



HAL
open science

Suivi longitudinal de la qualité d'air, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles de deux bâtiments performants en énergie sur trois ans

Mickaël Derbez, Bruno Berthineau, Valérie Cochet, Murielle Lethrosne, Sharmila Mahendran, Corinne Mandin, Cécile Pignon, Jacques Riberon, Guillaume Wyart, Séverine Kirchner

► To cite this version:

Mickaël Derbez, Bruno Berthineau, Valérie Cochet, Murielle Lethrosne, Sharmila Mahendran, et al.. Suivi longitudinal de la qualité d'air, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles de deux bâtiments performants en énergie sur trois ans. Rapport ESE_SB/ 2013-035, Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), 84 avenue Jean Jaures BP2, 77447 Marne-la-Vallée cedex 2. 2013. <hal-05348256>

HAL Id: hal-05348256

<https://hal.science/hal-05348256v1>

Submitted on 5 Nov 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

**Programme d'études et de recherche de
l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur**

**Suivi longitudinal de la qualité d'air, du
confort des occupants et des
consommations énergétiques réelles de
deux bâtiments performants en énergie sur
une durée de trois ans**

Convention 2011

Rapport final

**Mickaël DERBEZ, Bruno BERTHINEAU, Valérie COCHET, Murielle
LETHROSNE, Sharmila MAHENDRAN, Corinne MANDIN, Cécile PIGNON,
Jacques RIBERON, Guillaume WYART, Séverine KIRCHNER**

Juin 2013

**Programme d'études et de recherche de
l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur**

**Suivi longitudinal de la qualité d'air, du
confort des occupants et des
consommations énergétiques réelles de
deux bâtiments performants en énergie sur
une durée de trois ans**

Convention 2011

Rapport final

**Mickaël DERBEZ, Bruno BERTHINEAU, Valérie COCHET, Murielle
LETHROSNE, Sharmila MAHENDRAN, Corinne MANDIN Cécile PIGNON,
Jacques RIBERON, Guillaume WYART, Séverine KIRCHNER**

**Université Paris-Est, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment,
Direction Santé – Confort**

Rapport ESE_SB/ 2013-035

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent document, faite sans l'autorisation du CSTB est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1er juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

*Toute citation d'extraits ou reproduction doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : **Derbez M. Berthineau B., Cochet V., Lethrosne M., Mahendran S., Mandin C., Pignon C., Riberon J. Wyart G. Kirchner S. 2013. Suivi longitudinal de la qualité d'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles de deux bâtiments performants en énergie sur une durée de trois ans, N° ESE-SB / 2013-035, Juin 2013, Rapport final, CSTB, 95 pages.***

Remerciements

Les auteurs de ce rapport souhaitent remercier :

- les occupants des deux maisons investiguées pour leur grande disponibilité, leur implication importante et leur participation active à cette étude ;
- les laboratoires d'analyses suivants : Laboratoire POLLEM du CSTB pour l'analyse des prélèvements COV et aldéhydes, Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris (LHVP) pour la pesée des filtres PM_{2.5}, Laboratoire DOSIRAD pour l'analyse des prélèvements radon.

Publication scientifique

Cette étude a donné lieu à une publication dans une revue scientifique à comité de lecture dont les références sont les suivantes :

- Mickaël Derbez, Bruno Berthineau, Valérie Cochet, Cécile Pignon, Jacques Ribéron, Guillaume Wyart, Corinne Mandin, Séverine Kirchner, A 3-year follow-up of indoor air quality and comfort in two energy-efficient houses, *Building and Environment*, Volume 82, December 2014, Pages 288-299, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.028>.

Résumé

L'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) mène, depuis 2008, un programme entièrement dédié aux bâtiments performants en énergie. Le travail présenté ici traite du suivi dans le temps de deux habitations performantes en énergie effectué par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

Un outil d'évaluation de la qualité sanitaire des habitations et du confort des occupants a été élaboré et testé dans sept maisons performantes en énergie. La qualité de l'air intérieur (QAI), le confort des occupants et les consommations d'énergie réelles ont fait l'objet d'un suivi longitudinal dans deux de ces sept maisons, sur une période de 3 ans depuis 2009 : à réception (phase d'innoculation), puis en situation d'occupation en été et en hiver sur 3 saisons consécutives. Ces deux habitations à ossature bois sont équipées d'un système de ventilation mécanique double flux et d'un poêle-cheminée au bois comme principal moyen de chauffage.

A l'achèvement de leur construction, ces deux habitations montrent une perméabilité à l'air (0,11 et 0,19 m³.h/m² sous 4Pa) très inférieure à celle exigée dans les réglementations thermiques 2005 (0,8 m³.h/m²) et 2012 (0,6 m³.h/m²).

En terme de gestion de l'air, les taux de renouvellement d'air assurés par les systèmes spécifiques de ventilation sont différents d'un bâtiment à l'autre. Pour l'un d'eux, les taux mesurés atteignent les valeurs de l'étude de conception du bureau d'études techniques et la valeur médiane des taux observés dans les logements français équipés de VMC. Pour l'autre, les taux mesurés sont inférieurs à ces valeurs. Il a été observé ponctuellement, sur certaines bouches d'extraction après nettoyage des filtres que les débits d'air mesurés pouvaient être conformes aux débits réglementaires. Les retours d'expériences sur les systèmes de ventilation mécanique en place montrent la nécessité d'améliorer encore leur robustesse et la simplicité d'usage vis-à-vis des occupants. En particulier, le dérèglement intempestif et trop fréquent des débits d'air dû à la modification d'ouverture des obturateurs des bouches, à l'occasion de leur nettoyage par exemple, doit être supprimé et le choix automatique des vitesses de fonctionnement – donc des débits d'air – doit pouvoir être reprogrammé aisément de façon à être adapté au mode vie de chacun notamment grâce à des manuels plus faciles d'utilisation. Les systèmes de ventilation devraient également être contrôlés et entretenus régulièrement et la maintenance courante (changement des filtres,..) confiée à des spécialistes plutôt qu'aux occupants. Ces derniers pratiquent, en été, l'aération par ouverture des fenêtres, aussi bien de jour comme de nuit (surventilation nocturne).

En terme de confinement de l'air, les concentrations médianes du CO₂ mesurées dans les conditions d'occupation étudiées restent en dessous des recommandations du règlement sanitaire départemental type de ne pas dépasser 1 300 ppm en condition habituelles d'occupation et 1 000 ppm dans les locaux où on peut fumer.

En terme de qualité d'air intérieur, le suivi des indicateurs de qualité d'air intérieur pour les deux habitations, montre que les concentrations en particules (PM_{2.5} et nombre de particules [0,3-20 µm]) sont plus élevées en phase d'occupation qu'en phase d'innoculation, notamment du fait des activités humaines, sources d'émissions de particules. Les concentrations particulières

ainsi que les teneurs en acétaldéhyde sont plus élevées en hiver qu'en été, en partie du fait de la combustion du bois de chauffage dans le poêle-cheminée. Les concentrations élevées en aldéhydes (hexaldéhyde, formaldéhyde, acétaldéhyde) et de terpènes (alpha-pinène et limonène) pour les phases d'inoccupation et d'occupation semblent liées à l'utilisation de bois comme matériau de construction. La diminution de la pollution chimique entre la phase d'inoccupation et la phase d'occupation est possiblement liée à la diminution progressive des émissions liées aux bâtiments et à la gestion de l'air : ventilation continue et contrôlée des locaux et aération complémentaire pratiquée par les occupants en été. En phase d'occupation, seules les concentrations d'hexaldéhyde, de formaldéhyde et de benzaldéhyde sont relativement stables. Certains composés voient leur concentration augmenter suite à certaines activités humaines (n-butylacétate lors de l'utilisation de produits cosmétiques, terpènes lors de l'introduction de meubles neufs en bois, hydrocarbures aromatiques après l'application de vernis). L'acide acétique absent en phase d'inoccupation est apparu au cours de la phase d'occupation alors que le n-décane et le n-undécane semblent disparaître au cours du temps. Comparativement à l'état de la pollution dans les logements français, les concentrations médianes des composés chimiques en phase d'occupation oscillent autour de celles mesurées à l'échelle du parc, voire sont supérieures, possiblement du fait du caractère « neuf » des deux constructions (matériaux de construction, d'isolation, de décoration, etc.).

En terme de confort, les occupants sont globalement satisfaits du confort thermique et acoustique de leur habitation bien que des gênes aient été identifiées : surchauffe thermique en été en l'absence de protections solaires extérieures, température froide en hiver le matin ou suite à l'absence de chauffage pendant une courte période d'absence, température excessive en hiver due à l'impossibilité de réguler le chauffage au bois, bruit lié au fonctionnement du système spécifique de ventilation à moyenne et grande vitesse.

En terme de consommation énergétique, les deux habitations ont des consommations annuelles globales en énergie finale atteignant le tiers de la consommation actuelle des résidences principales françaises. Par ailleurs, comparées aux exigences conventionnelles des deux labels BBC-Effinergie et PassivHaus, ces consommations se rapprochent de leur objectif de référence respectif. Le suivi longitudinal des consommations montre des variations des consommations d'énergie d'une année sur l'autre différentes d'une habitation à l'autre. La diminution dans le temps des consommations d'énergie du chauffage pour BBC3 peut s'expliquer en partie par une moindre, ou meilleure utilisation de ce type de chauffage. L'augmentation des consommations d'énergie de chauffage pour PAS3 peut s'expliquer en partie par une plus grande utilisation, la deuxième et la troisième année, d'un bois de chauffage beaucoup plus économique selon les occupants. Le suivi montre également, entre la première et la troisième année, des transferts d'énergie (bois vers électricité pour BBC3 et électricité vers bois pour PAS3) traduisant une adaptation des modes de chauffage au fil du temps. Plusieurs années sont nécessaires aux occupants pour bien s'approprier les équipements de leur logement et optimiser leur gestion.

Mots-clés : outil d'évaluation, bâtiment d'habitation performant en énergie, ventilation mécanique double flux, qualité d'air intérieur, confort thermique, confort acoustique, consommation d'énergie, suivi longitudinal

Table des matières

1. RAPPEL DU CONTEXTE	15
2. RAPPEL DES ACTIONS REALISEES ET DES PRINCIPAUX RESULTATS	16
3. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	18
4. SUIVI LONGITUDINAL DE DEUX BATIMENTS PERFORMANTS EN ENERGIE	19
4.1 Choix des deux bâtiments	19
4.2 Descriptif synthétique des deux bâtiments	19
4.3 Mise en œuvre du suivi longitudinal.....	21
5. MESURES AERAIQUES DES BATIMENTS	23
5.1 Perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments en fin de construction	23
5.2 Mesure du taux de renouvellement d'air (TRA) lors de l'emménagement des occupants	23
5.3 Fonctionnement des systèmes de ventilation mécanique contrôlée double flux au cours du suivi	24
6. EVOLUTION TEMPORELLE DU CONFINEMENT DE L'AIR ET DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR ...	31
6.1 Confinement de l'air	31
6.2 Qualité de l'air intérieur	33
7. EVOLUTION TEMPORELLE DU CONFORT THERMIQUE DES OCCUPANTS	55
7.1 Etude de la température et de l'humidité relative de l'air au cours des enquêtes	55
7.2 Etude dynamique annuelle de la température de l'air	60
7.3 Evaluation du confort global	62
7.4 Evaluation du confort local	64
7.5 Evaluation du confort adaptatif	64
7.6 Perception du confort thermique par les occupants.....	68
8. EVOLUTION TEMPORELLE DU CONFORT ACOUSTIQUE DES OCCUPANTS	72
8.1 Mesure des niveaux de pression acoustique avec un sonomètre conventionnel	72
8.2 Mesure des niveaux continus équivalents de pression acoustique.....	73
8.3 confort acoustique perçu par les occupants	76
9. EVOLUTION TEMPORELLE DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE	78
9.1 Préambule	78
9.2 Évolution des factures d'énergie	79
9.3 Évolution des consommations par poste	80
9.4 Rapprochement des consommations d'énergie mesurées par rapport aux exigences énergétiques des labels visés	85
10. SYNTHESE.....	87
11. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	91
12. BIBLIOGRAPHIE	93

Liste des tableaux

Tableau 4-1 – Descriptif synthétique des deux bâtiments d’habitations performants en énergie sélectionnés pour le suivi longitudinal	20
Tableau 4-2 – Date d’emménagement et de réalisation des enquêtes des deux bâtiments retenus pour le suivi longitudinal	22
Tableau 5-1 – Valeurs de perméabilité à l’air de l’enveloppe des deux bâtiments communiquées par les propriétaires et comparaison avec les exigences des labels visés	23
Tableau 5-2 – Mesure du taux de renouvellement d’air (TRA) des bâtiments (vol/h) à l’emménagement des occupants selon les vitesses de fonctionnement de la VMC double flux et comparaison avec les valeurs théoriques déterminées à partir des études des BET	24
Tableau 5-3 – Principales interventions effectuées sur les systèmes de VMC double flux au cours du suivi longitudinal	25
Tableau 5-4 – Utilisation du système de VMC double flux par les occupants au cours du suivi longitudinal	26
Tableau 5-5 – Mesure des débits d’air extrait selon la vitesse de la VMC au cours du suivi longitudinal de l’habitation BBC3	27
Tableau 5-6 – Mesure des débits d’air extrait selon la vitesse de la VMC au cours du suivi longitudinal de l’habitation PAS3.....	28
Tableau 5-7 – Comparaison des mesures de débits d’air extrait avec le débit exigé dans les pièces de service par l’arrêté du 24 mars 1982.....	30
Tableau 5-8 – Comparaison des mesures de débits d’air extrait avec le débit minimal cuisine dans les logements de 3 pièces principales et plus par l’arrêté du 24 mars 1982	30
Tableau 5-9 – Comparaison des mesures de débits d’air extrait avec les débits théoriques de l’étude de ventilation du bureau d’études techniques	30
Tableau 6-1 – Durée de mesure et données statistiques descriptives des concentrations en CO ₂ (ppm) mesurées dans chaque bâtiment, dans deux pièces, selon chaque phase d’occupation	31
Tableau 6-2 – Comportement des occupants par rapport à l’ouverture de la fenêtre de leur logement au cours du suivi, selon la saison et les périodes jour/nuit.....	33
Tableau 6-3 – Durée de mesure et données statistiques descriptives des concentrations en COVT (µg/m ³ équivalent toluène) mesurées au cours du suivi dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque phase.....	34
Tableau 6-4 – Concentrations hebdomadaires (µg/m ³) des composés organiques volatils et des aldéhydes identifiés en inoccupation et en occupation dans la chambre des deux habitations selon les saisons et les phases d’enquêtes (LD : limite de détection, LQ : limite de quantification, LI : limite d’identification fixée à 2 µg/m ³ , NQ : non quantifié car co-élution du composé)	37
Tableau 6-5 – Durée de mesure et données statistiques descriptives des concentrations monoxyde de carbone (ppm) mesurées dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque période de chauffe.....	45
Tableau 6-6 – Concentration massique des PM _{2.5} mesurées dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque saison et chaque phase	46
Tableau 6-7 – Durée de mesure et données statistiques descriptives des concentrations en nombre de particules de diamètre [0,3-1 µm[(nombre par litre d’air) mesurées dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque phase	48
Tableau 6-8 – Durée de mesure et données statistiques descriptives des concentrations en nombre de particules de diamètre [1-20 µm] (nombre par litre d’air) mesurées dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque phase	48

Tableau 6-9 – Correspondance entre les indicateurs de QAI présentant un pic de concentrations (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ou en particule/litre pour PMN) et les activités pouvant impactées la QAI et reportées par les occupants des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes	51
Tableau 7-1 - Durée de suivi et données statistiques descriptives de la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) mesurée dans chaque bâtiment, selon deux saisons et dans deux pièces.....	57
Tableau 7-2 – Durée de suivi et données statistiques descriptives de l'humidité relative de l'air (%) mesurée dans chaque bâtiment, selon deux saisons et dans deux pièces	58
Tableau 7-3 – Valeur médiane prévisible de sensation thermique (PMV) par bâtiment selon la saison, en semaine et en week-end au cours des années	63
Tableau 7-4 - Pourcentage médian prévisible d'insatisfaits (PPD) par bâtiment selon la saison, en semaine et en week-end au cours des années.....	63
Tableau 7-5 – Pourcentages médians prévisibles de population gênée par la présence de courant d'air en hiver (HIV1, HIV2 et HIV3) et la différence verticale de température (tête-pied) dans le séjour de chaque bâtiment selon les années	64
Tableau 7-6 – Perception de la température et de l'humidité relative de l'air par les occupants âgés de plus de 10 ans de tous les bâtiments selon la saison	69
Tableau 7-7 - Perception du confort thermique global par les occupants âgés de plus de 10 ans de tous les bâtiments selon la saison	70
Tableau 7-8 - Perception des gênes locales par les occupants âgés de plus de 10 ans de tous les bâtiments selon la saison.....	71
Tableau 8-1 – Appréciation individuelle de l'ambiance sonore de chaque adulte selon les logements et les saisons au cours de la phase d'occupation	76
Tableau 9-1 – Calcul des degrés jour unifiés (DJU) par année calendaire pour les deux habitations sur les trois années de suivi et comparaison des DJU relevés à la station météorologique de Paris Montsouris.....	78
Tableau 9-2 – Estimation de la température intérieure moyenne ($^{\circ}\text{C}$) de confort pour les deux habitations sur les trois années de suivi.....	78
Tableau 9-3 – Ratio des consommations mensuelles des « autres usages » relevées en janvier et en juin des trois années de suivi pour BBC3	84
Tableau 9-4 – Ratio des consommations mensuelles des « autres usages » relevées en janvier et en juin des trois années de suivi pour PAS3.....	85

Liste des figures

Figure 5-1 – Photographies des filtres métalliques placées derrière les bouches d'extraction de la cuisine et de la salle de bain 2 de BBC3	29
Figure 6-1 – Concentrations hebdomadaires médianes de CO ₂ (ppm) mesurées dans les bâtiments et dans deux pièces au cours des enquêtes (Les tirets représentent les incertitudes de mesure de l'appareil)	32
Figure 6-2 – Concentrations hebdomadaires médianes des COVT (µg/m ³ équivalent toluène) mesurées en inoccupation et en occupation dans le séjour des deux habitations en fonction des saisons (A noter que du fait de l'échelle de l'axe des ordonnées, l'histogramme de la concentration mesurée en VID dans PAS3 est tronqué ; Les tirets représentent les incertitudes de mesure de l'appareil ; ☆ : pics de concentrations ; * résultat donné à titre informatif du fait de l'arrêt inexplicé de l'appareil de mesure au cours de l'enquête)	35
Figure 6-3 – Taux d'abattement entre la phase d'inoccupation et les phases d'occupation des concentrations hebdomadaires des 23 composés mesurées dans la chambre des deux habitations	41
Figure 6-4 – Stabilité temporelle des concentrations hebdomadaires de trois aldéhydes mesurés en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes (XX µg/m ³ : concentration médiane en phase d'occupation par habitation)	42
Figure 6-5 – Concentrations hebdomadaires de 15 composés organiques volatils et aldéhydes présentant des pics de concentrations (☆) mesurés en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes	43
Figure 6-6– Pic ponctuel des concentrations hebdomadaires du n-butylacétate mesurés en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes.	44
Figure 6-7– Concentrations hebdomadaires de l'acide acétique mesuré en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes.	44
Figure 6-8 - Concentrations hebdomadaires du n-décane et du n-undécane mesuré en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes.	44
Figure 6-9- Concentration hebdomadaire de l'acétaldéhyde mesuré en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes.	44
Figure 6-10 - Concentrations du CO (ppm) mesurées dans le séjour ouvert sur la cuisine de BBC3 au cours de l'enquête HIV2.	45
Figure 6-11 - Concentrations massiques des particules PM _{2,5} (µg/m ³) mesurées uniquement en occupation dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque saison et chaque phase et indication de la concentration médiane par habitation (p.i : prélèvement invalide, ☆:pics de concentration, med. : concentration médiane)	46
Figure 6-12 – Concentrations médianes du nombre de particules de diamètre [0,3-1µm] (nombre par litre d'air) mesurés dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque saison et chaque phase et indication de la concentration médiane par habitation (p.i : prélèvement invalide, ☆:pics de concentration, med. : concentration médiane) (Les tirets représentent les incertitudes de mesure de l'appareil)	49
Figure 6-13 - Concentrations médianes du nombre de particules de diamètre [1-20µm] (nombre par litre d'air) mesurés dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque saison et chaque phase et indication de la concentration médiane par habitation (p.i : prélèvement invalide, ☆:pics de concentration, med. : concentration médiane) (Les tirets représentent les incertitudes de mesure de l'appareil)	50

Figure 6-14 – Mesure en continu du nombre de particules [0.3-20µm] et de la concentration en CO (ppm) au cours de l'enquête HIV2 de BBC3.	50
Figure 6-15 – Rapports des concentrations annuelles des composés organiques volatils, des aldéhydes et des PM _{2,5} mesurées en situation d'occupation pendant 3 ans dans l'habitation BBC3 sur la concentration médiane des logements français	53
Figure 6-16 – Rapports des concentrations annuelles des composés organiques volatils, des aldéhydes et des PM _{2,5} mesurées en situation d'occupation pendant 3 ans dans l'habitation PAS3 sur la concentration médiane des logements français (n.c. : non calculé)	54
Figure 7-1 – Comparaison des températures médianes mesurées en été et en hiver dans les chambres et les autres pièces de BBC3 et PAS3 avec les médianes des températures des logements français en période de Hors Chauffe et de Chauffe (m.i. : mesure invalide)	59
Figure 7-2 – Comparaison des humidités relatives médianes mesurées en été et en hiver dans les chambres et les autres pièces de BBC3 et PAS3 avec les médianes des températures des logements français en période de Hors Chauffe et de Chauffe (m.i. : mesure invalide)	59
Figure 7-3 – Pourcentage mensuel de dépassement de la température mesurée en présence des occupants dans trois pièces (■ C_US ■ BUR 1 ■ CHB 2) de BBC3 de 2010 à 2012 par rapport au seuil d'inconfort d'hiver (graphique du haut) et au seuil d'inconfort d'été (graphique du bas).	61
Figure 7-4 – Pourcentage mensuel de dépassement de la température mesurée en présence des occupants dans trois pièces (■ C_US ■ BUR 1 ■ CHB 2) de PAS3 de 2010 à 2012 par rapport au seuil d'inconfort d'hiver (graphique du haut) et au seuil d'inconfort d'été (graphique du bas).	62
Figure 7-5 – Application du confort adaptatif selon la norme EN 15251 dans différentes pièces du bâtiment BBC3 en période estivale (juin-septembre de 2010 à 2012), en situation d'occupation et indication des classes de confort	66
Figure 7-6 – Application du confort adaptatif selon la norme EN 15251 dans différentes pièces du bâtiment PAS3 en période estivale (juin-septembre de 2010 à 2012), en situation d'occupation et indication des classes de confort. Les mesures de juillet et août 2012 sont manquantes.....	67
Figure 8-1 – Niveaux sonores moyens (dB(A)) dans chaque pièce des deux habitations (BBC3 et PAS3) selon les vitesses de fonctionnement de la VMC (A : arrêt, P :petite vitesse, M :moyenne vitesse, G ;grande vitesse). Les niveaux sonores mesurés à l'arrêt et à la petite vitesse de fonctionnement de la VMC inférieurs ou égaux à 30dB(A) n'ont pas été reportés sur ces graphiques.....	72
Figure 8-2 – LAeq et du LASmax global (50-1000Hz) par tiers d'octave pour chaque pièce de BBC3 en fonction de la vitesse de la VMC	74
Figure 8-3 – LAeq et du LASmax global (50-1000Hz) par tiers d'octave pour chaque pièce de PAS3 en fonction de la vitesse de la VMC	75
Figure 9-1 – Consommations annuelles 2010, 2011 et 2012 d'énergie finale (tous usages confondus) en kWh/m ² SHAB.an pour chaque bâtiment et comparaison avec la consommation annuelle en énergie finale des résidences principales françaises (ADEME, 2010).....	79
Figure 9-2- Consommations d'énergie primaire (kWh/m ² SHON/an) par poste de BBC3 et PAS3 sur les années 2010, 2011 et 2012.....	81
Figure 9-3- Répartition des consommations d'énergie primaire (kWh/m ² SHON/an) de BBC3 et PAS3 par poste sur les années 2010, 2011 et 2012	81
Figure 9-4 – Consommations mesurées par poste de 2010 à 2012 pour BBC3 et exprimées en kWh/m ² SHON en énergie primaire	82

Figure 9-5 - Consommations par poste mesurées de 2010 à 2012 pour PAS3 et exprimées en kWh/m² SHON en énergie primaire83

1. RAPPEL DU CONTEXTE

Pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007), « le réchauffement du système climatique est sans équivoque » et il est « très probablement » dû aux émissions de gaz à effet de serre (GES) des activités humaines. Le changement climatique est ainsi un enjeu pour tous les secteurs économiques. Celui du bâtiment doit limiter son empreinte écologique en réduisant les gaz à effet de serre et en utilisant des sources d'énergie alternatives moins dépendantes des énergies fossiles dont les gisements s'épuisent.

Le bâtiment (secteur résidentiel et tertiaire¹) est en effet le premier consommateur d'énergie en France (43 % de l'énergie finale loin devant les transports avec 31 % et l'industrie avec 23 %). Il représente 23 % des émissions nationales de gaz à effet de serre. Le secteur résidentiel est le plus énergivore, loin devant le tertiaire : deux tiers contre un tiers. La consommation moyenne annuelle du secteur résidentiel est de 240 kWh/m².an en énergie primaire (chauffage et eau chaude) (Grenelle de l'environnement, 2008).

Compte tenu de ces enjeux et de l'urgence à agir, la France a décidé de diviser par quatre ses émissions d'ici à 2050. Pour parvenir à ce résultat à long terme, des mesures ambitieuses ont été prises pour réduire les consommations d'énergie de 38 % d'ici 2020 dans le résidentiel et le tertiaire par rapport aux consommations existantes dans ces deux secteurs au moment de la loi de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement dite « Grenelle I » promulguée en 2009 (loi n° 2009-967 du 3 août 2009). Pour cela, un très vaste chantier de rénovation énergétique est engagé dans l'existant (la plus grande partie du parc), tandis qu'un véritable programme de rupture technologique s'impose dans le neuf (Grenelle de l'environnement, 2008). C'est ainsi que, depuis 2013, tous les bâtiments nouvellement construits doivent répondre à des exigences particulièrement ambitieuses de bâtiment économe en énergie, tandis que les bâtiments à énergie positive devraient se généraliser en 2020. La réglementation thermique « RT 2012 », applicable à ce jour, impose une consommation conventionnelle d'énergie primaire² pour le chauffage, le système de refroidissement, l'éclairage, la production d'eau chaude sanitaire et les auxiliaires (pompes et ventilateurs) des bâtiments neufs ne dépassant pas 50 kWh/m².an en moyenne, selon les conditions climatiques, des valeurs spécifiques étant fixées pour d'autres bâtiments.

A l'heure actuelle, très peu de données sont disponibles sur la qualité de l'air intérieur et le confort des occupants de ces bâtiments économes en énergie.

Compte tenu de ces évolutions et afin de répondre aux questions précédentes, le CSTB a développé en 2008 un outil d'évaluation de la qualité sanitaire, du confort et des consommations énergétiques de ces nouveaux bâtiments dans le cadre de son programme de recherche Bâtiment et Santé. Ces travaux ont été repris dans le cadre du programme Bâtiments performants en énergie mis en place par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur en 2010.

¹ "Résidentiel" : bâtiments d'habitation ; "tertiaire" : bâtiments à usage autre que d'habitation.

² La consommation conventionnelle d'énergie primaire des bâtiments neufs correspond à une consommation d'énergie calculée avec certaines hypothèses fixées, notamment de température intérieure, de présence des occupants, des scénarios d'occupation et d'historique des données météorologiques.

2. RAPPEL DES ACTIONS REALISEES ET DES PRINCIPAUX RESULTATS

Le CSTB a développé un outil d'évaluation de la qualité de l'air intérieur, du confort et des consommations énergétiques de ces nouveaux bâtiments, dans le cadre de son programme de recherche Bâtiment et Santé (Derbez et al., 2012a).

Cet outil méthodologique a été mis en œuvre dans sept maisons performantes en énergie et a été intégré en 2010 au programme d'actions de l'OQAI.

Dès 2011, les résultats des premiers suivis expérimentaux sur les 7 maisons (Derbez et al., 2011) ont permis d'observer que :

- il est aujourd'hui possible de réaliser des bâtiments bien moins perméables (perméabilité à l'air de la construction respectant les exigences des labels visés et les exigences de la réglementation thermique RT 2012) ;
- les performances énergétiques de ces bâtiments sont effectives puisque leurs consommations annuelles d'énergie finale tous usages sont au minimum inférieures à 100 kWh/m².an, ce qui représente la moitié de la consommation nationale d'énergie finale tous usages des résidences principales françaises estimée à 198 kWh/m².an en 2008 (ADEME, 2010) ;
- une vigilance particulière aux systèmes spécifiques de ventilation mécanique contrôlée double flux est nécessaire. Ces systèmes semblent complexes à l'usage et peu robustes vis-à-vis de l'occupant. Ils ne répondent pas toujours aux performances escomptées par le Bureau d'études techniques ou aux performances réglementaires. Ils peuvent présenter certains dysfonctionnements entraînant un mauvais renouvellement de l'air ;
- l'air est bien renouvelé avec des concentrations médianes de CO₂ inférieure à 1000 ppm dans ces habitations qui présentent néanmoins la particularité d'avoir une densité d'occupation faible. Les concentrations sont plus faibles en été qu'en hiver du fait de l'ouverture plus fréquente et prolongée des ouvrants pendant cette période. Elles sont plus élevées dans la chambre que dans le séjour ouvert sur la cuisine ;
- la qualité de l'air intérieur en situation d'occupation a été comparée à celle mesurée dans les logements français entre 2003 et 2005 (campagne nationale « logements » OQAI). Cette comparaison faite à titre d'information doit être prise avec précaution puisque la moitié du parc de logement français est ancienne (construite avant 1968) alors que les sept habitations de l'étude sont très récentes voire neuves. Il apparaît que la qualité de l'air intérieur en situation d'occupation des sept habitations est proche de celle mesurée dans les logements français pour les particules et le radon, mais diffère pour la pollution chimique. En effet, les concentrations en composés organiques volatils (COV) et en aldéhydes peuvent, selon les composés considérés, être jusqu'à dix fois plus élevées que les valeurs médianes observées dans le parc de logements français.

Ceci pourrait être lié au caractère récent des constructions étudiées dans l'étude ;

- le confort thermique et acoustique des occupants est très satisfaisant même si ces derniers expriment ponctuellement des gênes. L'air paraît aussi sec en été qu'en hiver possiblement du fait des meilleures conditions de ventilation, du faible taux d'occupation³ par rapport à celui des logements français (campagne nationale logements OQAI) et de la prédominance du bois dans ces maisons agissant comme régulateur d'humidité. Du fait de la forte isolation de ces maisons par rapport à l'extérieur, le bruit généré par le système de ventilation devient prédominant et peut entraîner une gêne lorsque tout est calme, en particulier la nuit.

³ Taux d'occupation : nombre de personnes/nombre de pièces principales

3. OBJECTIFS DE L'ETUDE

La présente étude fait partie du programme d'actions 2011-2012 de l'OQAI dont un des objectifs était de finaliser le suivi longitudinal, sur une période de trois ans, de deux habitations performantes en énergie parmi les sept investiguées dans la première phase afin de :

- évaluer la performance des systèmes dans le temps et en particulier du système de ventilation mécanique contrôlé ;
- suivre l'évolution temporelle du confinement (CO_2), de la qualité de l'air intérieur⁴ (CO, COV, aldéhydes, concentration massique des $\text{PM}_{2.5}$, nombre de particules), du confort thermique et acoustique des occupants et des consommations énergétiques réelles ;
- observer le comportement des occupants au cours du temps, avec leur consentement.

L'autre objectif de la présente convention était de développer une version plus opérationnelle de l'outil de collecte de données de façon à faciliter son utilisation et son déploiement sur le territoire national, à un coût raisonnable et d'élaborer une base de référence permettant de centraliser et d'exploiter les données collectées.

