



Rapport Tâche 4

Durabilité des performances de la ventilation -
Elaboration de préconisations techniques

Le 13/07/2024

Auteurs : Adeline Mélois, Valérie Leprince, Gaëlle Guyot, Cerema
Jérémy Depoorter, Anjos
Juan Rios, Marc Legree, Aereco

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 : Jérémie Depoorter, jdepoorter@anjios-ventilation.com



Société AERECO

Contact : Marc Legrée, 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
07/05/2024	v1	Rédaction par Adeline Mélois, Valérie Leprince, Gaëlle Guyot, CEREMA
30/05/2024	v2	Compléments Aereco, Anjos
30/06/2024	V3	Validation G. Guyot, Cerema
13/07/2024	vf	Validation A. Bacher et G. Rul, 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 durabilité des performances des bâtiments reste une question cruciale à traiter. Avec la ventilation à débits modulés, ou ventilation intelligente, comme la ventilation hygroréglable, des débits d'air plus faibles sont autorisés à certains moments lorsque les besoins sont faibles (humidité faible, absence d'occupation, faibles émissions, etc.), mais il est nécessaire de s'assurer que les systèmes de ventilation ne restent pas bloqués à ces débits faibles. La durée de vie d'un système de ventilation est de l'ordre de 25 ans, il est donc important que les composants et l'ensemble des capteurs pilotant les débits de ventilation offrent des performances durables sur 25 ans. Aux vues des résultats mis en évidence sur l'impact de la maintenance, et son manque de réalisation et de qualité, il est également important lors de la conception et l'installation, d'envisager que ces systèmes auront un coût non seulement à l'installation, mais aussi de maintenance sur une durée de l'ordre de 25 ans. A ces fins, les conclusions de cette tâche 4 intègre des recommandations à destination :

- Des responsables des évolutions des réglementations et des membres des commissions de validation ;

- Des industriels ;
- Des gestionnaires de bâtiments ;
- Des membres des commissions de normalisation européenne ;
- Des financeurs de la recherche.

L'Isle d'Abeau, le 13 juillet 2024

SOMMAIRE

TABLE DES ILLUSTRATIONS	3
TABLE DES TABLEAUX	4
1 DURABILITE DES PERFORMANCES DE LA VENTILATION - SYNTHESE DES CONNAISSANCES APPORTEES PAR LE PROJET PERFORMANCE 2	5
1.1 Etat de l'art – que sait-on de la durabilité des performances de la ventilation et de la durabilité des composants et des capteurs utilisés dans les systèmes de ventilation ?	5
1.2 Retour d'expériences sur les impacts à long-terme des usages et de la maintenance	7
1.3 Durabilité des performances intrinsèques des composants et des capteurs	19
2 PRECONISATIONS TECHNIQUES POUR GARANTIR LA DURABILITE DES PERFORMANCES DE LA VENTILATION RESIDENTIELLE	24
2.1 Préconisations pour les réglementations et les commissions de validation	24
2.2 Préconisations pour les industriels	25
2.3 Préconisations pour les gestionnaires de bâtiments	25
2.4 Préconisations pour la révision des normes européennes	26
2.5 Préconisations pour les financeurs de la recherche (ANR/ADEME/Horizon Europe/etc.)	27
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	29
ANNEXES	31
Annexe 1 : Extrait de l'arrêté du Moniteur Belge, 13.11.2015	31

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Représentation de l'état de propreté des bouches d'extraction et entrées d'air (Site de Paris) , référence : (Mélois et al., 2023).....	8
Figure 2 : Représentation de l'état de respect et de propreté des bouches d'extraction (Site de Villeurbanne) , référence : (Mélois et al., 2023).....	8
Figure 3 : Exemples d'obstruction des bouches d'extraction identifiés dans des logements de Performance 2.....	10
Figure 4 : Activation débit boost cuisine par jour site de Paris.....	11
Figure 5 : Ouverture du volet - WC	12
Figure 6 : Exemples de détérioration volontaire ou de dérèglement de terminaux de ventilation identifié sur des logements de Performance 2.....	14
Figure 7 : Courbes hygroscopiques des bouches cuisine, sites de Paris et Villeurbanne, référence : (Mélois et al., 2023).....	16
Figure 8 : Hygroscopic curves pour Paris, référence : (Mélois et al., 2023).....	17
Figure 9 : Limitation du débit d'air maximum entre les bouches installées et collectées en fonction de l'état d'entretien visuel. Référence : (Mélois et al., 2023).....	17
Figure 10 : Situation de la chambre instrumentée - Appartement V1 - Site de Villeurbanne	18
Figure 11 : (a) Impact of the CO2 sensor's drift on a DCV regulation, test data from sensors as collected and (b) Test data from correctly self-calibrated sensors	23

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs de température, humidité et CO2 étudiés (max pour T and RH, 90% pour CO2)	21
Tableau 2 : Pourcentage de capteurs respectant les spécifications selon les différents critères. (a) Specifications (ppm) and (b) Pourcentage de capteurs respectant les spécifications	21

1 DURABILITE DES PERFORMANCES DE LA VENTILATION - SYNTHESE DES CONNAISSANCES APPORTEES PAR LE PROJET PERFORMANCE 2

Les connaissances nouvelles apportées par le projet Performance 2 sur la durabilité des performances de la ventilation se décomposent en trois volets :

- Un état de l'art mettant en évidence que le projet Performance 2 est un des projets pilotes au niveau mondial sur le sujet de la durabilité des performances de la ventilation ;
- Des nouvelles connaissances sur les usages et la maintenance de la ventilation sur la durée et leurs impacts sur les performances à long-terme des systèmes de ventilation;
- Des nouvelles connaissances sur la durabilité des performances intrinsèques des composants de la ventilation et notamment des tissus hygroscopiques intégrés aux composants de la ventilation hygro-réglable, ainsi que sur des capteurs de CO₂ utilisés dans cette étude pour du monitoring continu.

1.1 Etat de l'art – que sait-on de la durabilité des performances de la ventilation et de la durabilité des composants et des capteurs utilisés dans les systèmes de ventilation ?

Pour répondre à cette question et établir un état de l'art international, nous avons interrogé les bases de données de référence : Scopus, Google Scholar et la base de données aibase de l'AIVC. Une sélection basée sur les mots-clés "ventilation durability", "ventilation durability buildings", "ventilation long-term", "ventilation long-term performance" et "ventilation long-term buildings" nous a permis d'identifier seulement 12 articles traitant de la durabilité des performances de la ventilation dans les bâtiments. Nous constatons un problème de terminologie pour le terme "long-term". En ce qui concerne la qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments, "Long-term" est souvent utilisé pour un ordre de grandeur d'un an, voire moins. Si la durée de vie des services techniques d'un bâtiment a souvent été évaluée entre 7 et 15 ans (Estaji, 2017; Gosling et al., 2013), la durée de vie des systèmes de ventilation est beaucoup plus longue : 15 à 20 ans (Feist et al., 2020), même 25 ans (Durmisevic, 2006). Par conséquent, nous aurions besoin de données sur la durabilité à "long terme" des performances des systèmes de ventilation qui devraient être envisagés pour plus de 3-4 ans.

La plupart des 12 articles sélectionnés proposaient des données pour des périodes d'un mois ou moins (Blomsterberg et al., 1995; Ouazia et al., 2019) à 1 an (Huang et al., 2020; Schibuola et al., 2018; Simanic et al., 2019; Zhao and Liu, 2020), souvent sans données détaillées provenant d'une inspection des systèmes de ventilation.

Seuls 3 articles fournissent des données détaillées sur la durabilité à long terme des systèmes de ventilation, ce qui semble être un domaine insuffisamment étudié. Certains de ces auteurs considèrent même l'hypothèse que les dysfonctionnements ou les défaillances de la ventilation modulée (smart ventilation) auraient dû être signalés par les occupants et n'auraient pas dû se produire en raison du fait que les bâtiments sont nouvellement construits et que tout type de problème technique est normalement couvert par une garantie de 5 à 10 ans (Simanic et al., 2019).

(Feist et al., 2020) fournit des données sur la durabilité des composants des systèmes de ventilation dans quatre maisons passives occupées et construites il y a 25 ans et équipées d'une

ventilation Double-Flux avec récupération de chaleur, qui ont été contrôlées de manière intensive (200 capteurs) sur une période de 5 ans. Les inspections se concentrent sur les conduits de ventilation de soufflage. Même si les conduits n'ont jamais été nettoyés au cours des 25 années, ils ont observé par inspection visuelle, par caméra dans les conduits et par analyse microbiologique en laboratoire, un état d'hygiène parfait du réseau de conduits, sans aucun signe d'augmentation de la densité des germes ou de contamination par les moisissures. Cette étude ne fournit aucune donnée sur les bouches d'extraction et d'insufflation.

(Howarth, 2001) présente une étude menée dans 26 logements pendant 6 ans sur la fiabilité des techniques de réduction du radon, l'une d'entre elles étant basée sur la ventilation. 11 des 17 systèmes de ventilation ont fonctionné pendant plus de 50 000 heures sans qu'aucun problème ne soit signalé. L'étude montre que le taux de défaillance des ventilateurs a tendance à augmenter avec le temps, mais cela est normal car les ventilateurs approchent de la fin de leur durée de vie. Cette étude ne fournit aucune donnée sur les composants tels que bouches d'extraction et d'insufflation, entrées d'air.

(Pallari M-L and Luoma M, 1993) proposent une étude de suivi sur les performances à long terme de la ventilation résidentielle réalisée en 1992-1993 sur neuf des bâtiments étudiés dans les années 1980, équipés de divers systèmes de chauffage et de ventilation, mais pas de ventilation modulée (smart ventilation). L'entretien régulier comprenait le remplacement des filtres tous les trois à six mois et le nettoyage des conduits et des composants (bouches, entrées d'air) si nécessaire. Les auteurs ont constaté que les vannes de contrôle ne fonctionnaient pas comme prévu. Les taux de ventilation mesurés ont chuté de 15 % à 94 %, sauf dans un bâtiment où ils ont augmenté de 9 %. Les auteurs notent une bouche d'insufflation seulement sale avec un filtrage insuffisant. Ils concluent que le travail de maintenance normal n'était pas toujours de bonne qualité (ventilateurs et filtres sales) et qu'il n'était pas suffisant à long terme, car les débits d'air et les conditions de pression des bâtiments ont tendance à changer en raison de l'interaction des occupants et de l'encrassement des terminaux de ventilation.

Si nous nous concentrons uniquement sur les capteurs, la littérature met en évidence un manque de données sur la durabilité des capteurs, ainsi qu'un manque d'informations leur précision (Anastasiou et al., 2022; Malings et al., 2020; Sá et al., 2022; Zhang and Srinivasan, 2020). La nécessité d'un étalonnage périodique des capteurs de CO₂ a été soulignée dans la littérature, qui contient plusieurs témoignages sur la dérive des capteurs au fil du temps (Fisk et al., 2006; Kesselring et al., 1993).

