



Smart-Réno

Fiabiliser, Professionnaliser, Valoriser la Rénovation Energétique

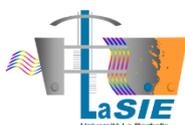
Troisième volet : Valoriser le confort

Livrable T3.6 – Evaluation des indicateurs sur des cas concrets

Auteurs : Jérôme Nicolle, Jordan Litaud, Marika Vellei, Adrien Dhalluin, Charles-Florian Picard, Marc Abadie.

Contributeurs : Karim Limam, Bénédicte Wall-Ribot.

Décembre 2021



Sommaire

Introduction.....	5
1 Campagne de mesures sur site du confort thermique et de la QAI avant/après rénovation énergétiques.....	7
1.1 Introduction.....	7
1.2 Description de la maison et des travaux de rénovation.....	7
1.3 Métrologie.....	9
1.4 Résultats des mesures.....	12
1.4.1 Mesures de CO ₂	12
1.4.2 Mesures de COVT.....	13
1.4.3 Mesures de température et humidité relative.....	14
1.4.4 Mesures de concentrations en particules fines.....	16
1.4.5 Comparaisons des capteurs.....	17
1.5 Comparaisons avant/après rénovation.....	18
1.5.1 Niveaux de CO ₂	18
1.5.2 Niveaux de COVT.....	18
1.5.3 Niveaux de température et d'humidité relative.....	19
1.5.4 Niveaux de particules fines.....	20
1.5.5 Indicateurs de confort thermique et de QAI.....	21
1.5.5.1 Indicateurs de confort thermique.....	21
1.5.5.2 Indicateurs de QAI.....	23
1.5.5.3 Note globale avant et après rénovation.....	23
1.6 Conclusion.....	24
2 Campagne de tests des capteurs à bas coût pour l'évaluation de la QAI.....	25
2.1 Introduction.....	25
2.2 Méthodologie.....	27
2.3 Résultats des mesures.....	38
2.3.1 Mesures portant sur les COV par des essais en conditions réalistes d'usage.....	38
2.3.1.1 Réalisation de scénarios polluants dans une pièce de type chambre.....	38
2.3.1.1 Comparaison entre des valeurs de COVT obtenues par prélèvement et mesures par des capteurs PID ou MOS.....	41
2.3.1.2 Influence de l'humidité sur la mesure de COVT.....	43
2.3.1.2.1 Influence de l'humidité en tests réalistes.....	43
2.3.1.2.2 Influence de l'humidité en enceinte contrôlée en laboratoire.....	44
2.3.1.3 Evaluation de la réponse en COVT à partir d'une atmosphère de COV générée en laboratoire.....	45

2.3.2	Mesures portant sur le CO ₂	46
2.3.2.1	Evaluation de la réponse de capteurs en fonction de la teneur en CO ₂ en chambre d'1 m ³	46
2.3.3	Mesures particulières lors d'essais en conditions réalistes d'usage	47
2.3.3.1	Données utilisées pour l'évaluation des capteurs à bas coût de particules	48
2.3.3.2	Evaluation de la pertinence des indices QAI mesurés à partir des appareils à bas coût	53
2.4	Conclusion	57
3	Campagne d'évaluation de l'évolution de la sensation de confort thermique sous des sollicitations variables en température	59
3.1	Introduction.....	59
3.1.1	Contexte et intérêt scientifiques	59
3.1.2	Objectifs.....	59
3.2	Protocoles expérimentaux	60
3.2.1	Le recrutement des participants	63
3.3	Métrologie	64
3.4	Résultats	66
3.4.1	Scenario de variation cyclique no 1.....	66
3.4.2	Scenario de variation cyclique no 2.....	67
3.4.3	Scenario de variation de température du au changement de salle	69
3.5	Conclusion	70
	Conclusion générale	73

Introduction

Ce livrable intitulé « Evaluation des indicateurs sur des cas concrets » présente les études exploratoires réalisées dans le cadre du Volet 3 « Valoriser le confort » du programme Smart-Réno « Fiabiliser, Professionnaliser, Valoriser la Rénovation Energétique » et qui concernent la problématique de la mesure in-situ des indicateurs définis lors de la tâche 3 et retenus pour les évaluations numériques des tâches 4 et 5 ; indicateurs permettant de quantifier l'influence des actions de rénovation énergétiques sur le confort hygrothermique et la santé des occupants des maisons individuelles.

La question posée est la suivante : sommes-nous en capacité d'évaluer des indicateurs de confort hygrothermique et de Qualité de l'Air Intérieur (QAI) à partir de mesures effectuées sur le terrain en amont et en aval de travaux de réhabilitation énergétique ?

Concernant le **confort hygrothermique**, la réponse est clairement positive. De nombreux systèmes métrologiques portables existent sur le marché pour mesurer le confort thermique d'une ambiance intérieure en temps réel. Les mâts de confort classiquement rencontrés sont équipés de capteurs de températures sèche et humide (température et humidité relative de l'air), de globe noir (température radiante moyenne) et d'anémomètre (vitesse d'écoulement d'air) pour les plus basiques, ce qui permet d'évaluer en particulier l'indice PMV-PPD bien adapté aux conditions stables des bureaux climatisés et des logements pendant la période de chauffage ou de climatisation. Des modules complémentaires peuvent être ajoutés pour mesurer les paramètres d'inconfort comme des capteurs de température additionnels positionnés selon la verticale (inconfort de gradient de température vertical des pieds à la tête) ou bien, comme retenu lors des tâches précédentes, l'inconfort induit par la présence de parois chaudes ou froides par des sondes pour la mesure de la température radiante (asymétrie de rayonnement).

En ce qui concerne la **QAI**, la réponse est plus nuancée. La mesure de concentration moyenne d'exposition aux polluants gazeux (COV) est certes possible grâce au piégeage des molécules au sein de supports de prélèvement laissés sur site pendant au moins une semaine et à l'analyse postérieure en laboratoire. La mesure normalisée concernant le polluant particulaire requiert obligatoirement l'usage de pompe, assez bruyante, mais qui permet de suivre l'évolution en temps réel de la concentration de particules de différentes tailles, en $PM_{2,5}$ par exemple. Une instrumentation scientifique plus avancée permet également de suivre la dynamique temporelle des concentrations en COV, mais toujours au détriment du bruit généré et de la complexité d'utilisation voire de l'impossibilité de déplacer ces équipements qui peuvent nécessiter des conditions ambiantes contrôlées thermiquement et en empoûssièrement.

On peut donc en conclure que, dans un processus d'évaluation des conditions hygrothermiques et de QAI, nous sommes en effet **en capacité d'évaluer des indicateurs de confort et de santé sur site avec des moyens scientifiques spécifiques**, mais néanmoins différents de ceux qui pourraient être utilisés dans un processus d'audits systématiques de type bureau d'étude.

Cependant, ces dernières années ont vu apparaître des **capteurs à bas coût** (*low-cost sensors*) permettant de mesurer les conditions hygrothermiques, acoustiques, lumineuses voire de QAI. Des appareils plus ou moins complets sont maintenant disponibles permettant pour la plupart de mesurer plusieurs paramètres représentatifs des conditions environnementales intérieures à des coûts abordables. On peut donc se poser la question de l'utilisation de ces capteurs, qui sont basés sur une miniaturisation et/ou une simplification du principe de la mesure normalisée, dans le cadre du projet Smart-Réno. C'est-à-dire de leur utilisation dans un processus d'audit du confort thermique et de la QAI lors de la rénovation énergétique des maisons individuelles.

Enfin, il faut bien reconnaître que les retours d'expériences négatifs existants sur de nombreuses rénovations en maisons individuelles sont liés à une dégradation du confort d'été. En ajoutant les projections climatiques à 10-20 ans et la non-résilience des systèmes passifs actuels aux vagues de chaleur futures, on peut imaginer une évolution significative des consommations de climatisation en maison individuelle sur les prochaines années. Aussi, des événements de demande d'effacement de systèmes de chauffage ou de refroidissement dans le cadre d'une souscription d'abonnement énergie *smart-grid* ou des réduits de consigne en utilisant les *smart-thermostats* (détecteur de présence/apprentissage) pour une simple économie énergétique représentent une évolution probable du fonctionnement des maisons individuelles ; ces événements pouvant être utilisés, aussi bien en hiver qu'en été, pour déplacer les charges thermiques vers les heures creuses. Ces variations de la température exposent les occupants à des **conditions thermiques dynamiques et répétitives** non prises en compte par les indicateurs de confort thermique tel que l'indicateur PMV-PDD et requièrent donc des **modèles de confort adaptés** à ces nouvelles conditions thermiques.

Ainsi, l'évaluation des indicateurs sur des cas concrets s'est traduit dans notre démarche selon trois campagnes de mesures. Une première **campagne** a ainsi eu lieu **sur site** en amont et en aval d'une rénovation énergétique d'une maison individuelle. L'objectif de cette campagne est de pouvoir identifier sur les indicateurs proposés sont pertinents pour mesurer les variations de confort thermique et de QAI. Une seconde campagne consiste à évaluer la pertinence des **capteurs à bas coût** pour la mesure de la concentration en polluants de l'air intérieur jusqu'à l'évaluation des indicateurs de QAI. Enfin, une troisième campagne de mesure vise à investiguer plus en amont **la variabilité de la sensation thermique des occupants** suite à des variations des conditions en température des ambiances contrôlées. Ce dernier vise ainsi à cerner les limitations des indicateurs généralement employés en ce qui concerne le confort thermique.

Ce livrable s'appuie sur les résultats et bibliographies des livrables précédents et notamment :

- T3.3-Définition des indicateurs de confort ;
- T3.5-Analyse du gain de confort et de qualité de l'air intérieur.

1 Campagne de mesures sur site du confort thermique et de la QAI avant/après rénovation énergétique

1.1 Introduction

Cette première **campagne** de mesure a eu lieu **sur site**, dans une **maison individuelle**, en **amont et en aval de la réalisation de sa rénovation énergétique**. L'objectif de cette étude sont de :

- Pouvoir identifier si les indicateurs proposés dans les livrables précédents sont pertinents pour mesurer les variations de confort thermique et de QAI ;
- Comparer les résultats obtenus entre différentes technologies de capteurs présentés ci-après. Il s'agira de comparer des équipements scientifiques de référence à des capteurs à bas coût.

1.2 Description de la maison et des travaux de rénovation

La maison individuelle qui a fait l'objet des mesures est une maison ancienne (d'avant 1914), de 90 m² de surface habitable.

La visite de la maison avant rénovation a permis de relever les informations suivantes :

- Des murs en pierre de 50 cm, isolés avec 5 cm de LDV ;
- L'arrière cuisine ne possède pas d'isolation ;
- Les menuiseries sont d'origine, en bois simple vitrage vétuste et la porte d'entrée en bois massif ;
- La toiture de la partie actuellement chauffée est en combles perdus, composé d'un plancher bois et d'un plafond en brique plâtrière non isolé. La toiture en arrière-cuisine est rampante non isolée ;
- Le plancher bas est en béton sur terre-plein non isolé ;
- La ventilation est naturelle par ouverture des fenêtres ;
- Le chauffage est une chaudière fioul standard et vétuste et les émetteurs des radiateurs en acier équipés d'anciens robinets thermostatiques. Pas de système de régulation automatique.

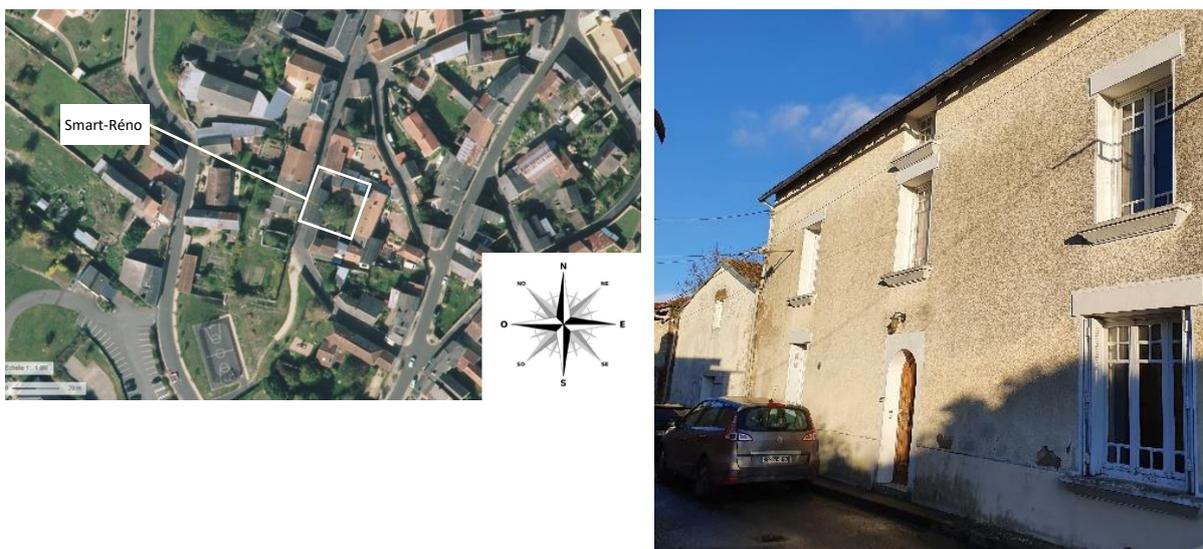


Figure 1 : Localisation géographique du bâtiment et photo extérieure.

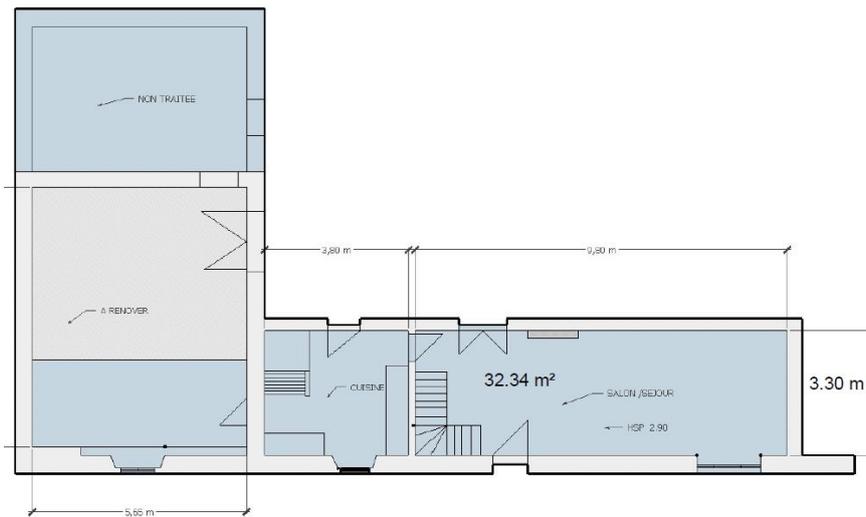


Figure 2 : Plan RDC.

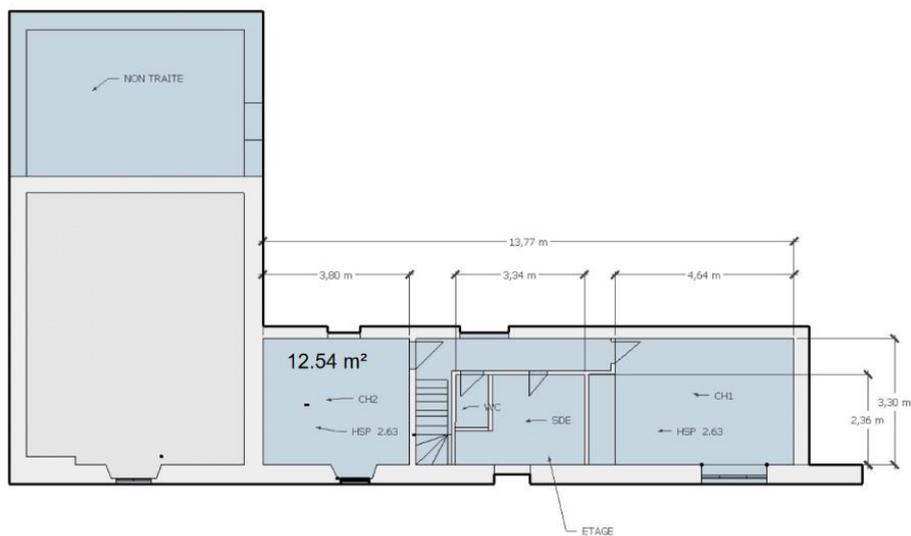


Figure 3 : Plan R+1.

Les travaux de rénovation ont concerné :

- Remplacement de l'ensemble des menuiseries (fenêtre, portes-fenêtres et portes donnant sur l'extérieur) ;
- Isolation des combles (ouate de cellulose) ;
- Remplacement de l'ancienne chaudière fioul par une PAC air/eau ;
- Installation d'une VMC hygro B avec réseau neuf ;
- Aménagement de l'ancienne grange en espace de vie (chambre, mezzanine).

La partie « à rénover » (sur le schéma) est l'ancienne grange, devenue chambre principale/mezzanine. La chambre 2 est l'ancienne chambre parentale, devenue chambre secondaire, occupée par un adolescent.

1.3 Métrologie

Les deux périodes de mesure ont été les suivantes :

- Avant rénovation : 1 mois, du 19/05/21 au 16/06/21. Lors de cette période, les fenêtres de l'étage venaient d'être rénovées ;
- Après rénovation : 2 semaines, du 17/11/21 au 01/12/21.

Les pièces investiguées étaient le séjour et la chambre principale (chambre 2 anciennement chambre parentale, devenue chambre secondaire).

Les paramètres mesurés sont les suivants :

- en intérieur : Tair, HR, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, CO₂, COVT, NO₂
- en extérieur : Tair, HR

A noter que certains capteurs (et donc paramètres mesurés) n'ont fourni des données que durant une semaine sur chacune de ces deux périodes de mesures.

Lors de la première campagne, en amont des travaux de rénovations énergétiques seulement un seul type de capteurs à bas coût a pu être déployé. En effet la plupart des capteurs à bas coût requiert une connexion via Wifi et proposent une lecture directe des données relevées. Seul le capteur Foobot était en mesure de donner un historique des valeurs présentent lors de la campagne. Celui-ci a été mis en « concurrence » avec de l'instrumentation scientifique afin de tester sa fiabilité mais aussi la pertinence de ses données afin de calculer un indice de QAI.

Les tableaux ci-dessous présentent les moyens mis en œuvre lors de la campagne avant et après rénovation.

Tableau 1 : Instrumentation – mesures avant rénovation.

Matériel	ID mesure	Paramètres mesurés et gammes de mesure	Technologie associée	Où	Durée des mesures
Fidas Frog	FD	Mesures simultanées des PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₄ et PM ₁₀ , TSP, concentrations en nombre et en masse. Tair (°C) HR (%) P (Pa)	Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols	1 dans le salon 1 dans la cuisine	1 mois
Grimm	G	Mesures simultanées des particules inhalables, thoracique et alvéolaire ; PM ₁₀ ; PM _{2,5} et PM ₁ , concentration (µg/m ³) et en nombre et distribution par taille. Tair (°C) HR (%)	Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols	1 dans le salon	1 semaine
GrayWolf	GW	COVT : ppb, ppm, µg/m ³ , mg/m ³ Tair (°C) HR (%)	PID 10,6eV équivalence isobutylène	1 dans le salon	1 mois
Foobot	FB	PM _{2,5} : µg/m ³ COVT : ppb CO ₂ : ppm Tair (°C) HR (%)	Détecteur MOS, [CO ₂] calculé en fonction de de la [COVT]	1 dans le salon 1 dans la chambre	1 mois
Airvisual pro	AVP	PM _{2,5} : 0,3 – 2,5 µm CO ₂ : 400 - 10 000 ppm T : -10 – 40 °C HR : 0 – 95 %	PM - Laser based light scattering (MIE)	1 dans le salon 1 dans la cuisine	1 semaine
Hygrolog	H	HR : 0...100% HR Tair : -10°C 60°C	Loggers de données pour l'humidité et la température avec éléments sensibles intégrés	1 dans le salon	1 semaine
Nemo	N	CO ₂ : 0-5000 ppm HCOH : 0-200 ppb COVL : 30 ppb -5 ppm Tair : -55 – 125 °C HR : 0 – 95 % P : 260 - 1260 Pa	HCOH : Lecture optique avec consommable à base de matériau nanoporeux (technologie brevetée) CO ₂ : NDIR COVL : électrochimie HR : capacitif Tair et P : CMOS	1 dans le salon 1 dans la chambre	1 semaine
Class'air	CA	CO ₂ : 0 à 5000 ppm Tair (°C) : -40°C +125 HR (%) : 0 à 100% P (Pa) : 300 à 1100 hPa	NDIR pour le CO ₂	1 dans la chambre	1 semaine

Tableau 2 : Instrumentation – mesures après rénovation.

Matériel	ID mesure	Paramètres mesurés et gammes de mesure	Technologie associée	Où	Durée des mesures
Fidas Frog	FD	Mesures simultanées des PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₄ et PM ₁₀ , TSP, concentrations en nombre et en masse. Tair (°C) HR (%) Pa (Pa)	Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols	1 dans le salon 1 dans la cuisine	2 semaines
GrayWolf	GW	COVT : ppb, ppm, µg/m ³ , mg/m ³ Tair (°C) HR (%)	PID 10,6eV équivalence isobutylène	1 dans le salon	2 semaines
Foobot	FB	PM _{2,5} : µg/m ³ COVT : ppb CO ₂ : ppm Tair (°C) HR (%)	Détecteur MOS, [CO ₂] calculé en fonction de de la [COVT]	1 dans la chambre	2 semaines
Airvisual pro	AVP	PM _{2,5} : 0,3 – 2,5 µm CO ₂ : 400 - 10 000 ppm T : -10 – 40 °C HR : 0 – 95 %	PM - Laser based light scattering (MIE)	1 dans le salon 1 dans la cuisine	2 semaines
Hygrolog	H	HR : 0...100% HR Tair : -10°C 60°C	Loggers de données pour l'humidité et la température avec éléments sensibles intégrés	1 dans le salon	1 semaine
Nemo	N	CO ₂ : 0-5000 ppm HCOH : 0-200 ppb COVL : 30 ppb -5 ppm Tair : -55 – 125 °C HR : 0 – 95 % P : 260 - 1260 Pa	HCOH : Lecture optique avec consommable à base de matériau nanoporeux (technologie brevetée) CO ₂ : NDIR COVL : electrochimie HR : capacitif Tair et P : CMOS	1 dans la chambre	1 semaine
Class'air	CA	CO ₂ : 0 à 5000 ppm Tair (°C) : -40°C +125 HR (%) : 0 à 100% P (Pa) : 300 à 1100 hPa	NDIR pour le CO ₂	1 dans la chambre	1 semaine

1.4 Résultats des mesures

Avant de réaliser une analyse des résultats pour chaque période et dans chacune des pièces, nous avons comparé les mesures des différents capteurs entre elles, afin d'évaluer les écarts d'interprétation.

1.4.1 Mesures de CO₂

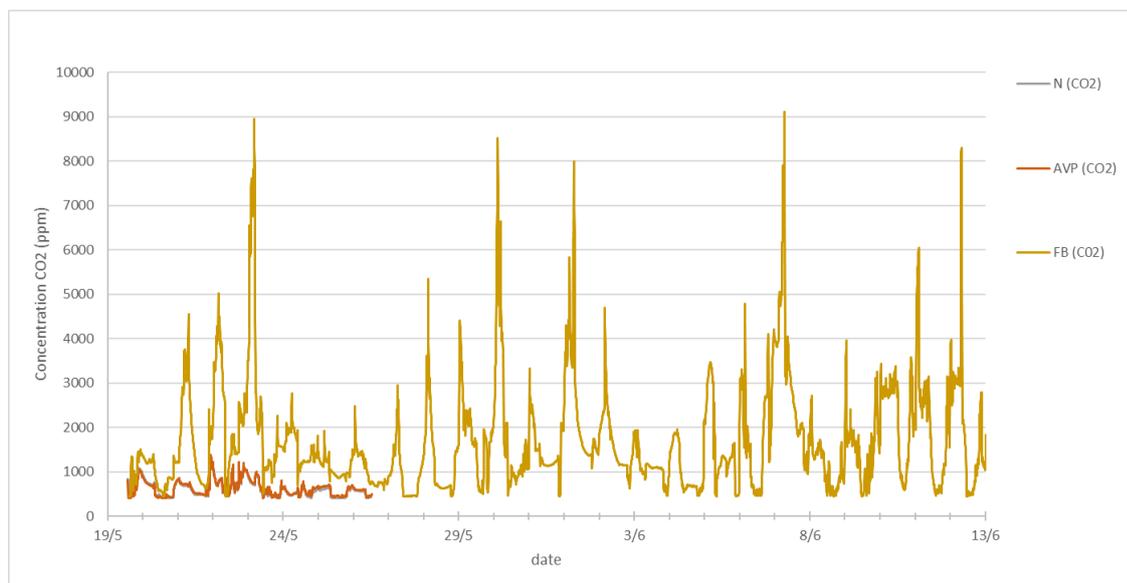


Figure 4 : Mesures de CO₂ (ppm) période avant rénovation dans le séjour.

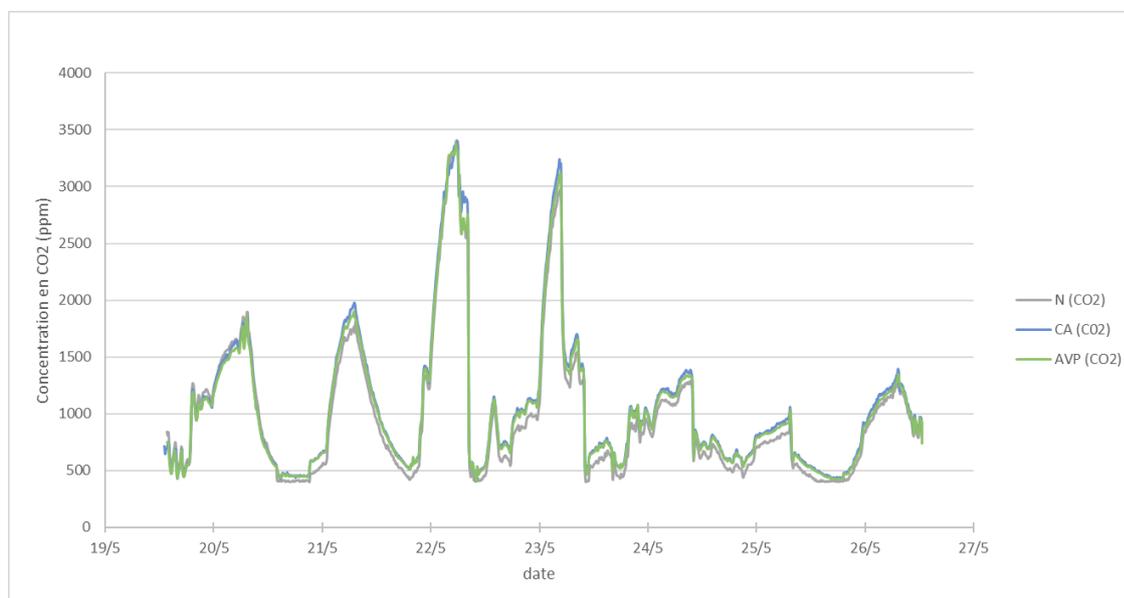


Figure 5 : Mesures de CO₂ (ppm) période avant rénovation dans la chambre.