⁴ L'évolution temporelle des concentrations en radon n'a pas été évaluée sur trois ans et c'est la raison pour laquelle les résultats de mesure obtenus lors de la première année d'occupation et présentés dans Derbez et al., 2011, ne sont pas repris dans ce rapport. Ils sont seulement donnés ici à titre informatif : pour BBC3, 43 Bq/m³ dans C_US, 24 Bq/m³ dans CHB1 ; pour PAS3, 52 Bq/m³ dans C_US et 66 Bq/m³ dans CHB1

4. SUIVI LONGITUDINAL DE DEUX BATIMENTS PERFORMANTS EN ENERGIE

4.1 CHOIX DES DEUX BATIMENTS

Sur les sept maisons performantes en énergie ayant fait l'objet des premiers suivis expérimentaux, il a été décidé de réaliser un suivi longitudinal sur deux d'entre elles (codées BBC3 et PAS3) pour les raisons suivantes :

- participation active des occupants aux premières enquêtes, intérêt et souhait de poursuivre les expérimentations ;
- mesurage en continu des consommations d'énergie par poste ;
- localisation des deux habitations dans la même zone climatique facilitant la mise en œuvre des suivis.

4.2 DESCRIPTIF SYNTHETIQUE DES DEUX BATIMENTS

Il s'agit de deux maisons individuelles isolées, localisées dans la zone thermique française H2b et visant les performances énergétiques du label français BBC-Effinergie (BBC3) et du label allemand PassivHaus (PAS3) (Tableau 4-1).

Ces bâtiments ont été imaginés, conçus, réalisés et sont occupés par leur propriétaire exerçant la profession d'architecte. Ils ont été réceptionnés en même temps (juin 2009) et ont été occupés un mois après pour BBC3 (un couple et deux enfants) et deux mois après pour PAS3 (un couple). Au cours de l'été 2011, les occupants de PAS3 ont accueilli un jeune chien dans leur maison. Leur taux d'occupation (0,67 et 0,4 personnes /nombre de pièces principales) est inférieur à la médiane calculée dans le cadre de la campagne nationale Logements de l'OQAI (0,80 personnes /nombre de pièces principales) (Lucas et al, 2009) ce qui indique que ces logements sont plutôt sous-occupés.

Ces bâtiments sont à ossature bois et isolés avec des matériaux d'origine végétale. Les propriétaires ont souhaité limiter les sources de pollution de l'air intérieur en optant notamment pour une isolation naturelle végétale, une peinture murale minérale sans solvant, un parquet en bois huilé en usine. Les principaux murs en bois de BBC3 ont été laissés à l'état brut et les murs en bois de PAS3 ont été recouverts d'une plaque de plâtre « épuratrice » selon le fabricant. La sélection de ces matériaux s'est faite à partir des connaissances des propriétaires et des données d'émissions des composés organiques volatils et des aldéhydes communiquées par les fabricants lorsque celles-ci étaient disponibles.

Tableau 4-1 – Descriptif synthétique des deux bâtiments d’habitations performants en énergie sélectionnés pour le suivi longitudinal

Principales caractéristiques des deux habitations		BBC3	PAS3
Labellisation énergétique visée		BBC-Effinergie en cours	conforme aux critères Passivhaus
Zone climatique		H2b	
Occupation	Date de réception	juin 09	
	Date d’emménagement	juillet 09	août 09
	Caractéristiques des occupants	Architecte concepteur/propriétaire/occupant	
	Taux occupation ¹	0,67 (2 adultes, 2 enfants)	0,40 (2 adultes)
Principaux matériaux et produits de construction, d’isolation et de décoration	Mode constructif	Ossature bois	
	Nature isolant	Ouate de cellulose, laine et fibre de bois	
	Choix matériaux et produits limitant la pollution de l’air	Mur bois brut Isolation naturelle Peinture minérale Parquet huilé en usine	Isolation naturelle Peinture minérale Parquet huilé en usine Plaque plâtre « épuratrice »
Equipements	Système de ventilation mécanique contrôlée (VMC) Double flux	Statique avec échangeur (taux de rendement entre 97 et 99 %, filtration air extérieur G4 ou F8 ; filtration air vicié F8)	
	Système de chauffage principal	poêle cheminée dans séjour (puissance nominale de 7 KW pour BBC3 et 5 KW pour PAS3) + convecteurs dans pièces humides (utilisation d’un radiateur électrique pour PAS3 entre août 2009 et janvier 2010 avant l’installation du poêle)	
	Système de production d’eau chaude sanitaire (ECS)	Production solaire appoint électrique (utilisation chauffe-eau électrique pour PAS3 entre août 2009 et mai 2011 avant installation panneaux solaires)	

1) Taux d’occupation = nb de personnes/nb de pièces principales

Au niveau des équipements mis en œuvre, les deux bâtiments possèdent le même système de ventilation mécanique contrôlée double flux avec échangeur de chaleur et disposent, comme système principal de chauffage, d'un poêle cheminée dans le séjour. Quelques convecteurs ont toutefois été installés dans les salles de bain des deux maisons. Il faut noter que pendant les premiers mois d'occupation de PAS3 (entre août 2009 et janvier 2010), les habitants se chauffaient au moyen d'un radiateur électrique de 2000 watt car le poêle cheminée a été installé seulement au début du mois de février 2010. La production d'eau chaude sanitaire est assurée par un système solaire avec appoint électrique depuis le début de l'occupation de BBC3 et depuis mai 2011 pour PAS3. Auparavant, l'eau chaude sanitaire de PAS3 était produite par un ballon électrique.

Ces deux habitations font partie des tous premiers bâtiments français économes en énergie. Elles sont atypiques par rapport au parc actuel de bâtiments performants en énergie. En effet, selon les indicateurs 2013 de l'Observatoire BBC publiés en février 2013 (Observatoire BBC, 2013), les maisons individuelles labellisées BBC-Effinergie en secteur diffus sont :

- plutôt construites en brique (30 % des maisons sont construites en bois) ;
- chauffées à l'électricité (10 % des maisons sont chauffées au bois) ;
- ventilées par une ventilation mécanique contrôlée simple flux (10 % des maisons sont ventilées par une ventilation mécanique contrôlée double flux).

4.3 MISE EN ŒUVRE DU SUIVI LONGITUDINAL

Le suivi longitudinal a débuté dès la réception des bâtiments en juin 2009 où la première enquête en inoccupation (VID) a été réalisée et s'est poursuivie pratiquement pendant trois ans jusqu'en janvier 2012 par la dernière enquête en situation d'occupation (HIV3) (Tableau 4-2). Au total six enquêtes en situation d'occupation ont été réalisées par bâtiment : deux au cours de la première année d'occupation (ETE1 et HIV1), deux au cours de la deuxième (ETE2 et HIV2) et deux au cours de la troisième (ETE3 et HIV3).

L'écart entre l'enquête d'inoccupation et les enquêtes en phase d'occupation sont respectivement pour BBC3 de 1 mois (ETE1), 7 mois (HIV1), 14 mois (ETE2), 18 mois (HIV2), 26 mois (ETE3) et 30 mois (HIV3) et pour PAS3 de 2 mois (ETE1), 8 mois (HIV1), 14 mois (ETE2), 19 mois (HIV2), 26 mois (ETE3) et 30 mois (HIV3).

Les dates d'emménagement sont données à titre informatif et correspondent au mois à partir duquel les occupants ont occupé et habité leur habitation de façon continue. Le déménagement de leur mobilier et de leurs affaires personnelles a eu lieu de façon progressive autour de cette date et ne s'est pas réalisé en une seule fois.

Chaque enquête a été réalisée selon le protocole développé précédemment (Derbez et al., 2012a) et a permis de mesurer, en situation d'occupation :

- la qualité de l'air intérieur ;
- le confort acoustique et thermique des occupants ;
- les consommations énergétiques réelles des années 2010, 2011 et 2012.

Par ailleurs, le taux de renouvellement d'air a été mesuré exclusivement en situation d'inoccupation alors que les débits d'air extrait ont été mesurés avant occupation et au cours de la seconde année d'occupation.

Les résultats obtenus en inoccupation et lors de la première année d'occupation (Derbez et al., 2011), puis de la seconde année d'occupation (Derbez et al., 2012b), sont repris dans ce rapport pour être comparés à ceux de la troisième année d'occupation.

Tableau 4-2 – Date d'emménagement et de réalisation des enquêtes des deux bâtiments retenus pour le suivi longitudinal

	Phase	BBC3	PAS3
Suivi en inoccupation	VID	15 au 22 juillet 2009	22 au 29 juin 2009
Date d'emménagement	-	Août 2009	Août 2009*
Suivi lors de la première année d'occupation	ETE1	25 août au 1 ^{er} septembre 2009	26 août au 2 septembre 2009
	HIV1	12 au 19 février 2010	12 au 19 février 2010
Suivi lors de la seconde année d'occupation	ETE2	31 août au 7 septembre 2010	1 ^{er} au 8 septembre 2010
	HIV2	25 janvier au 1 ^{er} février 2011	26 janvier au 2 février 2011
Suivi lors de la troisième année d'occupation	ETE3	1 ^{er} au 8 septembre 2011	2 au 9 septembre 2011
	HIV3	3 au 10 janvier 2012	2 au 9 janvier 2012

*les occupants de PAS3 sont venus dormir dans leur maison les deux premières nuits de la phase d'inoccupation

5. MESURES AERAIQUES DES BATIMENTS

5.1 PERMEABILITE A L'AIR DE L'ENVELOPPE DES BATIMENTS EN FIN DE CONSTRUCTION

Les mesures de perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments ont été réalisées par des bureaux d'études techniques (BET) agréés et les valeurs présentées dans le Tableau 5-1 sont celles obtenues à l'achèvement de la construction de chaque bâtiment. Ces valeurs nous ont été communiquées oralement par les propriétaires et il n'a pas été possible de les vérifier sur les procès-verbaux des résultats de mesure de perméabilité.

Les bâtiments présentent une très faible perméabilité à l'air de leur enveloppe. Elle est comprise entre 0,11 et 0,19 m³/h.m² sous 4 Pa. Ceci montre que **ces bâtiments sont nettement moins perméables** (4 fois moins pour BBC3 et 7 fois moins pour PAS3) que les exigences de la réglementation thermique française 2005 (perméabilité de référence égale à 0,8 m³/h.m² sous 4 Pa) et même de l'actuelle réglementation thermique française 2012 (0,6 m³/h.m² sous 4 Pa pour les maisons individuelles).

Tableau 5-1 – Valeurs de perméabilité à l'air de l'enveloppe des deux bâtiments communiquées par les propriétaires et comparaison avec les exigences des labels visés

Code bâtiment	Perméabilité à l'air des bâtiments mesurée à l'achèvement de la construction par des BET		Exigences de perméabilité à l'air des bâtiments selon les labels visés
	m ³ /h.m ² sous 4Pa	vol/h sous 50Pa	
BBC3	0,19	0,89	BBC Effinergie ou Effinergie + ≤ 0,6 m ³ /h.m ² sous 4Pa
PAS3	0,11	0,62	Passivhaus ≤ 0,6 vol/h sous 50 Pa

5.2 MESURE DU TAUX DE RENOUVELLEMENT D'AIR (TRA) LORS DE L'EMMENAGEMENT DES OCCUPANTS

Les mesures du taux de renouvellement d'air (TRA) ont été réalisées, juste après l'emménagement des occupants, dans les deux bâtiments dans deux pièces (cuisine et chambre) avec le système de ventilation à l'arrêt, puis en fonctionnement (aux trois vitesses du moteur de ventilation : petite, moyenne, grande) (Tableau 5-2). A partir de ces mesures, un TRA du bâtiment a été estimé en tenant compte des volumes des pièces et du volume total.

A l'arrêt des systèmes de ventilation, les TRA des pièces sont très faibles (entre 0,02 et 0,05 vol/h), ce qui illustre que ces bâtiments sont très étanches et conforte les mesures de perméabilité présentées précédemment. Cela illustre également l'importance de maintenir en bon état de fonctionnement les systèmes de ventilation puisqu'en cas de panne, les TRA sont très faibles et préoccupants au regard du confinement et de la qualité de l'air intérieur. Les TRA des pièces augmentent en général avec la vitesse de fonctionnement de la VMC,

mais il apparaît les dysfonctionnements suivants. En effet les TRA sont plus faibles en grande vitesse que ceux mesurés à moyenne vitesse pour BBC3 dans la chambre et pour PAS3 dans la cuisine et la chambre.

Comparativement au TRA théorique estimé à partir de l'étude ventilation du bureau d'études techniques, le TRA du bâtiment BBC3 est identique à celui attendu alors que celui de PAS3 est inférieur.

Tableau 5-2 - Mesure du taux de renouvellement d'air (TRA) des bâtiments (vol/h) à l'emménagement des occupants selon les vitesses de fonctionnement de la VMC double flux et comparaison avec les valeurs théoriques déterminées à partir des études des BET

Code bâtiment	Vitesse VMC double flux	Lieu de mesure	TRA mesuré par pièce	TRA bâtiment estimé à partir des TRA pièces	TRA bâtiment théorique selon étude BET
			Vol/h		
BBC3	Arrêt	C_US	0,05	0,04	
		Chambre	0,04		
	Petite	C_US	0,21	0,28	
		Chambre	0,55		
	Moyenne	C_US	0,30	0,51	0,51
		Chambre	1,24		
Grande	C_US	0,55 ¹	0,59		
	Chambre	1,15 ¹			
PAS3	Arrêt	C_US	0,02 ¹	0,02	
		Chambre	0,05 ¹		
	Petite	C_US	0,18 ¹	0,13	
		Chambre	0,15 ¹		
	Moyenne	C_US	0,55	0,36	0,58
		Chambre	0,35		
	Grande	C_US	0,32 ¹	0,24	
		Chambre	0,32 ¹		

¹ : taux de renouvellement estimé graphiquement à partir des courbes de décroissance du gaz traceur suite à la perte ou à l'impossibilité de récupérer les données de mesure ; C_US : cuisine américaine

Comparativement à la valeur médiane du TRA pour l'ensemble des logements français équipés de VMC (0,5 vol/h) (données campagne nationale Logements OQAI, Lucas et al., 2009), il apparaît que le TRA du bâtiment BBC3 atteint cette valeur alors que celui du bâtiment PAS3 est inférieur.

Alertés par les dysfonctionnements de leur système de ventilation, les occupants de PAS3 ont demandé l'intervention de l'installateur. En l'absence de mesures du TRA après l'intervention, il n'est pas possible de savoir si la situation s'est améliorée ou pas.

5.3 FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES DE VENTILATION MÉCANIQUE CONTROLÉE DOUBLE FLUX AU COURS DU SUIVI

Au cours du suivi, des renseignements ont été recueillis par questionnaire auprès des occupants afin de connaître la date et la nature des différentes interventions réalisées sur les systèmes de ventilation mécanique contrôlée et leur retour d'expérience sur leur usage.

En parallèle, des mesures de débits d'air aux bouches d'extraction ont été réalisées à trois reprises : en phase d'inoccupation, un an et demi après, puis deux ans et demi après.

5.3.1 INTERVENTIONS ET ENTRETIEN DES SYSTEMES

Plusieurs types d'intervention et d'entretien sur les systèmes de VMC double flux se sont succédés au cours du temps depuis la première enquête (VID) jusqu'à la dernière (HIV3) (Tableau 5-3).

Tableau 5-3 – Principales interventions effectuées sur les systèmes de VMC double flux au cours du suivi longitudinal

	BBC3	PAS3
Interphase VID/ETE1		<ul style="list-style-type: none"> - Premier réglage des débits à l'installation - Deuxième réglage des débits suite aux mesures et aux plaintes des occupants
Interphase ETE1/HIV1		<ul style="list-style-type: none"> - Changement de tous les filtres (intérieur système, dégivreur, extraction cuisine)
Interphase HIV1/ETE2	<ul style="list-style-type: none"> - Deuxième réglage des débits suite à un dérèglement des bouches - Mise en dépression de l'étage pour éviter surchauffe (demande de l'occupant) - Nettoyage des bouches d'extraction des salles de bain - Changements d'une partie des filtres (intérieur système mais pas dégivreur) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage grille extérieure - Changement de tous les filtres (intérieur système, dégivreur, extraction cuisine)
Interphase ETE2/HIV2	<ul style="list-style-type: none"> - Changements d'une partie des filtres (intérieur système) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage grille extérieure - Rajout d'une bouche d'insufflation dans le local technique
Interphase HIV2/ETE3	<ul style="list-style-type: none"> - Changement d'une partie des filtres 	<ul style="list-style-type: none"> - Changement de tous les filtres (intérieur système, dégivreur, extraction cuisine)
Interphase ETE3/HIV3		<ul style="list-style-type: none"> - Reprogrammation de la VMC

Les **interventions liées à la mise en œuvre des systèmes** (mise en fonctionnement, réglage et équilibrage des débits) ont été réalisées à deux dates différentes : avant l'enquête en situation d'inoccupation (VID) pour BBC3 et avant la première enquête en situation d'occupation (ETE1) pour PAS3. Pour ce bâtiment, le système de ventilation mécanique était à l'arrêt au cours de l'enquête en situation d'inoccupation, ce qui a eu un impact sur les niveaux de polluants d'air intérieur comme présenté dans la suite du présent document. Il faut noter que les occupants des deux bâtiments ont procédé à plusieurs réglages (Tableau 5-3) après le premier réglage lors de la mise en œuvre.

En situation d'occupation, **des interventions liées à l'entretien et à la maintenance** des systèmes sont effectuées en partie ou en totalité, plus ou moins régulièrement. Les occupants de PAS3 ont pris l'habitude, tous les 6 mois, de changer les filtres à l'intérieur du système de ventilation et de nettoyer le

filtre d'extraction de la cuisine et la grille extérieure de prise d'air neuf. L'entretien semble être moins régulier et moins rigoureux pour BBC3 où les occupants changent régulièrement les filtres à l'intérieur du système (car un message apparaît sur le boîtier de commande), mais ne nettoient pas régulièrement la grille extérieure. Il faut remarquer que les occupants de BBC3 n'ont jamais nettoyé les filtres se trouvant à l'intérieur des bouches d'extraction car ils ignoraient leur présence. Par ailleurs, les occupants des deux bâtiments ne nettoient pas souvent les bouches d'extraction et d'insufflation. De plus ils s'interrogent sur la possibilité d'effectuer le nettoyage de l'intérieur des conduits du système du fait d'entreprises spécialisées dans le domaine peu nombreuses.

D'autres **interventions liées aux besoins spécifiques des occupants** ont également été réalisées : mise en dépression de l'étage supérieur pour éviter des surchauffes en été pour BBC3, rajout d'une bouche d'insufflation dans le local technique de PAS3 que les occupants trouvaient trop confiné selon leur perception, programmation de la VMC selon les habitudes de vie des occupants de PAS3.

5.3.2 UTILISATION DES SYSTEMES

L'utilisation du système de VMC double flux par les occupants au cours du temps est reportée dans le Tableau 5-4.

Tableau 5-4 – Utilisation du système de VMC double flux par les occupants au cours du suivi longitudinal

Utilisation du système de VMC		BBC3	PAS3
Mode de fonctionnement (vitesse de la VMC la plus utilisée ou programme choisi)	ETE1	Mode manuel (vitesse moyenne par défaut)	Mode automatique (Programme P1) Petite vitesse : 0-6h/8h15-12h/13-20h/21-24h Vitesse Moyenne : 6-7h/7h30-8h15 Grande Vitesse : 7h-7h30/12-13h/20-21h
	HIV1	donnée manquante	
	ETE2	Mode manuel (vitesse moyenne par défaut)	
	HIV2	Mode automatique (Programme P4) Vitesse moyenne : 0-12h/13-18h/19-24h Grande vitesse: 12-13h/18-19h	Mode automatique (Programme personnalisé) Petite vitesse : 0-7h45/9-12h30/13h30-19h30/21-24h Vitesse Moyenne : 7h45-8h15/12h30-13h30 Grande Vitesse: 8h15-9h/19h30-21h
	ETE3	Mode manuel (vitesse moyenne par défaut)	
	HIV3	Mode automatique (Programme P4) Vitesse Moyenne : 0-12h/13-18h/19-24h Grande Vitesse: 12-13h / 18-19h	

La première année d'occupation, les occupants de BBC3 ont utilisé de façon manuelle le système de ventilation (vitesse moyenne par défaut) durant les premiers mois d'occupation du fait de la complexité du manuel d'utilisation mais également pour sur-ventiler en journée afin de réduire les niveaux de pollution liés aux émissions des matériaux neufs. Un an après leur installation, les occupants ont pris l'habitude, en été, d'utiliser la VMC en mode manuel et en plus d'aérer leur logement en ouvrant les fenêtres (VMC en vitesse moyenne par défaut et en vitesse minimale lors de l'ouverture des ouvrants) et en mode

automatique en hiver. En revanche, ils se plaignent de la complexité du système et ne parviennent pas à corriger deux problèmes majeurs : les programmes d'intermittence proposés ne correspondent pas à leur mode de vie et l'horloge interne du système n'est pas à l'heure.

Les occupants de PAS3 utilisent de façon automatique le système de ventilation depuis leur installation mais la programmation choisie (P1) était inadaptée à leur rythme de vie (heures de lever, de coucher, de présence, d'absence,...). Ils ne se sont pas plaints de la difficulté d'utilisation du système et ont élaboré leur propre programme d'intermittence en décembre 2011. Il faut noter qu'au début de la dernière enquête (HIV3), le système de ventilation a été éteint pour les besoins de certaines des mesures réalisées et n'a été remis en fonctionnement qu'un jour après.

5.3.3 MESURE DES DEBITS D'AIR EXTRAIT

Les débits d'air ont été mesurés avec une précision de 3,6 m³/h en phase d'inoccupation et au cours des phases HIV2 et HIV3, soit un an et demi et deux ans et demi après (Tableau 5-5 et Tableau 5-6). Quelques mesures de contrôle ont été effectuées pour BBC3 au cours de la phase HIV1.

Tableau 5-5 – Mesure des débits d'air extrait selon la vitesse de la VMC au cours du suivi longitudinal de l'habitation BBC3

Lieu	Pièce où se situe la bouche d'extraction	Vitesse de la VMC	Débit d'air extrait (m ³ /h)				
			VID	HIV1	HIV2		HIV3
					Première mesure	Deuxième mesure après intervention	
BBC3	CHB1-Douche	Petite	10	<7	13	-	11
		moyenne	20	13	24	-	23
		Grande	26	-	34	-	29
	CHB1-Dressing	Petite	10	-	13	-	10
		moyenne	23	-	25	-	22
		Grande	26	-	31	-	28
	SDB1	Petite	9	-	8	-	<7
		moyenne	20	-	21	-	17
		Grande	26	-	28	-	21
	SDB2	Petite	17	-	<7	28 (sans filtre)	18
		moyenne	39	-	9	61 (sans filtre)	35
		Grande	48	-	16	77 (sans filtre)	43
	C_US	Petite	-	-	<7	19 (après nettoyage filtre)	9
		moyenne	-	-	14	43 (après nettoyage filtre)	28
		Grande	-	-	21	52 (après nettoyage filtre)	37

Tableau 5-6 – Mesure des débits d'air extrait selon la vitesse de la VMC au cours du suivi longitudinal de l'habitation PAS3

Lieu	Pièce où se situe la bouche d'extraction	Vitesse de la VMC	Débit d'air extrait (m ³ /h)				
			VID	HIV1	HIV2		HIV3
					Première mesure	Deuxième mesure après intervention	
PAS3	SDB1	Petite	8	-	<7	-	9
		moyenne	16	-	15	-	17
		Grande	25	-	24	-	29
	SDB2	Petite	8	-	<7	-	10
		moyenne	16	-	15	-	15
		Grande	24	-	24	-	26
	C_US-Entrée	Petite	-	-	<7	-	<7
		moyenne	-	-	11	-	11
		Grande	-	-	18	-	21
	C_US-Evier	Petite	-	-	14	-	15
		moyenne	-	-	29	-	28
		Grande	-	-	47	-	57

CHB : chambre ; SDB : salle de bain ; C_US : cuisine américaine

Quelques mesures de débits d'air extrait n'ont pas pu être réalisées pour les raisons suivantes : hauteur des bouches d'extraction, proximité d'un meuble empêchant le passage de l'appareil de mesure ou position des bouches en saillie par rapport au mur rendant impossible la mesure.

Pour BBC3, la diminution importante des débits observée dans la CHB1-douche entre la phase VID et la phase HIV1 serait probablement due à un déséquilibre des débits dû au dérèglement de certaines bouches au cours du temps selon les occupants. En effet les modifications de débits s'effectuent directement sur la bouche simplement en vissant/dévisant l'obturateur mobile réglable, et à plusieurs reprises les occupants ou des personnes extérieures (électricien, femme de ménage) ont malencontreusement modifié la section d'ouverture et donc les débits. Les occupants, conscients de ce problème, ont envisagé de faire une marque au feutre sur la bouche et l'obturateur afin de retrouver la position initiale en cas de dérèglement.

Suite à l'intervention de l'installateur, les débits mesurés en HIV2 sont pratiquement identiques à ceux mesurés à la mise en œuvre du système sauf pour les bouches d'extractions de la SDB2 et de la cuisine. En fait, en démontant ces bouches, l'occupant présent lors de notre visite a découvert l'existence de filtres métalliques à l'arrière de chacune des bouches. Ces filtres n'avaient jamais été nettoyés depuis environ 2 ans et étaient complètement colmatés (Figure 5-1). Afin de vérifier si les faibles débits observés étaient liés à l'encrassement de ces filtres, une seconde mesure des débits a été réalisée : sans le filtre dans SDB2 et avec le filtre nettoyé dans la cuisine. Il apparaît que les débits mesurés après cette intervention sont bien plus élevés que lors de la première mesure.



a) Filtre colmaté de la bouche d'extraction de la cuisine à moitié nettoyé



b) Filtre colmaté de la bouche d'extraction de salle de bain 2

Figure 5-1 – Photographies des filtres métalliques placées derrière les bouches d'extraction de la cuisine et de la salle de bain 2 de BBC3

Avant de réaliser les mesures en HIV3, l'équipe technique du CSTB s'est aperçu que deux bouches d'extraction (C-US-Evier et SDB2) étaient manquantes qu'une troisième (SDB1) était complètement fermée. Les occupants ont expliqué que certaines bouches tombaient au sol systématiquement car elles étaient mal fixées et que le peintre avait fermé celle de la SDB1 pour pouvoir mieux la peindre lors des travaux de peinture de cette pièce. Après avoir remis en place les bouches d'extraction et ouvert celle de la SDB1, les mesures de débits d'air ont été réalisées ; ces derniers sont pratiquement identiques à ceux mesurés précédemment sauf pour la bouche d'extraction de la cuisine. Les débits d'air mesurés pour la bouche C_US en HIV3 sont inférieurs à ceux mesurés en HIV2 (9, 28, 37 m³/h versus 19, 43, 52 m³/h respectivement en petite, moyenne et grande vitesse).

Pour PAS3, les débits mesurés pendant les phases VID, HIV2 et HIV3 sont très proches. Il apparaît toutefois qu'en HIV2, les débits en petite vitesse de fonctionnement de la VMC des salles de bain étaient très faibles (inférieurs à 7 m³/h) possiblement dû à l'ajout d'une bouche d'extraction supplémentaire dans le local technique. En HIV3, ces débits sont revenus aux valeurs initialement mesurées en VID.

En fonction des mesures disponibles et compte tenu des imprécisions de mesures, les débits d'extraction réglementaires exigés dans les pièces de service (arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements) ont été comparés à ceux mesurés au cours du suivi (Tableau 5-7, Tableau 5-8). Il apparaît que les débits réglementaires peuvent être ponctuellement atteints lorsque les conditions sont réunies (ex : filtres nettoyés).

Enfin, une comparaison a été effectuée entre les valeurs de débits d'air extrait mesurées et les valeurs de débits théoriques de l'étude ventilation du bureau d'études techniques pour la vitesse moyenne du système de ventilation (Tableau 5-9). Pour BBC3, les débits mesurés sont proches voire supérieurs aux débits attendus, alors que pour PAS3 les débits mesurés sont plus faibles.

Tableau 5-7 – Comparaison des mesures de débits d'air extrait avec le débit exigé dans les pièces de service par l'arrêté du 24 mars 1982

Bâtiment	Pièce	Débits mesurés en grande/très grande vitesse (m ³ /h)			Débit réglementaire devant être atteint (m ³ /h)
		VID	HIV2	HIV3	
BBC3	SDB1	26	28	21	30
	SDB2	48	77 mesure réalisée sans filtre	43	
PAS3	SDB1	25	24	29	
	SDB2	24	24	26	

SDB : salle de bain

Tableau 5-8 – Comparaison des mesures de débits d'air extrait avec le débit minimal cuisine dans les logements de 3 pièces principales et plus par l'arrêté du 24 mars 1982

Bâtiment	Vitesse de la VMC	Débits mesurés en C_US (m ³ /h)			Débit minimal en cuisine (m ³ /h) dans les logements de 3 pièces principales et plus
		VID	HIV2	HIV3	
BBC3	Petite	-	19 (après nettoyage filtre)	9	45
	moyenne	-	43 (après nettoyage filtre)	28	
	Grande	-	52 (après nettoyage filtre)	37	
PAS3	Petite	-	14	15	
	moyenne	-	29	28	
	Grande	-	47	57	

C_US : séjour ouvert sur la cuisine ou cuisine américaine

Tableau 5-9 - Comparaison des mesures de débits d'air extrait avec les débits théoriques de l'étude de ventilation du bureau d'études techniques

Bâtiment	Pièce	Débits mesurés en moyenne vitesse (m ³ /h)			Débits théoriques de l'étude ventilation du BET (m ³ /h)
		VID	HIV2	HIV3	
BBC3	CHB1-Douche	20	24	23	20
	CHB1-Dressing	23	25 mesure réalisée sans filtre	22	20
	SDB1	20	21	17	20
	SDB2	39	61 mesure réalisée sans filtre	35	40
	C_US	-	43 mesure réalisée avec le filtre nettoyé	28	50
PAS3	SDB1-Douche	16	15	17	30
	SDB2	16	15	15	30
	C_US évier	-	29	28	50

CHB : chambre ; SDB : salle de bain ; C_US : cuisine américaine

6. EVOLUTION TEMPORELLE DU CONFINEMENT DE L'AIR ET DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR

6.1 CONFINEMENT DE L'AIR

Les statistiques descriptives des concentrations en CO₂ mesurées dans la chambre du ménage et dans le séjour ouvert sur la cuisine des habitations lors des deux saisons (été et hiver) des trois années de suivi sont présentées dans le Tableau 6-1 et dans la Figure 6-1.

La durée de suivi des concentrations en CO₂ est proche de la durée théorique correspondante à 7 jours de mesure (168 heures) sauf dans deux cas. Pour BBC3-HIV3, il n'y a aucune donnée pour la chambre suite à la panne de l'appareil de mesure. Pour PAS3-HIV3, un problème d'alimentation électrique de l'appareil placé dans la C_US est à l'origine de la réduction de la durée du suivi.

Tableau 6-1 – Durée de mesure et données statistiques descriptives des concentrations en CO₂ (ppm) mesurées dans chaque bâtiment, dans deux pièces, selon chaque phase d'occupation

Lieu	Saison	Pièce	Durée observée (en h)	min	P25	Moyenne	Médiane	P75	max
BBC3	ETE1	CHB1	166	291	314	381	351	413	861
		C_US	167	362	381	403	400	417	562
	HIV1	CHB1	165	467	595	722	701	823	1257
		CHB2*	165	444	610	752	716	848	1683
	C_US	165	457	539	623	601	699	961	
		ETE2	CHB1	166	356	388	494	454	589
	C_US	167	321	361	403	403	436	727	
		HIV2	CHB1	167	486	657	844	839	1008
	C_US	167	368	459	570	552	672	1028	
		ETE3	CHB1	169	330	362	525	427	666
	C_US	168	353	391	447	443	496	659	
		HIV3	CHB1	Données manquantes					
	C_US	166	417	532	619	596	684	1085	
		ETE1	CHB1	168	361	379	451	406	471
C_US	165		326	348	363	356	367	651	
	HIV1	CHB1	167	360	475	622	573	701	1263
C_US		167	407	495	567	557	640	870	
	ETE2	CHB1	167	391	410	564	439	743	1250
C_US		168	384	410	449	445	474	711	
	HIV2	CHB1	166	370	437	618	545	758	1319
C_US		167	367	410	490	485	559	1009	
	ETE3	CHB1	168	285	319	508	358	683	1192
C_US		167	373	402	480	453	555	677	
	HIV3	CHB1	169	426	577	845	721	950	2747
C_US		137	421	543	736	617	772	1759	

* mesure réalisée à la demande des occupants ; CHB : chambre ; C_US : séjour ouvert sur la cuisine

Il apparaît que les concentrations médianes varient en fonction des saisons et des pièces pour les deux habitations et oscillent entre 351 ppm et 839 ppm.