Par ailleurs, le Cerema pilote une tâche du projet IEA-EBC Annex 86- Energy Efficient Indoor Air Quality Management in Residential Buildings, sur la ventilation intelligente (à débits modulés) qui comprend une sous-tâche spécifique sur la durabilité des performances, nous n'avons pas recueilli à ce stade de nouvelles études sur les données relatives à ce sujet au niveau international, mise à part une étude en cours en Autriche.

Le projet Performance 2 apporte donc des résultats assez inédits au niveau national et international, puisque nous avons pu caractériser sur le long terme (plus de 13 ans) :

1. L'état de la maintenance et des usages de la ventilation ;
2. La durabilité des performances intrinsèques des composants de ventilation hygro-réglables avec capteurs/activateurs intégrés ;
3. La durabilité des performances des capteurs de CO₂ utilisés dans le monitoring continu de la QAI réalisé, qui peuvent être utilisés dans d'autres types de systèmes de ventilation pour contrôler et moduler les débits ;
4. Ainsi que leurs divers impacts sur les performances.

1.2 Retour d'expériences sur les impacts à long-terme des usages et de la maintenance

1.2.1 Les problèmes détectés

1.2.1.1 Manque (de qualité) d'entretien des systèmes de ventilation, et la nécessité d'un entretien à la charge de l'opérateur de logement social (Pièces concernées : toutes)

a) Résultats sur le manque d'entretien et l'encrassement des bouches d'extraction et entrées d'air. Publiés dans l'article (Mélois et al., 2023)

Au total sur le site de Paris, 54 entrées d'air et 52 bouches d'extraction (15 provenant des cuisines, 22 des salles de bains et 15 des toilettes) ont été collectées dans 15 appartements. En ce qui concerne les pièces humides, l'étude sur l'encrassement a montré qu'aucune des 15 bouches d'extraction de cuisine ne présentait un niveau d'entretien acceptable (figure 3). Dans les salles de bains et les salles d'eau, seuls 14 et 8 appareils respectivement (21 % et 25 %) présentaient un niveau de propreté acceptable. Les bouches des toilettes étaient les moins encrassées avec 80 % d'entre elles classées comme "acceptables" sur les 15 échantillons. Seul 1/3 des 54 entrées d'air présentait un bon niveau de propreté. Il n'y a pas de différence significative entre l'encrassement des entrées d'air installées dans les chambres à coucher (32% jugées "acceptables") et celles installées dans les salles de séjour (35% jugées "acceptables") (Figure 1).

Au total sur le site de Villeurbanne, 23 entrées d'air et 22 bouches d'extraction ont été collectées dans 6 appartements. L'étude de l'encrassement a montré qu'aucune des bouches d'extraction de la salle de bain et la plupart des bouches d'extraction de la cuisine avaient un niveau d'entretien acceptable (Figure 4). Comme pour le bâtiment de Paris, les bouches des toilettes de Villeurbanne présentent un niveau de propreté plutôt acceptable. En ce qui concerne les entrées d'air, la majorité des entrées d'air dans les pièces de vie sont obstruées ou hors d'usage ou même cassées mais néanmoins peu encombrées. Pour les chambres, la majorité des entrées d'air sont conformes mais 38 % des entrées d'air sont bouchées ou cassées (Figure 2).

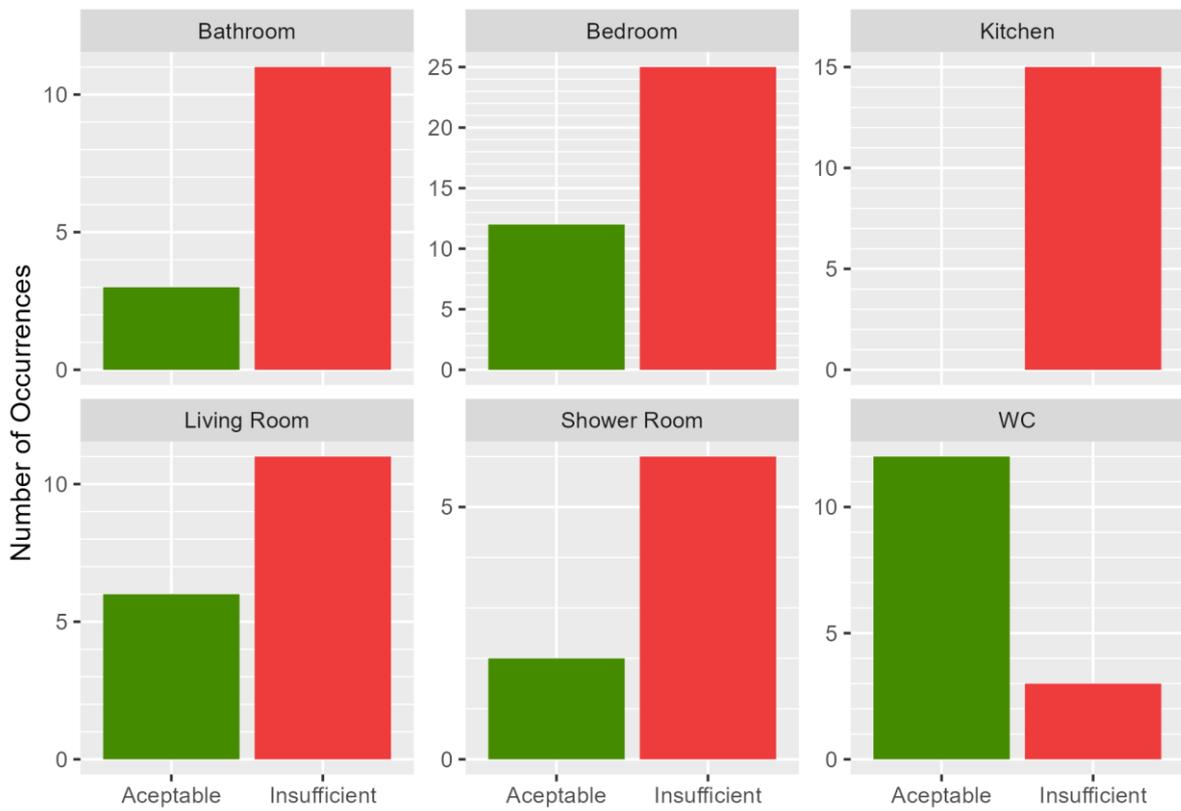


Figure 1 : Représentation de l'état de propreté des bouches d'extraction et entrées d'air (Site de Paris) , référence : (Mélois et al., 2023)

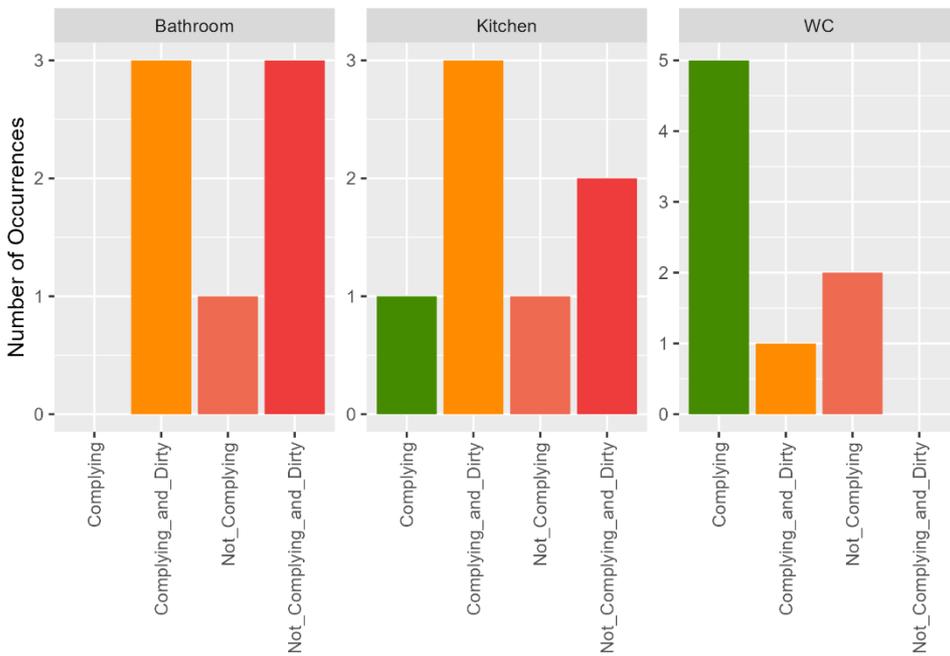


Figure 2 : Représentation de l'état de respect et de propreté des bouches d'extraction (Site de Villeurbanne) , référence : (Mélois et al., 2023)

b) Retour d'expérience sur le manque de qualité de la maintenance opérée par les sociétés de maintenance

Sur le site de Paris, avant le lancement de la campagne de mesure et monitoring, Aereco a réalisé des mesures de pression et a identifié des colonnes avec une pression anormalement nulle (0 Pa). En allant sur le toit terrasse, Aereco a trouvé des Té-souches avec couvercles enlevés, ce qui expliquait l'absence de différence de pression dans les colonnes. Aereco a remis en place des couvercles, et a identifié des potentiels déplacements de certaines autres parties du réseau. Après avoir contacté Paris Habitat, le Cerema a dû intervenir directement auprès de la société de maintenance pour demander une intervention en urgence avant le lancement des campagnes afin de réaliser une vérification de l'ensemble de l'installation (Paris Habitat n'arrivait pas à joindre cette société). Nous n'avons jamais réussi, malgré plusieurs relances, à obtenir un compte-rendu de cette intervention, ni de celles qui ont a priori eu lieu pendant les campagnes. De plus, une panne d'un mois (avril-mai 2023) du système de ventilation a pu être identifiée grâce aux mesures de pression aux bouches. Après signalement du problème à Paris Habitat, le ventilateur a été remis en route sans qu'un compte-rendu d'intervention puisse être obtenu, de nouveau.

Sur le site de Villeurbanne, lors de la première intervention d'Anjos, Anjos a constaté que le caisson de ventilation original de l'installation (installé pendant le projet initial ADEME-Performance) n'était plus connecté au réseau, mais toujours sur place, et qu'un autre caisson avait été installé à la place. Ce nouveau caisson était d'une autre marque, donc non conforme à l'avis technique. Malgré de nombreux échanges sur le sujet avec Lyon Métropole Habitat, aucune trace de ce changement de caisson n'a pu être trouvée.

c) Le rôle central de l'occupant pour le nettoyage - Retour d'expérience sur le rapport entre les occupants et la ventilation

L'acteur principal qui peut vérifier régulièrement et même nettoyer lui-même les entrées d'air et les bouches d'extraction est l'occupant de son logement. Encore faut-il qu'il sache qu'il faut le faire, qu'il sache comment le faire sans détériorer son système, et qu'il comprenne l'intérêt de le faire pour lui-même et sa famille/colocataires.