Les capteurs Nemo, Class'Air et AirvisualPro (NDIR) donnent très sensiblement les mêmes résultats avec la même dynamique et des écarts maximums d'une centaine de ppm, le capteur Nemo ayant tendance à très légèrement minimiser les valeurs par rapport aux deux autres.

Le calculateur CO₂ du Footbot (MOS), s'il donne grossièrement la même dynamique que les trois autres capteurs, maximise très largement les valeurs de concentration en CO₂ (jusqu'à un facteur 10) par rapport à la réalité.

1.4.2 Mesures de COVT

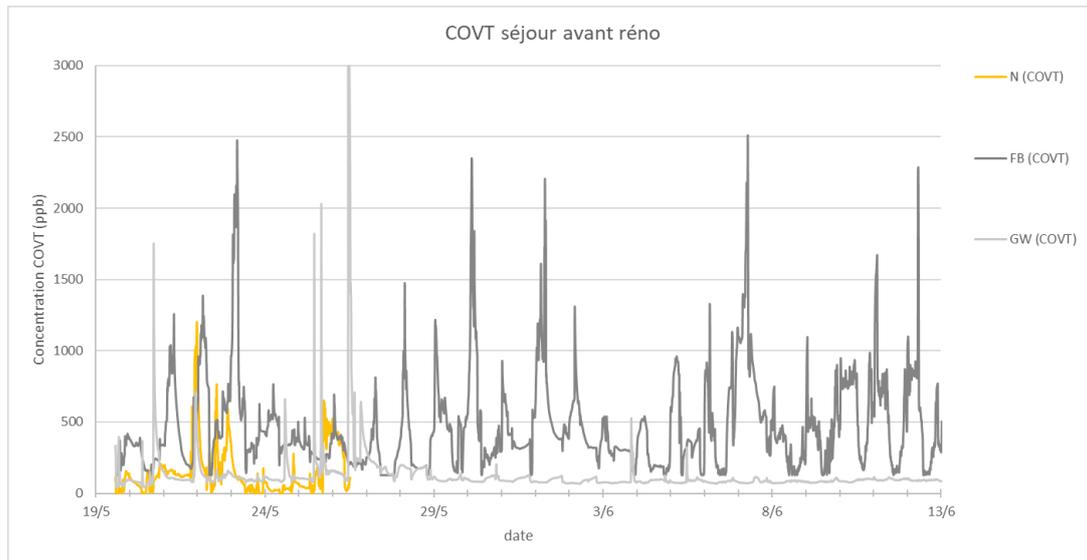


Figure 6 : Mesures de COVT (ppb) période avant rénovation dans le séjour.

Les trois capteurs testés donnent des valeurs et des dynamiques assez différentes du fait de leurs technologies (PID avec équivalences différentes, détecteur MOS). Les résultats des capteurs Nemo et Graywolf sont les plus semblables en valeur et en dynamique. Des écarts d'un facteur supérieur à 5 sont régulièrement observés.

Le capteur Footbot donnent des valeurs très nettement supérieures aux deux autres capteurs.

1.4.3 Mesures de température et humidité relative

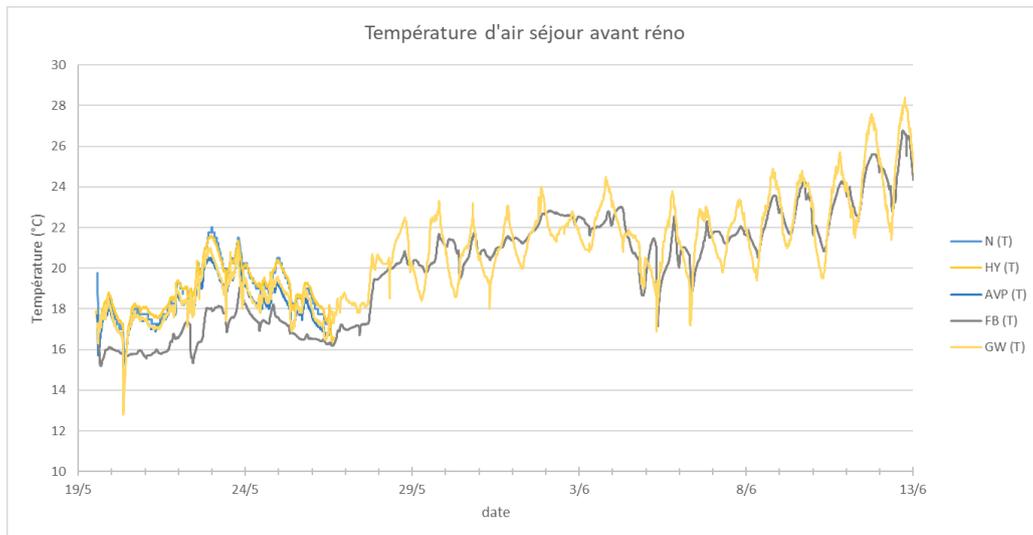


Figure 7 : Mesures de température d'air - période avant rénovation dans le séjour.

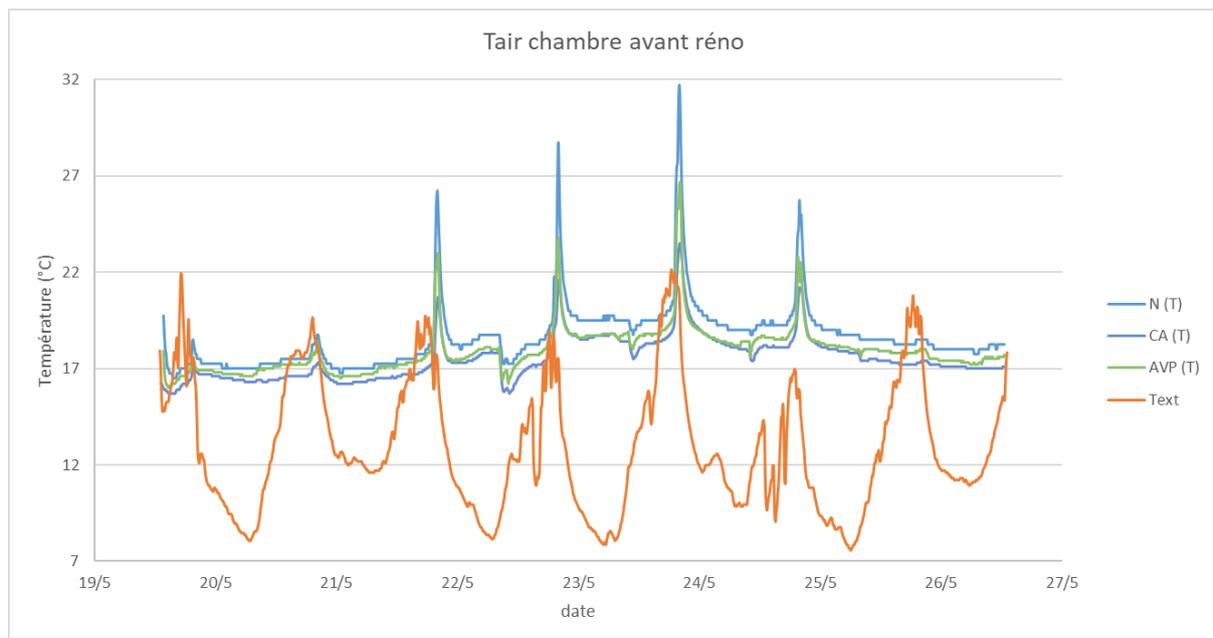


Figure 8 : Mesures de température d'air - période avant rénovation dans la chambre.

Les capteurs **Nemo, Hygrolog, AirvisualPro, Graywolf et Class'air** donnent sensiblement les mêmes résultats avec la même dynamique sur la température d'air. Les écarts maximums observés sont de 1,7 °C, sauf en cas de pics de chaleurs observés dans les chambres où des écarts ponctuels jusqu'à 7°C sont observés entre le Nemo et le Class'air. Ces pics de chaleur s'expliquent par l'orientation de la chambre qui se trouve plein ouest et à l'étage de la maison où la pénétration des rayons du soleil est optimale.

Les capteurs Nemo et Hygrolog présentent de très faibles écarts ainsi que AirvisualPro et Graywolf (de l'ordre de 0,3°C max). Le Class'air donne des valeurs légèrement plus faibles (jusqu'à 0,7°C, hors pics de chaleur dans les chambres).

Le capteur Footbot donne des valeurs assez éloignées des autres capteurs (régulièrement > 2°C), ne représente pas toujours la même dynamique et atténue les effets de pics de températures.

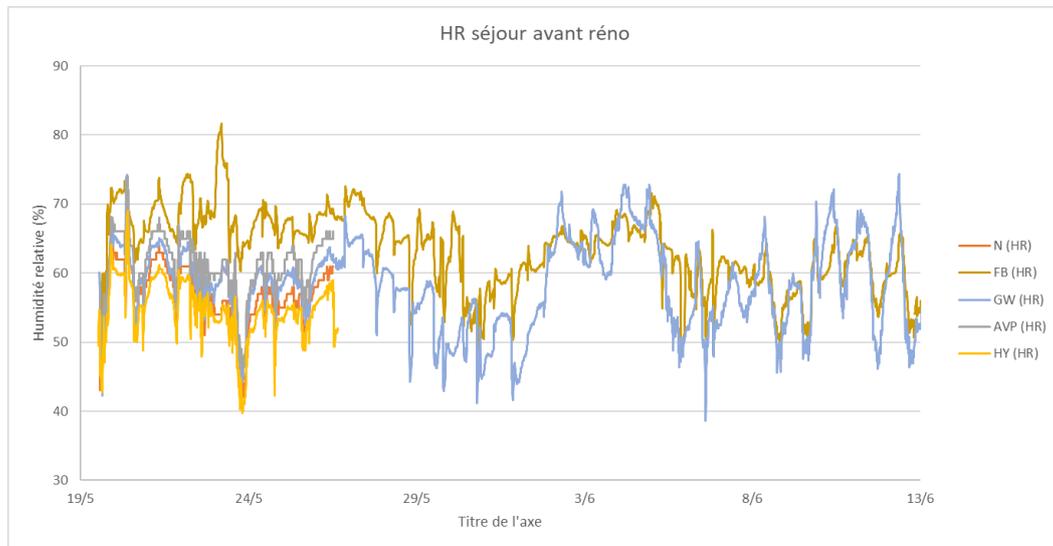


Figure 9 : Mesures d'humidité relative - période avant rénovation dans le séjour.

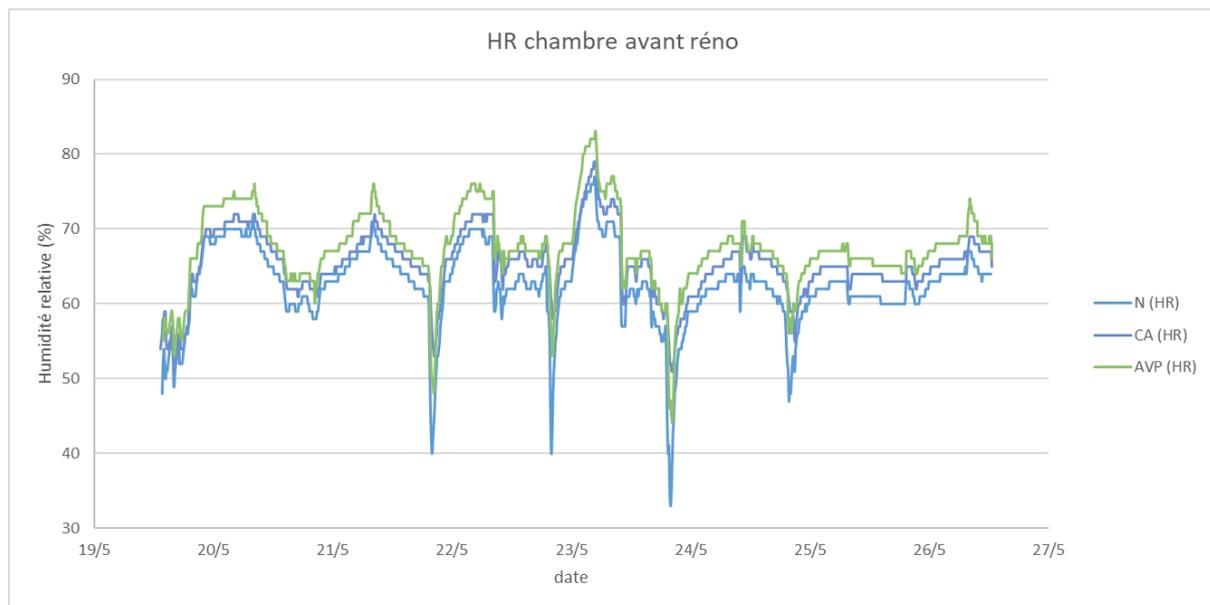


Figure 10 : Mesures d'humidité relative - période avant rénovation dans la chambre.

Comme pour la température d'air, les capteurs **Nemo, Hygrolog, AirvisualPro, Graywolf et Class'air donnent sensiblement les mêmes résultats avec la même dynamique sur l'humidité relative**. Les écarts maximums observés sont de 8%, sauf lors des pics de chaleurs dans les chambres (et donc des chutes brutales d'humidité relative) où des écarts ponctuels jusqu'à 18% sont observés entre le Nemo et le Class'air.

Comme pour la température également, les capteurs Nemo et Hygrolog présentent de très faibles écarts ainsi que AirvisualPro, Graywolf et Class'air (de l'ordre de 3% max).

Le capteur Footbot donne des valeurs assez éloignées des autres capteurs (régulièrement > 10%), ne représente pas toujours la même dynamique et atténue les effets de pics comme pour la température.

1.4.4 Mesures de concentrations en particules fines

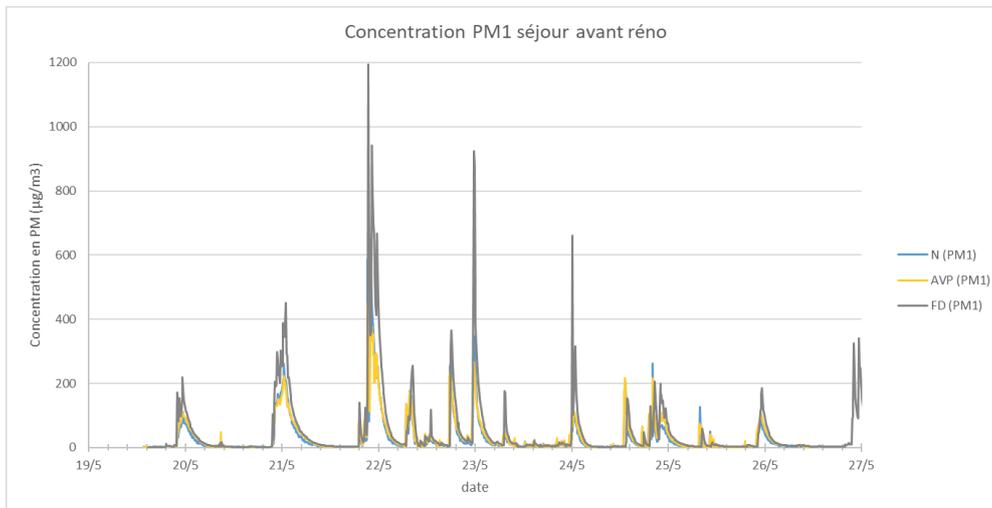


Figure 11 : Concentration en PM1 dans le séjour avant rénovation.

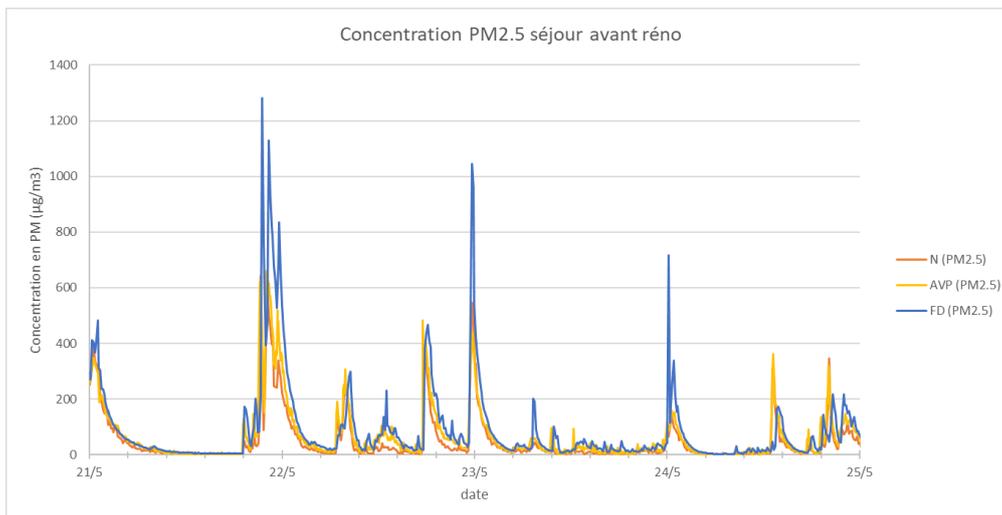


Figure 12 : Concentration en PM2.5 dans le séjour avant rénovation.

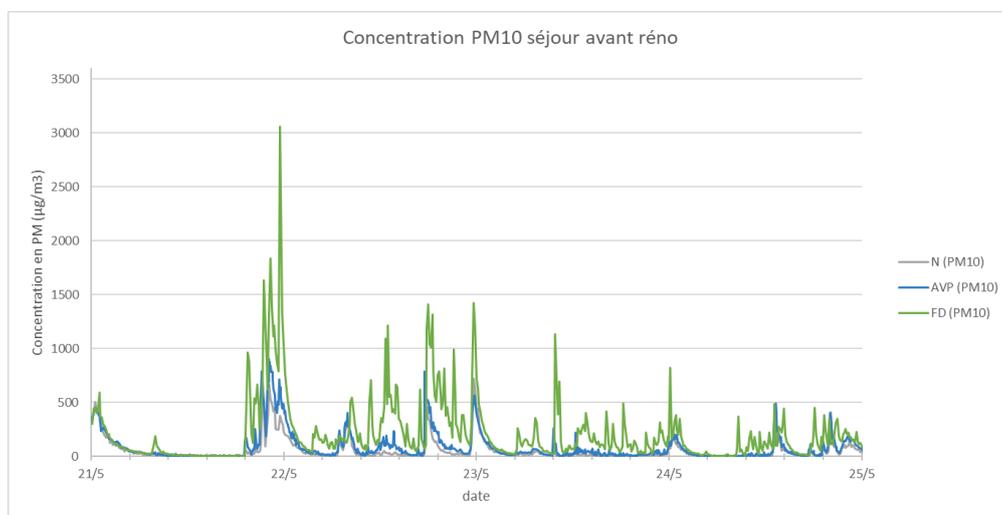


Figure 13 : Concentration en PM10 dans le séjour avant rénovation.

Les capteurs **Nemo, AirvisualPro et FIDAS (capteur de référence)** donnent sensiblement les mêmes résultats sur les concentrations en PM1 et PM2.5, avec la même dynamique, en dehors des pics de concentration particulaire. Les écarts maximums observés sont d'une dizaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM1 et d'une vingtaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2.5, hors pic de concentration.

Concernant les PM10, les capteurs Nem et AirvisualPro donnent des résultats similaires sur les concentrations, hors pic, avec des écarts maximums un peu plus élevés tout de même (régulièrement plus de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Le **FIDAS, considéré comme capteur de référence, représente à peu près la même dynamique, mais donne des valeurs nettement supérieures** par rapport aux deux autres capteurs, avec des écarts de plusieurs centaines, voire milliers de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lors de certains pics.

Lors des pics de concentration, les capteurs Nemo et AirvisualPro présentent des écarts importants, supérieurs à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$; le capteur Nemo présentant les concentrations les plus faibles.

1.4.5 Comparaisons des capteurs

Le tableau ci-dessous synthétise les écarts de mesures observés in situ, entre les différents capteurs utilisés, pour chacun des paramètres mesurés :

- « réf » est le capteur pris pour référence dans nos mesures
- « + » signifie que les valeurs mesurées sont supérieures par rapport à « réf »
- « - » signifie que les valeurs mesurées sont inférieures par rapport à « réf »
- « = » signifie que les valeurs mesurées sont équivalentes par rapport à « réf »

Tableau 3 : Synthèse des résultats.

	CO ₂	COVT	Tint	HR	PM
GW		réf	réf	réf	
N	=	De - à +	=	=	- (hors pic) --- (pic)
AVP	réf		=	=	- (hors pic) -- (pic)
FD					réf
HY			=	=	
CA	=		=	=	
FB	+++	+++	de -- à ++	de -- à ++	

On constate que le capteur Footbot, dit « low » cost est difficilement utilisable pour de l'évaluation précise de qualité des environnements intérieurs, mais peut-être utilisé pour représenter les tendances d'évolution des paramètres mesurés.

1.5 Comparaisons avant/après rénovation

1.5.1 Niveaux de CO₂

Pour ces essais de comparaisons avant/après rénovation, nous avons sélectionné le capteur AirvisualPro (NDIR).

Tableau 4 : Mesures de concentrations en CO₂ (ppm) avant et après rénovation, dans le séjour et la chambre.

Séjour	CO ₂ (ppm)		Chambre	CO ₂ (ppm)	
	Avant (AVP)	Après (AVP)		Avant (AVP)	après (AVP)
Min	399,0	381,0	Min	403,0	373,0
Moy	629,6	601,6	Moy	1038,7	700,7
Max	1376,0	1733,0	Max	3379,0	1744,5
Écart-type	145,9	96,1	Écart-type	458,1	175,3

Les mesures montrent :

- **Des concentrations moyennes en CO₂ inférieures après rénovation** (-28 ppm en moyenne dans le séjour et -338 ppm en moyenne dans la chambre), certainement du fait de la mise en place d'une VMC.
- En considérant que le taux d'occupation moyen du séjour était légèrement supérieur après rénovation et que la chambre avait sensiblement le même taux d'occupation avant et après rénovation, **la teneur en CO₂ plus faible après rénovation montre de manière générale un meilleur renouvellement d'air**. Cette amélioration étant plus perceptible dans la chambre avec un maximum deux fois moins important après rénovation.

1.5.2 Niveaux de COVT

Pour ces essais de comparaisons avant/après rénovation, nous avons sélectionné les capteurs Graywolf (GW) pour le séjour et Nemo (N) pour la chambre, car le même capteur n'a pu être utilisé dans les 4 configurations (séjour et chambre, avant et après rénovation). Ces deux capteurs utilisent un PID différent, dont les mesures sont peu comparables entre elles, bien qu'elles suivent globalement la même dynamique : voir la section précédente et les valeurs de ces deux capteurs avant rénovation dans le séjour (Tableau 5). Les ordres de grandeurs sont toutefois équivalents.

Tableau 5 : Mesures de concentrations en COVT (ppb) avant et après rénovation, dans le séjour et la chambre.

Séjour	COVT (ppb)			Chambre	COVT (ppb)	
	Avant (N)	Avant (GW)	Après (GW)		Avant (N)	Après (N)
Min	0,0	43,0	3780,0	Min	0,1	0,0
Moy	149,8	125,9	4284,6	Moy	0,4	0,1
Max	1195,0	10809,0	14103,0	Max	33,5	13,6
Écart-type	119,2	59,7	221,4	Écart-type	0,3	0,1

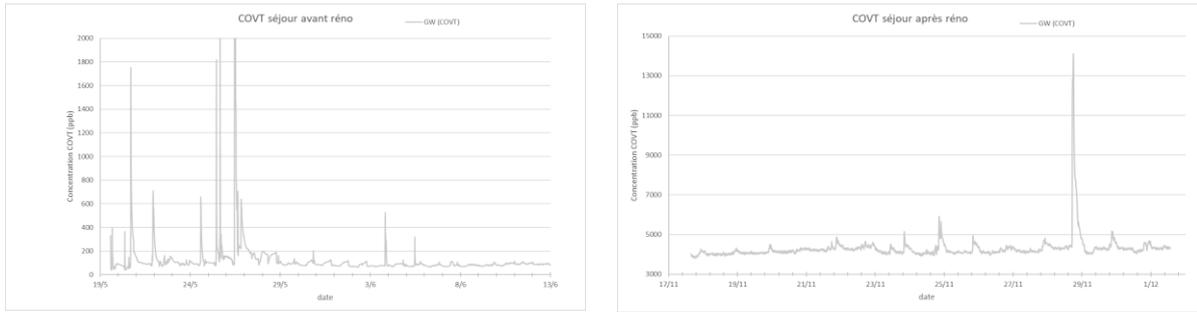


Figure 14 : Evolution des concentrations en COVT (en ppb) dans le séjour, avant (à gauche) et après (à droite) rénovation.

Les mesures montrent :

- **Des concentrations moyennes en COVT très nettement supérieures après rénovation dans le séjour** (34 fois supérieures en moyenne, pic relevé à 14,1 ppm, ne descendant pas en dessous de 3,78 ppm) alors que nettement inférieures après rénovation dans la chambre (passage de 0,4 à 0,1 ppb). Cela reflète des usages dans la partie commune de la maison qui ont été modifiés, principalement avec l'arrivée d'une personne supplémentaire et des pratiques de consommations du tabac plus importantes en intérieur.
- **Les concentrations relevées dans le séjour sont nettement plus élevées que dans la chambre.** La pratique de consommation de tabac est principalement la raison d'une présence de COV issus de la combustion, comme relevé dans les essais dans la maison Eurêka avec la combustion d'encens qui est assimilable à la fumée de cigarette.

1.5.3 Niveaux de température et d'humidité relative

Pour ces essais de comparaisons avant/après rénovation, nous avons sélectionné les capteurs Graywolf et AirvisualPro.

Tableau 6 : Mesures des températures d'air extérieure et intérieure, ainsi que de l'humidité relative, avant et après rénovation, dans le séjour.

Séjour	Text (°C)		Tint (°C)		HR (%)	
	Avant (HOBO)	Après (HOBO)	Avant (GW)	Après (GW)	Avant (GW)	Après (GW)
Min	7,6	0,9	12,8	12,0	42,3	31,6
Moy	13,0	6,8	18,3	19,5	59,1	47,1
Max	22,1	21,1	21,0	22,7	74,2	60,7
Écart-type	2,8	2,1	0,9	0,9	3,2	3,6

Tableau 7 : Mesures des températures d'air et d'humidités relatives, avant et après rénovation, dans la chambre.