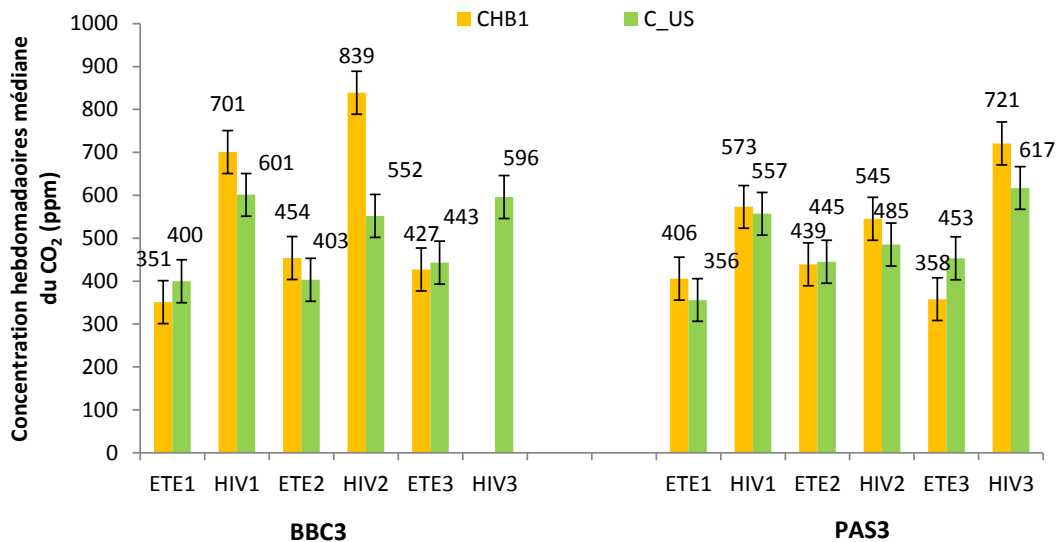


Figure 6-1 – Concentrations hebdomadaires médianes de CO₂ (ppm) mesurées dans les bâtiments et dans deux pièces au cours des enquêtes (Les tirets représentent les incertitudes de mesure de l'appareil)

Les concentrations médianes minimales sont observées systématiquement en été pour les deux habitations et quelle que soit l'année d'enquête. Les concentrations médianes mesurées en été sont inférieures à 450 ppm (entre 351 et 454 ppm) et en tenant compte des incertitudes de mesure de l'appareil, proches de celles habituellement mesurées à l'extérieur (aux alentours de 380 à 400 ppm). Les concentrations médianes observées en hiver sont supérieures à 450 ppm et comprises entre 485 et 839 ppm. Elles correspondent donc à de bons résultats en terme de niveaux de confinement d'air au regard des recommandations du Règlement sanitaire départemental type (1978) de ne pas dépasser, en condition habituelle d'occupation dans les locaux non-fumeurs 1300 ppm et de la concentration médiane hebdomadaire des logements français égale à 756 ppm (Kirchner et al. 2006).

Il existe une **différence significative (p-value < 0,0001) entre les séries de mesures de concentrations du CO₂ au cours des deux saisons quelles que soient la pièce et l'année d'enquête**. Les concentrations mesurées en été (ETE1 ou ETE2 ou ETE3) sont plus faibles que celle mesurées en hiver (HIV1 ou HIV2 ou HIV3).

Ceci est probablement en lien avec le changement du taux de renouvellement d'air des habitations lié à la modification saisonnière du comportement des occupants des deux bâtiments vis-à-vis de l'ouverture des fenêtres (Tableau 6-2).

En hiver, au cours des enquêtes HIV1, HIV2 et HIV3, l'ouverture des fenêtres est rarement, voire jamais pratiquée de jour comme de nuit dans les deux bâtiments. En été (enquêtes ETE1, ETE2 et ETE3), la durée d'ouverture est supérieure à une demi-heure, de jour comme de nuit sauf en ETE2 et ETE3 pour PAS3. Les occupants de PAS3 ont visiblement consciemment réduit la durée d'ouverture de leur fenêtre la nuit entre les enquêtes ETE1 et ETE2 du fait de la présence de moustiques et de l'absence de moustiquaires à leurs fenêtres.

Tableau 6-2 – Comportement des occupants par rapport à l'ouverture de la fenêtre de leur logement au cours du suivi, selon la saison et les périodes jour/nuit

Lieu	Durée d'ouverture des fenêtres du logement			
	BBC3		PAS3	
	Le jour	La nuit	Le jour	La nuit
ETE1	Plus d'une ½ h	Plus d'une ½ h	Plus d'une ½ h	Plus d'une ½ h
HIV1	réponse manquante		Rarement ou jamais	Rarement ou jamais
ETE2	Plus d'une ½ h	Plus d'une ½ h	Plus d'une ½ h	Rarement ou jamais
HIV2	Rarement ou jamais	Rarement ou jamais	Rarement ou jamais	Rarement ou jamais
ETE3	Plus d'une ½ h	Plus d'une ½ h	Plus d'une ½ h	Rarement ou jamais
HIV3	Moins d'une ½ h	Rarement ou jamais	Rarement ou jamais	Rarement ou jamais

L'aération par ouverture des fenêtres, plus souvent pratiquée en été qu'en hiver, a également été mise en évidence dans les logements français (Lucas et al., 2009) et son impact sur le taux de renouvellement d'air des logements a été précédemment démontré (Wallace et al., 2002, Howard-Reed et al., 2002, Lucas et al., 2009).

Par ailleurs, il semble que les concentrations mesurées dans la chambre soient plus élevées que celles mesurées dans le séjour ouvert sur la cuisine quels que soient la saison et le bâtiment. Toutefois aucun test statistique de comparaison de données n'a été effectué et rien ne permet de conclure en la significativité de cette différence.

En conclusion, **l'air n'est pas confiné** dans les deux habitations, qui présentent néanmoins la particularité d'avoir une densité d'occupation faible. Les concentrations sont plus faibles en été qu'en hiver du fait de l'ouverture plus fréquente et prolongée des ouvrants pendant cette période. En revanche, des freins à l'ouverture des fenêtres en été ont été exprimés par un des deux ménages (présence de moustiques).

6.2 QUALITE DE L'AIR INTERIEUR

6.2.1 LES COMPOSES ORGANIQUES VOLATILS TOTAUX (COVT)

Les statistiques descriptives des concentrations en COVT mesurées dans le séjour ouvert sur la cuisine des deux habitations, en situation d'inoccupation et d'occupation, lors des deux saisons (été et hiver) et des trois années sont présentées dans le Tableau 6-3.

La durée de suivi des concentrations en COVT est proche de la durée théorique correspondant à 7 jours de mesure soit 168 heures, sauf dans quatre cas. Pour BBC3 – HIV2, l'appareil de mesure s'est arrêté sans raison apparente. Pour PAS3-HIV1, ETE3 et HIV3, l'appareil a été arrêté par l'occupant suite au déclenchement inexplicé d'une alarme sonore.

Tableau 6-3 – Durée de mesure et données statistiques descriptives des concentrations en COVT ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ équivalent toluène) mesurées au cours du suivi dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque phase

Code bâtiment	Phase	Durée observée (en h)	Min	P25	Moyenne	Médiane	P75	Max
BBC3	VID	167	< LD	10	68	15	36	473
	ETE1	167	16	< LD	< LD	6	27	1233
	HIV1	164	164	2	82	128	180	898
	ETE2	167	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	337
	HIV2*	64	< LD	< LD	48	< LD	67	559
	ETE3	167	< LD	50	86	84	123	337
	HIV3	163	138	324	471	381	525	3405
PAS3	VID	168	< LD	1314	2711	3087	3920	4987
	ETE1	167	32	< LD	2	17	61	142
	HIV1	148	146	540	598	569	617	1268
	ETE2	167	< LD	< LD	30	17	52	239
	HIV2	166	< LD	< LD	27	6	25	852
	ETE3	137	< LD	57	81	82	101	186
	HIV3	138	128	192	292	228	362	1850

* résultat donné à titre informatif du fait de l'arrêt inexpliqué de l'appareil de mesure au cours de l'enquête

Les concentrations des COVT varient entre des concentrations minimales inférieures à la limite de détection de l'appareil de mesure et des concentrations maximales pouvant atteindre $5\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ en équivalent toluène.

La majorité des concentrations moyennes des COVT est inférieure à $300\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ en équivalent toluène dans les deux habitations, mais trois mesures dépassent ce seuil comme le montre la Figure 6-2 (à noter que l'histogramme de la concentration mesurée en VID dans PAS3 est tronqué du fait de l'échelle de l'axe des ordonnées). En outre, les concentrations médianes en COVT mesurées en hiver sont globalement supérieures à celles mesurées en été. Une **différence significative (p-value < 0,0001) entre les concentrations mesurées au cours des deux saisons et des trois années** a d'ailleurs été mise en évidence pour les deux bâtiments.

Les concentrations médianes les plus élevées ont été observées en :

- HIV3 ($381\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) pour BBC3. Les niveaux mesurés pourraient être liés à la réalisation de travaux de peinture dans la salle de bain du rez-de-chaussée avant l'enquête HIV3 en plus du fonctionnement du chauffage au bois pendant l'enquête ;
- VID ($3087\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) pour PAS3. Les niveaux mesurés sont très élevés et possiblement liés à l'absence de ventilation pendant la semaine d'enquête due à l'arrêt du système de VMC double flux ayant entraîné l'accumulation de la pollution émise par les sources intérieures ;
- HIV1 ($569\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) pour PAS3. Ces niveaux peuvent être liés à la réalisation des travaux d'installation du poêle cheminée (perçage, retouche de peinture,...) juste avant la semaine de mesure HIV1 en plus du fonctionnement du chauffage au bois pendant l'enquête.

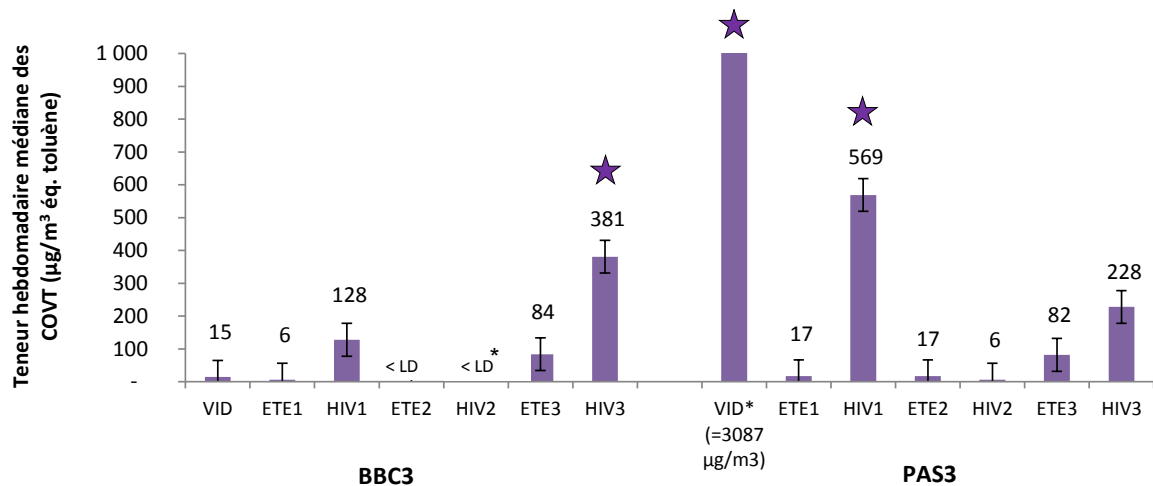


Figure 6-2 – Concentrations hebdomadaires médianes des COVT ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ équivalent toluène) mesurées en inoccupation et en occupation dans le séjour des deux habitations en fonction des saisons (A noter que du fait de l'échelle de l'axe des ordonnées, l'histogramme de la concentration mesurée en VID dans PAS3 est tronqué ; Les tirets représentent les incertitudes de mesure de l'appareil ; ☆ : pics de concentrations ; * résultat donné à titre informatif du fait de l'arrêt inexpliqué de l'appareil de mesure au cours de l'enquête)

En l'absence de valeurs réglementaires ou de valeurs guides françaises pour les COVT, ces résultats sont comparés avec la valeur cible ($300 \mu\text{g}/\text{m}^3$) définie par la Commission « Hygiène de l'air intérieur » de l'Agence fédérale allemande pour l'environnement¹. La majorité des concentrations médianes sont inférieures à la valeur cible de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sur trois mesures dépassant cette valeur pour PAS3, une seule dépasse la valeur de $1\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Toutefois cette concentration a été mesurée en l'absence des occupants, en situation d'inoccupation lorsque le système de ventilation mécanique était à l'arrêt.

6.2.2 LES COMPOSES ORGANIQUES VOLATILS ET LES ALDEHYDES

6.2.2.1 Identification et quantification des composés présents

Les composés ont été prélevés par échantillonnage passif qui est une technique très utilisée. Pour l'acroléine, la mesure par prélèvement passif aurait cependant tendance à sous-estimer les concentrations mesurées du fait de l'instabilité des dérivés formés.

Les concentrations hebdomadaires des COV et des aldéhydes sont présentées dans le Tableau 6-4.

Sur les 20 composés cibles (16 COV et 4 aldéhydes) de l'OQAI sélectionnés selon une hiérarchisation sanitaire et recherchés en priorité, 15 ont été détectés et quantifiés en ion spécifique. En revanche, 5 n'ont jamais été détectés : 2-butoxyéthanol, 2-butoxyéthyl acétate, 1-méthoxy-2-propanol, tétrachloroéthylène et 1,4-dichlorobenzène. Tous les autres composés présents à des concentrations supérieures à la limite de quantification égale à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été quantifiés en équivalent toluène.

¹ <http://www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/richtwerte-irluft.htm>

Au final, douze familles de composés et quarante-six composés différents ont été quantifiés dans les deux habitations en situation d'inoccupation et en situation d'occupation.

En se basant sur la fréquence de détection des composés au cours des enquêtes, il apparaît que vingt-trois composés sont mesurés dans moins de 50 % des cas et seront écartés de la suite de l'exploitation des données. Il s'agit notamment de l'ensemble des glycols, des hydrocarbures halogénés, des composés organiques très volatils, des alcools aromatiques, des cétones et des furanes.

Les vingt-trois composés restants ont été quantifiés dans plus de 50 % des cas, voire pour la majorité d'entre eux, de façon systématique. Il s'agit de :

- deux hydrocarbures aliphatiques et cycliques : n-décane (mesuré dans 71 % des cas) et n-undécane (mesuré dans 57 % des cas) ;
- huit hydrocarbures aromatiques : 1,2,4-triméthylbenzène (100 %), toluène (100 %), m+p-xylène (100 %), éthylbenzène (93 %), o-xylène (86 %), styrène (86 %), benzène (79 %), alkylbenzènes (79 %) ;
- six aldéhydes : acétaldéhyde (100 %), formaldéhyde (100 %), hexaldéhyde (100 %), acroléine (100 %), benzaldéhyde (86 %), isovaléraldéhyde (57 %) ;
- cinq terpènes : alpha-pinène (100 %), limonène (100 %), camphène (79 %), bêta-pinène (64 %), o-cymène (50 %) ;
- le n-butylacétate (64 %) et l'acide acétique (34 %).

Les concentrations en COV et aldéhydes mesurées pour PAS3 sont particulièrement élevées en situation d'inoccupation en comparaison avec celles de BBC3. Comme pour les COVT, **il semble que cette particularité soit liée à l'arrêt du système de VMC double flux de PAS3 pendant la semaine de mesure** ayant entraîné l'accumulation de la pollution émise par les sources intérieures.

Parmi les vingt-trois composés précédents, 9 sont systématiquement quantifiés en phase d'occupation uniquement. L'hexaldéhyde est le composé majoritaire dans les deux habitations (concentration médiane égale à 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour BBC3 et 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PAS3). Les autres composés, par ordre de concentration médiane décroissante, sont deux aldéhydes (formaldéhyde et acétaldéhyde respectivement avec 28 et 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour BBC3 et 19 et 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PAS3), deux terpènes (alpha-pinène et limonène respectivement avec 12 et 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour BBC3 et 13 et 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PAS3), trois hydrocarbures aromatiques (toluène, 1,2,4-triméthylbenzène respectivement avec 6, 5 et 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour BBC3 et 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PAS3). Enfin, l'acroléine est présente à 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour BBC3 et à 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour PAS3.

Tableau 6-4 – Concentrations hebdomadaires ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des composés organiques volatils et des aldéhydes identifiés en inoccupation et en occupation dans la chambre des deux habitations selon les saisons et les phases d'enquêtes (LD : limite de détection, LQ : limite de quantification, LI : limite d'identification fixée à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NQ : non quantifié car co-élution du composé)

Famille de composé et composés identifiés	Etalonnage	Fréquence détection (%)	BBC3							PAS3							
			VID	ETE1	HIV1	ETE2	HIV2	ETE3	HIV3	VID	ETE1	HIV1	ETE2	HIV2	ETE3	HIV3	
Hydrocarbures aliphatiques et cycliques																	
alcanes C5	éq. tol.	43	5,6	<LI	<LI	7.1	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	3.7	<LI	1.6	8.8	4.8
alcanes C8	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	11,5	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
alcanes C9	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	49,2	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
alcanes C10	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	52,9	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
alcanes C11	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	46,2	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
dodécane (alcanes C12)	éq. tol.	21	<LI	<LI	<LI	2.0	<LI	3.5	<LI	15,6	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
Alcène	éq. tol.	14	<LI	<LI	<LI	<LI	2.1	<LI	<LI	16,2	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
alkylcyclohexanes	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	107	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
cyclohexane	éq. tol.	14	2,5	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	16,8	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
méthylcyclohexane	éq. tol.	7	5,6	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
nonane (alcane C9)	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	16,7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
n-décane	spé.	71	24,1	15.9	3.4	<LQ	<LQ	1.9	1.1	102	13.8	6.5	< LD	1.5	< LD	2.9	
n-undécane	spé.	57	37,9	23.9	3.4	<LQ	5.1	< LD	< LD	93,4	26.4	5.7	< LD	<LQ	< LD	3.1	
Hydrocarbures aromatiques																	
alkylbenzènes	éq. tol.	79	19	<LI	9.8	<LI	9.8	7.5	5.1	92,1	<LI	27.6	10.4	9.1	10.1	8.5	
1,2,4-triméthylbenzène	spé.	100	5,4	4.7	4.7	1.7	3.0	6.5	4.5	1,4	7.8	7.9	3.5	2.1	1.3	5.0	
benzène	spé.	64	1	1.2	1.8	< LQ	3.7	2.3	NQ	1	<LQ	1.8	<LQ	1.4	3.4	< LQ	
éthylbenzène	spé.	93	3,6	1.7	13.2	< LQ	1.8	2.1	2.6	222	5.1	6.8	1.8	1.3	6.3	3.7	
styrène	spé.	86	5	1.8	4	1.7	2.6	4.5	4.4	7,2	0.2	0.8	<LQ	<LQ	2.1	1.9	
toluène	spé.	100	11	5.4	6.2	2.6	4.4	9.0	8.8	36,7	5.1	5.3	3.0	2.9	15.9	7.1	
m+p-xylène	spé.	100	10,7	3.7	38.4	2.5	4.8	3.0	3.8	569	<LQ	22.3	4.5	4.4	12.3	6.4	
o-xylène	spé.	71	5,4	2.0	13.4	1.6	2.0	< LQ	< LQ	164	5.4	8.4	NQ	NQ	4.8	2.1	

Tableau 6-4 (suite) - Concentrations hebdomadaires ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des composés organiques volatils et des aldéhydes identifiés en inoccupation et en occupation dans la chambre des deux habitations selon les saisons et les phases d'enquêtes (LD : limite de détection, LQ : limite de quantification, LI : limite d'identification fixée à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NQ : non quantifié car co-élution du composé)

Famille de composé et composés identifiés	Etalonnage	Fréquence de détection (%)	BBC3							PAS3							
			VID	ETE1	HIV1	ETE2	HIV2	ETE3	HIV3	VID	ETE1	HIV1	ETE2	HIV2	ETE3	HIV3	
Aldéhydes																	
benzaldéhyde	éq. tol.	86	3,6	<LI	5.4	2.0	2.2	4	3.4	23,6	<LI	2.0	2.9	1.8	10.2	7.3	
isovaléraldéhyde	éq. tol.	57	6	<LI	<LI	2.8	<LI	<LI	<LI	13,1	7.3	5.0	5.1	1.6	22	<LI	
nonanal	éq. tol.	36	4	<LI	<LI	<LI	2.1	8.2	3.9	<LD	<LI	<LI	3.0	<LI	<LI	<LI	
acétaldéhyde	spé.	100	16,1	7.9	22.1	8.6	29.7	10.0	16.1	30,8	23.2	29.4	18.3	23.3	16.6	55.3	
formaldéhyde	spé.	100	48,3	19.9	31.1	25.0	35.4	28.5	26.8	21,7	16.8	19.7	24.5	14.4	29.8	19	
furfural	éq. tol.	21	<LI	<LI	<LI	3.4	6.5	11.1	<LI	<LI	<LI	<LI	2.0	<LI	<LI	<LI	
hexaldéhyde	spé.	100	112	29.1	36.1	41.8	67.3	45.7	63.9	685	96	88.1	121.5	53.9	125.4	111.7	
acroléine	spé.	100	2,8	0.9	2.4	5.3	18.3	1.2	2.2	3,1	1.6	2.9	2.6	1.6	2.4	3.0	
Terpènes																	
alpha-pinène	éq. tol.	100	43,2	12.7	9.0	9.6	11.0	19.5	24.2	294	17.7	6.8	8.6	5.9	23.8	25.0	
beta-pinène	éq. tol.	57	6,8	<LI	<LI	2.1	2.2	5.6	3.9	NQ	<LI	<LI	2.6	<LI	5.5	7.4	
camphène	éq. tol.	79	8,2	<LI	2.6	2.1	3.3	<LI	3.4	23,7	<LD	3.2	2.4	2.2	4.7	4.3	
limonène	éq. tol.	100	18,3	6.6	4.7	4.7	7.2	51.8	18.6	92,3	11	9.2	5.9	6.2	15.7	22.6	
3-carène	éq. tol.	36	6,6	<LI	<LI	<LI	2.8	<LI	<LI	48,6	<LI	<LI	<LI	<LI	6	7.2	
4-carène	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	6,5	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	
o-cymène	éq. tol.	50	<LI	<LI	<LI	3.1	2.0	5.3	5.5	<LI	<LI	<LI	2.6	<LI	7.1	5.6	
Glycols, éthers de glycol, esters de glycol																	
1,2-propanediol	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	3,5	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	
Hydrocarbures halogénés																	
trichloroéthylène	spé.	7	<LD	<LD	2.1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LQ	<LD	<LD

Tableau 6-4 (suite et fin) - Concentrations hebdomadaires ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des composés organiques volatils et des aldéhydes identifiés en inoccupation et en occupation dans la chambre des deux habitations selon les saisons et les phases d'enquêtes (LD : limite de détection, LQ : limite de quantification, LI : limite d'identification fixée à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NQ : non quantifié car co-élution du composé))

Famille de composé et composés identifiés	Etalonnage	Fréquence de détection (%)	BBC3							PAS3						
			VID	ETE1	HIV1	ETE2	HIV2	ETE3	HIV3	VID	ETE1	HIV1	ETE2	HIV2	ETE3	HIV3
Composés organiques très volatils																
acétone	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	6,5	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
éthylacétate	éq. tol.	21	<LI	<LI	2.4	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	4.2	4.4
Esters et lactones																
n-butylacétate	éq. tol.	64	6,5	<LI	548.1	4.3	<LI	7.1	<LI	108	<LI	2.5	3.5	1.9	<LI	8.7
Acides																
acide acétique	éq. tol.	64	<LI	<LI	3.2	3.9	9.6	22.3	45.0	<LI	<LI	5.4	<LI	4.4	48	25.2
Alcools aromatiques																
phénol	éq. tol.	14	4,9	<LI	<LI	<LI	<LI	7.8	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
Cétone																
cyclohexone	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	2.6	<LI	<LI	<LI
6-methyl-5-heptene-2-one	éq. tol.	14	<LI	<LI	<LI	2.0	<LI	4.1	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI
Furane																
3-méthylfurane	éq. tol.	7	<LI	<LI	<LI	<LI	4.4	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI	<LI

*co-élution avec d'autres composés

La présence de ces composés semble être liée à l'utilisation du bois notamment comme matériau de construction dans les deux habitations comme d'autres études l'ont précédemment montré. Dans une maison préfabriquée en bois, Hodgson et al. (2002) ont montré la prédominance et la persistance des aldéhydes (formaldéhyde, acétaldéhyde, hexaldéhyde, pentanal et nonanal) et des terpènes (alpha-pinène, d-limonène et 3-carène). En comparaison avec des constructions traditionnelles en béton, parpaing, etc., les teneurs en formaldéhyde et en alpha-pinène mesurées dans des maisons en bois seraient significativement plus élevées selon Park et Ikeda (2006). Enfin, selon Yamaguchi et al. (2006), la présence de certaines essences de bois, comme le pin et le cèdre, dans une maison individuelle neuve construite en bois, pourraient être la cause des fortes concentrations de terpènes, en particulier de l'alpha-pinène et du limonène.

Comparativement aux valeurs d'actions rapides définies par le Haut conseil de la santé publique (HCSP) pour le formaldéhyde, le benzène, le trichloréthylène et tétrachloréthylène, aucun dépassement n'est observé.

6.2.2.2 Evolution temporelle des concentrations des composés

6.2.2.2.1 Comparaison Inoccupation/Occupation

La comparaison des concentrations entre les phases d'inoccupation et d'occupation montre que dans la majorité des cas, les niveaux les plus élevés sont observés en phase d'inoccupation. Cette observation est d'ailleurs confirmée par d'autres études réalisées dans les habitations neuves (Park and Ikeda, 2006 ; Yamaguchi et al., 2006 ; Guo et al., 2003).

Le taux d'abattement des concentrations des composés a été calculé en considérant les concentrations mesurées en phase d'inoccupation (VID) et la médiane des concentrations en phase d'occupation (ETE1, HIV1, ETE2, HIV2, ETE3, HIV3). Comme le montre la Figure 6-3, les concentrations de la majorité des 23 composés diminuent de la phase d'inoccupation à la phase d'occupation.

Le taux d'abattement médian est égal à 49 % pour BBC3 et à 89 % pour PAS3. Cette différence du taux d'abattement peut être liée à l'arrêt du système de ventilation mécanique contrôlée pendant la semaine de mesure en phase d'inoccupation dans l'habitation PAS3. Pour PAS3, la présence du n-butylacétate en inoccupation puis sa disparition en occupation peut paraître étrange puisque l'émission de ce composé est liée à l'utilisation de produits cosmétiques (cf. ci-après) donc à la présence humaine. Les occupants de PAS3 sont venus dormir dans leur maison les deux premières nuits de la phase d'inoccupation. Ils ont vraisemblablement utilisé des produits cosmétiques dans leur salle de bain communicante avec leur chambre et les concentrations en n-butylacétate sont élevées ($108 \mu\text{g}/\text{m}^3$) vraisemblablement du fait de l'arrêt du système de ventilation mécanique contrôlée.

Le taux d'abattement est négatif pour deux composés dont les concentrations augmentent en phase d'occupation. La concentration en benzène est multipliée par 1,5 pour PAS3 et par 2 pour BBC3 et celle du 1,2,4-triméthylbenzène par 2,3 pour PAS3. Toutefois ces concentrations restent faibles en phase d'occupation (BBC3 : $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le benzène, PAS3 : $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le benzène et $3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le 1,2,4-triméthylbenzène).

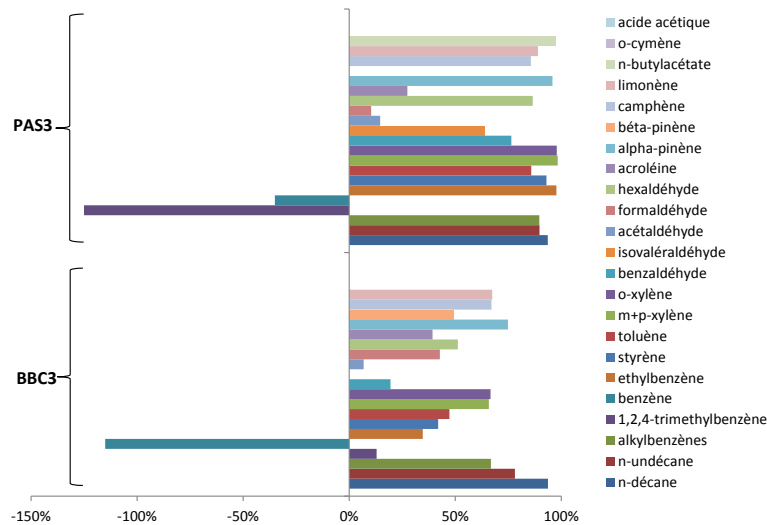


Figure 6-3 – Taux d’abattement entre la phase d’inoccupation et les phases d’occupation des concentrations hebdomadaires des 23 composés mesurés dans la chambre des deux habitations

6.2.2.2.2 Evolution temporelle en occupation

L’étude de l’évolution temporelle des concentrations de ces composés, entre la première enquête (ETE1) et la dernière enquête (HIV3) en phase d’occupation, permet de distinguer **cinq groupes de composés**:

- Le premier groupe de composés présente **une stabilité temporelle de leurs concentrations** (Figure 6-4). Sur cette figure, les concentrations médianes des composés ont été calculées par habitation et sont représentées par un trait en pointillé.

Ce groupe se compose de trois aldéhydes (formaldéhyde, hexaldéhyde, benzaldéhyde). Le benzaldéhyde présente une concentration médiane faible (concentration médiane de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) alors que le formaldéhyde et l’hexaldéhyde présentent des niveaux médians plus élevés (entre environ $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

- Le deuxième groupe de composés présente également **une stabilité temporelle de leur concentration ponctuée par des pics de concentrations** (Figure 6-5 et Figure 6-6). Pour un composé, un pic de concentration est identifié à partir du moment où la valeur mesurée lors d’une enquête est supérieure à la valeur médiane calculée pour l’habitation.

Ce groupe se compose de deux aldéhydes (acroléine, isovaléraldéhyde), cinq terpènes (alpha-pinène, bêta-pinène, o-cymène, limonène, camphène), de huit hydrocarbures aromatiques (alkylbenzènes, benzène, éthylbenzène, styrène, toluène, m+p-xylène, o-xylène, 1,2,4-triméthylbenzène) et du n-butyl-acétate. Les niveaux atteints par ces pics de concentration sont peu élevés

(concentrations maximales inférieures à $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$) à l'exception du n-butyl-acétate (concentration maximale de $548 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

- Le troisième groupe regroupe un seul composé, **l'acide acétique dont les concentrations semblent augmenter graduellement avec le temps** pour les deux habitations et atteignent des valeurs proches de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figure 6-7)
- Le quatrième groupe de composés présente **une diminution graduelle des concentrations dans le temps** de deux hydrocarbures aliphatiques et cycliques (n-décane, n-undécane) (Figure 6-8)
- Le cinquième groupe regroupe un seul composé, **l'acétaldéhyde dont les concentrations varient de façon saisonnière**, avec des concentrations hivernales supérieures aux concentrations estivales (médianes des concentrations respectivement égales à $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en été contre $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en hiver) (Figure 6-9).

