

PERFORMANCE 2 : DURABILITE DES SYSTEMES DE VENTILATION HYGROREGLABLE

Bilan du projet

RAPPORT FINAL



EXPERTISES

Juin
2024

REMERCIEMENTS

L'ensemble des membres du Consortium du projet Performance 2 ayant pris part aux travaux réalisés et aux résultats produits sont listés ci-dessous :

Cerema : Adeline Mélois, Gaëlle Guyot, Manon Santerne, Maryse Renaud, Ambre Marchand-Moury, Catherine Nauleau, Sylvain Rebières, Romuald Jobert, Sophie Zany, Murielle Clairis, Lucie Deroo, Cécile Caudron, Nathalie Moral, Stéphanie Bordel, Nathan Vala, Sandrine Charrier, Emmanuel Roux, Valérie Leprince

Aereco : Marc Legree, Juan Rios, Stéphane Berthin, Elsa Jardinier, François Parsy

Anjos : Jérémy Depoorter, Nicolas Dufour, David Salvetat

LOCIE : Evelyne Gonze, Michel Ondarts, Jonathan Outin, Benjamin Golly

CITATION DE CE RAPPORT

MÉLOIS Adeline. 2024. PERFORMANCE 2 : DURABILITE DES SYSTEMES DE VENTILATION HYGROREGLABLE – Bilan du projet. 43 pages.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2004C0014

Étude réalisée par (Cerema : Adeline Mélois, Gaëlle Guyot, Manon Santerne, Maryse Renaud, Ambre Marchand-Moury, Catherine Nauleau, Sylvain Rebières, Romuald Jobert, Sophie Zany, Murielle Clairis, Lucie Deroo, Cécile Caudron, Nathalie Moral, Stéphanie Bordel, Nathan Vala, Sandrine Charrier, Emmanuel Roux, Valérie Leprince ; Aereco : Marc Legree, Juan Rios, Stéphane Berthin, Elsa Jardinier, François Parsy ; Anjos : Jérémy Depoorter, Nicolas Dufour, David Salvetat ; LOCIE : Evelyne Gonze, Michel Ondarts, Jonathan Outin, Benjamin Golly) pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Adeline Mélois - Cerema

Appel à projet de recherche : Vers des Bâtiments responsables – Edition 2020

Coordination technique - ADEME : DEROUBAIX Pierre et MARX Etienne

Direction/Service : DVTD/SB

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	6
ABSTRACT	7
INTRODUCTION	8
1. PARTIE 1 : SUIVI DU PROJET	9
1.1. Rappels des objectifs du projet	9
1.2. Coordination du projet	11
1.3. Calendrier du projet	12
1.4. Liste des livrables du projet.....	13
1.5. Difficultés rencontrées.....	14
1.5.1. Changements de constitution des équipes du projet.....	14
1.5.2. Un contexte COVID encore très présent	14
1.5.3. Une instrumentation lourde à gérer pendant les 4 ans du projet.....	14
1.6. Perspectives.....	15
2. PARTIE 2 : SYNTHÈSE DES TRAVAUX RÉALISÉS	16
2.1. Tâche 1 : Organisation des campagnes de mesure de la performance in situ	16
2.1.1. Objectif.....	16
2.1.2. Organisation	16
2.1.3. Synthèse des diagnostics des installations de ventilation.....	17
2.1.4. Monitoring en continu : fonctionnement de la ventilation et qualité d'air intérieur .	18
2.1.5. Campagnes de mesures hivernales Qualité de l'Air Intérieur - QAI	19
2.1.6. Synthèse des retours auprès des offices de logement social et des occupants participants	20
2.2. Tâche 2 : Caractérisation en laboratoire de la pérennité technologique des performances des composants de ventilation et intercomparaison des moyens de mesure de la qualité de l'air intérieur	21
2.2.1. Objectifs.....	21
2.2.2. Caractérisation des terminaux hygrorégulables	21
2.2.2.1. Caractérisation des terminaux de Paris.....	21
2.2.2.2. Synthèse des résultats.....	23
2.2.3. Caractérisation des capteurs embarqués.....	23
2.2.3.1. Résultats - Site Paris.....	23
2.2.3.2. Résultats - Site de Villeurbanne.....	24
2.2.4. Intercomparaison des matériels de mesure QAI.....	25
2.3. Tâche 3 : Analyse de la durabilité des performances : entre pérennité des technologies proposées et robustesse aux sollicitations de l'occupant	27
2.3.1. Synthèse de l'étude bibliographique	27
2.3.2. Analyse des données recueillies lors des campagnes in-situ sur les deux sites.....	28
2.3.3. Évaluation de la durabilité des systèmes de ventilation hygrorégulable étudiés.....	30
2.3.3.1. Indicateurs liés à l'énergie.....	30
2.3.3.1.1. Consommation des ventilateurs	30
2.3.3.1.2. Débits déperditifs	31

2.3.3.2. Fonctionnement hygroréglable des systèmes de ventilation.....	31
2.3.3.2.1. Echelle des terminaux	32
2.3.3.2.2. Echelle du logement	33
2.4. Partie 3 : Analyse multicritères de la performance des systèmes de ventilation hygroréglable.....	34
2.4.1. Etude complémentaire des concentrations en CO ₂	34
2.4.2. Etude complémentaire des niveaux d'humidité relative.....	35
2.4.3. Analyse de la QAI	36
2.4.1.1. Cas particuliers à Paris	37
2.4.1.2. Cas particuliers à Villeurbanne	38
2.5. Tâche 4 : Elaboration de préconisations techniques.....	39
2.6. Tâche 5 : Valorisation scientifique et diffusion.....	40
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	42
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	43
SIGLES ET ACRONYMES	44

RÉSUMÉ

Le projet Performance 2 vise à évaluer la durabilité des systèmes de ventilation hygroréglable et à approfondir les connaissances scientifiques sur leur performance globale, tant en termes d'efficacité énergétique que de Qualité d'Air Intérieur (QAI). Ce projet s'inscrit dans le cadre de l'appel à projet de recherche « Vers des Bâtiments responsables » de l'édition 2020. Il est coordonné par le Cerema et financé par l'ADEME. Les principaux partenaires impliqués sont le Cerema, Aereco, Anjos et le LOCIE.

Le projet s'est articulé autour de :

- Campagnes de mesure en laboratoire, pour caractériser les performances des terminaux de ventilation et les performances des appareils de mesure ;
- Campagnes de mesures in-situ dans deux immeubles, à travers un monitoring en continu pendant deux ans du fonctionnement des terminaux de ventilation ainsi que des mesures de température, humidité relative, dioxyde de carbone (CO₂), Composés Organiques Volatils (COV) et particules fines (PM). Ce monitoring a été complété par deux campagnes hivernales QAI qui intègrent les mêmes mesures ainsi que des mesures de formaldéhyde et des collectes d'information auprès des occupants.

De nombreuses analyses de l'ensemble de ces données recueillies pendant ces campagnes ont permis tout d'abord de montrer qu'**après 15 ans d'utilisation dans des logements sociaux, les systèmes de ventilation hygroréglable étudiés continuent de répondre correctement aux conditions d'humidité relative et fournissent des débits qui varient en fonction de l'occupation et assurent des bonnes conditions d'humidité et de CO₂**, malgré quelques terminaux de ventilation dont le fonctionnement est plus limité qu'à la réception. Les analyses dédiées à la QAI, avec notamment l'étude des concentrations en COV, PM et formaldéhyde, montrent que les situations avec des niveaux élevés pour ces polluants correspondent à des logements avec des sources intérieures importantes - fumeurs ou à l'usage important de produits émissifs (notamment désodorisant, encens et parfums d'ambiance) – et non à la performance de la ventilation.

Les analyses en laboratoire permettent de quantifier l'impact de la maintenance, notamment sur le bon fonctionnement des terminaux.

Ces résultats ont permis d'élaborer des recommandations à destination des décideurs pour **faire évoluer le corpus réglementaire et normatif**, mais aussi des industriels pour **faire évoluer leurs produits**, des maîtres d'ouvrage pour les **sensibiliser au choix des systèmes et à l'importance de la maintenance**, et pour les financeurs de travaux de recherche afin de **prioriser les futures études**.

ABSTRACT

The Performance 2 project aims to evaluate the durability of humidity-controlled ventilation systems and to deepen scientific knowledge about their overall performance. It addresses both energy efficiency and indoor air quality (IAQ). This project is part of the 2020 edition of the "Towards Responsible Buildings" research call funded by ADEME. It is coordinated by Cerema. The main partners involved are Cerema, Aereco, Anjos, and LOCIE.

The project was based on:

- Laboratory measurement campaigns to characterize the performance of ventilation terminals and the performance of measurement devices;
- In-situ measurement campaigns in two buildings, involving continuous monitoring over two years of the operation of air terminal devices as well as measurements of temperature, relative humidity, carbon dioxide (CO₂), Volatile Organic compounds (VOCs), and Particulate Matter (PM). This monitoring was supplemented by two winter campaigns that included the same measurements as well as measurements of formaldehyde and information collected from the occupants.

Numerous analyses of all the data collected during these campaigns show that **after 15 years of use in social housing, the studied humidity-controlled ventilation systems continue to respond correctly to relative humidity conditions. They provide airflow rates that vary according to occupancy, ensuring good humidity and CO₂ conditions**, despite some air terminal devices functioning less efficiently than at the time of reception. IAQ-specific analyses, particularly the study of VOC, PM, and formaldehyde concentrations, indicate that the situations with high levels of these pollutants correspond to important pollutants emissions - smoking households or significant use of emissive products (notably air fresheners, incense, and ambient perfumes) – and not lack in ventilation system performance.

The laboratory analyses lead to the quantification of the impact of maintenance on the proper functioning of the air terminal devices.

These results have led to the development of recommendations aimed at stakeholders to **evolve the regulatory and normative framework**, but also at manufacturers to **improve their products**, project owners to **raise awareness about the choice of systems and the importance of maintenance**, and research funders to **prioritize future studies**.

Introduction

Ce document constitue la valorisation d'un projet de recherche soutenu par l'ADEME et le Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des territoires (DGALN/DHUP). Ce projet a été retenu dans le cadre de l'Appel à projet de recherche « Vers des bâtiments responsables à horizon 2020 » - Edition 2020. Ce projet est particulièrement soutenu par Etienne Marx, chef de projet (ADEME), ainsi que Léa Garrot (DGALN/DHUP). Le projet Performance 2 est un projet multi-partenarial coordonné par le Cerema. L'ensemble des partenaires (Cerema, Anjos, Aereco et le LOCIE) ont été mobilisés sur l'intégralité du projet.

Le projet Performance 2, conformément à la convention n°2004C00149 entre l'ADEME et les partenaires du projet Performance 2, a débuté le 08 juillet 2020. Le présent document est le rapport final du projet, réalisé par le Cerema, pilote du projet. Conformément à l'article 3 de la convention précitée, il est adressé à l'ADEME 45 jours avant la fin du projet, soit le 8 juin 2024. Ce rapport est constitué de :

- Partie 1 portant sur le suivi du projet : rappels des objectifs, coordination, calendrier et livrables du projet, difficultés rencontrées et perspectives ;
- Partie 2 présentant de façon détaillée les résultats obtenus et les conclusions du projet.

1. Partie 1 : Suivi du projet

1.1. Rappels des objectifs du projet

Le projet Performance 2 a pour objectif principal de produire de nouvelles connaissances issues d'un retour d'expérience inédit sur des systèmes de ventilation intelligents hygroréglable installés dans des bâtiments occupés depuis 15 ans, afin de faire évoluer les connaissances, les systèmes voire les réglementations futures vers cette notion de performance globale et durable des bâtiments, en prenant en compte ses occupants.

La ventilation intelligente de type hygroréglable a été étudiée lors du Projet « Performance » (ou « Performance 1 »). Ce projet était soutenu par l'ADEME (PREBAT, 2007-2010) et piloté par l'association Air.h, en partenariat avec des centres d'études privés et publics (CSTB, CETE – devenu Cerema, COSTIC, Cetiat), un bureau d'études indépendant (Allie Air) et des entreprises (AERECO, Anjos, Atlantic, Aldes). Il se basait sur le suivi de la construction de deux immeubles de logements sociaux à Paris et à Villeurbanne, équipés de ce type de ventilation ainsi que de nombreux capteurs et instrumentations de suivi embarqués. Lors de leur construction en 2007-2009, les deux immeubles situés à Paris et Villeurbanne ont été instrumentés grâce à des capteurs installés dans 31 appartements pour mesurer en continu le dioxyde de carbone (CO₂), l'humidité relative (HR), la température et le fonctionnement des bouches d'extraction (ouverture et pression donc débit) et entrées d'air (ouverture). Chaque immeuble était par ailleurs doté d'une station météorologique (2 pour le site de Paris) et d'une centrale d'acquisition des données multiples. Le projet avait notamment pour objectif de déterminer les performances des systèmes de ventilation hygroréglable en termes de qualité de l'air intérieur et d'efficacité énergétique. Le projet Performance 1 a constitué un projet important sur lequel a pu s'appuyer le corpus réglementaire relatif à la ventilation et à l'étanchéité à l'air depuis 2010 à travers la réglementation thermique 2012. Il s'agissait d'un projet innovant car un tel suivi instrumenté des systèmes de ventilation sur des appartements occupés n'avait encore jamais été réalisé. La performance de ces systèmes a été démontrée en mettant en avant le bon fonctionnement pour évacuer les excès d'humidité (humidité relative mesurée) et la réponse satisfaisante quant au taux de CO₂ émis par les occupants.

L'instrumentation embarquée des deux opérations, très rare en France et dans le monde, et toujours en état de fonctionnement aujourd'hui, a offert l'opportunité exceptionnelle d'évaluer la durabilité des performances des systèmes de ventilation, tout en produisant de nouvelles connaissances sur l'intelligence de ces systèmes. Le projet Performance 2 vise principalement deux objectifs :

1. Premièrement, le développement de connaissances scientifiques sur la performance globale des systèmes de ventilation hygroréglable, en intégrant performance énergétique et qualité de l'environnement intérieur (paramètres de confort et qualité d'air intérieur) ;
2. Deuxièmement, l'évaluation de la durabilité de la ventilation hygroréglable une fois installée in situ composée d'une part de la pérennité technologique intrinsèque de l'ensemble des composants, capteurs, contrôleurs de ces systèmes intelligents durant leur vieillissement et leur vie dans le bâtiment, et d'autre part, de la robustesse à l'usage, c'est-à-dire la robustesse de l'ensemble de ces composants à l'utilisation qui en est faite par les occupants : entretien (ou absence), nettoyage (ou absence), utilisation imprévue et non adaptée (notamment obstruction ou colmatage, lié à différentes raisons propres aux occupants), à leur compréhension des enjeux, des systèmes, et à la façon dont les systèmes prennent en compte leurs besoins et attentes.