Chambre	Tint (°C)		HR (%)	
	Avant (AVP)	Après (AVP)	Avant (AVP)	Après (AVP)
Min	16,0	15,5	44,0	42,0
Moy	18,0	18,0	68,1	55,5
Max	26,7	19,8	83,0	71,0
Écart-type	0,8	0,6	4,1	5,1

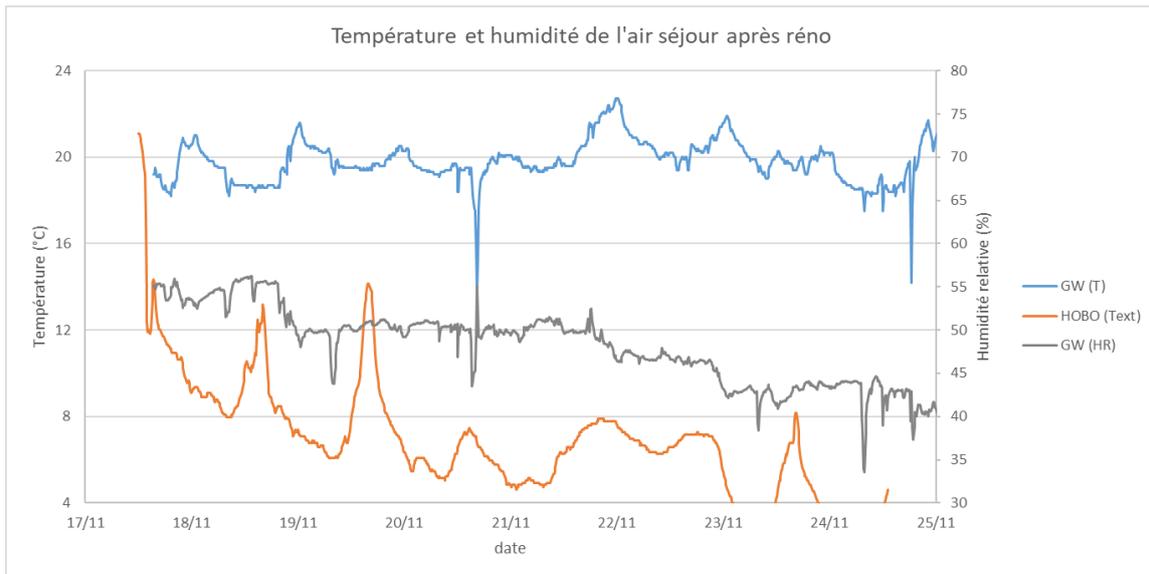


Figure 15 : Evolution des températures d'air intérieures et extérieures et de l'humidité relative dans le séjour, après rénovation.

Les mesures montrent :

- Des conditions climatiques assez différentes sur ces 2 périodes de mesures en mi-saison, avant (13°C en moyenne) et après rénovation (6,8°C en moyenne).
- Des **températures intérieures plus élevées après rénovation dans le séjour** (+1,2°C en moyenne), malgré des températures extérieures plus fraîches de 5,2°C en moyenne. Cela peut s'expliquer par l'amélioration de l'isolation de l'enveloppe et/ou la mise en route de la PAC. Les températures minimales sont faibles (12°C) et liée aux ouvertures de fenêtres matinales.
- **Des températures intérieures équivalentes dans la chambre**, avec une variabilité (écart type) un peu plus faible après rénovation. L'absence d'augmentation de température moyenne peut s'expliquer par un changement d'usage (passage de 2 personnes à 1 personne dans la chambre).

1.5.4 Niveaux de particules fines

Pour ces essais de comparaisons avant/après rénovation, nous avons sélectionné les capteurs FIDAS (capteur de référence) dans le séjour et Némoto dans la chambre.

Tableau 8 : Mesures de concentrations en PM2.5 et PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) avant et après rénovation, dans le séjour et la chambre.

Séjour	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Chambre	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Avant (FD)	Après (FD)		Avant (N)	Après(N)
Min	1,7	0,0	Min	1,0	2,0
Moy	61,6	155,4	Moy	41,1	97,2
Max	1282,0	2357,1	Max	671,0	501,0
Écart-type	19,3	153,4	Écart-type	45,0	77,8

Séjour	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Chambre	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Avant (FD)	Après (FD)		Avant (N)	Après (N)
Min	2,0	0,0	Min	1,0	2,0
Moy	162,1	249,9	Moy	44,1	106,1
Max	3061,9	4723,3	Max	707,0	598,0
Écart-type	41,1	229,7	Écart-type	48,1	85,9

Les mesures montrent :

- Des **concentrations en particules fines (PM2.5 et PM10) très fortes dans le séjour**, du fait de consommation de tabac importante mais également dans la chambre. Les concentrations moyennes sont **nettement supérieures aux valeurs limites long terme** ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2.5 et $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10) **et court terme** ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2.5 et $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10), définies dans l'Annexe 68 (Abadie et al., 2017) et reprises dans le livrable 3.3.
- Les **concentrations moyennes sont nettement plus élevées dans le séjour que dans la chambre** : entre 1,5 fois pour les PM2.5 et 4 fois pour les PM10 avant rénovation. Ces différences séjour/chambre sont en partie liées aux usages : plus de mouvement, mais aussi de consommation de tabac et de génération de particules dans le séjour. Mais ces grosses différences sont à nuancer car la comparaison inter-capteurs a montré que le NEMO (utilisé dans la chambre) a tendance à minimiser les concentrations par rapport au FIDAS (utilisé dans le séjour).
- Les **concentrations moyennes en PM10 et PM2.5 sont plus fortes après rénovation dans le séjour et la chambre** : entre 1,5 fois pour les concentrations en PM10 mesurées dans le séjour et 2,5 fois pour les trois autres cas. Cela peut s'expliquer par les poussières générées par la rénovation et/ou une nouvelle fois par le changement d'usage dans ces pièces : une personne supplémentaire consommateur de tabac dans la maison.

1.5.5 Indicateurs de confort thermique et de QAI

1.5.5.1 Indicateurs de confort thermique

Dans le but de reproduire l'approche décrite au sein du livrable 3.5, les principaux indicateurs de confort thermique définis au livrable 3.3 ont été calculés à partir des données expérimentales avant et après rénovation (Tableau 9).

Tableau 9 : Principaux paramètres thermiques et indices de confort thermique moyens dans le salon et la chambre, avant et après rénovation.

	Avant rénovation (moyenne sur la période)	Après rénovation (moyenne sur la période)
T extérieur	12,9	6,7
T salon	18,9	21,3
HR salon	54,8	40,5
T chambre	18,6	18,6
HR chambre	62,5	55,5
PMV séjour	-2,3	-1,2
PMV chambre	-2,6	-1,7
PPD séjour	87,8	45,5
PPD chambre	91,9	61,0
PMV* séjour	-1,1	-0,2
PMV* chambre	-1,3	-0,6
PPD* séjour	28,8	15,5
PPD* chambre	40,8	23,8
SET séjour	18,4	21,5
SET chambre	17,3	19,8
ET séjour	18,8	19,7
ET chambre	17,7	17,7

PMV : Predicted Mean Vote, PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied, SET : température sèche équivalente, ET : Température Effective. Les indices avec * prennent en compte la thermorégulation telle que décrite par Gagge. Le détail de ces calculs est décrit dans le livrable 3.3. Remarque : les valeurs de PPD assez basses s'expliquent en partie par l'utilisation d'une valeur de Met (représentant la production énergétique due au métabolisme des occupants) basse de 58,2 W/m², correspondant à un adulte au repos.

Les PMV et PPD ont été calculés selon un scénario d'exposition simplifié : présence de 23h à 7h dans la chambre puis dans le salon le reste du temps. Les indicateurs de confort thermique ainsi calculés sont regroupés Tableau 10.

Tableau 10 : PMV (Predicted Mean Vote) et PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied).

	Avant rénovation	Après rénovation
PMV	-2,5	-1,4
PMV*	-1,2	-0,6
PPD	91,7	49,9
PPD*	36,9	14,4

Il est ensuite possible d'en déduire une note de confort thermique pour Smart-Réno (méthode décrite dans livrable 3.5). Pour rappel, l'échelle des indicateurs varie de 0 (mauvais) à 100 (idéal). Il s'agit, dans ce cas précis, simplement du complémentaire par rapport à 100 du PPD (Tableau 11).

Tableau 11 : Note de confort thermique selon l'indicateur Smart-Réno défini dans le livrable 3.5 pour l'étude numérique.

Note Smart-Réno pour le confort thermique	
Avant rénovation	Après rénovation
8,3	50,1

1.5.5.2 Indicateurs de QAI

Le Tableau 12 résume les expositions aux pollutions particulières avant et après rénovation. Pour ce calcul, des sous périodes communes aux deux appareils de mesure, et similaires pour les périodes avant et après rénovation, ont été utilisées, il s'agit respectivement du 19/05/2021 14h30 au 26/05/2021 12h30 et du 17/11/2021 15h00 au 24/11/2021 13h00.

Tableau 12 : Valeurs moyennes des pollutions particulières dans le salon et la chambre, avant et après rénovation.
Exposition moyenne selon le scénario d'occupation simplifié précédemment décrit.

Avant rénovation

PM _{2,5} (µg/m ³) – Fidas Moyenne Salon	PM _{2,5} (µg/m ³) – NEMO Moyenne Chambre	PM _{2,5} (µg/m ³) Exposition moyenne (selon scénario d'occupation)
65,9	41,3	58,0

Après rénovation

PM _{2,5} (µg/m ³) – Fidas Moyenne Salon	PM _{2,5} (µg/m ³) – NEMO Moyenne Chambre	PM _{2,5} (µg/m ³) Exposition moyenne (selon scénario d'occupation)
169,6	98,1	163,9

Pour rappel, deux indicateurs ont été retenus pour l'évaluation de l'exposition aux particules, le DALY et l'ULR-QAI, décrits dans le livrable 3.3. Les polluants de l'air à considérer étaient : PM_{2,5}, NO₂, Benzène, Toluène et Formaldéhyde. Cependant, les capteurs utilisés ici ne mesurent que les PM_{2,5} et les COVT. Or, compte-tenus des niveaux élevés en PM_{2,5} mesurés avant et après rénovation, **les notes QAI avant et après rénovation sont donc de 0 dans ce cas (mauvaise QAI).**

1.5.5.3 Note globale avant et après rénovation

A titre illustratif, la méthodologie décrite dans le livrable 3.5 a été reproduite ici. On rappelle que l'indice global est calculé comme la moyenne des sous-indices de confort thermique et de QAI.

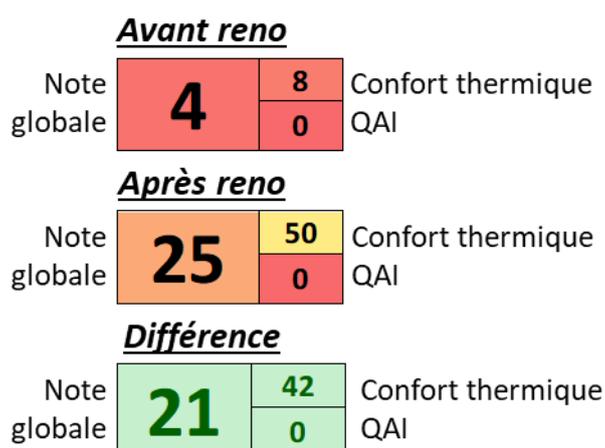


Figure 16 : Exercice de notation selon l'approche numérique décrite au livrable 3.5, avant et après rénovation.

1.6 Conclusion

La méthodologie pour quantifier les effets des actions de rénovation sur le confort thermique et la QAI a été pensée pour une approche numérique où les occupants sont prévisibles et les comportements périodiques. Dans cette approche expérimentale in-situ de nombreux autres paramètres entrent en jeu. Ainsi, la température moyenne extérieure est près de 2 fois inférieure pendant la période après rénovation (novembre) par rapport à la période d'étude avant rénovation (mai). Contrairement à l'approche numérique, les conditions extérieures sont donc très différentes et cela biaise la comparaison. Par ailleurs un changement de comportement des occupants (présence, ventilation naturelle par temps chaud et confinement par temps froid, ...etc.) mais aussi des sources intérieures de pollution est très probable et explique certainement les différences d'expositions aux particules avant et après rénovation. Il est à noter que les deux occupants principaux fument, et que le second habitant était vraisemblablement absent la majorité de la première période (avant rénovation) et beaucoup plus présent lors de la seconde période.

Les résultats présentés ici ne montrent donc pas uniquement l'action des rénovations : il aurait fallu se positionner sur des périodes à la météo équivalente et contrôler l'activité des occupants. Cependant les difficultés à trouver un tel site dans le temps imparti par le projet ne nous ont pas permis d'appliquer un tel protocole.

Une telle analyse expérimentale sur quelques semaines présente donc des inconvénients majeurs. Cette étude montre la nécessité d'instrumentation sur le long terme, ce qui rend l'emploi d'appareils de référence d'autant plus coûteux et contraignant. Envisager l'emploi de capteurs à bas coût, dont l'évaluation de leur utilisation à ces fins est étudiée dans la suite de ce rapport, trouve donc tout son sens dans ce cas. Il s'agira toutefois d'être vigilant à la qualité des mesures. Il semble que dans le cas du capteur « low cost » utilisé (Footbot), celui-ci représente plutôt bien les tendances mais ne permet pas de mesures précises.

2 Campagne de tests des capteurs à bas coût pour l'évaluation de la QAI

2.1 Introduction

L'objectif dans ce travail était d'évaluer l'utilisation de capteurs de QAI dans une configuration proche d'une utilisation par un usager quelconque au sein d'un foyer de type maison résidentiel. Pour cela des essais ont été menés en plaçant de nombreux capteurs dans différentes pièces stratégiques d'une maison de type pavillonnaire comportant un étage, la maison Eurêka.

Le fonctionnement des capteurs à bas ou faible coût a été évalué sans a priori en partant du postulat qu'il s'agit d'outils métrologiques disponibles facilement et rapidement, par correspondance, sur le marché français en 2019-2020. Ces capteurs ont été placés dans l'environnement de test avec des appareils validés et utilisés dans les programmes de recherche de l'Université de La Rochelle et de TIPEE.

L'utilisation de ce type de micro-capteurs dans le projet Smart-Réno doit permettre de définir s'il sera possible ou non de proposer ou de disposer d'un appareil en capacité d'exprimer à moindre coût l'indice Smart-Réno développé dans l'étude.

Une première phase d'essais a été réalisée dans un environnement réaliste dont certains résultats ont posé question. Une seconde phase d'investigation a donc été nécessaire avec la réalisation d'essais plus maîtrisés dans une enceinte régulée d'1 m³ en inox avec une génération spécifique de polluants ciblés.

Les lieux d'essais sont représentés dans les photos suivantes.



Figure 17 : Préparation de la chambre test avec une finition intérieur en plaques de plâtre (à gauche) et peinture blanche de finition (à droite).

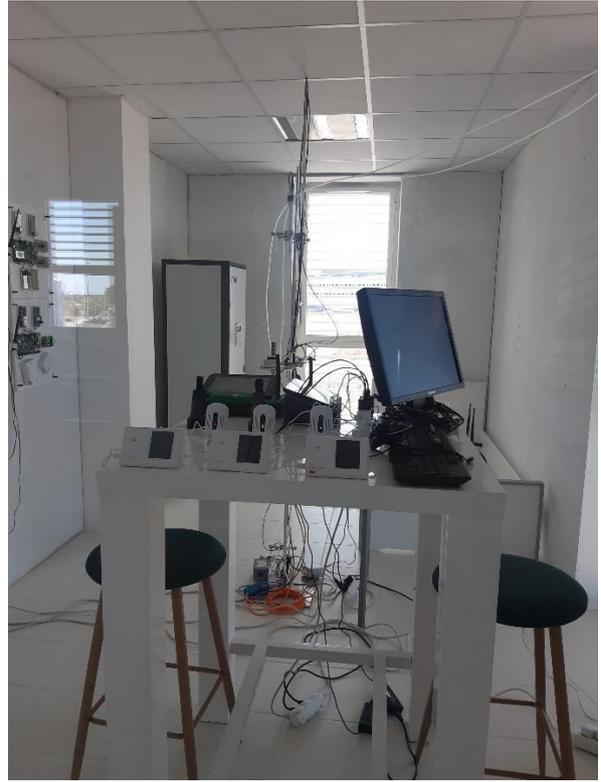


Figure 18 : Agencement de la pièce d'essai : Chambre, avec l'ajout d'un lit 1 place et deux tables avec deux assises (le matériel métrologique de référence et à tester sont placés sur les tables).



Figure 19 : Présentation du dispositif et des appareils métrologiques utilisés lors de l'essai réaliste en condition cuisine.

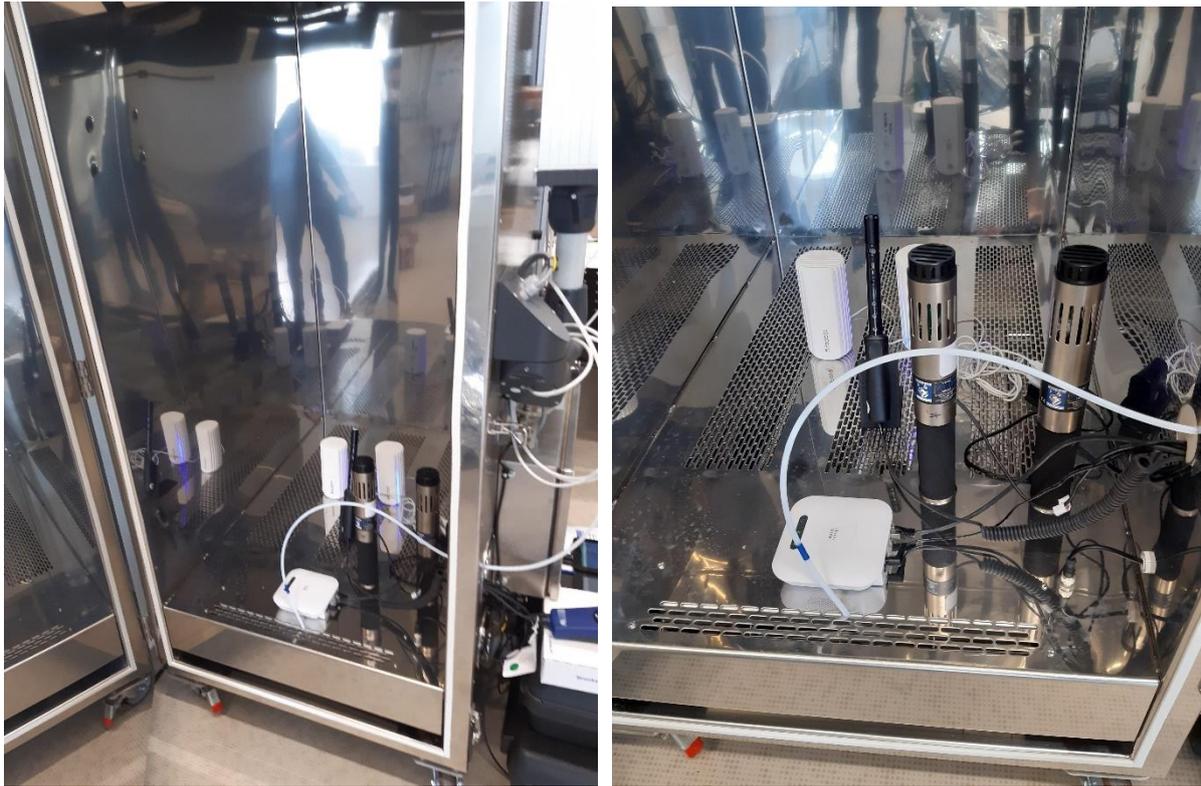


Figure 20 : Evaluation des réponses des capteurs à bas coût en fonction d'atmosphères de polluants spécifiques.



Figure 21 : Chambre d'essai d'1 m³ et système de génération de Composés Organiques Volatils par des fours et des tubes à perméation.

2.2 Méthodologie

L'ensemble des campagnes de mesures et les prélèvements en conditions réalistes se sont déroulés dans Euréka qui est une maison test d'environ 120 m², ceci pour permettre une approche des plus réaliste quant au fonctionnement des capteurs et appareils de mesure. Chaque pièce est équipée d'un mât de confort offrant la possibilité de mesurer la température l'humidité la concentration de CO₂ ainsi que la vitesse d'air et la luminosité. Plusieurs mesures ont été effectuées dans une des chambres d'une surface au sol de 13 m². D'autres essais ont été réalisés dans la partie cuisine ouverte.

Tableau 13 : Liste des capteurs utilisés lors des campagnes de mesures Smart-Réno.

Matériel	Identification lors des mesures	Nb d'appareils utilisés	Paramètres mesurés	Gamme de mesure	Technologie associée	Unité de mesure
Fidas Frog	F	2	PM, T, HR, P	Taille : 0,18 µm – 93 µm Nb particules : 0 - 20 000 particules/m ³ Poids : 0 µg/m ³ - 100 mg/m ³	Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols	Mesures simultanées des PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₄ et PM ₁₀ , TSP, concentrations en nombre et en masse. Température (°C) Hygrométrie (%) Pression (hPa)
Mini-WRAS	MW	1	PM, T, HR	Taille: 10nm - 35µm Nb particules : 0 - 53 millions particules/l Poids : 0 µg/m ³ - 100mg/m ³	- Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols - Détection électrique pour déterminer la fraction ultrafine des particules	Ultrafine, Inhalable ; Thoracique ; Alvéolaire ; PM ₁₀ ; PM _{2,5} et PM ₁ , concentration (µg/m ³) et en nombre et distribution par taille. Température (°C) Hygrométrie (%)
Grimm	G	1	PM, T, HR	Taille : 0,253 µm – 35 µm Nombre de particules : 0 – 53 millions particules/l Poids : 0 µg/m ³ – 100 mg/m ³	Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols	Inhalable ; Thoracique ; Alvéolaire ; PM ₁₀ ; PM _{2,5} et PM ₁ , concentration (µg/m ³) et en nombre et distribution par taille. Température (°C) Hygrométrie (%)
GrayWolf	GW	3	COVT, T, HR	COVT : 5 - 20 000 ppb	PID 10,6eV équivalence isobutylène	COVT : ppb, ppm, µg/m ³ , mg/m ³ Température (°C) Hygrométrie (%)
In'Air µBTEX-1	IA BTEX	1	BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène, m/p/o-Xylène)	Benzène et Toluène : 1 - 1000 ppb Ethylbenzène m/p-xylènes: 2 - 1000 ppb o-xylène : 4 - 1000 ppb	PID avec une colonne chromatographique	ppb
In'Air µF-1	IA ALD	1	Formaldéhyde	0 – 500 µg/m ³	Réaction à l'aide d'un réactif puis détection via spectroscopie de fluorescence	ppb
Sensirion SFA30	-	1	Formaldéhyde, T, HR,	0 - 1000 ppb	Détecteur électrochimique	HCOH : ppb Température (°C) Hygrométrie (%)
IQAIR - AIRVISUAL PRO		2	PM _{2,5} , CO ₂ , THR	PM _{2,5} : 0,3 – 2,5 µm CO ₂ : 400 - 10 000 ppm T : -10 - 40°C HR : 0 - 95%	PM - Laser based light scattering (MIE)	

KAITERRA - LaserEGG+ Chemical		2	PM _{2,5} , THR, COVT	PM _{2,5} : 0,3 – 2,5 µm COVT : 0 - 9999 ppb T : -20 - 100°C HR : 0 - 99%	PM - Laser based light scattering (MIE) COVT - Détecteur MOS	
ETHERA - NEMO		1	HCOH (Formaldéhyde) CO ₂ , COVL, T, HR, Pression, PM ₁₀ /PM _{2,5} , NO ₂	CO ₂ : 0-5000 ppm HCOH : 0-200 ppb COVL : 30 ppb -5 ppm T : -55 - 125°C HR : 0 -95% P : 260 - 1260 Pa		
BlueAir	BA	1	PM _{2,5} , COVT, CO ₂ , T, HR	PM _{2,5} : 1 - 500 µg/m ³ COVT : 125 - 1000 ppb CO ₂ : 450 - 5000 ppm	Détecteur MOS, [CO ₂] calculé en fonction de de la [COVT]	PM _{2,5} : µg/m ³ COVT: ppb CO ₂ : ppm Température (°C) Hygrométrie (%)
Foobot	FO	3	PM _{2,5} , COVT, CO ₂ , T, HR	PM _{2,5} : 1 - 500 µg/m ³ COVT : 125 - 1000 ppb CO ₂ : 450 - 5000 ppm	Détecteur MOS, [CO ₂] calculé en fonction de de la [COVT]	PM _{2,5} : µg/m ³ COVT : ppb CO ₂ : ppm Température (°C) Hygrométrie (%)
Plume Flow 2	PLUME	2	PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀ , NO ₂ , COVT	NR	Détecteur MOS	PM : µg/m ³ COVT : ppb NO ₂ : ppb
PMS5003	Plantower	1	PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀	PM _{2,5} : 1-1000 µg/m ³	Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols	PM : µg/m ³
PMS7003	Plantower	1	PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀	PM _{2,5} : 1-1000 µg/m ³	Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols	PM : µg/m ³
PMSA003	Plantower	1	PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀	PM _{2,5} : 1-1000 µg/m ³	Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols	PM : µg/m ³
SDS011	NovaFitness	1	PM _{2,5} , PM ₁₀	PM _{2,5} : 1-1000 µg/m ³	Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols	PM : µg/m ³
SDS018	NovaFitness	1	PM _{2,5} , PM ₁₀	PM _{2,5} : 1-1000 µg/m ³	Détection optique de la lumière diffusée par les aérosols	PM : µg/m ³
JSM-136ST	-	3	PM ₁₀ , PM _{2,5} , COVT, HCOH, CO ₂ , T, HR	PM _{2,5} : 0-500ug/m ³ PM ₁₀ : 0-999 ug/m ³ Formaldehyde (HCHO) : 0-9.999 mg/m ³ TVOC : 0-99.99 mg/m ³	" technologie de détection de débit de gaz naturel" - pas plus d'information. Il s'agit probablement d'un MOS	PM : µg/m ³ COVT : µg/m ³ HCOH : µg/m ³ Température (°C) Hygrométrie (%)

JQ-300	-	3	PM _{2,5} , COVT, HCOH, CO ₂ , T, HR	NR	NR. Il s'agit probablement d'un MOS visible sur la photo	PM : µg/m ³ COVT : µg/m ³ HCOH : µg/m ³ Température (°C) Hygrométrie (%)
--------	---	---	---	----	--	---

Pour l'ensemble des essais, nous avons été dans l'incapacité de collecter les données des capteurs JSM-136ST et JQ-300. Ceux-ci proposent seulement une lecture directe sur leur écran ou via une application. De plus les données relevées étaient erronées voir aberrantes ne serait-ce que sur la température et l'humidité. Il a été décidé de ne pas les exploiter pour le reste des campagnes de mesures.