Les entretiens sociologiques réalisés avec les occupants ont mis en évidence que peu de locataires ont conscience de l'importance de la ventilation de leur logement, et de l'intérêt du nettoyage.

Lors des soirées de retours auprès des occupants volontaires, après la fin de toutes les campagnes, une des remarques d'un occupant a interpellé l'équipe du projet : il ne comprenait pas pourquoi nous recommandions de nettoyer les bouches et les entrées d'air, car pour lui, le système de ventilation « *était responsable de nettoyer l'air* », et donc il ne comprenait pas pourquoi « *il fallait nettoyer un appareil dont le rôle est déjà de nettoyer* » (Verbatim). D'autres occupants pensaient que l'entretien de leur bouches et entrées d'air étaient à la charge de la société de maintenance, qui doit passer 1 fois par an, et donc ne s'en occupaient jamais.

1.2.1.2 Mauvaise connaissance du fonctionnement des composants de la ventilation

Plusieurs locataires nous ont dit qu'ils pensaient que l'air sortait des bouches (alors qu'il est justement extrait de la pièce). Un exemple est donné dans la cuisine d'un des appartements où l'occupant a obstrué la bouche d'extraction avec une serviette (Figure 3). Plusieurs occupants se sont plaints de présence de mouches pendant l'été 2020. L'occupant de cet appartement a expliqué qu'il pensait que les mouches venaient potentiellement de la bouche d'extraction.



Figure 3 : Exemples d'obstruction des bouches d'extraction identifiés dans des logements de Performance 2

1.2.1.3 Utilisation du débit nominal (Pièce concernée : cuisine)

En France, contrairement à d'autres pays, les hottes à extraction sont peu courantes et l'extraction à la source des polluants émis lors des activités de cuisine repose exclusivement sur l'activation du débit nominal dans la cuisine. Les hypothèses dans les calculs de performances des systèmes de ventilation (avis techniques et calcul réglementaires RE2020) sont l'activation deux fois par jour du grand débit pendant 30 minutes (soit 60 minutes dans la journée).

Dans le cadre de ce projet, nous avons constaté une différence significative entre les déclarations des occupants lors de l'entretien individuel et l'utilisation réelle enregistrée par les capteurs embarqués (Figure 4). En réalité, le haut débit n'est utilisé uniquement que dans un seul appartement et parfois mal actionné (temps inférieur à 60 minutes par jour), ce qui ne garantit pas le bon fonctionnement de ce système.

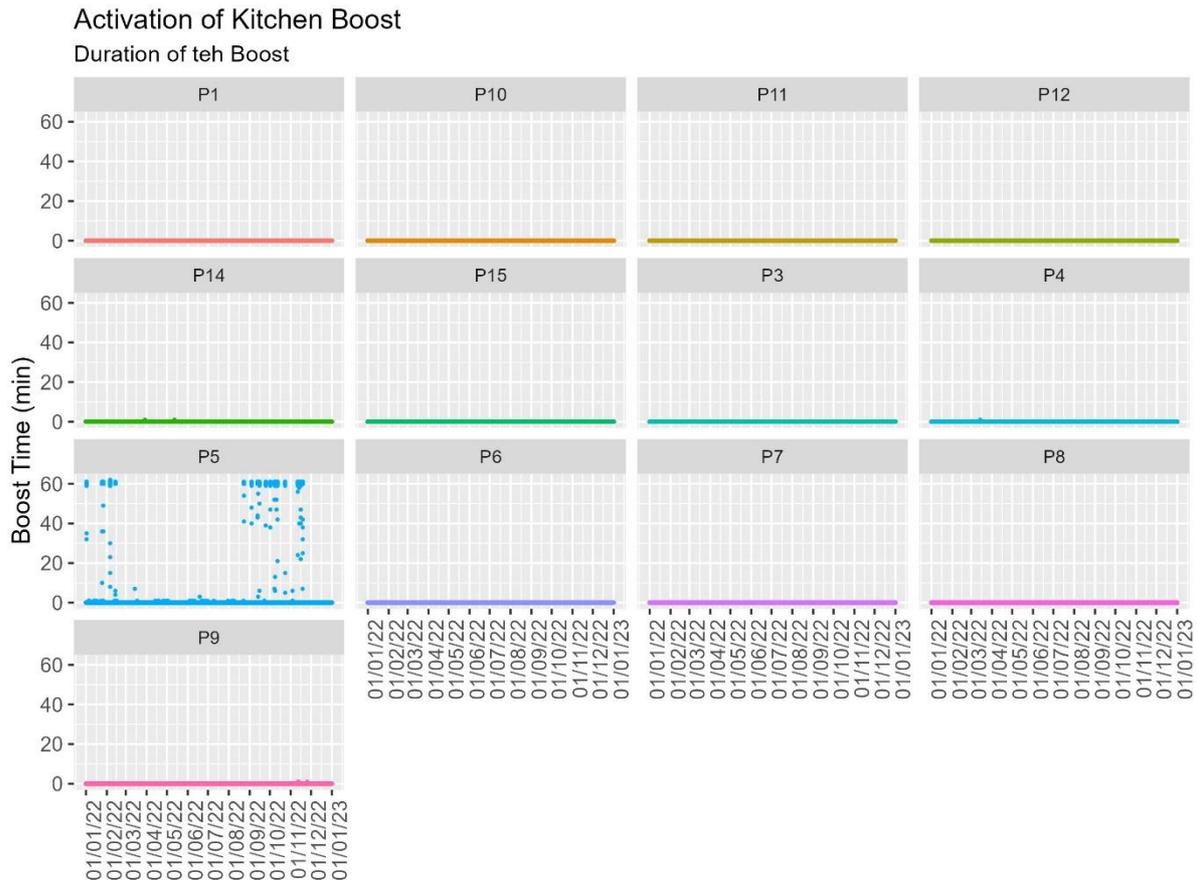


Figure 4 : Activation débit boost cuisine par jour site de Paris

La non-utilisation du débit nominal peut conduire à l'insuffisance de ventilation lors des activités de cuisine. Ceci peut entraîner une accumulation de polluants (fumées, vapeurs, graisses, particules fines, NO₂) à l'intérieur des logements ainsi que perturber l'équilibre du système pour l'ensemble du bâtiment, réduisant ainsi son efficacité globale.

1.2.1.4 Bouches à détection de présence bloquées pour cause de piles non fonctionnelles (Pièce concernée : WC)

En France, la majorité des WC sont équipées de bouche d'extraction à détection de présence, qui fonctionnent avec des piles. Les piles doivent donc être changées par les occupants du logement, ou a minima lors de l'entretien annuel réalisé par l'office. Dans ce projet, nous avons pu constater que ces piles étaient rarement changées et de ce fait, les bouches des toilettes restent bloquées en grand débit au lieu d'assurer un débit réduit lorsqu'il n'y a personne.

Ainsi, il est mis en évidence que le volet est resté en position de grande ouverture (débit max) sur au moins 1/3 de l'année (voir 2/3 dans le cas de l'appartement P9), sauf pour l'appartement P11 et P12 (Figure 5).

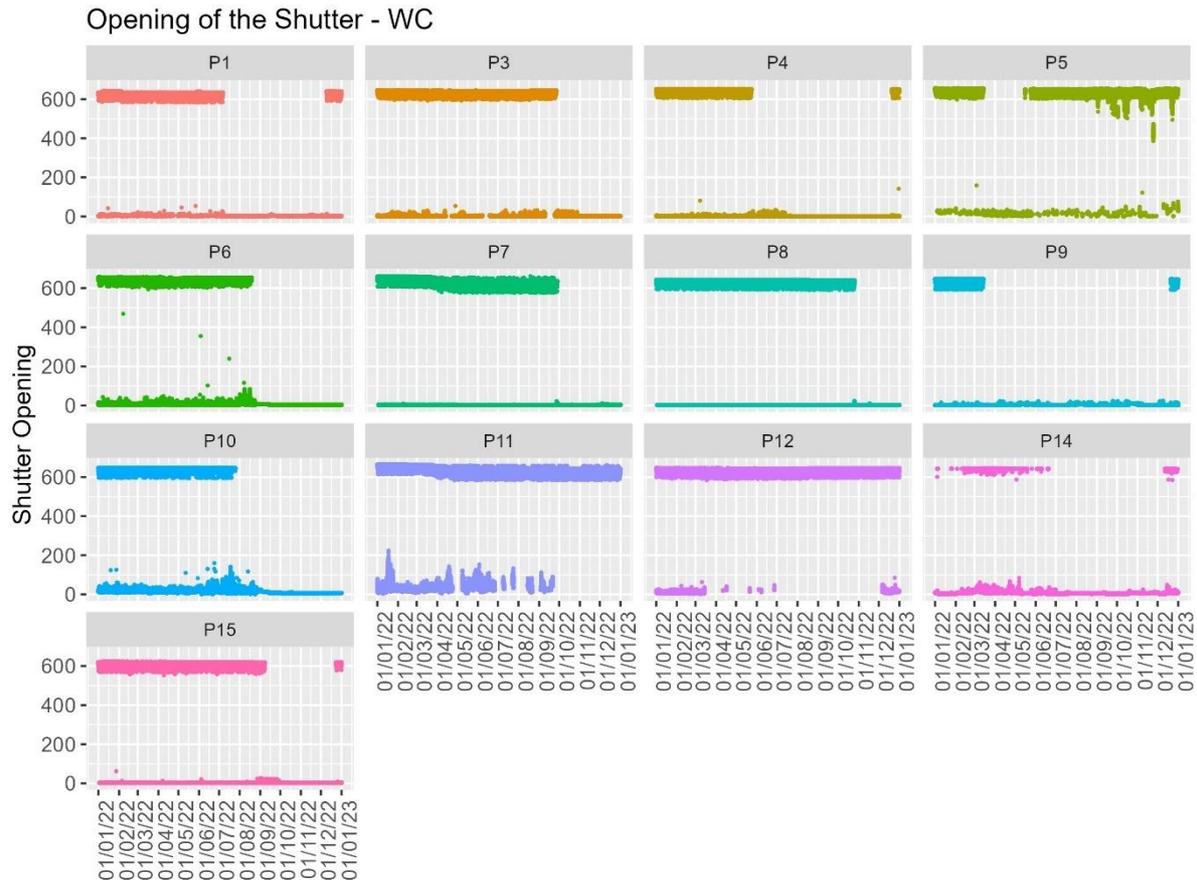


Figure 5 : Ouverture du volet - WC

Les bouches d'extraction sont conçues pour rester bloquées en débit maximal lorsque la pile arrive en fin de vie. Dans ce cas, cela peut entraîner une surconsommation énergétique puisque le système de ventilation fonctionne alors de manière intensive en permanence, contrairement à son fonctionnement prévu en débit réduit en l'absence de présence humaine. L'équilibre de la ventilation dans le logement ou le bâtiment est perturbé, ce qui peut réduire l'efficacité globale du système et affecter la qualité de l'air intérieur.