Ainsi, dans ce projet, il est proposé de :

- comparer la performance des systèmes de ventilation hygroréglable obtenue au bout de 15 ans, par un suivi continu sur deux saisons de chauffe, à la performance mesurée à réception de ces bâtiments, ne portant alors que sur des indicateurs basés sur la performance énergétique, l'humidité relative et le CO₂ ;
- identifier les raisons expliquant ces performances et/ou ces contre-performances observées : pérennité technologique, la vérification en laboratoire des unités et composants de ventilation, la robustesse à l'usage par les occupants, l'analyse des problèmes liés à la maintenance et à l'entretien, l'utilisation par les occupants (inspection visuelle, questionnaires et entretiens bilatéraux) ;

- mieux évaluer la qualité d'usage, notamment comprendre les attentes et besoins des occupants et identifier des pistes d'optimisation des systèmes pour l'amélioration de sa performance globale ;
- établir des critères pertinents de caractérisation de l'intelligence des systèmes de ventilation intégrant performance globale, durabilité des performances et prise en compte de l'usager.

Le projet Performance 2 est structuré autour de 6 tâches principales. Les tâches 1 à 4 sont les tâches opérationnelles du projet. La tâche 5 est dédiée à la valorisation des résultats du projet et la tâche 6 est constituée des travaux administratifs et organisationnels du projet. La Figure 1 présente l'organisation temporelle initiale des tâches. Les 6 tâches du projet sont décrites ci-dessous.

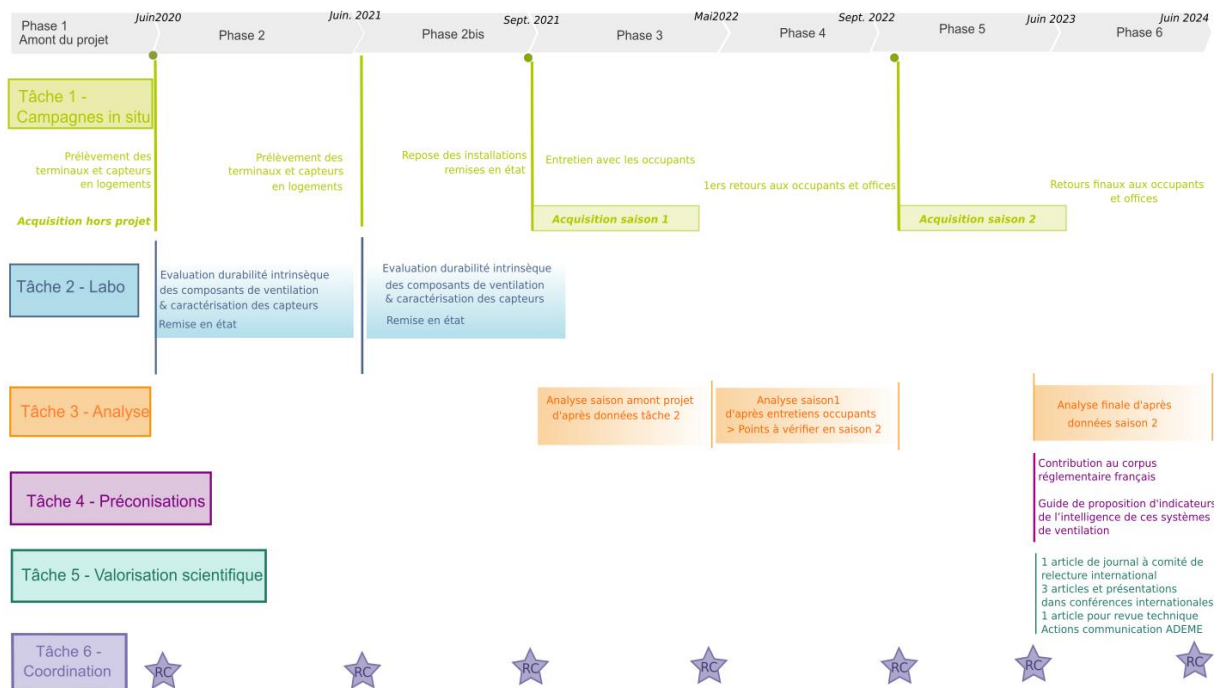


Figure 1 : Représentation temporelle des tâches du projet Performance 2

- **Tâche 1 : Organisation des campagnes de mesure de la performance in situ**
 - Définition du protocole d'intervention et d'instrumentation, incluant l'élaboration des questionnaires locataires
 - Recrutement des occupants volontaires pour participer au projet
 - Réalisation des deux campagnes de mesures hivernales dédiés à la QAI, incluant la réalisation des entretiens avec les participants
 - Monitoring en continu sur 2 ans via l'instrumentation embarquée
 - Retours auprès des offices de logement social
 - Retours auprès des participants
- **Tâche 2 : Caractérisation en laboratoire de la pérennité technologique des performances des composants de ventilation et intercomparaison des moyens de mesure de la qualité d'air intérieur**
 - Intercomparaison des appareils de mesure de la QAI
 - Caractérisation des performances des terminaux de ventilation
 - Etalonnage des capteurs embarqués
- **Tâche 3 : Analyse de la durabilité des performances : entre pérennité des technologies proposées et robustesse aux sollicitations de l'occupant**
 - Etude bibliographique
 - Evaluation de la durabilité de la ventilation
 - Evaluation multi-critère de la performance de la ventilation
- **Tâche 4 : Élaboration de préconisations techniques**
- **Tâche 5 : Valorisation scientifique et diffusion**
- **Tâche 6 : Coordination du projet**

Le pilotage du projet par le Cerema a été réalisé la première année par Sandrine Charrier, puis a été repris en septembre 2021 par Adeline Mélois.

1.2. Coordination du projet

La coordination du projet est assurée par le Cerema. Les comités techniques, (incluant la réunion de lancement) réunissent l'ensemble des partenaires techniques. Ils permettent de faire le point sur l'avancement technique du projet et d'échanger sur les tâches en cours. Ces réunions ont eu lieu deux fois par an, et ont fait l'objet d'ordre du jour et de compte-rendus formels.

7 comités techniques ont eu lieu :

- le 18 janvier 2021 (réunion de lancement)
- le 25 janvier 2021
- le 21 septembre 2021
- le 29 mars 2022
- le 13 septembre 2022
- le 27 mars 2023
- le 14 Septembre 2023.

Un comité technique de fin de projet de tiendra le 11 juin 2024, matin, avant la réunion de restitution du projet.

Les comités de pilotage réunissaient *a minima* un représentant de chaque partenaire technique du projet, un représentant de l'ADEME et un représentant de la DHUP. Ils permettaient de faire le point sur l'avancement global du projet, et d'échanger sur les aspects administratifs. Ces réunions ont eu lieu une fois par an, et ont fait l'objet d'ordre du jour et de compte-rendus formels.

3 comités de pilotage ont eu lieu :

- le 29 juin 2021 (la première réunion a été organisée en visioconférence en raison de la situation sanitaire liée au covid)
- le 13 septembre 2022 à Lyon
- le 14 septembre 2023 à Lyon.

En accord avec l'ADEME, la restitution du 11 juin 2024 vaut pour comité de pilotage final du projet.

Autres activités de pilotage :

- Un outil de suivi des réalisations du projet est rempli régulièrement, accessible par tous les partenaires techniques, avec des alertes sur les dates de rendus et une trace des retards et dysfonctionnements ;
- Un suivi du projet est réalisé en interne Cerema à partir de l'outil interne, avec suivi de l'avancée de travaux et suivi du temps de travail des équipes du Cerema ;
- Uniformité des livrables du projet : préparation de modèles de rapport, de modèles de poster, de flyers, d'un logo ;
- Gestion d'une plateforme d'échange de documents et de stockage des documents finaux (Box)
- Réunions de travail entre partenaires techniques : plusieurs réunions en présentiel et réunions par visioconférence ont été réalisées avec un ou plusieurs partenaires du projet, pour traiter d'un point particulier nécessitant un échange technique ou organisationnel. La fréquence de ces réunions est variable et chacune est organisée en fonction de l'activité en cours et des points techniques et administratifs à aborder le moment venu ;
- Discussions techniques ou administratives informelles entre partenaires techniques, et plus largement entre partenaires techniques et financiers, sous la forme d'échanges téléphoniques ou de mails ;
- Echanges avec les offices de logement social: signatures des conventions et avenants, recrutement des habitants volontaires, organisation des retours suite aux différentes campagnes sur site ;
- Mise en place de l'accord de consortium, signé en mars 2023 par tous les partenaires du projet ;
- Rédaction des livrables du projet.

1.3. Calendrier du projet

La convention prévoit une durée des travaux de 48,5 mois à compter du 08 juillet 2020. La date limite de fin du projet est donc le 23 juillet 2024. Le calendrier du projet a été respecté, avec le détail des travaux réalisés selon le calendrier présenté en Figure 2.

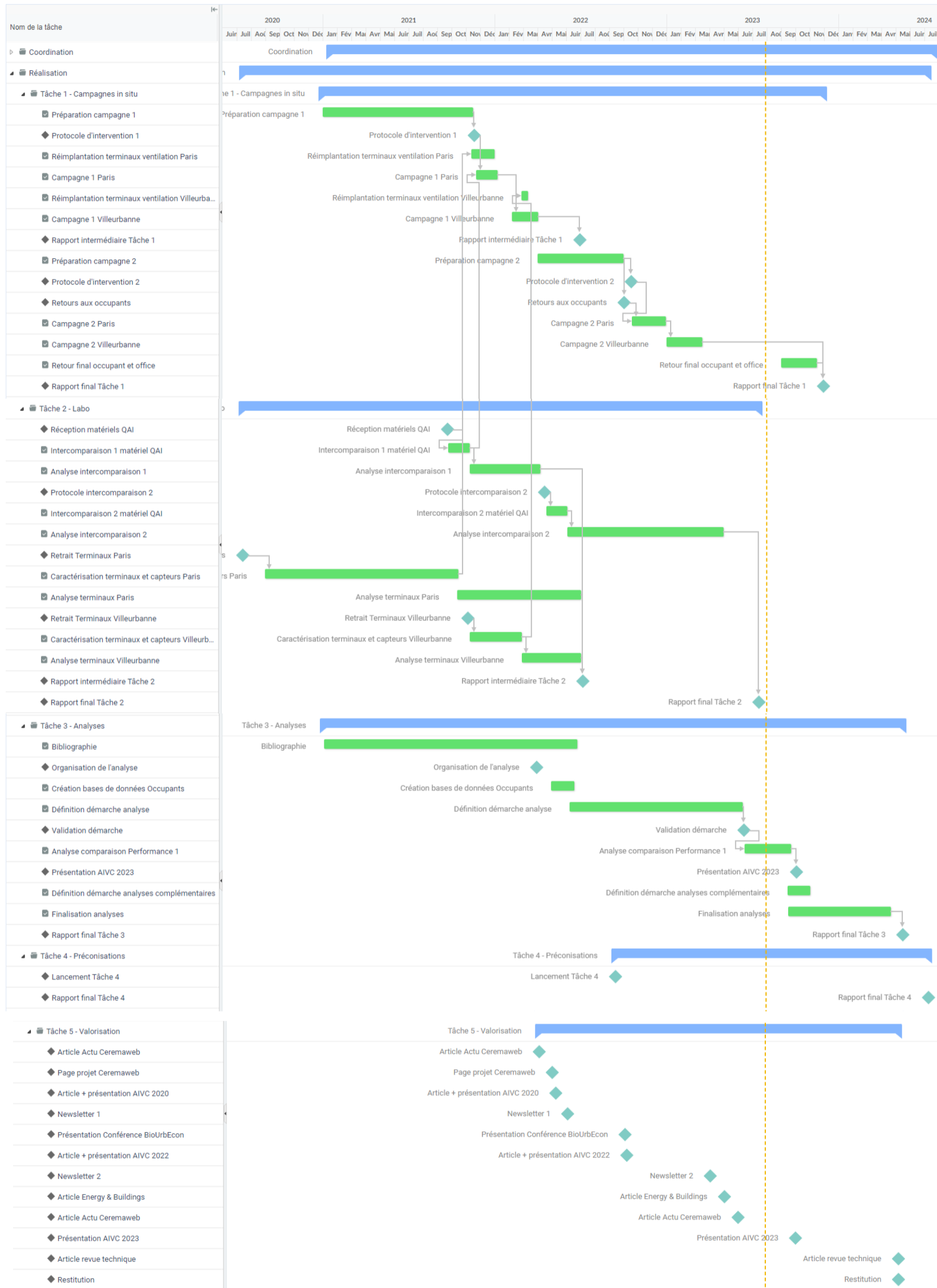


Figure 2 : Calendrier réalisé du projet Performance 2

1.4. Liste des livrables du projet

Le Tableau 1 fait état de l'ensemble des livrables du projet, qui sont disponibles à tous les partenaires du projet sur la plateforme de travail collaboratif BOX du Cerema. Des envois à l'ADEME des versions intermédiaires et finales ont été réalisés en 2022 et 2023. Toutes les versions finales seront envoyées à l'ADEME en juillet 2024.

Tableau 1 : Liste des livrables et bilan des envois

Tâche	Livrable	Envoi ADEME
Tâche 1 : Organisation des campagnes de mesure de la performance in situ	Rapport intermédiaire 1	Juillet 2022
	Rapport intermédiaire 2	Juillet 2023
	Rapport final _ Tâche 1	A faire : juillet 2024
Tâche 2 : Caractérisation en laboratoire de la pérennité technologique des performances des composants de ventilation et inter-comparaison des moyens de mesure de la qualité d'air intérieur	Rapport intermédiaire 1	Juillet 2022
	Rapport phase laboratoire Aereco Confidentiel _ vf	Juillet 2022
	Rapport phase laboratoire Anjos Confidentiel _ vf	Juillet 2022
	Rapport final _ Tâche 2	Juillet 2023
Tâche 3 : Analyse de la durabilité des performances : entre pérennité des technologies proposées et robustesse aux sollicitations de l'occupant	Rapport intermédiaire 1	Juillet 2022
	Rapport intermédiaire 2	Juillet 2023
	Rapport final _ Tâche 3	A faire : juillet 2024
Tâche 4 : Élaboration de préconisations techniques	Rapport final _ Tâche 4	A faire : juillet 2024
Tâche 5 : Valorisation scientifique et diffusion	Liste des publications	A faire : juillet 2024
Tâche 6 : Coordination du projet	Rapport d'avancement 1	Juillet 2022
	Accord de consortium	Mars 2023
	Rapport d'avancement 2	Juillet 2023
	Rapport final provisoire	Juin 2024
	Rapport final	A faire : juillet 2024
	Synthèse publique provisoire	Juin 2024
	Synthèse publique finale	A faire : juillet 2024
	Supports réunion de restitution	Juin 2024

1.5. Difficultés rencontrées

1.5.1. Changements de constitution des équipes du projet

Lors de la première année du projet, de nombreux départs des équipes initiales du projet ont eu lieu. Ces modifications des équipes projet et notamment des responsables de tâche, avec des remplacements par des nouveaux membres avec des compétences différentes des membres initiaux, ont entraîné des ajustements importants dans la répartition des travaux à réaliser entre les différentes équipes, et ont conduit notamment à :

- un retard important de la préparation de la première campagne. La mobilisation importante et urgente des nouveaux arrivants sur le projet et de l'ensemble des équipes a cependant permis de ne pas mettre en danger la réalisation de cette campagne ;
- un allègement de l'implication de la chercheuse en psychologie sociale, et donc d'une contribution moins importante sur ce volet pour le projet.