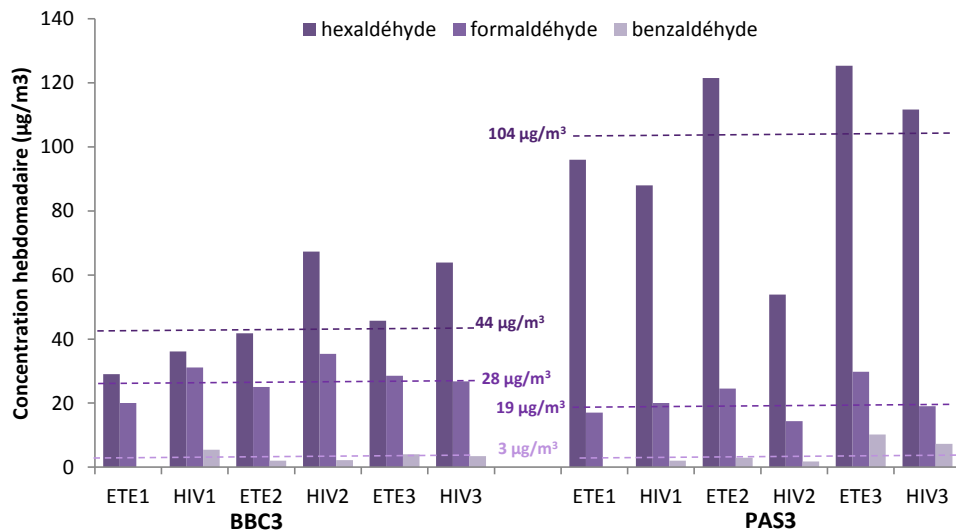


Figure 6-4 – Stabilité temporelle des concentrations hebdomadaires de trois aldéhydes mesurés en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes (XX $\mu\text{g}/\text{m}^3$: concentration médiane en phase d'occupation par habitation)

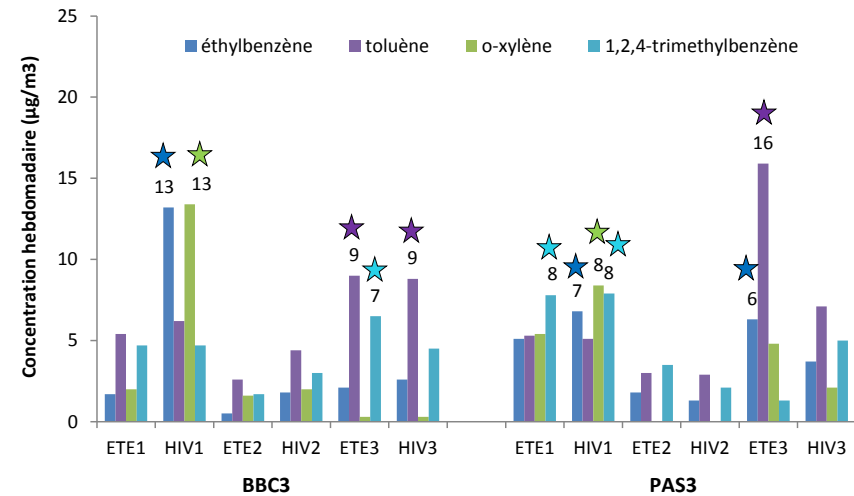
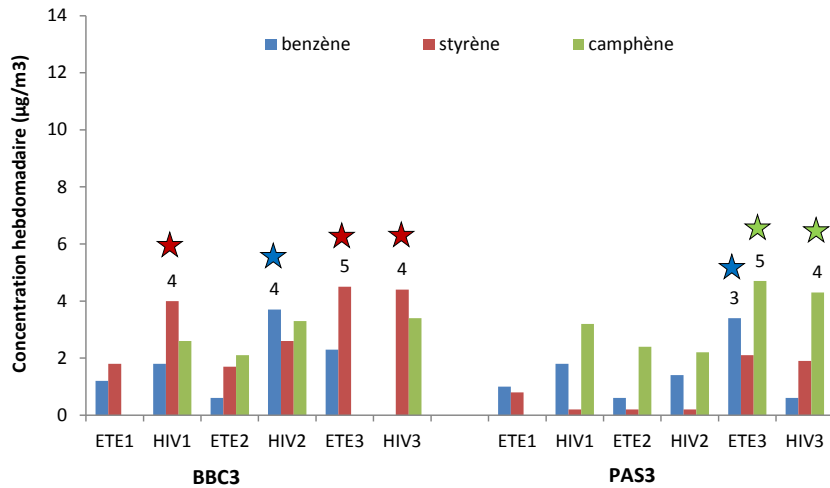
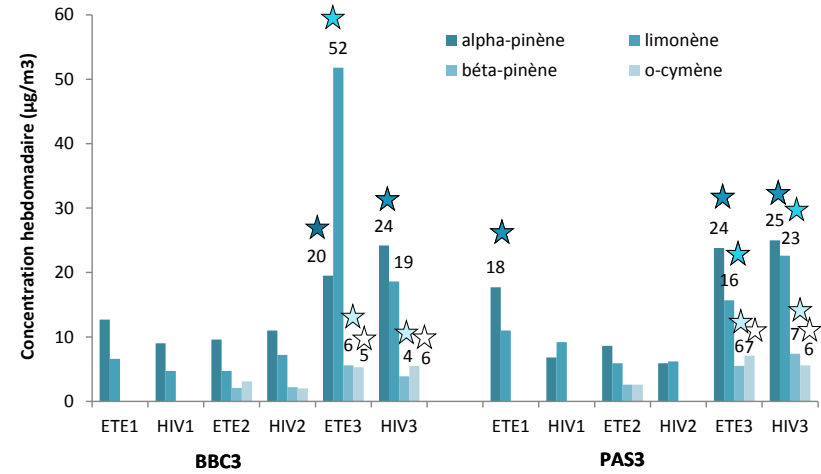
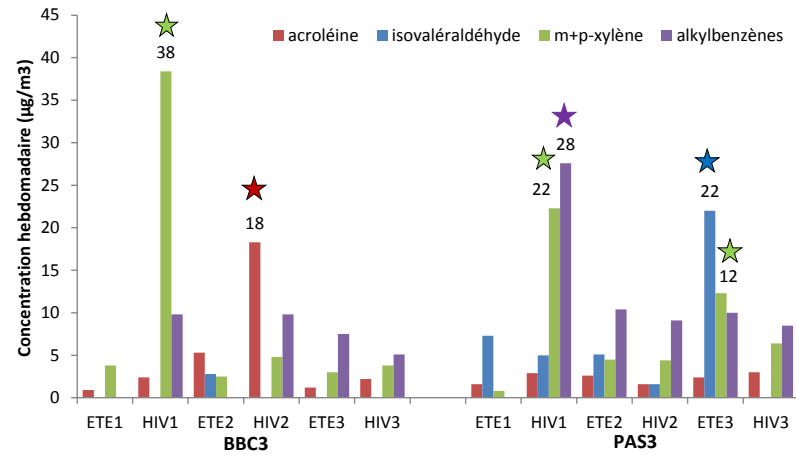


Figure 6-5 – Concentrations hebdomadaires de 15 composés organiques volatils et aldéhydes présentant des pics de concentrations (\star) mesurés en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes

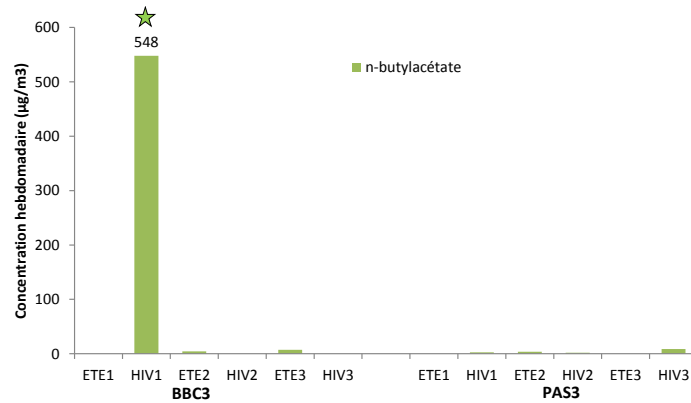


Figure 6-6– Pic ponctuel des concentrations hebdomadaires du n-butylacétate mesurés en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes.

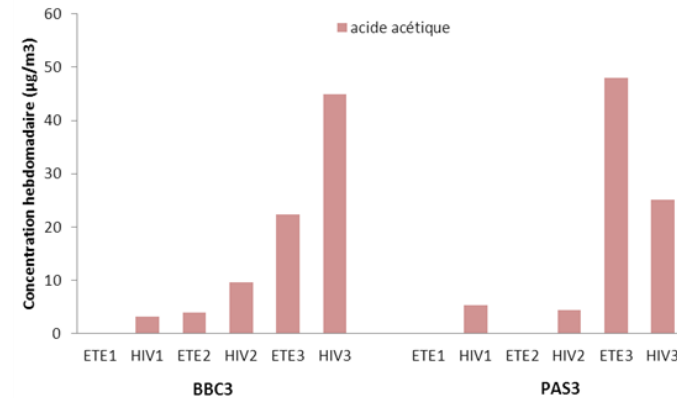


Figure 6-7– Concentrations hebdomadaires de l'acide acétique mesuré en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes.

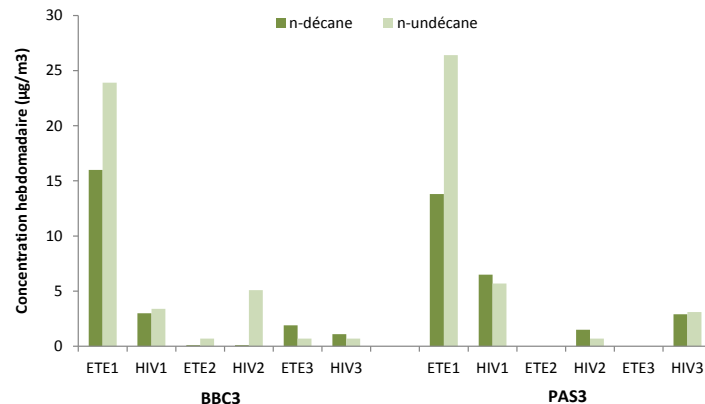


Figure 6-8 - Concentrations hebdomadaires du n-décane et du n-undécane mesuré en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes.

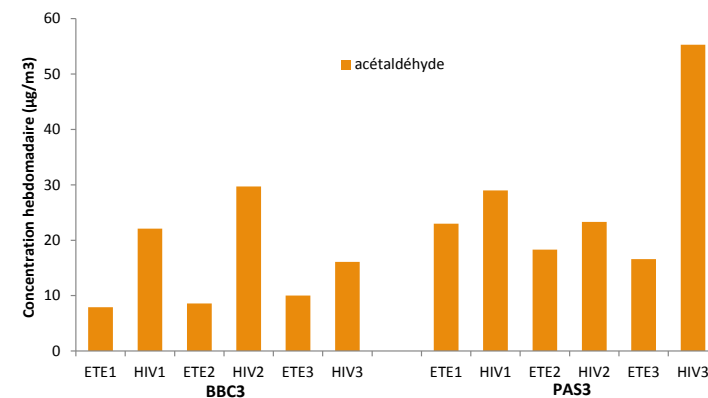


Figure 6-9- Concentration hebdomadaire de l'acétaldéhyde mesuré en occupation dans la chambre des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes.

6.2.3 LE MONOXYDE DE CARBONE (CO)

Les concentrations du monoxyde de carbone (CO) mesurées dans le séjour ouvert sur la cuisine en situation d'occupation, uniquement en période de chauffe (hiver) et pendant les trois années de suivi, sont présentées sur le Tableau 6-5.

La durée de suivi des concentrations en CO est proche de la durée théorique correspondante à 7 jours de mesure (168 heures) sauf dans deux cas. Pour BBC3-HIV3, l'appareil de mesure a été arrêté par l'occupant suite au déclenchement inexplicable de son alarme. Pour PAS3-HIV3, l'appareil de mesure s'est arrêté au cours de la semaine de mesure pour une raison inexplicable.

Les concentrations en CO sont le plus souvent nulles. Les concentrations médianes sont toujours égales à 0 ppm alors que les concentrations moyennes peuvent atteindre 1 ppm. Il faut noter qu'une concentration maximale de 20 ppm a été mesurée dans BBC3 pour HIV2. Le suivi temporel du CO durant cette enquête montre que ce pic de concentration a été mesuré le lundi 31 janvier à 12h00 et semble très probablement être en lien avec la présence de fumée rapportée par les occupants lors de la combustion du bois dans leur poêle cheminée. Les autres pics de concentrations (inférieurs à 10 ppm) sont possiblement également liés à l'utilisation du poêle-cheminée en soirée ou le matin.

Tableau 6-5 - Durée de mesure et données statistiques descriptives des concentrations monoxyde de carbone (ppm) mesurées dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque période de chauffe

Lieu	Saison	Durée observée (en h)	min	Moyenne	Médiane	max
BBC3	HIV1	165	0	0	0	1
	HIV2	167	0	1	0	20
	HIV3	148	0	1	0	3
PAS3	HIV1	167	0	0	0	0
	HIV2	166	0	0	0	0
	HIV3	103	0	1	0	3

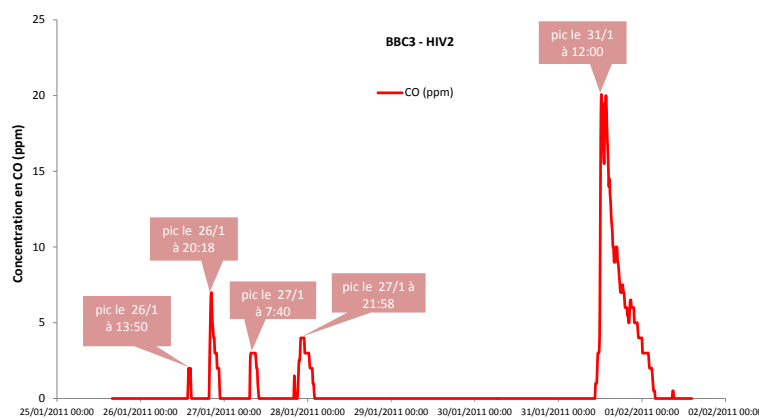


Figure 6-10 - Concentrations du CO (ppm) mesurées dans le séjour ouvert sur la cuisine de BBC3 au cours de l'enquête HIV2.

6.2.4 LES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'AIR : CONCENTRATION MASSIQUE PM_{2.5}

Les concentrations massiques des particules PM_{2.5} mesurées dans le séjour ouvert sur la cuisine en situation d'inoccupation et d'occupation, lors des deux saisons (été et hiver) et des trois années sont présentées sur le Tableau 6-6. Du fait de l'invalidation des prélèvements réalisés en ETE2 et HIV2 dans PAS3, les concentrations massiques de ces enquêtes n'ont pas pu être calculées.

Les concentrations des PM_{2.5} varient entre 7 et 75 µg/m³ et malgré l'absence des mesures de la seconde phase (ETE2 et HIV2) de PAS3, il semble que les concentrations en situation d'occupation sont plus élevées en hiver qu'en été (concentration médiane égale à 7,8 en été contre 28 µg/m³ en hiver pour BBC3 et 7,7 en été contre 17 µg/m³ en hiver pour PAS3) (Figure 6-11).

Quatre pics de concentration ont été identifiés exclusivement en hiver : 3 pour BBC3 avec des concentrations variant entre 25 et 75 µg/m³ et 1 pour PAS3 (concentration maximale de 24 µg/m³).

Tableau 6-6 – Concentration massique des PM_{2.5} mesurées dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque saison et chaque phase

Phase	Concentration massique PM _{2.5} (µg/m ³)	
	BBC3	PAS3
VID	7,4	12,1
ETE1	7,8	7,1
HIV1	27,8	23,5
ETE2	9,5	nd
HIV2	74,7	nd
ETE3	7,5	8,4
HIV3	25,0	9,8

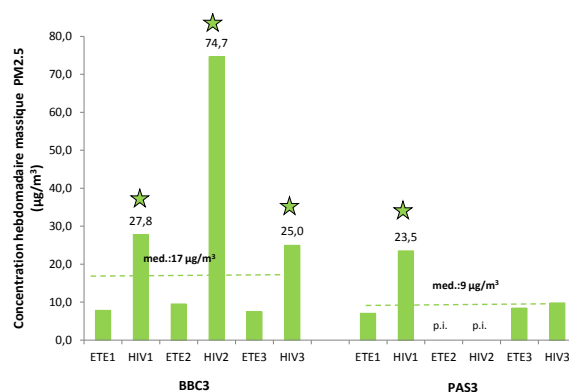


Figure 6-11 - Concentrations massiques des particules PM_{2.5} (µg/m³) mesurées uniquement en occupation dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque saison et chaque phase et indication de la concentration médiane par habitation (p.i : prélèvement invalide, ☆ : pics de concentration, med. : concentration médiane)

L'influence de la saison sur les concentrations des PM_{2.5} a précédemment été reportée par Fromme et al. (2006) et Keeler et al. (2002) et semble être liée aux différentes pratiques d'aération en été et en hiver. Selon une méta-analyse conduite par Hänninen et al. (2011) en Europe, le taux d'infiltration des particules de l'extérieur vers l'intérieur varie selon la saison et il est deux fois plus important en été qu'en hiver. A cause de l'augmentation du renouvellement d'air en été par ouverture des fenêtres, les niveaux intérieurs des PM_{2.5} seraient fortement corrélés aux concentrations extérieures alors qu'en hiver, ils seraient plus fortement influencés par les activités humaines intérieures.

Dans la présente étude, les concentrations extérieures des PM_{2.5} ont été recueillies auprès de la station de mesure la plus proche des habitations gérée par une Association agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air. Il apparaît que les concentrations extérieures médianes sont, comme les concentrations intérieures, plus élevées en hiver qu'en été (respectivement 32 et 12 µg/m³). L'étude de la corrélation des concentrations intérieures et extérieures des PM_{2.5} sur les trois années de suivi a montré une forte corrélation positive en été ($r=0.78$) et l'absence de corrélation en hiver ($r=0.14$) ce qui confirme les hypothèses de Hänninen et al. (2011). L'aération des fenêtres pratiquée par les occupants en période estivale semble en être la cause. Le calcul du ratio des concentrations des PM_{2.5} intérieures/extérieures montre que la valeur médiane de ce dernier est de 0,7 en été contre 1,5 en hiver. Ceci montre que les concentrations intérieures des PM_{2.5} sont inférieures aux concentrations extérieures en été alors que la tendance inverse est observée en hiver.

En conclusion :

- En hiver, du fait de l'absence de transfert des PM_{2.5} de l'extérieur vers l'intérieur et des niveaux de PM_{2.5} plus élevés en intérieur qu'en extérieur en hiver, il semble exister une source intérieure de particules qui est mise en évidence (ou qui existe seulement) en cette saison. Il est probable que la combustion du bois dans la cheminée en soit la cause.
- En été, les niveaux intérieurs de PM_{2.5} sont plus faibles qu'en hiver possiblement du fait de l'absence de sources intérieures de particules en cette saison et des niveaux extérieurs de PM_{2.5} plus faibles qu'en hiver. L'aération des fenêtres pratiquée par les occupants en leur présence semble favoriser le transfert des PM_{2.5} de l'extérieur vers l'intérieur.

6.2.5 LES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'AIR : CONCENTRATION EN NOMBRE

Il est apparu intéressant de suivre l'évolution temporelle des concentrations en particules afin de pouvoir identifier plus facilement les différentes sources d'émissions particulaires. En l'absence d'appareils de mesure permettant le suivi de la concentration massique des PM_{2.5} par méthode gravimétrique normalisée, c'est le nombre de particules qui a été mesuré. L'appareil de mesure utilisé permet de distinguer quinze canaux granulométriques entre 0,3 et 20 µm mais par soucis de simplification, les résultats des mesures sont présentés pour deux tranches granulométriques [0,3-1 µm[et [1-20 µm]. La coupure granulométrique a été définie à 1µm afin de distinguer la fraction des particules très fines et ultrafines (PM₁) de celle des particules « grosses » (PM₁₋₂₀).

Les statistiques descriptives du nombre de particules par litre d'air mesurées dans le séjour ouvert sur la cuisine des deux habitations en situation d'inoccupation et d'occupation, lors des deux saisons (été et hiver) et des trois années sont présentées dans le Tableau 6-7 et le Tableau 6-8.

Tableau 6-7 – Durée de mesure et données statistiques descriptives des concentrations en nombre de particules de diamètre $[0,3-1 \mu\text{m}]$ (nombre par litre d'air) mesurées dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque phase

Lieu	Saison	Durée observée (en h)	min	P25	Moyenne	Médiane	P75	max
BBC3	VID	167	13071	22081	37590	33225	43957	2529936
	ETE1	167	5975	11243	18125	14105	19321	776800
	HIV1	Prélèvement invalidé						
	ETE2	167	5585	15993	30833	26421	42609	117809
	HIV2	167	8980	70463	1113881	165985	549493	16773742
	ETE3	167	3386	9912	26217	15138	36447	603264
	HIV3	163	8053	23190	64574	32031	68331	1825925
PAS3	VID	167	15819	27024	57159	40827	90342	156941
	ETE1	167	7961	14264	21553	19245	24382	536054
	HIV1	166	17722	62119	173794	137339	224381	2090915
	ETE2	167	6590	20621	41739	41797	61164	135481
	HIV2	166	11814	33798	123810	94971	195103	661951
	ETE3	Prélèvement invalidé						
	HIV3	Prélèvement invalidé						

Tableau 6-8 – Durée de mesure et données statistiques descriptives des concentrations en nombre de particules de diamètre $[1-20 \mu\text{m}]$ (nombre par litre d'air) mesurées dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque phase

Lieu	Saison	Durée observée (en h)	min	P25	Moyenne	Médiane	P75	max
BBC3	VID	167	70	189	329	274	380	8723
	ETE1	167	21	342	767	637	1048	22344
	HIV1	Prélèvement invalidé						
	ETE2	167	29	175	367	309	465	5110
	HIV2	167	22	112	1347	295	990	49052
	ETE3	167	26	245	608	450	750	14555
	HIV3	164	110	353	957	553	895	44166
PAS3	VID	167	1	7	640	37	553	18342
	ETE1	167	68	372	680	546	845	2275
	HIV1	166	67	217	873	432	903	22749
	ETE2	167	60	105	238	173	332	1067
	HIV2	166	12	58	184	131	257	2298
	ETE3	Prélèvement invalidé						
	HIV3	Prélèvement invalidé						

La durée de suivi des concentrations en nombre de particules est proche de la durée théorique correspondant à 7 jours de mesure soit 168 heures. Il manque toutefois des données pour l'enquête HIV1 de BBC3, ETE3 et HIV3 de PAS3 où les prélèvements ont été invalidés suite à un problème d'alimentation électrique de l'appareil de mesure.

Les concentrations médianes en particules de diamètre $[0,3-1 \mu\text{m}[$ sont plus élevées (de l'ordre de 100 fois) que celles des particules de diamètre $[1-20 \mu\text{m}]$. Les concentrations médianes des particules de diamètre $[0,3-1 \mu\text{m}[$ varient entre environ 14 000 et plus de 160 000 particules/litre, alors que celles des particules $[1-20 \mu\text{m}]$ oscillent environ 40 et plus de 600 particules/litre.

Les concentrations médianes des particules de diamètre $[1-20\mu\text{m}]$ les plus faibles sont systématiquement observées en phase d'inoccupation pour chaque habitation, alors que ce n'est pas le cas pour les particules de diamètre $[0,3-1\mu\text{m}[$. Ceci est vraisemblablement lié aux caractéristiques de taille et de poids des particules de diamètre $[1-20\mu\text{m}]$ qui sédimentent rapidement en l'absence d'activités humaines. En situation d'occupation, le nombre de particules de diamètre $[1-20\mu\text{m}]$ augmente du fait de l'existence de sources intérieures d'émission liées à l'activité humaine, mais aussi par la remise en suspension des particules déposées au sol.

L'évolution temporelle des concentrations médianes des particules en nombre uniquement en phase d'occupation semble être différente selon les tranches granulométriques considérées.

- Pour les particules de diamètre $[0,3-1\mu\text{m}[$ et bien que les mesures HIV1 de BBC3, ETE3 et HIV3 de PAS3 soient absentes, il semble que la concentration en nombre varie selon les saisons avec des teneurs plus élevées en hiver qu'en été (Figure 6-12).

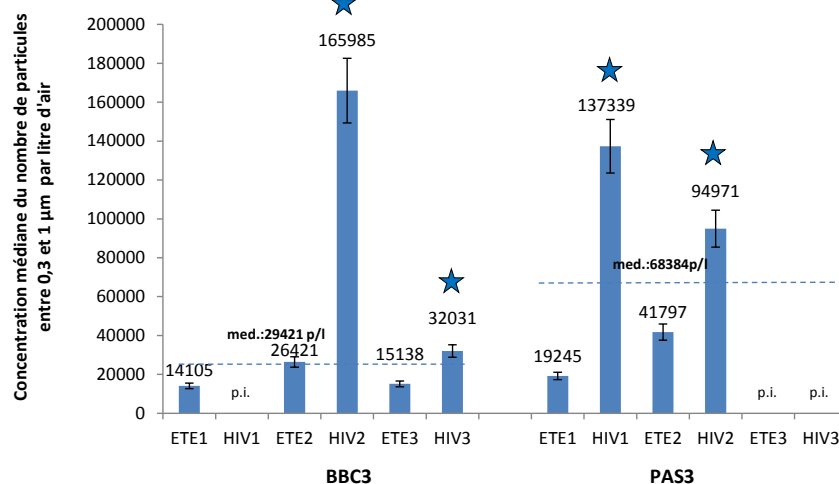


Figure 6-12 – Concentrations médianes du nombre de particules de diamètre $[0,3-1\mu\text{m}[$ (nombre par litre d'air) mesurés dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque saison et chaque phase et indication de la concentration médiane par habitation (p.i : prélèvement invalide, ★ : pics de concentration, med. : concentration médiane) (Les tirets représentent les incertitudes de mesure de l'appareil)

Les concentrations médianes sont égales à 99 000 particules/litre pour BBC3 et 116 000 particules/litre pour PAS3 en hiver contre 15 140 particules/litre pour BBC3 et 30 520 particules/litre pour PAS3 en été.

- Pour les particules de diamètre [1-20 μ m], il ne semble pas y avoir de variation saisonnière de leur concentration en nombre (Figure 6 10).

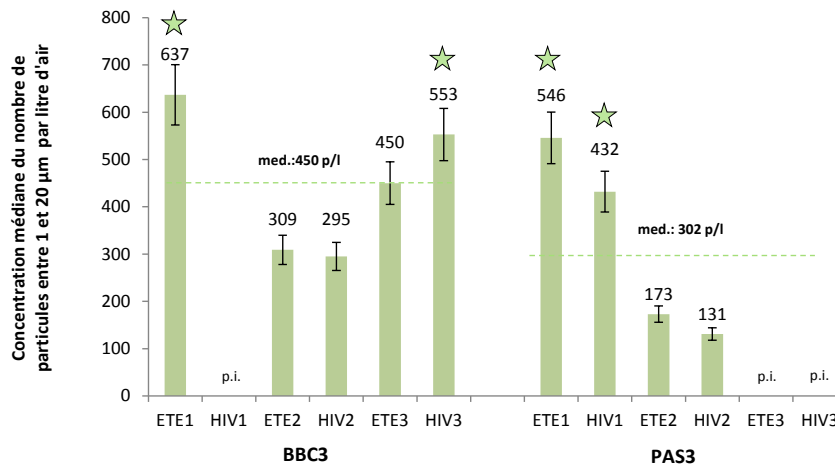


Figure 6-13 - Concentrations médianes du nombre de particules de diamètre [1-20 μ m] (nombre par litre d'air) mesurés dans le séjour de chaque bâtiment pour chaque saison et chaque phase et indication de la concentration médiane par habitation (p.i. : prélèvement invalide, ☆ : pics de concentration, med. : concentration médiane) (Les tirets représentent les incertitudes de mesure de l'appareil)

Afin de rechercher l'origine des particules comprises entre 0,3 et 20 μ m et suspectant l'émission de particules par le poêle-cheminée fonctionnant au bois, les mesures en continu du nombre de particules et des concentrations en CO ont été superposées et sont présentées sur la Figure 6-14 pour BBC3 lors de l'enquête HIV2. Il apparaît que les pics de concentrations du nombre de particules se superposent parfaitement aux pics de concentrations en CO ce qui montre que ces polluants ont une origine commune : la combustion du bois dans le poêle-cheminée.

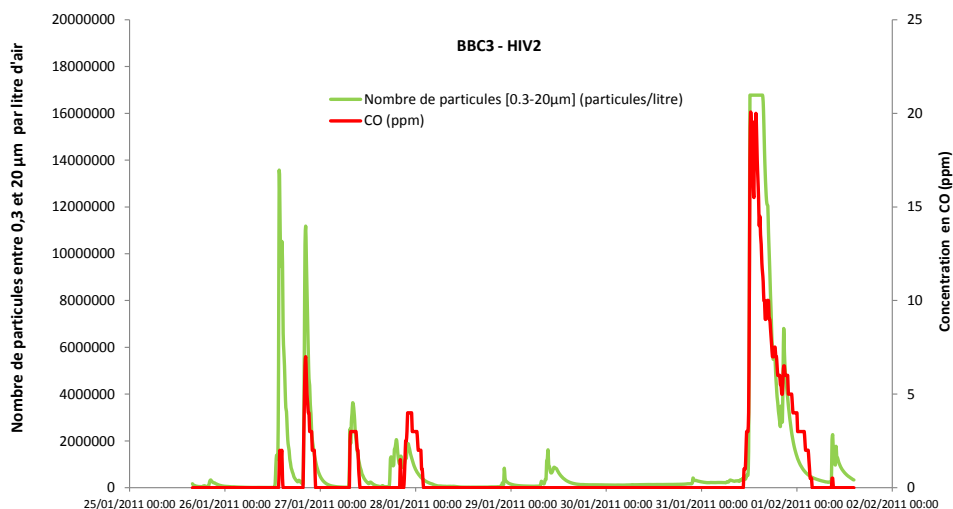


Figure 6-14 – Mesure en continu du nombre de particules [0.3-20 μ m] et de la concentration en CO (ppm) au cours de l'enquête HIV2 de BBC3.

6.2.6 EVENTUELS FACTEURS RESPONSABLES DES PICS DE CONCENTRATION DES INDICATEURS DE QAI

Suite à l'étude de l'évolution temporelle des concentrations des indicateurs de qualité d'air intérieur, il a paru intéressant de mettre en parallèle la présence des pics de concentration avec les activités humaines pouvant impactées sur la QAI et reportées par les occupants soit au cours des enquêtes, soit entre deux enquêtes consécutives (Tableau 6-9).