Il faut noter également que dans le cas du Projet Performance 1 & 2, la durée de vie de la pile des bouches WC est légèrement réduite par rapport au produit commercialisé car elle est utilisée pour alimenter un capteur lié à l'instrumentation.

1.2.1.5 Entrées d'air bloquées pour cause de dérèglement volontaire par les occupants (Pièces concernées : toutes)

Sur le site de Paris, 9% des entrées d'air ont été endommagées par l'occupant ou l'entreprise de maintenance avec des volets coincés en position ouverte ou fermée : 3 d'entre elles ont subi une détérioration volontaire du mécanisme ou une tentative de démontage et 2 de ces unités ont subi un mauvais réglage de l'élément hygroscopique (malgré le fait que la vis de réglage se trouve dans une partie cachée), comme illustré sur les photos de la Figure 6.

Sur le site de Villeurbanne, 13 % des entrées d'air ont été dérèglées ou cassées et 30 % ont été obturées. Les dérèglements ont été réalisés alors que les éléments se trouvaient derrière des capots à démonter et des vis collées à la cire. Plus de détails se trouvent dans l'article de Journal (Mélois et al., 2023).

Un autre impact direct de l'occupant sur les terminaux de ventilation a été observé avec le blocage des entrées d'air (chambre et séjour) en utilisant du scotch ou du sopalin. L'objectif de l'occupant étant de figer la position du volet pour limiter, augmenter ou changer l'orientation du débit d'air entrant dans la pièce. On notera également le remplacement d'une bouche originelle et dimensionnée pour le besoin de la pièce par une bouche non hygrovariable et peut-être avec moteur.

La modification du terminal de ventilation par l'occupant peut empêcher son bon fonctionnement réduisant la capacité du système à éliminer les polluants et l'humidité de manière efficace. Les blocages volontaires entraînent une pression d'air inadéquate dans les différentes pièces, ce qui peut aggraver les déséquilibres de ventilation et réduire l'efficacité globale du système.



Cuisine – Apt P10



Séjour – P10



Ch1 – P6



Ch1 – P4



Pièce - P8

Figure 6 : Exemples de détérioration volontaire ou de dérèglement de terminaux de ventilation identifiés sur des logements de Performance 2

1.2.1.1 Terminaux bloqués suite à l'ameublement ou l'aménagement par les occupants (Pièces concernées : toutes)

Les nouveaux meubles installés entre Performance 1 et Performance 2, dans la cuisine d'un des appartements, obstruent une partie de la section de passage du conduit destiné à accueillir la bouche d'extraction. Ne pouvant plus raccorder la bouche au conduit, l'occupant l'a remplacée par un carton troué. La valeur du débit et son adaptation au besoin de ventilation ne sont donc plus respectées.

1.2.2 Impacts des problèmes détectés

1.2.2.1 Quantification des performances du manque d'entretien (nettoyage et réparation) par caractérisation en laboratoire

La tâche 2 avec les mesures en laboratoire réalisées par Aereco et Anjos ont permis de caractériser l'impact du manque d'entretien sur les courbes de fonctionnement des bouches, en distinguant le manque de nettoyage et le manque de réparation. Les résultats ont été publiés dans l'article (Mélois et al., 2023).

En effet, les courbes hygro-aérauliques ont été réalisées pour 4 états des bouches : 1-lors de l'installation en 2007 - informations disponibles uniquement pour Paris (courbes rouges), 2-tel que collecté (courbes bleues), 3-après nettoyage (courbes vertes) et 4-remis à neuf (courbes violettes) - et comparées à l'enveloppe des tolérances. La Figure 7 présente les résultats pour les bouches cuisine sur les sites de Paris et Villeurbanne. Dans plusieurs cas (site de Villeurbanne), il est essentiel de noter que **l'impact du nettoyage est encore plus important que l'impact de la remise en état des bouches.**

Dans les figures ci-dessous, les courbes hygro/débit doivent se situer dans l'enveloppe de tolérances en gris afin d'assurer le bon compromis entre la qualité d'air et l'économie d'énergie. Après l'opération de maintenance (changement de la case mais sans toucher à la tresse hygroscopique), on observe des courbes proches de celles de 2007 et une majorité des points dans l'enveloppe de tolérance donnée pour un produit à l'état neuf, et ce après 15 ans, sur le site Parisien. La caractérisation des bouches après la phase de nettoyage des produits, mais avant la maintenance, montre parfois une influence non négligeable de l'encrassement sur les débits extraits. Cette

observation souligne l'importance d'une maintenance, au moins annuelle, pour limiter les pertes de débits liées à l'encrassement des terminaux de ventilation.

Un autre impact de ce manque d'entretien sur les débits d'air à travers les bouches porte sur la limitation du débit maximal. Il a été caractérisé au cours de ces essais en laboratoire pour le site de Paris, où la plupart des salles de bains/douches présentaient des limitations du débit d'air lorsque la bouche était complètement ouverte :

- 41 % présentaient une réduction du débit d'air maximal inférieure à 10 % (45 m³/h au lieu de 50 m³/h),
- 77 % présentaient une réduction du débit d'air maximal inférieure à 20 % (40 m³/h),
- 86 % présentaient une réduction du débit d'air maximal inférieure à 30 % (35 m³/h),
- 100 % ont présenté une réduction du débit d'air maximal inférieure à 40 % (30 m³/h).

Sur les 48 entrées d'air (EA) de Paris fonctionnent toujours correctement, cependant, une limitation du débit d'air maximal a été constatée et a parfois été associée à un manque d'entretien :

- Seules 14 EA (29%) ont montré une réduction du débit maximum de moins de 10%
- 32 EA (67%) ont montré une réduction du débit maximal inférieure à 20%.
- 44 EA (92%) ont montré une réduction du débit maximum de moins de 30%.
- 1 EA (2%) a montré une réduction du débit maximum de moins de 40%.

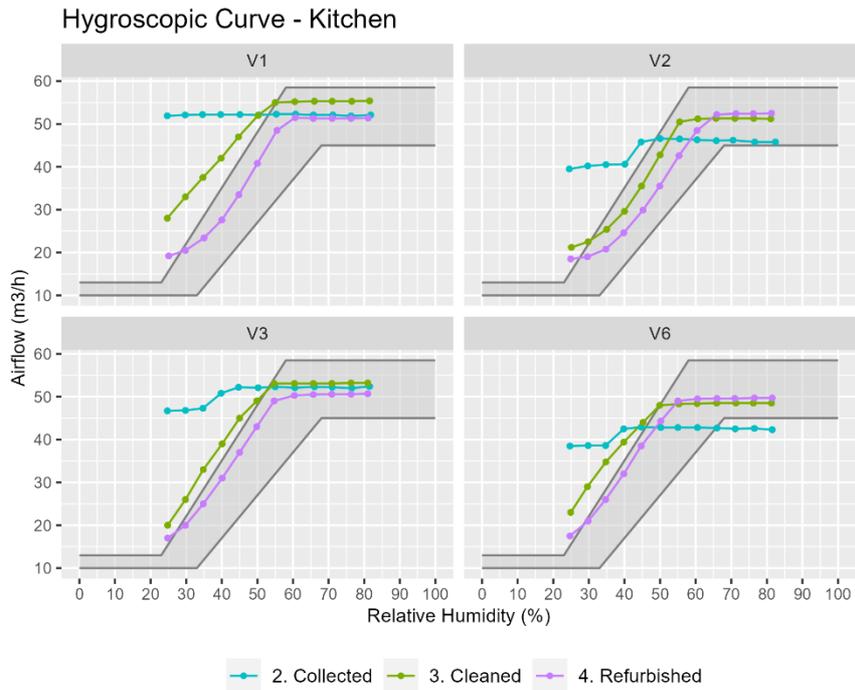
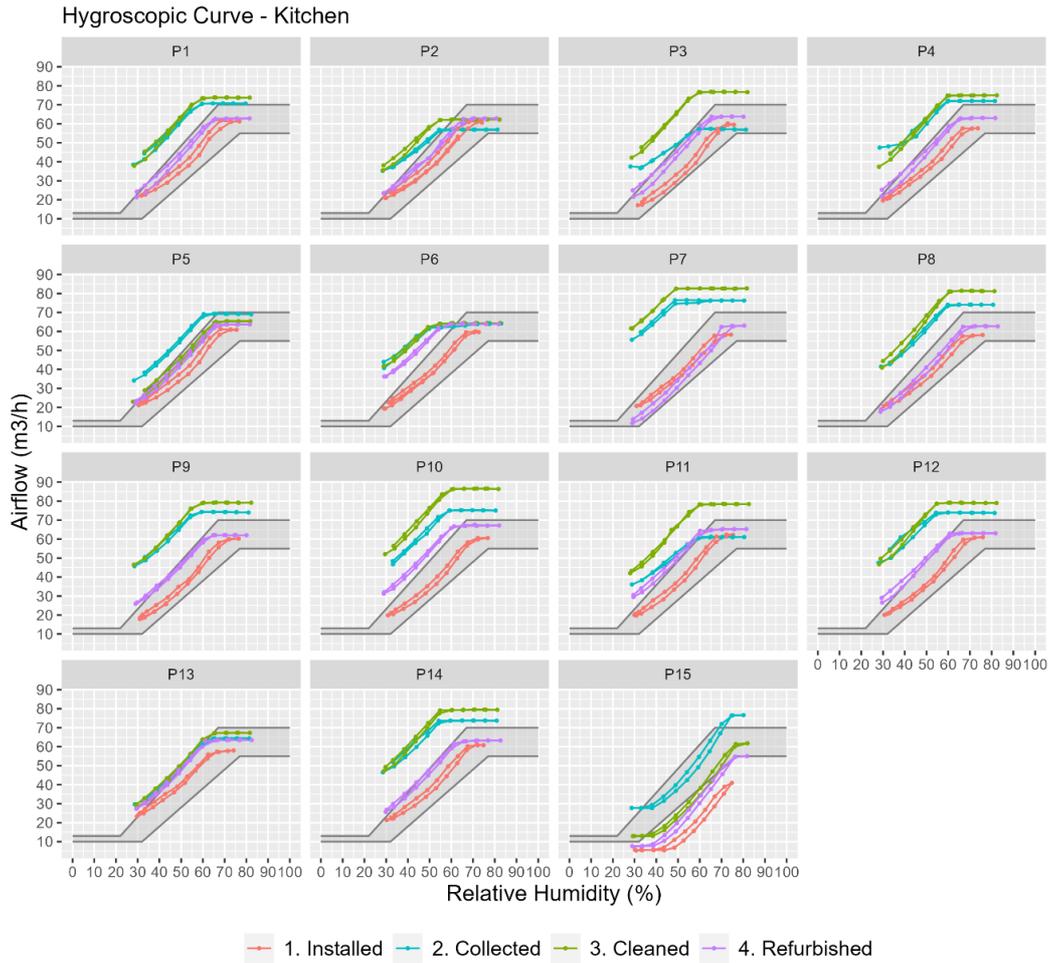


Figure 7 : Courbes hygroscopiques des bouches cuisine, sites de Paris et Villeurbanne, référence : (Mélois et al., 2023)

1.2.2.2 Corrélation entre le niveau d'entretien détecté par l'inspection visuelle et les caractéristiques réalisées en laboratoire

Un résultat du projet est que le manque d'entretien peut être détecté de manière relativement fiable et facile par inspection visuelle.

