}$ dans toutes les pièces de l'appartement P3 durant l'année 2022

Dans l'appartement P3, les concentrations les plus élevées de $\text{PM}_{2.5}$ se trouvent dans la chambre 3 puis dans le séjour. Les médianes sont toutes inférieures au seuil long terme proposé par l'OMS, mais dans ces deux pièces, les moyennes l'atteignent presque. Cela reste néanmoins un bon résultat par comparaison aux logements français si on se rapporte aux résultats de la CNL1 (paragraphe 2.3.4) – avec les précautions d'usage compte tenu de la différence de prélèvement.

Comme indiqué plus haut, les capteurs embarqués Aereco, sur Paris, remontent des données de $\text{PM}_{2.5}$ non seulement durant les périodes de campagnes de mesures, mais sur l'année complète. Il a donc été décidé de mettre en perspective les valeurs NEMOs, au regard de celles mesurées sur l'année complète et sur la saison de chauffe, pour la campagne QAI 1 (Figure 81) et 2 (Figure 82). Ici apparaît la cinétique saisonnière des $\text{PM}_{2.5}$ puisque, pour toutes les pièces et tous les appartements, les valeurs en saison de chauffe sont supérieures à celles de l'année complète. Cela se repère principalement dans les valeurs hautes (3^{ème} quartile) car les médianes restent relativement proches, ce qui montre que ce sont surtout les pics qui sont plus nombreux en hiver. Les appartements (P6 et P9) se démarquent dès cette première analyse, avec une distribution des valeurs globalement plus étendue sur l'intégralité de la boîte à moustache. Les minimas sont plus élevés, notamment dans le séjour en période hivernale, suggérant que la ventilation, même lorsqu'elle est très performante comme cela a déjà été relevé dans le P6 (cf analyse de CO_2 en 5.2.1), peine à revenir à des concentrations en $\text{PM}_{2.5}$ « normales ». L'écart entre les médianes été/hiver est également plus marqué dans les appartements fumeurs, suggérant le rôle de l'aération. C'est particulièrement visible dans l'appartement P9, dont la ventilation peine à renouveler l'air suffisamment en hiver comme l'a révélé (cf analyse de CO_2 en 5.2.1).

Par ailleurs on observe une relative homogénéité des distributions de concentrations de $PM_{2.5}$ entre appartements non-fumeurs dans les pièces de vie. Les NEMOs semblent accentuer les tendances visibles sur l'année – au point de vigilance près que l'année considérée est 2022 alors que la campagne 1 se déroule en 2021. Sur l'année 2022, qui correspond à la seconde campagne (Figure 82), les valeurs NEMOs semblent plutôt surestimer les valeurs – que l'on peut confronter à celles durant la saison de chauffe. Ici également on constate une relative homogénéité des valeurs de $PM_{2.5}$ inter et intra appartement, à l'exception du logement fumeur.

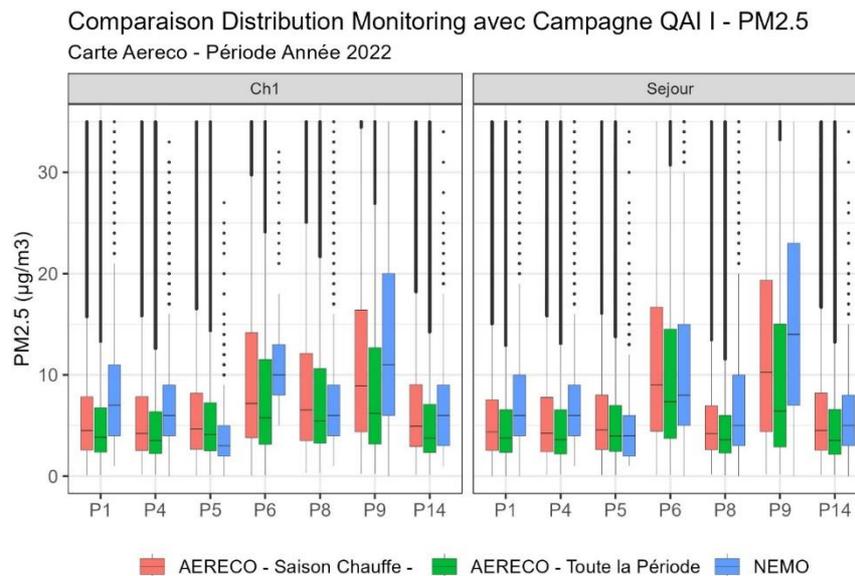


Figure 81 : Comparaison des $PM_{2.5}$ NEMOs de la 1^{ère} campagne avec les données Aereco sur l'année 2022 et sur la période de chauffe

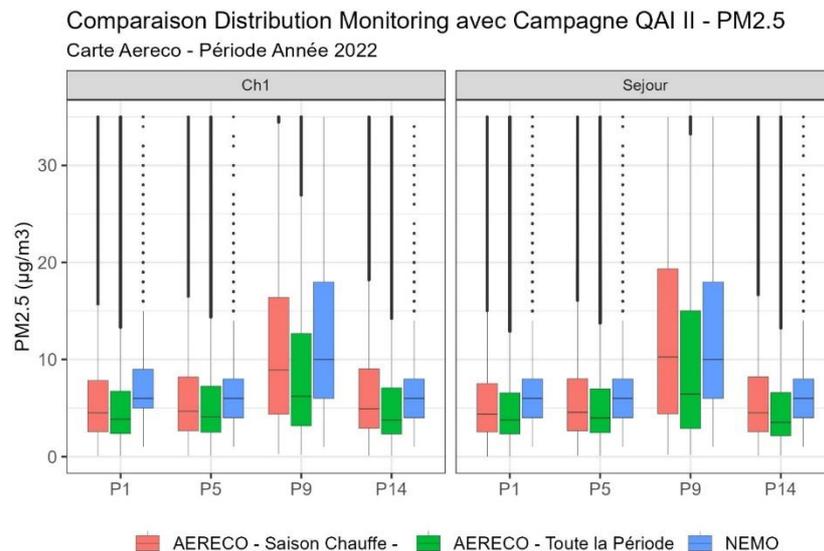


Figure 82 : Comparaison des $PM_{2.5}$ NEMOs de la 2^{ème} campagne avec les données Aereco sur l'année 2022 et sur la période de chauffe

5.2.5.3 Analyse du temps passés au-dessus des valeurs seuil

Attention, en raison de l'incertitude importante des valeurs mesurées, les résultats de cette analyse doivent être considérés avec précaution.

- Valeurs mesurées par les capteurs embarqués Aereco - 2022

Un premier niveau d'information réside dans l'évaluation du temps passé au-delà de la valeur de long terme préconisée par l'OMS. Il est calculé sur l'année entière (2022) à Paris grâce aux capteurs embarqués d'Aereco (Figure 83). Sont également indiqués, en bleu, le nombre d'heures auquel le pourcentage de temps correspond, et en rouge, la valeur moyenne des PM_{2.5}.

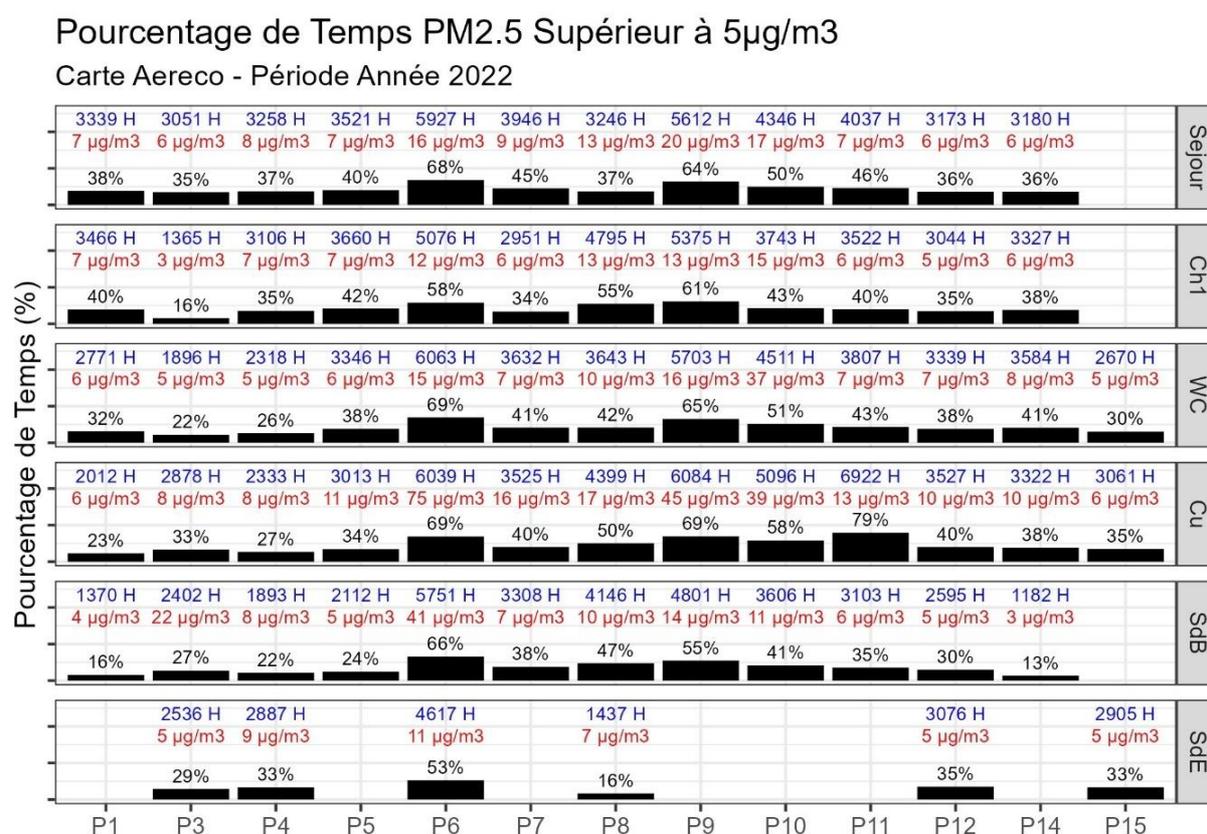


Figure 83 : Pourcentage de temps de dépassement de la valeur de 5 µg/m³ de PM_{2.5} pour chaque pièce des appartements de Paris en 2022

La valeur de 5 µg/m³ a un sens sur le plan sanitaire en termes de moyenne annuelle. Les dépassements ponctuels en cours d'année sont donc « normaux », en tous cas ils ne sont pas alarmants. De fait, la plupart des appartements la dépassent régulièrement. Même en considérant l'appartement le plus vertueux vis-à-vis de ce polluant, à savoir le P2 avec une moyenne de 3 µg/m³ dans la chambre, il reste en dépassement 16 % du temps de la valeur de 5 µg/m³. La valeur qu'il importe de ne pas dépasser est celle de 15 µg/m³, sur un pas de temps d'une heure, qui peut induire des problématiques de santé sur le court terme. Le pourcentage de temps au-delà de cette valeur est présenté sur l'année 2022 à Paris en Figure 84.

Valeur Moyenne Glissante sur 1h de la Concentration Intérieure en PM2.5
Carte Aereco - Période Année 2022

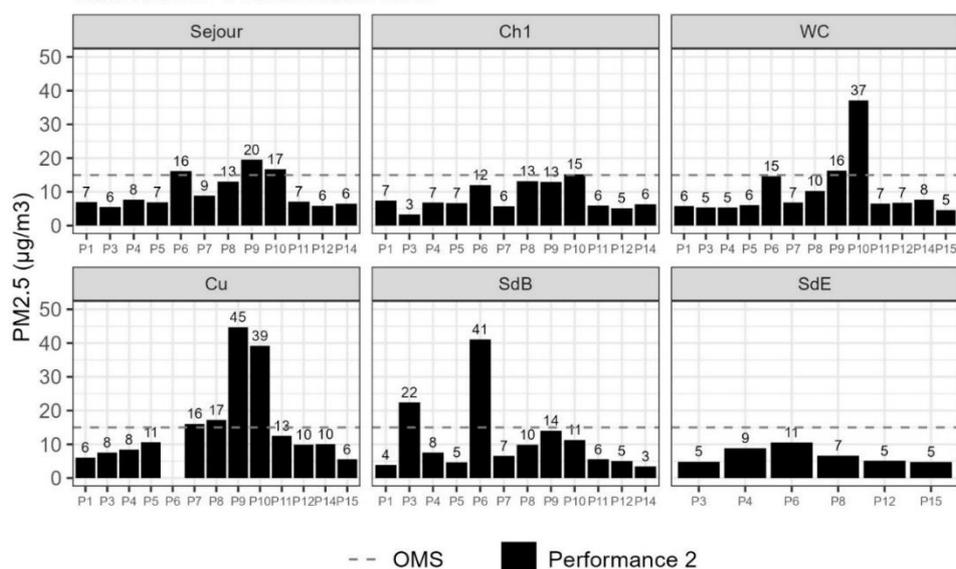


Figure 85 : Moyenne glissante sur 1 heure de la concentration en PM_{2.5} par pièce dans chaque appartement de Paris durant l'année 2022

Pour les non-fumeurs et non-utilisateurs intensifs de bougies parfumées ou d'encens, la moyenne de la concentration en PM_{2.5} sur 1 heure glissante s'établi plutôt entre 5 et 7 µg/m³, soit assez proche de la valeur de long terme. Un focus est réalisé sur la période nocturne, donc avec occupation quasi-certaine dans la chambre afin d'enrichir l'analyse (Figure 86).

Valeur Moyenne Concentration en PM2.5 Intérieure
Carte Aereco - Période Année 2022 la nuit (0h et 6h)

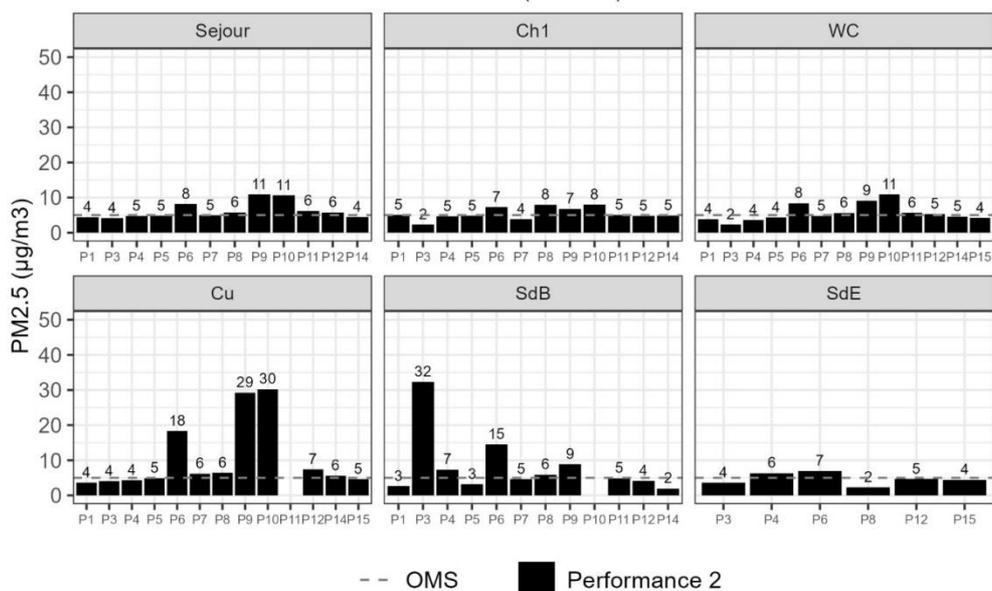


Figure 86 : Moyenne des concentrations en PM_{2.5} par pièce dans chaque appartement de Paris la nuit sur l'année 2022

La Figure 86 permet d'établir que la valeur préconisée au long court par l'OMS est respectée dans toutes les chambres hors fumeur (P6, P9, probablement P10) et utilisateur intensif de produits de senteurs combustible (P8). Pour ces derniers, elle est dépassée de relativement peu (2 à 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) mais cela ne peut être considéré comme anecdotique compte tenu des modes d'actions d'un polluant cancérigène.

Les valeurs pour les autres pièces, bien que parfois surprenantes (comme celle de la salle de bain du P3 qui est plus élevée la nuit que le jour) présentent en théorie peu de répercussion sur la santé puisqu'elles sont supposées être plus ou moins inoccupées durant la période nocturne.

- NEMos - pour chaque campagne de mesures

Le temps passé au-dessus de différents seuils est évalué sur les différents appartements ayant participé aux campagnes de mesures dans le cadre de ce projet. La moyenne des $\text{PM}_{2.5}$ exprimée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est en rouge, le nombre d'heures de dépassements sur la campagne est inscrit en bleu, en grisé, l'absence de donnée (Figure 87 à Figure 92).

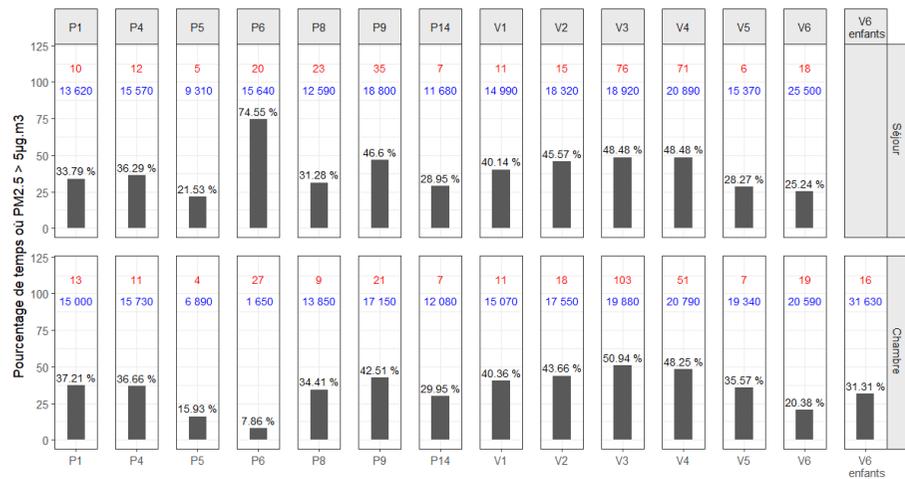
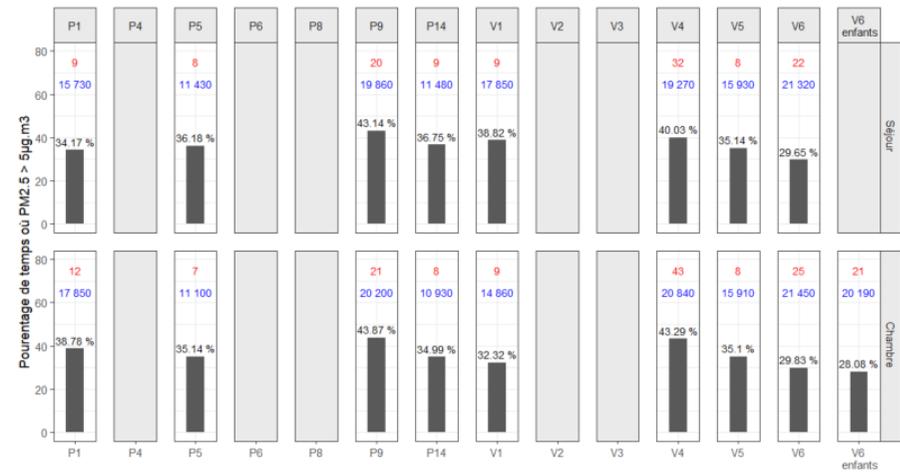


Figure 87 : Pourcentage de temps où les PM_{2,5} dépassent 5 µg/m³ dans la campagne 1



couleur pas de données

Figure 88 : Pourcentage de temps où les PM_{2,5} dépassent 5 µg/m³ dans la campagne 2

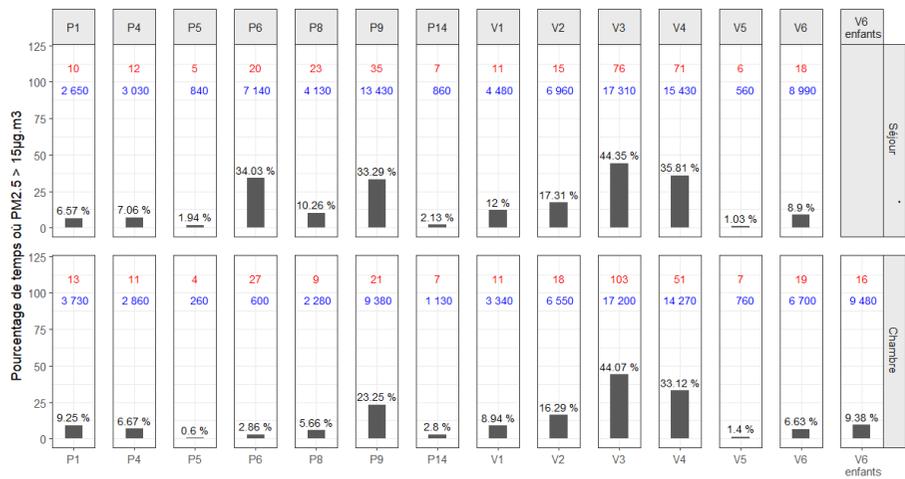


Figure 89 : Pourcentage de temps où les PM_{2,5} dépassent 15 µg/m³ dans la campagne 1