Le BlueAir, le FooBot et le Plume Flow 2 sont des capteurs connectés. Ils requièrent une connexion Wifi et Wifi/Bluetooth avec un smartphone ou une tablette dans le cas du Plume Flow 2. Les données sont renvoyées via leur application respective. Il est cependant possible de récupérer l'historique des valeurs enregistrées ce qui permet de comparer leurs données aux données des analyseurs scientifiques. Une question se pose, est-ce que les données récupérées sont des valeurs mesurées ou prétraitées par les fabricants des différents appareils. De plus la plateforme nous permettant de récupérer les données a cessé de collaborer avec le BlueAir. Nous avons donc pu récupérer les mesures du BlueAir que sur les premiers essais de l'été 2020.

Comme indiqué dans le Tableau 13, les capteurs mesurant les COVT expriment leurs données en ppb. Il était envisagé d'exprimer ces valeurs en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seulement la différence des technologies associées ainsi que la réponse différente d'un capteur à un autre ne permettent pas de transposer les ppb en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les technologies de capteurs de gaz « miniaturisés » sont nombreuses, seules quelques-unes d'entre elles sont aujourd'hui commercialisées. Dans le cadre de l'ensemble des essais, deux technologies de micro-capteurs adaptées à la mesure des COV ont été utilisées : PID (Photo Ionisation Detector) et MOS (Metal Oxyde Sensor). Chacune présente ses avantages et défauts résumés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Récapitulatif des technologies de mesure de COVT utilisées par les capteurs utilisés dans Smart-Réno.

Technologie	Avantages	Inconvénients
Détecteur à Photo Ionisation (PID)	Sensible, précis, robuste, intégrable dans les systèmes portables	Non sélectif, Onéreux, besoin d'étalonnage, nécessite un nettoyage régulier de la cellule
Capteurs à Oxydes métalliques (MOS)	Prix faible, Robuste, Miniaturisé, Intégrable dans les systèmes portables	Faible sélectivité, Sensible à l'humidité, vieillissement

Les PID sont basés sur le principe d'ionisation du gaz à mesurer par un rayonnement ultraviolet avec des photons d'énergie voisine de 10,6 eV. La détection se fait lorsque la lampe UV du détecteur génère des photons qui ionisent les molécules de gaz dans la chambre de mesure dont le potentiel d'ionisation est inférieur à l'énergie de la lampe. La limite principale de cette technique est qu'elle ne permet pas de détecter les molécules dont le potentiel d'ionisation est supérieur à 11 eV. Il existe cependant sur le marché des lampes de 11,7eV qui permettent de détecter plus de composés. Seulement elles s'accompagnent de nombreux défauts : la durée de vie (jusqu'à 10 fois moins que les lampes 10,6eV), une moins bonne résolution et plus sensible à la dérive.

Pour la mesure des COV, les PID donnent une concentration en équivalence avec le gaz avec lequel ils ont été étalonné. De plus chaque PID possède un facteur de réponse qui lui est associé différent pour un même composé ce qui rend compliqué la lecture d'un composé que l'on souhaite quantifier en particulier dans un mélange de gaz.

Le principe de la détection de gaz avec des capteurs MOS, repose sur la variation de la conductivité électrique de l'oxyde métallique, sa température de fonctionnement, lors d'un changement de

l'environnement gazeux. Cette variation est liée essentiellement aux propriétés physico-chimiques de la couche sensible et aux propriétés d'oxydo-réduction du gaz.

L'oxyde métallique est l'élément essentiel dans la conception des capteurs de gaz MOS. Il est responsable de la détection des polluants suite à un changement d'environnement gazeux du capteur. Il existe une multitude d'oxyde métallique semi-conducteur qui possède une température de fonctionnement variant de 200°C à 500°C selon la nature de l'oxyde et selon le gaz cible.

Un des inconvénients pour la mesure avec ce type de capteurs est qu'une forte humidité relative peut interférer avec le signal et doit être contrôlée ou mesurée avec précision afin de pouvoir corriger le signal de mesure. Un autre obstacle à l'utilisation des MOS est leur stabilité dans le temps. En effet, ces capteurs présentent des dérives à court et à long termes.

Par ailleurs, l'ensemble des capteurs de particules utilisés sont des compteurs optiques de particules se basant sur certains principes de la théorie de Mie. Un rayonnement, généralement monochromatique, éclaire un flux d'air. Un photorécepteur mesure la lumière diffusée à un angle donné par rapport au rayon incident. Ainsi, seul le diamètre de la particule demeure une inconnue et il devient possible de trouver une loi entre l'intensité du rayonnement mesurée à un certain angle et le diamètre de la particule.

Les capteurs se distinguent par la source lumineuse utilisée (LED ou LASER), la longueur d'onde et l'angle entre rayonnement incident et photorécepteur. De plus, plusieurs stratégies existent pour exploiter le phénomène de diffusion :

- Corréler une intensité lumineuse intégrée sur un intervalle court avec une pollution ambiante. Cette approche ne permet cependant pas de distinguer les tailles de particules et est très dépendante de sa calibration.
- Identifier les pics d'intensité et la contribution de chaque particule. Ceci permet un comptage des particules dont la taille peut être évaluée par l'intensité perçue. Cette stratégie est plus facilement sujette à saturation (car nécessite la distinction entre les pics de chaque particule) et le flux d'air doit être adapté au temps de réponse du photorécepteur et à la concentration recherchée.

Cette dernière approche est la plus commune parmi les capteurs utilisés et consiste à mesurer en continu le signal d'un photorécepteur (Figure 22). Un miroir peut être utilisé afin d'améliorer la sensibilité de l'appareil, notamment pour les petites particules dont les diamètres sont proches de sa limite de détection (environ 0,3 μm).

Chaque pic d'intensité relevé par le photorécepteur correspond au passage d'une particule. Après traitement du signal, un analyseur d'impulsion (« pulse height analyser ») permet le comptage et la mesure de la hauteur des pics et donc de la taille des particules.

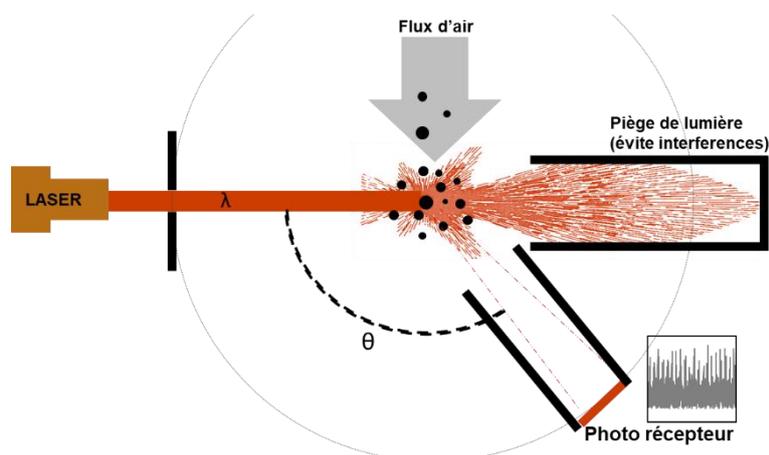


Figure 22 : exemple d'un système de mesure à environ 120°.

Seul le Mini-WRAS de la gamme GRIMM utilise une technologie très différente pour une partie de ses mesures (diamètre particulaire <200nm). Il s'agit en effet de la combinaison de deux appareils de mesure :

- Une cellule optique de mesure par détection de la lumière diffusée à 90°, avec miroir, d'une diode LASER 660 nm multiplex. Cet appareil permet le comptage des particules entre 253 nm et 35 µm (31 canaux).
- Un spectromètre à mobilité électrique avec détection par électromètre à coupelle de Faraday. Cet appareil est utilisé pour le comptage de particules entre 10 nm et 193 nm (10 canaux).

Les essais réalisés dans la maison Eurêka ont été effectués sous la forme d'usages représentatifs permettant d'obtenir des données définissant des scénarios d'émission spécifiques qui peuvent ensuite être incorporés dans les outils de simulation. Ces essais sont compilés dans les tableaux suivants.

Suite aux essais réalisés dans Eurêka, les premières analyses de données ont fait apparaître des questionnements quant aux résultats obtenus. Des essais en enceinte contrôlés (Tableau 17) ont alors été menés pour déterminer la pertinence des premiers résultats issus des micro-capteurs, aussi bien ceux de référence dans Smart-Réno que ceux utilisés comme capteurs bas coûts du marché. Des atmosphères de polluants connus ont été générées afin de pouvoir étudier plus précisément la capacité de réponse des capteurs et leurs précisions par rapport à des composés gazeux.

Tableau 15 : Différents essais réalisés durant l'été 2020 dans la maison Eurêka.

Essais	Intitulé de l'essai	Date/heure de début	Date/heure de fin	Description	Détails	Essais sur tubes	COV	PM	Liste de matériel utilisé
ESSAIS ÉTÉ 2020	BLANC	06/08/2020 10:20	06/08/2020 11:40	Blanc avant les essais	-	OUI	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA + Mesures sur Tube
	DIF1	06/08/2020 11:50	07/08/2020 08:55	1 ^{er} Essai avec un parfum d'ambiance, type diffuseur à brancher sur une prise électrique	06/08/20 11:50 Début diffuseur 06/08/20 17:30 Arrêt diffuseur	OUI	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA + Mesures sur Tube
	DIF2	07/08/2020 08:55	10/08/2020 09:20	2 ^{ème} Essai avec un parfum d'ambiance, type diffuseur à brancher sur une prise électrique pendant un WE en continu	07/08/20 08:55 Début diffuseur 10/08/20 14:30 Arrêt diffuseur	OUI	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA + Mesures sur Tube
	DIF3	10/08/2020 10:30	10/08/2020 14:00	3 ^{ème} Essai avec un parfum d'ambiance, type diffuseur à brancher sur une prise électrique pendant un WE en continu	07/08/20 08:55 Début diffuseur 10/08/20 14:30 Arrêt diffuseur	OUI	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA + Mesures sur Tube
	ENC1	12/08/2020 10:05	13/08/2020 10:40	1 ^{er} Essai avec la combustion d'un bâton d'encens.	12/08/20 10:55 Début combustion encens 12/08/20 12:00 Arrêt combustion encens	OUI	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA + Mesures sur Tube
	ENC2	13/08/2020 12:20	14/08/2020 10:00	2 ^{ème} Essai avec la combustion d'un bâton d'encens.	13/08/20 12:20 Début combustion encens 13/08/20 13:20 Arrêt combustion encens	OUI	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA + Mesures sur Tube
	ENC3	14/08/2020 10:00	17/08/2020 15:30	3 ^{ème} Essai avec la combustion d'un bâton d'encens.	14/08/20 11:20 Début combustion encens 14/08/20 12:20 Arrêt combustion encens	OUI	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA + Mesures sur Tube
	BLANC2	17/08/2020 15:35	27/08/2020 15:00	Blanc après les essais	Quelques entrées et sorties dans la chambre, augmentation de CO ₂ ?	OUI	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA, MW
	BOUGIE	02/09/2020 10:10	02/09/2020 14:50	Essai avec la combustion d'une bougie parfumée	02/09/20 11:30 Début combustion bougie 02/09/20 11:30 Arrêt combustion bougie	NON	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA + Mesures sur Tube
	ENC4	02/09/2020 14:50	03/09/2020 10:00	Essai avec la combustion d'un bâton d'encens.	02/09/20 15:00 Début combustion encens 02/09/20 16:00 Arrêt combustion encens	NON	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA, MW
	ASPI	03/09/2020 10:00	04/09/2020 10:45	Essai de remises en suspension particulaire + projection de Febrez et déodorant	03/09/20 10:05 -> 10:30 Aspirateur, balai, draps 03/09/20 11:00 Gel Hydroalcoolique 03/09/20 12:00 -> 12:35 Aspi + draps 03/09/20 15:00 Febrez 03/09/20 16:30 Déodorant	NON	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA, MW

ASPI2	04/09/2020 10:50	07/09/2020 13:50	Essai de remises en suspension particulaire + combustion de 2 allumettes + projection de Febrez et déodorant	04/09/2020 11:00 Balai 04/09/2020 12:00 Aspirateur 04/09/2020 13:15 Combustion de 2 allumettes 04/09/2020 15:15 Febrez 04/09/2020 17:00 Déodorant	NON	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA, MW
MELANGE	07/09/2020 13:50	08/09/2020 09:55	Essai de remises en suspension particulaire + projection de Febrez au même moment puis combustion d'allumette avec projection de Febrez au même moment	07/09/20 13:55 Balai 07/09/20 14:00 Febrez 07/09/20 16:00 Combustion allumette + Febrez	NON	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA, MW
FUMEE	08/09/2020 10:00	09/09/2020 11:00	Essai de vapotage	08/09/20 10:00 -> 10:05 1er essai, Vapotage fenêtre fermée, 17 bouffées 09/09/20 09:45 -> 09:50 2ème essai, vapotage fenêtre ouverte, 15 bouffées	NON	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA, MW
CUISINE	09/09/2020 17:15	11/09/2020 09:45	Essai de cuisson d'aliments à la poêle avec différentes matières grasses	10/09/20 11:30 -> 11:40 Cuisson légumes dans de l'huile 10/09/20 11:40 -> 11:50 Cuisson beignets de calamars dans de l'huile 10/09/20 14:50 -> 15:10 Cuisson gnocchis dans du beurre	NON	X	X	GW1-2, F1-2, FO, BA, MW

Tableau 16 : Essais complémentaires dans Euréka réalisés en décembre 2020 axés sur la remise en suspension des particules.

ESSAIS DECEMBRE 2020	CHAUFF_RM1	10/12/2020 10:00	11/12/2020 10:45	Essai de remises en suspension des poussières via différentes actions de découpe et ponçage de plusieurs types de matériaux	10/12/20 10:00 -> 12:00 Remise en suspension en marchant autour des appareils 10/12/20 14:25 -> 15:00 Ponçage de parquet et de bois tendre avec du papier abrasif de différentes granulométries 10/12/20 15:00 -> 15:45 Découpe de planche en bois, tubes PVC, tube aluminium, tube de cuivre. Ponçage avec un lapidaire. Découpe d'un tube PVC au lapidaire. 10/12/20 15:50 -> 15:55 Balai 11/12/20 9:15 -> 9:20 Aspirateur 11/12/20 9:40 -> 10:30 Découpe de plâtre au lapidaire 11/12/20 10:39 -> 10:45 Aspirateur	NON		X	F1-2, FO1-2, MW
	CHAUFF_RM2	11/12/2020 13:40	12/12/2020 14:40	Essai de remise en suspension des poussières via la mise en marche de différentes sources de chaleurs (radiateur, chauffage d'appoint...)	11/12/20 13:40 -> 14:00 Chauffage d'appoint au gaz 11/12/20 14:00 -> 14:15 Ouverture/Fermeture des fenêtres 11/12/20 14:30 -> 15:30 Chauffage par radiateur électrique puis arrêt	NON		X	F1-2, FO1-2, MW
	CHAUFF_RM3	14/12/2020 15:00	17/12/2020 14:15	Essais complémentaires sur systèmes de chauffages et méthodes de cuisson	14/12/20 15h18 -> 16h18 Chauffage d'appoint au gaz 15/12/20 9h50 -> 10h00 Cuisson - four grill 15/12/20 10h50 -> 11h00 Cuisson - plaque 15/12/20 13h21 -> 13h36 Cuisson - chaleur tournante	NON		X	F1-2, FO1-2, MW

Tableau 17 : Essais réalisés en chambre environnementale avec génération d'atmosphères de COV.

Essais	Intitulé de l'essai	Date/heure de début	Date/heure de fin	Description	Détails	Liste de matériel utilisé
ESSAIS AVRIL 2021	ALD	14/04/2021 08:30	14/04/2021 16:25	Génération de formaldéhyde dans une enceinte d'1m ³ à l'aide de tubes à perméation	9h40 Début de génération ALD, 2 tubes dans le four, Débit génération 190ml/min, Renouvellement 0,5 v/h 13h50 Débit génération 95ml/min, renouvellement 0,1 v/h	GW1-2, FO, IA ALD
	ENCENS	15/04/2021 08:00	16/04/2021 13:50	Génération de polluant via combustion d'un bâtonnet d'encens	8h00 -> 13h30 Divers manipulation sur les appareils de mesure, pas de génération. 14h20->14h45 Combustion d'un bâtonnet d'encens. Durant la combustion renouvellement à 0,5 v/h. Après extinction et retrait, renouvellement passé à 0,1 v/h 15h40 Arrêt des mesures 16/04/21 13:50 Ouverture de la chambre et nettoyage	GW1-2, FO, IA ALD
	BENZENE	19/04/2021 09:15	19/04/2021 16:00	Génération de benzène dans une enceinte d'1m ³ à l'aide de tubes à perméation	12h00 Début de génération Benzène, 2 tubes dans le four, débit génération 190ml/min, Renouvellement 0,1 v/h	IA BTEX
	TOLUENE	22/04/2021 11:15	22/04/2021 15:50	Génération de toluène dans une enceinte d'1m ³ à l'aide de tubes à perméation	11h15 Début de génération Toluène, 2 tubes dans le four, débit génération 190ml/min, Renouvellement 0,1 v/h	IA BTEX
ESSAIS JUILLET 2021	TOLUENE	07/07/2021 09:30	09/07/2021 09:20	Génération de toluène dans une enceinte d'1m ³ à l'aide de tubes à perméation	07/07/21 9h30 Début de génération Toluène, 2 tubes dans le four, débit génération 100ml/min, Renouvellement 0 v/h 09/07/21 9h20 Arrêt de génération	GW1-2, FO1-3, IA BTEX
	MELANGE	09/07/21 14h30	15/07/21 8h45	Génération d'un mélange de polluant dans une enceinte d'1m ³ à l'aide de tubes à perméation	09/07/21 14h30 Début de génération Toluène, Acétaldéhyde, Acétone et n-Heptane, débit génération 100ml/min, Renouvellement 0 v/h. 12/07/21 10h00 Mesure IA BTEX, 10 mesures toutes les 20 min. 15/07/21 8h45 Arrêt de génération	GW1-2, FO1-3, IA BTEX

2.3 Résultats des mesures

2.3.1 Mesures portant sur les COV par des essais en conditions réalistes d'usage

2.3.1.1 Réalisation de scénarios polluants dans une pièce de type chambre

Les mesures réalisées en début de campagne Smart-Réno ont consisté en l'évaluation d'un niveau de fond en COV suite à la mise en place d'une finition plâtre peint avec une couche de peinture blanche dotée d'un étiquetage de catégorie C. En complément, la pièce « Chambre 1 » a été préparée en ajoutant du mobilier représentatif de ce qui peut être retrouvé dans une chambre à coucher (cadre de lit, tables et assises).

Les mesures ont montré la présence de polluants avec des niveaux faibles mais non nulles comme le montrent les résultats des mesures de blanc dans le tableau ci-après.

Dans un second temps deux activités différentes ont été réalisées pour apporter une source de pollution de type COV avec la mise en place d'un diffuseur de parfum doté d'une résistance chauffante. Le second essai consistait en l'allumage d'un bâtonnet d'encens.

Les mesures présentées dans le tableau et les figures ci-après ont été réalisées par prélèvement en mode actif sur tubes adsorbants selon les normes d'échantillonnage NF EN ISO 16 000-11 et NF EN ISO 16 000-3. L'objectif de ces mesures était de suivre des composés cibles d'intérêt (BTEX¹ et formaldéhyde principalement) et de mesurer également des composés principalement présents suite aux prélèvements actifs pour évaluer la pertinence des résultats obtenus par une mesure de COVT par les micro-capteurs testés. Les prélèvements ont été réalisés sur une période de 60 min pour les blancs et de 3h à 3h30 pour les essais diffuseur et Encens.

En effet, la problématique principale d'une mesure de COVT est de ne pas permettre une représentativité d'un risque toxicologique. Il s'agit généralement d'une mesure indicative pour laquelle il serait intéressant de voir l'impact.

Tableau 18 : Concentrations mesurées sur tube Tenax par prélèvement actif.

Concentration ² COV µg/m ³	Blanc	DIF1	DIF 2	DIF 3	ENC 1	ENC 2	ENC 3
m-, p-, o- Xylène	9,6	0,0	5,9	1,4	6,2	5,0	4,2
1,2,4-Triméthylbenzène	0,2	/	0,8	/	1,0	0,8	0,8
Benzène	0,6	/	0,0	0,0	23,5	15,2	22,1
Ethylbenzène	2,1	0,0	1,3	0,8	2,0	1,4	1,5
Styrène	/	0,7	0,9	0,8	3,3	1,9	2,8
Toluène	/	1,0	1,1	1,1	11,0	9,0	11,1
Trichloroéthylène	0,2	/	/	/	/	/	/
Concentration ALD µg/m ³	Blanc	DIF1	DIF 2	DIF 3	ENC 1	ENC 2	ENC 3
Acétaldéhyde	16,0	6,6	7,5	0,0	5,2	9,0	13,0
Formaldéhyde	13,5	2,0	3,6	8,1	41,0	22,0	25,4
Hexanal	/	4,9	8,5	3,9	3,0	6,4	3,5
Benzaldéhyde	/	/	/	6,0	/	/	/

¹ Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes.

² Les concentrations DIF et ENC sont égales aux valeurs mesurées dans la pièce retranchées des valeurs des blancs.

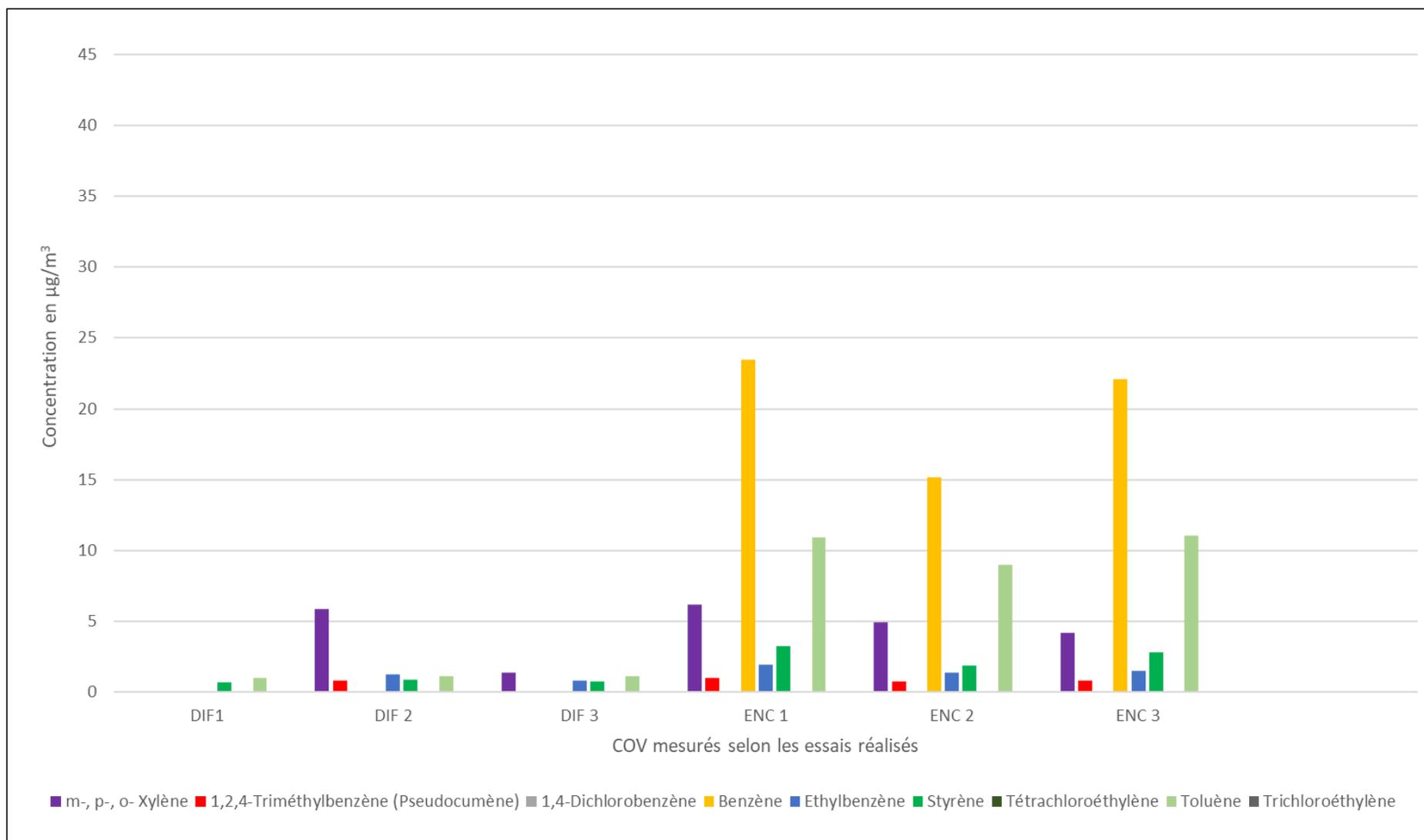


Figure 23 : Concentrations en COV issues de l'utilisation d'un diffuseur de parfum d'ambiance et de bâtonnets d'encens.