En effet, qu'il s'agisse des courbes de caractérisation en laboratoire, ou des calculs de limitations des débits assurés, les résultats quantifiés sont généralement conformes aux observations visuelles (Figure 8 et Figure 9).

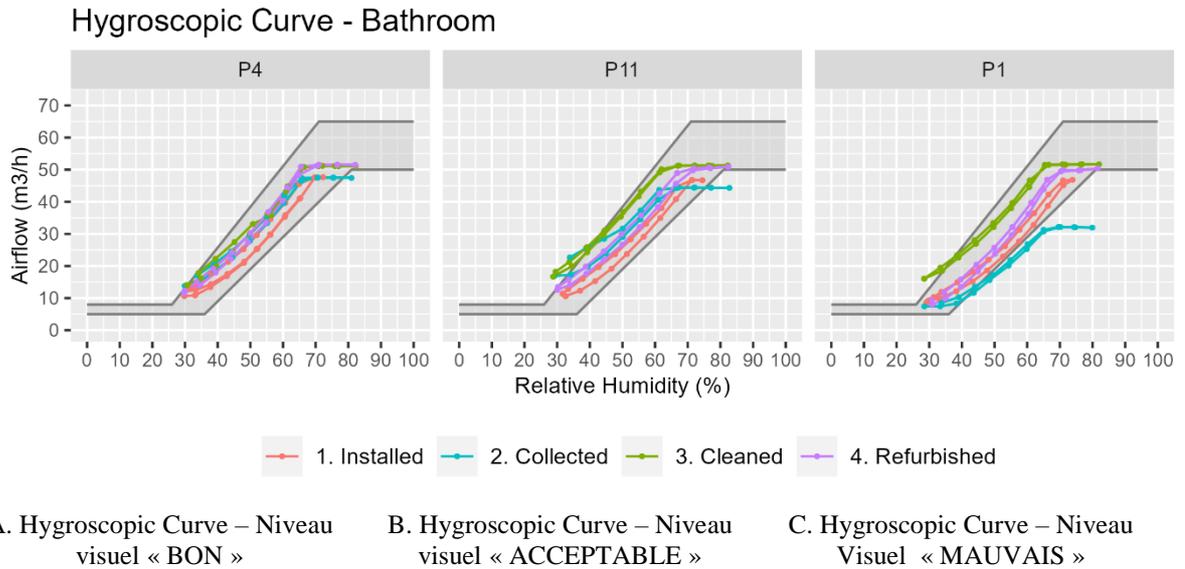


Figure 8 : Hygroscopic curves pour Paris, référence : (Mélois et al., 2023)

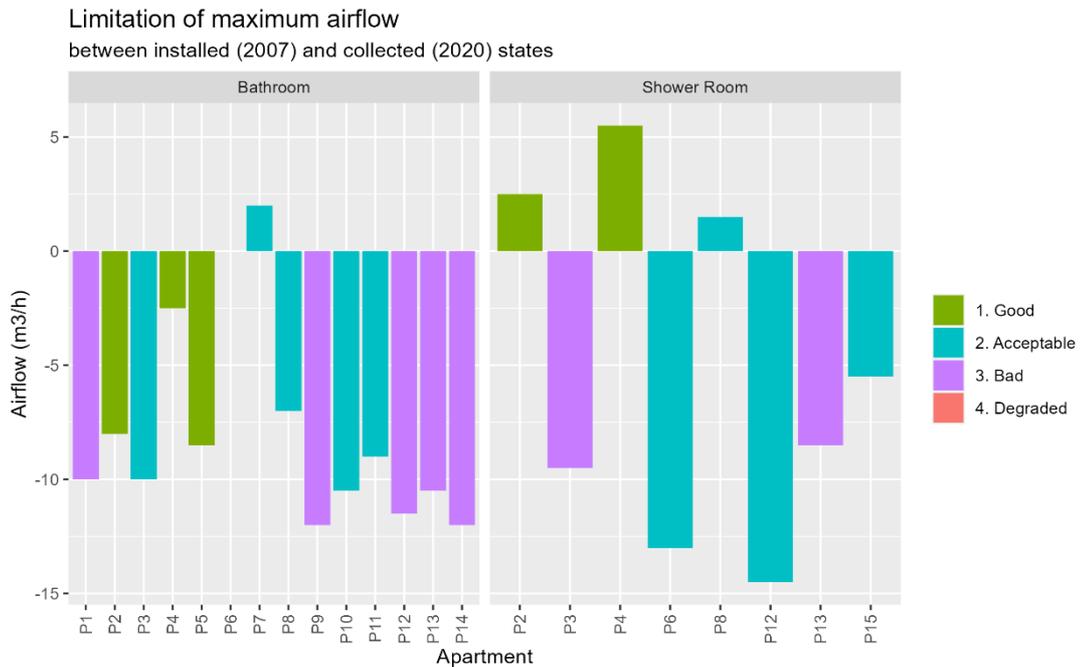


Figure 9 : Limitation du débit d'air maximum entre les bouches installées et collectées en fonction de l'état d'entretien visuel. Référence : (Mélois et al., 2023)

1.2.2.3 Quantification par simulations numériques de l'impact de la non utilisation du grand débit en cuisine

Les simulations réalisées par le CSTB dans le cadre du GT ESSOC (développement d'une nouvelle réglementation performancielle pour la ventilation) ont permis de quantifier l'impact de la non utilisation du grand débit sur la qualité d'air par rapport à une utilisation optimum. L'utilisation optimum correspond à un déclenchement de deux fois 30 min simultanément avec la production ponctuelle du polluant fictif lié aux activités de cuisine (nommé P2).

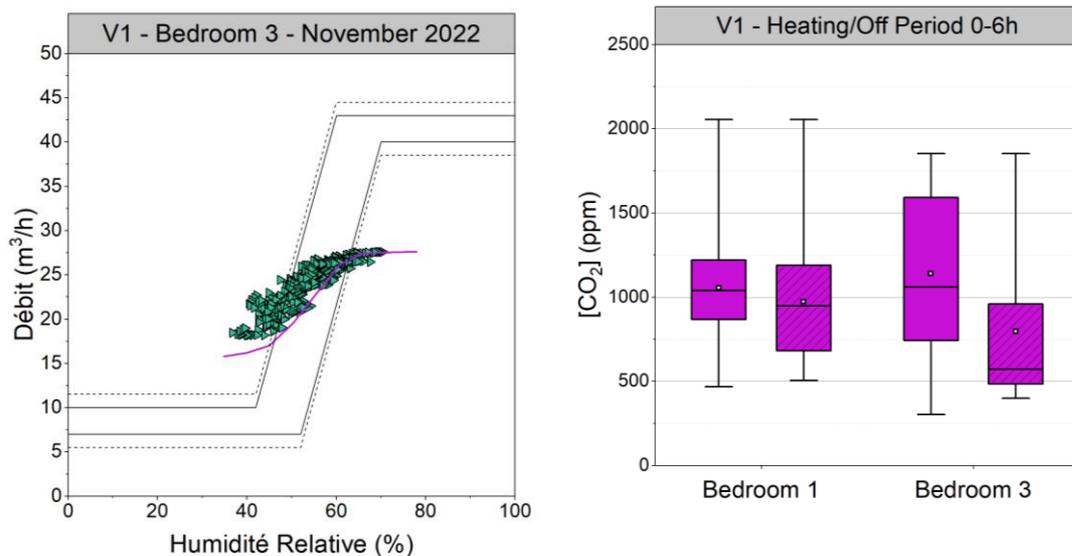
Ces simulations montrent que l'utilisation du grand débit permet une nette réduction de l'exposition court terme au polluant P2. En effet, l'exposition maximale sur 30 min à P2 (en cuisine) passe

- Pour un F2 en bâtiment collectif avec ventilation de type Hygro B de 2739 P2/m³ avec utilisation du grand débit à 5667 P2/m³ sans grand débit, soit un facteur d'augmentation de 2.1.
- Pour une maison F5 en auto réglable de 1793 P2/m³ avec utilisation du grand débit à 3257 P2/m³ sans utilisation du grand débit, soit un facteur d'augmentation de 1.8.

L'impact de l'utilisation du grand débit sur les autres indicateurs de qualité d'air étudié dans le cadre de ce GT ESSOC (exposition au CO₂ et aux polluants émis par le bâtiment ainsi que le taux d'humidité) est peu marqué.

1.2.2.4 Impact du dérèglement des entrées d'air sur les niveaux de CO₂

Dans plusieurs appartements du site de Villeurbanne, les entrées d'air, après maintenance par Anjos, présentent des blocages : la modulation est faible et les débits maximums ne sont pas atteints. Dans un seul cas, ce défaut sur l'entrée d'air (entraînant des débits qui restent sous les 30 m³/h), le niveau de CO₂ dans la chambre est régulièrement au-dessus de 1000 ppm pendant la nuit en période de chauffe (les occupants ont déclaré dormir la porte de la chambre fermée). Néanmoins, les concentrations en CO₂ restent toujours inférieures à 2000 ppm (Figure 10). Dans les autres cas, les concentrations en CO₂ mesurées restent majoritairement en dessous de 1000 ppm, ce qui s'explique par l'habitude des occupants de dormir avec les portes de chambres ouvertes, évitant ainsi une situation de confinement.



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

(b) Concentrations en CO₂ relevé dans la chambre instrumentée (Bedroom 3) pendant la nuit en période de chauffe

Figure 10 : Situation de la chambre instrumentée - Appartement V1 - Site de Villeurbanne

1.3 Durabilité des performances intrinsèques des composants et des capteurs

Le projet Performance 2 apporte donc des résultats assez inédits au niveau national et international, puisque nous avons pu caractériser la durabilité :

1. des composants de ventilation hygro-réglables avec capteurs/activateurs intégrés
2. et des capteurs de CO₂ utilisés dans le monitoring continu de la QAI réalisé, qui peuvent être utilisés dans d'autres types de systèmes de ventilation pour contrôler et moduler les débits.

1.3.1 Résultats de durabilité des composants de ventilation hygro-réglables et des capteurs/activateurs intégrés

Le projet permet d'étudier le comportement des capteurs/activateurs d'humidité intégrés, c'est-à-dire du tissu hygroscopique, sur le long terme, car cet élément est resté intact dans tous les produits dans toutes les phases de nettoyage et réparation.