Tableau 6-9 – Correspondance entre les indicateurs de QAI présentant un pic de concentrations (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ou en particule/litre pour PMN) et les activités pouvant impactées la QAI et reportées par les occupants des deux habitations en fonction des saisons et des phases d'enquêtes

Code bâtiment	Saison	Indicateurs de QAI présentant des pics de concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ ou particule/litre pour PMN)	Activités « polluantes » reportées par les occupants au cours des enquêtes ou entre deux enquêtes successives (Inter-enquête)
BBC3	Inter-enquête		Installation escalier, introduction meubles neufs en bois massif ou métal
	ETE1	PMN ₁₋₂₀ (637)	Travaux réalisés par le menuisier pendant un jour
	Inter-enquête	-	Introduction d'un meuble de séparation en panneaux de bois + retouches de vernis et colle (forte odeur)
	HIV1	Ethylbenzène (13), styrène (4), m+p-xylène (38), o-xylène (13), acétaldéhyde (22), n-butylacétate (548), PM _{2,5} (28)	utilisation poêle cheminée, utilisation cosmétique/parfum dans CHB
	Inter-enquête	-	Introduction meubles bois massif (lit, table) et bois massif/bois aggloméré (laissé dehors pendant 1 mois), meubles acier (étagère, bureau), canapé en laine bouillie
	ETE2	Pas de pic de concentration	
	Inter-enquête	-	Pose de faïence avec colle dans SBD du RDC
	HIV2	Benzène (4), acroléine (18), acétaldéhyde (30), PM _{2,5} (75), PMN _{0,3-1} (165985)	Utilisation poêle cheminée tous les jours sauf WE, arrêt utilisation cosmétique/parfum dans CHB
	Inter-enquête	-	Introduction d'1 sommier, d'1 matelas muni de pieds bois
	ETE3	Toluène (9), alpha-pinène (20), limonène (52), beta-pinène (6), o-cymène (5), styrène (5), 1,2,4-triméthylbenzène (7)	
Inter-enquête	-	Travaux de peinture dans salle de bain du RDC (peinture < 10g/l COV)	
HIV3	Toluène (9), alpha-pinène (24), limonène (19), beta-pinène (4), styrène (4), o-cymène (6), acétaldéhyde (16), COVT (381), PM _{2,5} (25), PMN _{0,3-1} (32031), PMN ₁₋₂₀ (553)	Combustion d'encens, de bougies, réalisation de deux pierrades, utilisation du poêle cheminée plusieurs fois pendant la semaine	
PAS3	Inter-enquête		Aménagement intérieur (portes placard, couloir), vernis sur portes dressing, huile sur plan de travail cuisine
	ETE1	Alpha-pinène (18), 1,2,4-triméthylbenzène (8), PMN ₁₋₂₀ (546)	
	Inter-enquête	-	Installation du poêle cheminée une semaine avant l'enquête HIV1
	HIV1	Alkylbenzènes (28), éthylbenzène(7), 1,2,4-triméthylbenzène (8), o-xylène (8), m+p-xylène (22), acétaldéhyde (29), COVT (569), PM _{2,5} (24), PMN _{0,3-1} (137339), PMN ₁₋₂₀ (432)	Odeur de vernis en entrant dans l'habitation, utilisation du poêle cheminée
	Inter-enquête	-	Travaux de peinture sur la cheminée et introduction meuble bois massif
	ETE2	Pas de pic de concentration	
	Inter-enquête	-	Application d'huile sur deux étagères
	HIV2	Acétaldéhyde (23), PMN _{0,3-1} (94971)	utilisation du poêle cheminée 4 fois pendant la semaine
	Inter-enquête	-	Introduction meuble d'entrée en bois massif + application d'huile
	ETE3	Benzène (3), éthylbenzène (6), isovaléraldéhyde (22), alpha-pinène (24), bêta-pinène (6), o-cymène (7), camphène (5), limonène (16), toluène (16), m-p-xylène(12)	
Inter-enquête	-		
HIV3	Acétaldéhyde (55), alpha-pinène (25), limonène (23), bêta-pinène (7), o-cymène (6), camphène (4)	utilisation du poêle cheminée 3 fois pendant la semaine	

Bien qu'aucune association (polluant/source) ne puisse être établie formellement, la répétition des observations et des événements a permis, sur la base d'hypothèses déjà décrites dans la littérature scientifique, d'émettre un certain nombre d'hypothèses :

- Le n-butyl-acétate présente une concentration élevée en HIV1 (548 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour BBC3. Ce composé est connu pour être utilisé comme solvant ou diluant dans l'industrie cosmétique, vestimentaire (colle pour chaussures et cuir), automobile (laques de protection et vernis), alimentaire (comme agent de saveur), pharmaceutique (comme agent d'extraction), mais aussi pour la production de cire liquide pour sol, de films photographiques et de plastiques (Health Council of the Netherlands, 2001). Dans cette étude, il est possible que la présence du **n-butyl-acétate** soit liée à **l'utilisation de parfums et/ou de produits cosmétiques** tels que vernis à ongles et dissolvants (Toy, 1989) dans la pièce où les prélèvements des COV et des aldéhydes ont été réalisés. En effet, la chambre de la personne de référence dans laquelle les prélèvements ont été faits est équipée d'un lavabo où sont stockés des produits cosmétiques et d'un coin douche. L'apparition du pic de concentration en HIV1 concorde avec l'utilisation quotidienne de parfum et de laque capillaire déclarée par les occupants au cours de la semaine de mesure. La diminution de la concentration en dessous de 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les enquêtes suivantes est liée au choix des occupants de ne plus utiliser ces produits dans leur chambre.
- La concomitance d'apparition de pics de concentration en **particules** (concentration massique $\text{PM}_{2.5}$ et concentration en nombre) et en **acétaldéhyde** exclusivement en hiver semble être liée à la **combustion du bois de chauffage dans le poêle cheminée** équipant les deux habitations. Selon Allemand et al. (2008), l'influence du chauffage au bois a un impact notable sur les niveaux intérieurs des $\text{PM}_{2.5}$, des PM_{10} et majeur pour le benzène et les HAP. Nazir et Colberg (2013) ont montré que les concentrations en PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ et PM_1 étaient significativement plus importantes dans les pièces chauffées au bois que dans celles ayant un chauffage central. De plus, Carvalho et al. (2013) ont mis en évidence l'apparition de pics de particules en nombre de diamètre compris entre 0.02 et 1 μm observés au moment de l'allumage et lors de l'alimentation d'un poêle à bois.
- L'apparition d'un nombre élevé de « **grosses** » **particules [1-20 μm]** en ETE1 pour BBC3 et PAS3 semble être liée à la **réalisation de travaux** (perçage et balayage par le menuisier pour BBC3 et aménagement pour PAS3) lors de la semaine de mesure. Nazir et Colberg (2013) ont montré que la resuspension des particules déposées au sol, le nettoyage du sol généraient de grosses particules alors que les processus de combustion (pour le chauffage, la cuisine) émettaient des particules de plus faible diamètre.
- La présence des **xylènes** et de **l'éthylbenzène** en concentration élevée en HIV1 correspond à l'apparition d'une forte odeur « de vernis » suite à **l'application de vernis** sur des meubles pour BBC3 et pour PAS3.
- L'augmentation des concentrations des **terpènes** en ETE3 semble liée à l'introduction de meubles neufs en bois juste avant la semaine d'enquête.

- **L'apparition d'acide acétique** observée dans les deux habitations a également été décrite par Hodgson et al. (2000) dans des maisons neuves préfabriquées en bois. Les auteurs ont observé une augmentation des taux d'émission de ce composé avec le temps, mais les sources d'émission n'ont pas été clairement identifiées (possiblement bois en contre-plaqué).

6.2.7 COMPARAISON AVEC L'ÉTAT DE LA POLLUTION DE L'AIR DES LOGEMENTS FRANÇAIS

A titre d'information, les concentrations des composés organiques volatils, des aldéhydes et des PM_{2,5} mesurées en phase d'occupation dans les deux habitations ont été comparées à celles des logements de la campagne nationale « Logements » de l'OQAI menée en 2003-2005 (Kirchner et al. 2006).

Les rapports des concentrations médianes (ou moyennes) mesurées au cours de la première année (médiane/moyenne des mesures ETE1 et HIV1), de la deuxième année (médiane/moyenne des mesures ETE2 et HIV2) et de la troisième année (médiane/moyenne des mesures ETE3 et HIV3) sur les concentrations médianes des logements français sont représentés sur la Figure 6-15 pour BBC3 et la Figure 6-16 pour PAS3. Les composés non détectés (tétrachloroéthylène, 1,4-dichlorobenzène, 2- butoxyéthanol et son acétate, 1-méthoxy-2-propanol), le trichloroéthylène et le 1-méthoxy-2-propalacétate quantifiés une seule fois (respectivement 2,1 µg/m³ en HIV1 dans BBC3 et 0,4 µg/m³ en HIV1 dans PAS3) n'apparaissent pas sur ces figures.

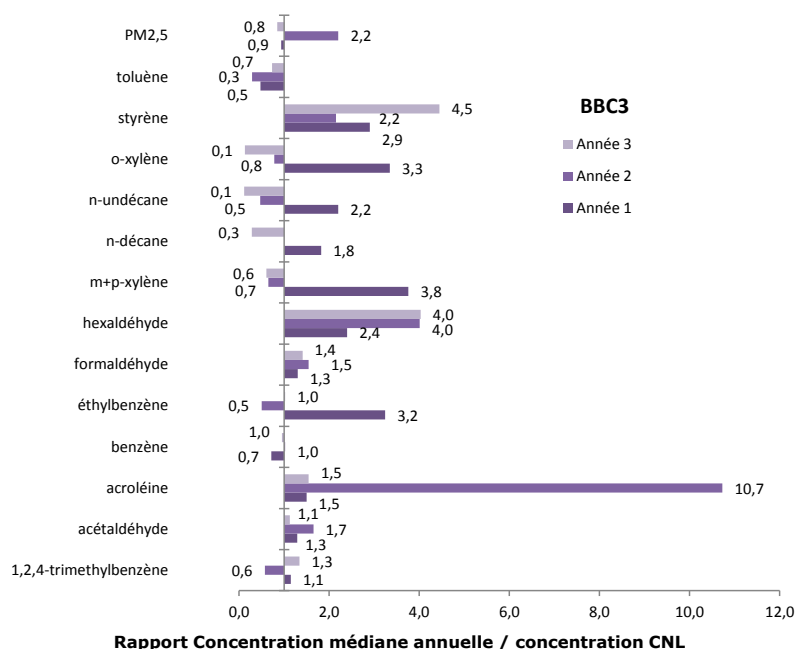


Figure 6-15 – Rapports des concentrations annuelles des composés organiques volatils, des aldéhydes et des PM_{2,5} mesurées en situation d'occupation pendant 3 ans dans l'habitation BBC3 sur la concentration médiane des logements français

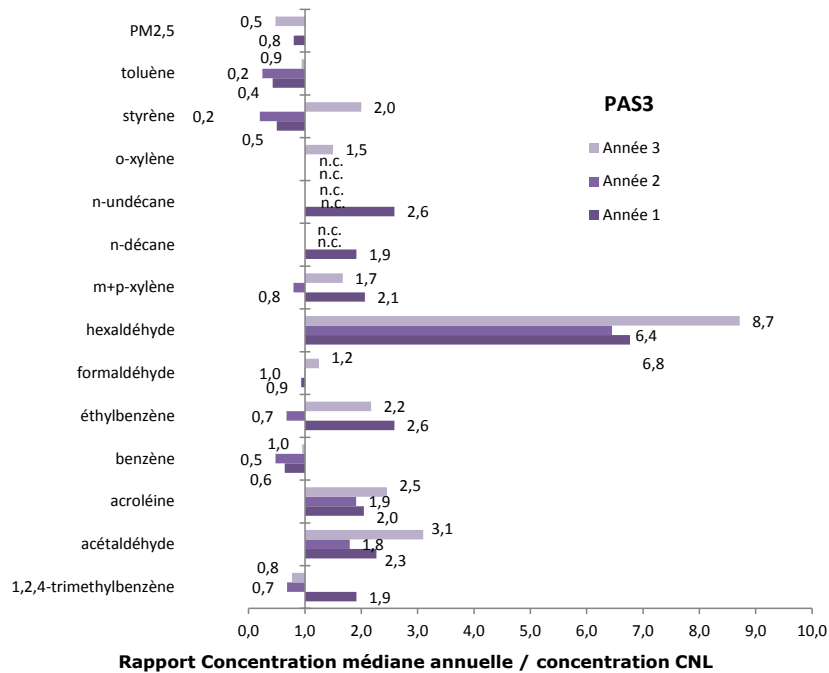


Figure 6-16 – Rapports des concentrations annuelles des composés organiques volatils, des aldéhydes et des PM_{2,5} mesurées en situation d'occupation pendant 3 ans dans l'habitation PAS3 sur la concentration médiane des logements français (n.c. : non calculé)

Sur les 14 indicateurs de qualité d'air intérieur communs avec ceux de la campagne nationale logements, il apparaît sur les trois années d'observation des deux habitations que les concentrations de certains composés :

- sont toujours restées inférieures aux concentrations des logements français. Il s'agit du toluène auquel il faut rajouter pour PAS3, le benzène, le o-xylène et les PM_{2,5} ;
- sont toujours restées supérieures aux concentrations des logements français. Il s'agit de l'hexaldéhyde, l'acétaldéhyde et de l'acroléine. Pour BBC3, il faut rajouter le formaldéhyde et le styrène et pour PAS3, le n-décane et le n-undécane ; Ceci peut être lié à la nature récente des deux habitations par rapport au parc existant ;
- ont oscillé autour des concentrations des logements français. Il s'agit de l'éthylbenzène, du m+p-xylène et du 1,2,4-triméthylbenzène. Pour BBC3, il y a aussi le benzène, le n-décane, le n-undécane, l'o-xylène et les PM_{2,5}. Pour PAS3, il y a aussi le styrène et le formaldéhyde.

Il est intéressant de noter pour certains indicateurs que leur rapport de concentration a diminué au fil du temps, en passant d'une valeur supérieure à 1, la première année, à une valeur inférieure à 1, la dernière année. Il s'agit du n-décane, du n-undécane, du m+p-xylène et de l'o-xylène pour BBC3 et du 1,2,4-triméthylbenzène pour PAS3. La tendance inverse est observée pour le benzène, le formaldéhyde et l'hexaldéhyde pour BBC3 et pour le formaldéhyde, l'hexaldéhyde, l'acroléine, l'acétaldéhyde pour PAS3.

7. EVOLUTION TEMPORELLE DU CONFORT THERMIQUE DES OCCUPANTS

Le confort thermique est évalué, à partir des mesures en continu de la température et de l'humidité relative de l'air dans deux pièces (séjour ouvert sur la cuisine et chambre) au cours des enquêtes, par l'étude dynamique du profil des données, par le calcul des indices de confort global (PMV et PPD) et des critères de confort thermique local et l'évaluation du confort adaptatif (en période estivale). Ces résultats ont été ensuite confrontés à la perception du confort thermique des occupants renseignée par auto-questionnaire pendant les enquêtes.

7.1 ETUDE DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'HUMIDITÉ RELATIVE DE L'AIR AU COURS DES ENQUÊTES

Les statistiques descriptives de la température et de l'humidité relative de l'air mesurées à 75 cm de hauteur dans la chambre du ménage et à 120 cm dans le séjour ouvert sur la cuisine sont présentées respectivement dans le Tableau 7-1 et le Tableau 7-2 pour les deux habitations en situation d'inoccupation et d'occupation, lors des deux saisons (été et hiver) et des trois années.

La durée de suivi de ces deux paramètres est proche de la durée théorique correspondant à 7 jours de mesure soit 168 heures. Par contre les données hivernales (HIV1) sont manquantes pour les deux pièces de BBC3 et PAS3 du fait de l'invalidité des mesures.

Les températures médianes varient en fonction des habitations, des saisons et des pièces :

- Les températures mesurées dans BBC3 sont en général supérieures à celles mesurées dans PAS3.
- En été, les températures médianes sont comprises entre 23,6°C et 26,5°C pour BBC3 et 21,9°C et 22,8 °C pour PAS3 alors qu'elles sont plus faibles en hiver : entre 18,3°C et 22,3°C pour BBC3 et entre 15,9°C et 18,5°C pour PAS3.
- Au niveau des pièces expérimentées, la chambre 2 de BBC3 et le séjour ouvert sur la cuisine de PAS3 présentent systématiquement les températures les plus élevées aussi bien en été qu'en hiver. Pour BBC3, il semble que le premier étage où se situe la chambre 2 présente des températures plus élevées que les pièces du rez-de-chaussée (observation confirmée par les occupants) du fait du mouvement ascendant de l'air chaud. En hiver, lorsque le poêle cheminée situé au rez-de-chaussée fonctionne, l'occupant de la chambre 2 rapporte qu'il est souvent obligé d'ouvrir sa fenêtre. Les occupants rapportent que les convecteurs électriques des salles de bain de l'étage ne sont jamais utilisés. En été, des surchauffes interviennent en particulier en fin de journée dans la chambre 2 du fait de l'absence de protections solaires extérieures au niveau des fenêtres exposées à l'ouest. Pour PAS3, le séjour présenterait des températures plus élevées que les autres pièces, en hiver du fait de la localisation du poêle cheminée, et en été, du fait du rayonnement

solaire sur sa façade sud entièrement vitrée même si des protections solaires extérieures sont présentes et utilisées.

Comme pour les températures, il apparaît que les humidités relatives médianes varient en fonction des habitations, des saisons et des pièces :

- Les humidités relatives mesurées dans PAS3 sont en général supérieures à celles mesurées dans BBC3.
- En été, les humidités relatives médianes sont comprises entre 40% et 55 % pour BBC3 et 53% et 66 % pour PAS3, alors qu'elles sont plus faibles en hiver : entre 32% et 50 % pour BBC3 et entre 40% et 62 % pour PAS3.
- Au niveau des pièces expérimentées, la chambre 2 de BBC3 et le séjour ouvert sur la cuisine de PAS3 présentent systématiquement les humidités relatives les plus basses aussi bien en été qu'en hiver.

A titre d'information, les températures et les humidités relatives médianes en phase d'occupation dans les deux habitations ont été comparées à celles des logements de la campagne nationale « Logements » de l'OQAI (Kirchner et al. 2006) en distinguant les pièces (chambres et autres) et les saisons (chauffe et hors chauffe) (Figure 7-1 et Figure 7-2).

Cette comparaison montre un dépassement quasi systématique, en été et en hiver, des valeurs médianes de températures des logements français pour BBC3, alors que ces dernières sont rarement atteintes pour PAS3. En ce qui concerne l'humidité relative, il semble que l'air soit aussi sec, voire plus sec pour BBC3 que dans le parc de logements français aussi bien en été qu'en hiver.

Tableau 7-1 - Durée de suivi et données statistiques descriptives de la température de l'air (°C) mesurée dans chaque bâtiment, selon deux saisons et dans deux pièces

Lieu	Saison	Pièce	Durée observée (en h)	Moyenne	min	P25	Médiane	P75	max	
BBC3	ETE1	CHB1	166	24,2	19,8	23,1	24,2	25,4	28,0	
		CHB2*	166	25,2	21,6	24,1	25,1	26,3	29,6	
		C_US	167	23,4	18,6	22,1	23,6	26,4	28,2	
	HIV1	CHB1	données manquantes							
		CHB2*#	165	21,9	15,6	20,7	22,3	23,2	26,1	
		C_US	données manquantes							
	ETE2	CHB1	166	25,3	21,4	24,1	25,4	26,5	28,9	
		CHB2*	166	26,5	22,6	25,3	26,5	27,6	29,9	
		C_US	167	24,4	19,1	23,5	24,4	25,2	27,4	
	HIV2	CHB1	167	18,7	15,0	17,9	18,8	19,6	21,8	
		CHB2*	167	20,4	16,9	19,6	20,5	21,4	23,4	
		C_US [§]	167	18,2	15,2	17,5	18,3	18,9	21,5	
	ETE3	CHB1	169	23,9	20,2	23,02	23,6	24,9	27,9	
		CHB2	169	25,8	22,2	24,7	25,5	26,8	30,7	
		C_US	168	24,4	20,4	23,5	24,3	24,9	28,9	
	HIV3	CHB1	167	21,8	19,6	21,1	21,6	22,5	27,1	
		CHB2	167	22,2	20,1	21,5	22,0	22,9	25,6	
		C_US	165	20,9	19,5	20,4	20,8	21,5	23,1	
	PAS3	ETE1	CHB1	167	21,6	17,9	21,1	22,0	22,4	23,2
			C_US	168	22,7	17,4	21,9	22,8	25,1	25,7
		HIV1	CHB1	données manquantes						
C_US			données manquantes							
ETE2		CHB1	167	22,3	19,5	21,8	22,4	22,9	23,5	
		C_US	167	22,6	20,5	22,2	22,7	23,0	24,4	
HIV2		CHB1	166	15,9	14,0	15,1	15,9	16,6	19,4	
		C_US	166	16,9	14,2	15,9	16,9	17,9	22,1	
ETE3		CHB1	167	21,7	18,1	21,1	21,5	22,6	23,1	
		C_US	167	22,1	19,9	21,2	21,9	22,7	26,3	
HIV3		CHB1	168	17,5	16,6	17,1	17,5	17,8	21,0	
		C_US	167	18,8	17,5	18,1	18,5	19,3	24,9	

* mesure supplémentaire réalisée dans la chambre à l'étage ayant un de ses murs au niveau du grand volume du séjour ouvert sur la cuisine

#du fait du dysfonctionnement de la sonde de T et d'HR placée à 75 cm du sol, les valeurs présentées ici sont celles de la sonde placée à 120 cm du sol

\$ du fait du dysfonctionnement de la sonde de T et d'HR placée à 120 cm du sol, les valeurs présentées ici sont celles de la sonde placée à 75 cm du sol

Tableau 7-2 – Durée de suivi et données statistiques descriptives de l’humidité relative de l’air (%) mesurée dans chaque bâtiment, selon deux saisons et dans deux pièces

Lieu	Saison	Pièce	Durée observée (en h)	Moyenne	min	P25	Médiane	P75	max	
BBC3	ETE1	CHB1	166	46	26	43	46	51	65	
		CHB2*	166	43	27	39	42	49	66	
		C_US	167	47	23	42	47	53	68	
	HIV1	CHB1	données manquantes							
		CHB2*#	165	32	24	31	32	34	40	
		C_US	données manquantes							
	ETE2	CHB1	166	44	29	41	43	48	62	
		CHB2*	166	41	25	38	40	44	56	
		C_US	167	47	29	42	44	51	72	
	HIV2	CHB1	167	47	42	45	46	49	56	
		CHB2*	167	42	38	40	41	43	48	
		C_US\$	166	45	40	43	44	47	56	
	ETE3	CHB1	169	55	40	52	55	58	70	
		CHB2*	169	50	36	49	51	53	64	
		C_US\$	168	54	40	51	54	57	71	
	HIV3	CHB1	167	50	35	48	50	52	70	
		CHB2*	167	46	36	43	46	48,3	55	
		C_US\$	165	50	41	49	50	52	62	
PAS3	ETE1	CHB1	167	58	34	53	58	65	76	
		C_US	168	53	25	49	53	59	74	
	HIV1	CHB1	données manquantes							
		C_US	données manquantes							
	ETE2	CHB1	167	56	42	52	55	60	67	
		C_US	167	54	39	50	53	58	65	
	HIV2	CHB1	166	46	38	42	44	49	63	
		C_US	166	41	32	37	40	45	54	
	ETE3	CHB1	167	65	50	63	66	69	83	
		C_US	167	62	46	60	63	65	79	
	HIV3	CHB1	168	63	54	61	62	65	82	
		C_US	167	56	40	54	55	59	64	

* mesure supplémentaire réalisée dans la chambre à l’étage ayant un de ses murs au niveau du grand volume du séjour ouvert sur la cuisine

#du fait du dysfonctionnement de la sonde de T et d’HR placée à 75cm du sol, les valeurs présentées ici sont celles de la sonde placée à 120 cm du sol

\$ du fait du dysfonctionnement de la sonde de T et d’HR placée à 120cm du sol, les valeurs présentées ici sont celles de la sonde placée à 75 cm du sol

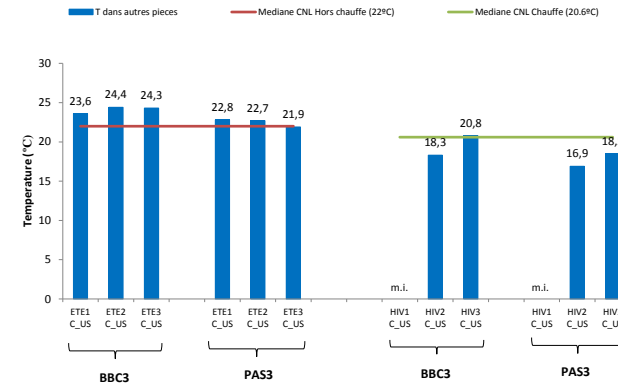
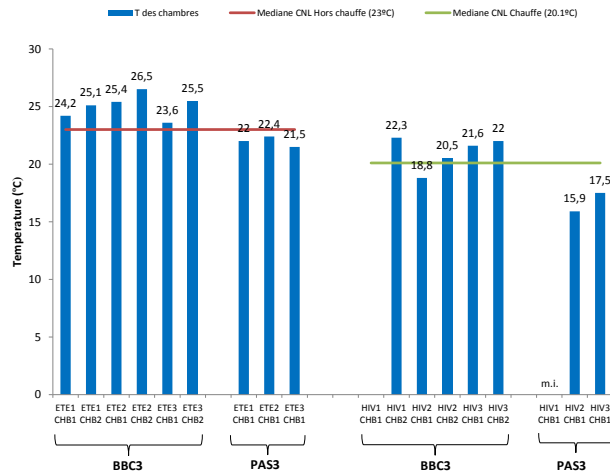


Figure 7-1 – Comparaison des températures médianes mesurées en été et en hiver dans les chambres et les autres pièces de BBC3 et PAS3 avec les médianes des températures des logements français en période de Hors Chauffe et de Chauffe (m.i. : mesure invalide)

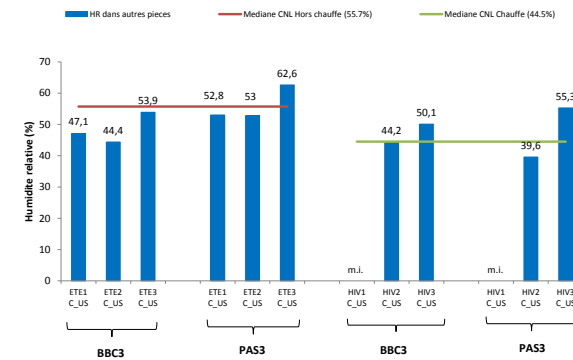
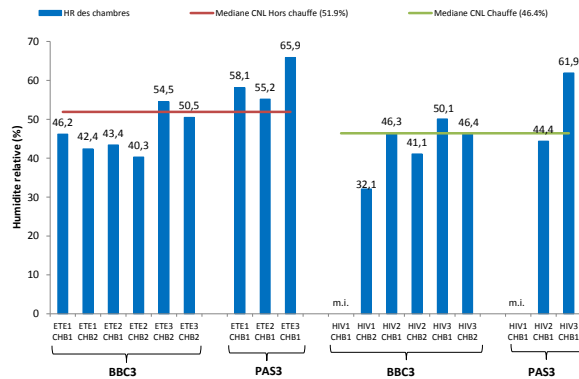


Figure 7-2 – Comparaison des humidités relatives médianes mesurées en été et en hiver dans les chambres et les autres pièces de BBC3 et PAS3 avec les médianes des températures des logements français en période de Hors Chauffe et de Chauffe (m.i. : mesure invalide)

7.2 ETUDE DYNAMIQUE ANNUELLE DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

Pour les deux bâtiments, des sondes de températures ont été installées à l'extérieur et dans trois pièces intérieures : le séjour ouvert sur la cuisine, une chambre (différente de celle de la personne de référence du ménage), un bureau.

A l'aide de ces données, le pourcentage mensuel de dépassement de la température par rapport à un seuil de confort a été calculé sur les années 2010, 2011 et 2012 uniquement sur les plages de présence des occupants (pour BBC3 : 6h-8h et 18h-22h la semaine, 8h-22h le WE ; pour PAS3 : 7h-9h et 19h-23h la semaine, 9h-23h le WE). **Il a été décidé de fixer arbitrairement le seuil d'inconfort d'été à 27°C** (température à laquelle les occupants souhaitent en général avoir une climatisation) **et celui d'hiver à 16°C** (deux degrés en dessous de la température basse de consigne de chauffage de 18°C).

Les résultats du bâtiment BBC3 présentés dans la Figure 7-3 montrent que les taux de dépassement du seuil d'inconfort d'été sont plus élevés que ceux du seuil d'inconfort d'hiver (jusqu'à 88 % en été contre 33 % en hiver).

Les dépassements de la température d'inconfort d'hiver ($T < 16^{\circ}\text{C}$) sont observés en hiver (entre novembre et mars) en particulier dans le bureau. Cette pièce est la plus éloignée de l'emplacement du poêle cheminée et les occupants envisagent d'y installer les convecteurs électriques se trouvant dans les salles de bain du premier étage (ceux-ci n'étant jamais utilisés). L'apparition ponctuelle d'un dépassement dans le séjour ouvert sur la cuisine et dans la chambre 2 en février 2010, en mars 2011 et en décembre 2012 semblent correspondre aux périodes de vacances scolaires et donc à l'absence des occupants (donc absence de chauffage).

Les dépassements de la température d'inconfort d'été ($T > 27^{\circ}\text{C}$) sont observés du printemps à l'automne (entre avril et octobre) en particulier dans la chambre 2 située au premier étage, mais également au rez-de-chaussée, dans le séjour ouvert sur la cuisine et, dans une moindre mesure, dans le bureau. Les dépassements de température dans la chambre 2 et le séjour ouvert sur la cuisine sont probablement liés aux rayonnements directs du soleil sur les surfaces vitrées exposées à l'ouest et à l'absence de protections solaires extérieures. Les dépassements observés au bureau semblent plutôt liés au transfert de chaleur du séjour vers cette pièce plutôt qu'au rayonnement direct du soleil, les fenêtres étant exposées à l'est. L'observation systématique des pourcentages de dépassement les plus élevés au mois d'août laisse supposer qu'il s'agit d'une conséquence de l'absence des occupants partis en vacances (absence d'aération et de sur-ventilation nocturne). Par ailleurs, le seuil de température d'inconfort d'été de 27°C peut être dépassé en hiver (entre décembre et mars) dans la chambre 2. Cela a été reporté par les occupants et semble lié à l'apport d'air chaud par convection naturelle depuis le poêle cheminée situé au rez-de-chaussée.

Les résultats du bâtiment PAS3 présentés dans la Figure 7-4 montrent, à la différence de BBC3, que les taux de dépassement du seuil d'inconfort d'hiver sont plus élevés que ceux du seuil d'inconfort d'été (jusqu'à 66 % en hiver contre 31 % en été).

Les dépassements de la température d'inconfort d'hiver ($T < 16^{\circ}\text{C}$) sont observés en hiver (entre novembre et mars) en particulier dans la chambre 2 et le bureau. Ils sont probablement liés à l'éloignement de ces pièces par rapport au poêle cheminée et à la limitation volontaire du chauffage au bois par les occupants. De plus, la chambre 2, qui présente le pourcentage de dépassement le plus fort, ne bénéficie pas des rayonnements directs solaires (fenêtre exposée au nord). Le séjour ouvert sur la cuisine présente les plus faibles taux de dépassement du fait de la présence poêle cheminée mais également de sa grande surface vitrée exposée au sud.

Les dépassements de la température d'inconfort d'été ($T > 27^{\circ}\text{C}$) sont observés presque exclusivement dans le séjour ouvert sur la cuisine et uniquement lors de l'été 2010. La présence de protections solaires extérieures sur les baies vitrées exposées au sud depuis l'achèvement de la construction et leur utilisation adéquate par les occupants semblent être la raison principale de la quasi-absence de dépassement du seuil d'inconfort d'été.