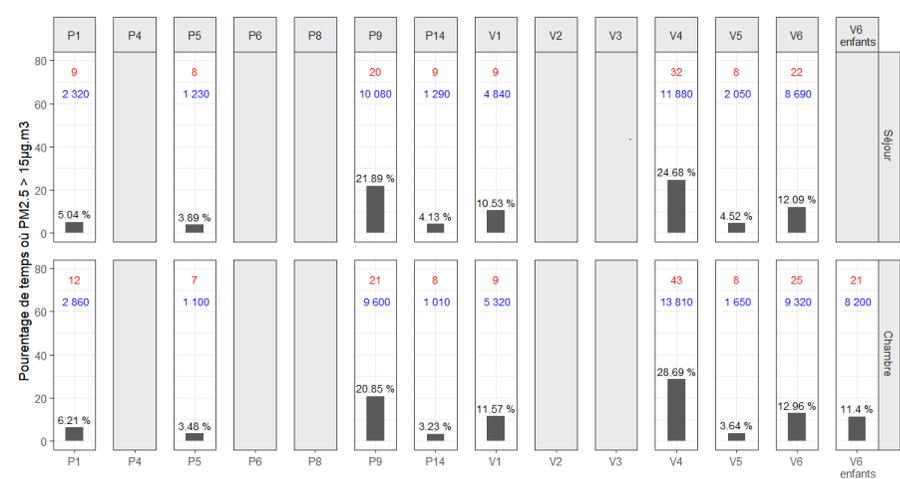


Figure 90 : Pourcentage de temps où les PM_{2,5} dépassent 15 µg/m³ dans la campagne 2

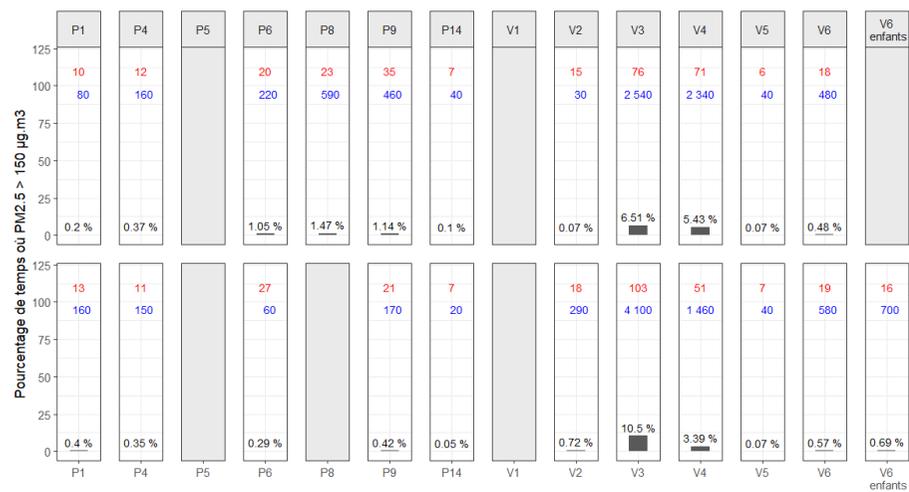


Figure 91 : Pourcentage de temps où les $PM_{2,5}$ dépassent $150 \mu g/m^3$ dans la campagne 1

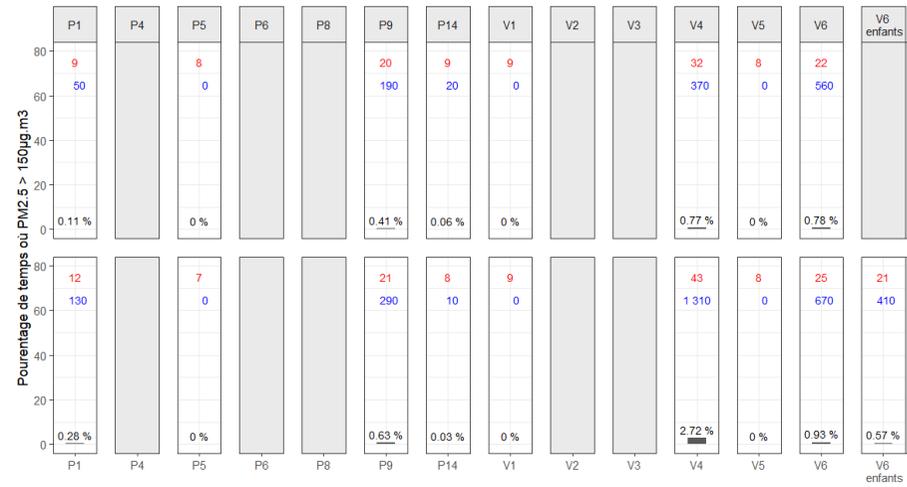


Figure 92 : Pourcentage de temps où les $PM_{2,5}$ dépassent $150 \mu g/m^3$ dans la campagne 2

La rehausse successive des valeurs considérées sur ces figures illustre parfaitement l'effet de seuil.

Comme cela a déjà été identifié sur l'année complète dans les appartements parisiens (Figure 83), à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la quasi-totalité des pièces enregistre des dépassements importants (Figure 87 et Figure 88), ce qui ne permet pas de cibler les locaux à enjeu. Plus que le temps de dépassement, c'est la moyenne annuelle qui permet de qualifier le risque chronique, et elle est difficilement qualifiable sur une durée de mesure de deux semaines.

Le facteur « temps » cumulé de dépassement vis-à-vis de la valeur court terme, de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a davantage de sens puisqu'il qualifie un risque aigu. Les Figure 89 et Figure 90 font une fois de plus émerger les appartements occupés par les fumeurs (V3, V4, P6 et P9 - le P10 n'a pas souhaité intégrer les campagnes QAI). Ils dépassent cette valeur plus d'un tiers du temps lors de la campagne 1 (Figure 89). Parmi ces 4 foyers, 2 n'ont pas souhaité participer à la deuxième campagne QAI, mais ceux qui ont intégré cette deuxième campagne, les V4 et P9, ressortent toujours à la seconde (Figure 90). Les amateurs de bougies parfumées sont également visibles dans une moindre mesure (P8, V2). On identifie clairement une augmentation des valeurs de $\text{PM}_{2.5}$ dans le V6. Une piste d'explication peut être extraite du questionnaire, avec l'utilisation d'encens qui n'était pas mentionnée lors de la 1^{ère} campagne.

Le seuil de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ issu de la campagne nationale logement dans l'habitat des fumeurs (Figure 91 et Figure 92) étant particulièrement élevé, seuls les plus gros consommateurs de tabac apparaissent.

5.2.5.4 Comparaison intérieur extérieur

Enfin, les $\text{PM}_{2.5}$ étant plutôt un polluant émis en extérieur, il a été décidé de caractériser le temps où les concentrations en intérieur sont inférieures à celles de l'extérieur (Figure 93).

A l'exception des appartements fumeurs P6 et P9, les concentrations en $\text{PM}_{2.5}$ sont inférieures dans les pièces de vie par rapport à l'extérieur 80 % à 97 % du temps. C'est globalement le cas dans les pièces de service aussi, mais avec d'avantage de variations entre appartement.

Pourcentage de Temps Concentration en PM_{2.5} Intérieure Inférieure à l'Extérieure (Station Météo)

Carte Aereco - Période Année 2022

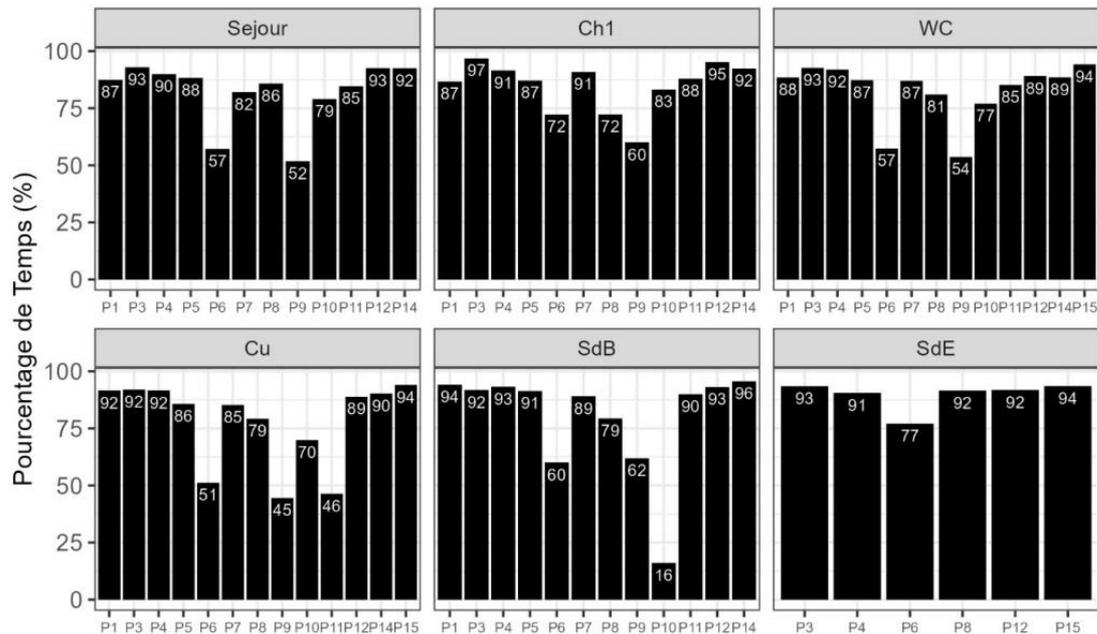


Figure 93 : Pourcentage de temps où la concentration intérieure en PM_{2.5} est inférieure à celle en extérieure pour chaque pièce des appartements instrumentés à Paris sur l'année 2022

5.2.5.5 Conclusion sur les PM_{2.5}

Les mesures réalisées dans le cadre de Performance 2 permettent de constater :

- Les résultats en termes de PM_{2.5} sont plutôt encourageants dans les appartements instrumentés, meilleurs que ceux de la CNL : ils s'établissent aux alentours de la valeur guide de long terme préconisée par l'OMS en moyenne annuelle ;
- Les taux de particules intérieurs sont globalement inférieurs aux taux extérieurs quasi-systématiquement dans les logements ;
- Les conclusions précédentes ne s'appliquent pas aux logements fumeurs, le tabagisme en intérieur étant le principal pourvoyeur de PM dans l'air intérieur ;
- Les concentrations de PM_{2.5} dans les logements fumeurs dépassent de manière récurrente la valeur guide court terme, et ce, quelle que soit l'efficacité du système de ventilation ;
- Dans une moindre mesure, l'utilisation de bougies parfumées ou d'encens augmente significativement les taux de P PM_{2.5} en intérieur.
- Les performances ou contre-performances identifiées sur le système de ventilation en place (simple flux) ne se répercutent pas de manière linéaire sur les concentrations en PM_{2.5} intérieures comme cela peut être le cas sur les COV. Dans le cas des PM_{2.5}, ce qui reste prédominant est la présence ou non de sources intérieures majeures (comme le tabac).

5.2.6 Pistes explicatives d'interaction entre les polluants et l'occupation

Suite aux premières conclusions tirées par polluant et par appartement dans les paragraphes précédents, il a été décidé de mener des analyses statistiques multi variées sur l'ensemble des campagnes afin de voir si ces conclusions restaient du cas par cas ou si des enseignements plus généraux pouvaient être tirés – avec toutes les réserves de rigueur. Celles-ci tiennent notamment à la taille de l'échantillon considéré, et à la qualité des mesures (déjà discutée précédemment – cf chapitre 2).

L'Analyse en Composante Principale (ACP) permet justement d'analyser un grand jeu de données avec des multiples variables. Cette dernière définit un nombre limité d'axes qui concatènent la majeure partie de l'information sur la variabilité des données. Ces axes sont à interpréter au regard des paramètres qui les caractérisent, c'est-à-dire ceux dont le vecteur est le plus proche de l'axe considéré (angle entre le vecteur du paramètre et l'axe le plus petit possible), et dont la longueur est la plus proche de 1.

Afin de ne pas noyer l'information avec des cas d'usage trop différents, il a été décidé de séparer les logements fumeurs et non-fumeurs. Ce critère apparaît en effet déterminant sur les concentrations en particules fines, et assez facilement objectivable, contrairement à l'utilisation de produits émetteurs de COV, qui recouvrent des catégories bien plus nombreuses.

5.2.6.1 Logements non-fumeurs

Dans les logements non-fumeurs des deux sites, toutes campagnes de mesure NEMos confondues, l'Analyse en Composante Principale (ACP) sur les médianes des différents paramètres aboutit aux deux premiers axes suivants (Figure 94) :

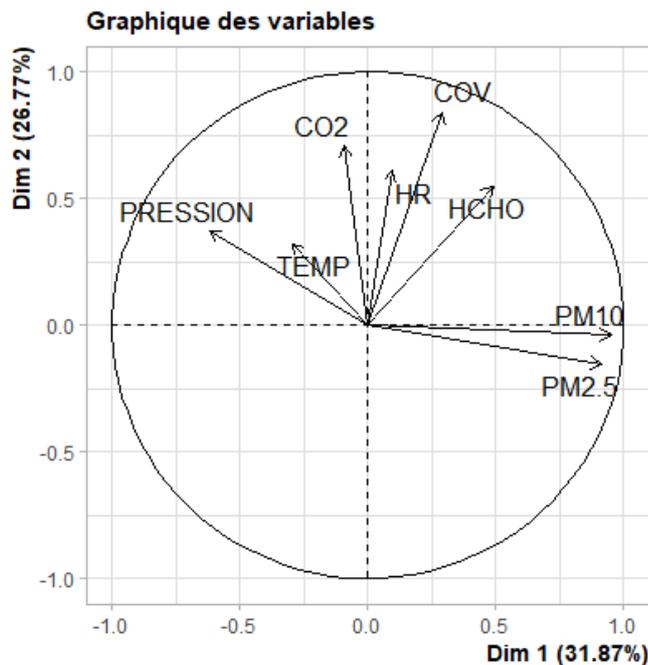


Figure 94 : ACP sur les données NEMos issues des campagnes 1 et 2 dans les logements non-fumeurs, axes 1 et 2

- Le premier axe, celui des abscisses sur la Figure 94, explique plus de 30 % de la dispersion des valeurs mesurées sur l'ensemble des campagnes QAI. Il est très largement constitué par le paramètre «PM » (particules fines). En effet, les vecteurs correspondant à ces dernières sont très proches de l'abscisse, et leur projection sur cet axe arrive presque à 1. Elles varient globalement en sens opposé par rapport à la température puisque cette dernière (nommée « temp » sur le graphe), voit sa projection sur l'axe des abscisses donner une valeur négative, aux alentours de -0,3. La valeur absolue étant relativement faible, le paramètre température contribue assez peu à l'élaboration du 1^{er}axe. Il demeure néanmoins intéressant de noter la transcription de la variabilité saisonnière dans les émissions et donc dans les concentrations de PM_{2,5} au sein des résultats de l'ACP.
- Le second axe, celui des ordonnées, explique quant à lui plus de 25 % de la variabilité des données. Il est principalement constitué par le CO₂ et les COV, ainsi que l'humidité relative et le formaldéhyde (nommé « HCOH ») dans une moindre mesure. La projection de chacun de ces paramètres sur l'axe 2 donne une valeur supérieure à 0,5. Elles sont toutes positives, ce qui signifie qu'elles évoluent dans le même sens. Concrètement, cela signifie par exemple que si le CO₂ augmente, les COV augmenteront aussi. Au vu des paramètres qui constituent cet axe, il pourrait correspondre à la notion de confinement vs renouvellement d'air.

A noter également que plus deux paramètres sont proches sur la figure, plus ils sont corrélés. On remarquera ici (Figure 94), comme dans les logements fumeurs (Figure 96), la proximité des COV et du formaldéhyde, plutôt rassurante aussi en termes de traduction statistique d'une réalité chimique. A l'opposé, un angle droit entre les vecteurs de deux paramètres traduit leur indépendance. Ici, cela semble être le cas entre les PM_{2,5} et les COV par exemple, ou encore entre le CO₂ et les PM₁₀. Cela tendrait à indiquer que, dans les logements non-fumeurs, la pollution intérieure aux sources chimiques, comme le renouvellement d'air à l'intérieur, sont relativement indépendant du taux de particules qu'on y retrouve, conclusion qui semblait déjà ressortir des analyses dans le chapitre consacré aux PM.

L'ensemble de ces deux axes explique près de 60 % de la variabilité des jeux de données. Pour gagner en précision, il est nécessaire de considérer les axes suivants, à savoir les 3^e et 4^e dimensions (Figure 95).

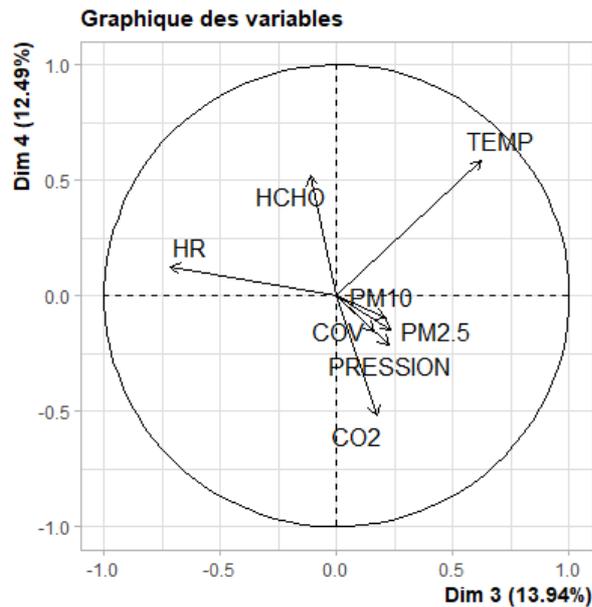


Figure 95 : ACP sur les données NEMos issues des campagnes 1 et 2 dans les logements non-fumeurs, axes 3 et 4

La 3^e dimension, qui explique près de 15 % de la variance, est principalement constituée des paramètres de confort que sont la température et l'hygrométrie, lesquelles varient en sens opposé, comme cela est couramment admis sur le diagramme de confort.

L'ensemble de ces trois premiers axes explique plus de 70 % de la variance du jeu de données. Le 4^e axe est constitué par l'humidité qui évolue de manière opposée à la température, comme l'indique le diagramme de confort, et explique 12.5% de la variance.

5.2.6.2 Logements fumeurs

Sur l'ensemble des logements instrumentés, 4 seulement sont fumeurs, dont 2 n'ont fait qu'une seule des deux campagnes QAI. Contrairement à l'analyse pour les appartements non-fumeurs, il a donc été décidé de conserver toutes les données afin de conserver un maximum de la variabilité (Figure 96).

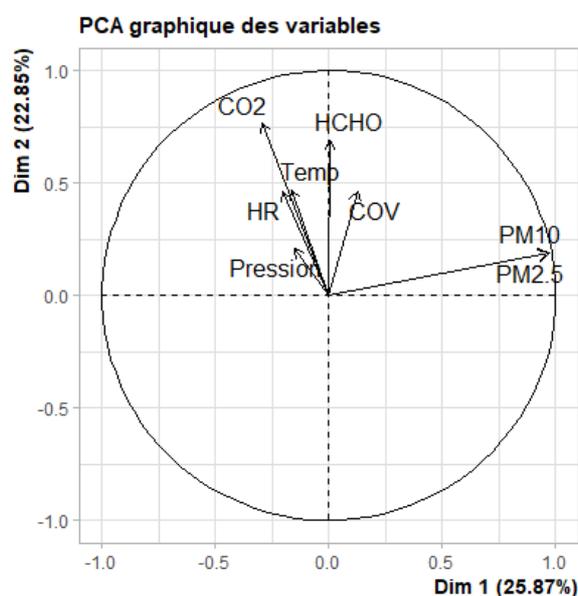


Figure 96 : ACP sur les données NEMos issues des campagnes 1 et 2 dans les logements fumeurs, axes 1 et 2

Le premier axe, celui des abscisses sur la Figure 96, est une fois encore largement constitué par le paramètre PM_{2.5}. Il explique un peu moins de la dispersion des valeurs que dans le cas des non-fumeurs, 25 % contre un peu plus de 30 %. Cela peut s'expliquer par le fait que les appartements fumeurs ont globalement toujours des résultats de PM_{2.5} élevés, alors qu'ils descendent davantage dans les logements non-fumeurs. Ici aussi, le paramètre CO₂ est indépendant des PM_{2.5}. Bien que celles-ci soient émises durant l'occupation du fait du tabagisme, les valeurs sont tellement élevées qu'elles restent globalement hautes même lorsque les occupants sortent et que le CO₂ diminue. D'autre part, durant le sommeil, les valeurs de CO₂ peuvent monter sans que les personnes ne fument. Le CO₂ en tant qu'indicateur de présence n'est donc pas corrélé aux PM_{2.5}. En tant qu'indicateur de confinement, il ne l'est pas non plus car les taux de PM_{2.5} émis par le tabagisme sont trop élevés pour être éliminés par la ventilation. Autre différence avec les logements non-fumeurs, le vecteur température forme lui aussi un angle droit avec celui des PM_{2.5}, indiquant une indépendance entre ces paramètres. La variabilité saisonnière des émissions en extérieur, importante chez les non-fumeurs, est ici masquée par la source majeure que représente le tabac.

Le second axe, celui des ordonnées, explique presque autant de part de variance que le 1^{er} (avec plus de 22 % contre 25 %). Il est principalement constitué par le CO₂ et le formaldéhyde (nommé « HCOH »), ce qui pourrait une fois encore le rapprocher d'un axe « confinement ». Les COV, ainsi que l'humidité relative et la température y contribuent dans une moindre mesure (projections inférieures à 0,5). Toutes ces variables évoluent cependant dans le même sens puisqu'elles sont toutes positives.

L'ensemble de ces deux axes explique un peu moins de 50 % de la variabilité des jeux de données. Pour gagner en précision, il est nécessaire de considérer les axes suivants, à savoir les 3^e et 4^e dimensions (Figure 97).