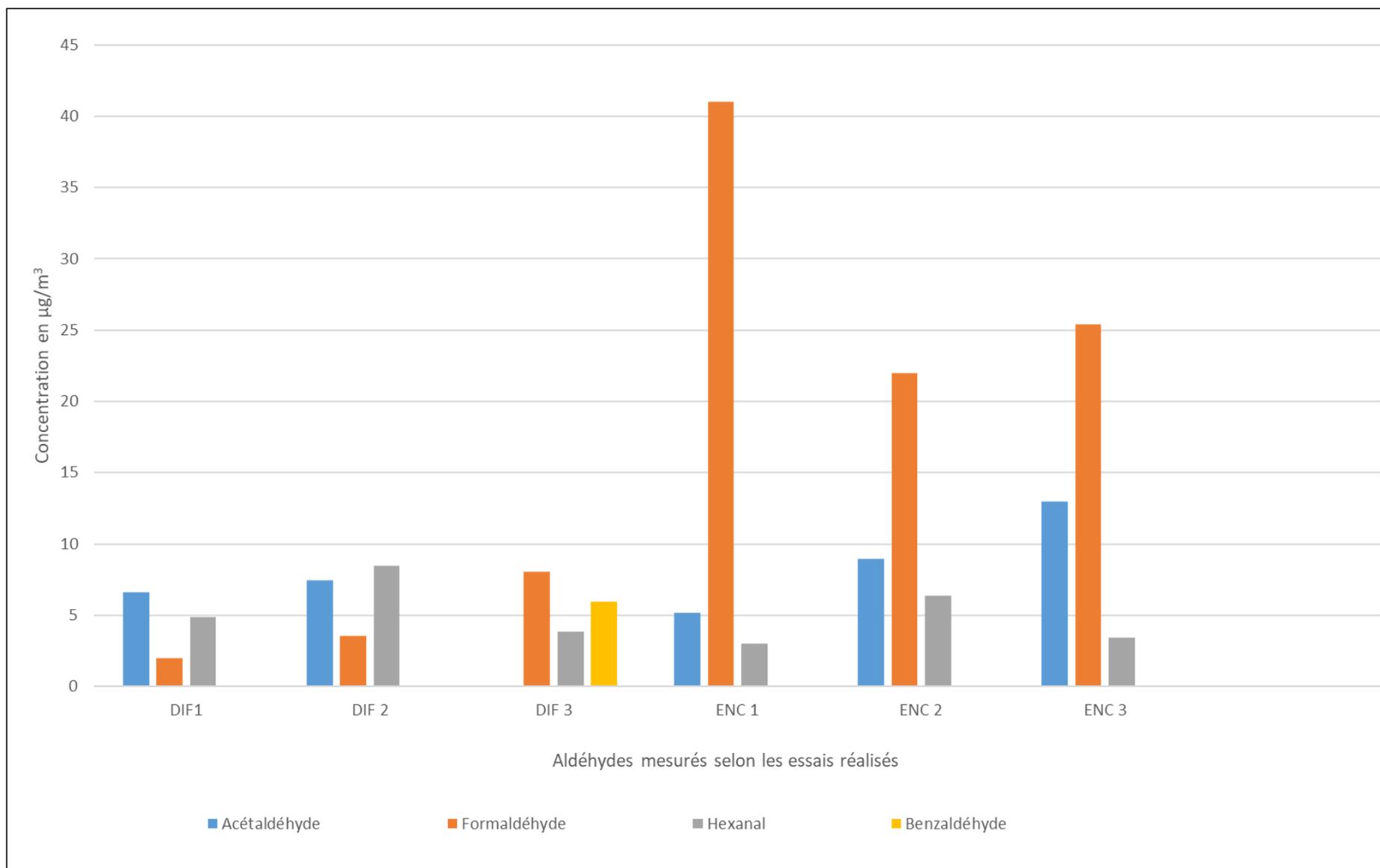


Figure 24 : Concentrations en Aldéhydes issues de l'utilisation d'un diffuseur de parfum d'ambiance et de bâtonnets d'encens.

Ces graphiques montrent une signature intéressante pour chaque usage avec des essais relativement répétables, bien que les niveaux mesurés soient faibles.

En effet, l'usage des diffuseurs montre une légère augmentation de certains COV d'intérêt. Cependant, nous avons été en mesure de constater qu'une odeur persistante est sentie dans la chambre d'essai. Il est fort probable que les composés odorants présents dans le produit à diffuser soient des composés de poids moléculaire relativement important et appartiennent certainement à la famille des COSV (Composés Organiques Semi-Volatils), d'où le besoin d'une résistance chauffante pour volatiliser le liquide odorant.

Les essais Encens ont un intérêt pour tracer des activités de combustion. Les trois essais sont relativement répétables avec la génération de BTEX et principalement de benzène à des concentrations très supérieures en moyenne à par exemple la VGAI de $2\mu\text{g}/\text{m}^3$ ou de la valeur limite de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ utilisée dans le cadre de la surveillance réglementaire dans les ERP (Etablissements Recevant du Public). Ainsi, les concentrations obtenues sont 8 à 12 fois supérieures à celles à atteindre pour garantir une bonne qualité d'air sur une période de 3h30. Pour revenir à une exposition ne reflétant plus de risque pour la santé avec le cas le plus défavorable, il ne faudrait plus utiliser d'encens pendant 14h sans prendre en compte les effets de sorption et désorption des matériaux présents dans l'environnement de l'usager et avec un renouvellement d'air constant. Ce graphique montre quelques différences de comportement entre le diffuseur de parfum et l'encens. En effet, la tendance est à l'augmentation du formaldéhyde dans le temps en sachant que la mesure 3 du diffuseur a été effectuée après 2 jours de diffusion en continu. Après ce laps de temps la concentration en formaldéhyde a doublé par rapport aux premiers essais, alors que l'hexanal a diminué de moitié. L'acétaldéhyde n'a pas été mesuré dans l'essai 3 mais du benzaldéhyde est apparu.

Dans le cas des essais Encens, nous pouvons constater une bonne représentativité de l'empreinte de l'activité avec une prépondérance de formaldéhyde, d'acétaldéhyde et d'hexanal.

Les premiers enseignements de ces essais montrent des différences d'émission selon les activités avec des concentrations en COV relativement faibles en général alors que certaines concentrations pour les composés d'intérêt comme le benzène ou le formaldéhyde peuvent être importantes et supérieures à des valeurs de référence d'air intérieur.

2.3.1.1 Comparaison entre des valeurs de COVT obtenues par prélèvement et mesures par des capteurs PID ou MOS

A la suite de la réalisation de ces premiers essais, il a été souhaité de comparer les réponses des appareils de mesures de COVT (Graywolf 1 et 2, Blue Air, Foobot, Plume 1 et 2) par rapport aux mesures et au paramètre COVT mesuré à partir d'un prélèvement d'air. Les capteurs JSM-136ST et JQ-300 ne sont pas représentés ici car c'est dernier se sont montrés totalement incapables de fournir des données téléchargeables voire que les mesures réalisées ne montraient pas de variation dans le temps pendant une activité, au contraire des capteurs dont les résultats sont montrés ici.

L'objectif est de déterminer si la réponse obtenue est équivalente et si l'information reçue est pertinente.

Pour harmoniser les concentrations obtenues par chaque appareil, les valeurs de concentration ont été ramenées en ppb pour minimiser les écarts liés aux unités usuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ où la masse molaire des composés intervient dans la valeur des concentrations.

Pour rappel le calcul de conversion d'une concentration en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vers une concentration en ppb, s'obtient de la manière suivante :

$$C_{ppb} = C_{\mu\text{g}/\text{m}^3} \times V_m \times MM$$

avec $V_m = 22,71108 \text{ L/mol}$ et $MM = \text{Masse Molaire de chaque composé de référence en g/mol}$.

A noter que des approximations seront présentes dans le résultat final puisque les données sont exprimées avec des composés de référence (étalonnage) différents les uns par rapport aux autres.

Les comparaisons ci-après sont donc toutes relatives mais permettent d'évaluer les tendances de réponse et si les comportements des sondes sont cohérents avec des activités réalisées.

Tableau 19 : Représentativité du paramètre COVT par comparaison entre les résultats obtenus par prélèvement d'air (standard) et une mesure par un capteur de COVT.

Concentration en COVT	Composé équivalent	Unités	Blanc	DIF1	DIF 2	DIF 3	ENC 1	ENC 2	ENC 3	Blanc 2
Prélèvement sur Tubes	Toluène	ppb	65	18	106	16	121	120	113	44
Graywolf (moyenne 1 et 2)	Isobutylène	ppb	227	251	249	374	425	436	389	260
Blue air	?	ppb	250	408	257	253	467	482	481	272
Foobot	?	ppb	125	372	191	165	467	562	532	152
Plume (moyenne 1 et 2)	?	?	235	240	250	255	211	184	/	/

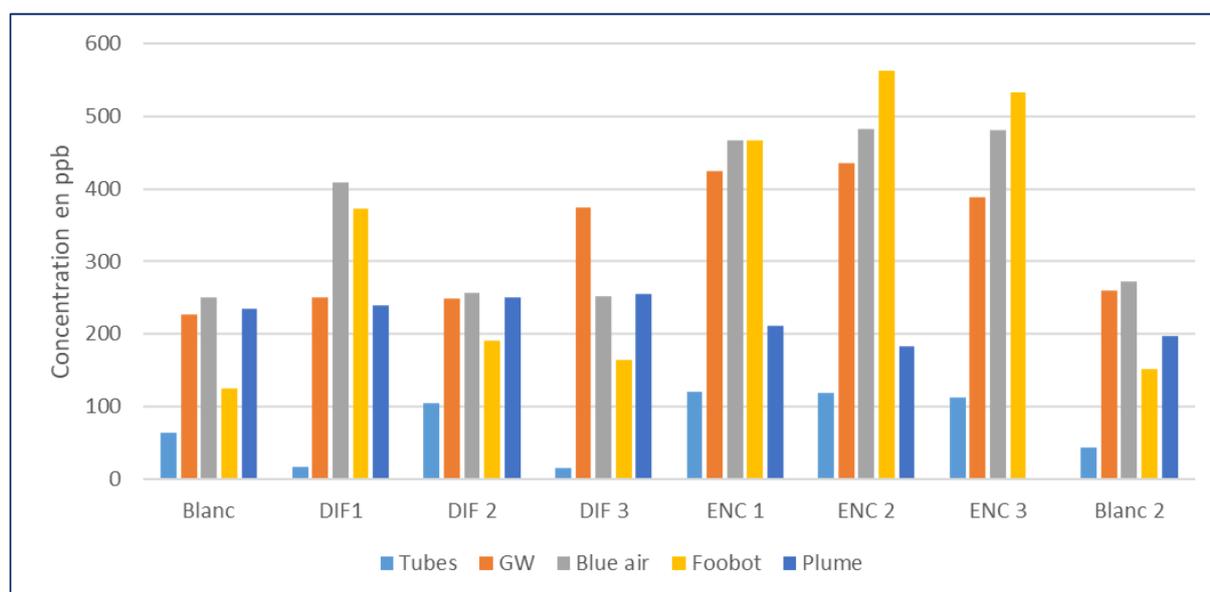


Figure 25 : Tâche 3.6 – Concentrations en COVT issues de l'utilisation d'un diffuseur de parfum d'ambiance et de bâtonnets d'encens.

Les réponses obtenues par les capteurs ne sont pas toutes identiques.

En effet, par rapport à nos données de références (le COVT obtenu par prélèvement sur tube actif), nous remarquons déjà que les valeurs sont généralement bien plus élevées pour les capteurs bas coût que pour les celles obtenues par prélèvement. A ce stade il est difficile d'évaluer s'il s'agit d'un problème d'étalonnage ou de composé de référence utilisé pour adimensionner le résultat à une concentration exprimée en ppb.

Le Blue air et le Foobot ont un comportement très similaire l'un et l'autre tant au niveau des valeurs exprimées que des concentrations mesurées. A noter que ces appareils détectent une variation du COVT à partir de 125ppb. Les mesures montrent bien une différence de concentrations en COVT en fonction de l'activité Diffuseur et Encens avec une forte augmentation de la concentration sur cette dernière activité.

Nous remarquons également que la concentration a augmenté durant l'essai Dif1 mais reste stable pour les essais Dif 2 et 3. Il semblerait qu'un réajustement de type « remise à zéro » a eu lieu. En effet, durant les essais Dif 2 et 3, l'émission provenant des diffuseurs de parfum a été constante durant le WE donc si ce réajustement a eu lieu, cela pourrait expliquer la différence de concentration mesurée entre le premier et les deux essais suivants puisque la concentration du Foobot décroît alors que celle du Blue air reste stable.

Les plumes ne voient pas de différence ou même, la concentration diminue avec le test Encens ce qui est totalement à l'inverse du comportement attendu.

2.3.1.2 Influence de l'humidité sur la mesure de COVT

2.3.1.2.1 Influence de l'humidité en tests réalistes

Pendant la réalisation de ces premiers essais dans la maison Eurêka, une évaluation de l'impact de l'humidité sur les mesures des capteurs Graywolf Foobot et Blue Air qui disposent de la technologie PID ou MOS, a été réalisée. La température durant cet essai était de $23,5 \pm 0,5$ °C.

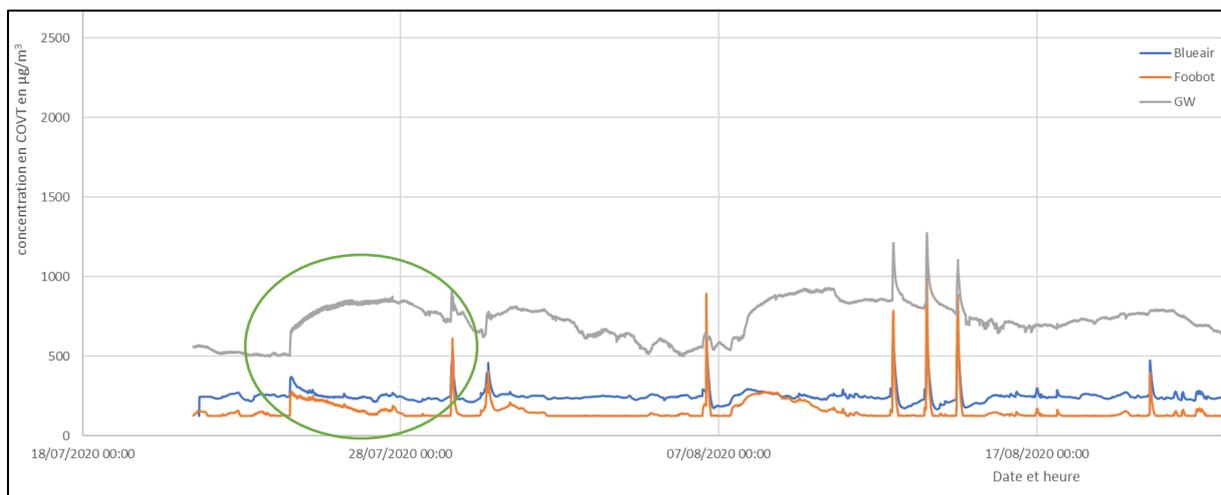


Figure 26 : Pré-essai Smart-Réno avec variation de l'humidité dans la pièce d'essai chambre de la maison Eurêka.

La partie verte sur le graphique matérialise la période de changement de l'humidité relative dans l'air avec un passage d'une valeur de 40 à 75%, maintenue sur toute la période cerclée de vert sur la figure.

Plusieurs enseignements sont intéressants :

- La réponse des capteurs PID est sujette à variation avec l'humidité. En effet, si celle-ci est importante, le niveau de COVT à concentration constante sera supérieur par rapport à un air moins humide.
- Un seuil, obtenu à $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été atteint et ne peut pas être inférieur même lorsque l'humidité diminue. Ce résultat peut être expliqué par un effet de dérive de l'offset et donc un besoin d'étalonnage de l'appareil.
- La diminution de la réponse en COVT semble suivre de manière quasi parfaite la diminution du niveau d'humidité dans l'air. En faisant une régression linéaire entre la teneur en COVT et le niveau d'humidité relative mesuré, nous obtenons une décroissance d'environ $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour chaque diminution d'1% d'humidité relative.

2.3.1.3 Evaluation de la réponse en COVT à partir d'une atmosphère de COV générée en laboratoire

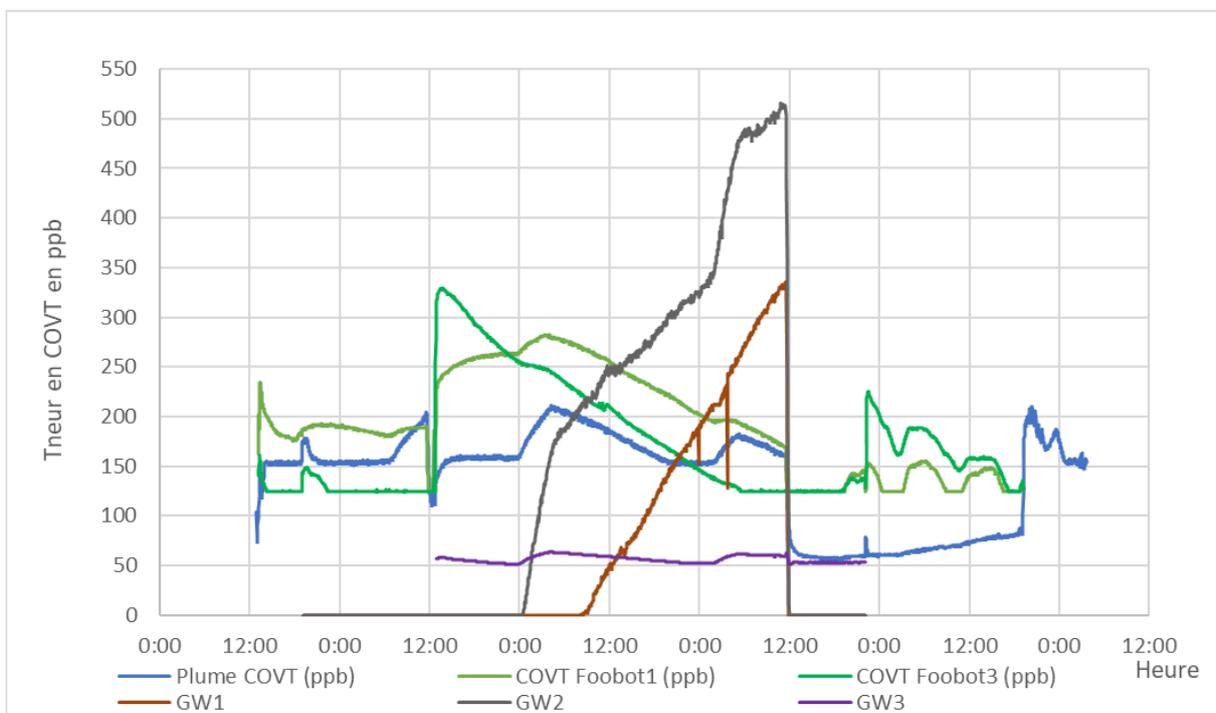


Figure 28 : Concentrations en COVT mesurées après génération d'un mélange de COV en enceinte d' 1m^3 .

Le graphique ci-dessus, montre les données mesurées par six capteurs bas coût dans une enceinte d' 1m^3 en inox utilisée pour l'évaluation des émissions de COV des matériaux de construction (Figure 21). Des concentrations en acétaldéhyde, heptane, toluène et acétone ont été générées dans l'enceinte en présence des six capteurs. Cette génération alterne des périodes de génération et d'arrêt de celle-ci pour exprimer des épisodes de pollution ponctuels plus ou moins long.

Bien que chaque capteur semble détecter des variations de concentration dans le temps, le graphique montre clairement des disparités de réponse qui permettent difficilement de déterminer une justesse de la mesure au premier abord.

Cet essai montre également que dans le cas d'une génération sur plusieurs jours et dont la concentration théorique doit augmenter de manière continue, les capteurs Foobot et Plume se sont

recalibrés, expliquant cette diminution dans le temps de la concentration mesurée à la différence des GrayWolf dont la mesure indique bien une augmentation dans le temps.

Cet essai apporte les enseignements suivants :

- Des appareils provenant du même fabricant ne donnent pas nécessairement la même réponse, ce qui indique que malgré une provenance identique, une vérification de la justesse de la mesure est nécessaire.
- Les variations de concentration correspondantes à une génération ou bien à une dilution ne sont pas identiques d'un capteur à un autre.
- Les valeurs mesurées entre appareils ne sont pas identiques pouvant osciller entre 0 et 500 ppb, ce qui montre des réponses différentes malgré une réinitialisation de l'offset des capteurs lorsque cette manipulation est possible.

2.3.2 Mesures portant sur le CO₂

2.3.2.1 Evaluation de la réponse de capteurs en fonction de la teneur en CO₂ en chambre d'1 m³

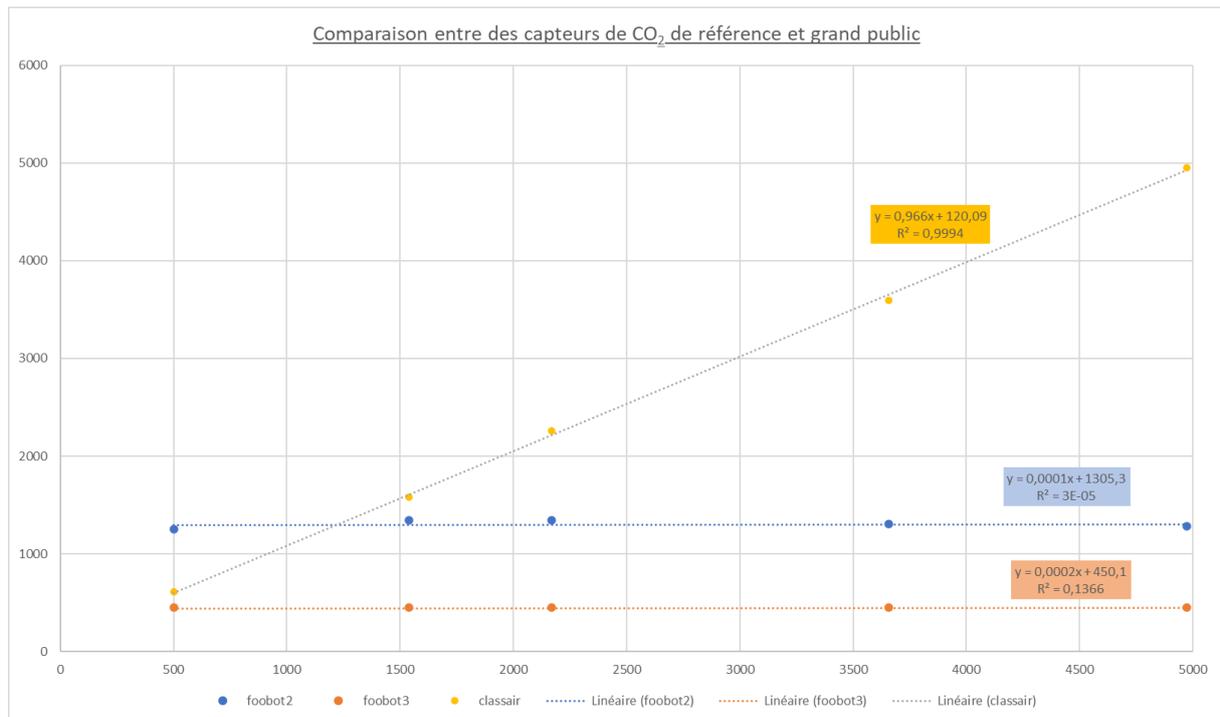


Figure 29 : Evaluation de la réponse de la teneur en CO₂ (en ppm) des capteurs Foobot, indexée sur la mesure du COVT.

Suite à la génération de différents niveaux de CO₂ en enceinte d'1 m³, un appareil étalonné (QTRAK) comparé avec un capteur éprouvé (Class'air) et 2 appareils grand public (Foobot).

Les deux appareils de références donnent les mêmes valeurs moyennes alors que les appareils grands publics restent à une valeur constante durant tout l'essai. Ce comportement s'explique par le fait qu'il n'y pas de capteur spécifique de CO₂ d'intégré dans ces appareils grand public. Ainsi pour donner une valeur de dioxyde de carbone, un calcul est indexé sur la mesure du COVT provoquant ainsi une variation lorsque ce niveau évolue dans le temps mais restant inerte si cette mesure n'évolue pas.

Il apparaît clairement un biais sur le résultat qui peut fausser la visualisation de la réalité, en apportant une information surestimant ou sous-estimant la réalité de la teneur dans l'environnement.

Ce type d'appareil ne pourrait donc pas être utilisé pour évaluer la qualité d'air intérieur sur le critère du confinement par la mesure de CO₂ puisqu'une surestimation ou une sous-estimation non maîtrisée sera rencontrée.

2.3.3 Mesures particulières lors d'essais en conditions réalistes d'usage

Les mesures de la pollution particulaire ont été effectuées simultanément aux mesures de COV pendant l'ensemble des expérimentations en conditions réalistes, au sein de la maison Eureka. Les expérimentations de septembre et décembre 2020 ont été particulièrement adaptées à l'évaluation des capteurs de particules à bas coût utilisés. Celles-ci comportent une grande variété de sources intérieures usuelles :

- Episodes de cuisson (cuissons four et plaque électrique, toast,...) ;
- Remise en suspension : présence (passive ou active-marche) et nettoyages (balais, aspirateur, dépoussiérage...)
- Aérosols (parfums, déodorant, ...)
- Confort/relaxation (Encens, bougies, ...)
- Vapotage ;
- Chauffages (gaz et électrique) ;
- Travaux (ponçages, découpes, ...).

Mais également des périodes où seule la pollution extérieure est impactante.

Pour rappel ces expérimentations ont eu lieu au sein de la chambre précédemment décrite (30m³, renouvellement de l'air de 0.5 vol.h⁻¹) et du salon équipé d'une cuisine ouverte (30m³, renouvellement de l'air de 0.5 vol.h⁻¹).

De par la nature de sa conception et la détection des particules les plus fines, le Mini-WRAS a été utilisé en tant que référence. Contrairement aux COVs, les appareils à bas-coût de mesure de pollutions particulaire se basent sur des principes physiques similaires aux appareils de référence ici utilisés. Leur intercomparaison est donc facilitée.

Afin d'estimer si la présence seule de capteurs à bas coût permettrait d'évaluer l'impact d'une rénovation sur les indices QAI, la méthodologie adoptée est présentée Figure 30. La première étape est de constituer une base de données à partir des mesures issues de la maison Eureka. Celle-ci sera ensuite utilisée afin de reconstituer des scénarios réalistes d'exposition qui permettront d'évaluer l'emploi des capteurs utilisés pour le calcul des indicateurs de QAI.

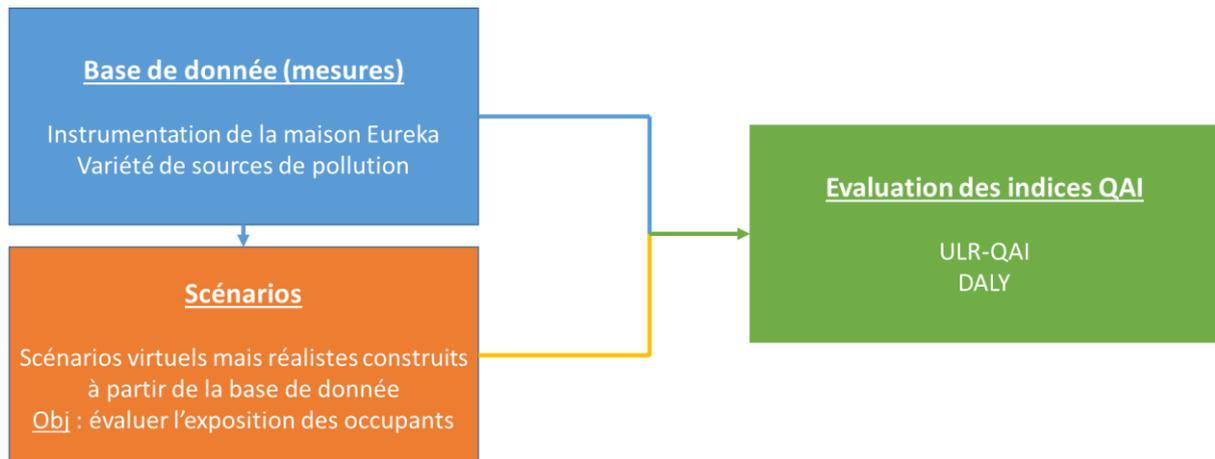


Figure 30 : Méthodologie adoptée pour évaluer l'utilisation des capteurs de particules à bas coût dans le cadre d'une rénovation.