1.5.2. Un contexte COVID encore très présent

Le recrutement des locataires, étape déterminante dans le projet, s'est révélée très complexe. Malgré l'adhésion des occupants et la campagne d'information en 2019 pour l'immeuble parisien et 2021 pour l'immeuble de Villeurbanne, les occupants n'étaient globalement pas assez informés des interventions prévues dans leurs logements. Ils n'avaient pas suffisamment connaissance du projet, de l'objectif et de la durée d'intervention, et le temps qu'ils devaient accorder pour répondre aux équipes du Cerema. Lors des prises de rendez-vous, les principales remarques remontées aux équipes du Cerema concernaient le temps de pose et la disponibilité pour les interventions dans leurs logements. Il y avait également une confusion entre les industriels (Aereco et Anjos) et le Cerema, rendant la prise de rendez-vous d'autant plus compliquée. Du fait de cette confusion, plusieurs rendez-vous ont été annulés, les locataires pensant qu'il s'agissait de la même intervention. De plus, le contexte sanitaire lié au COVID 19 n'a pas facilité les prises de rendez-vous. L'ensemble de ces difficultés ont mené à une participation de seulement 4/15 logements pour Paris et 4/7 logements pour Villeurbanne, malgré plusieurs relances téléphoniques et envoi de SMS, pour l'intégralité du projet. Cette défection des volontaires s'explique aussi par la nature intrusive à la fois des mesures et des entretiens / questionnaires, qui ont parfois été jugées trop longs et trop invasifs par les occupants.

1.5.3. Une instrumentation lourde à gérer pendant les 4 ans du projet

Concernant le site de Paris, les premières interventions pour les campagnes hivernales QAI dans les logements furent plus complexes qu'à Villeurbanne. La prise en main du matériel de mesure a été faite très rapidement du fait d'un souci logistique suite à l'intercomparaison et au changement des membres des équipes. Également du fait d'un souci logistique, les trois premiers logements ont été mesurés sans badge formaldéhyde n'ayant pas pu être envoyés à temps pour le début de la campagne QAI. De plus, les instruments de mesure ont eu beaucoup de mal à se connecter au logiciel dédié (Profil'air), rallongeant les durées des interventions sur place.

Plusieurs problèmes ont été rencontrés avec les balises de mesure de la QAI « NEMOs » sur les campagnes QAI: déconnection répétitive en cours de campagne des appareils, perte d'alimentation électrique de la station extérieure, auto-calibration avec un OFFSET de 600 ppm environ, ayant un impact important sur les résultats des mesures de CO₂ de la campagne de Paris, saturation du capteur de PM extérieur inexplicable pendant 3 jours.

Concernant les capteurs embarqués, des problèmes ont été rencontrés en début de projet avec la mise hors service de la station extérieure sur Villeurbanne, des problèmes de compatibilité avec les cartes d'acquisition, la société de maintenance rendant aveugles les capteurs (façade de bouche inversée entre WC et salle de bain) rendant les mesures impossibles.

Malgré ces problèmes techniques, et grâce à l'intervention rapide des différentes équipes du projet sur site à chaque fois, la grande majorité des mesures prévues ont pu être réalisées.

1.6. Perspectives

Les objectifs, méthodes et résultats intermédiaires ont été partagés tout au long du projet à l'international (réseau AIVC et Annex 86 notamment) et national (Club Ventilation, GT ESSOC et représentants UNM). Les résultats finaux seront également partagés dans ces réseaux. Ainsi, les préconisations établies en tâche 4 du projet seront largement diffusées auprès des décideurs, et soutenues par des membres de l'équipe impliqués dans ces réseaux. Les travaux à mener pour la prise en compte de ces préconisations seront donc suivis par les partenaires du projet après la fin de Performance 2.

L'un des points important mis en avant dans le projet est l'impact de la maintenance / de la non-maintenance des systèmes de ventilation sur leur performance vis-à-vis des consommations d'énergie et de la QAI. Les équipes du projet sont motivées pour continuer à creuser cette question, à travers de nouveaux projets dédiés à cet aspect.

2. Partie 2 : Synthèse des travaux réalisés

2.1. Tâche 1 : Organisation des campagnes de mesure de la performance in situ

- Coordination : Cerema
- Participants : Cerema, Anjos, Aereco

2.1.1. Objectif

L'objectif de cette tâche, coordonnée par le Cerema, est l'organisation et la tenue des campagnes de mesure en continu et campagnes de mesures hivernales QAI dans les deux immeubles ayant fait l'objet du projet Performance 1 :

- L'immeuble de Paris dont 19 logements avaient été instrumentés par Aereco en 2007 (du 4ème au 8ème étage),
- L'immeuble de Lyon Métropole Habitat à Villeurbanne dont 12 logements avaient été instrumentés par Anjos en 2007.

2.1.2. Organisation

La tâche 1 du projet s'articule autour de deux campagnes de mesures hivernales QAI et de la campagne de monitoring en continu, afin de pouvoir caractériser les performances de la ventilation toute l'année et pendant la période la plus confinée de l'année (période durant laquelle les occupants ouvrent peu ou pas les fenêtres, et où le renouvellement d'air est donc essentiellement assuré par le système de ventilation). Les interventions se sont succédées suivant plusieurs phases qui sont représentées par l'organigramme de la Figure 3 :

- Signature de convention avec Paris Habitat (mars 2019 avec avenant en 2021) et Lyon Métropole Habitat (mai 2021) et recrutement des occupants volontaires: au moment de l'adhésion (signature d'un formulaire d'adhésion), 15 logements dont les occupants étaient volontaires sur le site parisien et 7 sur le site de Villeurbanne ;
- Intervention dans les logements des occupants volontaires (15 à Paris et 7 à Villeurbanne) pour prélever tous les terminaux de ventilation (bouches d'extraction et entrées d'air) et les capteurs embarqués, remplacement temporaire des terminaux de ventilation prélevés, par des produits neufs le temps de leur caractérisation en laboratoire lors de la tâche 2, inspection visuelle et prise de photos de l'installation initiale, puis réinstallation des terminaux et capteurs après la tâche 2, sur 13 logements à Paris (2 ont quitté le projet à cette étape) et 6 logements à Villeurbanne (dans un des logements, toutes les bouches et toutes les entrées d'air avaient été remplacées depuis la fin du projet Performance 1, rendant inéligible ce logement pour participer à Performance 2) ;
- Lancement du monitoring dans les 13 logements de Paris et 6 de Villeurbanne¹ ;
- Élaboration des supports méthodologiques pour la campagne hivernale QAI (guide méthodologique, diagnostic QAI immeuble et logement, carnet de bord, guide d'entretien semi-directif pour l'occupant, fiche de suivi des capteurs) et prise de rendez-vous avec les occupants volontaires pour la campagne QAI. Les occupants de 7 logements à Paris et 6 à Villeurbanne ont participé à cette étape ;
- Réalisation de la première campagne hivernale QAI, avec installation des balises de mesure NEMo pour mesurer en continu durant deux semaines les paramètres de l'air intérieur (température, HR, CO₂, particules, COVI et formaldéhyde) dans la chambre principale et le salon de chaque logement participant, installation d'un NEMo extérieur sur chaque site pendant la durée de la campagne QAI, réalisation des diagnostics QAI et réalisation des entretiens avec les occupants ;
- Organisation d'une réunion de retour avec chacun des deux offices de logement social et rédaction d'une fiche retour occupant pour chaque participant ;
- Préparation de la deuxième campagne hivernale QAI avec mise à jours de supports méthodologiques et prise de rendez-vous ;

¹ Les occupants d'un des logement de Villeurbanne a souhaité se retirer du projet en cours de monitoring en raison de crainte de l'impact des capteurs sur leur santé. Le monitoring partiel de ce logement n'a donc pas pu être considéré dans les étapes d'analyse.

- Réalisation de la deuxième campagne hivernale QAI pour 4 logements à Paris et 4 logements à Villeurbanne ;
- Organisation de réunions de retour finaux avec les offices de logement social et d'un « 5 à 7 » avec les occupants participants sur chacun des deux sites.

Durant cette tâche 1, Anjos et Aereco ont été en charge de l'organisation de la pose et de la dépose des terminaux de ventilation ainsi que de la mesure en continu des paramètres instrumentés sur les systèmes de ventilation. Le Cerema a été en charge de l'organisation des campagnes hivernales QAI en lien avec les occupants, y compris les campagnes d'entretien réalisés en fin de campagne QAI.

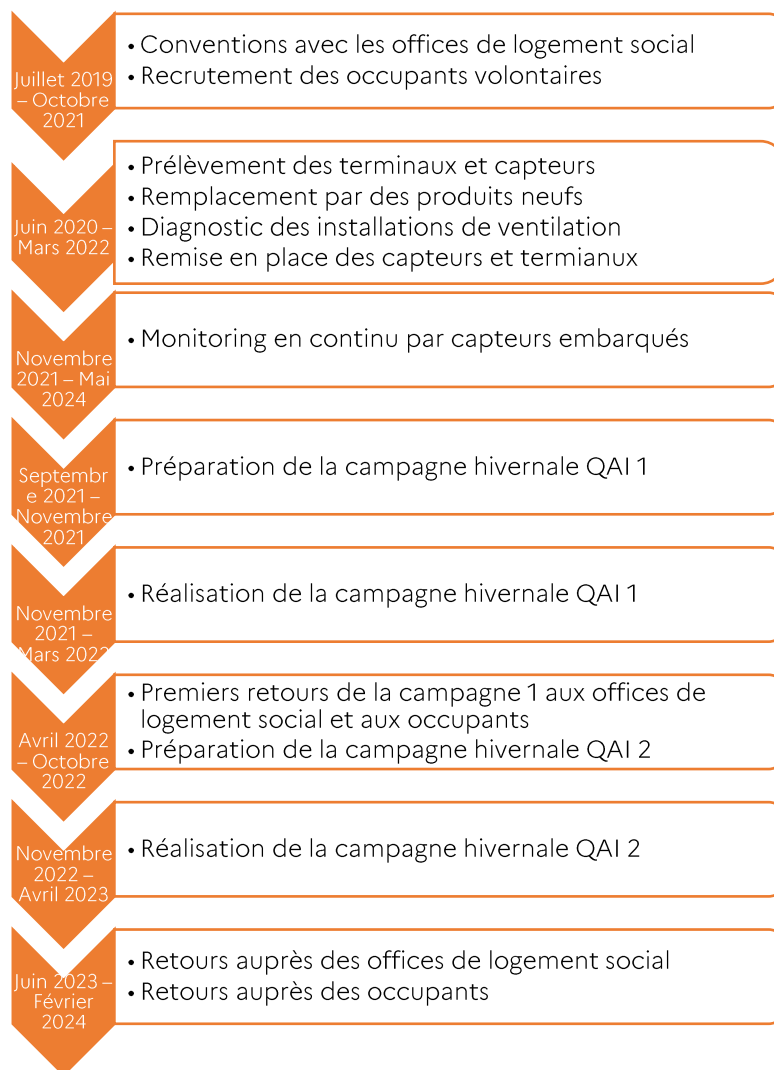


Figure 3 : Organigramme de la tâche 1 - Performance 2

2.1.3. Synthèse des diagnostics des installations de ventilation

Sur les deux sites, des points de vérification pour les systèmes dans l'immeuble ont été réalisés en appliquant au maximum le protocole Promevent. Cette inspection comprend des contrôles visuels des différents composants des systèmes de ventilation, ainsi que des mesures de pression pour chaque bouche d'extraction.

A Paris, l'étude de l'encrassement montre qu'aucune des 15 bouches cuisines ne présente un entretien jugé comme bon. Les bouches des salles de bain (14 au total) et salles de douche (8 au total) présentent un bon niveau d'entretien à hauteur de 21 % et 25 % des totaux respectifs. Les bouches WC sont les moins encrassées avec un bon entretien qui atteint 80% des 15 échantillons. Seulement un tiers des 54 entrées d'air ont été jugées comme ayant un bon niveau d'entretien. Il n'y a pas de différence notable entre l'encrassement des entrées d'air des chambres et des séjours (Figure 4). Concernant les passages de

transit, pour plus de 80% des pièces, les détalonnages sont conformes aux recommandations. En revanche, aucune des cuisines ne respectent le détalonnage réglementaire.

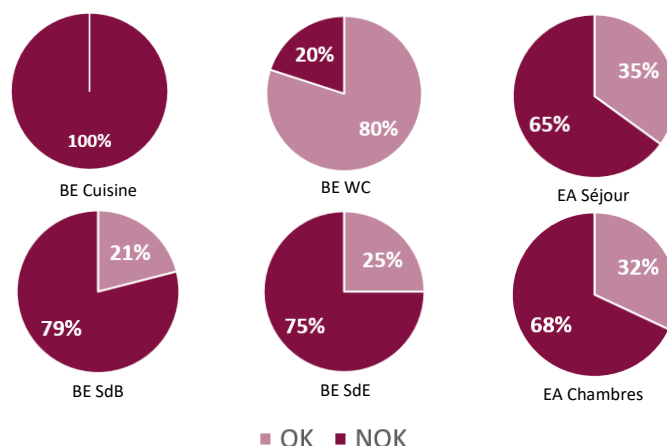


Figure 4 : Niveau d'encrassement des bouches d'extraction et des entrées d'air- Paris - Diagnostic initial Performance 2

A Villeurbanne, le diagnostic initial a montré que les bouches d'extraction se trouvant dans les cuisines et salles de bain sont souvent encrassées et peuvent être non conformes pour la majorité. Ceci peut être causé par des remplacements de bouches non conformes à l'Avis techniques en cours d'utilisation par les occupants ou la société de maintenance. Dans les WC, l'encrassement est moins perçu et les bouches sont pour la majorité en état de fonctionnement. Les mesures de détalonnage dans ces pièces ainsi que les pièces de vie indiquent que la moitié n'est pas conforme aux réglementations. Il faut ajouter à cela que toutes les portes menant à la cuisine sont non conformes aux règles de l'art.

2.1.4. Monitoring en continu : fonctionnement de la ventilation et qualité d'air intérieur

Les campagnes de Performance 2 incluent tout d'abord des mesures au niveau des terminaux de ventilation (entrées d'air et bouches d'extraction) : capteurs pression et de position des volets, capteurs CO₂, température et HR déjà existant depuis Performance 1 (remplacés par des nouveaux capteurs à Paris pour CO₂, HR et température), et COV et PM_{2.5} ajoutés pour Performance 2 (Paris uniquement) en continu. Ces mesures sont gérées par Aereco pour l'immeuble de Paris (Figure 5), et par Anjos pour l'immeuble de Villeurbanne.

Sur le site de Paris, les acquisitions ont été réalisées jusqu'en avril 2024, selon la convention avec Paris Habitat. Deux stations extérieures ont également permis de mesurer en continu les paramètres suivants : température et humidité, CO₂, PM_{2.5}, COV, Direction du vent, Vitesse du vent.

Sur le site de Villeurbanne, les acquisitions sont toujours en cours, la convention avec Lyon Métropole Habitat étant valable jusqu'au 30 juin 2024. La station extérieure en continu a été endommagée pour des raisons électriques indépendantes de l'installation, rendant toute réparation impossible. Les données extérieures seront donc disponibles uniquement sur les périodes de campagnes hivernales QAI, à partir des mesures réalisées par les balises NEMO extérieures utilisées pendant les campagnes hivernales.

L'ensemble de ces données recueillies durant ce monitoring est analysé dans la tâche 3 du projet.