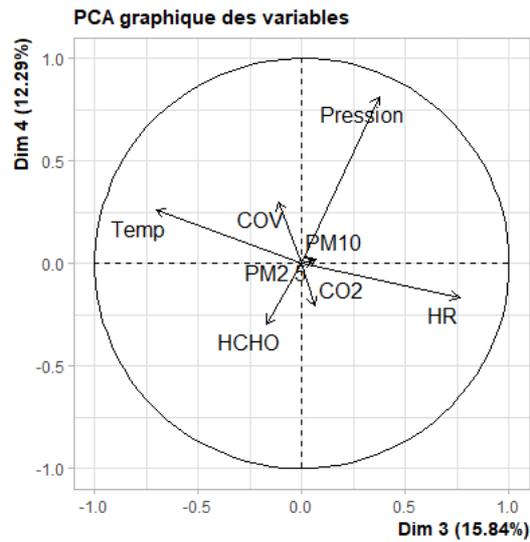


Figure 97 : ACP sur les données NEMos issues des campagnes 1 et 2 dans les logements fumeurs, axes 3 et 4

Le 3^e axe explique 15 % supplémentaires de variance du jeu de données, pour atteindre un total d'un peu moins des deux tiers. Il est principalement composé une fois encore du binôme température/humidité, qui varie en sens contraire.

Le 4^e axe, dont l'ajout est nécessaire pour approcher de trois quarts de la variance est principalement lié à la pression.

6 ANALYSE APPROFONDIE DES SITUATIONS PARTICULIERES

Dans ce chapitre, nous analysons en détail les situations pour lesquelles nous avons pu observer des concentrations pour un paramètre donné supérieures à une valeur de référence étudiée, ou significativement supérieures à ce qui est observé dans les autres logements. Nous étudions alors à la fois le fonctionnement du système de ventilation, les déclarations des occupants (issues des carnets de bord et des interviews lorsqu'une campagne QAI a été réalisée dans ce logement) et les diagnostics réalisés en début de projet. L'intégralité des analyses sont présentées dans les fiches appartements disponibles en annexe de ce rapport, et ont servi de support pour les analyses présentées dans ce chapitre.

6.1 Site de Paris

6.1.1 Identification des appartements présentant des débits totaux extrêmes

Le fonctionnement théorique d'un système de ventilation hygroréglable repose sur une production d'humidité dans le logement variable (cuisine, hygiène, métabolique, etc.), entraînant un débit d'extraction au niveau du logement variable et en moyenne sur la période de chauffe supérieur à celui d'un système autoréglable. Dans Performance 2 (Figure 98), nous avons identifié un appartement présentant un débit total d'extraction faible (P7), présentant un risque de renouvellement d'air insuffisant avec des conséquences sur la QAI, et deux appartements présentant des débits totaux extraits supérieurs aux autres, ce qui peut entraîner une surconsommation d'énergie (P6 et P10). Ces trois situations sont analysées dans les deux prochains sous-paragraphe.

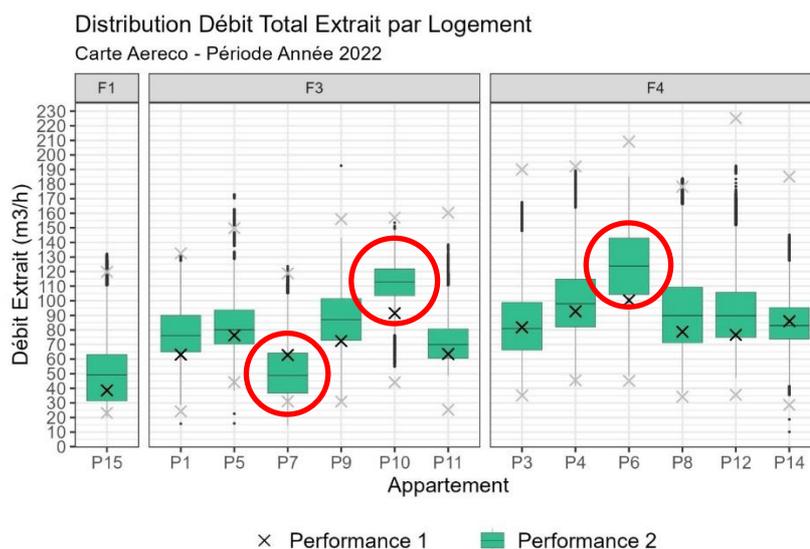
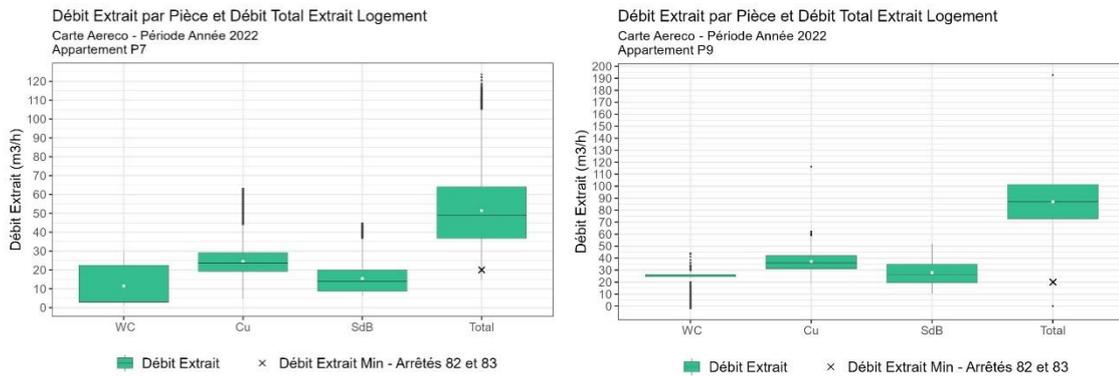


Figure 98 : Comparaison des distributions des débits totaux extraits mesurés entre Performance 1 et Performance 2— site de Paris

6.1.1.1 Impact d'un fonctionnement en sous-débit sur les concentrations mesurées en CO₂ et sur la QAI

Dans Performance 2, nous avons identifié un appartement pour lequel la production d'humidité est très inférieure aux scénarios de référence définis pour l'évaluation des performances des systèmes hygro. L'appartement identifié, le P7, présente des débits d'extraction faibles en cuisine et en salle de bain. En effet, sur la Figure 99, on peut observer un débit médian inférieur à 15 m³/h en salle de bain en P7, contre plus de 25 m³/h en P9 (appartement de même typologie T3 – ventilation correcte), et un débit médian inférieur à 25 m³/h en cuisine en P7, contre plus de 35 m³/h en P9.



(a) Débits d'extraction par pièce – Appartement P7

(b) Débits d'extraction par pièce – Appartement P9

Figure 99 : Comparaison des débits d'extraction par pièce entre un T3 sous ventilé (P7) et un T3 correctement ventilé (P9) - Site de Paris

Nous avons comparé la courbe temporelle d'humidité relative mesurée dans la salle de bain de cet appartement avec celle du P9, un T3 également, avec des débits normaux (Figure 100). Cette comparaison permet de mettre en avant l'inexistence de pics d'humidité, qui correspondent à des douches ou des bains. Nous avons fait le même constat en cuisine, mettant en évidence l'absence de production d'humidité telle qu'attendue pendant la préparation des repas. Cependant, cette absence de production d'humidité n'est pas visible sur les distributions par pièce, qui sont similaires à celles des autres logements. Cette analyse montre que le fonctionnement en sous-débit de la ventilation pour cet appartement P7 pourrait être lié à un cas d'utilisation extrême, sans production d'humidité.

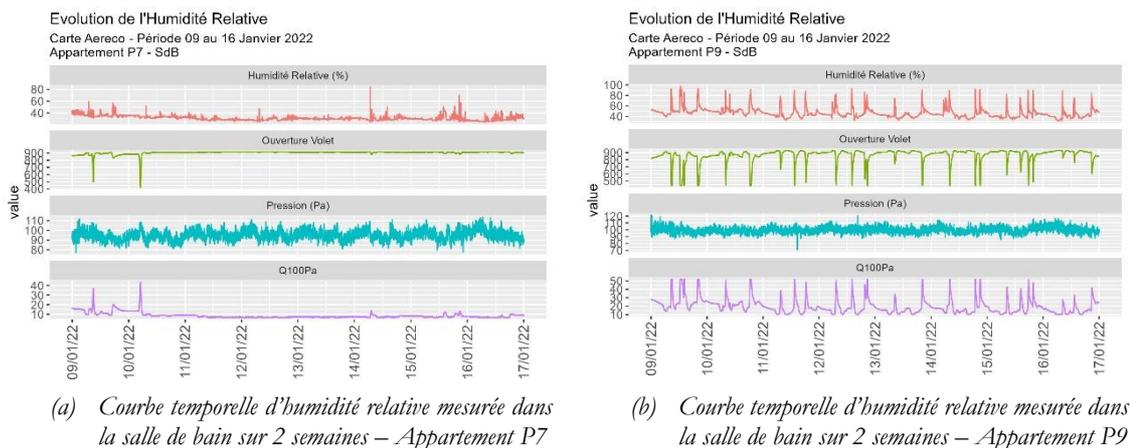


Figure 100 : Comparaison des pics d'humidité relative entre les appartements P7 et P9 – site de Paris

En l'absence de pic d'humidité, la ventilation hygroréglable maintient les débits minimums. Ceci représente un risque que l'appartement soit sous-ventilé par rapport à l'occupation, avec des répercussions sur la QAI. Les occupants n'ayant pas souhaité intégrer les campagnes de mesure QAI, seules les données des capteurs embarqués permettront d'évaluer la qualité de l'air du logement (CO_2 , COV_{totaux} , et $PM_{2.5}$).

Deux indicateurs en lien avec le CO_2 sont retenus pour cette analyse : l'indice ICONE, Figure 101 (a), et la distribution des concentrations avec le focus jour/nuit dans l'appartement P7, Figure 101 (b).

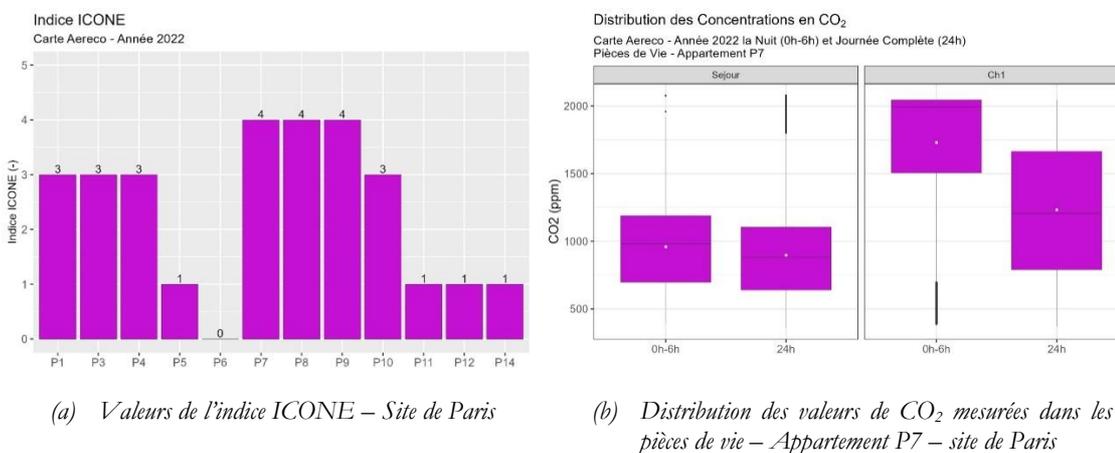


Figure 101 : Etude du confinement de l'appartement sous-ventilé – P7 – site de Paris

L'appartement P7 fait partie de ceux qui présentent l'indice de confinement ICONE les plus élevés de l'étude (Figure 101 (a)). Pour mémoire, ce dernier est calculé dans les chambres seulement, et la nuit entre 0 et 6 heures, lorsque la présence est quasiment assurée. La Figure 101 (b) indique la répartition des valeurs prises par le CO_2 dans ces conditions. Le capteur atteint ainsi sa valeur de saturation, aux alentours de 2000 ppm, plus de la moitié du temps. La distribution des valeurs par

tranche de 100 ppm sur la plage de mesure apporte un complément d'information sur la cinétique de cette molécule (Figure 102).

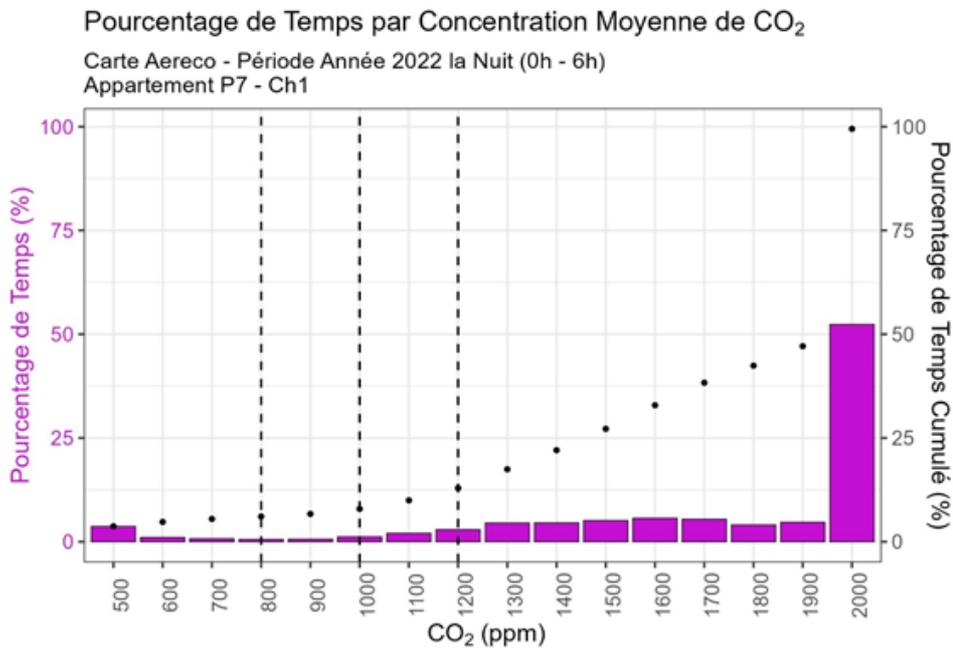


Figure 102 : Distribution détaillée des valeurs de CO₂ mesurées la nuit dans la chambre – Appartement P7 – Site de Paris
 Comme l'indiquait la médiane de la Figure 101 (b), le temps cumulé jusqu'à 1900 ppm (qui se lit sur les points noirs de la Figure 102) atteint à peine les 50 %. La barre des 2000 ppm représente les 50 % restant. Cela n'a pas de signification physique, cela correspond simplement au seuil de saturation du capteur et indique que 50 % du temps est passé au-dessus de 2000 ppm. En revanche l'histogramme permet de visualiser une dynamique croissante du temps passé au fur et à mesure que les concentrations de CO₂ augmentent. Cette tendance laisse supposer que les valeurs continuent à augmenter de la sorte au-delà de 2000 ppm, potentiellement jusqu'à des valeurs assez élevées.

Ces résultats peuvent en partie s'expliquer par l'occupation et le volume de la chambre. En effet, cette chambre présente un petit volume (valeur capteur Aereco) et est occupée par 2 enfants.

Au-delà de la sur-occupation qui peut générer une problématique de confinement spécifiquement la nuit, la ventilation assure la dilution constante des émissions de polluants, notamment des COV. La concentration de ces derniers est présentée sur l'ensemble des appartements à Paris sur une année (Figure 103).

Distribution COV

Carte Aereco - Période Année 2022

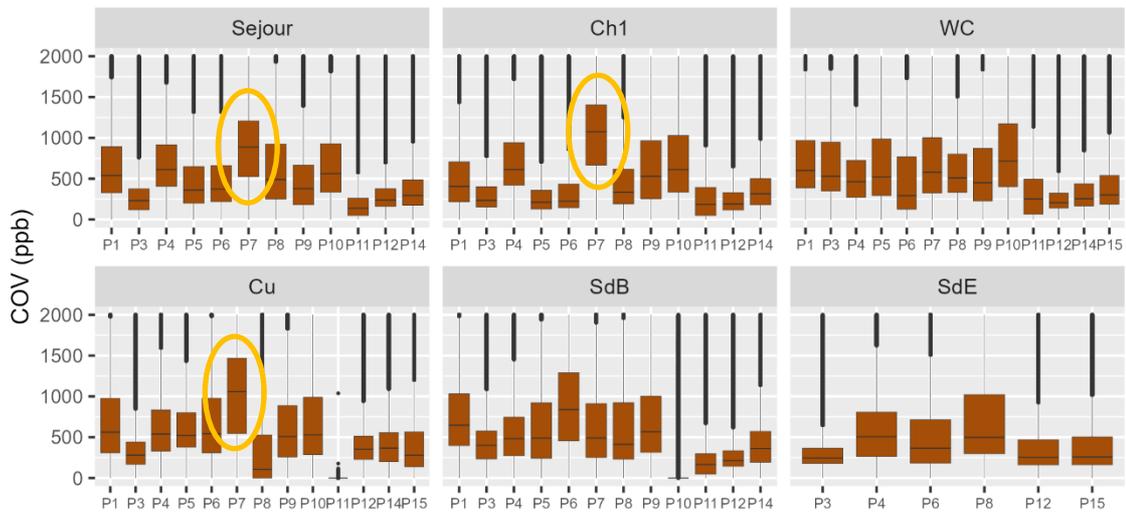


Figure 103 : Distribution des mesures de COV réalisées par les capteurs embarqués en 2022 - site de Paris

L'importance relative des niveaux de COV dans l'appartement P7 par rapport aux autres, ressort particulièrement à la lecture de ce graphe. Il est, de loin, celui dont les taux sont les plus élevés dans le séjour, la chambre et la cuisine, et ce, quel que soit le quartile considéré. Le Q1 très élevé (plus que 50 % des Q3 dans la chambre par exemple) est particulièrement significatif car il montre que le renouvellement d'air ne permet pas d'évacuer les polluants, qui gardent toujours un niveau de base important. Les occupants n'ayant pas participé aux campagnes QAI, nous n'avons pas de données sur les émissions. Néanmoins, il a été remarqué sur l'ensemble des campagnes que, lorsqu'il y avait des sources d'émissions importantes, notamment sous forme de produits de senteurs, ces dernières étaient plutôt localisées dans les pièces de services. Ici, les pièces de services semblent relativement épargnées. Sans pouvoir être tout à fait affirmatifs, cela tendrait à montrer qu'il n'y a pas de source de pollution particulière, mais plutôt du cumulatif lié à un défaut de renouvellement d'air.

L'évolution temporelle des concentrations peut également apporter une information supplémentaire en termes de dynamique saisonnière. Elle est présentée pour le séjour dans la Figure 104.

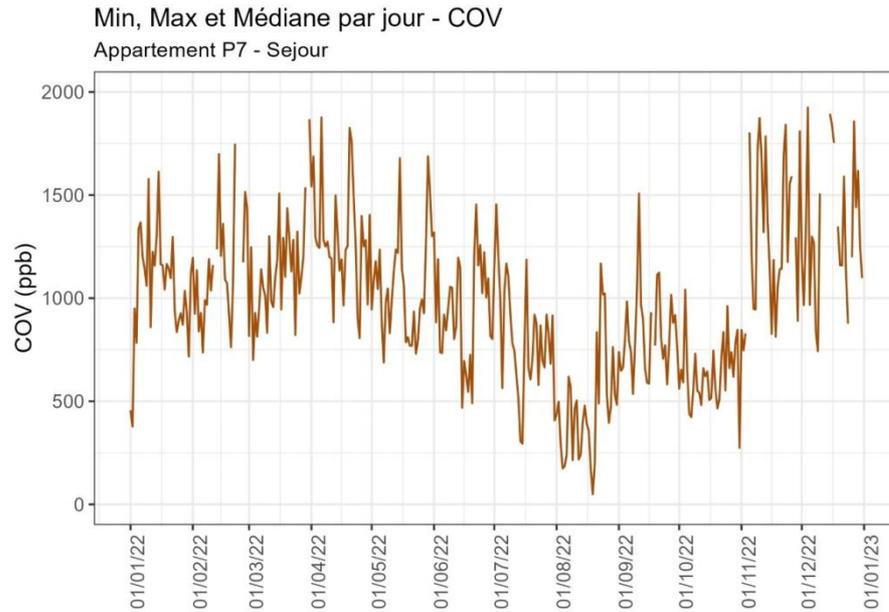


Figure 104 : Evolution temporelle des concentrations de COV_{totaux} , dans le séjour de l'appartement P7

Cette courbe est intéressante car elle est à l'opposée d'un comportement de relargage classique de COV. En effet, comme cela a déjà été indiqué, ces derniers dégazent davantage en été, ce qui n'est pas visible sur la courbe présentée ici. Il n'y a pas de raison particulière pour que les sources ponctuelles fassent l'objet de fluctuation saisonnière. L'hypothèse la plus crédible pour expliquer la dynamique identifiée sur ce graphe, à savoir une baisse estivale, serait que l'aération en été compense le faible renouvellement d'air assuré par la ventilation, et dilue ainsi les COV. Même émis en plus grande quantité, les concentrations résultantes dans l'appartement seraient finalement plus faible qu'en hiver.

Sur les particules fines, en revanche, le sous-débit ne semble pas avoir d'incidence particulière, comme cela a été identifié dans la partie dédiée (Figure 85).

6.1.1.2 Explication d'un fonctionnement en sur-débit

Les appartements P6 et P10 (Figure 98) présentent des débits d'extraction totaux supérieurs à ceux des autres appartements. Une surventilation, bien qu'en général bénéfique pour la QAI, entraîne une surconsommation énergétique. L'objectif de ce sous-paragraphe est d'identifier les raisons de cette surventilation.

- Appartement P6

L'appartement P6 est un T4 occupé par 6 personnes. En comparant les débits par pièce avec un autre T4 non surventilé (P8), on observe que les écarts se font sur une utilisation plus fréquente des WC, ainsi que des débits supérieurs en cuisine. Ces constats sont cohérents avec l'écart d'occupation des deux appartements. La légère surventilation observée dans le logement P6 est donc expliquée par une légère suroccupation. **Cela montre que le système hygroréglable permet de répondre parfaitement à cette situation où les besoins de ventilation sont plus élevés que**

ceux définis pour cette typologie d'appartement, en fournissant un renouvellement d'air supérieur.