2.3.3.1 Données utilisées pour l'évaluation des capteurs à bas coût de particules

Si l'ensemble des sources sont détectées par tous les capteurs, avec des temps de réponse adaptés, les ratios observés avec l'appareil de référence sont variés et très dépendant de la nature de la pollution.

Ainsi, les sources liées à des combustions, tels que, par exemple, les bougies (Figure 31) et les épisodes de cuisson (Figure 32) permettent les meilleures performances de la part des capteurs à bas coût. Les stations commerciales grand public présentent des écarts inférieurs à 5%. Les capteurs NovaFitness présentent l'écart le plus important et sous estiment assez largement ce type de pollution. Notons que ces capteurs n'ont pas été recalibrés depuis leur configuration d'usine et ne sont pas exclusivement destinés à la mesure de ce type de polluants intérieurs. Un post-traitement spécialisé des données capteur de la part des stations commerciales participe probablement à leurs bons résultats. Un post-traitement équivalent n'a pas été appliqué ici aux autres capteurs bruts faute d'information sur les méthodes employées. Notons cependant que la station BlueAir présente un offset important sur l'expérimentation de cuisson, inexplicé ici.

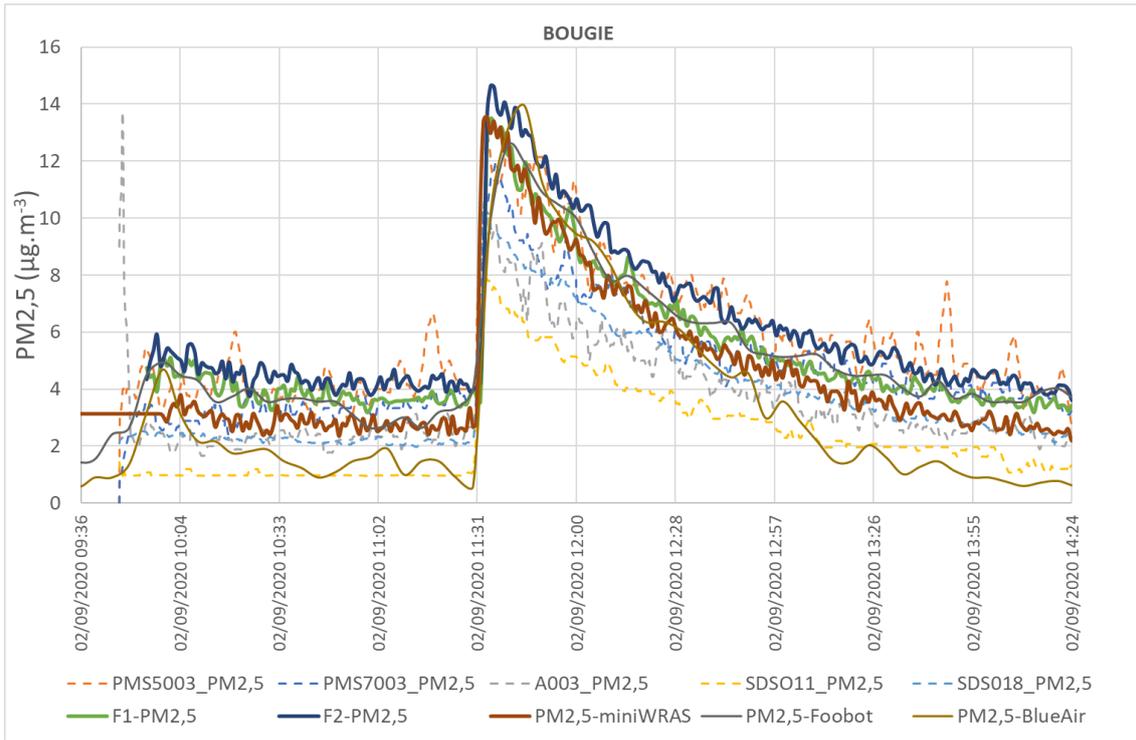


Figure 31 : Phase de combustion d'une bougie (de 9h40 à 11h30) puis extinction (11h30). Expérimentation au sein de la chambre (F1 et F2 désignent les deux compteurs FIDAS cités précédemment).

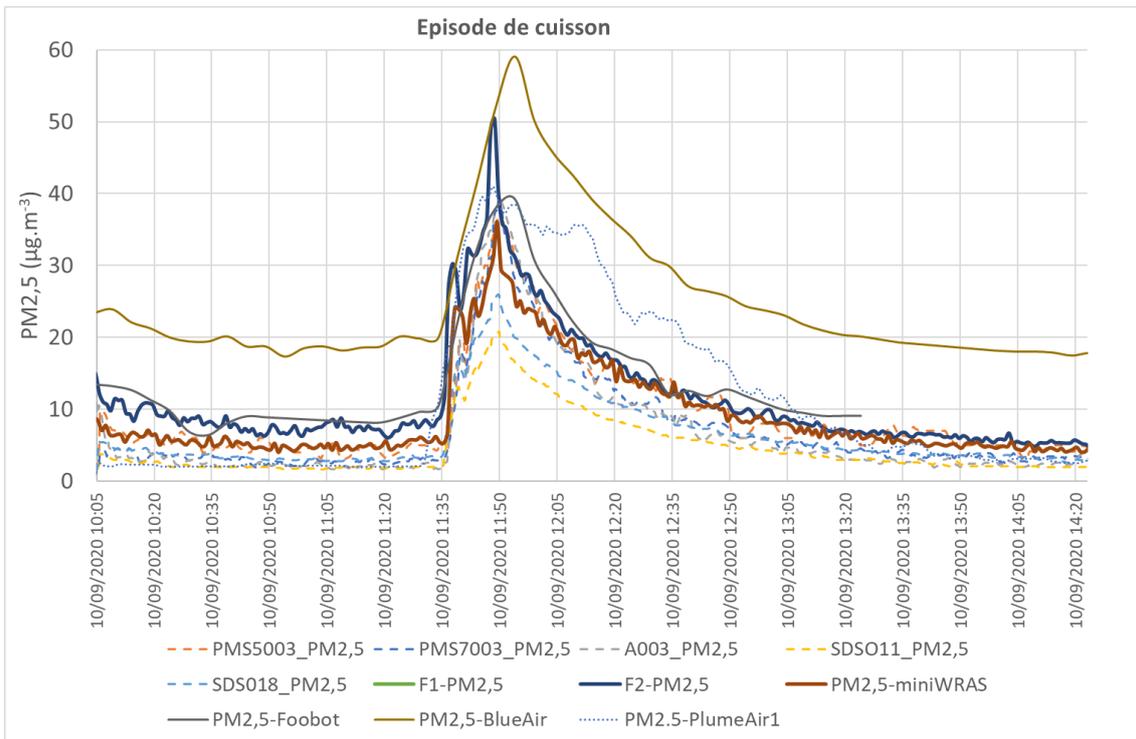


Figure 32 : Episode de cuisson au sein de la cuisine ouverte (F1 et F2 désignent les deux compteurs FIDAS cités précédemment).

Au contraire, les expérimentations liées à l'encens (Figure 33) présentent des résultats inversés : les capteurs bruts (NovatFitness et plus particulièrement ceux de la marque Plantower) ont tendance à surestimer très fortement ce type de pollution par rapport à la référence. Ainsi les capteurs PMSA003 et PMS7003 détectent une exposition supérieure d'un facteur 3 par rapport au Mini Wras. Là encore,

les stations de mesure commerciales grand public étudiées offrent des performances très satisfaisantes avec des écarts de l'ordre de 10%.

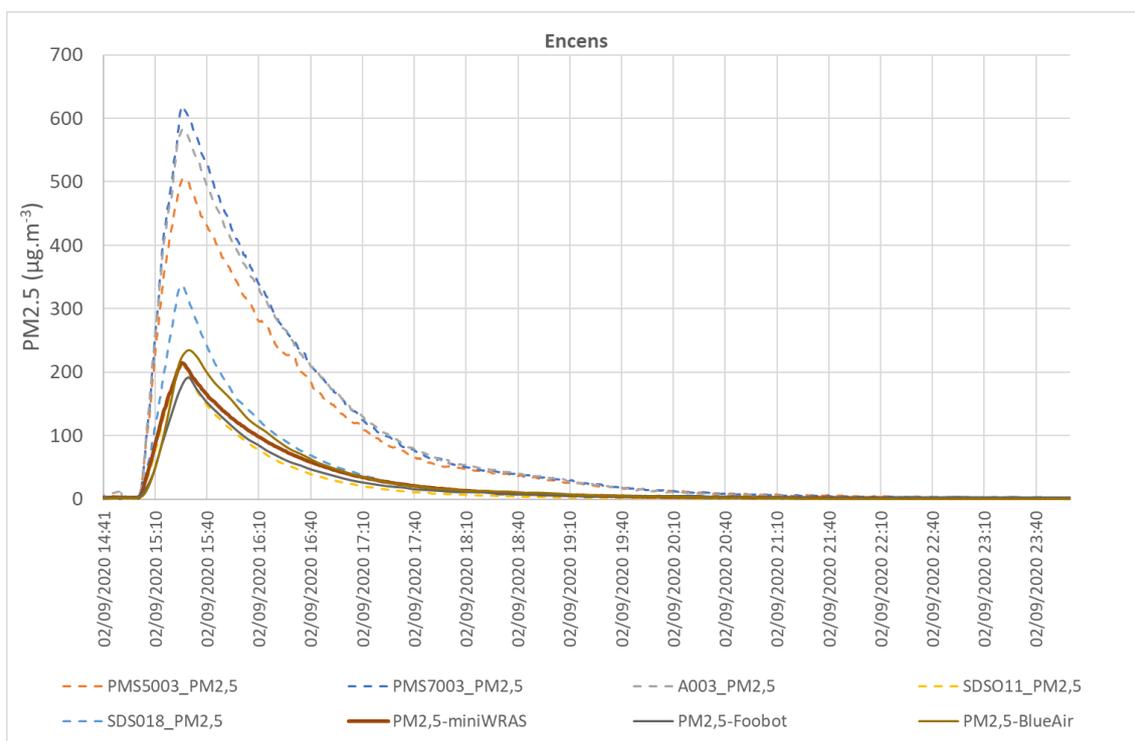


Figure 33 : Combustion d'un bâton d'encens au sein de la chambre (F1 et F2 désignent les deux compteurs FIDAS cités précédemment).

L'épisode de vapotage (Figure 34) a la particularité de présenter une pollution particulaire liée en grande partie à des composés semi-volatils. Ainsi la décroissance observée n'est pas uniquement due au renouvellement de l'air mais a des processus plus complexes qui ne font pas l'objet de ce travail. On observe ici que l'ensemble des capteurs à bas coût sous-estiment largement l'exposition estimée par le Mini Wras. Cependant, de par sa nature, le pic de pollution est très court et ne dure qu'une vingtaine de minutes.

Concernant les aérosols, un comportement semblable aux combustions est observé (Figure 35) : les capteurs dits bruts sous-estiment assez largement l'exposition (d'environ 50%), alors que les stations commerciales (Footbot et BlueAir) présentent des écarts de moins de 20%.

Ce comportement est particulièrement problématique pour le cas des épisodes de remise en suspension (Figure 36), pour lesquels les capteurs bruts ne détectent pas ou très peu ces pollutions. Ce comportement a été observé pour l'ensemble de ces épisodes et non pas uniquement pour celui présenté ici en exemple.

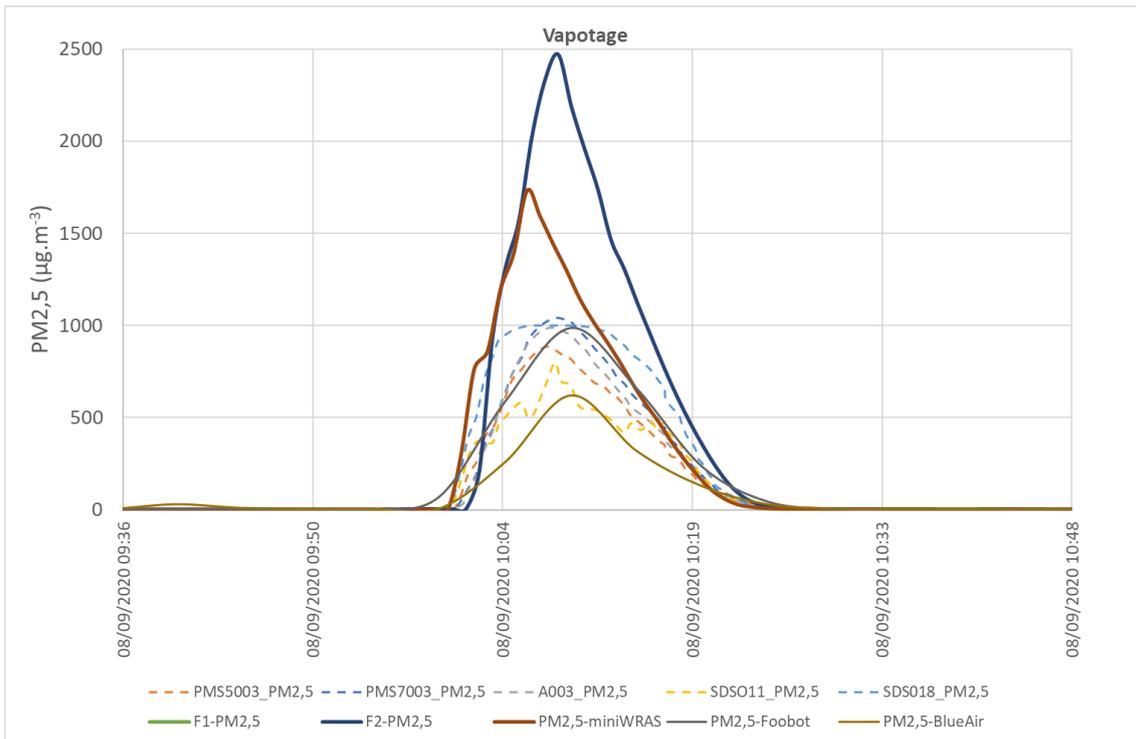


Figure 34 : Episode de vapotage au sein de la chambre (F1 et F2 désignent les deux compteurs FIDAS cités précédemment).

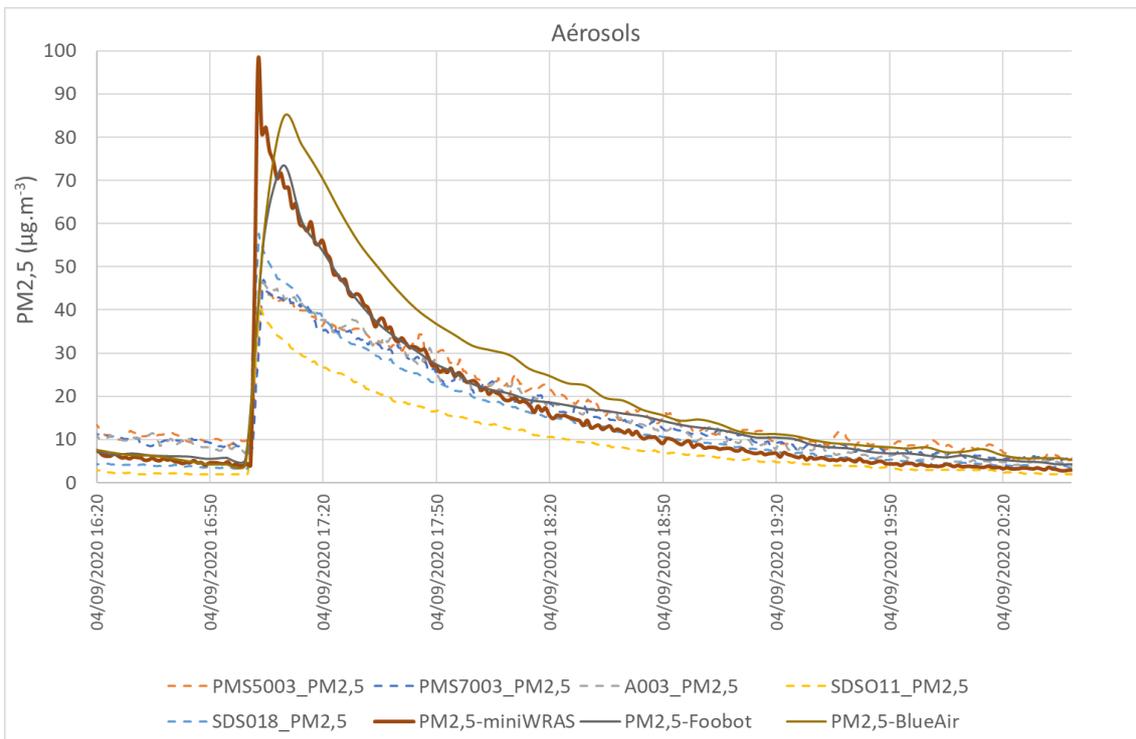


Figure 35 : Utilisation d'aérosols au sein de la chambre (F1 et F2 désignent les deux compteurs FIDAS cités précédemment).

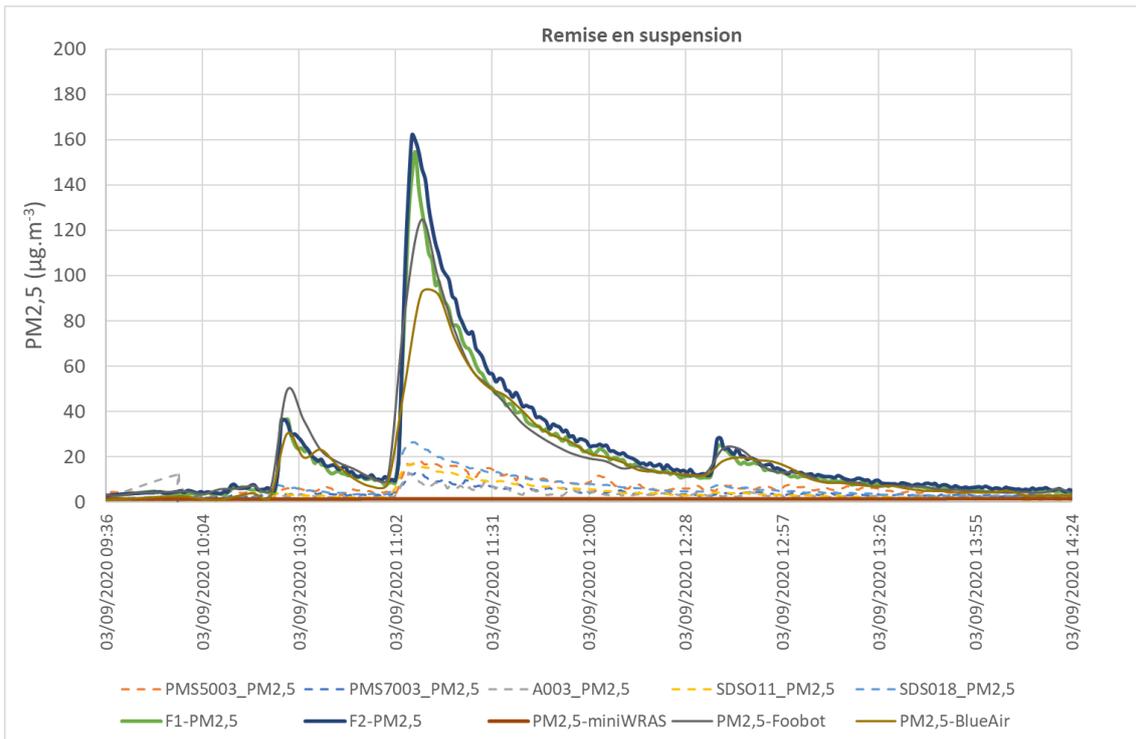


Figure 36 : Episodes de remise en suspension (draps, balayage et aspirateur) au sein de la chambre (F1 et F2 désignent les deux compteurs FIDAS cités précédemment).

Enfin, il peut être intéressant de regarder le comportement de ces capteurs pour des pollutions très faibles, en l'absence de sources internes (Figure 37). Là encore une sous-estimation importante de la part de la plupart des capteurs bruts est observée.

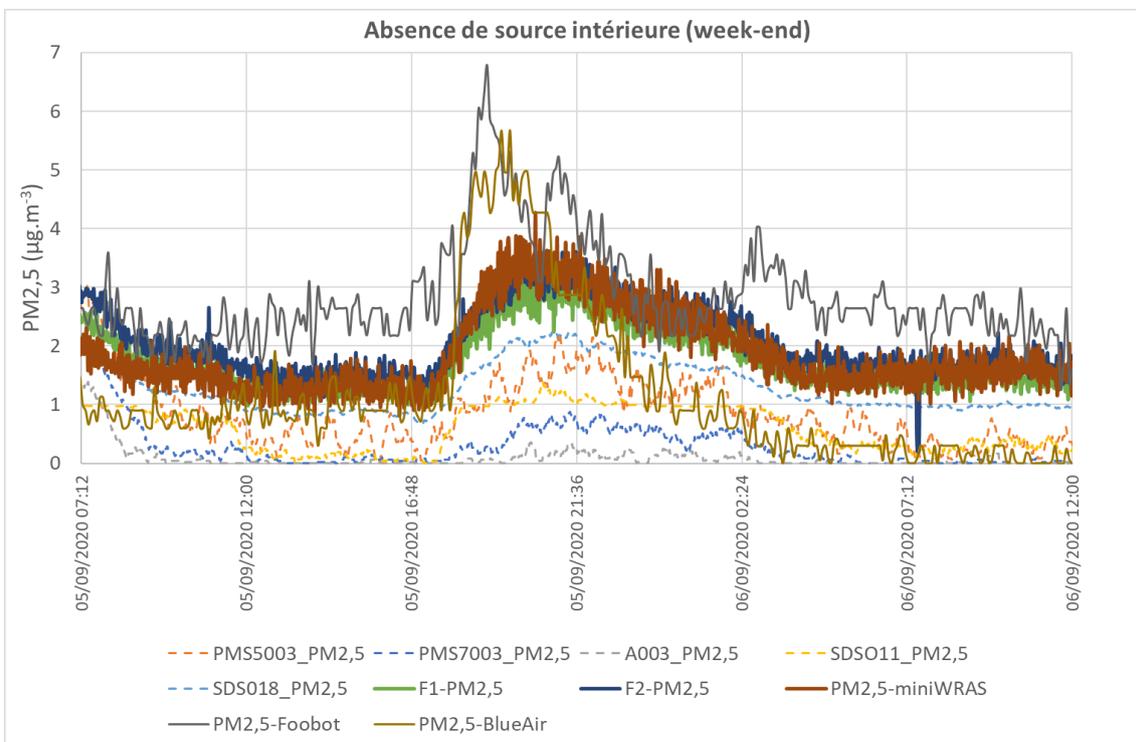


Figure 37 : Exemple de période dans sources intérieures, au sein de la chambre. Les variations sont dues à la pollution extérieure (F1 et F2 désignent les deux compteurs FIDAS cités précédemment).

En conclusion, les stations commerciales type Foobot et BlueAir, permettent ici la meilleure estimation de l'exposition des occupants aux pollutions particulaires intérieures. Les capteurs bruts étudiés ont montré des comportements très inégaux selon les types de pollution. Ils présentent généralement une sous-estimation assez importante, voire une non détection de la remise en suspension, sauf pour le cas de l'encens où ils surestiment parfois très largement l'exposition en PM_{2,5}.

Suite à ces observations, il a été choisi de distinguer trois groupes de capteurs aux comportements similaires, et dont les données sont exploitables :

- Ceux de la marque Plantower, représentés par la suite par le PMS7003 ;
- Ceux de la marque NovaFitness, représentés dans la suite par le SDS011 ;
- Les stations type Foobot et BlueAir, représentées dans la suite par le Foobot.

En effet il ne s'agit pas d'évaluer uniquement les réponses instantanées de ces capteurs mais bien leur capacité à fournir une information fiable sur l'évolution de la QAI après un acte de rénovation, ceci à partir des indicateurs précédemment définis.

2.3.3.2 Evaluation de la pertinence des indices QAI mesurés à partir des appareils à bas coût

Une fois l'ensemble des données des expérimentations acquises, il est possible de poursuivre la méthodologie décrite Figure 30.

Pour chaque type de pollution considéré et pour chaque groupe de capteur précédemment déterminé, une exposition moyenne pendant une durée jugée représentative a été calculée (Tableau 20). Cette durée représente la période pendant laquelle la pollution intérieure est supposée dominée par cette source. La Figure 38 présente une illustration de cette approche dans le cas de l'encens et d'une période de 4h.

Dans la suite de cette partie, à titre d'illustration, nous considérons 3 scénarios simples d'exposition (Tableau 21), reconstitués à partir des concentrations moyennes précédemment définies. Il s'agit de scénarios d'une semaine, découpés en périodes pendant lesquelles certaines sources sont dominantes. Ils ont pour objectif de permettre le calcul d'indicateurs d'exposition à la fois avec l'appareil de référence (Mini Wras) et les capteurs à bas coût, dans le but de les comparer.

Tableau 20 : Expositions moyennes selon le type de source de pollution dominante. Données provenant de la base de données précédemment décrite.

Source	PM2,5 - Mini-WRAS ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	PM2,5 – Foobot ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	PM2,5 – SDS011 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	PM2,5 – PMS7003 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
Cuisson	21.7	25.6	37.15	22.1
Activité occupant forte	9.8	11.93	25.15	0.93
Aérosols	52.9	42.7	71.76	33.34
Encens	102.7	80.46	97.55	340.26
Vapotage	812.7	609.1	539.75	562.7
C fond	9.2	11.5	2,1	4,1

Tableau 21 : Construction des épisodes d'exposition théoriques.