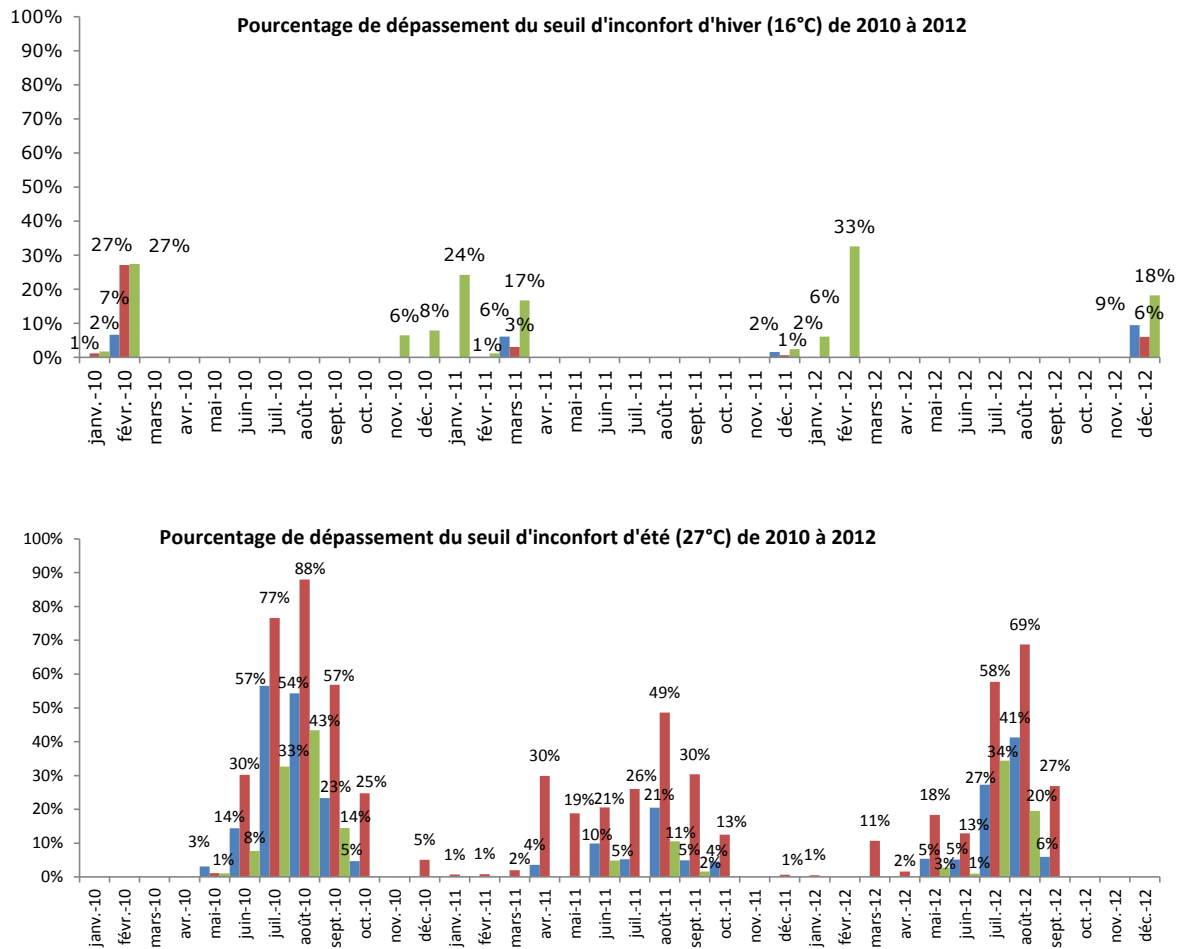


Figure 7-3 – Pourcentage mensuel de dépassement de la température mesurée en présence des occupants dans trois pièces (■ C_US ■ BUR 1 ■ CHB 2) de BBC3 de 2010 à 2012 par rapport au seuil d'inconfort d'hiver (graphique du haut) et au seuil d'inconfort d'été (graphique du bas).

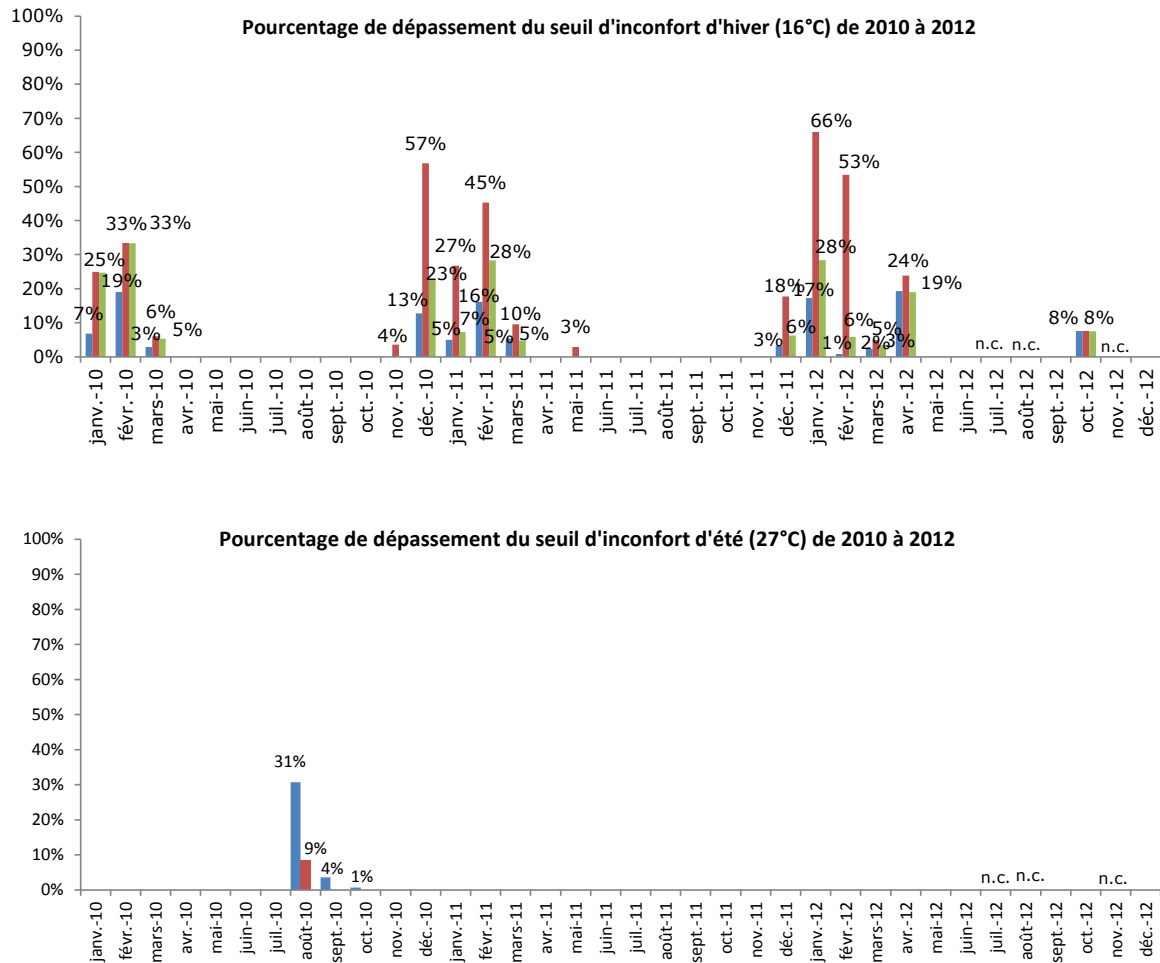


Figure 7-4 – Pourcentage mensuel de dépassement de la température mesurée en présence des occupants dans trois pièces (C_US BUR 1 CHB 2) de PAS3 de 2010 à 2012 par rapport au seuil d'inconfort d'hiver (graphique du haut) et au seuil d'inconfort d'été (graphique du bas).

7.3 EVALUATION DU CONFORT GLOBAL

Le confort thermique global a été déterminé à partir du calcul des valeurs prévisibles de sensation thermique (PMV) et du pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) en période d'occupation (ETE et HIV) dans une seule pièce (séjour ouvert sur la cuisine) pour chaque bâtiment uniquement sur les plages de présence des occupants (en soirée la semaine de 19h-22h et de 12h-22h le week-end). Afin de réaliser ces calculs, plusieurs variables d'entrées sont mesurées ou estimées :

- la température moyenne de rayonnement a été prise égale à la valeur de température de l'air ambiant ;
- la valeur moyenne des vitesses d'air prise en compte pour le calcul du confort global dans tous les bâtiments a été mesurée à 0,07 m/s ;
- l'isolement thermique vestimentaire et le métabolisme énergétique des occupants ont été évalués par auto-questionnaire ;

- la température et l'humidité relative de l'air ambiant ont été mesurées en continu, au cours de chaque enquête, dans le séjour ouvert sur la cuisine à 120 cm de hauteur

Les valeurs médianes des PMV indiquent que la sensation thermique est neutre à légèrement fraîche pour BBC3 aussi bien en été qu'en hiver, la semaine que le week-end, au cours des trois années de suivi (Tableau 7-3). En revanche, pour PAS3, la sensation thermique est neutre à légèrement fraîche en hiver alors qu'en été, elle est légèrement fraîche à fraîche la semaine et neutre à légèrement fraîche le week-end.

Tableau 7-3 – Valeur médiane prévisible de sensation thermique (PMV) par bâtiment selon la saison, en semaine et en week-end au cours des années

Lieu		BBC3		PAS3	
		Semaine	Week-end	Semaine	Week-end
Été	ETE1	-0,5 neutre à légèrement frais	-0,8 neutre à légèrement frais	-1,2 légèrement frais à frais	-1,0 légèrement frais
	ETE2	-0,5 neutre à légèrement frais	-0,4 neutre à légèrement frais	-1,8 légèrement frais à frais	-0,6 neutre à légèrement frais
	ETE3	-0,6 neutre à légèrement frais	-0,5 neutre à légèrement frais	-1,9 légèrement frais à frais	-0,7 neutre à légèrement frais
Hiver	HIV1	-0,6 neutre à légèrement frais	-0,6 neutre à légèrement frais	-0,8 neutre à légèrement frais	-1,1 légèrement frais à frais
	HIV2	-0,1 neutre à légèrement frais	-0,3 neutre à légèrement frais	-0,6 neutre à légèrement frais	-0,7 neutre à légèrement frais
	HIV3	-0,2 neutre à légèrement frais	-0,4 neutre à légèrement frais	-0,7 neutre à légèrement frais	0,3 légèrement tiède à neutre

Le pourcentage médian des PPD varie entre plus 5 % jusqu'à près de 70 % (Tableau 7-4). Ce pourcentage est plus élevé pour PAS3 (de 7 à 72 %) que pour BBC3 où les pourcentages restent inférieurs à 20 %. Les pourcentages les plus élevés sont observés pour PAS3, en été et au cours de la semaine. Cela est peut être lié au fait que les occupants baissent systématiquement les stores extérieurs en leur absence en journée ce qui permet de garder la fraîcheur de PAS3 jusqu'au coucher du soleil.

Tableau 7-4 - Pourcentage médian prévisible d'insatisfaits (PPD) par bâtiment selon la saison, en semaine et en week-end au cours des années

Lieu		BBC3		PAS3	
		Semaine	Week-end	Semaine	Week-end
Été	ETE1	10%	17%	34%	27%
	ETE2	11%	9%	65%	13%
	ETE3	12%	11%	72%	17%
Hiver	HIV1	12%	13%	19%	29%
	HIV2	5%	7%	13%	16%
	HIV3	6%	9%	16%	7%

Ces résultats sont en décalage avec les valeurs médianes des températures de l'air mesurées au cours des enquêtes et avec la perception des occupants. Ce décalage est certainement lié aux nombreuses hypothèses faites et à l'imprécision de certaines données d'entrée telles que la vêture. Ce paramètre est difficile à renseigner par les occupants et a été considéré comme constant sur l'ensemble de la journée le week-end et en soirée la semaine.

7.4 EVALUATION DU CONFORT LOCAL

Bien que de nombreuses données soient manquantes (Tableau 7-5), il apparaît une absence de gênes locales liées à la présence de courants d'air en hiver (HIV1, HIV2 et HIV3), dans les deux pièces instrumentées (chambre et séjour ouvert sur la cuisine), en semaine et le week-end. De même, aucune gêne n'est ressentie par rapport à la différence verticale de température de l'air entre la tête et les pieds dans le séjour, en semaine et le week-end, sur les deux années.

Tableau 7-5 – Pourcentages médians prévisibles de population gênée par la présence de courant d'air en hiver (HIV1, HIV2 et HIV3) et la différence verticale de température (tête-pied) dans le séjour de chaque bâtiment selon les années

Courant d'air en hiver		BBC3		PAS3	
		Semaine	Week-end	Semaine	Week-end
HIV1	Chambre	2%	2%	non calculé	non calculé
	Séjour	aucune gêne	aucune gêne	non calculé	non calculé
HIV2	Chambre	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
	Séjour	non calculé	non calculé	non calculé	3%
HIV3	Chambre	1%	1%	non calculé	non calculé
	Séjour	4%	4%	4%	4%

Différence verticale de T° dans le séjour		BBC3		PAS3	
		Semaine	Week-end	Semaine	Week-end
Eté	ETE1	< 0,5 %	< 0,5 %	< 0,5 %	< 0,5 %
	ETE2	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
	ETE3	< 0,5 %	< 0,5 %	0,5%	0,5%
Hiver	HIV1	non calculé	non calculé	non calculé	non calculé
	HIV2	non calculé	non calculé	0,5%	0,6%
	HIV3	< 0,5 %	< 0,5 %	0,5%	0,5%

7.5 EVALUATION DU CONFORT ADAPTATIF

L'évaluation du confort thermique selon le modèle adaptatif a été réalisée au cours des périodes estivales de 2010 à 2012 (entre 1^{er} juin et 30 septembre), en présence des occupants des bâtiments BBC3 et PAS3. Les mesures des sondes de températures à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment (notamment dans le séjour ouvert sur la cuisine, une chambre, un bureau) ont été utilisées dans ce calcul. Les données de PAS3 pour juillet et août 2012 sont manquantes du fait de l'interruption de transfert des données vers le CSTB sur cette période.

Les résultats obtenus à partir de ce modèle sont présentés pour trois pièces de chaque bâtiment dans la Figure 7-5 pour BBC3 et dans la Figure 7-6 pour PAS3. Par ailleurs, y figurent les quatre classes de confort définies par la norme EN15251 (AFNOR, 2007) comme suit :

- Limite I : niveau élevé recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles
- Limite II : niveau normal qu'il convient d'utiliser dans les bâtiments neufs ou rénovés
- Limite III : niveau modéré acceptable qui peut être utilisé dans les bâtiments existants
- Limite IV : valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessous / niveau acceptable pour une partie restreinte de l'année

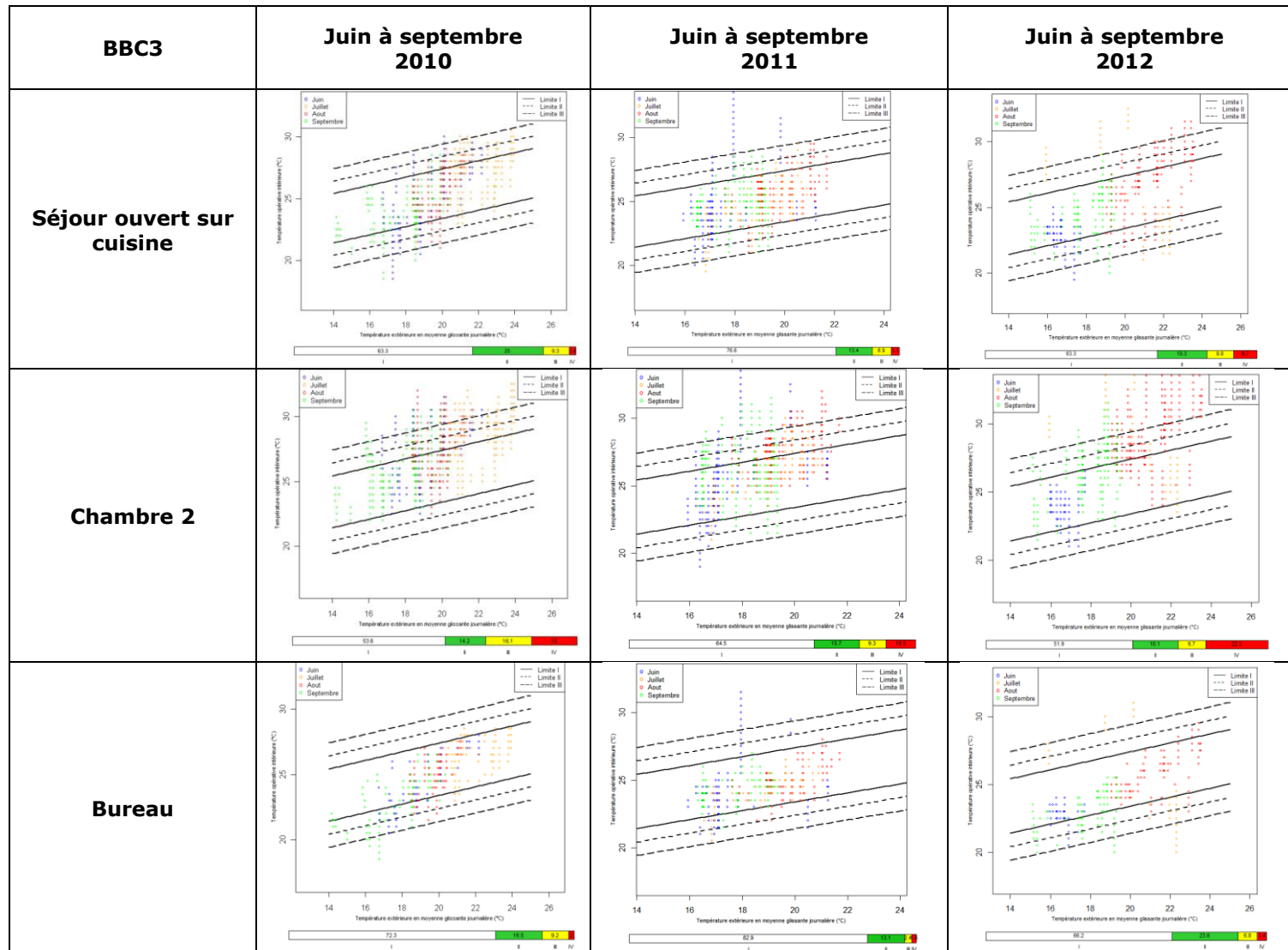


Figure 7-5 – Application du confort adaptatif selon la norme EN 15251 dans différentes pièces du bâtiment BBC3 en période estivale (juin-septembre de 2010 à 2012), en situation d’occupation et indication des classes de confort

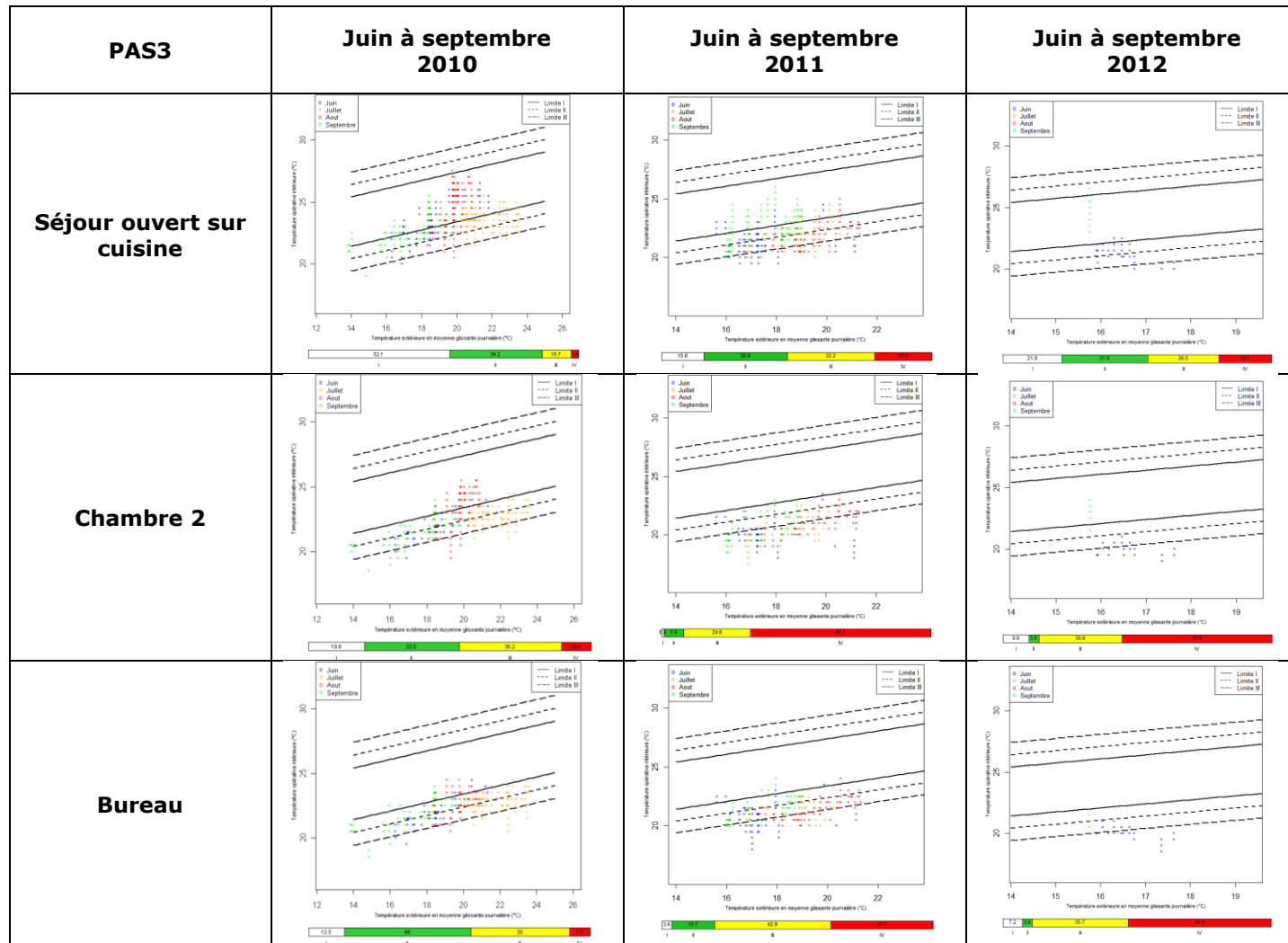


Figure 7-6 – Application du confort adaptatif selon la norme EN 15251 dans différentes pièces du bâtiment PAS3 en période estivale (juin-septembre de 2010 à 2012), en situation d’occupation et indication des classes de confort. Les mesures de juillet et août 2012 sont manquantes.

Au niveau des classes de confort, le confort thermique dans les pièces de BBC3 est élevé à normal (limites I et II) la majeure partie du temps (entre 68 à 96 % du temps) alors qu'il est moins souvent atteint dans les pièces de PAS3 (entre 10 à 86 % du temps). Pour PAS3, ce niveau de confort est atteint plus rarement au cours des étés 2011 et 2012 (entre 10 et 54 % du temps) qu'au cours de l'été 2010 (entre 53 et 86 % du temps).

Par rapport aux trois pièces instrumentées, la chambre 2 semble la pièce la moins confortable de BBC3 au cours des trois étés. Pour PAS3, les pièces les plus inconfortables sont la chambre 2 et le bureau au cours de l'été 2010 et les trois pièces instrumentées au cours des étés 2011 et 2012.

Pour les trois pièces instrumentées dans BBC3 et quelle que soit l'année d'observation, il apparaît que le séjour est la seule pièce présentant à la fois des températures au-delà des limites supérieures et inférieures de confort (I et II) traduisant des températures élevées (au-dessus de 27°C) à moins élevées (en dessous de 20°C). La chambre 2 présente quant à elle des températures intérieures très souvent au-delà des limites supérieures de confort (I et II), largement au-dessus de 27°C traduisant une surchauffe de cette pièce en été. En revanche les températures intérieures du bureau sont quelque fois en deçà des limites inférieures de confort (I et II), en dessous de 21°C. Ces particularités peuvent être expliquées par la localisation dans le bâtiment, l'orientation principale de chacune des pièces et l'absence de protections solaires extérieures. La chambre 2 connaît des surchauffes de température car elle possède une baie vitrée orientée à l'ouest sans protection solaire extérieure. Le bureau a moins de surchauffe possiblement du fait de sa localisation au rez-de-chaussée et de l'absence de baie vitrée orientée à l'ouest (son unique baie étant orientée à l'est).

A la différence de BBC3, les trois pièces instrumentées de PAS3 présentent, la majeure partie du temps, des températures en deçà des limites inférieures de confort (I et II), en dessous de 21°C. Au cours des étés 2011 et 2012, la chambre 2 et le bureau présentent des températures intérieures systématiquement en deçà des limites inférieures de confort (I et II). Cette habitation ne connaît pas de surchauffe en été grâce aux protections solaires extérieures équipant toutes les baies vitrées et de leur utilisation adéquate par les occupants (protections baissées en journée).

7.6 PERCEPTION DU CONFORT THERMIQUE PAR LES OCCUPANTS

Les réponses au questionnaire perceptif permettant notamment de connaître la perception du confort thermique par les occupants âgés de plus de 10 ans sont synthétisées, par bâtiment et selon les saisons, dans le Tableau 7-6 pour la température et l'humidité relative de l'air et dans le Tableau 7-7 et le Tableau 7-8 pour le confort thermique global et les gênes locales.

Les occupants des bâtiments ont complété les questionnaires à chaque enquête en phase d'occupation à quelques exceptions près. Les occupants de BBC3 n'ont pas rendu leurs questionnaires en HIV1 et HIV3 malgré de nombreuses relances et ceux de PAS3 n'ont pas souhaité s'exprimer sur la température et d'humidité relative de l'air car le système de chauffe (poêle cheminée) n'avait pas encore été installé.

Tableau 7-6 – Perception de la température et de l’humidité relative de l’air par les occupants âgés de plus de 10 ans de tous les bâtiments selon la saison

		BBC3			PAS3	
		Individu 01	Individu 02	Individu 03	Individu 01	Individu 02
Température	ETE1	plutôt chaude dans les chambres à l'étage en fin de journée	très chaude en fin de journée dans CHB2 et CHB3 chaude dans CHB1 confortable au RDC	Chaude dans CHB3	confortable	confortable
	HIV1	données manquantes			refus de répondre	
	ETE2	plutôt chaude dans les chambres à l'étage en fin de journée	confortable	chaude dans CHB3	confortable	confortable
	HIV2	plutôt chaude	stratifiée entre RDC et 1 ^{er} étage	stratifiée entre RDC et 1 ^{er} étage	Plutôt froide	Plutôt froide
	ETE3	données manquantes	données manquantes	Froide en bas Chaude en haut	confortable	confortable
	HIV3	données manquantes			Plutôt froide	confortable
Humidité relative	ETE1	plutôt sec	confortable	confortable	confortable	confortable
	HIV1	données manquantes			refus de répondre	
	ETE2	sec	très agréable	sec	confortable	confortable
	HIV2	sec	confortable	confortable	confortable	confortable
	ETE3	données manquantes	confortable	confortable	confortable	confortable
	HIV3	données manquantes			confortable	confortable

Le confort thermique global est considéré par les occupants plutôt satisfaisant en général, aussi bien en été qu'en hiver mais des inconforts thermiques et des gênes sont ressentis :

- Pour BBC3, en été, les températures sont élevées dans les chambres du premier étage, du fait qu'elles possèdent des fenêtres exposées à l'ouest et sans protections solaires extérieures. Tous les étés, l'individu 03 est insatisfait du confort thermique de sa chambre (chambre 2) et exprime sa gêne. Les deux autres individus expriment également leur insatisfaction en été, en fin de journée du fait de la surchauffe des chambres du premier étage et de la présence d'une stratification de température (T élevée au premier étage). En hiver, ils notent également une stratification de la température (T froide au RDC, T chaude au premier étage). Ils sont insatisfaits des températures jugées froides au RDC, en hiver, le matin en période de grand froid. Lors d'un entretien, les occupants ont expliqué avoir eu froid en HIV2, lors de leur retour de week-end après une absence de deux jours. Le, poêle cheminée n'avait pas fonctionné et l'absence de soleil (temps froid et nuageux) a contribué également à faire chuter la température intérieure de la maison. Pour toutes ces raisons, les

occupants envisagent d'installer des convecteurs électriques au RDC notamment au niveau du coin cuisine et de les équiper d'un système de programmation afin de les mettre en fonctionnement notamment en leur absence.

- Pour PAS3, les inconforts sont plutôt ressentis en hiver bien qu'au cours de l'ETE2, la surchauffe de la chambre a été ressentie du fait de la limitation de la sur-ventilation nocturne à cause de la présence de moustiques. En hiver, les occupants se plaignent de la température froide, le matin lorsque le chauffage n'est pas allumé et de la forte inertie du chauffage au bois (décalage temporel entre la température souhaitée et la température réelle instantanée). De plus, un occupant ressent que le sol est froid et qu'il existe une différence de température entre le sol et la tête.

Les occupants de BBC3 et PAS3 sont satisfaits de l'humidité relative de l'air de leur habitation puisqu'ils le qualifient de « confortable » bien qu'un occupant de BBC3 trouve l'air sec.

Tableau 7-7 - Perception du confort thermique global par les occupants âgés de plus de 10 ans de tous les bâtiments selon la saison

		BBC3			PAS3	
		Individu 01	Individu 02	Individu 03	Individu 01	Individu 02
Confort thermique globale	ETE1	plutôt satisfaisant	plutôt satisfaisant	très insatisfaisant car T élevée dans CHB2	très satisfaisant	satisfaisant
	HIV1	données manquantes			plutôt insatisfaisant	insatisfait
	ETE2	plutôt satisfaisant sauf surchauffe des chambres à l'étage	plutôt satisfaisant	très insatisfaisant car T élevée dans CHB2	très satisfaisant	satisfaisant sauf surchauffe si non surventilation nocturne (présence moustiques)
	HIV2	plutôt insatisfaisant avec les grands froids, T froide le matin	plutôt insatisfaisant avec les grands froids, T froide le matin	Plutôt satisfait sauf T froide le matin	plutôt insatisfaisant à cause de l'inertie du chauffage (délai d'attente pour obtenir T confortable)	plutôt insatisfaisant car T intérieure froide lorsque il fait froid et nuageux dehors
	ETE3	données manquantes	satisfait sauf dans CHB	Plutôt insatisfait car T élevée dans CHB2	satisfaisant	satisfaisant
	HIV3	données manquantes			plutôt insatisfaisant car sans le poêle il fait 18C (pas suffisant si on est assis)	plutôt satisfaisant

Tableau 7-8 - Perception des gênes locales par les occupants âgés de plus de 10 ans de tous les bâtiments selon la saison

		BBC3			PAS3	
		Individu 01	Individu 02	Individu 03	Individu 01	Individu 02
Gênes locales	ETE1	aucune gêne	T élevée dans chambres le soir	T élevée dans CHB2	aucune gêne	aucune gêne
	HIV1	données manquantes			différence T pieds/tête température sol froide	T froide matin sans soleil et sans chauffage
	ETE2	T élevée en fin de journée	aucune gêne	aucune gêne	aucune gêne	aucune gêne
	HIV2	Différence T entre RDC et 1er étage	Effet paroi froide porte coulissante séjour	aucune gêne	différence T pieds/tête température sol froide	aucune gêne
	ETE3	données manquantes	données manquantes	T élevée dans CHB2	-	aucune gêne
	HIV3	données manquantes			différence T pieds/tête température sol froide	aucune gêne

8. EVOLUTION TEMPORELLE DU CONFORT ACOUSTIQUE DES OCCUPANTS

8.1 MESURE DES NIVEAUX DE PRESSION ACOUSTIQUE AVEC UN SONOMETRE CONVENTIONNEL

Les niveaux de pression acoustique avec la pondération temporelle A ont été mesurés avec un sonomètre conventionnel dans chaque pièce de chaque bâtiment selon la vitesse de fonctionnement du système de ventilation à deux reprises : en situation d'inoccupation (VID) et en situation d'occupation (HIV2), près de deux ans après (Figure 8-1). Il faut noter que seules les mesures indiquant des niveaux sonores supérieurs à 30 dB(A) (limite inférieure de la gamme de mesure du sonomètre) ont été prises en compte. La précision des mesures est de $\pm 1,5$ dB(A).