Sur le plan de la QAI, le renouvellement d'air est particulièrement bon au regard des différents indicateurs étudiés, avec en particulier un indice ICONE de O. Concernant les polluants étudiés, si les résultats sont très bons en matière de formaldéhyde, ils peuvent, de prime abord, apparaître un peu moins satisfaisants sur les COV (Figure 105).

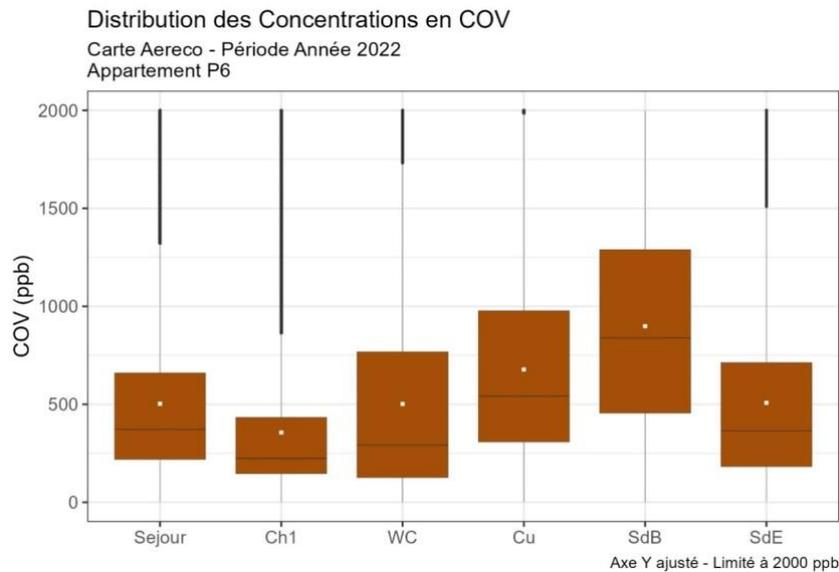


Figure 105 : Distribution des COV par pièces dans l'appartement P6

La Figure 105 permet d'identifier les pièces concernées par des concentrations élevées : la salle de bain, la cuisine et les sanitaires, ce qui peut être rapproché de l'utilisation massive de produits de senteurs (sprays désodorisants et cosmétiques) indiquée lors du questionnaire. Dans une moindre mesure, la présence de bougies parfumées dans le séjour se retrouve dans ses concentrations par rapport à la chambre. Néanmoins, compte tenu de l'importance des valeurs enregistrées dans les pièces de service, leur relative absence de répercussion dans les pièces de vie signe une performance vraiment notable de la ventilation. Les Figure 77 et Figure 103, vues précédemment, attestent par ailleurs que les pièces de vie présentent des résultats similaires à ceux des autres appartements, alors que ce n'est pas du tout le cas des toilettes, en particulier. Au-delà des débits d'air, le sens de circulation de l'air créé par la ventilation est particulièrement favorable dans ce type de cas, dont les émissions concernent principalement les pièces humides.

En revanche, concernant les $PM_{2,5}$, même une ventilation performante n'est pas en capacité d'assurer le maintien de seuils satisfaisants dans un logement fumeur, comme c'est le cas du P6.

- Appartement P10

L'appartement P10 présente également un léger surdébit, déjà identifié pendant Performance 1. Deux phénomènes expliquent cette surventilation. Premièrement, la bouche d'extraction de la cuisine avec une courbe de fonctionnement décalée vers le maximum : le débit en cuisine est en permanence légèrement au-dessus du débit théorique (Figure 106).

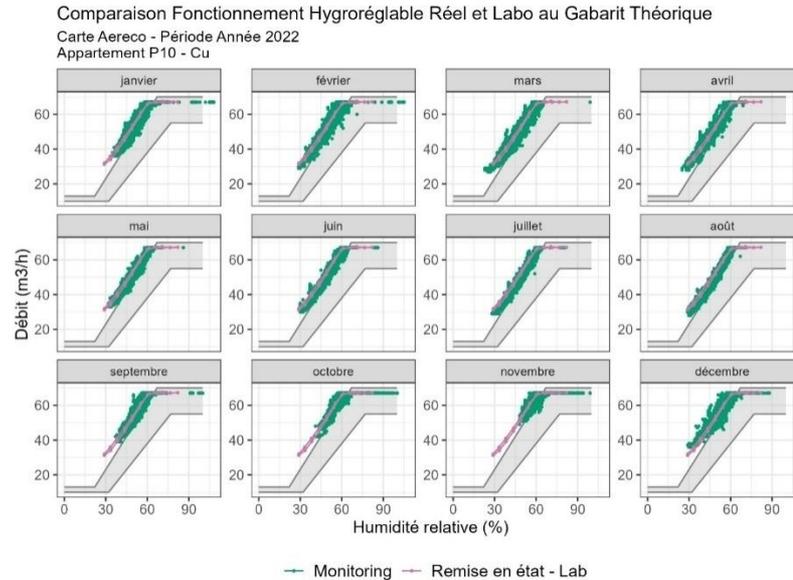
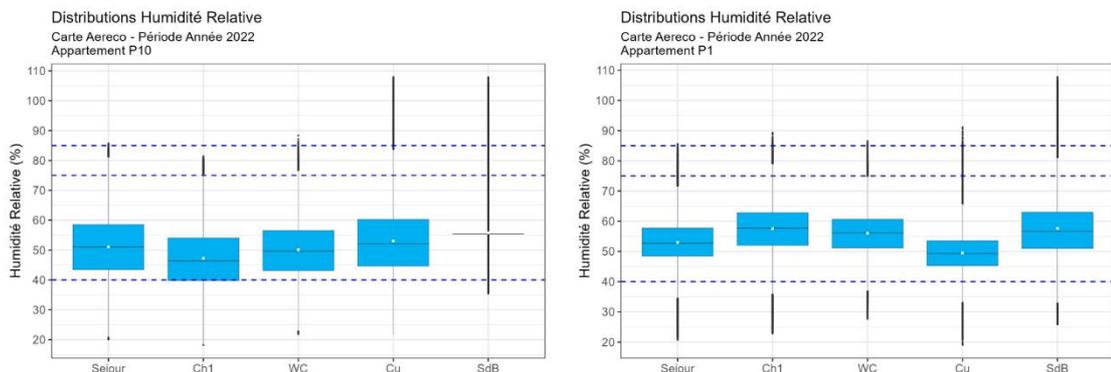


Figure 106 : Fonctionnement réel de la bouche cuisine - Appartement P10 - Site de Paris

D'autre part, les niveaux d'humidité relative mesurés en cuisine pour cet appartement sont supérieurs à ceux relevés dans les autres appartements de même typologie (Figure 107, Figure 58) : on mesure une humidité relative supérieure à 50 % plus de la moitié du temps en cuisine du P10, dont 4 % supérieure à 75 %. Cela entraîne une ouverture en débit important plus fréquente de la bouche cuisine, qui réagit bien à la demande supérieure de renouvellement d'air liée à la production d'humidité en cuisine.



(a) Distribution des valeurs d'humidité relative mesurées dans l'appartement P10

(b) Distribution des valeurs d'humidité relative mesurées dans l'appartement P1

Figure 107 : Comparaison des niveaux d'humidité relative dans deux appartements de type T3 – site de Paris

L'impact sur la consommation d'énergie de cette surventilation est nul, car dans cet appartement, la température intérieure est inférieure à celle mesurée dans les autres appartements (Figure 108) (les occupants ont déclaré avoir la fenêtre de la cuisine ouverte en permanence) : avec un écart entre l'extérieur et l'intérieur plus faible, le débit déperditif calculé dans cet appartement est similaire à celui calculé dans les autres appartements de type T3.

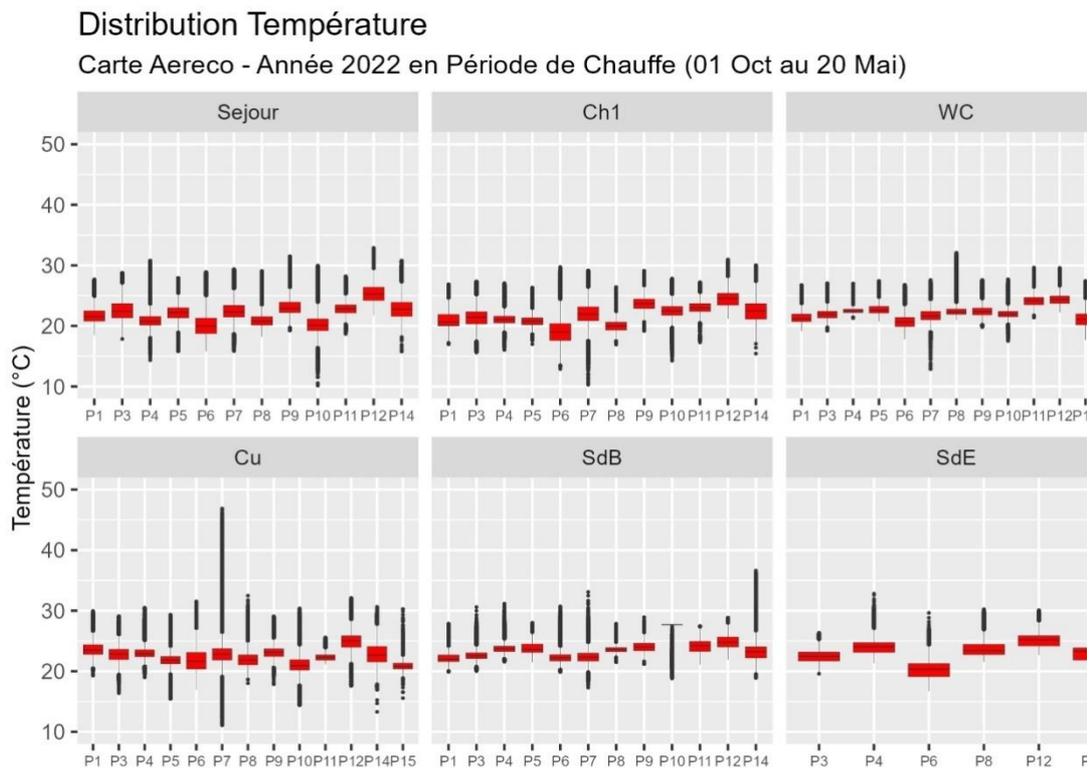


Figure 108 : Distribution des températures relevées par pièce - Site de Paris

6.1.2 Analyse des appartements présentant les plus importants niveaux de CO₂

La Figure 109 présente une synthèse des temps passés dans les pièces de vie instrumentées de tous les appartements du site de Paris, la nuit en période de chauffage, au regard de deux seuils pour le CO₂ : 800 ppm et 1000 ppm.

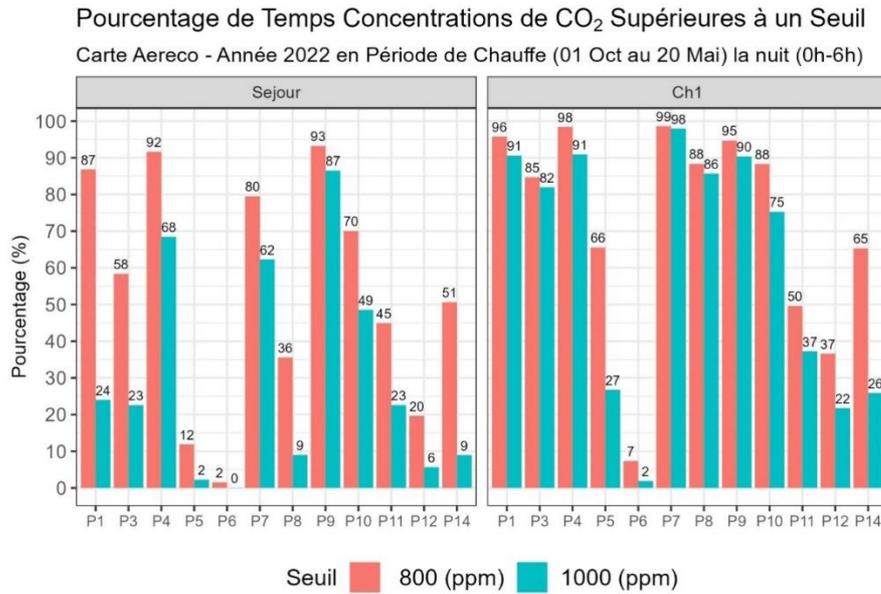


Figure 109 : Synthèse des temps passés avec des concentrations de CO₂ Supérieures à 800 et 1000 ppm la nuit en période de chauffage – site de Paris

Sur ce graphique, on identifie les 5 appartements présentant les chambres “les plus confinées” : le P7, dont l’analyse détaillée est proposée dans le paragraphe précédent, puis les P4, P9, P1 et P8. Il est à noter que cela correspond globalement aux appartements avec les niveaux de COV les plus élevés (Figure 103).

Nous proposons ci-après une analyse détaillée de ces quatre appartements.

- Appartement P1

Le logement est occupé par quatre personnes : deux adultes et deux enfants. Ce nombre d'occupants est adapté au dimensionnement du logement, ce qui signifie que la ventilation a été conçue pour évacuer le CO₂ et l'humidité produits par un nombre d'occupants similaire. Cependant, malgré ce dimensionnement adéquat, les niveaux de CO₂ restent élevés, indiquant des problèmes au niveau du système de ventilation. Une des explications principales à l'accumulation de CO₂ est la limitation en débit maximal des bouches d'extraction, en particulier en cuisine. La Figure 110 montre que le débit maximal n'est jamais atteint.

Comparaison Fonctionnement Hygroréglable Réel et Labo au Gabarit Théorique
 Carte Aereco - Période Année 2022
 Appartement P1 - SdB

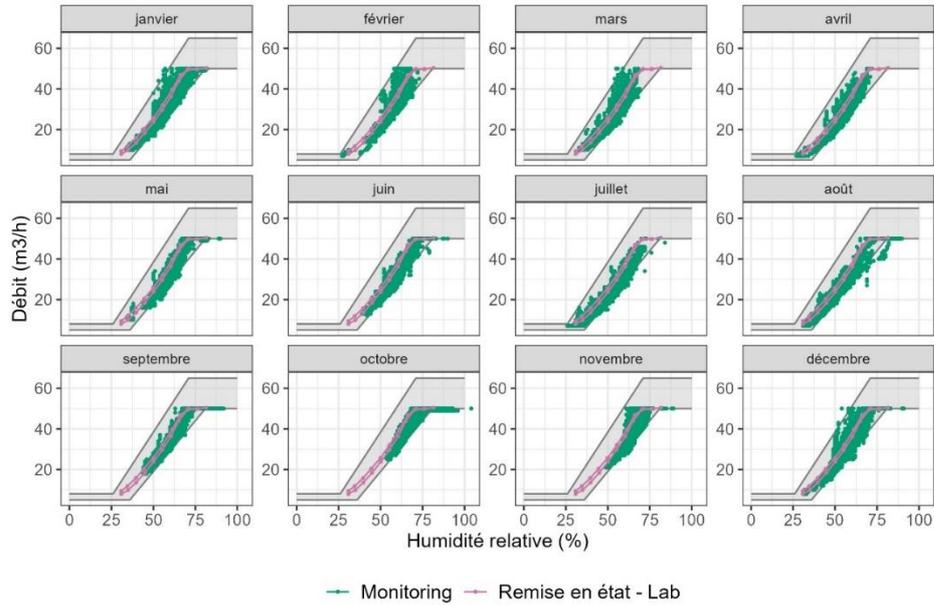


Figure 110 : Fonctionnement de la bouche d'extraction en salle de bain – Appartement P1 - Paris

Cette limitation en débit empêche l'évacuation efficace du CO₂, contribuant à son accumulation dans le logement. Un autre constat est la défaillance en pression qui a été constaté également dans les bouches d'extraction (Figure 111).

Synthèse Variation de la Pression (mesurée) et du Débit (calculé)
 Carte Aereco - Période Année 2022
 Appartement P1

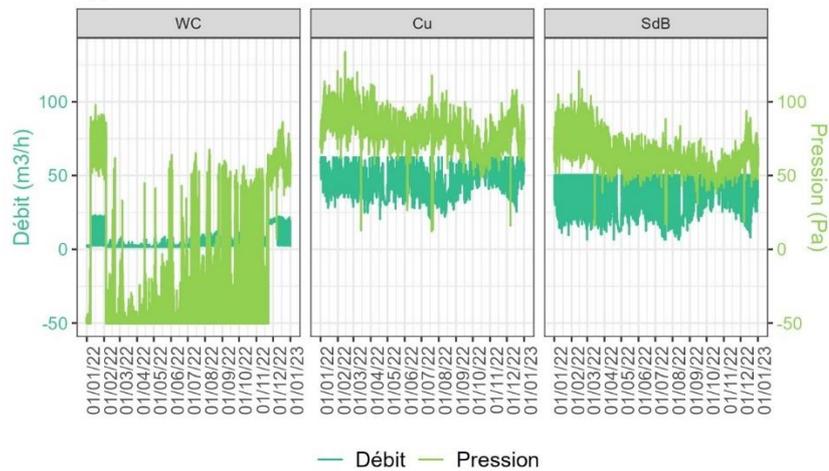


Figure 111 : Différence de pression mesurée aux bouches d'extraction - Appartement P1 - Paris

Cette défaillance peut être causée par des fuites dans les conduits, défaillance du ventilateur ne pouvant pas générer suffisamment de pression pour une extraction efficace ou bien des obstructions partielles dans les conduits peuvent augmenter la

résistance au flux d'air, diminuant la pression. Une pression insuffisante dans les bouches d'extraction signifie que le système de ventilation ne fonctionne pas à son efficacité optimale, ce qui contribue à l'accumulation de CO₂. Même si les taux d'humidité relative sont élevés, les débits restent corrects mais insuffisants (pas aussi élevés par rapport aux autres logements du même type) pour évacuer le CO₂ (Figure 24).

Bien que les débits d'air soient corrects, ils restent insuffisants pour évacuer le CO₂ de manière adéquate. Une évaluation et une maintenance approfondies du système de ventilation sont nécessaires pour remédier à ces problèmes et améliorer la qualité de l'air intérieur.

- Appartement P4

L'appartement P4 est un T4 où réside un foyer de 5 personnes. La chambre instrumentée est occupée par 2 personnes. Nous n'avons relevé aucune anomalie sur l'entrée d'air et le détalonnage de la porte est correct.

Au-delà de l'alerte présentée par le franchissement des seuils présentés sur la Figure 109, la réalité du confinement s'analyse au regard de la distribution des concentrations de CO₂ sur l'ensemble de la plage de mesure durant la nuit (Figure 112).

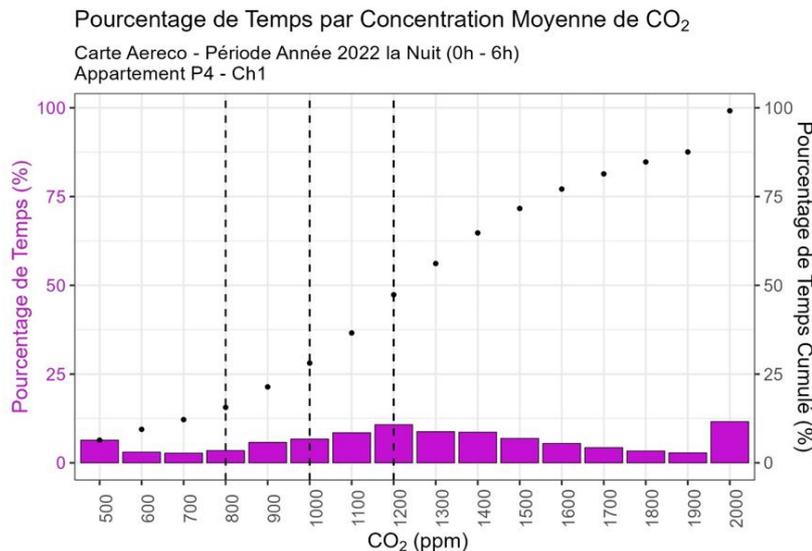


Figure 112 : Distribution détaillée des valeurs de CO₂ mesurées la nuit dans la chambre – Appartement P4 – Site de Paris

La distribution des valeurs atteint un pic à 1200 ppm, et décroît ensuite de façon relativement constante. Il s'agit d'une cinétique tout à fait différente de celle que l'on peut observer dans l'appartement P7, par exemple (Figure 102), qui fait l'objet d'un confinement avéré, avec plages de valeurs quasi-croissantes jusqu'au-delà de 2000 ppm. Par ailleurs, la courbe des valeurs cumulées permet de lire que durant la plage d'occupation 0-6h, le seuil des 30 % de valeurs supérieures à 1500 ppm, qui fait basculer en confinement "élevé" selon l'indice ICONE, est là aussi franchi de peu. Les anciennes modalités de calcul qui prenaient pour seuil 1700 ppm, tout comme

le seuil fixé dans le GT ESSOC en dessous duquel 67 % des valeurs doivent se trouver, comme vu précédemment (Tableau 17), ne feraient pas considérer cette chambre comme une pièce confinée.

Concernant les polluants de l'air intérieur, peu de sources d'émission ont été relevées lors du questionnaire. On peut retenir la réfection des peintures dans le séjour/salle à manger l'année précédente, qui constitue plutôt une source relarguant sur le long terme. Concernant les sources ponctuelles, certains produits de ménage peuvent être cités (spray sur le canapé, javel, etc.), ainsi que l'utilisation fréquente d'encens.

Les concentrations de formaldéhyde mesurées ne font pas apparaître de problématique particulière (Figure 113).