Source	Scénario 1 (h)	Scénario encens (h)	Scénario vapotage (h)
Cuisson	3.5	3.5	3.5
Activité occupant forte	21	21	21
Aérosols	2.3	2.3	2.3
Encens	0	4	0
Vapotage	0	0	2,3
C fond	141.2	137.2	138.9

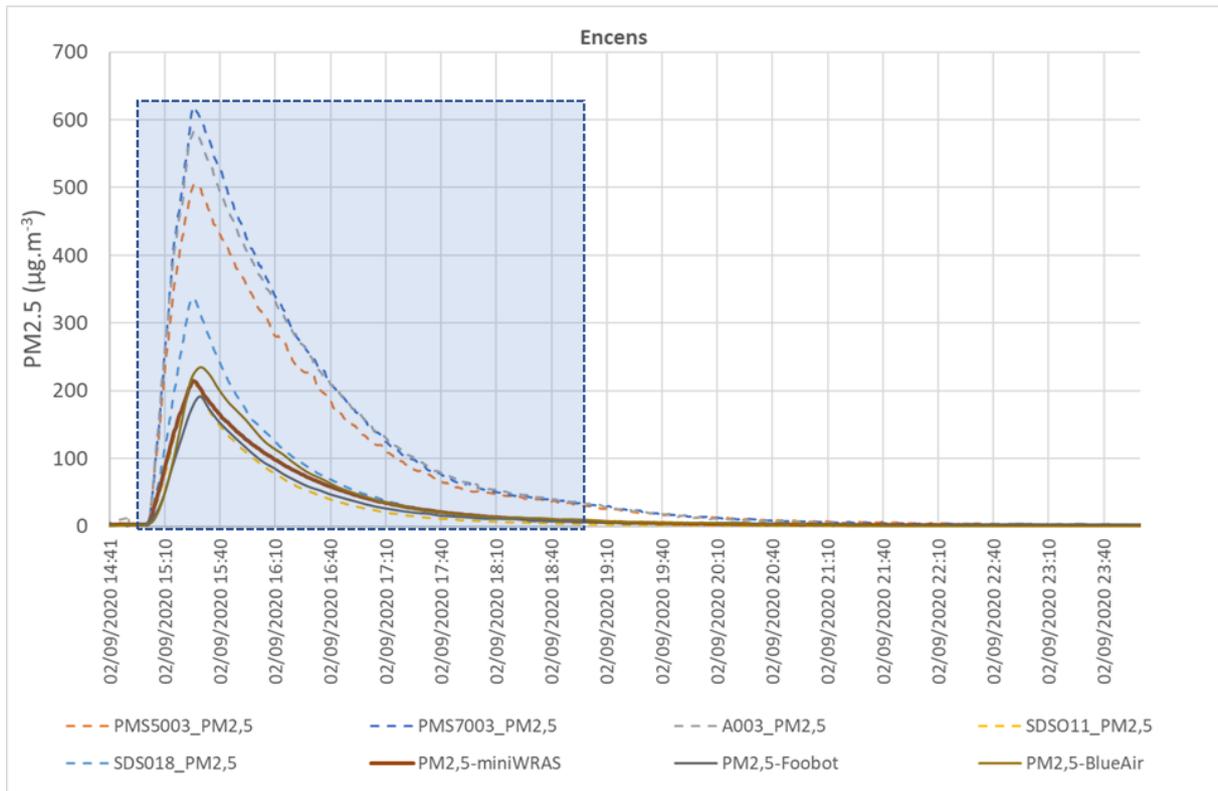


Figure 38 : Illustration du procédé utilisé pour estimer les données du Tableau 19.

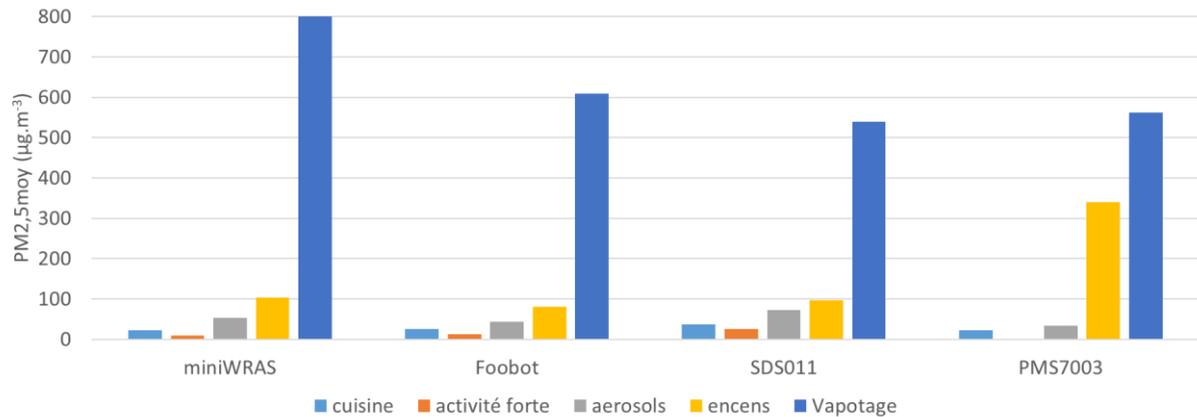


Figure 39 : Représentation des données du Tableau 19.

Une fois les scénarios constitués, il est possible de calculer pour chacun d’entre eux les indicateurs retenus dans le cadre du livrable 3.5 pour évaluer les rénovations sur le critère QAI. Ces deux indicateurs (ULR-QAI et DALY) sont décrits en détails dans le livrable 3.3.

Pour rappel, l’indice ULR QAI se définit selon l’équation (1), dans le cas où seul un unique polluant i est considéré (ici PM2,5).

$$I_{ULR-QAI,i} = 10 \times \frac{C_{int,i} - VGAI_{LT,i}}{VGAI_{CT,i} - VGAI_{LT,i}} = 10 \times \frac{PM2,5_{moy} - 10}{25 - 10} \quad (1)$$

Où : $VGAI$: est la valeur guide considérée pour le polluant, pour le court terme (CT) ou long terme (LT) ;

C_{int} : est la concentration intérieure du polluant considéré.

Le DALY représente le nombre d'années d'espérance de vie perdues pour 100 000 hab.

La Figure 40 présente les indices de QAI, calculés à partir des capteurs à bas coût et de la référence, pour chacun des scénarios. Les écarts absolus par rapport au scénario 1 sont représentés Figure 41.

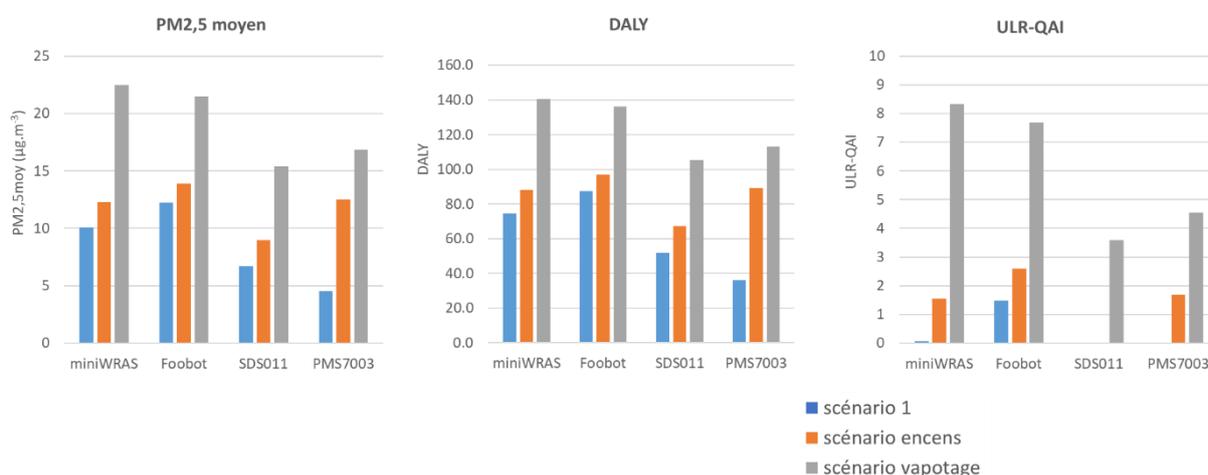


Figure 40 : Indices de QAI, calculés à partir des capteurs à bas coût et de la référence, pour chacun des scénarios.



Figure 41 : Ecart absolu, par rapport au scénario 1, des indices de QAI calculés à partir des capteurs à bas coût et de la référence.

Les capteurs bruts, représentés par le SDS011 et le PMS7003, montrent une sous-estimation de l'exposition dans l'ensemble des scénarios. Les écarts, avec la référence, observés sur une semaine d'exposition sont cependant très inférieurs à ceux relevés lors des scénarios de pollution (partie 2.3.3.1), car moyenné sur un temps long. De plus un effet de compensation est observé, notamment sur le scénario encens et le PMS7003. Ainsi, ce capteur sous-estime certains types de pollution et surestime d'autres. Globalement les écarts observés sur les indicateurs se trouvent réduits.

Ainsi le PMS7003 offre des résultats satisfaisant malgré les fortes dissonances avec le Mini Wrass, observées précédemment pour certaines sources. La sous-estimation du SDS011 est plus problématique, notamment pour l'ULR-QAI où il montre des écarts de plus de 4 points, soit près de la

moitié de l'échelle de cet indicateur. Une recalibration de ce capteur, qui a montré une bonne qualité de détection de tous les types de pollution, permettrait d'améliorer grandement ces résultats.

Le Foobot permet une excellente estimation des indices et montre des résultats très proches de ceux obtenues avec le Mini-WRAS. Les écarts maximums sont de l'ordre de 1 point pour l'ULR-QAI et de 10 points pour le DALY, ce qui ne change jamais les conclusions quant à la QAI.

2.4 Conclusion

En conclusion de ces études, la réponse à l'objectif initial du projet Smart-Réno d'évaluer la pertinence de l'utilisation de capteurs bas coût pour évaluer la qualité de l'air intérieur sur les paramètres gazeux afin de favoriser l'acte de rénovation montre un véritable risque dans l'état actuel des connaissances.

En effet, ces études apportent quelques éléments de réponse permettant d'indiquer en premier lieu qu'une bonne connaissance du fonctionnement et de l'information donnée par le capteur est primordiale. En effet, afin d'utiliser des boîtiers de monitoring pour valoriser le confort et la qualité de l'air, la mesure doit pouvoir être répétable et fiable afin de sécuriser l'information et de la rendre crédible auprès des usagers. Le risque principal est un désintérêt de l'information si celle-ci est fautive ou imprécise, pouvant même mener jusqu'à une contre-productivité où l'utilisateur pourrait émettre des actions néfastes sur la QAI ou les économies d'énergie.

Il apparaît donc nécessaire avant de proposer ce type de solution, d'avoir des garanties de fiabilité, ce qui nécessite soit une vérification selon des normes existantes ou à construire. Ainsi le ou les paramètres mesurés (par exemple formaldéhyde ou dioxyde de carbone) devront pouvoir apporter une information relativement précise et robuste afin que des évaluations via des indices de QAI ou confort puissent être obtenus et faciliter la compréhension pour les non-initiés.

Cependant, même si la justesse des capteurs de QAI mesurant les COVT n'est pas démontrée comme fiable dans cette étude, ils peuvent avoir une utilité pédagogique. En effet, comme vu sur la figure ci-dessous, la visualisation des épisodes de pollution peut aider les usagers à évaluer a priori la présence ou non d'une pollution intérieure.

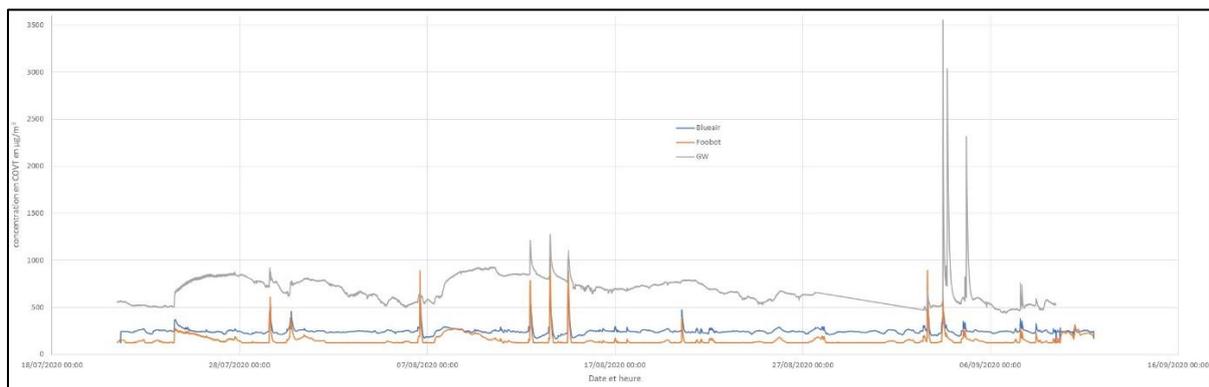


Figure 42 : Représentation d'un suivi graphique des de la teneur en COVT dans l'air intérieur.

Dans le cas des polluants particulaires, l'emploi de capteurs à bas coût s'est montré pertinent pour estimer les indicateurs de QAI. En effet, contrairement aux COVs, l'emploi de technologies similaires

entre les appareils de référence et à bas coût, ainsi que l'étude d'une unique grandeur (PM_{2,5}), facilitent la comparaison.

La qualité de détection de ces capteurs à bas coût dépend grandement du type de pollution particulaire et ont montré parfois des écarts importants avec les appareils de référence. Certaines pollutions ont été difficilement détectées par une partie des capteurs étudiés (remise en suspension) alors que d'autres ont été largement surestimées (encens). L'étude de l'exposition à plus ou moins long terme a montré des résultats plus satisfaisant, grâce à des phénomènes de moyennage et de compensation.

Les stations commerciales grand public étudiées (Foobot et BlueAir) ont démontré ici un excellent comportement pour les pollutions particulières et sont exploitables pour l'estimation des indicateurs de QAI pour ce type de pollution. Leurs résultats sont globalement supérieurs à ceux observé pour les capteurs bruts n'ayant subi aucune recalibration spécifique.

Le développement en constante évolution des micro-capteurs ces dernières années laisse présager un nombre important de nouvelles solutions à évaluer afin d'obtenir un boîtier de monitoring adapté.

3 Campagne d'évaluation de l'évolution de la sensation de confort thermique sous des sollicitations variables en température

3.1 Introduction

3.1.1 Contexte et intérêt scientifiques

Les critères de confort thermique normatifs ne considèrent que des valeurs stabilisées de température, ainsi que des conditions de l'occupant stationnaires. Ces critères sont basés principalement sur des modèles de confort dérivés à partir d'expériences conduites en laboratoire dans des conditions stationnaires. C'est par exemple le cas pour les modèles PMV et PPD de Fanger. Ces modèles ne sont donc adaptés que pour prédire le confort thermique dans des conditions intérieures changeant très lentement dans le temps. Cette campagne vise à réaliser une évaluation physiologique et psychologique du confort thermique dans des conditions thermiques dynamiques qui sont caractérisées par des changements rapides, en particulier en étudiant des variations cycliques de température en été. Ce travail, essentiellement expérimental, s'inscrit en complément des études numériques sur les actions de rénovation (Volet 3 - Tâches 4 et 5) qui ne prennent en compte ni le système de chauffage (système parfait), ni la climatisation en été (étude de l'inconfort d'été sans système de refroidissement) concernant l'évaluation du confort thermique. Une meilleure prise en compte de ces effets transitoires dans les modèles de confort thermique contribuera au développement des futurs bâtiments flexibles, où la température est contrôlée de manière dynamique afin d'être optimisée pour le confort des occupants et pour les besoins du réseau électrique intelligent (*smart-grid*).

3.1.2 Objectifs

Les essais ont été réalisés pendant l'été dans la FAÇADE TEST (Figure 43) et dans la MAISON EUREKA (Figure 44) de la plateforme technologique Tipee dans des conditions thermiques contrôlées. Les mesures ont été effectués sur des mâts de confort couplées à des questionnaires distribués à un panel de participants humains statistiquement significatif. Ces essais ont pour but d'apporter un nouvel éclairage sur les mécanismes psycho-physiologiques conduisant à la perception thermique dynamique, avec une attention particulière sur les phénomènes d'alliesthésie et d'adaptation thermique. L'alliesthésie thermique est la perception de plaisir ou déplaisir associée à une sensation thermique. Un stimulus thermique, capable d'améliorer dans le temps l'état thermique du sujet, va être perçu comme agréable (plaisir). À l'inverse, un stimulus perturbant l'état thermique du sujet va être perçu comme désagréable (déplaisir). L'adaptation thermique est la capacité du sujet à s'adapter avec le temps à un stimulus thermique désagréable.



Figure 43 : Salle de la FAÇADE TEST.



Figure 44 : Salle de la MAISON EUREKA avec deux sujets et le mât de confort au premier plan.

3.2 Protocoles expérimentaux

Chaque sujet est exposé à une variation cyclique de température pour une durée de 3 heures, dans un environnement intérieur quasi isotherme (température uniforme dans la salle). Les 4 variations étudiées sont caractérisées par des taux de variation de température autour du point thermique neutre différents. Le point thermique neutre est la condition de température associée à une sensation thermique de « ni chaud ni froid » dans des conditions stationnaires et se situe autour de 25,5°C pour des sujets habillés en shorts et en t-shirt. Pour un aperçu de 4 scenarii de température étudiée voir Figure 45, Figure 46, Figure 47, and Figure 48. Les 4 conditions de température dynamiques sont comprises entre 25,5°C et 29,5°C et ne posent aucun risque pour la santé.

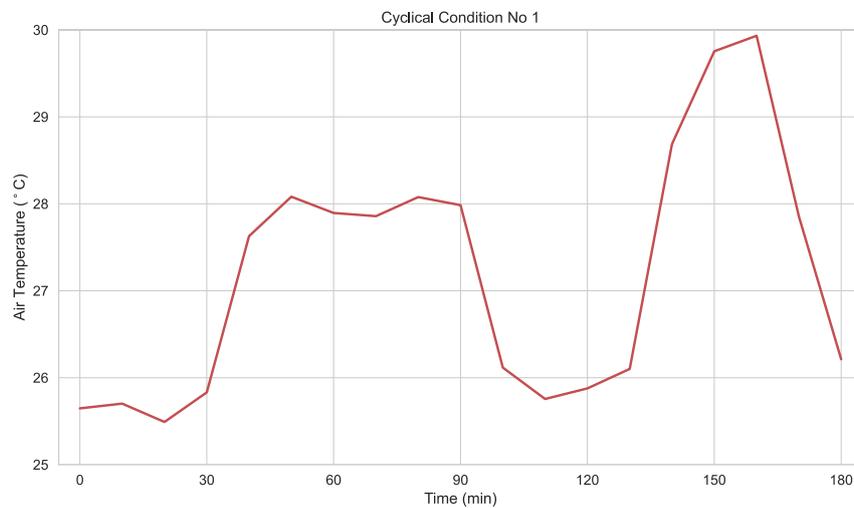


Figure 45 : Scenario de variation cyclique de température no 1 (« Cyclical Condition No 1 »).

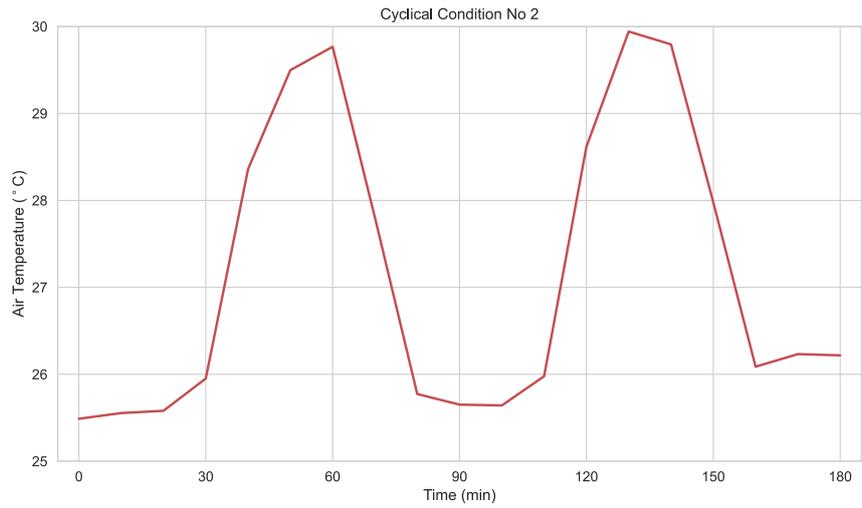


Figure 46 : Scenario de variation cyclique de température no 2 (« Cyclical Condition No 2 »).

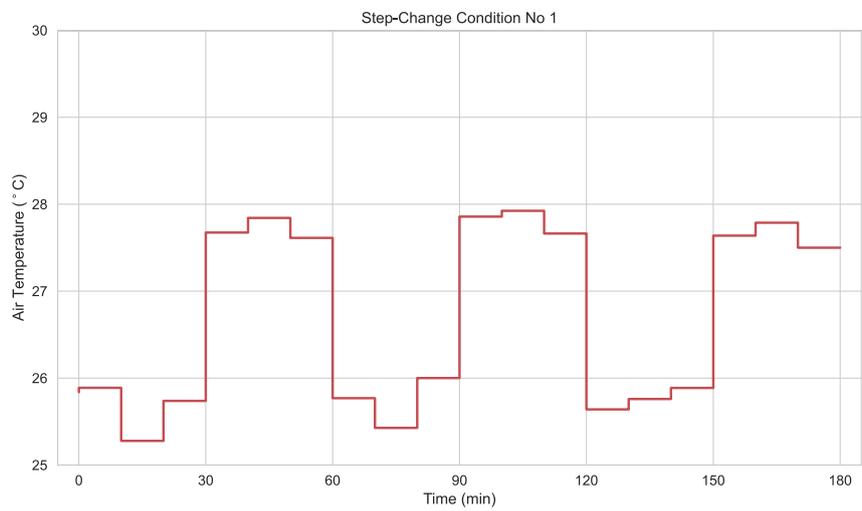


Figure 47 : Scenario de variation de température no 1 du au changement de salle (« Step-change Condition No 1 »).

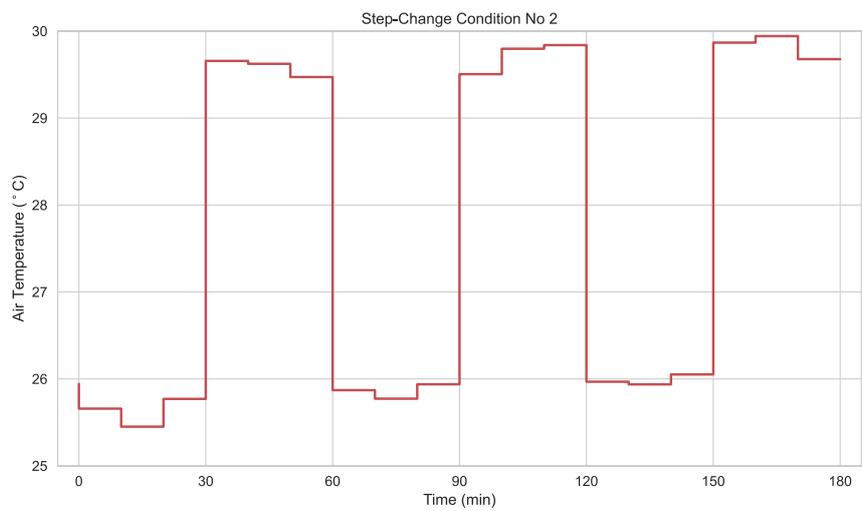


Figure 48 : Scenario de variation de température no 2 du au changement de salle (« Step-change Condition No 2 »).

Pendant le test, les sujets sont libres de s'hydrater (de l'eau en bouteille est mise à leur disposition) et peuvent pratiquer l'activité de leur souhait :

- Ordinateur/tablette/téléphone (jeux, films...),
- Musique (via écouteurs/casques),
- Tricot,
- Dessin,
- Livre.

Chaque sujet participe à un seul test et chaque test a une durée de 3 heures plus une demi-heure pour l'accueil et le briefing. Le planning des phases de tests est présenté dans le Tableau 22. Le lundi après-midi, aucune séance de test n'était prévue, afin de pouvoir ajuster les réglages en fonction du déroulement de la première séance de test du lundi matin, avec les 12 premiers sujets. Les 12 sujets sont répartis en différentes salles tel qu'indiqué dans le Tableau 23.

Tableau 22 : Planning des phases de tests.

Jour	Date	Heure d'arrivée sujet	Début phase de test	Fin phase de test	Nombre de sujets
Lundi matin	19/07/2021	9h00	9h30	12h30	12 dont 4 non exploitables = 8 (dont 4 avec température de peau mesurée)
Mardi matin	20/07/2021	9h00	9h30	12h30	12 (dont 4 avec température de peau mesurée)
Mardi après-midi	20/07/2021	14h00	14h30	17h30	11 (dont 4 avec température de peau mesurée)
Mercredi matin	21/07/2021	9h00	9h30	12h30	11 (dont 4 avec température de peau mesurée)
Mercredi après-midi	21/07/2021	14h00	14h30	17h30	12 (dont 4 avec température de peau mesurée)
Jeudi matin	22/07/2021	9h00	9h30	12h30	12 (dont 4 avec température de peau mesurée)
Jeudi après-midi	22/07/2021	14h00	14h30	17h30	11 et 1 abandon = 10 (dont 4 avec température de peau mesurée)
Vendredi matin	23/07/2021	9h00	9h30	12h30	12 (dont 4 avec température de peau mesurée)
Vendredi après-midi	23/07/2021	14h00	14h30	17h30	5 (dont 4 avec température de peau mesurée)

Tableau 23 : Répartition des sujets dans les différentes salles.

<p>Salle FAÇADE TEST 1 (« test room 1 »)</p> <p>2 personnes équipés de capteurs de température de surface de peau.</p>	<p>Salle FAÇADE TEST 2 (« test room 2 »)</p> <p>2 personnes Salle équipée d'une caméra thermique.</p>	<p>MAISON EUREKA (« living lab 1 »)</p> <p>rez de chaussée , salle 1</p> <p>2 personnes</p>	<p>MAISON EUREKA (« living lab 2 »)</p> <p>étage, salle 2</p> <p>2 personnes</p>	<p>MAISON EUREKA (« living lab 3&4 »)</p> <p>étage, salles 3 et 4</p> <p>4 personnes en rotation entre les 2 salles</p>
---	--	--	---	--

Pour participer, les sujets doivent venir avec une tenue spécifique qui est identique pour tout le monde et permet d'éliminer un facteur de variation dans la perception du confort thermique lié aux vêtements. Cette tenue facilite aussi l'installation des capteurs thermiques de peau. La tenue est composée de :

- Sous-vêtements,
- Short ou jupe,
- T-shirt d'été léger,
- Chaussettes d'été à hauteur de la cheville,
- Chaussures.

Des habitudes de vie ou activités peuvent modifier la perception du confort thermique, afin d'éviter ces variations, il a été demandé que les sujets, 24 heures avant :

- Évitent la pratique d'un exercice intense,
- Évitent la prise de boissons alcoolisées ou des boissons énergisantes,
- Évitent de manger des repas trop copieux,
- Respectent un horaire de sommeil régulier.

3.2.1 Le recrutement des participants

Dans le but d'obtenir des résultats significatifs et appliquer des statistiques robustes, l'étude a été réalisée avec 97 participants, dont 93 exploitables pour une cible initiale de 90.