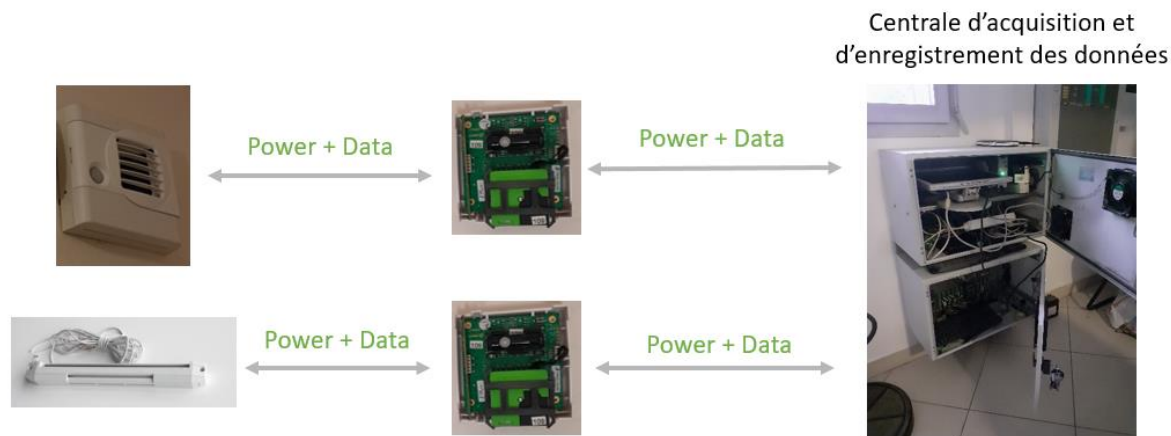


Figure 5 : Schéma de l'instrumentation embarquée - Site de Paris

2.1.5. Campagnes de mesures hivernales Qualité de l'Air Intérieur - QAI

Deux campagnes hivernales spécifiques QAI ont été réalisées dans les pièces de vie des logements : dans le salon et une chambre de chaque logement pendant 2 semaines pour chacune des deux campagnes hivernales (balises NEMos mesurant CO₂, température, HR, COV légers, PM_{2.5} et Formaldéhyde). En amont de la première campagne, une préparation importante a été réalisée, avec l'élaboration d'une « mallette méthodologique de campagne » comprenant 5 documents :

- guide méthodologique ;
- fiche de suivi des capteurs ;
- diagnostic QAI immeuble + diagnostic QAI logement ;
- carnet de bord (Figure 6) ;
- guide pour l'entretien semi-directif de l'occupant.

La première campagne hivernale a été réalisée de novembre à décembre 2021 à Paris, dans 7 logements, et de janvier à avril 2022 à Villeurbanne dans 6 logements. Pour chaque logement, les équipes du Cerema sont intervenues une première fois pour poser les capteurs, remplir les diagnostics et présenter les carnets de bord, puis une deuxième fois 2 à 3 semaines après pour récupérer les carnets de bord et les capteurs.

A l'issue de la première campagne, cette mallette a été améliorée en prenant en compte les retours d'expérience des équipes du Cerema l'ayant mise en œuvre sur les deux sites, les retours directs de certains occupants sur le carnet de bord, les difficultés rencontrées lors de l'utilisation des appareils de mesure et les premières exploitations des résultats (notamment l'analyse du contenu des carnets de bord et des entretiens). Pour la deuxième campagne, une nouvelle version de cette mallette a donc été utilisée. Les changements principaux sont :

- les fiches de diagnostic : seuls les éléments qui peuvent avoir été modifiés entre les deux campagnes sont évalués ;
- le carnet de bord a été largement modifié pour faciliter le remplissage (tableau toutes thématiques à renseigner à la journée remplacé par un tableau hebdomadaire par thématique) et un tableau d'occupation a été ajouté pour collecter des informations sur la présence des occupants dans le logement ;
- le guide pour l'entretien a été modifié pour raccourcir la durée d'entretien avec les locataires (notamment suppression des questions non essentielles ou sans réponse nouvelle par rapport à la première campagne, et reformulation de certaines questions).

La deuxième campagne hivernale a été réalisée de novembre à décembre 2022 à Paris, dans 4 logements, et de février à mars 2023 à Villeurbanne dans 4 logements. Pour chaque logement, les équipes du Cerema sont intervenues à nouveau deux fois sur site.

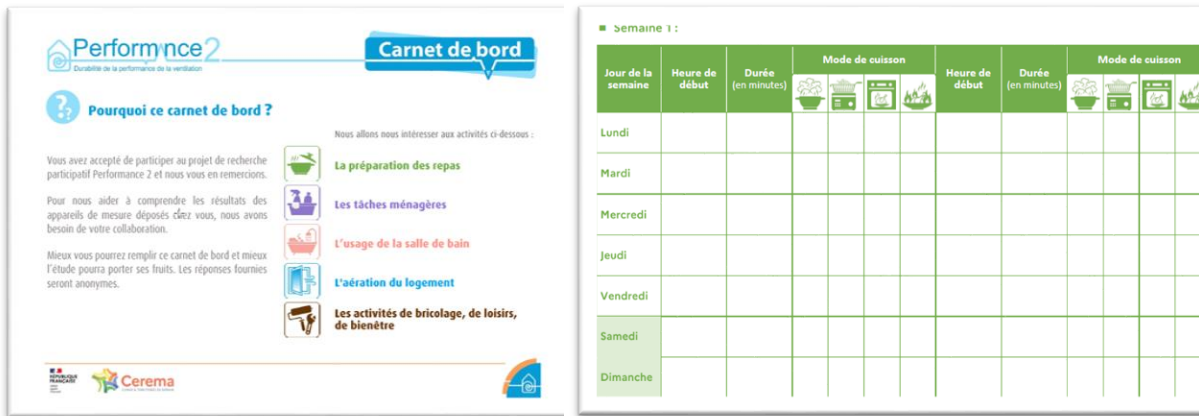


Figure 6 : Extrait du carnet de bord – 1^{ère} version

2.1.6. Synthèse des retours auprès des offices de logement social et des occupants participants

Une première réunion de bilan avec les offices de logement social a été organisée pour chaque site à l'issue de la première campagne hivernale (17 janvier avec Paris Habitat, puis 8 mars 2023 suite à un changement d'interlocuteur, et 13 juin 2022 avec Lyon Métropole Habitat). Lors de ces trois réunions, Aereco (Paris), Anjos (Villeurbanne) et le Cerema ont présenté les différentes interventions réalisées, les appareils de mesure utilisés, ainsi que les supports développés et utilisés, notamment le carnet de bord, les fiches de diagnostics et les guides d'entretien, une synthèse des inspections des systèmes de ventilation et les taux de participation aux différentes phases. Les discussions ont notamment permis d'aborder la forme du retour aux occupants (validation / correction de la fiche retour) et les difficultés de mobilisation pressenties pour la deuxième campagne hivernale.

Une deuxième réunion a été organisée à l'issue de la deuxième campagne hivernale QAI, notamment pour préparer le retour final aux occupants. Ces réunions ont été suivies de la tenue de deux soirées de type « 5 à 7 » à destination des occupants participants, en présence des offices de logement social. Ces soirées de restitution, accompagnées d'un cocktail dinatoire, ont été organisées de la façon suivante :

- Accueil des offices de logement social et des occupants ;
- Présentation du projet : lien avec le premier projet Performance, les étapes clés auxquelles ont participé les occupants, les premiers résultats, l'utilité du projet en France et à l'international ;
- Atelier sur la compréhension de la ventilation : présentation et explication des bouches et entrées d'air avec manipulation des terminaux, des principes du système avec vidéo, et recommandations d'entretien ;
- Atelier qualité de l'air intérieur : identification des sources de pollution dans un logement et recommandations associées avec Quizz ;
- Temps d'échange autour d'un cocktail.

Le programme de la soirée a été ajusté selon le nombre d'occupants présents et en réponse aux questions spécifiques qui ont été posées. Les soirées de restitution du projet aux occupants ont eu lieu le 30 novembre 2023 pour le site de Villeurbanne de 17h à 19h, et le 9 avril 2024 pour le site de Paris de 18h à 19h30.

En complément, deux retours personnalisés ont été faits aux occupants participants. Après la première campagne hivernale (fin 2021 à Paris, début 2022 à Villeurbanne), l'ensemble des occupants des appartements toujours volontaires pour participer au projet ont reçu une fiche présentant les résultats de la première campagne. Cette fiche A4 recto/verso (format demandé par les offices de logement social) comprend :

- Une page dédiée à la ventilation : synthèse rapide de l'état des lieux de la ventilation (entrées d'air, bouches d'extraction et détalonnages) avec recommandations d'entretien ;
- Une page dédiée à la qualité de l'air intérieur : indication des niveaux mesurés pendant la première campagne hivernale (échelle vert / orange / rouge utilisée, mais pas de valeurs mesurées directement communiquées) pour la température, l'humidité relative, les COV, le

formaldéhyde et les particules, avec des pistes d'amélioration proposées à partir de l'analyse du carnet de bord, des fiches de diagnostics et de l'entretien.

Une deuxième version de cette fiche a été remise aux participants de la deuxième campagne QAI.

Le Tableau 2 présente la synthèse des participations aux différentes phases de la tâche 1.

Tableau 2 : Nombre d'appartements participant à chacune des phases de la Tâche 1

	Paris	Villeurbanne
Dépose terminaux et capteurs	15	7
Repose terminaux et capteurs	13	6
1ère campagne hivernale (2021-2022)	7	6
2ème campagne hivernale (2022-2023)	4	4

2.2. Tâche 2 : Caractérisation en laboratoire de la pérennité technologique des performances des composants de ventilation et intercomparaison des moyens de mesure de la qualité de l'air intérieur

- Coordination : Cerema
- Participants : Anjos, Aereco, LOCIE, Cerema

2.2.1. Objectifs

Depuis le projet Performance 1, les terminaux de ventilation (bouches d'extraction et entrées d'air) des logements des bâtiments de l'étude ainsi que les différents capteurs mis en place pendant Performance 1 sont restés dans les logements. Une étude en laboratoire de ces terminaux et ces capteurs a été réalisée pour :

- Caractériser les performances hygro-réglables actuelles des terminaux de ventilation ;
- Vérifier le fonctionnement et la fiabilité des capteurs embarqués : les capteurs installés pendant Performance 1 (CO₂, Humidité relative (HR) et température), ainsi que les nouveaux capteurs intégrés dans les cartes d'acquisition (COV et Particules) ;
- Vérifier le fonctionnement et la fiabilité des balises NEMos utilisées pour les campagnes QAI de Performance 2 dans les pièces de vie (CO₂, température, HR, Composés Organiques Volatils Légers (COVL), Particules et Formaldéhyde).

2.2.2. Caractérisation des terminaux hygro-réglables

Pour 15 appartements volontaires de l'immeuble de Paris et 6 à Villeurbanne, Aereco (Paris) et Anjos (Villeurbanne) ont prélevé tous les terminaux de ventilation (bouches d'extraction et entrées d'air) ainsi que l'ensemble des capteurs datant de Performance 1 (des terminaux de remplacement ont été installés provisoirement) afin de caractériser leurs réponses vis-à-vis de l'humidité en laboratoire.

2.2.2.1. Caractérisation des terminaux de Paris

Les performances des 52 bouches d'extraction ont été caractérisées, après 13 années de fonctionnement : 15 en cuisine, 22 en salle de bain (SdB) et 15 en WC. Leur état a été évalué et les bouches ont été classées en 4 catégories : état bon / état moyen / état mauvais / dégradée. Le fonctionnement hygroscopique de chaque bouche a ensuite été évalué à partir d'essais réalisés en salles de laboratoire, avec une température et une humidité relative contrôlées. Les courbes de fonctionnement hygroscopiques ont été tracées pour les trois phases d'essai :

- bouche en état (directement depuis le prélèvement dans les logements) ;
- bouche nettoyée ;

- bouche remise en état : un changement des volets a été réalisé car les premiers essais ont montré un fluage du matériau des essais, modifiant la forme et donc le fonctionnement des volets. Afin de caractériser les performances du dispositif hygroréglable uniquement, il a été décidé de réaliser cette opération de maintenance pour l'ensemble des bouches de l'étude.

Pour chaque bouche, les 3 courbes obtenues ont été comparées aux courbes de 2007, permettant d'évaluer l'évolution de performance du dispositif hygroréglable.

En préparation de la campagne in-situ, les capteurs à effet Hall (qui permettent de mesurer l'ouverture du volet de la bouche) embarqués dans les bouches (datant de Performance 1) ont été « étalonnés », afin de lier le débit d'air traversant la bouche au signal envoyé par le capteur à effet Hall et au signal du capteur de pression. Ainsi, des abaques ont été produites qui permettront d'évaluer les débits réels in-situ à partir des signaux envoyés par les capteurs à effet Hall et les capteurs de pression une fois les bouches réinstallées dans les logements.

Un protocole similaire a été mis en œuvre pour caractériser les performances des 54 entrées d'air. Les essais ont été réalisés sur les entrées d'air :

- en état après prélèvement dans les logements ;
- nettoyées ;
- remises en état : volets et mousse acoustiques changés.

Pour chaque entrée d'air, 3 courbes de fonctionnement hygroscopique ont donc pu être tracées, et comparées aux courbes initiales de 2007 (Figure 7).

De même que pour les bouches, les capteurs à effet Hall embarqués dans les entrées d'air ont été étalonnés.

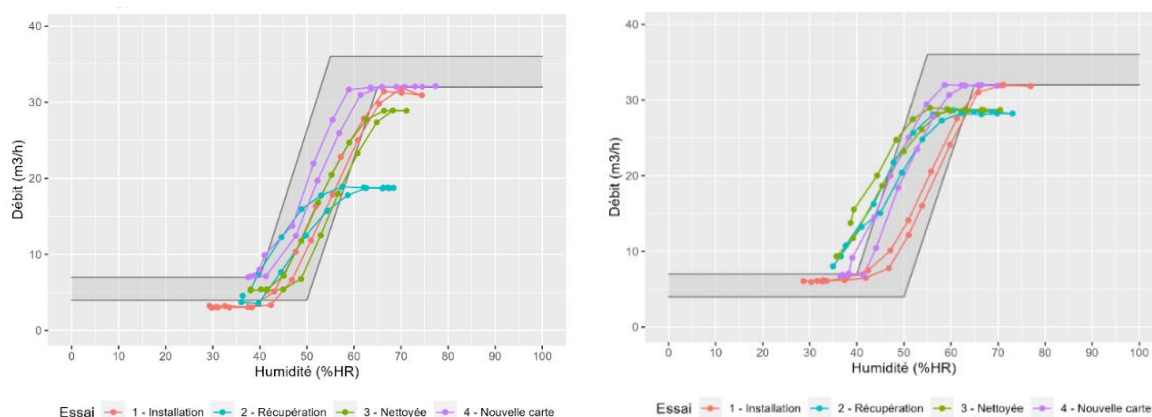


Figure 7 : Exemples de courbes Débit/Humidité pour une chambre (à gauche) et un séjour (à droite) - Paris

2.2.2.1. Caractérisation des terminaux de Villeurbanne

Les performances des 10 bouches d'extraction hygroréglables ont été caractérisées : 4 en cuisine, 6 en SdB (dans certains logements, des bouches étaient remplacées par des bouches non similaires). Le fonctionnement hygroscopique de chaque bouche a été évalué à partir d'essais réalisés en salles de laboratoire, avec une température et une humidité relative contrôlées. Les courbes de fonctionnement hygroscopiques ont été tracées pour les trois phases d'essai (Figure 8) :

- bouche en état (directement depuis le prélèvement dans les logements) ;
- bouche nettoyée ;
- bouche remise en état : un changement des volets et des canaux a été réalisé.