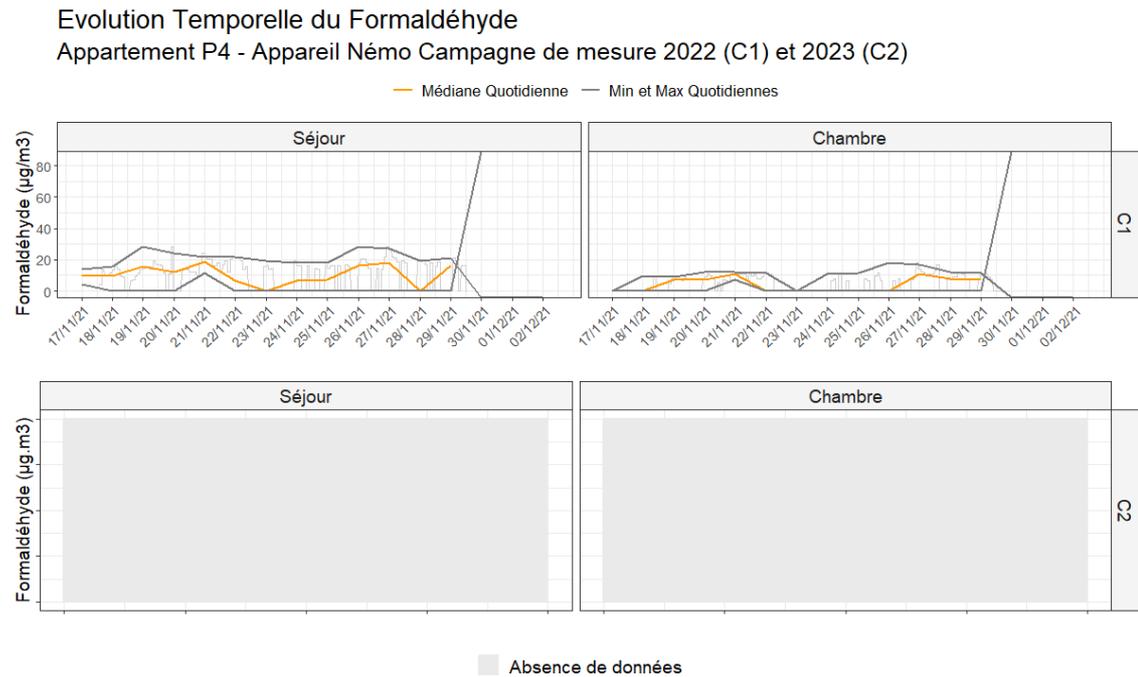


Figure 113 : Evolution temporelle du formaldéhyde durant les campagnes hivernales QAI

Les courbes des minima redescendent bien à 0 de manière quasi-systématique, ce qui montre que le renouvellement d'air est suffisant pour évacuer les émissions. Ces dernières ne sont pas trop élevées non plus, avec un maximum de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit la valeur réglementaire de long terme en France dans les ERP, dans le salon, atteint 8 heures sur l'ensemble des deux semaines. D'autre part, la médiane dans la chambre, à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (cf. fiche appartement) classe ce logement dans les 2.5 % des foyers les moins pollués au formaldéhyde selon la CNL1 (Erreur! Source du renvoi introuvable.).

Concernant les COV, les concentrations relevées entre les capteurs Aereco et NEMOs sont présentés en Figure 114.

Comparaison Distribution Monitoring avec Campagne QAI I - COV
 Carte Aereco - Période Année 2022
 Apt P4

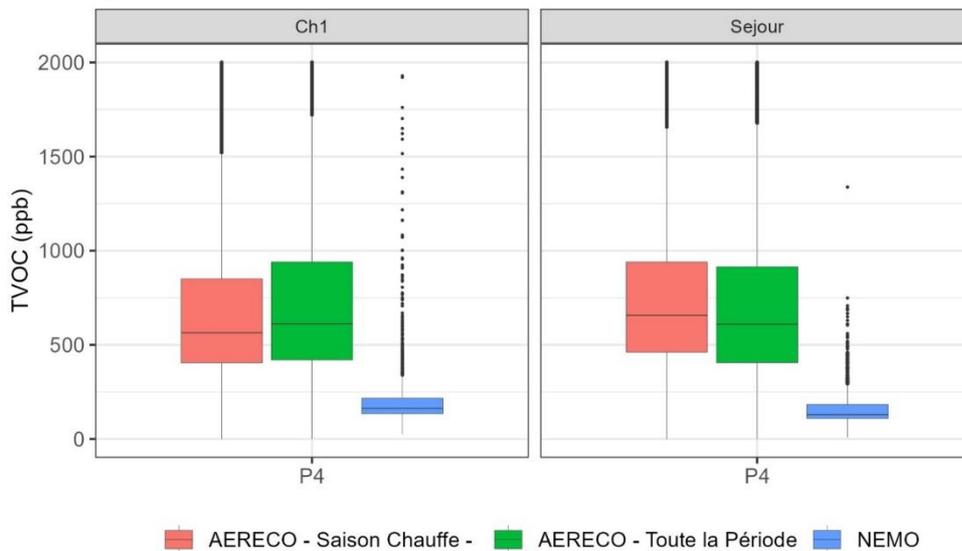


Figure 114 : Distributions des concentrations en COV dans la chambre et le séjour du P4

L'écart entre les valeurs mesurées par les capteurs Aereco et les NEMOs peuvent s'expliquer soit par l'écart « naturel » entre les capteurs identifié pendant l'intercomparaison (tâche 2), soit par des émissions plus faibles pendant les campagnes hivernales dues à la présence des NEMOs (les occupants peuvent avoir changer leurs habitudes pendant les deux semaines de campagne).

Les cartes Aereco font état de concentrations de COV relativement élevées, dans la même gamme de valeur que les appartements P1, P8, P9 et P10, c'est-à-dire par l'ensemble des appartements identifiés comme ayant une problématique CO₂. Comme indiqué précédemment, il ne semble pas y avoir d'usage particulier susceptible d'entraîner de fort dégagement de COV.

- Appartement P8

L'appartement P8 présente également des valeurs de CO₂ dans la chambre parmi les plus élevées de l'étude. Il fait partie des trois appartements qui dépassent les indicateurs préconisés par le GT ESSOC avec le P7 et le P9 (Tableau 17). Le confinement est « très élevé » selon l'Indice Icone. Avec 64 % des valeurs prises en compte qui dépassent 1500 ppm (Figure 115), il est même dans la fourchette haute du niveau 4 de l'Icône puisque ce dernier concerne les locaux passant entre 30 et 75 % du temps d'occupation au-dessus de ce second seuil.

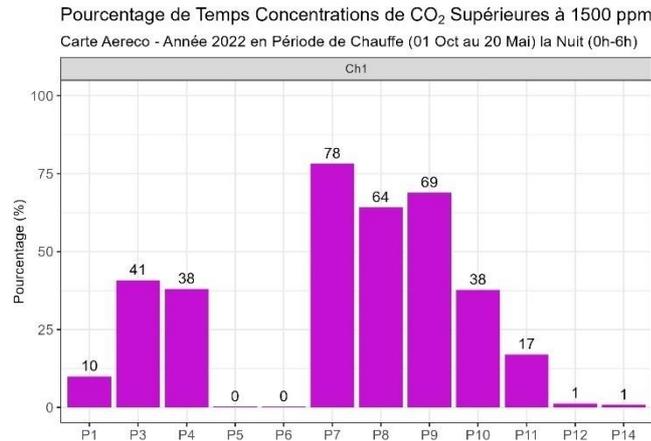


Figure 115 : Pourcentage de temps de dépassement du second seuil de CO₂ considéré dans l'indice Icone, 1500 ppm, la nuit dans les chambres en période de chauffe à Paris

L'entrée d'air de la chambre présente des débits normaux (pas de limitation) et les détalonnages mesurés sont corrects. La chambre est occupée par 2 personnes, qui ont déclaré dormir porte fermée. Nous avons vérifié l'état des mortaises derrière l'entrée d'air de la chambre, qui ne présentent aucune réduction de section. Nous n'avons pas pu identifier de cause vérifiable pour expliquer le confinement dans la chambre. Cependant, les occupants ont déclaré avoir identifié des défauts d'étanchéité autour des fenêtres de certaines autres pièces de l'appartement : un déséquilibre de la répartition des fuites sur l'enveloppe pourrait être à l'origine d'un court-circuit du balayage du logement, qui pourrait expliquer les valeurs de CO₂ mesurées dans la chambre. Un diagnostic détaillé de l'étanchéité de l'appartement ainsi qu'une modélisation des flux d'air serait nécessaire pour confirmer cette hypothèse.

Concernant le formaldéhyde, la Figure 116 montre la distribution des concentrations de formaldéhyde dans la chambre et le séjour de l'appartement P8 durant la 1^{ère} campagne. Ce foyer s'est retiré de l'étude avant la seconde.

Distribution des Concentrations en Formaldéhyde
Appareil NémO - Campagne de mesure 2022 (C1) et 2023 (C2)
Appartement P8

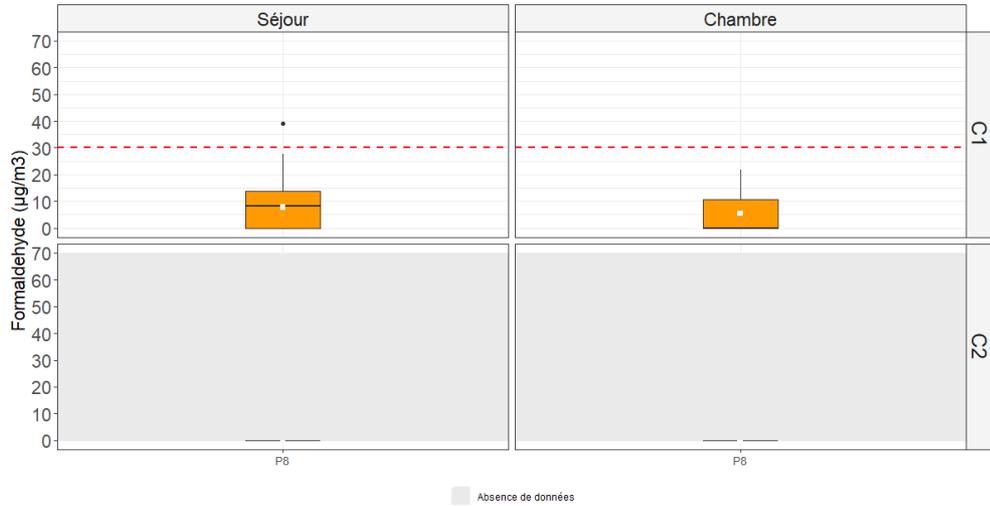


Figure 116 : Distribution des concentrations de formaldéhyde dans l'appartement P8

Dans la chambre, on peut lire que la médiane est très proche de 0 quand la moyenne est plutôt aux alentours de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La moyenne étant tirée par les extrêmes, cela montre qu'il y a bel et bien des émissions de formaldéhyde dans cette pièce, non excessives puisque le 3^{ème} quartile est de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Elles sont bien évacuées dans le temps puisque 50 % des données sont en dessous de 0.

Sur les $\text{COV}_{\text{légers}}$, de manière plus générale, on peut aboutir au même constat dans la chambre durant la campagne de mesures, comme l'indique la Figure 117.

Synthèse des Evolutions Temporelles en COV
Appareil NémO - Campagne de mesure 2022 (C1) et 2023 (C2)
Appartement P8

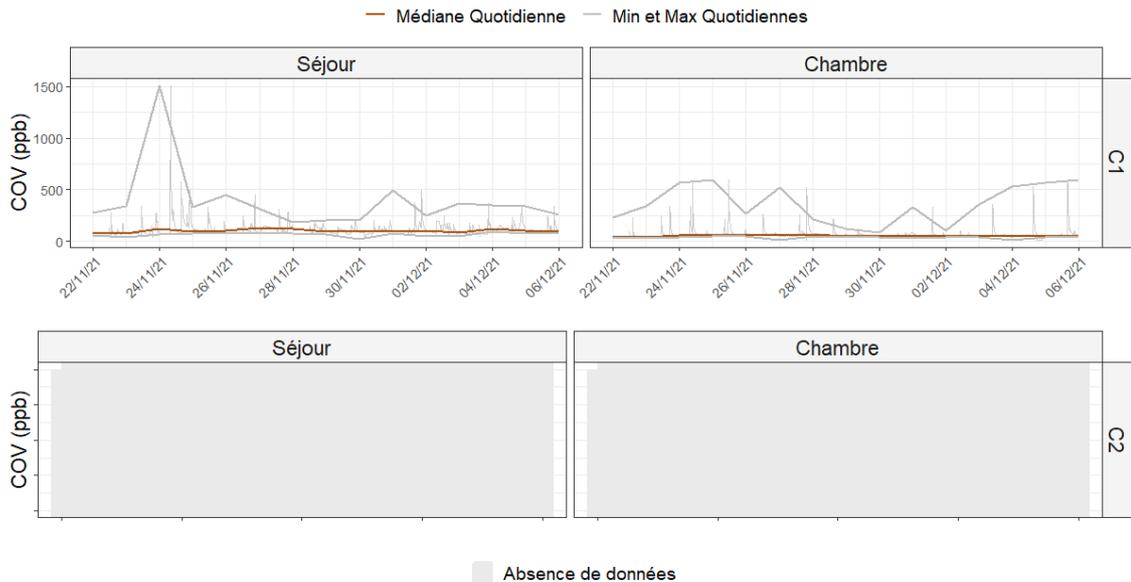


Figure 117 : Evolution temporelle des $\text{COV}_{\text{légers}}$ durant la campagne de mesure NEMOs dans les pièces de vie de l'appartement P8

Les maxima de COV dans la chambre ne sont pas très élevés, mais indiquent néanmoins la présence d'émissions non nulles (attestées par la présence de pics réguliers dans les données). La médiane quant à elle reste très proche de 0, ce qui objective le fait que les pics soient rapidement résorbés, évacués grâce au renouvellement d'air. Sur l'ensemble de l'année 2022 (Figure 77), les résultats en COV_{total} de la chambre P8 sont un peu plus élevés, se situant plutôt dans la moyenne des appartements de Paris. La différence s'explique en regardant la courbe temporelle des concentrations de COV_{total} sur l'année (Figure 118).

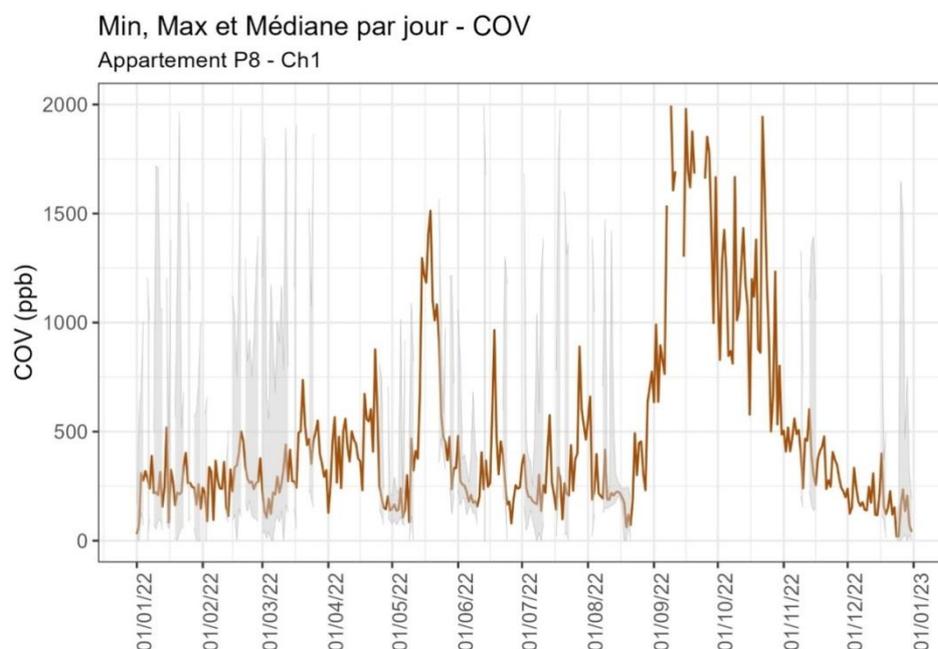


Figure 118 : Evolution temporelle des COV_{total} durant l'année 2022 dans la chambre du P8

En effet, la Figure 118 permet d'identifier une très forte élévation des taux de septembre à novembre 2022. Cette période n'étant pas couverte par le questionnaire QAI dont nous disposons, nous n'avons pas d'explication de cet épisode de pollution, ni la possibilité de savoir s'il s'agit d'un phénomène récurrent et circonscrit à l'automne ou non. La redescende sur la fin d'année aux taux pré-existants est rassurante sur la capacité du bâtiment à évacuer des émissions même importantes, moyennant une durée plus longue que lors d'un pic isolé comme celui de mi-mai. Ce type de phénomène montre également les limites d'une comparaison de valeurs sur deux périodes différentes, comme on le voit sur la Figure 119.

Comparaison Distribution Monitoring avec Campagne QAI I - COV
 Carte Aereco - Période Année 2022
 Apt P8

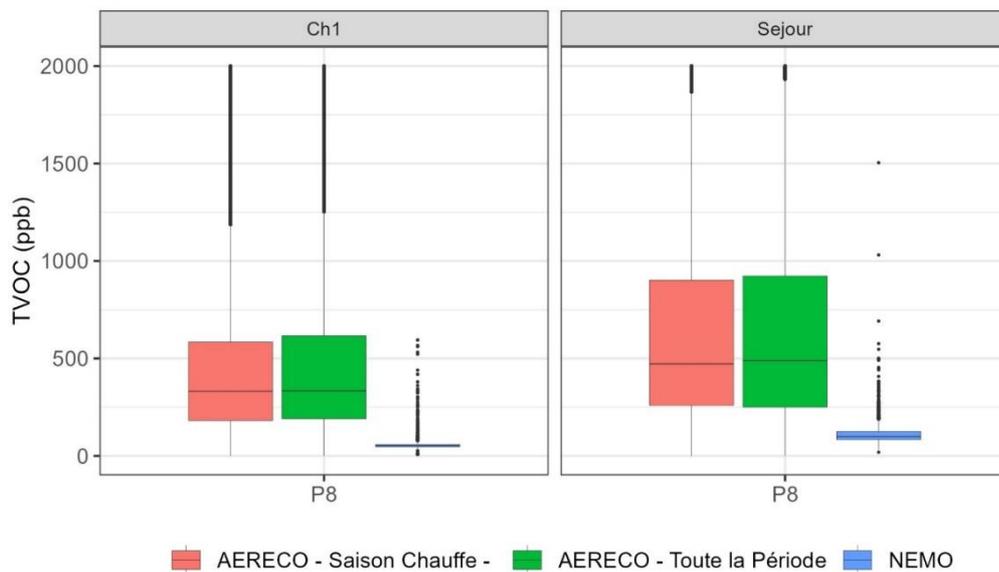


Figure 119 : Comparaison des distributions de valeurs entre les $COV_{légers}$ NEMOs sur la campagne C1 et les COV_{totaux} des capteurs embarqués Aereco de l'année 2022 dans l'appartement P8

En effet, la distribution des COV_{totaux} est homogène en période de chauffe et sur l'année : la moitié du grand pic automnal se situant en période de chauffe, cela ne discrimine pas une période par rapport à l'autre. En revanche, les résultats mesurés sur la période de campagne de mesure hivernale sont largement plus faibles, ce qui s'explique parfaitement au regard des courbes vues plus haut. La question de la représentativité des mesures se pose non seulement sur une campagne de mesures de deux semaines, mais également sur l'année, puisque nous ne sommes pas en mesure d'expliquer le pic constaté et donc de prédire l'existence et la fréquence d'épisodes similaires.

La chambre semble donc avoir un problème de confinement vis-à-vis de l'indicateur CO_2 , qui ne dégrade pas sa QAI, bien que le foyer ne fasse pas état de pratiques spécifiquement vertueuses. En effet, comme indiqué dans le paragraphe dédié aux COV (5.2.4), les occupants du P8 utilisent quotidiennement huiles essentielles et bougies parfumées dans le séjour, ainsi que de l'eau de Cologne après utilisation des sanitaires. Cela s'observe clairement sur les concentrations mesurées dans ces pièces (Figure 77).

Concernant les particules fines, l'analyse des courbes nécessite de considérer une année de mesure intérieur/extérieur (Figure 120). En effet, l'extérieur apporte une contribution majeure des particules de l'air intérieur – sauf source spécifique très prolifique comme le tabac, qui réduit alors l'importance relative des PM extérieures.

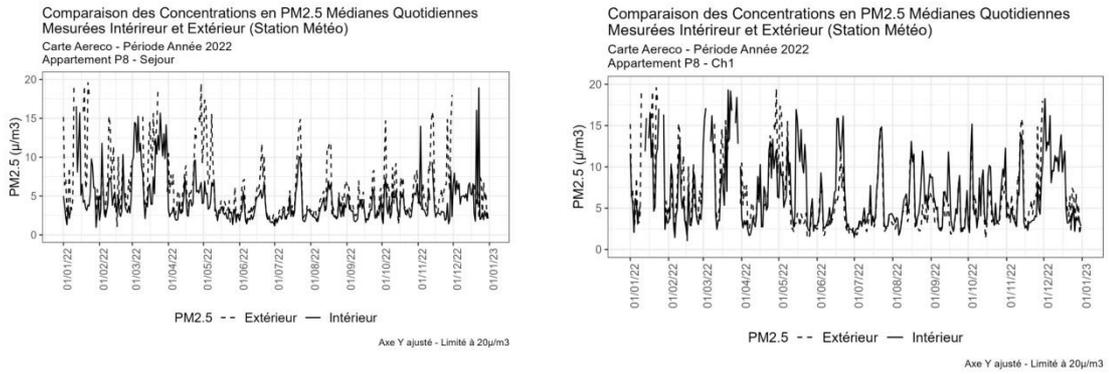


Figure 120 : Evolution des concentrations en $PM_{2.5}$ sur l'année 2022 dans le séjour et la chambre de l'appartement P8

Les courbes extérieures, en pointillées, illustrent parfaitement la dynamique saisonnière des $PM_{2.5}$ atmosphériques avec une plus grande prévalence des pics en saison froide. Dans le séjour, la courbe des $PM_{2.5}$ intérieures est similaire à celle de l'extérieur, avec des variations moindres puisqu'elle présente des valeurs moins élevées. Dans la chambre, en revanche, les sources intérieures créent des pics en dehors de toute saisonnalité, particulièrement visibles en été quand les $PM_{2.5}$ extérieures sont plus faibles. Cela se répercute sur les moyennes annuelles (Figure 86) et sur la moyenne des valeurs glissantes sur 1 heure (Figure 85), qui sont parmi les plus fortes des appartements non-fumeurs et frôlent, voire dépassent, dans la cuisine, la valeur guide de court terme de l'OMS de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

S'il est déjà apparu à plusieurs reprises que le lien entre le renouvellement d'air intérieur et les $PM_{2.5}$ semblait complexe à établir, cela peut être illustré dans le cas de cette chambre à travers le résultat d'une Analyse en Composantes Principales (ACP), réalisée à partir des données de la 1^{ère} campagne de mesure avec les NEMOs (Figure 121).