La société « rcp design global » (www.rcp.fr) a eu en charge le recrutement des participants. Elle était chargée de cibler une population entre 20 et 50 ans avec un ratio homme/femme équilibré. Les critères de recrutement appliqués sont donc le genre et dans un second temps l'âge. Afin de s'affranchir de potentielles différences de perceptions dû à l'âge les personnes de plus de 50 ans ont été exclues.

Lors du recrutement, les participants ont répondu à un questionnaire afin de collecter des informations supplémentaires pouvant affecter la perception du confort thermique :

- Quel est votre taille en mètre ?
- Quel est votre poids en kg ?

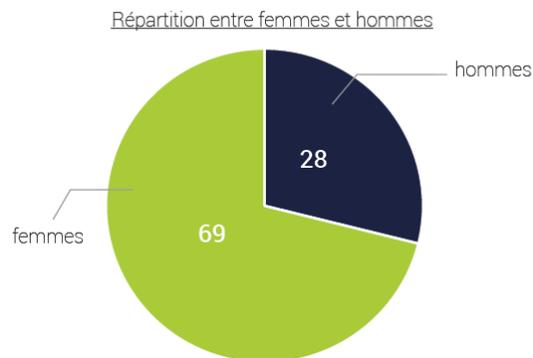
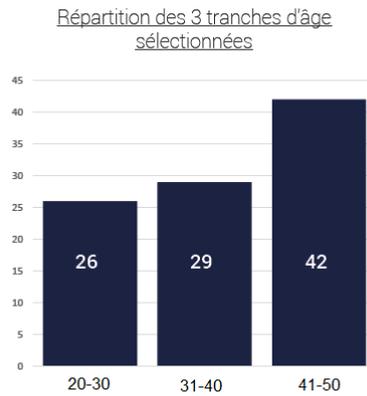


Figure 49 : Répartition des sujets par âge et sexe.

3.3 Métrologie

Au cours des tests, des données environnementales, physiologiques (température de la peau) et subjectives (questionnaires de confort thermique) sont mesurées chaque minute (collectées toutes les 10 minutes pour les questionnaires). Chaque pièce est équipée d'un mât de confort offrant la possibilité de mesurer la température de l'air, la température moyenne de rayonnement, l'humidité, la concentration de CO₂ ainsi que la vitesse d'air et la luminosité.

La température de peau, seule donnée physiologique d'intérêt, était mesurée selon deux méthodes :

- 1) Méthode sans contact avec une caméra thermique infra-rouge (Figure 50) ;
- 2) Méthode avec des thermocouples (Figure 51) de type T, communément appelé Cuivre/Constantan thermocouples, ayant un diamètre de 0,2 mm et positionnés sur les mains/bras/cou/genoux/tibia/mollet. Les thermocouples sont collés à la peau avec du ruban adhésif médical.

La température de peau n'est mesurée que sur une fraction des sujets (voir Tableau 22).



Figure 50 : Mesure de la température de la peau des sujets avec la méthode sans contact par caméra thermique.



Figure 51 : Mesure de la température de la peau des sujets avec la méthode des thermocouples directement apposés sur les différentes parties du corps.

Le questionnaire de confort thermique comprend 3 questions :

1. *Comment vous sentez-vous en ce moment précis ?*

- Très Froid Froid Légèrement Froid Ni Chaud Ni Froid Légèrement Chaud Chaud
 Très Chaud

2. *Trouvez-vous cela... ?*

- Très Confortable Confortable Légèrement Confortable Légèrement Inconfortable Inconfortable Très Inconfortable

3. *En ce moment, préféreriez-vous avoir... ?*

- Beaucoup Plus Froid Plus Froid Un Peu Plus Froid Sans Changement Un Peu Plus Chaud
 Plus Chaud Beaucoup Plus Chaud

3.4 Résultats

Dans cette section, nous montrons les résultats pour les 4 différents scénarios testés. Nous avons répété les deux scénarios de température cyclique dans la FAÇADE TEST et la MAISON EUREKA. Alors que les variations de température étaient identiques dans les deux conditions, la vitesse de l'air était inférieure à 0,1 m/s dans la FAÇADE TEST (notée « test room » dans les figures suivantes), tandis que dans la MAISON EUREKA (notée « living lab » par la suite), la vitesse moyenne de l'air était d'environ 0,3 m/s. Cela a eu un effet notable sur le confort thermique des sujets, qui ont senti l'ambiance de la MAISON EUREKA plus froide. Par conséquent, les résultats de la FAÇADE TEST et du MAISON EUREKA sont analysés séparément.

3.4.1 Scenario de variation cyclique no 1

Dans la Figure 52 et la Figure 53, nous comparons le vote de sensation thermique des sujets avec le PMV prédit par Fanger en rouge. Nous pouvons remarquer que le PMV fonctionne bien dans des conditions stables et pendant les phases de réchauffement. Cependant, pendant les phases de refroidissement, les sujets ont plus froid que ce que prédit le modèle PMV. En outre, les sujets féminins ont tendance à sentir plus froid que les sujets masculins, ce qui est particulièrement évident pendant les phases de refroidissement. La Figure 54 montre la température moyenne de peau mesurée dans le FAÇADE TEST. La température moyenne de peau des femmes est plus basse que celle des hommes, ce qui signifie que la différence de sensation thermique peut s'expliquer par des différences physiologiques.

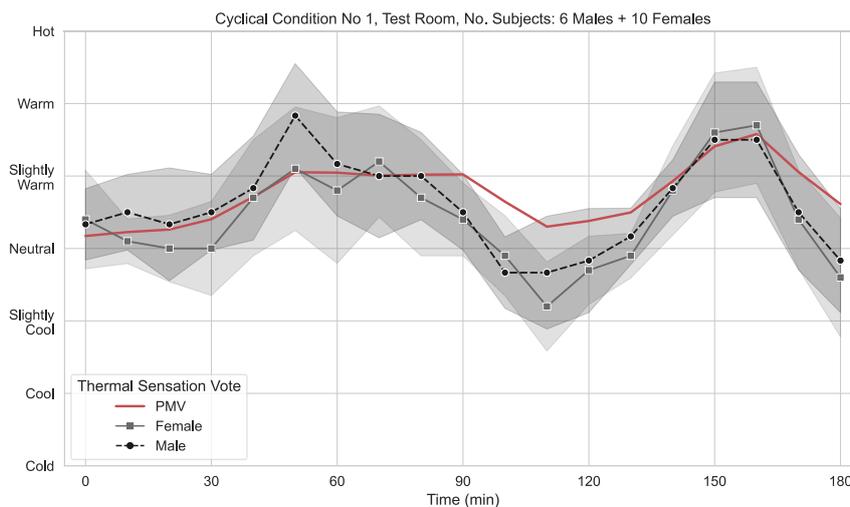


Figure 52 : Scenario de variation cyclique de température no 1 (« Cyclical Condition No 1 ») dans les salles de la FAÇADE TEST (« test room 1&2 »).

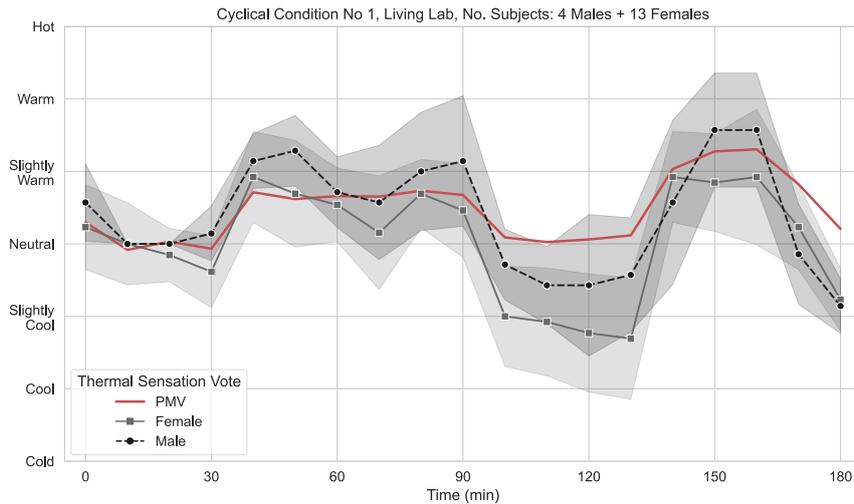


Figure 53 : Scenario de variation cyclique de température no 1 (« Cyclical Condition No 1 ») dans les salles de la MAISON EUREKA (« living lab 1&2 »).

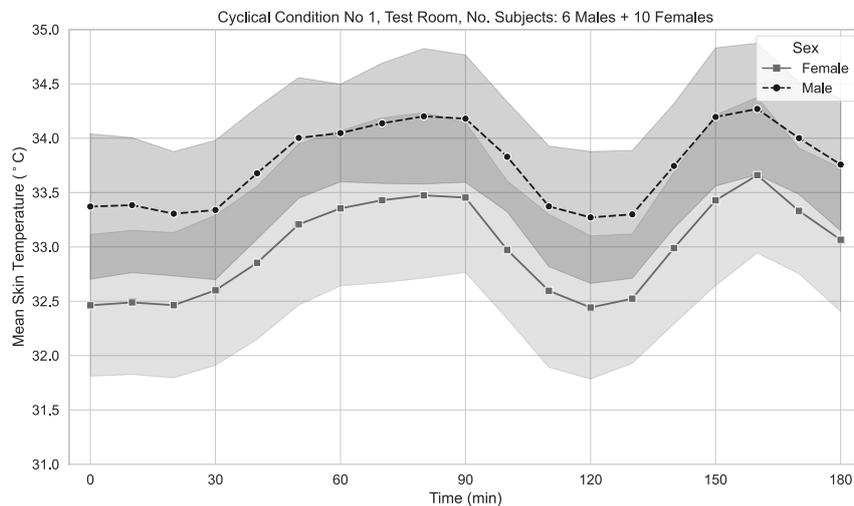


Figure 54 : Température moyenne de peau pour sujets féminins et masculins pendant la variation cyclique de température no 1 (« Cyclical Condition No 1 ») dans les salles de la FAÇADE TEST (« test room 1&2 »).

3.4.2 Scenario de variation cyclique no 2

Dans les Figure 55 and Figure 56, nous observons un schéma similaire à celui observé dans la section précédente, les femmes ayant tendance à sentir plus froid que les hommes lors des phases de refroidissement. On peut également observer que la vitesse de l'air plus élevée dans la MAISON EUREKA par rapport à la FAÇADE TEST contribue à une plus grande différence entre le vote de sensation thermique et les prédictions PMV. Cela est probablement dû au fait qu'une vitesse d'air élevée induit des gradients de refroidissement plus importants sur la température de peau.

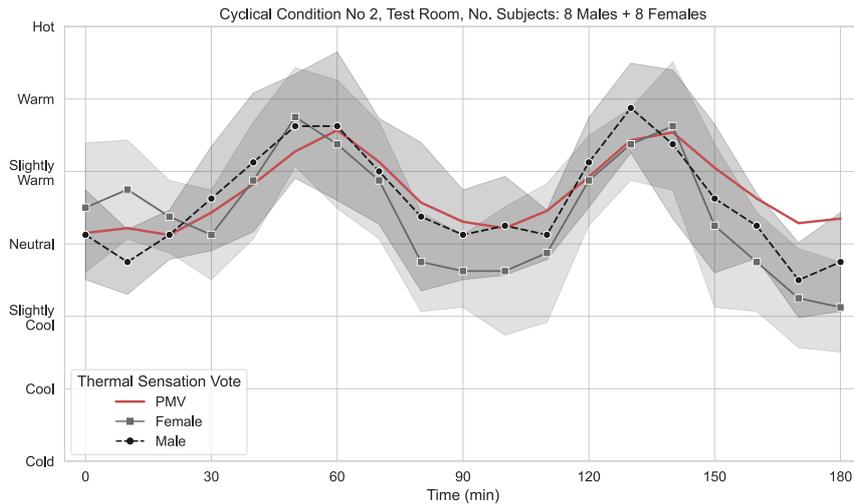


Figure 55 : Scenario de variation cyclique de température no 2 (« Cyclical Condition No 2 ») dans les salles de la FAÇADE TEST (« test room 1&2 »).

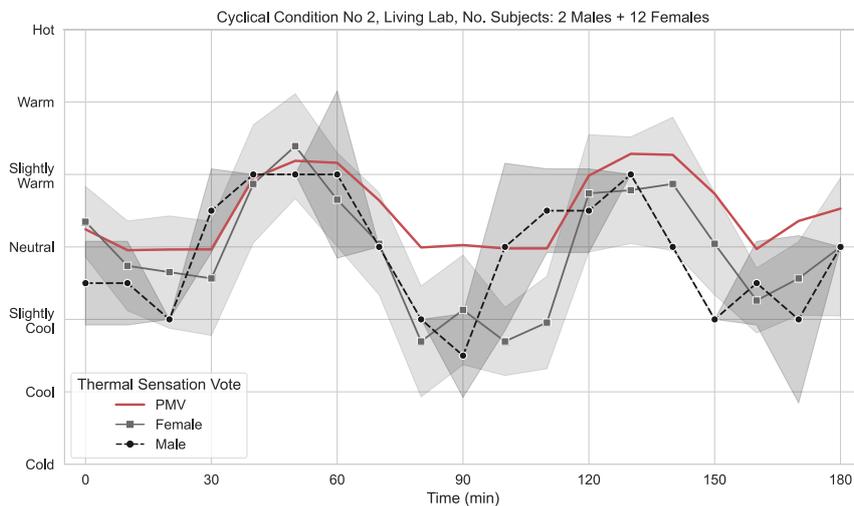


Figure 56 : Scenario de variation cyclique de température no 2 (« Cyclical Condition No 2 ») dans les salles de la MAISON EUREKA (« living lab 1&2 »).

La sensation thermique peut être considérée comme la dimension objective de la sensation thermique tandis que le confort thermique est une dimension hédonique plus complexe qui peut être plus directement liée au comportement. Dans la Figure 57, nous montrons donc la relation entre le taux d'insatisfaction (dérivé de la question sur le confort thermique) et le PPD de Fanger. En particulier, nous montrons le taux d'insatisfaction à la fois pendant le refroidissement et le réchauffement pendant les conditions testées dans la FAÇADE TEST. Il est à noter ici que les phases de refroidissement dans la FAÇADE TEST correspondaient à des conditions d'alliesthesia thermique positive (diminution de l'inconfort due au refroidissement) tandis que les phases de réchauffement correspondaient à des conditions d'alliesthesia négative (augmentation de l'inconfort due au réchauffement). D'après la Figure 57, il est intéressant de noter que dans des conditions d'alliesthesia positive, les gens sont plus satisfaits que ce que prédit le PPD de Fanger, tandis que dans des conditions d'alliesthesia négative, les gens sont moins satisfaits que ce que prédit le PPD de Fanger.

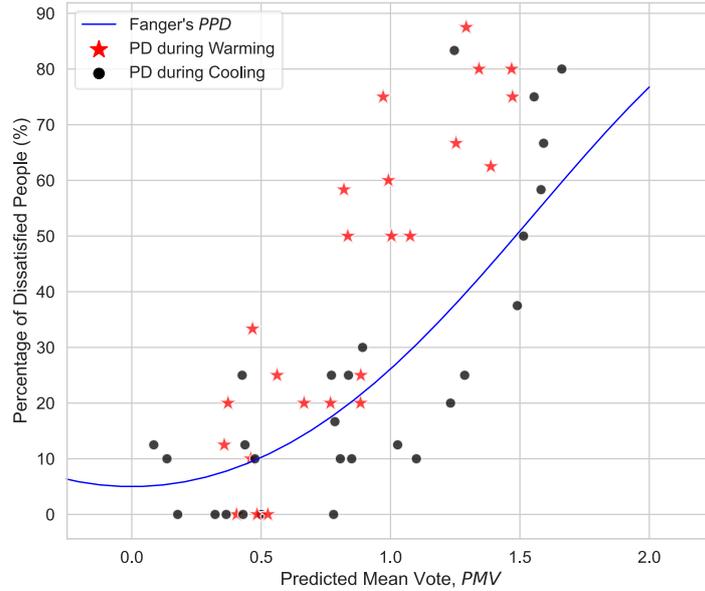


Figure 57 : PPD de Fanger et taux d'insatisfaction pendant la variation cyclique de température no 1 et no 2 (« Cyclical Condition No 1 and No 2 ») dans les salles de la FAÇADE TEST (« test room 1&2 »).

3.4.3 Scenario de variation de température du au changement de salle

Dans cette section, nous analysons les données recueillies lorsque les sujets se déplacent entre des pièces caractérisées par des températures différentes. Dans ce cas précis, les conditions dynamiques ont été plus intenses que celles rencontrées lors des changements cycliques de température. La prédiction du modèle PMV de Fanger n'est pas bonne lorsque les sujets se déplacent dans la pièce neutre qui est perçue comme légèrement fraîche.

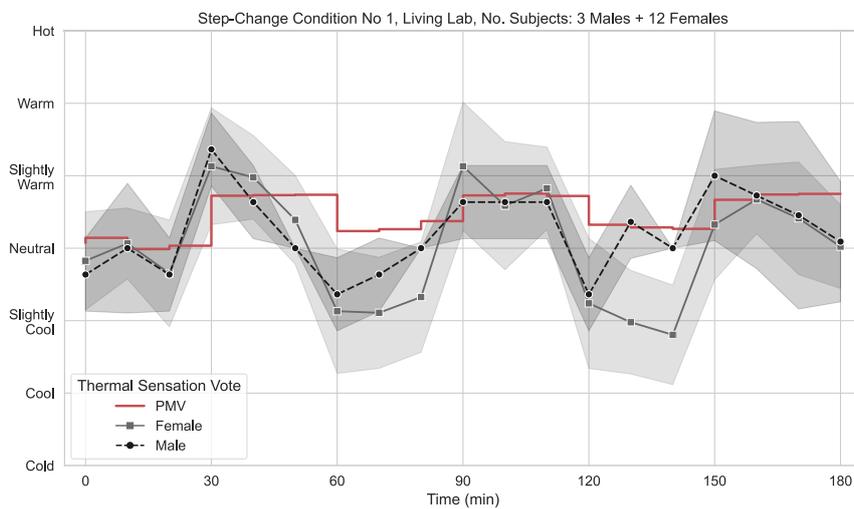


Figure 58 : Scenario de variation de température no 1 due au changement de salle (« Step-change Condition No 1 ») dans les salles de la MAISON EUREKA (« living lab 3&4 »).

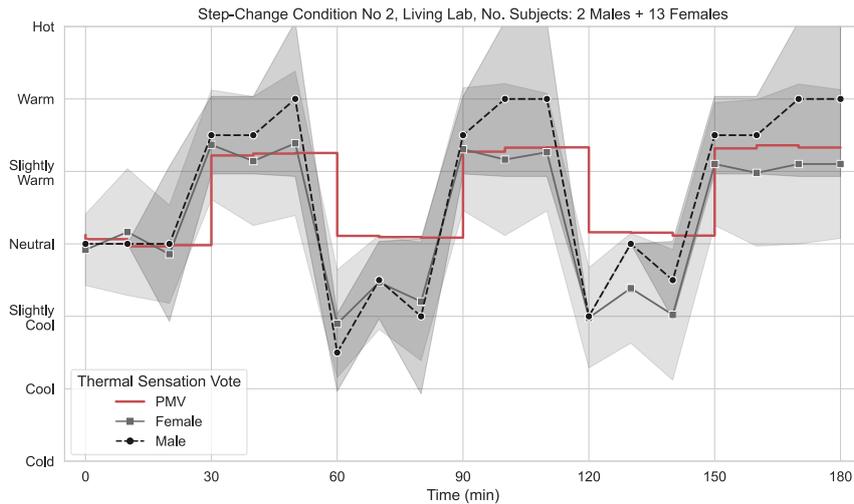


Figure 59 : Scenario de variation de température no 2 due au changement de salle (« Step-change Condition No 2 ») dans les salles de la MAISON EUREKA (« living lab 3&4 »).

Dans toutes les figures précédentes, nous pouvons voir que les femmes ont généralement plus froid que les hommes lors de phases de refroidissement, ce qui peut être directement expliqué par les différences de température de peau. Dans la Figure 60, nous avons exploré les différences entre les sexes en examinant la relation entre la sensation thermique et le confort (satisfaction) pour les hommes et les femmes. D'après la Figure 60, nous pouvons observer que les femmes ont tendance à être plus satisfaites que les hommes lors de sensations chaudes, tandis que les hommes sont plus satisfaits lors des sensations froides.

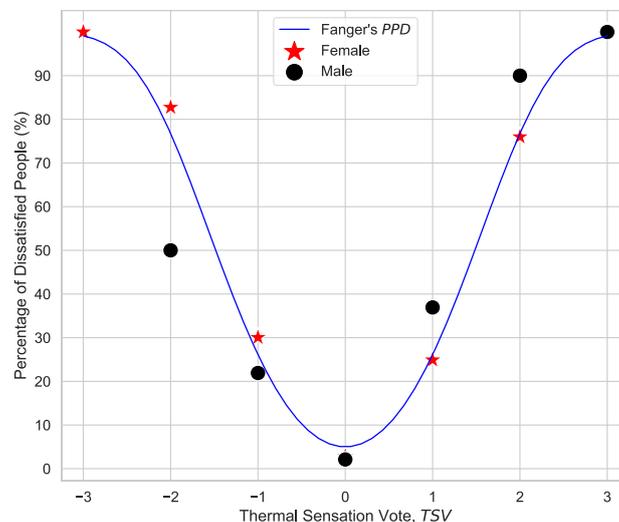


Figure 60 : PPD de Fanger et taux d'insatisfaction pour les hommes et femmes pour toutes les variations et salles confondues.

3.5 Conclusion

Nous avons mené des expériences de confort thermique sur plus de 90 participants dans des conditions dynamiques contrôlées afin d'évaluer la capacité du modèle de Fanger à prédire la sensation thermique et le confort thermique dans ce type de conditions. Nous avons constaté que le modèle de Fanger fonctionne bien lors de phases de réchauffement, mais qu'il surestime la sensation thermique en cas de refroidissement. Ceci est particulièrement évident pour les sujets féminins et

lorsque la vitesse de l'air est supérieure à 0,1 m/s. Les différences observées entre les sexes en matière de sensation thermique dynamique peuvent être expliquées en termes de température cutanée, la femme ayant une température cutanée plus basse que l'homme en raison de différences morphologiques et fonctionnelles au niveau physiologique. Nous avons également comparé le modèle PPD de Fanger avec le taux d'insatisfaction et observé que le phénomène d'alliesthésie thermique modifie la relation entre PMV et PPD. Enfin, nous avons constaté que les femmes sont plus satisfaites que les hommes sous des sensations thermiques chaudes, tandis que les hommes sont plus satisfaits que les femmes sous des sensations thermiques froides. Ainsi, des différences entre les sexes sont observées tant au niveau de la sensation thermique que du confort. Ces résultats soulignent la nécessité d'adapter le modèle PMV pour tenir compte des différences entre les sexes et de l'effet dynamique. Ils soulignent également la nécessité de modifier les relations PPD-PMV pour rendre compte des phénomènes d'alliesthésie thermique.

Conclusion générale

L'ensemble des campagnes expérimentales effectuées dans le cadre de ce programme a permis d'évaluer différents aspects relatifs à la valorisation du confort thermique et à la QAI vis-à-vis des actions de rénovation énergétique.

La première campagne sur site avait pour objectif d'évaluer la possibilité de mesurer sur site les effets d'une rénovation énergétique à l'aide des indicateurs définis dans le livrable 3.5 avec des instruments scientifiques de référence et des capteurs à bas coût. Une des principales difficultés de cette approche est que, contrairement aux travaux numériques, les conditions extérieures et les scénarios d'occupations ne sont pas identiques avant et après rénovation. Ceci a révélé l'intérêt d'évaluer les indicateurs de confort et de QAI sur de longues périodes et ont montré, dans ce cadre, le potentiel des capteurs à bas coût.

Les études en laboratoire (réalistes et contrôlées) apportent quelques éléments de réponse permettant d'indiquer en premier lieu qu'une bonne connaissance du fonctionnement et de l'information donnée par les capteurs de mesure est primordiale pour valoriser le confort et la qualité de l'air. Le risque principal est un désintérêt de l'information si celle-ci est fautive ou imprécise, pouvant même mener jusqu'à une contre-productivité où l'utilisateur pourrait émettre des actions néfastes sur la QAI ou les économies d'énergie. Le développement en constante évolution des micro-capteurs ces dernières années laisse présager un nombre important de nouvelles solutions afin d'obtenir un boîtier de monitoring adapté.

Cependant, avant de proposer ce type de solution à des non-initiés, un besoin de garantie de fiabilité sera nécessaire, ce qui imposera une vérification selon des normes existantes ou à construire. Ainsi les paramètres mesurés (par exemple formaldéhyde ou dioxyde de carbone) devront pouvoir apporter une information relativement précise et robuste afin que des évaluations via des indices de QAI ou confort puissent être obtenus et faciliter la compréhension pour les non-initiés.

De plus, même si la justesse des capteurs de QAI mesurant les COVT n'est pas démontrée comme fiable dans cette étude, ils peuvent avoir une utilité pédagogique. En effet, la visualisation des épisodes de pollution peut aider les usagers à évaluer à priori la présence ou non d'une pollution et mettre en perspective, sous réserve d'une information pertinente et adaptée, des actions correctrices.

Les capteurs à bas coût ont démontré cependant un réel potentiel quant aux pollutions particulières. Les résultats obtenus ont montré que l'estimation des indicateurs de QAI est plus permissive que l'étude en temps réel d'épisodes de pollution, du fait d'un moyennage sur le long terme et d'effets de compensations. Les stations commerciales grand public étudiées ont démontré une réelle capacité à évaluer la QAI dans le cadre de la pollution particulière alors que les capteurs bruts étudiés ont eu tendance à sous-estimer l'exposition des occupants.

La campagne expérimentale concernant l'évolution de la sensation de confort thermique sous des sollicitations variables a montré les limites du modèle de confort thermique de Fanger (PMV, PPD) classiquement utilisé pour l'évaluation du confort thermique des ambiances intérieures. Rappelons que c'est le modèle utilisé pour évaluer le confort thermique à partir des résultats de la simulation numérique (tâches 4 et 5 du volet 3 du programme Smart-Réno). Plus précisément, ce modèle a été utilisé pour l'hiver et une variante de celui-ci (PMV*, PPD*) pour le printemps et l'automne plus adapté à des conditions variables. Cependant, aucun de ces modèles ne considère ni le sexe des occupants, ni, et surtout, l'alliesthésie thermique. La prise en compte de l'alliesthésie thermique montre une plus grande variation de la sensation thermique. Ainsi, on peut supposer que les faibles effets des actions

de rénovation énergétique sur le confort thermique observés lors de l'étude numérique pourraient être en partie sous-estimés.