Comme pour Paris, les capteurs à effet Hall embarqués dans les bouches ont été « étalonnés », et des abaques ont été produites.

Un protocole similaire a été mis en œuvre pour caractériser les performances des 14 entrées d'air (dans certains logements, des entrées d'air étaient absentes). Les essais ont été réalisés sur les entrées d'air :

- en état après prélèvement dans les logements (pour 6 entrées d'air) ;
- nettoyées et remises en état : volets et mousse acoustiques changés.

Pour chaque entrée d'air, une ou deux courbes de fonctionnement hygroscopiques ont pu être tracées, et comparées aux spécifications initiales.

De même que pour les bouches, les capteurs à effet Hall embarqués dans les entrées d'air ont été étalonnés.

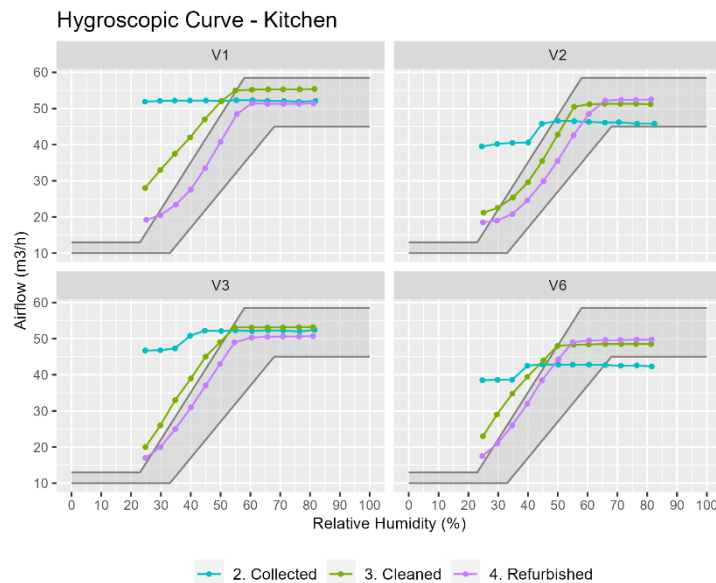


Figure 8 : Caractérisation en laboratoire des performances des bouches d'extraction cuisine - Villeurbanne

2.2.2.2. Synthèse des résultats

Pour les deux sites, les résultats de cette étude montrent que malgré des niveaux de maintenance largement insuffisants, 100 % des bouches d'extraction et des entrées d'air qui n'ont pas été délibérément dégradées par l'occupant ont réagi comme prévu à l'humidité. Dans le contexte de la sensibilisation croissante à la ventilation intelligente, ces retours d'expérience soulignent l'importance cruciale de la durabilité des systèmes de ventilation et de leurs composants, et de leur résistance à un manque d'entretien ou même à une mauvaise utilisation par les occupants. Cette étude met en évidence la corrélation entre le niveau d'entretien visuel et la limitation du débit d'air maximal pour les terminaux. Plus important encore, les résultats des tests effectués en laboratoire ont prouvé la durabilité des performances hygroaérodynamiques de tous les terminaux inclus dans cette étude, qui sont basées sur un capteur d'humidité mécanique et un actionneur ne nécessitant ni étalonnage ni maintenance.

2.2.3. Caractérisation des capteurs embarqués

En parallèle de la caractérisation des performances des terminaux de ventilation, le fonctionnement des capteurs de la QAI qui ont été utilisés pendant les campagnes in-situ a été évalué. Il s'agit :

- des capteurs de température, humidité relative et CO₂ implantés pendant Performance 1 ;
- des capteurs de température, humidité relative, CO₂, COV et Particules qui équipent les nouvelles cartes électroniques pour Performance 2 (Paris uniquement).

Des essais en environnement contrôlé ont été réalisés en comparant les valeurs obtenues par les capteurs aux valeurs données par une référence pour chaque paramètre mesuré. L'écart obtenu est ensuite comparé aux spécifications techniques annoncées par le fabricant et qui tient compte des 13 ans de vieillissement du capteur.

2.2.3.1. Résultats - Site Paris

Après 13 ans de vieillissement en condition réelle d'utilisation, 96% des mesures de température et 81% des mesures d'humidité sont dans les spécifications annoncées par le fabricant si l'on tient compte à la fois de la précision initiale et de la dérive annuelle annoncées par le fabricant. Ces capteurs bas coûts et de plages de mesures étendues sont donc adaptés à des monitorings à court ou moyen terme (0.04°C et 0.5%HR de dérive annuelle). Cependant, la dérive annuelle n'est pas négligeable (0.5%HR/an soit 6.5%HR

sur 13 ans), en particulier aux fortes humidités qui sont par exemple typiques des salles de bain, douches et cuisines. Une attention toute particulière doit donc être portée au choix du capteur pour les applications tels que les monitorings et les produits de ventilation devant fonctionner sur le long terme.

D'autre part, la mesure d'humidité relative étant basée sur la température, il est donc important que le capteur soit mis dans des conditions qui sont les plus proches de celle de la pièce (à distance d'un chauffage, d'une fenêtre, d'un élément chauffant sur la carte électronique, ...) afin de donner une mesure (de température et d'humidité) représentative du local.

Concernant les capteurs de CO₂ initiaux, il a été observé :

- Une moyenne décalée vers le bas par rapport à la consigne ;
- Une forte dispersion des mesures qui augmente avec la concentration de consigne (environ 95 % des valeurs sont comprises entre la moyenne et ± 2 écart-types) ;
- Moins d'un tiers des capteurs respectent les spécifications initiales de justesse sur toute la plage. Si l'on ajoute la dérive à long terme, deux tiers des capteurs se trouvent dans les spécifications à 400 ppm, mais seulement la moitié à 1000 ppm et un tiers à 1700 ppm. Enfin, la prise en compte des variations dues à la température et à la pression barométrique améliore encore le résultat mais moins de la moitié des capteurs se trouve dans les spécifications sur toute la plage d'intérêt ;
- 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 sur-occupation 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 justesse 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 utilisés par 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.

La précision des capteurs des nouvelles cartes a également été évaluée pour chaque paramètre mesuré, avec notamment la mise en place d'une intercomparaison de toutes les cartes :

- pour la mesure de COV, avec utilisation de lingettes émettant des COV ;
- pour le compteur de particules, avec une émission de fumée générée par des cigarettes (sans référence de mesure).

Concernant les COV : à l'exception d'un seul capteur, tous ont répondu à la présence des deux lingettes. De plus, les signaux de mesure présentent une dispersion plutôt faible et une même dynamique de montée et descente. Malgré les incertitudes liées aux conditions de tests (absence de mesures de référence, de contrôle de la source de pollution et de l'homogénéité dans la pièce), cet essai permet de valider le bon fonctionnement de tous les capteurs COV. Le capteur défaillant a été remplacé.

Concernant les particules, tous les capteurs ont répondu à la fumée de cigarettes. De plus, les signaux de mesure présentent une dispersion relativement faible, ainsi qu'une dynamique comparable avant, pendant et après l'évènement. Malgré les incertitudes liées aux conditions de tests (absence de mesures de référence, de contrôle de la source de pollution et de l'homogénéité dans la pièce), cet essai permet de valider le bon fonctionnement de tous les capteurs PM.

2.2.3.2. Résultats - Site de Villeurbanne

Concernant le CO₂, les essais montrent qu'après 13 ans, les dérives observées sont faibles (surtout à 400 ppm). Il est à noter que ces dérives ont tendance à être légèrement plus élevées dans les chambres que

dans les séjours. De plus, en prenant en compte les spécifications fournies par les constructeurs qui indiquent une augmentation de 2% de plus pendant la durée de vie du capteur (désignée à 15 ans), les valeurs obtenues avec les données du nouvel étalonnage ont été comparées à la dérive calculée à partir des spécifications constructeurs. Il est important de noter qu'à 400 ppm, tous les capteurs ont été conformes aux données constructeurs, ce qui n'est plus le cas à 1000 ppm et 1700 ppm.

De la même manière que les capteurs CO₂, les valeurs mesurées de température et celles d'origine ont été comparées. Il en résulte que les capteurs de température n'ont pas ou très peu été affectés dans le temps. A noter que les capteurs installés dans les pièces d'air vicié sont ceux ayant moins été déréglés au cours du temps.

Enfin, concernant les capteurs d'humidité relative, les résultats obtenus pour les chambres et les séjours sont ceux qui présentent les mesures les plus fidèles. Comme attendu, les pièces humides présentent des variations très importantes d'humidité relative ce qui amène au dérèglement des capteurs dans le temps.

2.2.4. Intercomparaison des matériels de mesure QAI

L'intercomparaison des matériels de mesure de la QAI a pour objectif d'évaluer, pour chaque polluant, les écarts entre les résultats obtenus par tous les appareils de mesure afin de vérifier la cohérence entre tous les matériels. Deux types d'intercomparaison ont été réalisées par le LOCIE :

- En environnement réel : dans une salle de cours occupée, pendant 2 semaines. Les paramètres étudiés ont été : HR, Température, CO₂, COV, Particules. Durant cette phase, les mesures ont uniquement été réalisées avec les appareils de la campagne Performance 2 (pas de mesure comparative de référence) ;
- En environnement maîtrisé : dans une enceinte en laboratoire avec un renouvellement d'air constant (Figure 9), avec pour chaque paramètre mesuré (HR, COV, Particules, formaldéhyde) une concentration maîtrisée. Les sollicitations pendant cette phase sont « sévères » (avec des concentrations plus élevées que celles rencontrées dans des conditions normales) et contrôlées en durée et amplitude. Pour certains paramètres, des mesures complémentaires avec des matériels de référence ont été réalisées en même temps que les mesures par les appareils de Performance 2. Afin d'apporter le maximum d'informations concernant la fiabilité des mesures, deux campagnes ont été réalisées en enceinte : une avant la première campagne hivernale QAI, et une entre les deux campagnes, avec des protocoles différents permettant d'évaluer la réponse des capteurs dans différentes situations (notamment deux COVs ont été testés, ainsi que des scénarios échelons et pics de pollution).

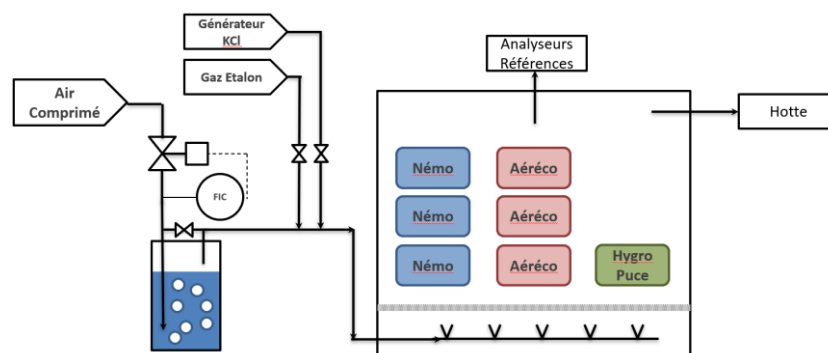


Figure 9 : Schéma de principe de l'enceinte à paramètres contrôlés

Concernant l'intra-comparaison des capteurs (comparaison au sein d'une même famille de capteurs), les conclusions générales suivantes peuvent être faites :

- Cartes Aereco :
 - 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. Ils sont également fortement corrélés aux mesures de l'analyseur de référence. Ces réponses sont donc cohérentes. 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 ;
- NEMO :
 - 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. 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 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 (Figure 11): 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 *en environnement réel*). 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 comprises entre environ 10 et 60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Comme le confirme la campagne *en environnement réel*, pour les PM, les capteurs peuvent être comparés au sein d'une même famille, i.e. NEMO et Aereco (Figure 10). Cette même campagne a cependant mis en évidence des coefficients de corrélation NEMO-Aereco moins satisfaisants, et cela malgré des niveaux de concentration proches. La comparaison des résultats de ces deux types de capteur est d'autant plus complexe que leurs pas de temps de mesure sont différents. Concernant les COV, l'inter-comparaison des deux types de capteurs n'est pas possible : les réponses temporelles et les valeurs mesurées ne sont pas cohérentes. Ceci s'explique sans doute en grande partie du fait des gammes de composés cibles qui sont différentes d'une famille à l'autre.

Pour finir, on pourra souligner des problèmes récurrents de communication et de batterie, donc d'acquisition, pour les NEMOs qui ont entraîné la perte de nombreuses données.

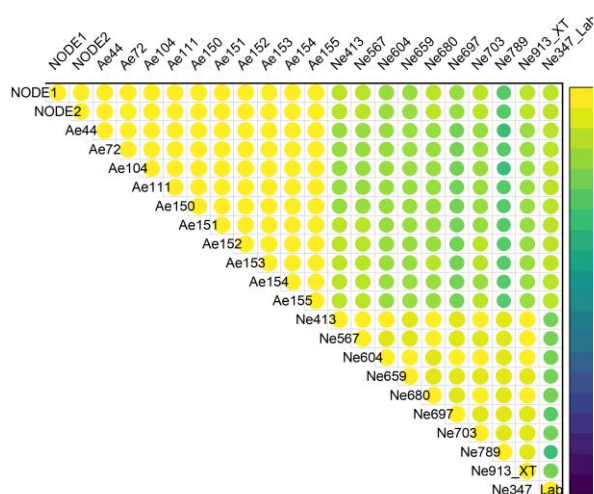


Figure 10 : Coefficients de corrélation de Pearson pour la mesure de PM2.5: inter-comparaison des capteurs Aereco, des NEMOs et des Nodes, salle « CONFORT » de l'IUT – Campagne 1

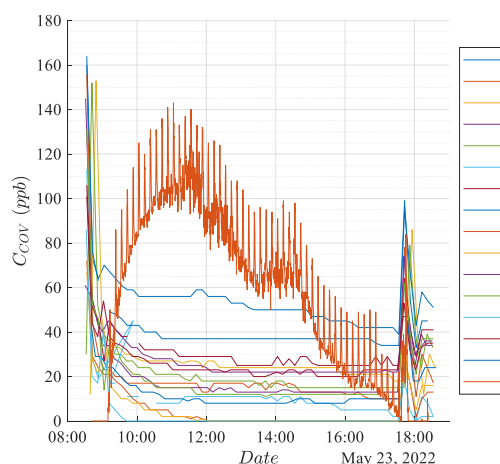


Figure 11 : Etude de la mesure des COV léger par les NEMOs

2.3. Tâche 3 : Analyse de la durabilité des performances : entre pérennité des technologies proposées et robustesse aux sollicitations de l'occupant

- Coordination : Cerema
- Participants : Cerema, Anjos, Aereco, LOCIE

2.3.1. Synthèse de l'étude bibliographique

La bibliographie porte sur quatre axes, trois relevant de l'état de l'art, et le dernier portant sur la sélection des indicateurs à manipuler dans la partie d'analyse des données. Il a été choisi d'intégrer la partie « sélection des indicateurs de QAI » à la phase d'état de l'art sur le sujet pour plus de fluidité dans la lecture. Les quatre axes sont :

- 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 ;
- Etat de l'art des réglementations introduisant des objectifs de durabilité des installations de ventilation ;
- 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) ;
- Sélection des indicateurs portant sur la performance énergétique (a priori débit déperditif et consommation électrique des ventilateurs).