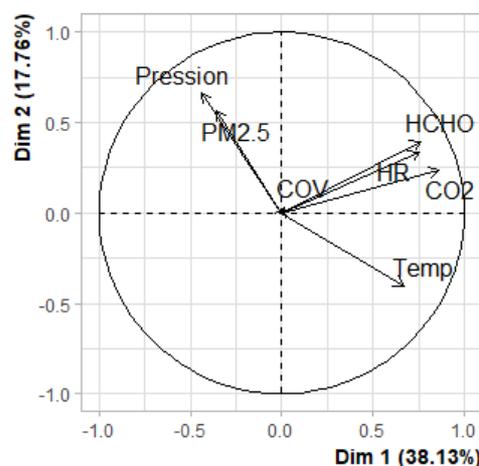


Figure 121 : ACP sur les paramètres mesurés par le NEMO dans le séjour de l'appartement P8 à la 1^{ère} campagne

L'axe 1 explique 38,13 % de la variabilité des données, et le second 17,76. Le cumul dépassant de peu les 50 %, les résultats doivent être considérés avec prudence. Néanmoins, on identifie assez distinctement que le premier axe est défini par ce qui pourrait être qualifié de « renouvellement d'air », avec une participation quasi-égale du CO₂, du formaldéhyde et de l'humidité relative, auxquelles s'ajoutent, dans une moindre mesure mais dans un sens similaire, les COV légers.

Les PM_{2.5} sont indépendants des autres paramètres. Le vecteur est orienté en sens opposé, ce qui signifie qu'une augmentation des autres paramètres conduit plutôt à une diminution des PM_{2.5}. Néanmoins, il ne contribue que très peu à l'axe 1 et a donc peu d'impact sur le renouvellement d'air. Il est d'avantage représenté sur le 2nd axe, celui des ordonnées, avec une projection dépassant de peu 0,5. En dehors de la pression, le facteur température (« temp ») pèse également sur l'axe des ordonnées, dans le sens opposé à celui des PM_{2.5}. Cela tend à indiquer que lorsque la température augmente, les PM_{2.5} diminuent, corroborant la notion de variabilité saisonnière préalablement citée. D'autre part, un angle droit entre deux paramètres signe leur absence de corrélation selon le plan considéré. C'est par exemple le cas ici entre les PM_{2.5} et le formaldéhyde, qui semblent complètement indépendants l'un de l'autre, ce qui est cohérent compte tenu de leurs sources respectives.

- Appartement P9

Enfin, le dernier appartement identifié est l'appartement P9, un T3 occupé par 4 personnes.

La chambre instrumentée, d'une surface de 10 m², est occupée par deux jeunes adultes d'une vingtaine d'années. Les débits d'extraction de l'appartement sont normaux, l'entrée d'air de la chambre fonctionne correctement après remise en état pendant la phase laboratoire (l'entrée d'air était obturée lors de la récupération par Aereco) et les détalonnages sont suffisants. Les occupants ont déclaré dormir avec la porte fermée, mais comme ce sont les parents qui ont répondu au questionnaire, un doute persiste vis-à-vis des chambres concernées par la réponse : on ignore si elle s'applique aussi à la chambre des enfants. Nous avons identifié la présence de deux gros chiens dans l'appartement, sans savoir dans quelle pièce ils se trouvent la nuit. Les éléments identifiés ne nous permettent pas de conclure avec certitude quant à la source du confinement identifié dans cette chambre (Figure 122). Une hypothèse serait que la chambre soit suroccupée (par rapport aux scénarios de référence Mathis), avec la présence de deux adultes, à laquelle s'ajouterait potentiellement les chiens. L'habitude de dormir avec la porte fermée pourrait jouer le rôle de facteur aggravant.

Comme le P7 et le P8 précédemment analysés, il s'agit d'un des trois appartements ciblés pour leur dépassement des valeurs CO₂ du GT ESSOC (Tableau 17). Il est étiqueté ICONE 4, ce qui signifie que le confinement est considéré comme « très élevé ». Ses valeurs sont dans la fourchette haute du niveau 4 et approchent du suivant, puisque 69 % de ses résultats sont supérieurs à 1500 ppm (Figure 115), tandis que l'ICONE 5 est franchi pour un dépassement de 75 %. Au-delà de la

chambre, seule pièce dont nous puissions calculer l'icone ou la conformité aux indicateurs du GT ESSOC avec une estimation plausible des temps de présence, ces valeurs de CO₂ élevées conduisent à analyser, en complément, la distribution des valeurs en saison de chauffe sur l'ensemble des pièces de vie (Figure 122).

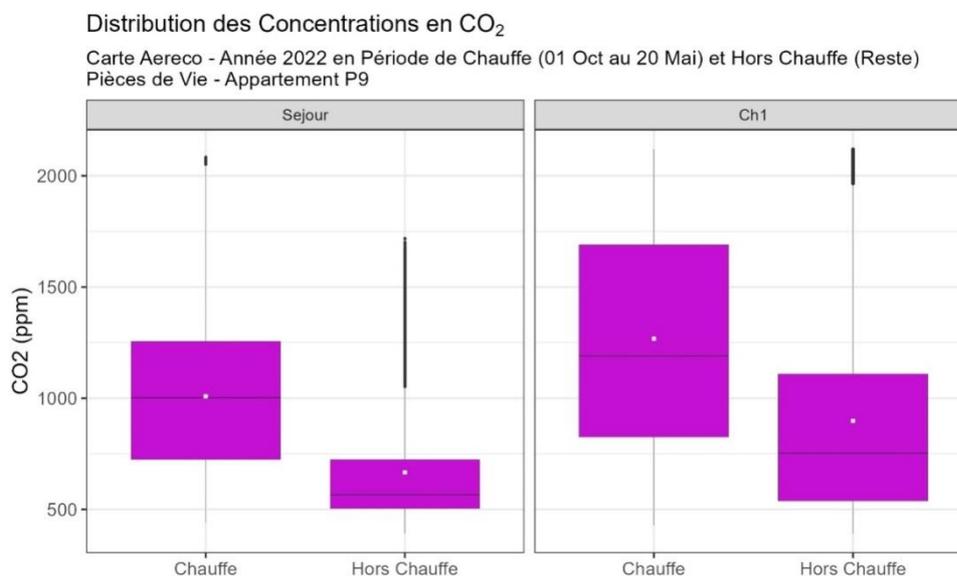


Figure 122 : Distribution des concentrations en CO₂ en période de chauffe et hors chauffe dans les pièces de vie de l'appartement P9 sur l'année 2022

Sur la période de chauffe, le séjour affiche également des valeurs élevées, avec 50 % des données supérieures à 1 000 ppm. Le Q1 redescend à peine en dessous de 750 ppm, indiquant que la ventilation peine à diluer le CO₂ émis durant les périodes d'occupation, même sur 24 heures. En comparaison, dans le P7 la distribution du salon en période de chauffe est décalée d'environ 200 ppm vers le bas (cf. fiche appartement – Annexe C). Ces constats sont davantage marqués dans la chambre, avec plus de 25 % des valeurs supérieures au seuil de 1500 ppm (le Q3 est plutôt aux alentours de 1700 ppm), même sur une journée complète, en intégrant les périodes d'inoccupation. On constate donc dans cet appartement un problème de confinement dans l'ensemble des pièces de vie malgré un fonctionnement normal du système de ventilation.

Il s'agit d'un appartement fumeur, qui présente des concentrations de particules fines particulièrement élevées, comme cela a été vu préalablement (chapitre 5.2.5).

On peut retenir dans cet appartement que :

- Les pièces de vie enregistrent des valeurs en PM_{2.5} supérieures aux valeurs extérieures 40 à 50 % du temps contre 3 à 15 % dans les appartements non-fumeurs (Figure 93) ;
- La valeur guide long terme de 5 µg/m³ est dépassée plus des deux tiers du temps dans la majorité des pièces (Figure 83) ;

- La moyenne glissante sur une heure (Figure 85) dépasse la valeur guide court terme de l'OMS de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la quasi-totalité des pièces, et notamment dans le séjour.

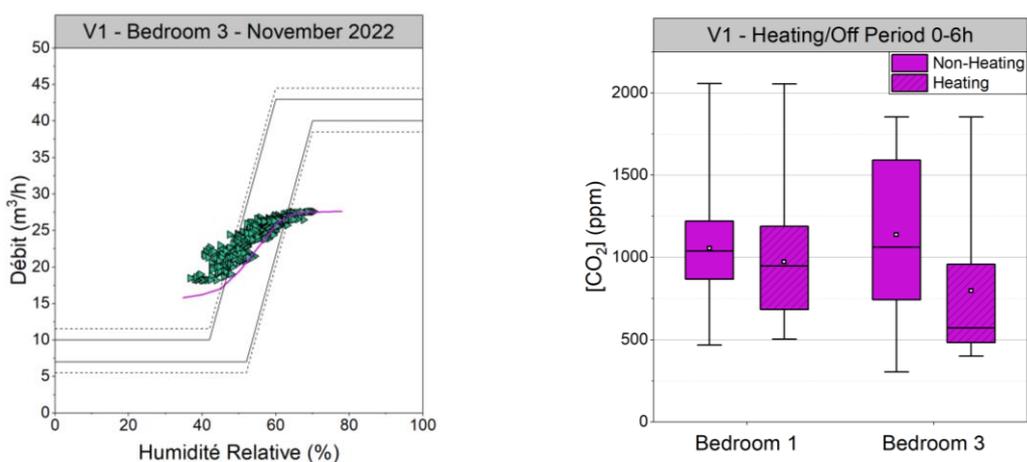
Les valeurs de COV dans la chambre sont également élevées, ce qui est expliqué par l'utilisation d'encens et de désodorisants dans cette pièce, et un renouvellement de l'air insuffisant.

6.2 Site de Villeurbanne

6.2.1 Impact des entrées d'air présentant une limitation du débit maximal sur le confinement

Lors de la campagne en laboratoire (tâche 2), plusieurs entrées d'air prélevées sur le site de Villeurbanne montraient des limites : ces entrées d'air ne permettent plus d'atteindre le débit maximal. C'est le cas des entrées d'air des chambres des appartements V1 et V2.

La Figure 123 illustre le blocage de l'entrée d'air de la chambre (a) avec une courbe caractérisée en laboratoire (en violet) qui reste sous les $30 \text{ m}^3/\text{h}$. Les occupants ont déclaré dormir avec la porte fermée, ce qui explique qu'avec une entrée d'air qui reste en débit intermédiaire, le niveau de CO_2 dans la chambre soit régulièrement au-dessus de 1000 ppm pendant la nuit en période de chauffe. Néanmoins, les concentrations en CO_2 restent toujours acceptables, avec un Q3 inférieur à 1500 ppm sauf dans la chambre 3 en période hors chauffe avec un Q3 légèrement supérieur à 1500 ppm. Les valeurs en COV et en $\text{PM}_{2.5}$ sont globalement bonnes dans ces pièces, et ne se prêtent pas à des analyses complémentaires.

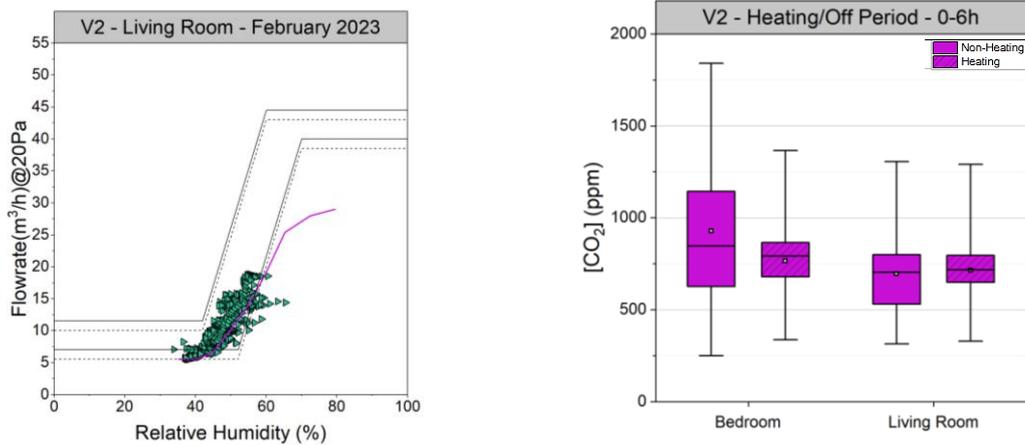


(a) Exemple de réponse de l'entrée d'air de la chambre instrumentée en novembre 2022

(b) Concentrations en CO_2 relevé dans la chambre instrumentée (Bedroom 3) pendant la nuit en période de chauffe

Figure 123 : Situation de la chambre instrumentée - Appartement V1 - Site de Villeurbanne

Dans l'appartement V2, malgré le défaut sur l'entrée d'air, aucun confinement n'est observé dans la chambre, les valeurs de CO₂ restant majoritairement en dessous de 1000 ppm (Figure 124). La chambre étant située juste à côté de la SdB et des WC, il se peut qu'elle bénéficie d'un meilleur tirage par dépression. Deux autres hypothèse envisagée sont l'occupation peu importe de la chambre ou encore le maintien de la porte de la chambre ouverte la nuit.



(a) Exemple de réponse de l'entrée d'air de la chambre instrumentée en février 2023

(b) Concentrations en CO₂ relevé dans la chambre instrumentée pendant la nuit en période de chauffe

Figure 124 : Situation de la chambre instrumentée - Appartement V2 - Site de Villeurbanne

Les résultats en formaldéhyde dans l'appartement V2 sont présentés sur la Figure 125.

Distribution des Concentrations en Formaldéhyde
Appareil Néo - Campagne de mesure 2022 (C1) et 2023 (C2)
Appartement V2

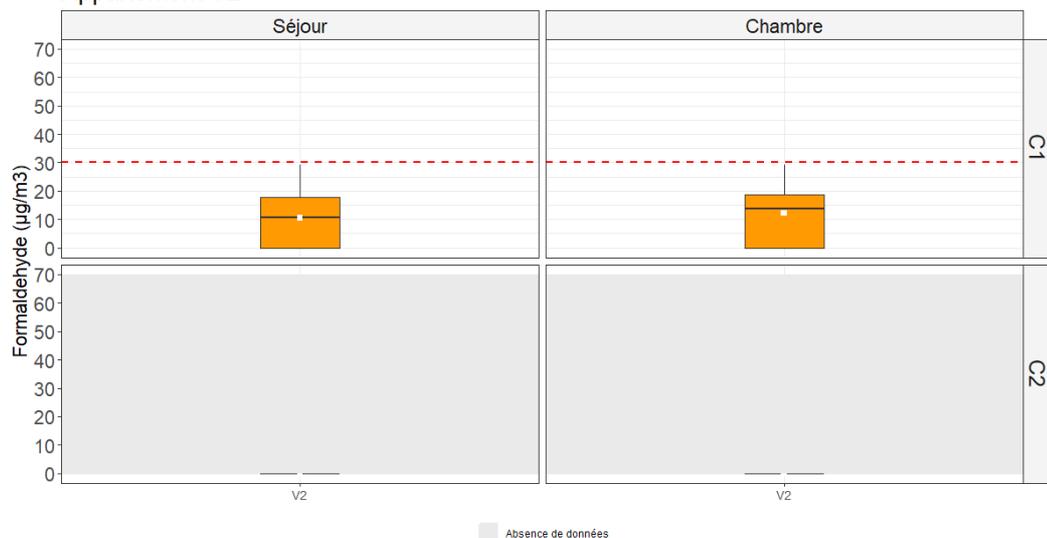


Figure 125 : Distribution des valeurs de formaldéhyde dans les pièces de vie de l'appartement V2

La médiane pour la chambre, à $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, correspond à la gamme de valeur juste inférieure à celle qui est la plus représentée dans les logements français lors de la CNL1 : un peu plus de 20 % sont compris entre 15 et $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Par rapport aux autres logements de cet immeuble, les résultats sont également bons puisque cette chambre fait partie des deux seules sur 6 n'enregistrant pas de dépassement de la valeur de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figure 65). En revanche, les résultats en COV sont particulièrement élevés, comme cela a été vu dans le chapitre 5.2.4 en lien avec la Figure 75. Cela est à rapprocher de l'utilisation de nombreux produits de senteur (sprays désodorisant, encens, bougies parfumées, huiles essentielles, parfum, etc.). Les courbes sont représentées sur la Figure 126.

Synthèse des Evolutions Temporelles en COV
Appareil NémO - Campagne de mesure 2022 (C1) et 2023 (C2)
Appartement V2

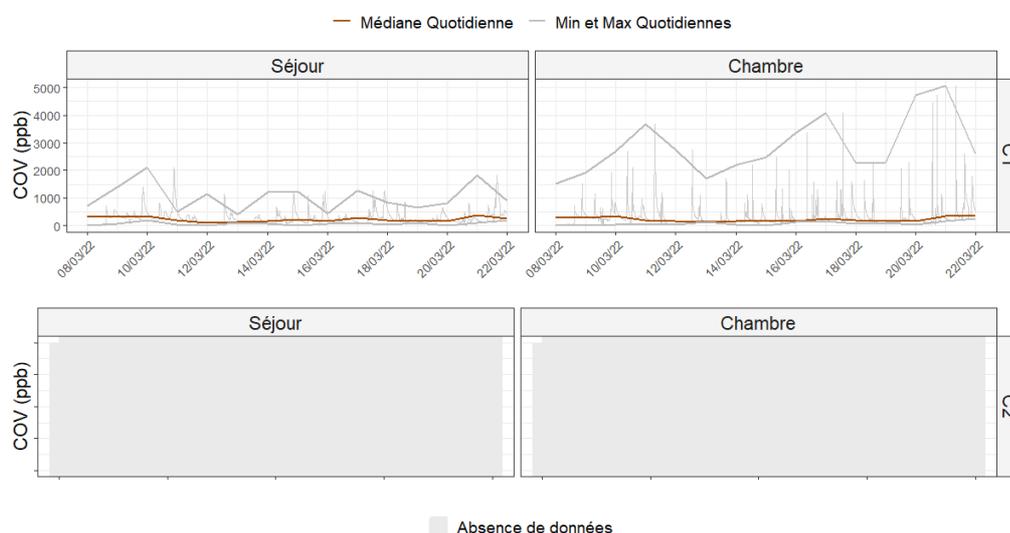


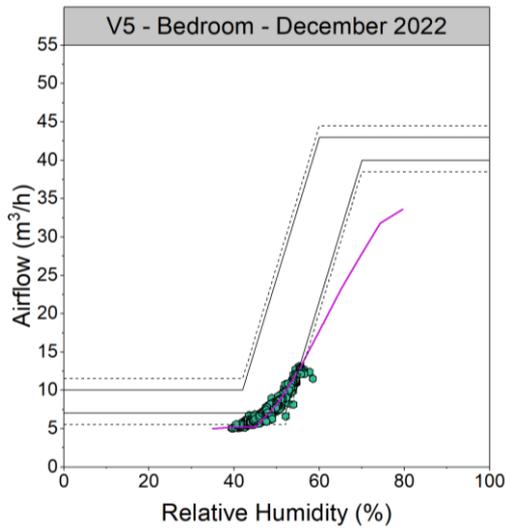
Figure 126 : Evolution temporelle des COV légers NEMOs dans les pièces de vie de l'appartement V2

L'importance de ces émissions dans la chambre se constate à la fois aux pics et aux maxima très élevés. Le seuil de saturation du capteur, à 5000 ppb, est atteint le 21 mars 2022. Le renouvellement d'air semble réussir à éliminer ces polluants car la médiane reste basse par rapport aux maxima et le minimum redescend à 0 tous les jours.

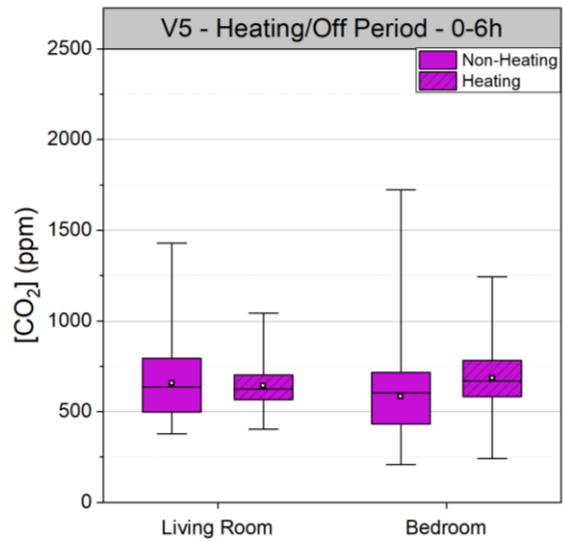
6.2.2 Impact des niveaux d'humidité faibles sur le fonctionnement de la ventilation et le confinement

Dans les chambres instrumentées des appartements V5 (Figure 127) et V6 (Figure 128), les niveaux d'humidité relative mesurée restent inférieurs à 60 %, ce qui a pour conséquence que les entrées d'air de ces chambres ne présentent jamais de débit important. La question se pose alors du risque de confinement dans ces chambres. Dans les deux cas, nous observons de très bonnes performances sur les concentrations en CO_2 dans les chambres, avec un icône de 0, malgré les débits

entrants limités. Cela s'explique par les habitudes des occupants de ces deux appartements, qui ont déclaré dormir avec la porte de leur chambre ouverte.