Les courbes de fonctionnement présentées dans la section 1.2.1.1 et de manière plus détaillée dans l'article publié (Mélois et al., 2023) montrent qu'après le nettoyage des bouches et entrées d'air et la remise à neuf de certains composants autres que le capteur d'humidité, les performances des sont en grande partie conformes aux performances initiales et théoriques, les valeurs mesurées se situant pour la plupart à l'intérieur de l'enveloppe de tolérance. Cela prouve que le capteur d'humidité, après 13 à 15 ans de fonctionnement et sans aucun entretien ou recalibrage, présente toujours de bonnes performances.

Dans le cas des bouches d'extraction des salles de bain, après nettoyage et quel que soit leur état, pour Paris :

- 100% atteignent leur débit maximum ;
- 77% (17/22) ont tous leurs points dans l'enveloppe de tolérance initiale ;
- 23% (5/22) n'ont que quelques points en dehors de l'enveloppe de tolérance.

C'est également le cas pour les bouches d'extraction des cuisines où après nettoyage et rénovation et quel que soit leur état de propreté, toutes les courbes sont revenues dans l'enveloppe de tolérance et sont très proches de 2007 (avant installation).

Dans tous les cas précédents, la dérive du capteur/actionneur hygroscopique est donc suffisamment faible pour que les caractéristiques des bouches d'extraction restent dans les tolérances de fonctionnement d'origine.

Pour les entrées d'air, après réparation et quel que soit leur état de propreté, les résultats montrent que :

- Toutes les courbes (en violet) sont revenues dans la plage de tolérance ;
- Les performances hygro-aérauliques sont très proches de celles obtenues lorsque les produits étaient neufs en 2007 (pour Paris).

Pour ces entrées d'air, la mousse acoustique a été légèrement déplacée, bloquant partiellement le flux d'air (9/29 sur Paris). En outre, une légère torsion de l'obturateur a également été constatée. Suite à ces résultats, il a été décidé de changer la mousse acoustique et l'obturateur de chaque entrée d'air dans le cadre du protocole de réparation, sans toucher au tissu hygroscopique. La phase de

rénovation (courbe violette) a permis de ramener tous les points à l'intérieur de l'enveloppe de tolérance. De plus, la courbe est proche de la courbe originale de 2007, avant la phase d'installation en 2007 (pour Paris). L'hypothèse la plus probable est que le tissu hygroscopique n'a pas ou peu bougé au cours du temps.

A Villeurbanne, les résultats montrent que la fonction hygroréglable des composants terminaux tels qu'ils sont collectés existe toujours, même si l'amplitude entre les débits minimum et maximum est réduite (en particulier pour les bouches d'extraction de la cuisine). Ceci pourrait être induit par un encrassement très important de ces terminaux dû à un manque d'entretien des systèmes qui ne permet pas une bonne régulation. Après nettoyage, l'amplitude entre les débits extrêmes est plus importante. Comme pour Paris, une maintenance a été effectuée pour chaque composant afin d'analyser correctement la durabilité de la fonction hygroréglable uniquement. Les résultats montrent que l'amplitude a été à nouveau améliorée et que la dispersion des courbes a été réduite.

Jouant à la fois le rôle de capteur et d'actionneur, notre conclusion est que le tissu hygroscopique utilisé dans les systèmes de ventilation hygroréglables étudiés dans ce projet est donc adapté à une utilisation à long terme (au moins 13 ans) et dans des conditions réelles de fonctionnement, avec une faible dérive de performance due au manque de nettoyage et maintenance. Plus de résultats sont disponibles dans (Mélois et al., 2023).

1.3.1 Résultats de durabilité des capteurs de CO₂

Dans ce projet, des capteurs de CO₂ (Technologie NDIR) ont été installés dans les logements afin de réaliser sur le long-terme un monitoring continu de la QAI. Or, les données que nous avons récoltées sur ces capteurs sont intéressantes, car ils peuvent être utilisés dans d'autres types de systèmes de ventilation pour contrôler et moduler les débits. Plus de résultats seront bientôt disponibles dans l'article soumis.

En 2007, une carte électronique embarquant plusieurs types de capteurs a été installée dans presque toutes les pièces des 15 logements :

- Dans le salon et au moins dans une chambre : capteur CO₂ (NDIR) + capteur de température/humidité
- Dans les cuisines, salles de bains et toilettes, des unités de surveillance comprenant des capteurs électroniques d'humidité relative et de température ont été installées près des terminaux de ventilation (bouches d'extraction).

Les capteurs CO₂ utilisent une technologie NDIR basée sur un canal de mesure unique et qui fonctionne à la longueur d'onde du CO₂. Un algorithme d'auto-calibration basé sur la recherche du point minimum de CO₂ sur une durée d'1 à 2 semaines, permet au capteur de déterminer l'écart entre sa valeur la plus basse et celle d'une valeur saine (typiquement un air extérieur de 400 à 450 ppm). Cet écart est appliqué automatiquement aux mesures sous la forme d'un offset et permet ainsi, en théorie, de limiter une partie de la dérive.

Cet algorithme d'auto-calibration est compatible avec un environnement où le taux de CO₂ réel dans le local revient au moins une fois par cycle (1 à 2 semaines) à une valeur comprise entre 400 et 450 ppm. Si ce n'est pas le cas, la mesure aura tendance à sous évaluer la concentration en CO₂ et donc à générer un risque de sous-ventilation, pour des systèmes de ventilation contrôlés selon le niveau détecté par un tel capteur. Cette situation peut arriver dans le cas d'une occupation en continu de la pièce, avec de très faibles ouvertures de fenêtres : télétravail, un couple travaillant en heures décalées (chambre), en période de pandémie, ...

Ainsi, l'impact d'un recalage en condition réelle d'occupation par rapport à un recalage dans un environnement où le CO₂ est proche de 400-450 ppm a été étudié. Pour cela, les capteurs ont d'abord été testés dans la foulée de leur 1^{ère} alimentation après désinstallation. Les paramètres d'auto-calibration étaient liés à l'environnement des 2 dernières semaines dans les logements occupés avant désinstallation. Une première caractérisation en CO₂ de ces capteurs a permis de déterminer la justesse de leurs mesures pour un auto-calibrage dans des conditions de logements occupés. Puis, les capteurs ont été alimentés pendant 2 semaines dans un environnement à 400-450 ppm (salle climatisée de laboratoire à Aereco pendant la période de Noël, sans présence humaine ou activité générant du CO₂). Une seconde caractérisation en CO₂ a permis de déterminer la justesse de mesures des capteurs après ces 2 semaines dans des conditions proches de 400-450 ppm.

Le Tableau 1 reprend les caractéristiques des capteurs (T/RH, CO₂).

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs de température, humidité et CO₂ étudiés (max pour T and RH, 90% pour CO₂)

Paramètre	Température	Humidité Relative	CO ₂
Précision Initiale	± 0.35°C @ 25°C	± 1.9 %RH @ 25°C	± 40 ppm ± 3% reading @ 22°C
Dérive	± 0.04°C/an	± 0.5 %RH/an	± 40 ppm sur 15 ans
Précision Finale	± 0.92°C @ 25°C	± 8.4 %RH @ 25°C	< ± 80 ppm ± 3% reading @ 22°C
Autres Influences	/	Température	Température (4 ppm/°C) Pression Barométrique (0.135% lecture/mmHg)

Le Tableau 2 résume le pourcentage de capteurs répondant aux spécifications annoncées par le fabricant en fonction de différents critères :

- Précision à t0
- Prévion à t0 + dérive
- Prévion à t0 + dérive + environnement

Remarque : La spécification "environnement" signifie que les mesures des capteurs ont été compensées de l'influence de la pression barométrique et de la température par rapport aux valeurs « usine ».

Tableau 2 : Pourcentage de capteurs respectant les spécifications selon les différents critères. (a) Spécifications (ppm) and (b) Pourcentage de capteurs respectant les spécifications

(a)				(b)			
Consigne (ppm)	Précision Initiale	Initiale + Dérive	Initiale + Dérive + Env	1. Collectés			
400,43	± 52	± 92	± 107	Consigne (ppm)	Précision Initiale	Initiale + Dérive	Initiale + Dérive + Env
996,9	± 70	± 110	± 131	400,43	31 %	69 %	76 %
1698,2	± 91	± 131	± 152	996,9	24 %	52 %	60 %
1703.2	± 91	± 131	± 161	1698,2	29 %	38 %	43 %
				2. Après auto-calibration			
Consigne (ppm)	Précision Initiale	Initiale + Dérive	Initiale + Dérive + Env	Consigne (ppm)	Précision Initiale	Initiale + Dérive	Initiale + Dérive + Env
400,43	85 %	95 %	98 %	400,43	85 %	95 %	98 %
996,9	41 %	66 %	80 %	996,9	41 %	66 %	80 %
1698,2	37 %	44 %	51 %	1698,2	37 %	44 %	51 %

On observe ainsi qu'après la période d'auto-calibration réalisée chez Aereco, la justesse de mesure des capteurs est nettement améliorée à 400 ppm :

- On passe de 31 à 85% de capteurs dans les tolérances initiales
- On passe de 69 à 95 % de capteurs dans les tolérances si on tient compte de la dérive annoncée dans la fiche technique du fabricant.

Dans une moindre mesure, les résultats sont également meilleurs à 1000 et 1700 ppm :

- On passe de 24 à 41% de capteurs dans les tolérances initiales à 1000 ppm
- On passe de 52 à 66 % de capteurs dans les tolérances si on tient compte de la dérive annoncée dans la fiche technique du fabricant à 1000 ppm

Lorsque les mesures sont compensées des effets environnementaux (pression barométrique et température), 80 % des capteurs sont dans les spécifications à 400 et 1000 ppm et 51 % sur toute la plage 400 à 1700 ppm.

On retiendra donc que :

- Comme spécifié dans le protocole d'auto-calibration, ce genre de capteurs nécessite un environnement dans lequel le taux de CO₂ redescend à des valeurs proches de celles de l'air extérieur (400-450 ppm). Le profil d'occupation d'un logement peut être très variable et spécifique ce qui ne semble pas être en adéquation avec l'algorithme d'auto-calibration. La suroccupation d'un logement peut être liée à des contextes tels que le télétravail, un couple travaillant en heures décalées et occupant donc la chambre une grande partie du temps, un confinement, ...
- L'algorithme de recalibrage de ce genre de capteurs utilise la valeur classique de l'air extérieur au moment de sa fabrication (typiquement 375-400 ppm dans les années 2000, 450 ppm en 2020, ...). La précision de mesure est donc affectée par cette évolution régulière du taux de CO₂ extérieur qui peut impacter la mesure de façon non négligeable, surtout si les produits sont destinés à fonctionner pendant au moins 10 ans sans maintenance.
- La période d'auto-calibration des capteurs réalisée chez Aereco a surtout permis d'améliorer la justesse de mesures à 400 ppm : 98%, 80% et 51% des capteurs sont dans les tolérances totales (avec compensation de l'environnement) pour les concentrations de 400, 1000 et 1700 ppm respectivement. Il en résulte qu'un auto-étalonnage en 1 point (à 400 ppm) semble insuffisant pour assurer une mesure correcte aux concentrations plus hautes.
- La prise en compte de l'effet environnemental (Pression barométrique et Température) permet d'améliorer de façon non négligeable la justesse de mesure. En effet, la proportion de capteurs qui sont dans les spécifications techniques passe de 66 à 80% à 1000 ppm et 44 à 51% à 1700 ppm. L'intégration d'un capteur de température et d'un capteur barométrique permettrait d'améliorer la qualité de mesures au cours du temps et lors de l'auto-calibration. Certains fabricants commencent déjà à le faire (exemple : les capteurs EE894 et EE895 du fabricant EplusE).