Peu d'études portent sur la durabilité des systèmes de ventilation en tant que telle. La seule qui a été identifiée traite du sujet en Suède, pays dont la réglementation intègre des vérifications périodiques des systèmes de ventilation, ce qui a permis de constituer une base de données. Parmi les 5 catégories de non-conformités proposées, le dysfonctionnement le plus courant est la présence de débits trop faibles. En France, à défaut d'étude comparant les performances à réception avec celles après plusieurs années d'utilisation, quelques études permettent d'avoir une idée de la performance des systèmes de ventilation à réception (données issues du Contrôle des Règles de la Construction par exemple) ou en cours d'occupation (données issues des campagnes logements de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, études Exist'air 1 et 2).

A l'image du peu d'études sur la durabilité des systèmes de ventilation, il existe peu de réglementations qui introduiraient des objectifs de durabilité des systèmes de ventilation. A défaut, il a été décidé dans le cadre de cette bibliographie, de recenser les réglementations obligeant à réaliser des contrôles sur les systèmes de ventilation posés, avec une attention particulière à celle(s) qui mentionnerai(en)t une régularité de ces inspections. Une étude commanditée dans le cadre de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD19a) a effectué un recensement en 2018. Seule la Suède a instauré un contrôle régulier des systèmes de ventilation. En dehors de ce pays, cinq autres disposent d'une réglementation ayant introduit des contrôles à réception (Belgique, Finlande, France, Irlande, Pologne), et douze ont des exigences réglementaires sur la ventilation. Ces dernières portent essentiellement sur le taux de renouvellement d'air (ou débits).

Les approches performantielles se déclinent en deux catégories : celles issues de modélisation, et celles issues de l'instrumentation. Concernant la modélisation, les indicateurs majoritaires s'intéressent au taux de renouvellement d'air ou aux débits d'air assurés. Ils s'appuient sur des critères qui relèvent d'avantage du confort (humidité relative, taux de CO₂) que du domaine sanitaire. L'approche expérimentale se traduit dans la littérature par des campagnes de mesures de polluants extrêmement variés, avec des seuils par polluant tout aussi fluctuants selon les études. Dans le cadre du projet de recherche Performance 2 il a été décidé d'axer la bibliographie sur les aspects méthodologiques transposables, qui apportent un éclairage dans l'analyse des données. L'annexe 68 de l'Agence Internationale de L'Energie permet par exemple de justifier un choix parmi l'ensemble des valeurs seuils qui peuvent être prise pour référence : celui de retenir la plus faible décrite dans la littérature. Le projet Performance 2 ne vise pas à établir un état des lieux complet de la qualité de l'air dans les logements instrumentés, le nombre de polluants mesurés étant limité, néanmoins les résultats de l'étude logement de l'OQAI sur ces polluants sont intéressants en ce qu'ils donnent un ordre de grandeur des valeurs que l'on retrouve en logement.

Concernant l'aspect énergétique, les indicateurs choisis sont ceux proposés par la réglementation : à savoir le débit déperditif et la consommation des auxiliaires de ventilation.

2.3.2. Analyse des données recueillies lors des campagnes in-situ sur les deux sites

Depuis la fin de la première campagne QAI sur site (début avril 2022), le consortium dispose des données terrain qui comprennent, pour chaque logement :

- des informations sur le logement ;
- des informations sur « la vie des occupants » pendant les campagnes hivernales ;
- des informations sur les habitudes des occupants, leur utilisation et connaissance de leur système de ventilation, et leur perception de la QAI ;
- des résultats de mesure de paramètres intérieurs et de polluants, à partir des balises NEMOs pendant 2 semaines ;
- des résultats de mesure de paramètres intérieurs et de polluants, à partir des capteurs embarqués ;
- des résultats de mesure de fonctionnement du système de ventilation.

L'analyse des caractéristiques de chaque capteur, des résultats de l'intercomparaison en tâche 2, des protocoles de campagnes ainsi que des événements perturbateurs relevés pendant le projet a permis d'identifier les limites à prendre en compte lors de l'analyse de l'ensemble des données collectées. Les Tableau 3 et

Tableau 4 offrent une synthèse des données recueillies dans le cadre du projet, et des principales limites associées à chacune d'entre elles.

Tableau 3 : Synthèse des données recueillies dans Performance 2

Type de donnée ^{2s}	Pièces de vie			Pièces humides		Extérieur	
	Capteurs embarqués (continue)	NEMo (campagnes QAI 15 jours sur 2 pièces)	déclaratif	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 4 : 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 A Villeurbanne : hebdomadaire sur valeur la plus faible non désactivable	Pas de calcul de moyenne
Formaldéhyde COV _{totaux}	NEMos	Moyenne sur 2h Dispersion des valeurs	
	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 Saint Mandé Paris	Incertitude élevée Artefact : pic ponctuel	Vigilance sur les statistiques descriptives
	NEMos	Incertitude élevée Dispersion des valeurs	Vigilance sur les statistiques descriptives
PM ₁₀	Pour 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 .

Cette analyse préalable des données est indispensable pour juger de la qualité des données et ainsi identifier les analyses qui ne peuvent pas être réalisées, notamment l'utilisation de valeurs dites absolues pour certaines mesures. Cette étape, souvent oubliée, a permis de prendre conscience de l'importance de questionner la fiabilité de chaque mesure et de chaque donnée, afin de proposer des analyses scientifiquement acceptables.

2.3.3. Évaluation de la durabilité des systèmes de ventilation hygroréglable étudiés

Dans Performance 2, l'un des objectifs est 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 repose 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 focalisent 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.

2.3.3.1. Indicateurs liés à l'énergie

2.3.3.1.1. Consommation des ventilateurs

Sur le site du Villeurbanne, le caisson de ventilation a été changé entre Performance 1 et Performance 2. Le nouveau caisson n'ayant pas été instrumenté, aucune mesure au ventilateur n'a pu être réalisée dans Performance 2.

Pour Paris, les données de consommation du ventilateur ne sont disponibles qu'à partir du 21 novembre du 2022 en raison de l'indisponibilité du service de support technique permettant la remise en route de l'installation d'acquisition au niveau du caisson de ventilation. Il a été constaté que la consommation est relativement la même (variation de puissance autour de 500 W). Malgré les conditions d'utilisation qui ont pu changer (intensité de l'utilisation, conditions climatiques, etc.), 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 par rapport à des systèmes de ventilation non modulants.

2.3.3.1.2. Débits déperditifs

Dans Performance 1, pour 100% des logements étudiés, les débits déperditifs étaient bien inférieurs aux débits des systèmes équivalents autoréglables correspondant au type de logement.

Dans Performance 2, à Villeurbanne les débits déperditifs sont inférieurs à ceux d'un système équivalent autoréglable pour les 5 logements étudiés. A Paris (Figure 12), pour 10 logements, les débits déperditifs sont inférieurs à ceux d'un système équivalent autoréglable et à ceux mesurés dans Performance 1. Pour un logement, le débit déperditif est plus élevé qu'il y a 15 ans, mais reste inférieur au débit d'un système autoréglable. Pour les deux derniers logements, 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 approfondie de ces deux cas est nécessaire pour comprendre l'origine de ces valeurs élevées, notamment sur l'existence probable de débits extrêmes pendant la période de chauffe, entraînant une augmentation significative de la moyenne prise en compte dans le calcul du débit déperditif.

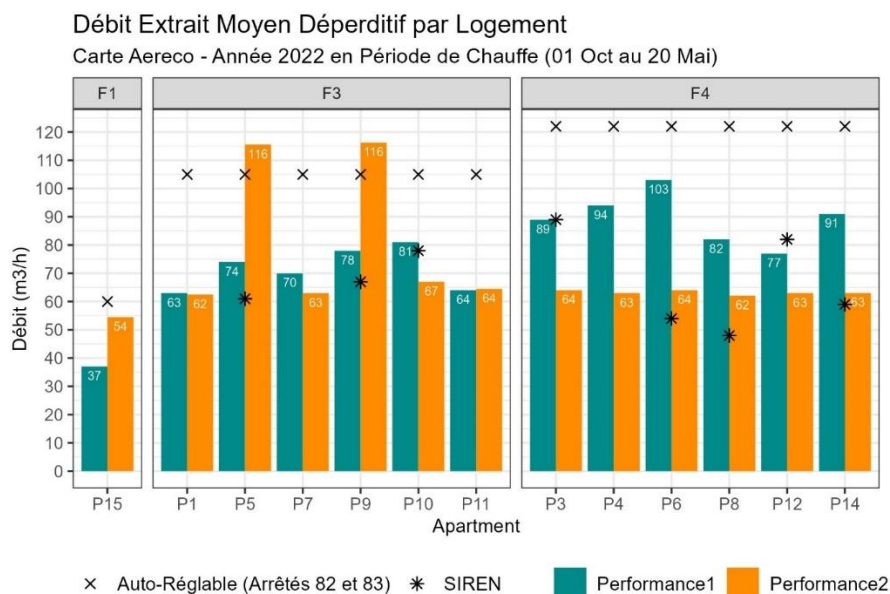


Figure 12 : Comparaison de débits déperditifs évalués dans Performance 2 aux résultats de Performance 1, aux débits correspondants autoréglables et aux débits théoriques évalués par le logiciel SIREN – Paris

2.3.3.2. Fonctionnement hygroréglable des systèmes de ventilation

Le fonctionnement de la ventilation hygroréglable se base sur la modulation des 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. Nous avons ici étudié les indicateurs de ce fonctionnement applicables aux systèmes du projet, qui concernent :

- à l'échelle terminaux (entrées d'air et bouches de ventilation) : la position des points de mesures {débit ; humidité relative} par rapport au gabarit de fonctionnement ;
- à l'échelle logement :
 - la variation du débit total extrait ;
 - le risque de condensation (correspondant à un niveau d'humidité relative supérieur à 85%) et le nombre d'heure au-delà de 75% d'humidité ;
 - les concentrations en CO₂ en ppm.h cumulés en base 2000, avec une limite de 400 000 ppm.h.

2.3.3.2.1. Echelle des terminaux

A l'échelle des terminaux (entrées d'air et bouches d'extraction), la réponse de chaque terminal a été analysée : les couples {débit ; humidité relative} mesurés sont comparés au gabarit de fonctionnement défini à la conception. Cette analyse est réalisée à partir des mesures issues de la campagne laboratoire (tâche 2) et des données in-situ (monitoring tâche 1). En complément, afin d'identifier les sources potentielles de dysfonctionnement, une analyse de la pression disponible aux bouches d'extraction a été réalisée (un couple hors gabarit peut être expliqué par un sous-débit causé par une pression disponible insuffisante, ce qui ne relève alors pas d'une mauvaise réponse du système hygroscopique).

A Villeurbanne, la pression mesurée aux bouches est conforme pour toutes les bouches cuisines et une majorité des bouches WC. En revanche, en salle de bain, les valeurs sont souvent inférieures aux pressions recommandées, ce qui pourra expliquer des débits insuffisants non liés au fonctionnement hygroréglable. A Paris, la pression mesurée aux bouches est globalement conforme pour les cuisines, mais souvent insuffisante dans les salles de bain, notamment pour deux appartements où la pression mesurée est très inférieure à la limite. Là encore, ces mauvaises conditions de fonctionnement seront à prendre en compte en cas de sous-débit dans ces pièces.

Pour les bouches d'extraction, on note à Paris 4 bouches cuisine pour lesquelles plus de 50% des points étudiés sont hors gabarit en phase laboratoire. Aucune bouche d'extraction de Villeurbanne ne montre de défaut de fonctionnement en sortie de caractérisation en laboratoire. En revanche, pour les entrées d'air, on observe un taux de dysfonctionnement en sortie de laboratoire plus important sur les deux immeubles : à Paris la majorité des entrées d'air présentent plus d'un tiers des points étudiés hors gabarit dont 5 avec plus de 50% des points hors gabarit. A Villeurbanne, on décompte 5 entrées d'air présentant plus d'un tiers des points étudiés hors gabarit dont 3 avec plus de 50% des points 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.

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. 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).

Sur Paris (Figure 13), 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.

Pourcentage Points dans le Gabarit de Tolérance par Plage d'Humidité Carte Aereco - Année 2022

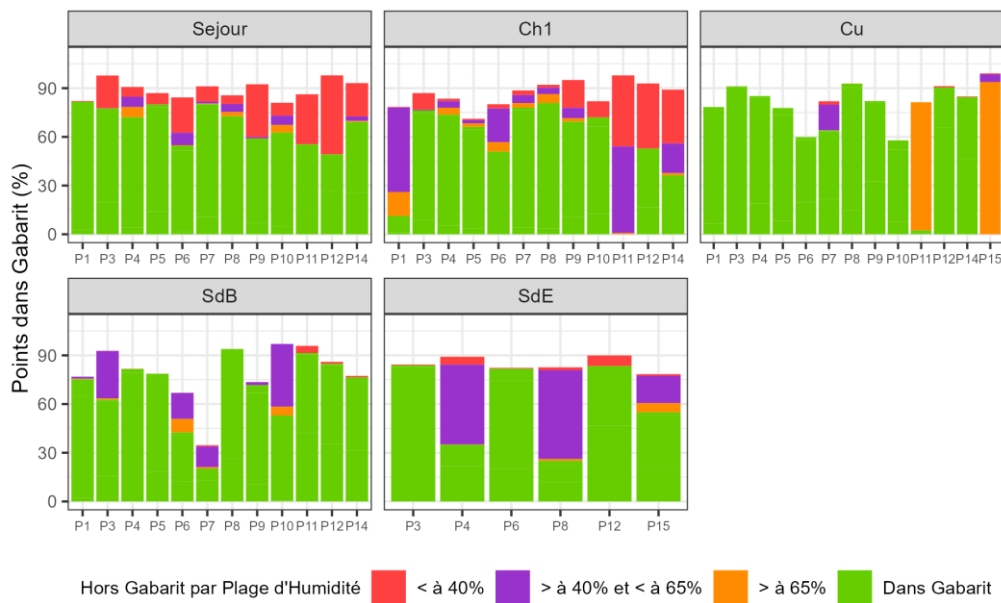


Figure 13 : Synthèse de l'analyse du fonctionnement des bouches d'extraction et des entrées d'air en conditions réelles – Site de Paris

2.3.3.2.2. Echelle du logement

Nous avons tout d'abord analysé ici 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. 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 (Figure 14). 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.

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, le critère du GS 14.5 se calcule sur toute la période de chauffe en prenant en compte uniquement les périodes pendant lesquelles le CO₂ est au-dessus de 2000 ppm. Or, sur l'intégralité de cette période, seuls les capteurs embarqués mesurent le CO₂, avec une saturation autour de 2000 ppm. En considérant des hypothèses de valeurs de CO₂ basées sur la campagne hivernale, nous avons proposé un calcul permettant de calculer cet indicateur. Cependant, les incertitudes dues à ces hypothèses sont élevées. Ainsi, nous avons identifié deux appartements à Paris pour lesquels les niveaux de CO₂ des chambres sembleraient entraîner un dépassement du seuil 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. Dans les chambres, la nuit, où le risque de confinement est le plus élevé, il est observé que dans la plupart des cas, les concentrations de CO₂ n'atteignent pas, ou très peu 1500 ppm, considéré comme seuil critique de l'Indice Icone.