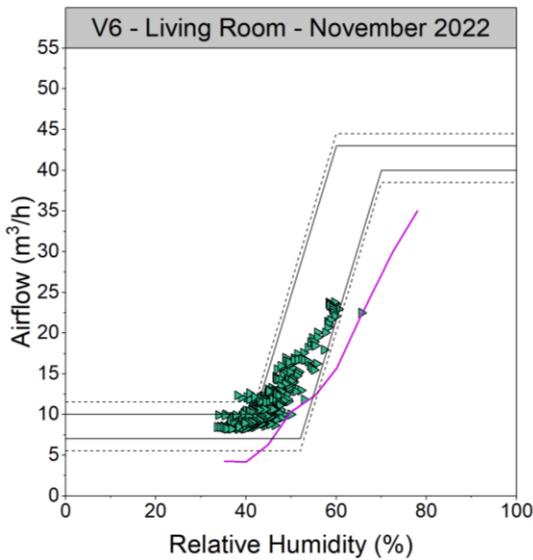


(a) Exemple de réponse de l'entrée d'air de la chambre instrumentée en décembre 2022

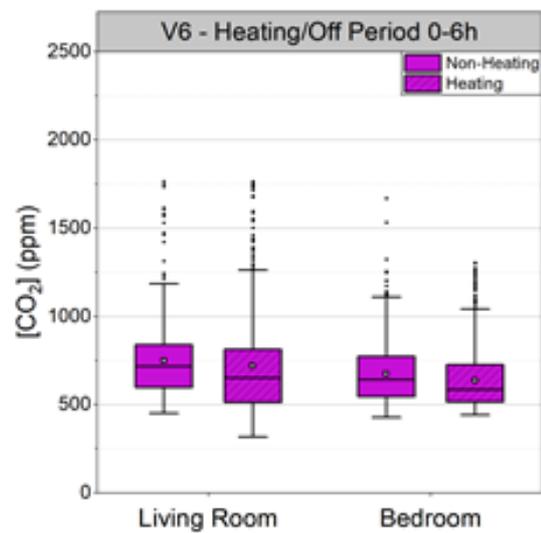


(b) Concentrations en CO₂ relevé dans la chambre instrumentée pendant la nuit en période de chauffe

Figure 127 : Situation de la chambre instrumentée - Appartement V5 - Site de Villeurbanne



(c) Exemple de réponse de l'entrée d'air de la chambre instrumentée en Novembre 2022



(d) Concentrations en CO₂ relevé dans la chambre instrumentée pendant la nuit en période de chauffe

Figure 128 : Situation de la chambre instrumentée - Appartement V6 - Site de Villeurbanne

7 ANALYSE DES COMPORTEMENTS DES HABITANTS

7.1 Contexte

7.1.1 Les sujets

Les sujets sont des résidents de l'immeuble HLM de Villeurbanne ou de Paris instrumentés dans le cadre de Performance 2. Il s'agit exclusivement de volontaires, qui ont accepté d'intégrer le projet après que celui-ci leur a été présenté.

Au total, 13 foyers ont accepté de participer à la première campagne de mesure hivernale QAI : 6 à Villeurbanne et 7 à Paris. Concernant la seconde campagne, 8 foyers ont participé : 4 à Villeurbanne et 4 à Paris.

En termes de classe d'âge des occupants principaux, les quinquagénaires sont les plus représentés (7/13), puis les quadragénaires (3/13), les sexagénaires (2/13) et un trentenaire. Nous n'avons pas recueilli de données sur leur catégorie socio-professionnelle.

Sur Paris, 6 des 7 foyers inclus dans le projet sont des familles avec un ou plusieurs enfants de plus de 20 ans. À Villeurbanne, 4 des 6 foyers hébergent une ou plusieurs personnes de manière ponctuelle.

Les personnes qui nous ont reçu et ont répondu à nos questions sont très majoritairement des femmes : 11 sur 13 questionnaires. Il est possible que cela soit lié au fait que les agents qui ont mené les entretiens soient également des femmes. Les deux hommes qui font exception à la règle et qui ont répondu aux questions n'ont pas de conjointe.

7.1.2 Le matériel

Le recueil d'information auprès des occupants poursuivait différents objectifs, qui se sont traduits par autant de matériel de travail.

- Diagnostic

Les **aspects techniques liés au bâtiment** ont fait l'objet d'un « diagnostic » rempli par les partenaires du projet en partie en amont des visites, en lien avec les offices HLM. Il concatène par exemple les données en lien avec les équipements, qui ont un impact sur la QAI mais qui sont peu connues des occupants, ou encore des éléments qui peuvent être relevés visuellement lors de la visite initiale sans interroger les occupants : matériaux de construction et orientation des pièces, par exemple.

- Entretien semi-directif

Les **habitudes de vie des occupants**, pour les aspects qui influent sur la QAI, ont été recueillies au cours d'un entretien semi-directif.

L'entretien reposait sur une grille dont l'ordre et la formulation des questions a fait l'objet d'un travail avec une psychologue sociale (Stéphanie Bordel) du Cerema afin

de limiter les biais dans les réponses. Le questionnaire est constitué de deux types de questions :

- Des **questions ouvertes**, qui visent à identifier les connaissances et représentations des répondants au sujet de la qualité de l'air intérieur ;
- **Des questions fermées ou à choix multiples**, qui cherchent à compléter les informations sur les déterminants de la QAI en lien avec les activités et habitudes des occupants. Sont par exemple recherchés les travaux d'embellissement ou les changements de mobilier, dont seuls les occupants peuvent avoir connaissance, et qui ont un impact à moyen terme sur la QAI.

Les questions ouvertes posées sont listées ci-dessous. Elles n'ont pas été posées dans l'ordre de la liste, d'autres questions ayant pu être intercalées, comme réfléchi avec la psychologue sociale pour limiter au maximum les réponses induites.

1. Pour vous, qu'est-ce que la « qualité d'air » ? Pourriez-vous me donner 5 mots ?
2. Que pouvez-vous me dire de votre qualité d'air intérieur ?
Le travail en amont avec la psychologue sociale a abouti à ne pas « définir » la qualité de l'air, dont la connotation scolaire pouvait bloquer certaines personnes.
3. Est-ce que vous connaissez votre ventilation ? A quoi sert-elle à votre avis ?
4. Est-ce que vous la trouvez efficace ? Pourquoi ?

L'objectif est d'approcher les représentations des occupants sur le sujet d'étude, la QAI et la ventilation, car elles peuvent déterminer en partie les comportements.

Quelques exemples de questions fermées ou à choix multiples sont reportés ci-dessous. Les questions visent à objectiver les comportements des occupants significatifs vis-à-vis de différents déterminants de la QAI :

- Les sources d'émission : « Utilisez-vous de l'encens ? de l'huile essentielle ? des sprays désodorisants ? des bougies parfumées ? des cosmétiques type parfum ou déodorant ? » En cas de réponse positive, la fréquence approximative sera alors demandée (« tous les jours ? une fois par semaine ? par mois ? ») ainsi que les pièces concernées.
- Les actions de renouvellement d'air : « Est-ce que vous trouvez votre logement confortable ? Ressentez-vous le besoin d'ouvrir les fenêtres ? Est-ce que vous les ouvrez souvent ? A quel moment de la journée : plutôt matin, le soir, les deux ». Dans cet exemple, on évite d'utiliser le terme d'« aération », qui sonne comme une pratique à avoir, et le sujet est abordé sous l'angle du besoin d'ouvrir les fenêtres, afin de ne pas trop orienter les réponses.
- La perception des occupants : « Vous ou une autre personne de votre logement a-t-elle ressenti des désagréments tels que des maux de tête, de la fatigue ou autre ? ». Sans être une preuve tangible, ce type de symptôme

peut orienter vers différentes problématiques de qualité d'air, depuis le confinement en passant par l'exposition à un ou plusieurs polluants. D'autre part, l'inconfort engendré peut mener l'occupant à différentes actions correctives, comme par exemple l'achat d'un purificateur d'air. Ces actions seront à analyser car elles peuvent influencer sur la QAI.

- Sont étudiés ci-après les termes utilisés par les occupants, leur fréquence d'occurrence, voire leur rang (c'est-à-dire s'ils ont été mentionné en premier, deuxième, etc.) parmi les mots énoncés. Certains propos tenus seront rapprochés de comportements déclarés, ceci afin d'interroger le lien entre représentations, connaissances et actes.

- Carnet de bord

Enfin, les **actions ponctuelles** influençant la QAI sur le court terme, **durant les campagnes de mesures**, devaient être consignées par les occupants, au fur et à mesure, dans un carnet de bord. Ce dernier se divise en 5 rubriques thématiques : préparation des repas, tâches ménagères, usage de la salle de bain, aération, bricolage.

7.1.3 Procédure

Anjos et Aereco sont les premiers à être intervenus dans les logements, pour prélever les terminaux de ventilation afin de les tester en laboratoire. Ils sont intervenus à nouveau quelques semaines plus tard afin de les remettre en place. Les manipulations lors de cette seconde visite ont pu être longues (plusieurs heures) et se sont accompagnées d'explications sur les systèmes. Ils avaient par ailleurs remis de la documentation technique sur les systèmes de ventilation et les bonnes pratiques d'entretien aux occupants lors de leur recrutement au sein du projet.

Les équipes du Cerema ne sont intervenus qu'après cette première phase de dépose/repose des terminaux de ventilation, dans l'objectif d'instrumenter les logements. La pose des capteurs était conçue comme une intervention rapide. Elle devait s'accompagner de la remise du carnet de bord et de la demande de le remplir aussi scrupuleusement que possible afin de faciliter l'analyse des résultats par la suite. Il était convenu de donner le moins d'information possible sur les déterminants de la QAI lors de cette visite afin de limiter les interférences sur le comportement des occupants durant les quinze jours de campagne.

À la fin de cette première campagne, les équipes du Cerema ont réalisé les entretiens semi-directifs. Les agentes intervenant sur Villeurbanne ont suivi une sensibilisation par la psychologue sociale sur la conduite d'entretien, afin d'éviter autant que possible de biaiser les réponses. À la suite d'imprévus sur les ressources humaines affectées au projet, l'équipe qui est intervenue sur le bâtiment de Paris n'a pas bénéficié de la même préparation. La procédure d'entretien a pâti de cette défaillance, en particulier de l'absence d'enregistrement des entretiens et de leur retranscription parcellaire. La procédure a donc différé entre Villeurbanne et Paris.

Les contextes dans lesquels ont été menés ces entretiens sont distincts, tant sur le plan géographique que temporel.

En effet, l'immeuble de Paris se situe au voisinage immédiat d'un bâtiment ayant subi des travaux durant une longue période, qui a exposé ses occupants à différentes nuisances, dont une problématique d'empoussièrement, largement rapportée durant les entretiens. Ce dernier s'est déroulé en décembre 2021, en plein confinement lié à la Covid 19, et plus spécifiquement durant une période de très forte médiatisation des protocoles d'aération voire de traitement de l'air des écoles.

Les entretiens menés sur Villeurbanne l'ont été en mars de l'année suivante, alors que la tension autour de la pandémie était moins forte et les confinements levés. Pour l'ensemble de ces raisons, les analyses des entretiens de chaque site seront menées séparément.

La seconde campagne s'est déroulée selon la même procédure, avec un entretien allégé et des carnets de bords remodelés en fonction des remarques de forme des occupants, afin de rendre son utilisation plus ergonomique.

7.2 Résultats

Plusieurs résidents n'avaient pas bien compris l'ampleur de la participation qui leur était demandée, en particulier en termes de disponibilité pour les campagnes de mesures menées par le Cerema. Cela explique les défections observées entre les deux campagnes.

7.2.1 Qualité de l'air

Sont analysées dans cette partie les réponses données aux questions 1 et 2 présentées ci-dessus.

- Paris

Le terme le plus mentionné vis-à-vis de la qualité de l'air est celui d'« aération », qui est revenu dans 5 des 7 interviews. Il ressort d'ailleurs également par son positionnement : une fois en premier rang et deux fois au second rang.

La notion de « pollution », ou plus largement de « polluant » arrive directement ensuite en termes de fréquence, avec 4 personnes sur 7. La forte association entre « qualité d'air » et « pollution » s'illustre également au niveau du rang puisque c'est le premier mot utilisé pour deux entretiens. Les poussières venues de l'extérieur sont particulièrement mentionnées, en particulier lorsqu'il s'agit de décrire sa propre qualité d'air intérieur, en lien avec les travaux de l'immeuble adjacent. Il est à noter que la préoccupation autour de la pollution de l'air, largement partagée comme on vient de le voir, n'engendre pas nécessairement des comportements favorables. En effet, tous les occupants ont déclaré utiliser « fréquemment » au moins un produit néfaste pour l'air intérieur : javel, encens, bougies parfumées, etc.

Des notions positives sont également associées à la notion de qualité d'air, avec des termes comme « bien-être », « ambiance saine » ou « bien respirer ». Des actions correctives sont citées pour améliorer sa QAI, comme la filtration ou l'épuration.

- Villeurbanne

Le terme qui revient le plus, dans 4 entretiens sur 6, est celui de « pollution ». Il est fait mention de « polluant », voire même de « composition de l'air ». Les polluants sont évoqués par deux fumeurs, qui en ont énuméré une liste. À noter qu'ils ont tous deux omis le tabac, et que les polluants chimiques spécifiques de l'air intérieur n'ont pas non plus été cités.

Les impacts sur la santé ont également été évoqués dans quatre entretiens, sous des formes différentes. Il s'agit de foyers dans lesquels au moins une personne est victime de problématiques de santé respiratoire (asthme, allergies). Sont alors évoquées spontanément, en lien avec la qualité de l'air, les « maladies respiratoires » ou l'« absence d'allergie », ainsi que la notion de « nocivité ».

Le terme d'aération n'apparaît dès la première question (les 5 mots pour « qualité d'air ») que dans un entretien, en revanche il ressort comme l'une des explications, voire justifications, les plus couramment évoquées lorsque les personnes jugent leur air intérieur « bon ».

Les aspects retenus pour qualifier sa propre QAI sont ceux de la température, de l'humidité, et de l'absence d'odeur (désagréable). Un lien direct est établi entre sa QAI et le « renouvellement d'air ». Ce dernier influe plutôt positivement sur la perception de sa QAI chez la moitié des répondants, qui jugent leur air sain grâce à leurs pratiques d'aération. Néanmoins l'air extérieur est jugé comme source de pollution, ce qui fait considérer à un tiers des sujets, dont l'un des fumeurs, que leur QAI n'est pas bonne. Les questions posées sur ce sujet ont engendré des réflexions chez les personnes répondantes. Deux se sont notamment interrogées sur la dynamique spatiale des polluants extérieurs : elles ont supposé que la qualité d'air extérieure était moins dégradée au niveau de leur appartement car ceux-ci se situent en hauteur.

- Tendances générales

Si la pollution est très largement associée à la notion de qualité d'air, les polluants de l'air mentionnés sont généralement issus de sources extérieures. Ceux de l'air intérieur, en particulier ceux générés par les occupants eux-mêmes, ne sont pas mentionnés : tabac, produits d'entretien parfois agressifs, bougies, encens, sprays désodorisants, etc. Le tabac n'est absolument jamais cité par les fumeurs, lesquels sont pourtant parmi les personnes qui ont le plus axé leurs propos sur des polluants, avec parfois des listes étayées de molécules ou de sources, quasi-exclusivement d'origine extérieure.

Le champ lexical du ressenti est utilisé pour qualifier sa propre qualité d'air intérieur, comme c'était le cas dans l'étude Nudge'air, où le « discours sur l'air intérieur est dominé par les sensations, liées à la perception d'informations environnementales

olfactives, visuelles, irritatives et hygrothermiques ». En revanche, les résultats diffèrent ici de Nudge'air sur la connaissance des sources de pollution de l'air intérieur. En effet, si dans Nudge'air les sources d'altération de la QAI semblent « connues », même de manière « parcellaire », ce sont ici quasi-exclusivement des sources extérieures qui sont citées. La « confusion » entre air intérieur et extérieur était néanmoins déjà relevée dans Nudge'air.

Le phénomène de focalisation sur les sources de pollutions extérieures est encore accentué lorsqu'il est question de juger sa QAI. Pour tous les occupants qui considèrent avoir une mauvaise QAI, les causes nommées se cristallisent autour des apports de l'extérieur : poussières, tabagisme sur le trottoir sous les fenêtres, pollution de l'air en ville. Pour les occupants pensant avoir une bonne QAI, les explications sont également très liées à l'air extérieur puisqu'elles résident dans le bon renouvellement d'air, via l'aération en général, et dans quelques cas, grâce au système de ventilation également.

Le déterminant de la QAI le plus conscientisé est donc son interaction avec le milieu extérieur, qu'il soit jugé favorablement (dans le cas du renouvellement d'air), ou défavorablement (comme une source de polluants entrants). La question des émissions dans son propre logement, liées à ses propres activités ou au bâtiment et à ses équipements, reste largement sous-représentée.

On ne relève pas d'influence *consciente* de la covid sur les comportements. Le terme n'a jamais été mentionné lorsqu'il était question de l'air. En revanche, le terme d'aération reste l'un des plus fréquemment cités, ce qui pourrait être lié à la forte médiatisation des protocoles sanitaires pendant la pandémie. Une famille a d'ailleurs mis en place une action directement issue de la crise sanitaire à travers l'achat d'un épurateur d'air.

7.2.2 Ventilation

- Paris

La majeure partie des occupants interrogés à Paris (5/7) indique que la ventilation sert au renouvellement d'air. Pour les deux exceptions, l'une n'a pas répondu à la question et l'autre déclare ignorer l'utilité de ce système. Ces deux personnes sont également celles qui indiquent le moins aérer, et les deux seules qui n'ont pas mentionné l'aération dans leur description de la qualité d'air (cf. question précédente).

Au-delà du rôle de la ventilation, les connaissances sur ses composantes et son mode de fonctionnement semblent beaucoup moins partagées. Ainsi, seules 2 des 7 interrogés sont en capacité de préciser à quoi sert le détalonnage, dont l'une l'a appris des pompiers durant la campagne de mesure, à cause d'un incendie qui s'était déclaré dans l'immeuble. Par ailleurs, 3 personnes sur 7 déclarent garder systématiquement ouverte la fenêtre de leur cuisine. Cette habitude risquant de shunter le système de ventilation, et donc de nuire à son efficacité, on peut supposer que le fonctionnement de la ventilation n'est pas complètement compris.

- Villeurbanne

Les participants de Villeurbanne ont unanimement indiqué que le système de ventilation avait pour objet de renouveler l'air du logement. Une personne a évoqué la notion de balayage (sans la nommer ainsi) à travers « la circulation de l'air entre les entrées d'air et les bouches ».

L'efficacité du système fait l'objet d'avis mitigés : 2 positifs, 2 qui ne savent pas, 1 négatif et 1 qui n'a pas répondu. Pour les personnes considérant leur ventilation efficace, l'une part de ce principe car elle connaissait le projet Performance 1 qui comprenait entre autres un suivi de l'installation de cet équipement. La seconde évoque simplement qu'elle « n'a pas la sensation de suffoquer ». La personne considérant son système comme non efficace base ce jugement sur l'apparition d'odeurs et de buée lorsqu'elle cuisine. Deux personnes se plaignent du bruit émis par la ventilation, dont l'une décrit des sifflements au niveau des entrées d'air.

Notre entretien ne demande pas explicitement si les terminaux de ventilation sont entretenus, mais deux personnes le mentionnent spontanément. Il s'agit de personnes ayant une pratique très intensive du ménage (ménage quotidien).

Sur le plan technique, seule une personne identifie à quoi sert le détalonnage. Il s'agit d'une personne qui s'est largement documentée sur la QAI, en particulier sur les sources de polluants, dans un objectif d'éco-responsabilité. En revanche, 3 personnes reconnaissent qu'elles n'avaient pas remarqué le détalonnage, et qu'elles ignorent son utilité. Une personne imagine que les entrées d'air filtrent l'air entrant.

- Tendances générales

Le lien entre système de ventilation et renouvellement d'air ressort comme bien compris dans le cadre des entretiens menés. Il est à rappeler que cette proportion importante de personnes connaissant l'utilité d'un système de ventilation est rencontrée dans le cadre d'un projet au sein duquel, comme précisé précédemment, elles avaient déjà bénéficié de l'intervention de professionnels sur les terminaux présents dans leur logement. Elles ont d'autre part reçu de la documentation technique sur le sujet en début de projet. Pour l'ensemble de ces raisons, au-delà des considérations sur la taille de l'échantillon, ces résultats ne peuvent pas être considérés comme représentatifs de la population générale. Au-delà du rôle de la ventilation, les connaissances sur ses composantes et son mode de fonctionnement semblent beaucoup moins partagées, et ce malgré le fait que la population peut être considérée comme relativement sachante, comme expliqué ci-dessus.

Paradoxalement, alors même que la qualité de l'air extérieur semble générer de nombreuses inquiétudes, il ressort des entretiens que le fait d'aérer ou d'avoir un système de ventilation concourt à la QAI. Ceux qui étaient inquiets de la QAE ne questionnent pas pour autant le fait de faire entrer des polluants lorsque la ventilation est abordée.

CONCLUSIONS

Après 15 ans, les systèmes hygroréglables étudiés dans Performance 2, qui ont été installés sur deux bâtiments de logements sociaux, continuent de moduler correctement les débits d'air en fonction de l'humidité. Les terminaux répondent aux sollicitations en humidité comme initialement. Malgré des variations d'occupation et des conditions environnementales, les débits d'air extraits restent cohérents avec ceux de Performance 1 et les consommations énergétiques sont similaires. Concernant les risques de condensation, seul un appartement a dépassé les seuils d'humidité en raison d'un dégât des eaux. Pour le CO₂, seuls deux appartements montrent des concentrations élevées, avec un risque de confinement confirmé dans l'un d'eux. Globalement, les concentrations de CO₂ restent sous le seuil de 1000 ppm, comme dans Performance 1. Performance 2 a donc mis en évidence la bonne durabilité de ces deux systèmes étudiés, avec un maintien après 15 ans d'utilisation des performances attendues à réception.