1.3.2 Impacts

La Figure 8 montre un exemple de courbe de ventilation contrôlée linéaire basée sur les capteurs de CO₂ testés. Les données en bleu sont la mesure de référence et sont considérées comme la régulation souhaitée. Le débit d'air varie linéairement entre une valeur minimale (Q_{min}) au niveau de CO₂ minimum (point de consigne de 1000 ppm choisi ici) et une valeur maximale (Q_{max}) au niveau de CO₂ maximum (point de consigne de 1700 ppm choisi ici). Les données en rouge sont la valeur médiane sur l'ensemble des capteurs testés, après 13 ans d'exploitation. Les zones en gris foncé

montrent Q1 (25e percentile) à Q3 (75e percentile) des données observées. Les zones en gris clair représentent 3 intervalles interquartiles des données observées. Elles sont une représentation de la dispersion des données, à l'exclusion des valeurs aberrantes qui sont représentées par des points sur les boîtes à moustaches. Comme elles n'ont aucun impact sur la régulation, les mesures à 400 ppm n'ont pas été utilisées pour ces graphiques. Les données des capteurs tels que collectées (test 1) sont tracées dans la Figure 8a tandis que les données des capteurs correctement auto-calibrés (test 2) sont tracées dans la Figure 8b.

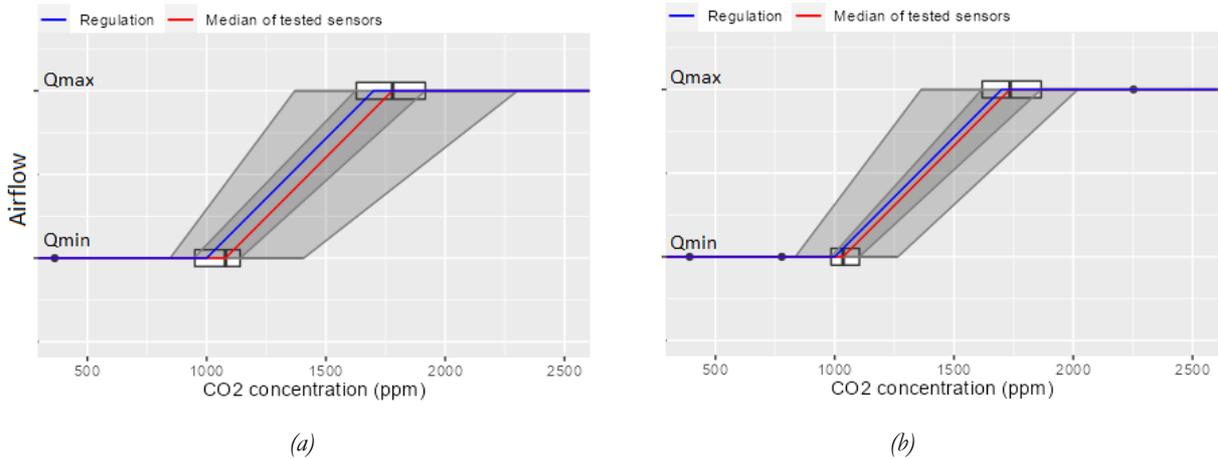


Figure 11 : (a) Impact of the CO₂ sensor's drift on a DCV regulation, test data from sensors as collected and (b) Test data from correctly self-calibrated sensors

Il est observé que la courbe rouge est décalée vers des niveaux de CO₂ plus élevés, en raison de concentrations minimales de CO₂ supérieures à 400 ppm rencontrées par les capteurs dans les logements occupés (+ 79 ppm en médiane, côté gauche) et, dans une moindre mesure, lors de l'auto-calibration correcte (+ 35 ppm en médiane, côté droit). Cela entraînera un taux de surventilation par rapport à la stratégie initiale, compromettant l'efficacité énergétique du système.

La dispersion entre les capteurs tels que collectés est élevée : [1079 - 328; 1079 + 232] ppm à 1000 ppm et [1779 - 525; 1079 + 409] ppm à 1700 ppm. Elle est légèrement meilleure mais de même ordre de grandeur une fois correctement auto-calibrée : [1035 - 230; 1079 + 200] ppm à 1000 ppm et [1735 - 285; 1079 + 372] ppm à 1700 ppm. Le comportement et les performances seront donc très variables.

2 PRECONISATIONS TECHNIQUES POUR GARANTIR LA DURABILITE DES PERFORMANCES DE LA VENTILATION RESIDENTIELLE

La durabilité des performances des bâtiments reste une question cruciale à traiter. Avec la ventilation à débits modulés, ou ventilation intelligente, comme la ventilation hygro-réglable, nous autorisons généralement des débits d'air plus faibles à certains moments lorsque les besoins sont faibles (humidité faible, absence d'occupation, faibles émissions, etc.), mais nous devons nous assurer que les systèmes de ventilation ne restent pas bloqués à ces débits faibles. De manière générale avec ces systèmes intelligents, encore plus qu'avec d'autres systèmes de ventilation à des débits constants, il est crucial de s'assurer que les débits d'air prévus sont toujours correctement fournis, à réception et tout au long de la durée de vie du bâtiment. Nous l'avons vu, la durée de vie d'un système de ventilation est de l'ordre de 25 ans (Feist et al., 2020), (Durmisevic, 2006), il est donc important que les composants et l'ensemble des capteurs pilotant les débits de ventilation offrent des performances durables sur 25 ans.

Aux vues des résultats mis en évidence sur l'impact de la maintenance, et son manque de réalisation et de qualité, il est également important lors de la conception et l'installation, d'envisager que ces systèmes auront un coût non seulement à l'installation, mais aussi de maintenance sur une durée de l'ordre de 25 ans.

2.1 Préconisations pour les réglementations et les commissions de validation

Ces préconisations visent les réglementations et les commissions de validation qui incluent :

- CCFAT – GS14.5 "Equipements / Ventilation et systèmes par vecteur air" - Avis techniques. Cette commission permet de valider l'utilisation de systèmes de ventilation sur la base de dossier techniques déposés par les industriels de la ventilation avec un cadre d'application défini.
- GT ESSOC 1 "Aération/renouvellement d'air" – Travaux terminés. Le code de la construction a déjà été modifié pour permettre une procédure de validation des projets (pas des systèmes) basée sur le principe de la performance équivalente à des projets avec systèmes de référence existant. Seulement quelques projets sont passés par ce dispositifs qui sera automatiquement abrogé quand ESSOC 2 rentrera en vigueur (1/1/25)
- GT ESSOC 2 « Aération/renouvellement d'air » – Travaux en cours. Ce Groupe de travail présidé par la DHUP publiera une procédure de validation des projets (pas des systèmes) sur le principe de la performance minimale à atteindre en termes de QAI, ce nouveau texte sera une alternative "performantielle " à la réglementation prescriptive actuelle pour la ventilation des logements. Les exigences en termes de QAI seront fixées pour être cohérentes avec les systèmes actuellement réglementaires selon l'arrêté de 82/83.

Nous préconisons :

- Que les systèmes de ventilation avec débit modulable soient autorisés/valorisés à conditions qu'ils soient assortis de données sur la durabilité des capteurs/activateurs

ou avec une valeur limite de précision des capteurs (comme c'est le cas en Belgique (Moniteur Belge, 2015), tableau en annexe), assortie d'une dérive maximale dans le temps.

- Que les systèmes de ventilation avec détection des fautes soient valorisés
- Que les protocoles d'inspection
 - Incluent une vérification de la réactivité de l'ensemble des composants avec capteurs
 - Incluent des vérifications sur la conformité des capteurs mis en place
 - Soit réalisés périodiquement sur la durée de vie du bâtiment

2.2 Préconisations pour les industriels

Nous préconisons :

- De n'utiliser dans le développement de produits que des capteurs avec une précision suffisante et sans dérive dans le temps,
- De réaliser des études sur la durabilité (vieillesse) de leurs composants dont les capteurs/activateurs,
- De développer des moyens de détection des fautes pour alerter l'occupant et/ou le gestionnaire du bâtiment et de déclencher un nettoyage ou une maintenance,

2.3 Préconisations pour les gestionnaires de bâtiments

Nous préconisons :

- De poursuivre la maintenance régulière a minima une fois par an des systèmes de ventilation, en s'assurant en amont de la qualité et du détail des cahiers des charges des appels d'offres et du contenu attendu pour les rapports de maintenance,
- D'intégrer une sensibilisation de l'occupant aux bases de la ventilation (sens de l'air dans les bouches/entrées d'air et utilisation de la tirette en cuisine) lors de la maintenance annuelle par le professionnel, permettrait :
 - A l'occupant de comprendre l'intérêt du débit nominal et à en faire usage quand il le faut,
 - De limiter les obstructions de bouches et entrées d'air,
 - De faire changer les piles sur les produits anciens qui le nécessitent,
 - De mieux penser l'agencement des meubles en cuisine pour accéder à la tirette,
- De s'assurer de la qualité et exhaustivité de la réalisation de cette maintenance régulière de l'ensemble des composants de la ventilation, dont les bouches et entrées d'air, et du contenu des rapports de maintenance,
- De contacter les industriels fabricants pour toute réparation ou changement partiel de composant de l'installation,
- De s'assurer du changement des piles dans les bouches localisées dans les toilettes,

- D'investir dans des actions régulières de communication avec les occupants pour le nettoyage qui est à leur charge/responsabilité et qui améliorent leur confort et leur santé, et pour éviter qu'ils détériorent le matériel et avec lui leurs conditions de vie,
- De développer des moyens de détection des fautes pour déclencher un nettoyage ou une maintenance en dehors des périodes de maintenance annuelle,
- D'éviter d'investir dans des installations de suivi de la qualité de l'air avec des capteurs sans garantie sur la précision et la durabilité de ces capteurs.