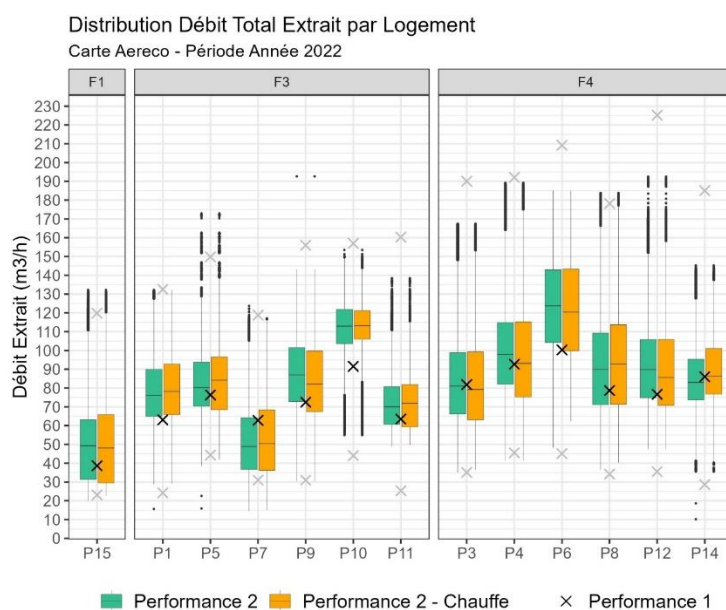


Figure 14 : Variations du débit total extrait dans les logements - Paris

2.4. Partie 3 : Analyse multicritères de la performance des systèmes de ventilation hygroréglable

Des paramètres nouveaux par rapport à Performance 1 ont été mesurés pendant Performance 2, notamment COV, Formaldéhyde et PM. Des informations nouvelles auprès des occupants ont également été récoltées pendant les campagnes hivernales QAI. L'ensemble de ces données a été analysé afin d'évaluer de façon plus large la performance des systèmes hygroréglables. Aucune référence initiale de Performance 1 n'existant, il a été nécessaire de définir des indicateurs et des critères de performance pour réaliser cette évaluation. De plus, 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.

2.4.1. Etude complémentaire des concentrations en CO₂

Trois seuils sont étudiés :

- 800 ppm : seuil admis comme protecteur vis-à-vis des transmissions aéroportées par le Haut Conseil de Santé Publique comme l'Organisation Mondiale de la Santé (ré-évalué depuis la crise Covid) et premier seuil de l'indice ICONNE ;
- 1000 ppm : défini dans le Règlement Sanitaire Départemental Type ;
- 1500 ppm : second seuil de l'indice ICONNE.

L'introduction du seuil à 800 ppm a permis d'identifier 2 nouveaux appartements à Villeurbanne qui présentent, selon ce seuil, un renouvellement d'air insuffisant : il s'agit de deux situations de suroccupation au sens des scénarios utilisés dans Mathis (deux T4 occupés par 6 personnes et 7 personnes).

Les analyses différenciées entre période de chauffe et hors chauffe montrent 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. 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. On observe là aussi majoritairement une augmentation significative des concentrations en CO₂ durant cette période.

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.

L'indice ICONNE, 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 durée pendant laquelle ils sont franchis en présence

des occupants, a été calculé sur Performance 2, on ne considérant que les nuits dans les chambres, périodes pendant lesquelles les occupants sont a priori présents. A Paris, l'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 (Figure 15).

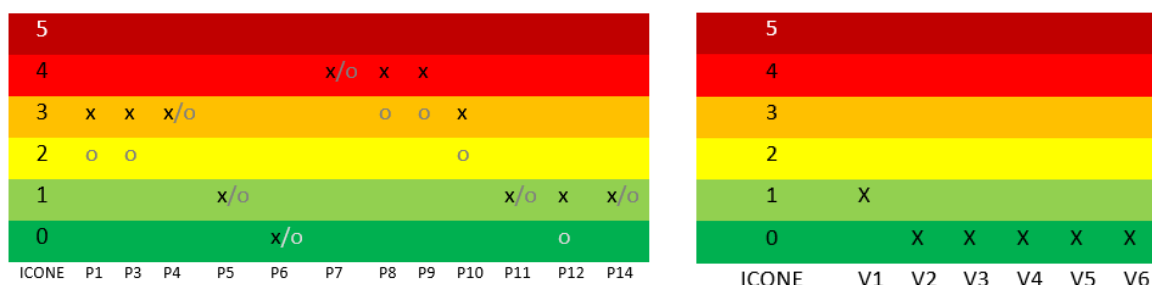


Figure 15 : Indice ICONE calculés de 0 à 6h pour chaque chambre – Paris (gauche) et Villeurbanne (droite)

2.4.2. Etude complémentaire des niveaux d'humidité relative

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, assorti d'un risque sanitaire. En complément des analyses précédentes, un focus a été réalisé sur le pourcentage de temps en dessous de 40 % d'humidité.

A Paris, un appartement interpelle par la sécheresse de ses ambiances dans toutes les pièces, avec cependant une mention particulière pour le séjour qui est plus des trois quarts du temps en dessous de 40 % d'HR. Deux autres appartements présentent des temps de dépassement de ce seuil bas relativement important également, avec une atmosphère trop sèche qui approche la moitié du temps dans le séjour et dépasse un tiers du temps dans la chambre. A Villeurbanne (Figure 16), les résultats interpellent sur la problématique de sécheresse dans un appartement, 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 50 % du temps, ce qui n'est pas vrai des pièces humides. Un deuxième appartement se distingue également par une sécheresse, relativement homogène entre les pièces. Un dernier appartement présente des résultats similaires, qui s'expliquent par une surventilation volontaire imposée en raison de présence de moisissures dans la salle de bain.

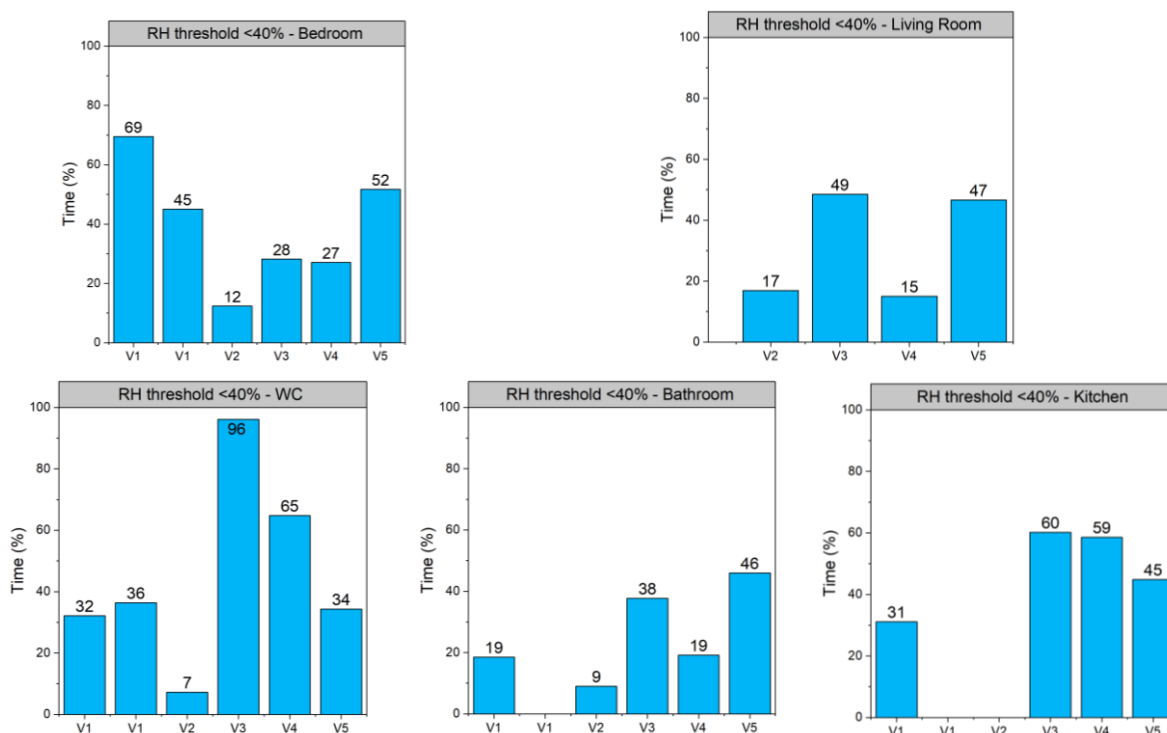


Figure 16 : Pourcentage de temps passé avec une humidité relative inférieure à 40% - Villeurbanne

2.4.3. Analyse de la QAI

2.4.3.1. Particules fines

Deux valeurs seuils sont considérées :

- 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: valeur seuil proposée par l'OMS pour le long terme ;
- 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: valeur seuil proposée par l'OMS pour le court terme.

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

- Les résultats en termes de $\text{PM}_{2.5}$ sont plutôt encourageants dans les appartements instrumentés, meilleurs que ceux de la CNL Campagne Nationale Logement (CNL) de l'OQAI. Ils s'établissent aux alentours de la valeur seuil 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 dans les logements fumeurs dépassent de manière récurrente la valeur seuil court terme de l'OMS, 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 PM en intérieur ;
- Les performances ou contre-performances identifiées sur le système de ventilation ne se répercutent pas de manière linéaire sur les concentrations en PM intérieures comme cela peut être le cas sur les COV. Dans le cas des PM, ce qui reste prédominant est la présence ou non de sources intérieures majeures (comme le tabac).

2.4.3.2. Composés Organiques Volatils

Une valeur seuil est considérée : 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

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.

Concernant les COV^{légers}, plusieurs appartements s'illustrent par leurs valeurs élevées lors de la campagne 1 avec des valeurs dépassant 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de COV^{légers} plus de 15% du temps. Le point commun entre ces appartements est l'utilisation de sprays désodorisants, et pour certains des produits de senteur (sprays désodorisant, encens, bougies parfumées, huiles essentielles, parfum, etc.).

Les analyses des mesures effectuées par les capteurs embarqués montrent clairement que les pièces aux valeurs les plus élevées sont les sanitaires, salle de bain et salle 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. On retrouve des concentrations élevées dans les appartements avec une utilisation massive de désodorisant et 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 grande performance de la ventilation dans ce logement, qui ressort dans toutes les analyses réalisées sur le paramètre du CO_2 . Au-delà des débits d'air, le sens de circulation engendré par la ventilation est particulièrement favorable dans le cas de polluants 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 humides peuvent engendrer des concentrations relativement élevées dans les pièces de vie. Il est à noter, par ailleurs, que les appartements les plus sujets aux valeurs hautes en CO_2 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.

2.4.3.3. Formaldéhyde

Deux valeurs seuils sont considérées :

- 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: réglementation de surveillance de la QAI dans les ERP ;
- 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: Valeur Guide de l'Air Intérieur (VGAI) – Anses.

Les valeurs mesurées sur Performance 2 ont également été comparées aux moyennes intégrées issues de la Campagne Nationale Logement 1 de l'OQAI.

Deux appartements à Villeurbanne dépassent de façon significative le seuil de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant la première campagne, beaucoup moins à la seconde. Pour l'un, les occupants ont modifié leurs habitudes entre les deux campagnes grâce à une formation sur l'air intérieur. Pour le deuxième, la réfection du sol

et des peintures murales avant la 1ère campagne de mesure pourrait être responsable des niveaux mesurés.

Pour Paris, un appartement dépasse le seuil de 30 µg/m³ près de 20 % du temps lors de la 1ère campagne, alors que cela ne se produit plus du tout à la seconde. Les informations collectées auprès des occupants ne permettent pas d'avancer d'hypothèse explicative sur la différence entre 1ère et 2nde campagne.

2.4.1. Analyse approfondie des situations particulières

Dans cette partie, nous avons analysé 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.

2.4.1.1. Cas particuliers à Paris

- **1 appartement est en sous-débit** par rapport aux autres logements de même type : cette situation est liée à une absence de production importante d'humidité dans le logement, notamment dans la salle de bain et la cuisine (en comparaison aux productions relevées dans des logements similaires, notamment par les douches ou la cuisson des aliments). Cela engendre un confinement important (le plus important du projet) ainsi que des concentrations en COV les plus importantes du projet. **Dans ce cas, la modulation par l'humidité de la ventilation n'est pas adaptée à l'usage particulier de ce logement.**
- **2 appartements sont en sur-débit** par rapport aux autres logements de même type :
 - Un appartement en suroccupation, avec donc des débits plus importants liés à l'usage renforcé des sanitaires et de la cuisine. **Cela montre que le système hygroréglable permet de répondre 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 0. Concernant les polluants étudiés, les résultats sont très bons en matière de formaldéhyde. Les niveaux élevés de COVs s'expliquent par l'utilisation massive de produits de senteurs (sprays désodorisants et cosmétiques) et de bougies parfumées. Néanmoins compte tenu de l'importance des concentrations en COV enregistrées dans les pièces humides, leurs concentrations faibles dans les pièces de vie illustrent une performance notable de la ventilation. En revanche, concernant les PM, même une ventilation avec des débits élevés n'est pas en capacité d'assurer le maintien de seuils satisfaisants dans un logement fumeur comme c'est le cas ici.
 - Le deuxième appartement, déjà en sur-débit pendant Performance 1, possède une 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. 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. **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. L'impact sur la consommation d'énergie de cette surventilation est négligeable, car dans cet appartement, la température intérieure est inférieure à celle mesurée dans les autres appartements.**
- Parmi les autres appartements présentant des débits moyens, 4 appartements montrent des valeurs de CO₂ qui témoignent d'un confinement plus ou moins important :
 - Un appartement présente l'intégralité de ses bouches avec une différence de pression insuffisante (inférieure au minimum défini dans l'Avis Technique), ce qui entraîne un renouvellement d'air insuffisant et donc un léger confinement la nuit dans la chambre instrumentée ;
 - Un deuxième appartement montre des valeurs de CO₂ dans la chambre parentale centrées autour de 1200 ppm, avec aucun défaut détecté sur les entrées d'air et des détalonnages de porte conformes. Le confinement est donc raisonnable, avec des niveaux pour les autres polluants également acceptables. Cette situation correspond aux limites du renouvellement d'air fourni par le système de ventilation, avec deux

personnes occupant la même chambre. Aucune information n'a pu être récoltée concernant leurs habitudes d'aération ;

- Le troisième appartement fait partie des trois appartements qui dépassent les indicateurs préconisés par le GT ESSOC et présente un confinement considéré « très élevé » selon l'Indice Icone. Aucun dysfonctionnement du système de ventilation n'a été détecté, qui pourrait expliquer le confinement dans la chambre. Une hypothèse relevée est le potentiel déséquilibre de répartition des défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe entre les pièces, créant un court-circuit du balayage de la ventilation. Aucune analyse ni mesure ne permet aujourd'hui de confirmer cette hypothèse ;
- Le dernier appartement affichant un confinement dans la chambre instrumentée semble représenter une situation de sur-occupation, avec deux adultes et potentiellement des animaux partageant une chambre « enfant ». La présence de fumeurs dans l'appartement et l'utilisation d'encens et de désodorisant, combiné avec un renouvellement de l'air insuffisant, engendre une qualité de l'air insuffisante dans cette chambre.