Au-delà de la durabilité du système, les analyses complémentaires sur le CO₂ et l'humidité relative, ainsi que les nouvelles analyses sur les COV, formaldéhyde et PM_{2.5} apportent des informations quant au lien entre fonctionnement de la ventilation et QAI. Ces analyses montrent une augmentation des concentrations de CO₂ en période de chauffe, particulièrement la nuit, avec quelques situations de confinement dans des chambres. L'humidité relative est généralement satisfaisante, malgré quelques cas de sécheresse dans certaines chambres et séjours. Les résultats de formaldéhyde sont globalement bons mais limités par des mesures à court terme et saisonnières. Les COV sont complexes à évaluer, avec des concentrations plus élevées dès utilisation de produits émissifs, notamment encens, désodorisants ou bougies parfumées de façon quotidienne. On identifie cependant une propagation moins importante dans les autres pièces lorsque la ventilation fonctionne correctement. Les concentrations de PM_{2.5} sont généralement inférieures aux taux extérieurs sauf dans les logements fumeurs, où les concentrations dépassent fréquemment les valeurs guides. L'utilisation de bougies et d'encens augmente également les PM_{2.5}. On observe donc que lorsque le système de ventilation fonctionne correctement, la QAI est acceptable pour des émissions raisonnables de polluants. En revanche, la ventilation ne suffit pas à évacuer les fortes émissions dues notamment au tabagisme ou à l'utilisation intense et quotidienne de produits d'ambiance comme l'encens ou les désodorisants d'intérieur. En effet, l'analyse de chaque situation spécifique pour laquelle des concentrations élevées de certains paramètres ont été observées a été réalisée, en tenant compte du fonctionnement du système de ventilation, des déclarations des occupants et des diagnostics initiaux. L'analyse des débits totaux extraits montrent que la ventilation hygroréglable s'adapte au cas de sur-occupation, avec débits plus élevés, permettant un bon renouvellement d'air et de bonnes performances en matière de QAI, malgré des

concentrations élevées en COV dues à l'utilisation de produits parfumés. En revanche, la quasi-absence de production d'humidité, entraînant un logement globalement en sous-débit, entraîne un confinement et des concentrations élevées en COV. Des situations de confinement nocturne dans des chambres ont été identifiées, et correspondent soit à un fonctionnement limité de certaines entrées d'air identifiées en laboratoire, soit à une sur-occupation de la chambre. On retrouve des cas de concentrations en COV qui correspondent à une utilisation de nombreux produits parfumés, et des fortes concentrations de $PM_{2.5}$ dans les logements fumeurs. Ces analyses montrent comment les spécificités de chaque logement et les habitudes des occupants influencent la QAI, malgré un fonctionnement majoritairement bon du système de ventilation hygro-réglable.

L'analyse des comportements des occupants et de leur vision de la QAI et de la ventilation a montré que les occupants mentionnent principalement des polluants extérieurs, ignorant souvent ceux générés à l'intérieur (tabac, produits d'entretien, bougies, etc.). Ceux qui estiment avoir une mauvaise QAI blâment les apports extérieurs, tandis que ceux qui pensent avoir une bonne QAI l'attribuent à un bon renouvellement d'air. La connaissance du lien entre ventilation et renouvellement d'air est bien comprise, surtout grâce aux interventions professionnelles et à la documentation reçue dans le cadre du projet. Cependant, les connaissances spécifiques sur les composantes et le fonctionnement de la ventilation restent limitées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] F. Engdahl, Evaluation of Swedish ventilation systems, *Build. Environ.* 33 (1998) 197–200. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(97\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(97)00040-1).

[2] R. Jobert, La ventilation mécanique des bâtiments résidentiels neufs : État de l'art général, Analyse qualitative et technique des dysfonctionnements, CETE de Lyon, 2012.

[3] OQAI, Etat de la ventilation dans les logements français en images, in: Atelier OQAI 16 Juin 2008, 2008.

[4] Cerema, Exist'air - Campagne de mesures de perméabilité à l'air des logements existants construits avant 2005 - Tâche 7 : analyse de la base de données, 2018.

[5] Cerema, Exist'air2 - Campagne de mesures de perméabilité à l'air des logements existants construits avant 2005, 2021.

[6] F. Durier, P. Wouters, M. De Strycker, G. Guyot, M. Sherman, V. Leprince, M. Urbani, Feasibility Study EPBD19a. Task 1. Existing regulations, standards and guidelines on the inspection of ventilation systems, and other relevant initiatives and projects, European Commission, 2019.

[7] Parlement Européen, Directive EPBD - Directive (EU) 2018/ of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>.

[8] G. Guyot, I.S. Walker, M.H. Sherman, Performance based approaches in standards and regulations for smart ventilation in residential buildings: a summary review, *Int. J. Vent.* 18 (2019) 96–112. <https://doi.org/10.1080/14733315.2018.1435025>.

[9] Development of an assessment methodology for IAQ ventilation performance in residential buildings: An investigation of relevant performance indicators - ScienceDirect, (n.d.). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221009980> (accessed April 7, 2022).

[10] IEA EBC, IEA-EBC Annex 68 : Indoor Air Quality Design and Control in Low Energy Residential Buildings, (2018). <http://www.iea-ebc-annex68.org/>.

[11] Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, Qualité de l'air et confort dans les bâtiments performants en énergie : l'éclairage de l'OQAI, (2017). <https://presse.ademe.fr/2017/03/etude-qualite-de-lair-et-confort-dans-les-batiments-performants-en-energie.html>.

[12] Observatoire de la qualité de l'air intérieur, Campagne nationale logements, état de la qualité de l'air dans les logements français - rapport final, 2006.

[13] Groupe spécialisé n°14.5 "EQUIPEMENTS / Ventilation et systèmes par vecteur air," VMC simple flux hygroréglable - règles de calculs pour l'instruction d'une demande d'avis technique (révision 01), (2015).

[14] Haut Conseil de Santé Publique, Avis relatif à l'adaptation des mesures d'aération, de ventilation et de mesure de dioxyde de carbone dans les établissements recevant du public pour maîtriser la transmission du SARS-CoV-2, (2021).

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwikzs3Kn8b4AhX7h_OHHaZCC6YQFnoECAQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.hcsp.fr%2FExplore.cgi%2FTelecharger%3FNomFichier%3Dhcspa20210428_covaravenetmesducodanleserp.pdf&usg=AOvVaw2CnXYOf2DTluVI5ZPkWK_A (accessed June 24, 2022).

[15] R. d'expertise collective Avis de l'Anses, Mise à jour des valeurs guides de l'air intérieur - le formaldéhyde, 2018.

[16] [écologie.gouv.fr](https://www.ecologie.gouv.fr), Tableau des normes Qualité de l'Air, (n.d.). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj1uZP51M34AhXStqQKHdEwAo8QFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ecologie.gouv.fr%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F01_Tableau-Normes-Seuils%2520r%25C3%25A9glementaires.pdf&usg=AOvVaw0zFTGjLSDo7uG14-FcKXD5 (accessed June 27, 2022).

[17] Centre européen de l'environnement et de la santé de l'Organisation Mondiale de la Santé, Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air - particules (PM2.5 et PM10), ozone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre et monoxyde de carbone, (2021). <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/346555/9789240035423-fre.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

ANNEXES

Annexe A : caractéristiques techniques des capteurs utilisés pour les paramètres de qualité d'air intérieur

- CO₂

	NEMos TC	NEMos XT	Capteurs embarqués Paris	Capteurs embarqués Villeurbanne
Unité	ppm		ppm	ppm
Seuil détection	1 ppm		1 ppm	1ppm
Seuil saturation	5 000 ppm		Dépend des capteurs (aux alentours de 2000ppm)	Dépend des capteurs (aux alentours de 2000ppm)
Incertitude	± 50 ppm ou 3% de la valeur mesurée		± 50 ppm ou 2% de la valeur mesurée	± 40 ppm ou 3% de la valeur mesurée
Pas de temps	10 minutes		1 minute	2 secondes
Durée mesure	15 jours * 2 ans		Octobre/Novembre 2021 à mai 2024	Février 2022 à juin 2024
Re-calibrage	Inactivée à partir de la campagne 1 sur Lyon et 2 sur Paris Réalisé pendant la révision par Ethera avant la campagne 2 à Paris, et réalisé manuellement avant la campagne 2 à Lyon		Chaque mesure de CO ₂ est associée à un auto-calibrage grâce au second canal de mesure	1 fois/semaine Calibration des capteurs en 2022
Vigilances	Recalibrage malgré tout sur la campagne 1? Interaction avec HR		L'auto-calibrage est indépendant du type d'occupation	

- Formaldéhyde

	NEMos TC	NEMos XT	Capteurs embarqués Paris	Capteurs embarqués Villeurbanne
Unité	µg/m ³		Non concernée	Non concernée
Seuil détection	1.85 µg/m ³		Non concernée	Non concernée
Seuil saturation	246		Non concernée	Non concernée
Incertitude	30% (information Ethera)		Non concernée	Non concernée
Pas de temps	Donnée sur 10 minutes mais mesure sur 2h glissantes		Non concernée	Non concernée
Durée mesure	15 jours * 2 ans		Non concernée	Non concernée
Re-calibration	Réalisé pendant la révision par Ethera avant la campagne 2 à Paris Réalisé manuellement avant la campagne 2 à Lyon		Non concernée	Non concernée
vigilances	Valable pour une t°C entre 10 et 30°C, une HR comprise entre 30 et 70%		Non concernée	Non concernée

- COV

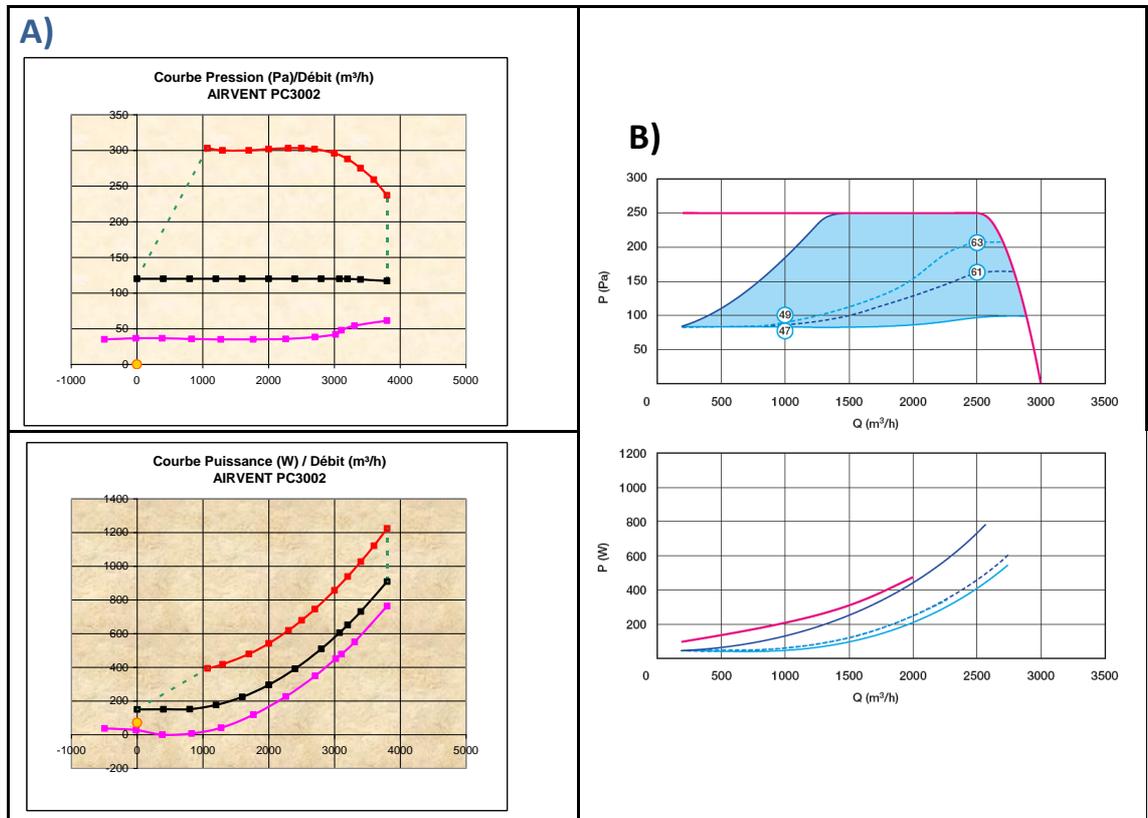
	NEMos TC	NEMos XT	Capteurs embarqués 1 Paris	Capteurs embarqués 2 Paris	Capteurs embarqués Villeurbanne
Unité	COV légers Ppb/ppm		COV _{total} en ppb	VOC Index : 1 à 500	Non concernée
Seuil détection	30ppb		Non indiqué (Résolution : Ethanol and H2 signals => 0.2% of meas. Value)	<0.05 ppm Or <10 % of concentration setpoint (the larger)	Non concernée
Seuil saturation	5 ppm		Ethanol signal : 1000 ppm mesurable 30 ppm spécifié H2 signal : 1000 ppm mesurable	500 (VOC Index) Ethanol in clear air : 1000 ppm mesurable 30 ppm spécifié	Non concernée

		3 ppm spécifié Explication : Mesurable : max mesurable mais spé. métro. non assurées Spécifié : max respectant les spécifications métro	Explication : Mesurable : max mesurable mais spé. métro. non assurées Spécifié : max respectant les spécifications métro	
Incertitude	40 ppb	Ethanol signal : ± 15% meas. (typ) H2 signal : ± 10% meas. (typ) (Typ : 90% of the sensors)	Pas d'info. Juste un écart entre les capteurs : <±15 du VOC Index points Or <±15 % m.v. (the larger)	Non concernée
Pas de temps	10 minutes	1 minute	1 minute	Non concernée
Durée mesure	15 jours * 2 ans	Octobre/Novembre 2021 à mai 2023	Octobre/Novembre 2021 à mai 2024	Février 2022 à juin 2024
recalibrage	Entre les campagnes	Recalibrage 1 fois par semaine	La valeur 100 représente la moyenne sur 24h	Non concernée
Vigilance		Pièces concernées : Toutes les pièces instrumentées + station météo. Reste une mesure relative du fait du principe de recalibrage	Pièces concernées : Toutes les pièces instrumentées + station météo. Reste une mesure relative du fait du principe de recalibrage	Non concernée
Attention, on ne mesure pas la même chose entre les NEMOs (COV légers jusqu'à C4 – sans le C1) et les capteurs embarqués (COV totaux)				

- PM 10, 2.5, 1

	NEMos TC	NEMos XT	Capteurs embarqués Paris	Capteurs embarqués Villeurbanne
Unité	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Non concernée
Seuil détection	1		Non indiqué	Non concernée
Seuil saturation	1 000		1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Non concernée
Incertitude	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ou 15% de la valeur		0 à 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 100 à 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: $\pm 10 \%$ m.v	Non concernée
Pas de temps	10 minutes		1 minute	Non concernée
Durée mesure	15 jours * 2 ans		Octobre/Novembre 2021 à mai 2024	Non concernée
Re-calibrage	Entre les campagnes		Aucun	Non concernée
Vigilance	PM ₁₀ seulement évaluée sur la base de la mesure PM _{2.5} PM ₁ pas de données sur la métrologie	Pas de PM ₁	PM _{2.5} uniquement	Non concernée

Annexe B : Données techniques du caisson de ventilation – Site performance 2



A) Courbes caractéristiques du caisson utilisé pour performance 1. B) Courbes caractéristiques du caisson utilisé pour performance 2. Débit maximal estimé en 2007 : 2195 m³/h

Annexe C : Fiches-appartement

Résumé

La tâche 3 vise à analyser les données issues des différentes campagnes du projet pour plusieurs objectifs : (1) Qualifier la durabilité des performances des systèmes de ventilation hygroréglable, (2) Mieux comprendre l'interaction entre le système de ventilation et la qualité de l'air intérieur et (3) Expliquer les performances ou contre-performances observées par une analyse approfondie des comportements des occupants et des résultats de mesures.

Analyse bibliographique

L'analyse des études sur la durabilité des systèmes de ventilation révèle une absence notable de données sur ce sujet, avec seulement la Suède qui impose une inspection obligatoire tous les 3 ou 6 ans depuis 1991. Cette analyse met également en lumière l'absence d'études combinant des mesures à réception et en occupation plusieurs années après la réception, limitant ainsi l'évaluation de l'évolution des performances dans le temps. L'analyse des approches performantielles et des approches de modélisation existantes montre que la plupart des réglementations se basent sur les taux de renouvellement d'air et les débits d'air. Des indicateurs ont été identifiés comme pertinents pour la QAI, basés sur leur impact sur la santé et la méthode de mesure définie : CO₂ et humidité relative, incontournables pour qualifier les performances des systèmes de ventilation, en particulier hygroréglable, le formaldéhyde, identifié comme polluant ubiquitaire de l'air intérieur lors des campagnes nationales logement, avec un risque de concentration importante, les COV ainsi que les particules fines (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁). L'analyse de différentes études, dont celles produites par l'Annexe 68 et celles de l'OQAI a permis de proposer différents seuils pour les divers polluants retenus, basés notamment sur des études épidémiologiques et toxicologiques, et des campagnes de mesures grande échelle dans les logements.

Durabilité des systèmes de ventilation hygroréglables

La caractérisation de l'évolution des performances repose sur la comparaison des résultats théoriques, des données à réception (Performance 1) et après 15 années d'utilisation (Performance 2). Les analyses se concentrent sur l'évolution des performances énergétiques et des paramètres de confort (CO₂ et humidité relative). Après 15 ans, les systèmes hygroréglables continuent de moduler correctement les débits d'air en fonction de l'humidité. Les terminaux répondent aux sollicitations en humidité comme initialement. Malgré des variations d'occupation et des conditions environnementales, les débits d'air extraits restent cohérents avec ceux de Performance 1 et les consommations énergétiques sont similaires. Concernant les risques de condensation, seul un appartement a dépassé les seuils d'humidité en raison d'un dégât des eaux. Pour le CO₂, seuls deux appartements montrent des concentrations élevées, avec un risque de confinement confirmé dans l'un d'eux. Globalement, les concentrations de CO₂ restent sous le seuil de 1000 ppm, comme dans Performance 1.

Caractérisation de la QAI dans les logements étudiés

Au-delà de la durabilité du système, ce projet cherche à caractériser les performances des systèmes hygroréglables B étudiés et installés sur les 2 bâtiments de l'étude en matière de QAI, en proposant des analyses complémentaires sur le CO₂ et l'humidité relative, et en apportant des résultats concernant les concentrations en COV, formaldéhyde et PM_{2.5}. Les analyses

montrent une augmentation des concentrations de CO₂ en période de chauffe, particulièrement la nuit, avec quelques situations de confinement dans des chambres. L'humidité relative est généralement satisfaisante, malgré quelques cas de sécheresse dans certaines chambres et séjours. Les résultats de formaldéhyde sont globalement bons mais limités par des mesures à court terme et saisonnières. Les COV sont complexes à évaluer, avec des concentrations plus élevées dès utilisation de produits émissifs, notamment encens, désodorisants ou bougies parfumées de façon quotidienne. On identifie cependant une propagation moins importante dans les autres pièces lorsque la ventilation fonctionne correctement. Les concentrations de PM_{2,5} sont généralement inférieures aux taux extérieurs sauf dans les logements fumeurs, où les concentrations dépassent fréquemment les valeurs guides. L'utilisation de bougies et d'encens augmente également les PM_{2,5}.

Analyse des situations particulières

Chaque situation spécifique pour laquelle des concentrations élevées de certains paramètres ont été observées a été analysée en détail, en tenant compte du fonctionnement du système de ventilation, des déclarations des occupants et des diagnostics initiaux. L'analyse des débits totaux extraits montrent que la ventilation hygroréglable s'adapte au cas de sur-occupation, avec débits plus élevés, permettant un bon renouvellement d'air et de bonnes performances en matière de QAI, malgré des concentrations élevées en COV dues à l'utilisation de produits parfumés. En revanche, la quasi-absence de production d'humidité, entraînant un logement globalement en sous-débit, entraîne un confinement et des concentrations élevées en COV. Des situations de confinement nocturne dans des chambres ont été identifiées, et correspondent soit à un fonctionnement limité de certaines entrées d'air identifiées en laboratoire, soit à une sur-occupation de la chambre. On retrouve des cas de concentrations en COV qui correspondent à une utilisation de nombreux produits parfumés, et des fortes concentrations de PM_{2,5} dans les logements fumeurs. Ces analyses montrent comment les spécificités de chaque logement et les habitudes des occupants influencent la QAI, malgré un fonctionnement majoritairement bon du système de ventilation hygroréglable.

Analyse des comportements des occupants

Le recueil d'informations auprès des occupants visait à comprendre leurs habitudes de vie influençant la QAI via des entretiens semi-directifs, préparés avec une psychologue sociale pour minimiser les biais. Les questions ouvertes et fermées visaient à identifier leurs connaissances sur la QAI et les déterminants liés à leurs activités. Les occupants devaient aussi consigner les actions ponctuelles influençant la QAI dans un carnet de bord. Une analyse des mots utilisés pour parler de la QAI a montré que les occupants mentionnent principalement des polluants extérieurs, ignorant souvent ceux générés à l'intérieur (tabac, produits d'entretien, bougies, etc.). Ceux qui estiment avoir une mauvaise QAI blâment les apports extérieurs, tandis que ceux qui pensent avoir une bonne QAI l'attribuent à un bon renouvellement d'air. La connaissance du lien entre ventilation et renouvellement d'air est bien comprise, surtout grâce aux interventions professionnelles et à la documentation reçue dans le cadre du projet. Cependant, les connaissances spécifiques sur les composantes et le fonctionnement de la ventilation restent limitées.