2.4 Préconisations pour la révision des normes européennes

2.4.1 Révision de la norme EN 16798-1 – Performance énergétique des bâtiments - Ventilation des bâtiments - Partie 1 : données d'entrées d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, l'ambiance thermique, l'éclairage et l'acoustique (Module M1-6)

Cette norme, actuellement en révision, devrait intégrer des critères performanciers pour dimensionner et évaluer les systèmes de ventilation. Ces éléments permettront de mieux évaluer les performances des systèmes « intelligents » régulant les débits. Néanmoins, des critères de durabilité des systèmes et de précision et durabilité des capteurs modulant les débits devraient également être intégrés pour évaluer les performances des systèmes.

2.4.2 Révision de la norme EN 15665 – Ventilation des bâtiments - Détermination des critères de performance pour les systèmes de ventilation résidentielle

Pour aider à évaluer la durabilité des systèmes, une annexe (informative) devrait donner des valeurs précises de dérive qui pourraient ensuite être prises en compte dans les évaluations des performances.

Cette norme pourrait aussi intégrer, une annexe informative permettant d'évaluer les coûts des différents systèmes qui intégreraient :

- a) Une analyse du coût initial.
- b) Une analyse à 25 ans en prenant en compte, la consommation d'énergie, la QAI, la maintenance et la durabilité et robustesse du système

2.4.3 Normes d'inspection

En Europe, il existe 3 normes d'inspection pour les systèmes de ventilation :

- a) L'EN 16798-17 : Performance énergétique des bâtiments - Partie 17 : ventilation des bâtiments - Lignes directrices pour l'inspection des systèmes de ventilation et de conditionnement d'air
 - En complément de l'évaluation à réception, cette norme pourrait intégrer des recommandations pour évaluer les performances du système après un certain nombre d'année (à partir des data sur les dérives potentielles),
- b) L'EN 16211 : Ventilation des bâtiments - Mesurages des débits d'air sur site – Méthodes

- Cette norme ne propose que des méthodes de mesure de débit pour les systèmes à débit constant. Il serait intéressant d'intégrer des procédures d'évaluation adaptés aux systèmes « intelligents » qui modulent les débits en permanence.
- c) L'EN 12599 : Ventilation des bâtiments - Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de conditionnement d'air et de ventilation
- Cette norme donne des directives générales sur l'évaluation des systèmes de ventilation et manque actuellement d'information sur le contrôle des systèmes à la demande.

2.5 Préconisations pour les financeurs de la recherche (ANR/ADEME/Horizon Europe/etc.)

Aussi bien notre état de l'art que les résultats de ce projet illustrent un besoin de financement de travaux de recherche d'envergure au niveau français et européen sur :

- La durabilité intrinsèque des systèmes de ventilation de tout type,
- La performance in situ à long terme de la ventilation, avec le suivi de parc de bâtiments divers – pas seulement les logements,
- Le développement de capteurs fiables, robustes et durables,
- Le développement de connaissances nouvelles sur l'impact de la maintenance et de son calendrier, avec des tests à 1, 3, 6, 12 mois et chiffrage économique des impacts et coûts évités,
- La résilience de ces systèmes aux climats futurs, avec des travaux de simulation et des expérimentations en laboratoires avec enceintes climatiques,
- Les impacts multi-critères des stratégies de ventilation, incluant QAI, énergie, sobriété, santé, adaptation aux dérèglements climatiques et environnementaux (pandémies, feux), performances cognitives, impacts économiques. Pour cela des approches multidisciplinaires sont nécessaires et requièrent des financements plus importants,
- La sensibilisation des différents acteurs autour de l'importance de la ventilation, de son choix à son utilisation jusqu'à l'utilisateur final, en passant par la maintenance,
- Sur le développement de systèmes de détection de fautes et d'incitation à l'utilisateur, incluant des techniques issues de la psychologie sociale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anastasiou, E., Vilcassim, M.J.R., Adragna, J., Gill, E., Tovar, A., Thorpe, L.E., Gordon, T., 2022. Feasibility of low-cost particle sensor types in long-term indoor air pollution health studies after repeated calibration, 2019–2021. *Sci Rep* 12, 14571. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18200-0>
- Blomsterberg, A., Carlsson, T., Kronvall, J., 1995. Short term and long term measurements of ventilation in dwellings. Presented at the 16th AIVC Conference “Implementing the results of ventilation research,” Palm Springs, USA.
- Durmisevic, E., 2006. TRANSFORMABLE BUILDING STRUCTURES Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction, Delft University.
- Estaji, H., 2017. A Review of Flexibility and Adaptability in Housing Design. *Int. J. Contemp. Archit* 4, 37–49. <https://doi.org/10.14621/tna.20170204>.
- Feist, W., Pfluger, R., Hasper, W., 2020. Durability of building fabric components and ventilation systems in passive houses. *Energy Efficiency* 13, 1543–1559. <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09781-3>
- Fisk, W.J., Faulkner, D., Sullivan, D.P., 2006. Accuracy of CO2 sensors in commercial buildings: a pilot study. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Gosling, J., Sassi, P., Naim, M., Lark, R., 2013. Adaptable buildings: A systems approach. *Sustainable Cities and Society* 7, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.11.002>
- Howarth, C.B., 2001. The reliability of radon reduction techniques. *Science of The Total Environment* 272, 349–352. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00716-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00716-1)
- Huang, K., Sun, W., Feng, G., Wang, J., Song, J., 2020. Indoor air quality analysis of 8 mechanically ventilated residential buildings in northeast China based on long-term monitoring. *Sustainable Cities and Society* 54, 101947. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101947>
- Kesselring, J.P., Koontz, M.D., Cade, D.R., Nagda, N.L., 1993. Evaluation of residential ventilation controller technology, in: *Proceedings of 'Indoor Air '93', The 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate"*. Finland, Helsinki, p. pp 73-78.
- Malings, C., Tanzer, R., Hauryliuk, A., Saha, P.K., Robinson, A.L., Presto, A.A., Subramanian, R., 2020. Fine particle mass monitoring with low-cost sensors: Corrections and long-term performance evaluation. *Aerosol Science and Technology* 54, 160–174. <https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1623863>
- Mélois, A., Legree, M., Sebastian Rios Mora, J., Depoorter, J., Jardinier, E., Berthin, S., Parsy, F., Guyot, G., 2023. Durability of humidity-based ventilation components after 13 years of operation in French residential buildings – Assessment of components performance in laboratory. *Energy and Buildings* 292, 113154. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113154>
- Moniteur Belge, 2015. Arrêté ministériel déterminant les valeurs du facteur de réduction pour la ventilation visé à l'annexe A1 de l'arrêté du Gouvernement wallon du 15

mai 2014 portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments.

- Ouazia, B., Arsenault, C., Li, Y., Brown, M., Chisholm, C., 2019. Long-term performance and resiliency testing of a dual core energy recovery ventilation system for the Arctic. Presented at the 40th AIVC - 8th TightVent - 6th venticool Conference -, Ghent, Belgium.
- Pallari M-L, Luoma M, 1993. Long-term Performance of Residential Ventilation Systems. Presented at the 14th AIVC Conference "Energy Impact of Ventilation and Air Infiltration," Copenhagen, Denmark.
- Sá, J.P., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G., Sousa, S.I.V., 2022. Application of the low-cost sensing technology for indoor air quality monitoring: A review. *Environmental Technology & Innovation* 28, 102551. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102551>
- Schibuola, L., Scarpa, M., Tambani, C., 2018. Performance optimization of a demand controlled ventilation system by long term monitoring. *Energy and Buildings* 169, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.059>
- Simanic, B., Nordquist, B., Bagge, H., Johansson, D., 2019. Indoor air temperatures, CO2 concentrations and ventilation rates: Long-term measurements in newly built low-energy schools in Sweden. *Journal of Building Engineering* 25, 100827. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100827>
- Zhang, H., Srinivasan, R., 2020. A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management. *Sustainability* 12, 9045. <https://doi.org/10.3390/su12219045>
- Zhao, L., Liu, J., 2020. Operating behavior and corresponding performance of mechanical ventilation systems in Chinese residential buildings. *Building and Environment* 170, 106600. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106600>

ANNEXES

Annexe 1 : Extrait de l'arrêté du Moniteur Belge, 13.11.2015

(Moniteur Belge, 2015) Moniteur Belge, 2015. Arrêté ministériel déterminant les valeurs du facteur de réduction pour la ventilation visé à l'annexe A1 de l'arrêté du Gouvernement wallon du 15 mai 2014 portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments.

MONITEUR BELGE — 13.11.2015 — BELGISCH STAATSBLAD

68615

Art. 2. Le présent arrêté entre en vigueur le 1^{er} décembre 2015.

Bruxelles, le 29 octobre 2015.

La Ministre de l'Enseignement de Promotion Sociale, de la Jeunesse, des Droits des femmes et de l'Egalité des chances,
Mme I. SIMONIS

VERTALING

MINISTERIE VAN DE FRANSE GEMEENSCHAP

[C – 2015/29552]

29 OKTOBER 2015. — Ministerieel besluit tot goedkeuring van het referatiedossier van de onderwijseenheid « Burgerzin » (code 050202U11D1), gerangschikt op het niveau van het lager secundair overgangsonderwijs voor sociale promotie

3.2.4 Incertitude des capteurs de détection

Les capteurs utilisés pour la détection des besoins, comme spécifié dans la suite du texte, doivent avoir une incertitude maximale sur la valeur du paramètre mesuré comme suit :

- Pour les capteurs de concentration en CO₂ : +/- 40 ppm + 5 % de la valeur, entre 300 et 1 200 ppm (exemple pour une exigence de 950 ppm, l'intervalle de tolérance est compris entre 862 ppm et 1 038 ppm);
- Pour les capteurs d'humidité relative (RH) : +/- 5 points de pourcentage d'humidité relative, entre 10 % et 90 % (exemple pour une exigence de 35 % d'humidité relative, l'intervalle de tolérance est compris entre 30 % et 40 % d'humidité relative).

Résumé

La durabilité des performances des bâtiments reste une question cruciale à traiter. Avec la ventilation à débits modulés, ou ventilation intelligente, comme la ventilation hygroréglable, des débits d'air plus faibles sont autorisés à certains moments lorsque les besoins sont faibles (humidité faible, absence d'occupation, faibles émissions, etc.), mais il est nécessaire de s'assurer que les systèmes de ventilation ne restent pas bloqués à ces débits faibles. La durée de vie d'un système de ventilation est de l'ordre de 25 ans, il est donc important que les composants et l'ensemble des capteurs pilotant les débits de ventilation offrent des performances durables sur 25 ans. Aux vues des résultats mis en évidence sur l'impact de la maintenance, et son manque de réalisation et de qualité, il est également important lors de la conception et l'installation, d'envisager que ces systèmes auront un coût non seulement à l'installation, mais aussi de maintenance sur une durée de l'ordre de 25 ans. A ces fins, les conclusions de cette tâche 4 intègre des recommandations à destination :

- Des responsables des évolutions des réglementations et des membres des commissions de validation ;
- Des industriels ;
- Des gestionnaires de bâtiments ;
- Des membres des commissions de normalisation européenne ;
- Des financeurs de la recherche.