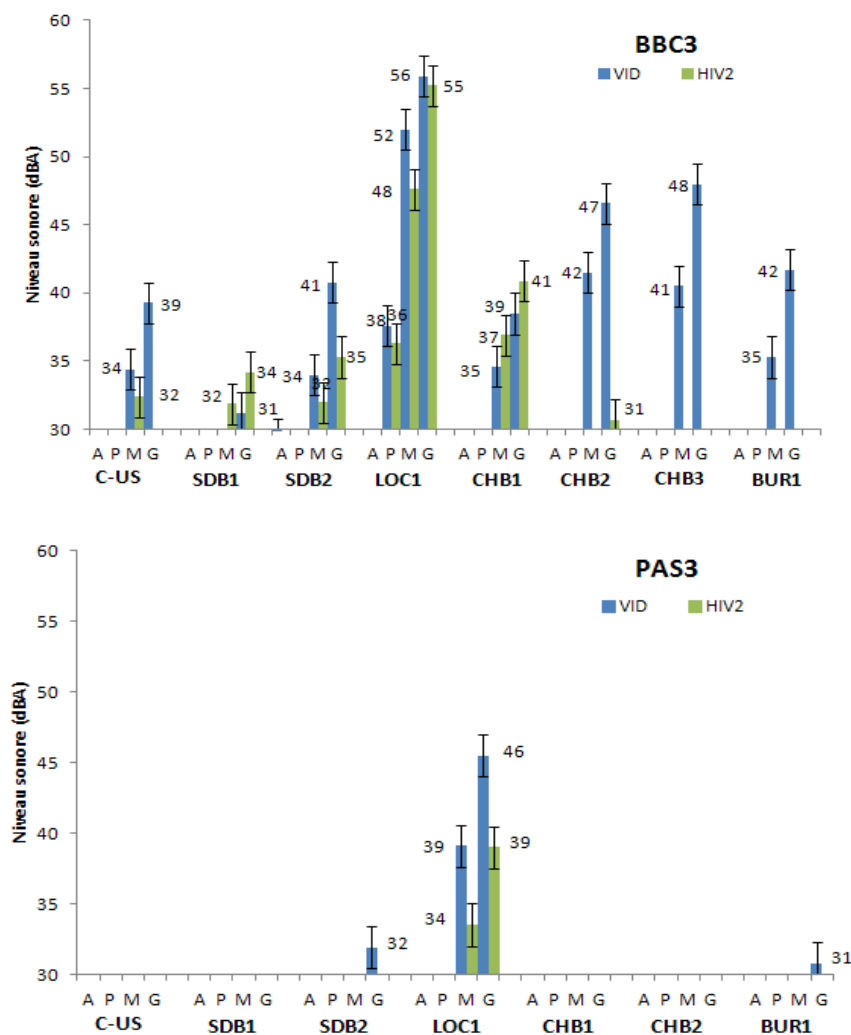


Figure 8-1 – Niveaux sonores moyens (dB(A)) dans chaque pièce des deux habitations (BBC3 et PAS3) selon les vitesses de fonctionnement de la VMC (A : arrêt, P : petite vitesse, M : moyenne vitesse, G ; grande vitesse). Les niveaux sonores mesurés à l'arrêt et à la petite vitesse de fonctionnement de la VMC inférieurs ou égaux à 30dB(A) n'ont pas été reportés sur ces graphiques.

Il apparaît, pour deux habitations, que :

- les niveaux sonores sont inférieurs ou égaux à 30dB(A) à l'arrêt du système de VMC double flux mais également lorsqu'il fonctionne en petite vitesse ;
- les niveaux sonores augmentent avec la vitesse de fonctionnement du système de la VMC (moyenne et grande vitesse) ;
- le local technique (LOC) où se situe le dispositif de ventilation est la pièce où les niveaux sonores sont les plus élevés (valeur comprise entre 34 et 56 dB(A)) par rapport à ceux mesurés dans les autres pièces.

Pour BBC3, au cours de la première mesure (VID), des niveaux sonores élevés (jusqu'à 48 dB(A) et à l'exception du LOC1) ont été observés dans les chambres et le bureau alors que les niveaux étaient plus faibles (maximum 41 dB(A)) dans les pièces de services (C_US, SDB1 et SDB2). Suite aux dérèglages des bouches observés entre la phase VID et la phase HIV1 et aux plaintes des occupants sur les niveaux sonores élevés dans les chambres, la VMC a été de nouveau réglée avant les secondes mesures acoustiques en HIV2. Les niveaux sonores ont pratiquement tous diminués (sauf pour CHB1) et sont même passés en dessous de la limite de mesure du sonomètre (CHB2, CHB3 et BUR1). Ces observations sont confortées par la perception des occupants qui notent une nette diminution de l'inconfort sonore dans les chambres 2 et 3 mais une dégradation du confort acoustique dans la chambre principale (CHB1).

Pour PAS3, les niveaux sonores sont plus faibles que ceux de BBC3 ; seul le local technique présente des niveaux sonores supérieurs à 30 dB(A) en moyenne et grande vitesse de VMC. Cette particularité est peut être liée au fait que la VMC de PAS3 ne semble pas avoir été réglée à son optimum (mesure de débits d'air extraits inférieurs à 7 m³/h en petite vitesse) bien qu'elle a été réglée à deux reprises entre les deux mesures de confort acoustique. Les niveaux sonores en HIV2 sont inférieurs à ceux mesurés avant l'occupation.

8.2 MESURE DES NIVEAUX CONTINUS EQUIVALENTS DE PRESSION ACOUSTIQUE

Au cours de la dernière enquête (HIV3), il a été possible d'utiliser un sonomètre analyseur par bandes de tiers d'octave de 50 Hz à 10000 Hz, intégrateur-moyenleur de classe de précision 1. La plage de mesure de cet appareil permet de mesurer des niveaux allant de 0 à 130 dB pour une dynamique d'au moins 90 dB par gamme de niveau (exemple : 20 à 110 dB, 30 à 120 dB, 40 à 130 dB).

Deux types de mesures de pression acoustique ont été réalisés (Figure 8-2 et Figure 8-3) : le niveau de pression acoustique continu équivalent en pondération fréquentielle A (LAeq) et le niveau de pression acoustique maximal continu équivalent en pondération fréquentielle A et pondération temporelle S (LAS max). Les mesures de pression acoustique ont été systématiquement réalisées en bande de tiers d'octave.

BBC3

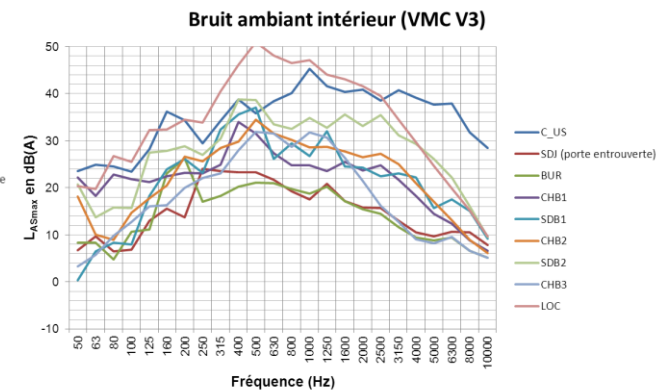
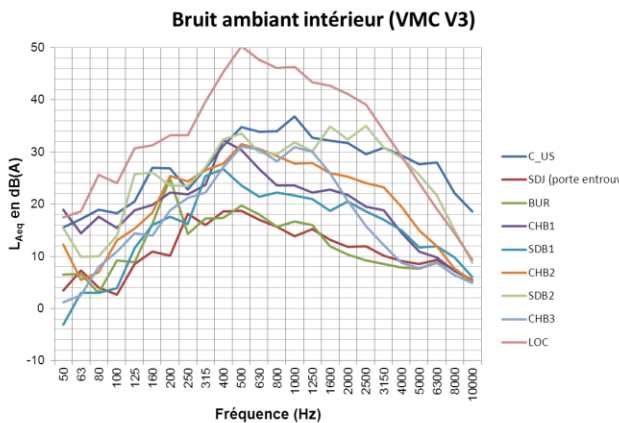
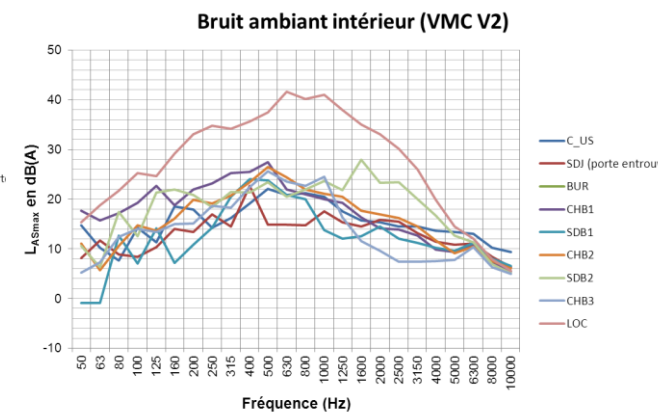
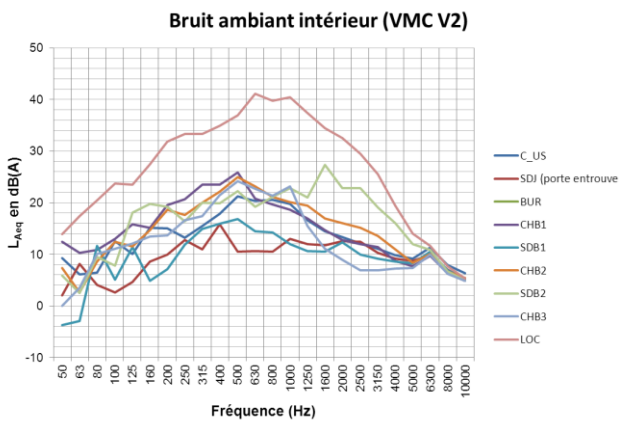
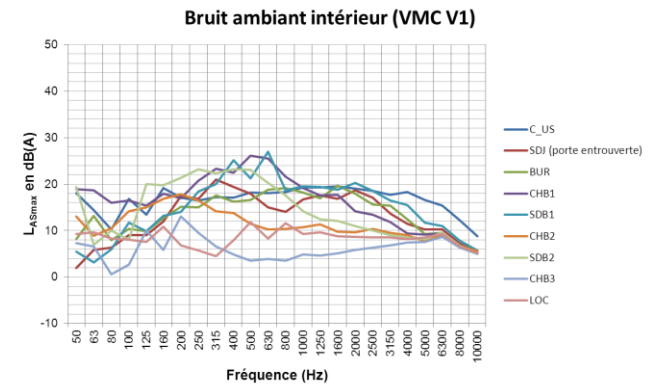
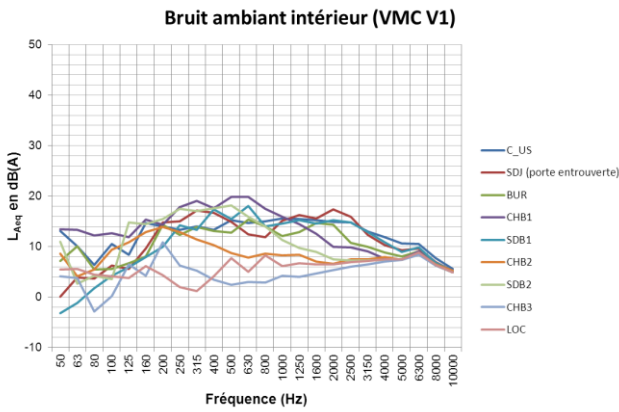
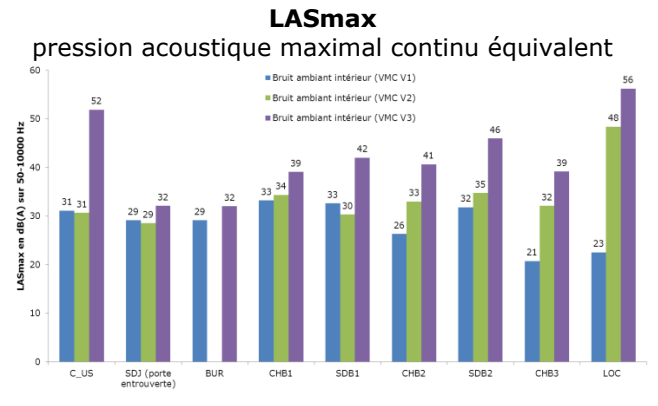
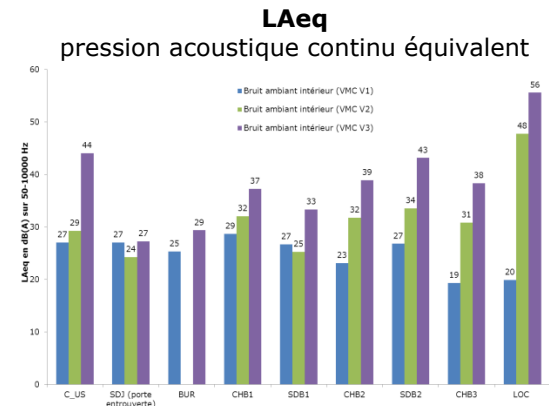


Figure 8-2 – LAeq et du LASmax global (50-1000Hz) par tiers d’octave pour chaque pièce de BBC3 en fonction de la vitesse de la VMC

PAS3

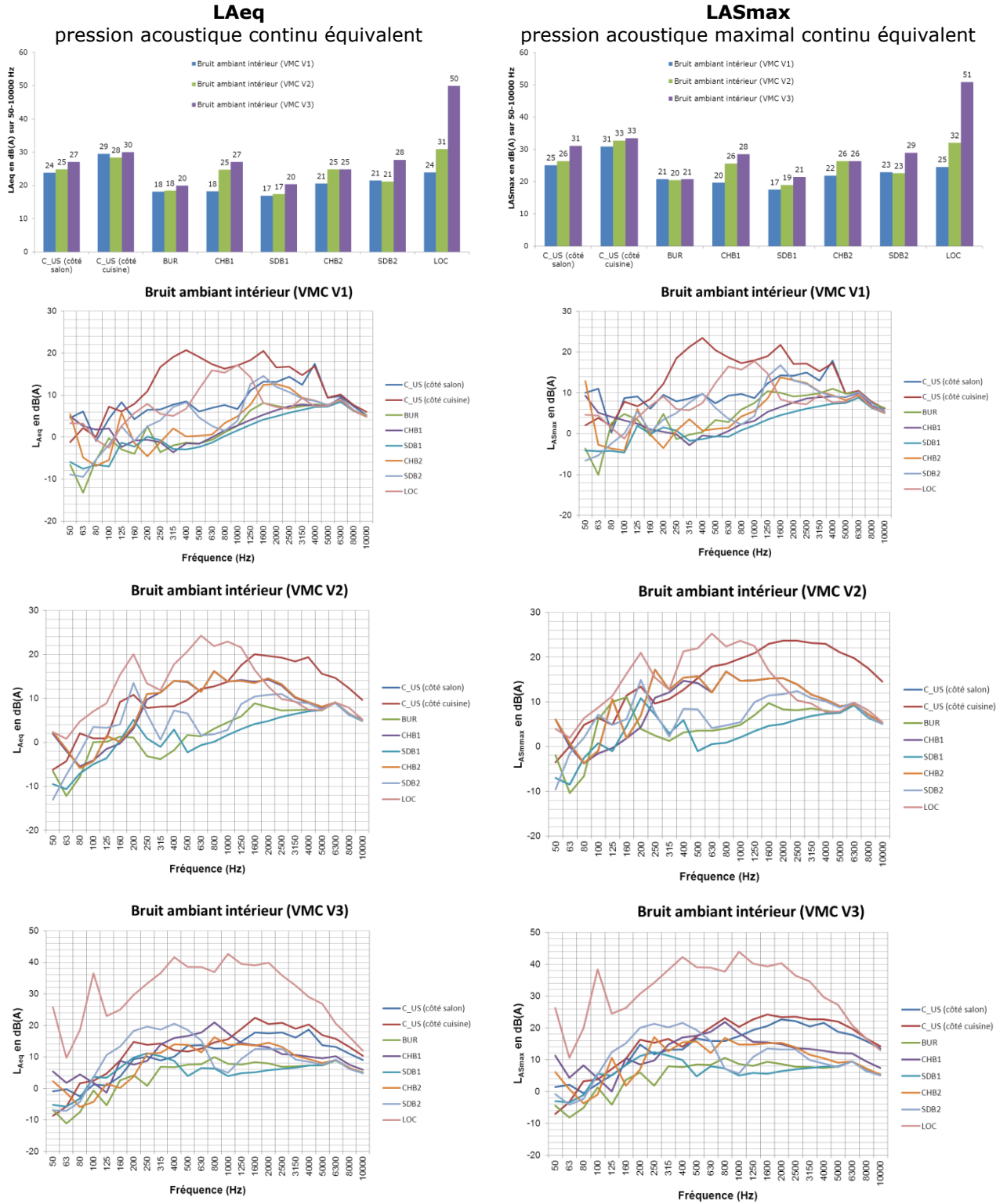


Figure 8-3 – LAeq et du LASmax global (50-1000Hz) par tiers d’octave pour chaque pièce de PAS3 en fonction de la vitesse de la VMC

Les mesures de pression acoustique continu équivalent montrent les mêmes tendances que les mesures du niveau sonore moyen pour les deux bâtiments. Les niveaux de bruit sont de manière générale plus élevés pour BBC3 que pour PAS3. Une augmentation de la vitesse de la VMC est généralement associée à une augmentation du niveau de bruit. Les bruits les plus élevés sont mesurés dans le local technique.

L'exploitation des niveaux sonores par tiers d'octave ne permet pas d'identifier une « signature » claire du bruit du système de ventilation mécanique contrôlée.

Les niveaux LASmax ont été comparés aux niveaux maximaux de pression acoustique recommandés par l'arrêté du 30 juin 1999 et engendrés par une installation de ventilation mécanique en position de débit minimal. Pour la ventilation mécanique en débit minimal, le niveau réglementaire $L_{ASmax,nT}$ doit être inférieur à 30 dB(A) dans les pièces principales (séjour, chambre) et 35 dB(A) dans les cuisines. En faisant l'hypothèse que pour une pièce meublée dans lesquelles les mesures ont été effectuées le temps de réverbération est de 0.5 s, on a alors $L_{ASmax,nT} = L_{ASmax}$. La réglementation autorise de dépasser de 3 dB la valeur réglementaire.

Pour PAS3, les niveaux LASmax pour la VMC en vitesse minimum V1 sont systématiquement inférieurs aux niveaux réglementaires.

Pour BBC3, les niveaux LASmax sont notamment supérieurs à 30 dB(A) dans la chambre 1 ce qui peut être gênant pour le sommeil. Pour les autres pièces, les niveaux LASmax sont voisins ou en dessous de 30 dB(A) pour la VMC en vitesse minimum V1. Les niveaux LASmax deviennent importants lorsque la VMC est utilisée en grande vitesse V3, notamment dans la cuisine.

8.3 CONFORT ACOUSTIQUE PERÇU PAR LES OCCUPANTS

L'appréciation globale de l'ambiance sonore des logements par les occupants est décrite entre « plutôt agréable » et « extrêmement agréable » quelle que soit la saison (Tableau 8-1).

Tableau 8-1 – Appréciation individuelle de l'ambiance sonore de chaque adulte selon les logements et les saisons au cours de la phase d'occupation

		BBC3		PAS3	
		Individu 01	Individu 02	Individu 01	Individu 02
Appréciation de l'ambiance sonore du logement au cours de l'enquête	ETE1	très agréable	très agréable plutôt désagréable*	très agréable	agréable
	HIV1	données manquantes		très agréable	agréable
	ETE2	Plutôt agréable	Plutôt agréable et amélioration du confort sonore dans CHB2 et CHB3	agréable sauf dans SDB1 lors des douches	agréable
	HIV2	très agréable sauf CHB1 (VMC en vitesse moyenne)	plutôt agréable sauf CHB1 (VMC en vitesse moyenne)	très agréable	extrêmement agréable
	ETE3	données manquantes	agréable	données manquantes	très agréable
	HIV3	données manquantes		données manquantes	

* Avec le système de VMC en fonctionnement en vitesse moyenne

Dès leur emménagement, les occupants et en particulier ceux de BBC3 ont exprimé des gênes sonores liées au système de ventilation à partir de la vitesse moyenne. Selon les occupants de BBC3, le bruit du « moteur » de la VMC est perceptible lorsque tout est calme, au moment de se coucher ou en l'absence de bruit intérieur lié à l'activité humaine (télévision, radio,...). D'autres bruits intérieurs sont évoqués tels que celui du bruit d'impact des gouttes d'eau sur le carrelage de la douche (PAS3). Du fait des données manquantes au cours de la dernière année de suivi, il n'est pas possible de dire si les gênes ont disparu ou pas.

9. EVOLUTION TEMPORELLE DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE

9.1 PREAMBULE

Afin de pouvoir comparer l'évolution des consommations d'énergie de chaque bâtiment sur les trois années de suivi (2010, 2011 et 2012), il a été nécessaire de comparer la rigueur des hivers et la température intérieure de consigne de chauffage.

Les degrés jour unifiés ou DJU ont été calculés à partir des mesures extérieures de température des deux habitations par année calendaire et sont fournis dans le Tableau 9-1. A titre de comparaison les données issues de la station météorologique de Paris Montsouris et accessibles librement confirment ces tendances, bien qu'étant plus au nord et plus continentale que la région nantaise. Si l'on compare les trois années entre elles, l'hiver 2010 a été le plus rigoureux, l'hiver 2011 a été le plus doux et l'hiver 2012 a été intermédiaire.

Tableau 9-1 – Calcul des degrés jour unifiés (DJU) par année calendaire pour les deux habitations sur les trois années de suivi et comparaison des DJU relevés à la station météorologique de Paris Montsouris

DJU par année calendaire (janvier-avril et octobre-décembre)	BBC3	PAS3	Paris-Montsouris	Qualification de la rigueur hivernale
Année 2010	2318	2274	2607	« rigoureux »
Année 2011	1528	1633	1915	« doux »
Année 2012	1972	2085	2189	« intermédiaire »

Etant chauffées principalement par un poêle-cheminée au bois, les deux habitations ne disposent pas d'un système de régulation de chauffage et dans le cas des convecteurs électriques, les consignes de chauffage sont inconnues. La température de confort (assimilable à une température de consigne) a toutefois été approchée en calculant la moyenne des températures intérieures de toutes les pièces équipées de sonde, en période de chauffage et dans les heures de présence des occupants. La température de confort est stable pour les deux habitations sauf pour PAS3 en 2012 où elle chute d'un degré sans explication. On peut se demander si cette baisse de température traduit une augmentation des déperditions thermiques du bâtiment possiblement par augmentation du taux de renouvellement d'air (modification du réglage de la VMC ? ouverture permanente de la porte fenêtre pour le chien ?).

Tableau 9-2 – Estimation de la température intérieure moyenne (°C) de confort pour les deux habitations sur les trois années de suivi

T° moyenne de confort (°C) par période de chauffe dans le séjour ouvert sur la cuisine (janvier-avril et octobre-décembre)	BBC3	PAS3
Année 2010	20,9	19,5
Année 2011	21,4	19,6
Année 2012	21,1	18,4

Ainsi sur la base des DJU calculés, de la mesure de la température de confort et en faisant l'hypothèse que la présence des occupants est rigoureusement identique d'une année sur l'autre, les consommations d'énergie de chauffage pour BBC3 devraient être les plus faibles en 2011, les plus élevées en 2010 et intermédiaires en 2012. Pour PAS3, les consommations d'énergie de chauffage devraient baisser en 2011 par rapport à 2010.

9.2 ÉVOLUTION DES FACTURES D'ÉNERGIE

Les occupants ont été sollicités afin de fournir leurs factures d'électricité depuis leur date d'emménagement. Leur consommation de bois ainsi que sa nature et son pouvoir calorifique leur ont été demandés pour chaque période de chauffe.

La comparaison des relevés d'index des factures d'électricité fournis par les occupants a montré une parfaite adéquation avec les résultats des mesures de consommation d'électricité totale au niveau de leur compteur électrique. De ce fait, les consommations d'énergies annuelles pour l'électricité sont basées sur les mesures réalisées.

Les consommations d'énergie annuelles en énergie finale pour tous les usages confondus sont présentées pour les deux bâtiments dans la Figure 9-1 et comparées à la consommation annuelle des résidences principales françaises estimée à 196 kWh/m².an d'énergie finale en 2008 (ADEME, 2010).

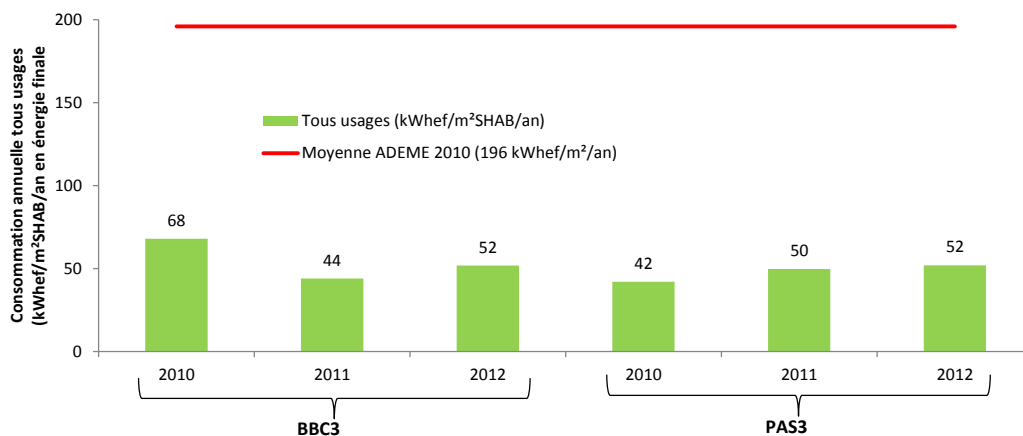


Figure 9-1 – Consommations annuelles 2010, 2011 et 2012 d'énergie finale (tous usages confondus) en kWh/m²SHAB.an pour chaque bâtiment et comparaison avec la consommation annuelle en énergie finale des résidences principales françaises (ADEME, 2010)

Les deux habitations présentent une consommation annuelle d'énergie finale pour tous les usages inférieure à 70 kWh/m²SHAB/an et par conséquent bien inférieure à celle des résidences principales françaises.

9.3 ÉVOLUTION DES CONSOMMATIONS PAR POSTE

9.3.1 SUIVI ANNUEL

Les données de consommations par poste des deux habitations instrumentées ont été récupérées quotidiennement par le CSTB sous forme de fichier texte. Un programme a été développé sous Visual Basic for Application sous Microsoft Excel pour permettre l'exploitation des données de l'année 2010 dans le cadre d'un stage de Master 2 « Matériaux, Management de projet et qualité, Energies renouvelables » de l'Université de Poitiers (Rupin, 2010). Ce programme a ensuite été modifié pour prendre en compte certaines évolutions des moyens de mesure pour les années suivantes.

La consommation d'énergie primaire par poste de BBC3 et PAS3 pour 2010, 2011 et 2012 exprimée en kWhep/m²SHON/an et en pourcentage (Figure 9-3 et Figure 9-4) montre qu'en comparaison du parc d'habitations existantes, le chauffage n'est plus le principal poste de consommation puisqu'il contribue entre 7 et 35 % à la consommation d'énergie totale.

Pour BBC3, les consommations d'énergie des autres usages (électroménagers, hifi, bureautique, prises électriques,...) représentent le principal poste de consommation. Cette tendance est très marquée pour 2011 et 2012. Entre 2010 et 2011, les parts relatives des consommations de chauffage (poêle bois et convecteurs électriques) ont diminué (de 23 à 7 %) alors que celles des autres usages ont augmenté (de 42 à 60 %). Cette particularité est liée en partie à la douceur de l'année 2011 mais aussi au changement de comportement des occupants privilégiant le chauffage par radiateurs électriques d'appoint branchés sur prises à la place du chauffage bois à partir de 2011. Pour 2012, avec son hiver de rigueur intermédiaire, les consommations relatives au chauffage se situent bien entre celles de 2010 et 2011.

Pour PAS3, ce sont les consommations de la production électrique d'eau chaude sanitaire qui représentaient initialement le principal poste de consommation (49 % en 2010 puis 35 % en 2011 et enfin 20 % en 2012). La diminution progressive de ce poste est liée au remplacement de la production électrique d'eau chaude sanitaire par un système de production solaire installé au mois de mai 2011. L'augmentation de la consommation des autres usages peut être liée par l'usage ponctuel de chauffages électriques d'appoint, branchés sur des prises électriques comme mentionnés par les occupants. Enfin le changement de combustible (bois massif local bon marché à la place de buchettes de bois onéreuses) pourrait expliquer l'augmentation de consommation de bois de chauffage.

Pour les deux habitations, les parts relatives des consommations d'éclairage varient entre 6 et 12 % et celles de la VMC entre 3 et 7 %.

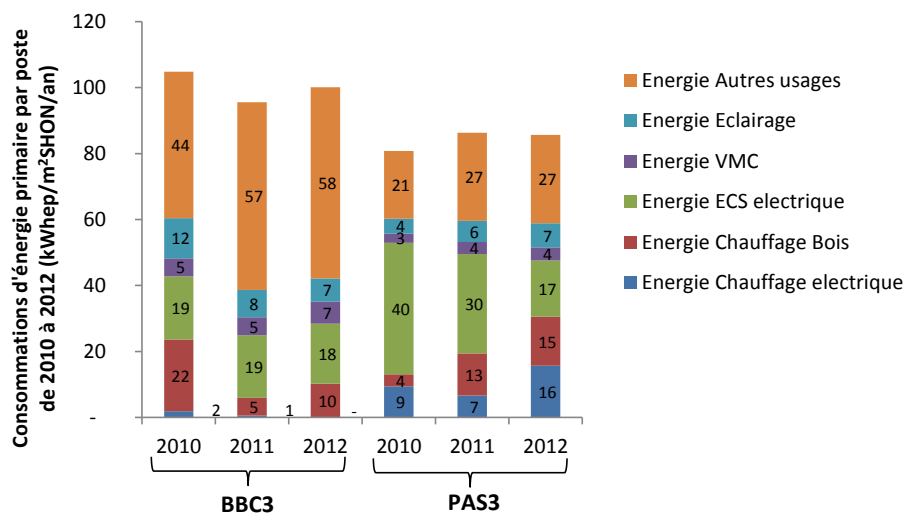


Figure 9-2- Consommations d'énergie primaire (kWh/m²SHON/an) par poste de BBC3 et PAS3 sur les années 2010, 2011 et 2012

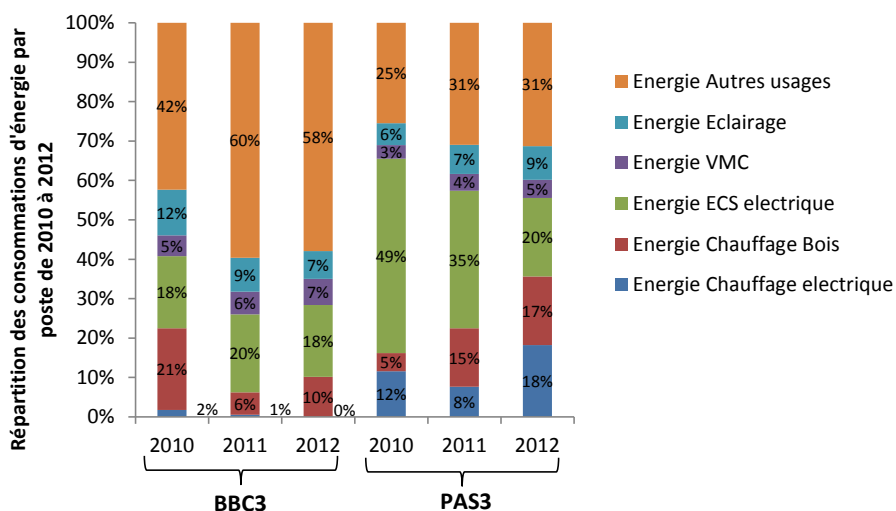


Figure 9-3- Répartition des consommations d'énergie primaire (kWh/m²SHON/an) de BBC3 et PAS3 par poste sur les années 2010, 2011 et 2012

9.3.2 SUIVI MENSUEL

Les consommations mensuelles par poste pour BBC3 et PAS3 exprimées en kWh/m² SHON sont présentées pour 2010, 2011 et 2012 sur les Figure 9-4 et Figure 9-5. Les consommations de PAS3 ne sont disponibles que depuis avril 2010.