2.4.1.2. Cas particuliers à Villeurbanne

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 de deux appartements :

- Dans le premier appartement, l'entrée d'air de la chambre qui ne dépasse pas le débit intermédiaire induit un niveau de CO₂ régulièrement au-dessus de 1000 ppm pendant la nuit en période de chauffe. Néanmoins, les concentrations en CO₂ restent toujours acceptables, et les valeurs en COV et en PM sont globalement bonnes ;
- Dans le deuxième appartement, malgré le défaut sur l'entrée d'air, aucun confinement n'est observé dans la chambre, avec des valeurs de CO₂ qui restent majoritairement en dessous de 1000 ppm. Les résultats en COV sont particulièrement élevés, liés à l'utilisation de nombreux produits de senteur (sprays désodorisant, encens, bougies parfumées, huiles essentielles, parfums, etc.).

Dans deux autres appartements, les niveaux d'humidité relative mesurée dans les chambres instrumentées restent inférieurs à 60 %, ce qui a pour conséquence que les entrées d'air de ces chambres ne présentent jamais de débit important. Dans les deux cas, nous observons de très bonnes performances sur les concentrations en CO₂ dans les chambres, avec un indice de 0, malgré les débits entrants limités. Cela s'explique notamment par les habitudes des occupants de ces deux appartements, qui ont déclaré dormir avec la porte de leur chambre ouverte.

2.4.1. Analyse des comportements des occupants

Le recueil d'information auprès des occupants poursuivait différents objectifs, qui se sont traduits par autant de matériel de travail. Les habitudes de vie générales des occupants, pour les aspects qui influent sur la QAI, ont été recueillies dans 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 en amont avec une psychologue sociale du Cerema afin de limiter les biais dans les réponses. Le questionnaire est constitué de questions ouvertes, qui visent à identifier les connaissances et représentations des répondants au sujet de la qualité de l'air intérieur, et de 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. 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.

Une première analyse des mots utilisés par les occupants pour parler de la qualité de l'air (Figure 17) a permis d'identifier que les polluants de l'air mentionnés sont généralement issus de sources extérieures. Ceux de l'air intérieur, en particulier générés par les occupants, ne sont pas mentionnés (tabac, produits d'entretien, bougies, encens, sprays désodorisants, etc.). Le tabac n'est absolument jamais cité par les fumeurs, qui ont le plus axé leurs propos sur des polluants avec parfois des listes assez étayées des molécules ou de sources, quasi-exclusivement d'origine extérieure. Pour tous les occupants qui considèrent avoir une mauvaise QAI, les apports de l'extérieur en sont responsables : 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 (aération en général, et parfois la ventilation). La question des émissions dans son propre logement liées à ses activités ou au bâtiment et à ses équipements restent largement sous-représentées.



Figure 17 : Représentation du vocabulaire lié à la qualité de l'air d'après les entretiens réalisés

En ce qui concerne la connaissance de la ventilation (le principe et le système installé dans leur logement), nos études ont montré que le lien entre système de ventilation et renouvellement d'air ressort comme bien compris. 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, 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 donc 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.

Il ressort de façon générale que le fait d'aérer ou d'avoir un système de ventilation concourt à la QAI. Ceux qui étaient inquiets sur la QAE ne questionnent pas pour autant le fait de faire entrer des polluants lorsque la ventilation est abordée.

2.5. Tâche 4 : Elaboration de préconisations techniques

- Coordination : Cerema
- Participants : Cerema, Anjos, Aereco

L'objectif de cette tâche, coordonnée par le Cerema, est l'élaboration de pistes d'amélioration de la qualité d'usage : prise en compte des attentes et besoins des occupants et de leur impact sur l'utilisation de la ventilation et la qualité de l'air intérieur. Une contribution aux corpus réglementaires français et européen était attendue, en fonction de leur calendrier et des opportunités de participation à ces travaux. Des échanges avec des membres du groupe Essoc ont eu lieu, avec une présentation des premiers résultats du projet.

Les préconisations développées dans cette tâche s'appuient sur les connaissances nouvelles apportées par le projet Performance 2 sur la durabilité des performances de la ventilation, que nous avons décomposées 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 hygroréglable, ainsi que sur des capteurs de CO₂ utilisés dans cette étude pour du monitoring continu.

Les analyses réalisées dans le projet ont été réalisées au regard des exigences réglementaires et normatives existantes. Il en ressort que 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, 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, 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.

Ainsi, dans cette tâche, 5 familles de préconisations sont proposées :

- Préconisations pour les réglementations et les commissions de validation : à destination du CCFAT – GS14.5 et des GT ESSOC 1 et 2 "Aération/renouvellement d'air", avec la prise en compte de la durabilité et précisions des capteurs, et l'inspection périodique de la ventilation ;
- Préconisations pour les industriels, concernant la précision et la dérive des capteurs, la durabilité de la ventilation, ainsi que les besoins de maintenance ;
- Préconisations pour les gestionnaires de bâtiments, relatives à la maintenance régulière de la ventilation et le suivi de la qualité de l'air ;
- Préconisations pour la révision des normes européennes : la EN 16798-1 et la EN 15665 sur la performance de la ventilation, et les normes d'inspection EN 16798-17, EN 16211 et EN 12599 ;
- Préconisations pour l'ANR/ADEME/Horizon Europe/financeurs : concernant les travaux de recherche d'envergure au niveau français et européen à réaliser et financer sur :
 - la durabilité intrinsèque des systèmes de ventilation de tout type ;
 - la performance in situ à long terme de la ventilation ;
 - le développement de capteurs fiables, robustes et durables ;
 - le développement de connaissances nouvelles sur l'impact de la maintenance et de son calendrier ;
 - la résilience de ces systèmes aux climats futurs ;
 - 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 ;
 - la sensibilisation des différents acteurs autour de l'importance de la ventilation ;
 - le développement de systèmes de détection de fautes et d'incitation à l'usagers, incluant des techniques issues de la psychologie sociale.

2.6. Tâche 5 : Valorisation scientifique et diffusion

- Coordination : Cerema
- Participants : Cerema, Anjos, Aereco, LOCIE

L'objectif de cette tâche, coordonnée par le Cerema, est de faire connaître, valoriser et diffuser les résultats du projet, au niveau national et international. Il était prévu d'autoriser une diffusion très large des résultats du projet, par exemple au cours de journées dédiées à la ventilation ou lors de conférences internationales, et à travers la rédaction de documents de communication tels que des articles scientifiques. Il était prévu que trois articles et présentations soient présentés dans les workshops et conférences de l'AIVC ou autre conférence internationale reconnue. Un article devait également être

rédigé et soumis à un journal à comité de relecture international et un article destiné à être publié en revue technique.

Diffusions et valorisations réalisées :

- Mars 2022 : parution d'un article d'actualité sur le site web du Cerema (<https://www.cerema.fr/fr/actualites/ventilation-hygroreglable-projet-performance-2-evalue>)
- Avril 2022 : parution de la page projet de recherche sur le site web du Cerema (<https://www.cerema.fr/fr/innovation-recherche/recherche/projets/performance-2-durabilite-performance-ventilation>)
- 4/5/6 mai 2022 : présentation et article à la conférence internationale ASHRAE-AIVC « IAQ 2020: Indoor Environmental Quality Performance Approaches Transitioning from IAQ to IEQ » (reportée depuis 2020), à Athènes [1]
- Mai 2022 : Newsletter n°1, avec ouverture d'une adresse mail dédiée performance2@cerema.fr
- Septembre 2022 : une présentation à la Conférence « BioUrbEcon” - A bio-based urban economy for climate protection and sustainability” (Wellington)
- Octobre 2022 : deux présentations et deux articles à la conférence AIVC, à Rotterdam [2,3];
- Avril 2023 : Newsletter n°2
- Mai 2023 : publication d'un article dans la revue Energy & Building “Durability of humidity-based ventilation components after 13 years of operation in French residential buildings – assessment of components performance in laboratory” [4]
- Juin 2023 : parution d'un article d'actualité sur le site web du Cerema (<https://www.cerema.fr/fr/actualites/ventilation-francaise-comment-ces-systemes-fonctionnent-ils>)
- Octobre 2023 : une présentation et un article à la conférence AIVC, à Copenhague [5];
- Avril 2024 : une présentation au workshop de l'AIVC, à Singapour;
- Avril 2024 : une présentation et un article à la conférence Roomvent, à Stockholm [6].

Diffusions et valorisations supplémentaires, encore en cours :

- Un encart dans une plaquette DREAL Auvergne-Rhône-Alpes (parution à confirmer);
- 2 articles de conférence soumis pour la conférence AIVC, octobre 2024, Dublin;
- 1 article de revue internationale soumis, en cours de révision;
- 1 article de revue internationale en cours de rédaction.

L'ensemble des travaux du projet seront présentés lors de la restitution du projet le 11 juin 2024, en présentiel, au Cerema à Bron (plus de 50 inscrits). Différents supports de communication sont en cours de finalisation pour cet évènement, et seront disponibles à partir du 11 juin 2024.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. Guyot, E. Jardinier, F. Parsy, S. Berthin, E. roux, S. Charrier, Smart Ventilation Performance Durability Assessment: Preliminary Results from a Long-Term Residential Monitoring of Humidity-Based Demand-Controlled Ventilation, in: IAQ 2020: Indoor Environmental Quality Performance Approaches Transitioning from IAQ to IEQ, AIVC-ASHRAE, Athens, Greece, 2022.
- [2] A. Mélois, N. Vala, A. MArchand-Moury, C. Nauleau, R. Jobert, How to collect reliable information regarding occupants' behavior during IAQ campaigns? Performance 2 project first feedbacks, in: Rotterdam, The Netherlands, 2022.
- [3] G. Guyot, A. Mélois, M. Legree, R. Juan, Durability of humidity-based ventilation components after 15 years of operation in French residential buildings – Lab tests, in: Rotterdam, The Netherlands, 2022.
- [4] A. Mélois, M. Legree, J. Sebastian Rios Mora, J. Depoorter, E. Jardinier, S. Berthin, F. Parsy, G. Guyot, 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 (2023) 113154. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113154>.
- [5] A. Melois, A. MArchand-Moury, M. Legree, J. Rios, J. Depoorter, N. Dufour, S. Rebières, G. Guyot, Performance 2 project - Winter IAQ campaigns in 13 dwellings equipped with Humidity-based DCV systems: analysis of the ventilation performance after 15 years of use, in: Copenhagen, Denmark, 2023.
- [6] A. Mélois, J. Sebastian Rios Mora, A. Marchand-Moury, M. Legree, J. Depoorter, N. Dufour, S. Rebières, G. Guyot, Performance 2 project - Winter IAQ campaigns in 13 dwellings equipped with Humidity-based DCV systems: analysis of the ventilation performance after 15 years of use, in: Stockholm, 2024.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des livrables et bilan des envois.....	13
Tableau 2 : Nombre d'appartements participant à chacune des phases de la Tâche 1.....	21
Tableau 3 : Synthèse des données recueillies dans Performance 2.....	29
Tableau 4 : Principales limites associées aux différentes données recueillies dans Performance 2	30

FIGURES

Figure 1 : Représentation temporelle des tâches du projet Performance 2.....	10
Figure 2 : Calendrier réalisé du projet Performance 2.....	12
Figure 3 : Organigramme de la tâche 1 - Performance 2.....	17
Figure 4 : Niveau d'encrassement des bouches d'extraction et des entrées d'air- Paris - Diagnostic initial Performance 2	18
Figure 5 : Schéma de l'instrumentation embarquée - Site de Paris	19
Figure 6 : Extrait du carnet de bord – 1 ^{ère} version.....	20
Figure 7 : Exemples de courbes Débit/Humidité pour une chambre (à gauche) et un séjour (à droite)- Paris.....	22
Figure 8 : Caractérisation en laboratoire des performances des bouches d'extraction cuisine - Villeurbanne.....	23
Figure 9 : Schéma de principe de l'enceinte à paramètres contrôlés.....	25
Figure 10 : Coefficients de corrélation de Pearson pour la mesure de PM2.5: inter-comparaison des capteurs Aereco, des NEMos et des Nodes, salle « CONFORT » de l'IUT – Campagne 1	26
Figure 11 : Etude de la mesure des COV léger par les NEMos	26
Figure 12 : 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 – Paris	31
Figure 13 : Synthèse de l'analyse du fonctionnement des bouches d'extraction et des entrées d'air en conditions réelles –Site de Paris	33
Figure 14 : Variations du débit total extrait dans les logements - Paris.....	34
Figure 15 : Indice ICONÉ calculés de 0 à 6h pour chaque chambre – Paris (gauche) et Villeurbanne (droite).....	35
Figure 16 : Pourcentage de temps passé avec une humidité relative inférieure à 40% - Villeurbanne.....	35
Figure 17 : Représentation du vocabulaire lié à la qualité de l'air d'après les entretiens réalisés.....	39

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
LOCIE	LabOratoire proCédés énergle bâtimEnt
QAI	Qualité de l'Air Intérieur
OQAI	Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur
CNL	Campagne Nationale Logement
DGALN	Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature
DHUP	Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages
AIVC	Air Infiltration and Ventilation Center
UNM	Union de Normalisation de la Mécanique
CO ₂	Dioxyde de Carbone
HR	Humidité Relative
COV	Composés Organiques Volatils
PM	Particules fines
EA	Entrée d'air
BE	Bouche d'extraction

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

PERFORMANCE 2 : DURABILITE DES SYSTEMES DE VENTILATION HYGROREGLABLE

Le projet Performance 2 a été réalisé par le Cerema, Aereco, Anjos et le LOCIE, et financé par l'ADEME. Il s'articule autour de :

- Campagnes de mesure en laboratoire, pour caractériser les performances des terminaux de ventilation et les performances des appareils de mesure ;
- Campagnes de mesures in-situ dans deux immeubles, avec un monitoring en continu du fonctionnement des terminaux de ventilation ainsi que des mesures de température, humidité relative, CO₂, COV et PM, complétées par deux campagnes hivernales qui mesurent aussi le formaldéhyde et collectent des informations auprès des occupants.

Après 15 ans d'utilisation dans des logements sociaux, les systèmes de ventilation hygro-réglables étudiés continuent de répondre correctement aux conditions d'humidité relative et fournissent des débits qui varient en fonction de l'occupation et assure des bonnes conditions d'humidité et de CO₂. Les analyses dédiées à la QAI, avec notamment l'étude des concentrations montrent que les situations avec des niveaux élevés pour les COV, PM et formaldéhyde correspondent à des logements fumeurs ou à l'usage important de produits émissifs (notamment désodorisant, encens et parfums d'ambiance).

Ces résultats ont permis d'élaborer des recommandations à destination des décideurs pour faire évoluer le corpus réglementaire et normatif, mais aussi des industriels pour faire évoluer leurs produits, des maîtres d'ouvrage pour les sensibiliser au choix des systèmes et à l'importance de la maintenance, et pour les financeurs de travaux de recherche afin de prioriser les futures études.