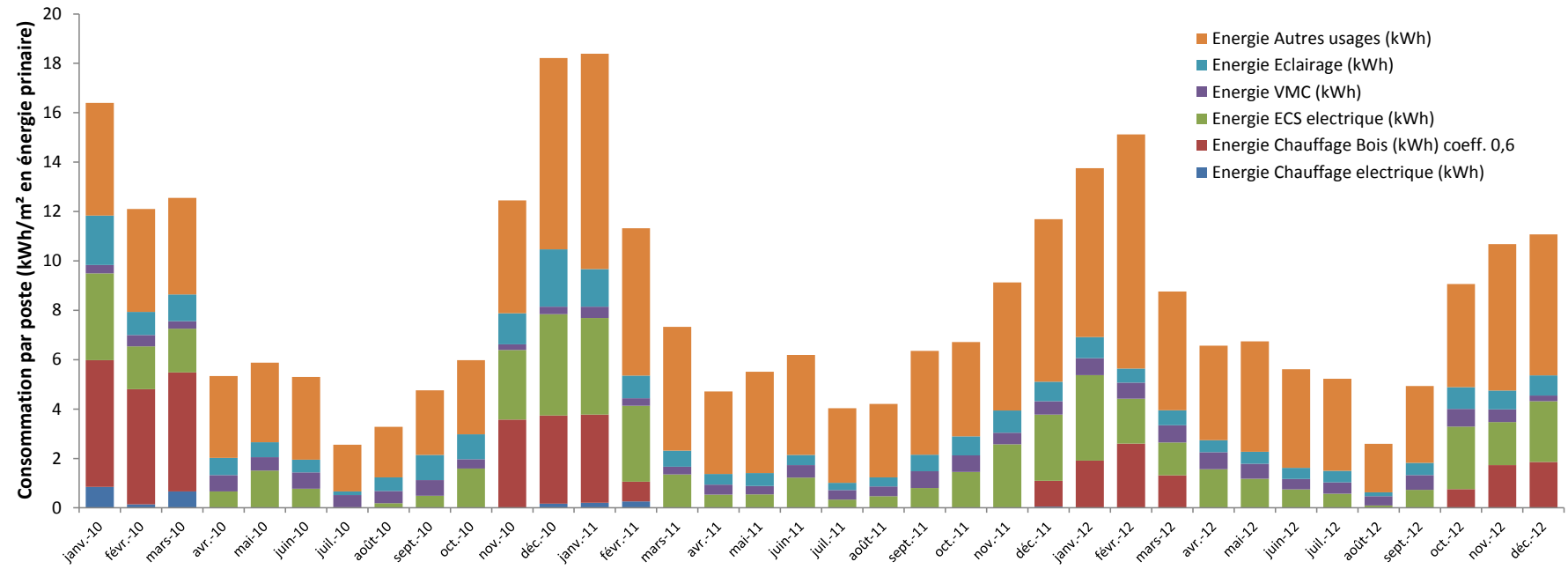


Figure 9-4 – Consommations mesurées par poste de 2010 à 2012 pour BBC3 et exprimées en kWh/m² SHON en énergie primaire

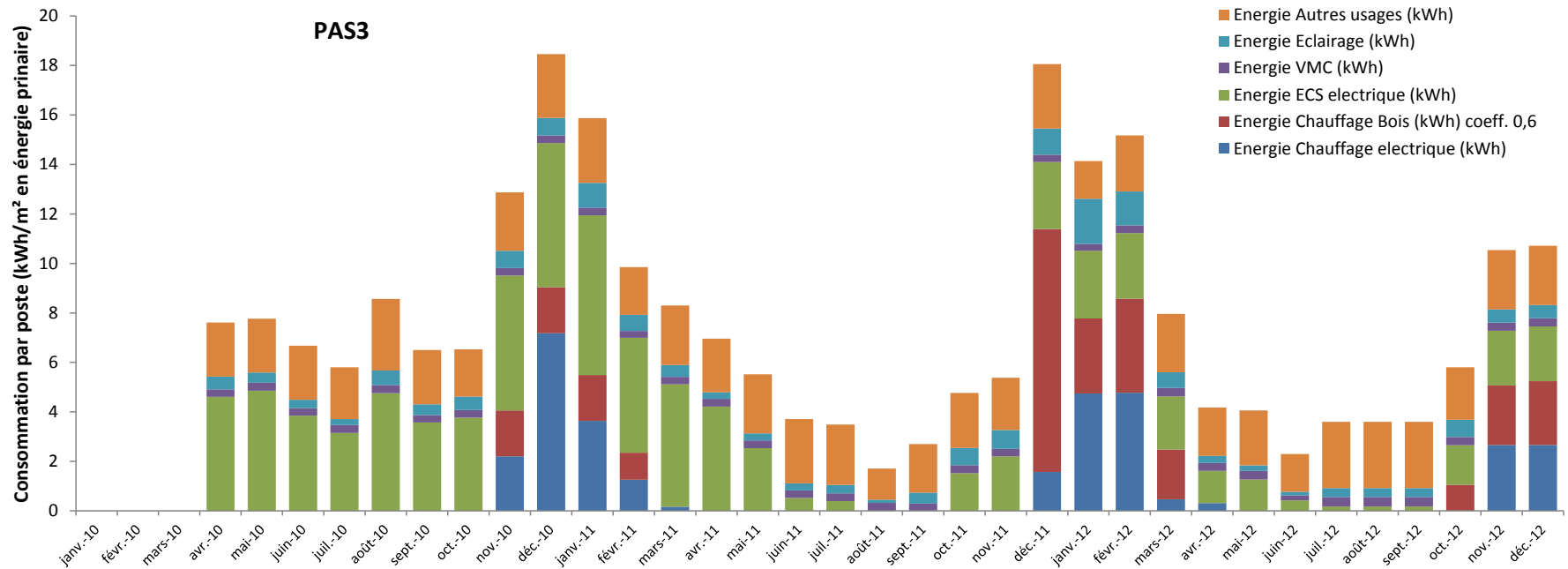


Figure 9-5 - Consommations par poste mesurées de 2010 à 2012 pour PAS3 et exprimées en kWh/m² SHON en énergie primaire

Pour BBC3, les consommations les plus élevées sont observées à la fin de l'automne et pendant tout l'hiver ce qui correspond approximativement à la période de chauffe. Pendant cette période, entre janvier et mars 2010, le poste de consommation « énergie chauffage bois » apparaît comme le premier poste de consommation alors qu'il passe en seconde, voire 3^{ème} place à partir de novembre 2010. Il semble que les occupants ont modifié leur comportement au regard du chauffage au fil du temps et qu'ils utilisent moins le chauffage au bois qu'au début de leur arrivée.

Le chauffage électrique (convecteurs dans salles de bain) est très peu utilisé ce qui est confirmé par les occupants (du fait du mouvement ascendant de l'air chauffé par le poêle, les pièces de l'étage sont chauffées et il n'est pas utile d'utiliser les convecteurs électriques).

La consommation d'éclairage diminue avec l'augmentation de la durée des jours et de l'ensoleillement. On notera également une baisse significative (environ - 50 %) du poste éclairage entre 2010 et les 2 années suivantes.

Il en est de même pour la consommation d'énergie liée à l'eau chaude sanitaire car les apports solaires deviennent plus importants en période estivale.

La consommation de la VMC est la plus faible par rapport aux autres postes.

Les consommations des autres usages (électroménagers, hifi, bureautique, prises électriques,...) représentent le premier poste de consommation sauf au cours des trois premiers mois de 2010. L'augmentation de la part de ce poste en 2011 et 2012, en particulier en période de chauffe, semble liée à l'utilisation régulière de radiateurs électriques d'appoint par les occupants. Afin de confirmer cette hypothèse confortée par les renseignements recueillis auprès des occupants, le ratio des consommations du poste « Autres usages » a été calculé sur deux mois (janvier et juin) ayant des conditions climatiques diamétralement opposées, et pour une occupation supposée normale (hors vacances) (Tableau 9-3). Partant de l'hypothèse que l'utilisation des « autres usages » par les occupants est pratiquement constante toute l'année, un ratio hiver/été supérieur à 1 indiquerait une consommation supplémentaire d'électricité en rapport avec le besoin de chauffage. Les valeurs des ratios sont très importantes (entre 1,4 et 2) et très vraisemblablement liées à l'utilisation de radiateurs électriques branchés sur les prises électriques en guise de chauffage d'appoint. L'évolution temporelle du ratio montre que l'usage du chauffage d'appoint électrique était relativement faible en 2010, maximum en 2011 et intermédiaire en 2012.

Tableau 9-3 – Ratio des consommations mensuelles des « autres usages » relevées en janvier et en juin des trois années de suivi pour BBC3

Ratio consommation « autres usages » pour le mois de janvier / consommation « autres usages » pour le mois de juin	BBC3
Année 2010	1,36
Année 2011	2,15
Année 2012	1,71

Pour PAS3, les consommations les plus élevées sont observées pendant l'hiver ce qui correspond à une partie de la période de chauffe. Pendant cette période, le poste de consommation « énergie chauffage bois et chauffage électrique »

apparaît comme le deuxième poste de consommation en novembre 2010 et janvier 2011 et le premier en décembre 2010 et 2011 ainsi qu'en janvier, février, novembre et décembre 2012. Au cours du premier hiver 2010, les occupants semblent s'être chauffés avec les convecteurs électriques placés dans les différentes pièces de la maison plutôt qu'avec le chauffage au bois. En revanche, la tendance semble être inversée à partir de décembre 2011 possiblement du fait de leur changement de comportement lié à l'utilisation du bois massif local à la place des buchettes de bois.

Par ailleurs, en utilisant la même méthode que celle décrite pour BBC3, le ratio des consommations « autres usages » entre les mois de janvier et juin sur les trois années de suivi (Tableau 9-4) est stable et voisin de 1. Ceci montre qu'aucune consommation supplémentaire d'électricité n'est observée en hiver ce qui semble exclure l'usage d'un chauffage électrique d'appoint.

Tableau 9-4 – Ratio des consommations mensuelles des « autres usages » relevées en janvier et en juin des trois années de suivi pour PAS3

Ratio consommation « autres usages » pour le mois de janvier / consommation « autres usages » pour le mois de juin	PAS3
Année 2010	1,18
Année 2011	1,01
Année 2012	1,00

La production électrique d'eau chaude sanitaire est le premier poste de consommation depuis le suivi des consommations jusqu'au mois de mai 2011. Pendant cette période, les consommations sont constantes. A partir du mois de juin 2011, les consommations chutent à cause de l'installation et de la mise en service du système de production solaire d'eau chaude sanitaire en mai 2011.

La consommation de la VMC est constante sur l'année.

La consommation d'énergie pour l'éclairage augmente en hiver et diminue avec l'augmentation de la durée des jours et de l'ensoleillement. On note une surconsommation inhabituelle sur cet usage « éclairage » pour les mois de janvier et février 2012 probablement liée à l'usage ponctuel durant ces 2 mois d'un luminaire d'ancienne génération.

9.4 RAPPROCHEMENT DES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE MESURÉES PAR RAPPORT AUX EXIGENCES ÉNERGETIQUES DES LABELS VISES

Il est paru intéressant de rapprocher les consommations d'énergie réellement mesurées avec les critères de performance des labels énergétiques visés, c'est-à-dire BBC-Effinergie pour BBC3 et Passivhaus pour PAS3. Ce rapprochement est à considérer avec précaution car les consommations énergétiques au cours des premières années après la construction des bâtiments sont habituellement plus élevées et parce que les consommations énergétiques des labels sont conventionnelles. En effet, ces consommations conventionnelles sont calculées à partir de scénarios d'occupation, ainsi que des scénarios météorologiques conventionnels ne reflétant pas nécessairement la réalité.

Le label BBC Effinergie exige une consommation conventionnelle maximale de 50 kWh/m² SHON.an en énergie primaire, pour la région nantaise, pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, les auxiliaires, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage. La consommation d'énergie primaire mesurée pour BBC3 sur ces postes est égale à 60 kWh/m² SHON.an en 2010, à 39 kWh/m² SHON.an en 2011 et à 42 kWh/m² SHON.an en 2012. La consommation la plus élevée est mesurée lors de la première année d'occupation ce qui peut être possiblement dû notamment au réglage non optimal des systèmes et à la méconnaissance de ceux-ci par les occupants. Si l'on tient compte des consommations électriques des « autres usages » que l'on peut raisonnablement attribuer aux radiateurs d'appoint, la consommation d'énergie primaire mesurée pour BBC3 atteint 70 kWh/m² SHON.an en 2010, 50 kWh/m² SHON.an en 2011 et 56 kWh/m² SHON.an en 2012.

Le label Passivhaus exige une consommation conventionnelle maximale tous usages confondus à 120 kWh/m² SHAB.an en énergie primaire. Pour PAS3, les mesures indiquent une consommation globale de 116 kWh/m² SHAB.an en 2010 et de 86 kWh/m² SHAB.an en 2011 et 2012.

10. SYNTHÈSE

A l'aide de l'outil méthodologique développé par le CSTB et testé sur sept habitations performantes en énergie, deux habitations ont fait l'objet d'un suivi longitudinal de la qualité de l'air, du confort et de leurs performances énergétiques sur une période de près de trois ans (juin/juillet 2009 à janvier 2012).

Concernant l'étanchéité à l'air de l'enveloppe des habitations, les mesures de perméabilité à l'air, réalisées à l'achèvement des constructions, ont montré que ces bâtiments sont nettement plus étanches que les exigences de la réglementation thermique 2005 et même de l'actuelle réglementation thermique 2012.

Concernant le taux de renouvellement d'air (TRA) assuré par les systèmes mécaniques de ventilation double flux, les mesures, réalisées lors de l'emménagement des occupants, montrent que, pour l'un des bâtiments (BBC3), le TRA mesuré atteint la valeur théorique calculée par le BET et correspond à la valeur médiane des logements français alors que ce n'est pas le cas pour l'autre bâtiment (PAS3) (TRA mesuré inférieur au TRA escompté).

Concernant les systèmes mécaniques de ventilation double flux, leur fonctionnement au cours de la première année d'occupation a nécessité un premier réglage puis plusieurs interventions suite à des dysfonctionnements ou à des dérèglages (bouches fermées volontairement ou dérèglées, bouches mal fixées qui tombent au sol) et ce pour les deux maisons expérimentées. Au cours des deux années suivantes, l'entretien des systèmes par les occupants (changement des filtres, nettoyage des bouches de soufflage et d'extraction, de la grille extérieure d'air neuf,...) se met en place mais dépend de leur volonté et de leur disponibilité. Il est effectué en totalité ou en partie (changement des filtres uniquement), et plus ou moins régulièrement selon les occupants et cela a une incidence sur le bon fonctionnement des systèmes. Enfin l'utilisation des systèmes par les occupants, bien que complexe et mal adaptée au début (programmations proposées en mode automatique non adaptées au mode de vie des occupants), semble aujourd'hui avoir été intégrée différemment selon les individus. Certains alternent mode manuel (en été) et mode automatique (en hiver) même s'il subsiste un mécontentement (horloge interne décalée, programmes non adaptés). D'autres maîtrisent le système qu'ils utilisent exclusivement en mode automatique avec leur propre programmation. Ces observations montrent qu'il est nécessaire de proposer des systèmes de ventilation robustes et faciles d'utilisation pour l'occupant. Il est important d'effectuer des mesures de contrôle de ces systèmes à réception des bâtiments mais également régulièrement au cours de leur usage afin d'assurer leur bon fonctionnement. Enfin, leur entretien et leur maintenance pourraient être réalisés plutôt par des professionnels que par les occupants eux-mêmes.

Concernant le confinement de l'air évalué à partir de la mesure du CO₂, il apparaît que l'air n'est pas confiné dans les deux habitations, qui présentent néanmoins la particularité d'avoir une densité d'occupation faible. Les concentrations médianes de CO₂ sont toujours inférieures à celles préconisées par le Règlement Sanitaire Départemental, ce qui correspond à un bon résultat. Les concentrations sont plus faibles en été qu'en hiver du fait de l'ouverture plus fréquente et prolongée des ouvrants pendant cette période aussi bien de jour que de nuit (sur-ventilation nocturne).

Concernant la variation de la qualité de l'air intérieur au cours du temps, plusieurs tendances sont observées en fonction des indicateurs de pollution considérés.

Les concentrations des particules (concentrations massiques ou $PM_{2.5}$ et en nombre pour particules de diamètre compris entre 0.3 et 20 μm) ont augmenté entre la phase d'inoccupation et la phase d'occupation du fait de la présence humaine (resuspension des particules déposées au sol, sources intérieures de particules liées aux activités humaines). En phase d'occupation, les concentrations sont plus élevées en hiver qu'en été du fait de l'utilisation du poêle-cheminée au bois, source d'émissions de particules.

Parmi **les composés organiques volatils et les aldéhydes** quantifiés, la prédominance et l'abondance des aldéhydes (hexaldéhyde, formaldéhyde, acétaldéhyde) et des terpènes (alpha-pinène et limonène) dans ces maisons par rapport aux autres COV détectés semblent être liées à l'utilisation du bois notamment comme matériau principal de construction. La diminution de concentration de la majorité de ces composés entre la phase d'inoccupation et la phase d'occupation est possiblement liée à la diminution progressive des émissions du bâtiment (en lien avec le délai entre l'achèvement et l'occupation des maisons), au fonctionnement des systèmes de ventilation et à une aération complémentaire par ouverture des fenêtres pratiquée par les occupants en particulier en été. Il faut noter qu'en cas de dysfonctionnement du système de ventilation des niveaux particulièrement élevés de COV et d'aldéhydes sont observés : cas de la non mise en service du système de PAS3 pendant la semaine d'enquête en situation d'inoccupation. Le suivi longitudinal sur trois ans, en phase d'occupation, des composés chimiques majoritaires a permis de mettre en évidence cinq groupes de composés. Le premier présente des teneurs pratiquement stables au fil du temps (formaldéhyde, hexaldéhyde, benzaldéhyde). Le deuxième est influencé ponctuellement par les activités humaines (augmentation des teneurs en alpha-pinène, bêta-pinène, limonène, o-cymène lors de l'introduction de meuble en bois, en n-butylacétate lors de l'utilisation de produits cosmétiques, en hydrocarbures aromatiques après l'application de vernis). Le troisième est composé de l'acide acétique dont les concentrations semblent augmenter progressivement avec le temps pour les deux habitations. Le quatrième est composé de deux hydrocarbures aliphatiques (n-décane, n-undécane) dont les concentrations diminuent progressivement avec le temps. Enfin le cinquième groupe est représenté par l'acétaldéhyde caractérisé par la variation saisonnière de sa concentration.

Par comparaison avec les concentrations intérieures dans les logements français, les concentrations médianes mesurées en occupation, sur trois ans, sont plutôt supérieures (hexaldéhyde, acétaldéhyde et acroléine) ou oscillent autour de la valeur nationale (éthylbenzène, m+p-xylène, 1,2,4-triméthylbenzène). Seul le toluène présente des niveaux inférieurs. Certains composés n'ont jamais été quantifiés dans les deux habitations (tétrachloroéthylène, 1,4-dichlorobenzène, 2-butoxyéthanol et son acétate, 1-méthoxy-2-propanol).

Concernant le confort acoustique, les occupants qualifient leur ambiance sonore entre « plutôt agréable » et « extrêmement agréable » mais expriment ponctuellement des gênes liées le plus souvent au bruit du système de ventilation. Bien que les niveaux de bruit liés au fonctionnement du système de

ventilation au débit minimal soient conformes aux niveaux réglementaires, le bruit du moteur est perceptible lorsque tout est calme et devient désagréable pour les autres vitesses de fonctionnement. Le dérèglement des débits de ventilation au cours du temps peut entraîner l'apparition de nuisances sonores.

Concernant le confort thermique, les mesures de la température et de l'humidité relative de l'air au cours des enquêtes montrent qu'il est semblable à celui des logements français. L'étude dynamique des paramètres de confort sur trois ans a permis de mieux qualifier les ambiances thermiques, d'identifier les zones et périodes d'inconfort ainsi que leurs causes. Bien que le confort thermique global soit considéré par les occupants plutôt satisfaisant en général, des inconforts thermiques sont ressentis. En été, des surchauffes sont mesurées dans les chambres du premier étage de BBC3 du fait de l'exposition ouest des fenêtres dépourvues de protections solaires extérieures. En hiver, dans les deux habitations, les températures intérieures sont jugées froides le matin en se levant mais également après une période d'absence même courte (2 jours). Le chauffage avec un poêle cheminée au bois ne semble pas adapté pour ce type d'habitation en raison de son absence de régulation de la température et de sa trop forte inertie thermique. En effet, il existe un déphasage temporel entre la température de confort souhaitée et la température réelle instantanée ce qui nuit au confort des occupants. De plus il est difficile de régler l'apport calorifique avec des bûches alors que ce problème serait résolu avec un dispositif à vis sans fin à pellets ou à granulés asservi à une régulation. Par ailleurs, la répartition de l'air chaud ne s'effectue pas de façon homogène dans toutes les pièces. Pour finir, il n'est pas possible de chauffer le bâtiment en l'absence des occupants (la journée, le WE, pendant les vacances) ce qui devient source d'inconfort en période hivernale, au retour des occupants. Pour toutes ces raisons, des radiateurs électriques d'appoint sont utilisés ponctuellement au cours de l'hiver et les occupants de BBC3 envisagent d'installer des convecteurs électriques au RDC, au niveau du coin cuisine, et de les équiper d'un système de programmation afin de les mettre en fonctionnement notamment en leur absence.

Concernant les consommations d'énergie, la consommation annuelle globale en énergie finale des deux bâtiments évaluée de 2010 à 2012 représente le tiers de la consommation actuelle en énergie finale des résidences principales françaises. Aucun commentaire ne peut être fait quant au rapprochement des consommations mesurées en continu au moyen des dispositifs de suivi et des exigences énergétiques conventionnelles des labels visés. En revanche, dans le cas du calcul énergétique du label BBC-Effinergie, la consommation du poste chauffage peut potentiellement être sous-évaluée du fait de la non-prise en compte des consommations liées à l'utilisation de radiateurs électriques branchés sur les prises électriques : cette consommation apparaît dans le poste « Autres usages » (cas de BBC3) mais n'est pas prise en compte dans le calcul du label. Le suivi longitudinal sur trois années d'occupation a montré des variations significatives des consommations d'énergie d'une année à l'autre, différentes d'une habitation à l'autre. La diminution des consommations d'énergie pour BBC3 peut s'expliquer en partie par une utilisation du chauffage au bois différente de celle adoptée la première année. L'augmentation des consommations d'énergie pour PAS3 peut s'expliquer en partie par une plus grande utilisation, la deuxième et la troisième année, d'un bois de chauffage beaucoup plus économique. Le

suivi montre entre la première et la troisième année des transferts d'énergie (bois vers électricité pour BBC3 et électricité vers bois pour PAS3) traduisant l'adaptation des modes de chauffage au fil du temps. Plusieurs années sont nécessaires aux occupants pour pouvoir bien s'approprier les équipements de leur logement et optimiser sa gestion.

11. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les conclusions issues du suivi sur trois ans de ces deux habitations qui font partie des tout premiers bâtiments français performants en énergie et qui sont atypiques par rapport au parc actuel de bâtiments performants en énergie, fournissent un éclairage intéressant. Il a été possible d'évaluer la performance dans le temps des systèmes et équipements, de mesurer l'évolution temporelle de la qualité de l'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles et d'observer l'évolution du comportement des occupants au cours du temps. Ces évolutions temporelles ont été peu étudiées à ce jour.

Bien que ces conclusions ne puissent pas être généralisées, plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette étude :

- Il semble aujourd'hui possible de construire des bâtiments moins perméables dont les performances énergétiques sont relativement proches des performances énergétiques attendues.
- S'agissant de la qualité de l'air intérieur de ces deux habitations, il ne ressort pas de particularité liée au caractère « performant en énergie » des logements, hormis les spécificités observées en lien avec l'utilisation du bois de construction. Certaines concentrations de polluants sont plus élevées que la moyenne de la campagne nationale logements de l'OQAI. Cette particularité pourrait être liée au caractère « neuf » des habitations (matériaux de construction, d'isolation, de décoration, etc.). Toutes les sources d'émissions n'ont pas été clairement mises en évidence puisque ce n'était pas l'objet de l'étude.
- La présente étude s'est particulièrement intéressée au renouvellement de l'air et à l'efficacité des systèmes spécifiques de ventilation. Les concentrations médianes du CO₂ mesurées dans les conditions d'occupation étudiées restent en dessous des recommandations du règlement sanitaire départemental type de ne pas dépasser 1300ppm en condition habituelles d'occupation et 1000ppm dans les locaux où on peut fumer. L'étude a illustré, du fait de l'étanchéité des bâtiments, que la conception, le dimensionnement, la mise en œuvre, le réglage, l'entretien et l'utilisation des systèmes spécifiques de ventilation mécanique contrôlée ont une importance capitale sur la qualité de l'air intérieur. Dans les deux cas étudiés, plusieurs dysfonctionnements des systèmes de ventilation ayant été observés, une piste de réflexion pourrait consister à développer des systèmes plus simples à utiliser et plus robustes. De même, il est apparu que leur entretien et leur maintenance jouent un rôle capital, d'où la nécessité d'inciter à une vérification périodique, à effectuer par des professionnels dans certains cas.
- Au niveau du confort, les niveaux sonores du système de ventilation respectent les valeurs réglementaires au débit minimal mais pas aux débits supérieurs, ce qui peut être une source d'inconfort. Une piste de réflexion pourrait consister à améliorer le confort sonore des systèmes de ventilation.

- Des inconforts d'hiver semblent liés au choix du chauffage bois comme énergie principale de chauffage pour ce type d'habitation : une meilleure connaissance des atouts et des contraintes de ce mode de chauffage pourrait contribuer à éviter, dès la phase amont de conception, des choix inadaptés, par exemple, aux modes de vie des futurs occupants. Concernant les surchauffes d'été, elles sont directement liées à la volonté des occupants de ne pas avoir de protections solaires extérieures.
- Enfin, plusieurs années semblent nécessaires aux occupants pour pouvoir bien s'approprier les équipements de leur logement et optimiser leur gestion, ce qui laisserait penser que des initiatives en faveur d'une meilleure appropriation des logements par les occupants sont favorables à une meilleure qualité de l'air intérieur.

Au vu de ces premiers enseignements, les pouvoirs publics ont souhaité élargir de type d'étude à un plus grand nombre de bâtiments et d'usages différents (en premier lieu habitation, enseignement/accueil de la petite enfance et bureau).

Dans ce cadre, l'OQAI a mis en place un **dispositif de remontée de données et de partage d'information** - dénommé « OQAI- BÂTIMENTS PERFORMANTS EN ENERGIE » ou « OQAI-BPE ». Ce dispositif est ouvert à l'ensemble des acteurs publics et privés intéressés par le questionnement relatif à la qualité de l'air et au confort des bâtiments performants en énergie, principalement ceux répondant aux réglementations les plus récentes en matière de performance thermique. Il est destiné à accompagner en temps réel, le déploiement des nouvelles constructions, et à identifier les éléments d'ajustement à mettre en œuvre pour optimiser le parc de bâtiments en cours de métamorphose.

L'outil méthodologique développé précédemment a été simplifié afin qu'il soit facilement déployable sur un grand nombre de bâtiments et adapté aux bâtiments à usage d'enseignement et à usage de bureau. Le **protocole harmonisé OQAI – Bâtiments performants en énergie** (Protocole harmonisé OQAI-BPE) a ainsi été élaboré en collaboration avec les partenaires scientifiques et techniques¹ de l'OQAI, puis évalué in fine par le conseil scientifique de l'OQAI. Ce protocole rassemble l'ensemble de la stratégie d'échantillonnage et de collecte des données permettant de caractériser la qualité de l'air intérieur et le confort des bâtiments performants en énergie. Il est destiné aux bâtiments neufs ou existants faisant l'objet d'une réhabilitation à haute performance énergétique et leurs occupants, des premiers mois aux premières années d'occupation et mis en œuvre par les opérateurs, par engagement volontaire.

Une **base de référence nationale** (base de données) a été constituée afin de permettre le recueil centralisé des données collectées sur le territoire français par tous les opérateurs mettant en œuvre le « protocole harmonisé ». La gestion et l'exploitation des données par l'OQAI permettra de dresser annuellement un état de la situation sur la qualité des environnements intérieurs dans des bâtiments performants en énergie, d'identifier les éventuels points défaillants et de proposer des pistes d'amélioration le cas échéant.

¹ ADEME, AIR&BIO, Air Normand, Air Rhône-Alpes, ASPA, CETE Nord-Picardie, CETE de l'Ouest, CERTES/Université Paris-Est Créteil, COSTIC, DHUP, EHESP, Ecole des Mines de Douai, HUS/Service pneumologie, INERIS/LCSQA, LCPP, LHVP, PEUTZ, Université Cergy-Pontoise, Université Lyon 1/CNRS écologie microbienne

12. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME (2010) : Chiffres clés du bâtiment – Evolution des consommations unitaires des résidences principales par usage à climat normal en kWh/m² – Source CEREN- 113 pages.
- Allemand N, Besombes JL, Collet S, Mandin C, Ribéron J, Leoz-Garziandia E, (2008) - Evaluation de l'impact des appareils de chauffage domestique à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur. Rapport final DRC-08-70801-15219A, 202 pages
- Arrêté du 24 mars 1982 relatives à l'aération des logements: aération générale ou permanente, aération permanente pouvant être limitée à certaines pièces. Journal officiel du 27 mars 1989, page 942 (http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=9568DF7D5E7415FC8E213ECD20529CDD.tpdjo02v_1?cidTexte=LEGITEXT000006074206&dateTexte=20080930)
- Arrêté du 30 juin 1999 relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation. Journal officiel °163 du 17 juillet 1999, page 10658 (http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=48AC54AEE4D798DBF69226F111728A8B.tpdjo15v_1?cidTexte=JORFTEXT000000211449&dateTexte=20110217)
- Carvalho R.L., Jensen O.M., Afshari A., Bergsøe N.C. (2013) : Wood-burning stoves in low-carbon dwellings, *Energy and Buildings*, Volume 59, Pages 244-251
- Derbez M., Berthineau B., Cochet V., Lethrosne M., Pignon C., Ribéron J. (2011). Évaluation de la qualité d'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles des bâtiments performants en énergie, Septembre 2011, Rapport final, 121 pages.
- Derbez M., Berthineau B., Cochet V., Lethrosne M., Pignon C., Ribéron J., Kirchner S. (2012a), Méthodologie d'évaluation de la qualité de l'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles des bâtiments d'habitation performants en énergie, *Environnement, Risques & Santé*. Volume 11, Numéro 1, 40-51 .
- Derbez M. Berthineau B., Cochet V., Lethrosne M., Mahendran S., Pignon C., Ribéron J. Wyart G. Kirchner S. (2012b). Suivi longitudinal de la qualité d'air intérieur, du confort des occupants et des consommations énergétiques réelles de deux bâtiments performants en énergie sur une durée de deux ans - Mise en place d'une base de référence nationale, N° ESE-SB / 2012-087, Mai 2012, Rapport final, CSTB, 71 pages.
- Fromme H., Twardella D., Dietrich S., Heitmann D., Schierl R., Liebl B., Rüdén H. (2007). Particulate matter in the indoor air of classrooms—exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmospheric Environment*, Volume 41, Issue 4, February 2007, Pages 854-866
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève, Suisse. 103 pages.

- Grenelle de l'Environnement (2008). Lutter contre les changements climatiques et maîtriser l'énergie - Rapport de synthèse du Groupe 1. 108 pages.
- Guo, H.; Murray, F.; Lee, S.C.(2003). The development of low volatile organic compound emission house—a case study, *Building and Environment* 38, 1413-1422
- Hänninen O., Hoek G., Mallone S., Chellini E., Katsouyanni K., Gariazzo C., Cattani G., Marconi A., Molnár P, Bellander T, Jantunen M.2011. Seasonal patterns of outdoor PM infiltration into indoor environments: review and meta-analysis of available studies from different climatological zones in Europe, *Air Qual Atmos Health*, 4:221–233
- Health Council of the Netherlands: Dutch Expert Committee on Occupational Standards. n-, iso-, sec-, and tert-Butyl acetate; Health-based recommended occupational exposure limit. The Hague: Health Council of the Netherlands, 2001; publication no. 2001/03OSH.
- Hodgson A.T., Rudd A.F., Beal D., Chandra S. (2000). Volatile organic compound concentrations and emission rates in new manufactured and site-built houses, *Indoor Air*, 10, 178-192.
- Hodgson A.T., Beal D., McIlvaine J.E.R. (2002) : Sources of formaldehyde, other aldehydes and terpenes in a new manufactured house, *Indoor Air*, 12, 235-242.
- Howard-Reed C., Wallace LA, Ott WR (2002). The effect of opening windows on air change rates in two homes. *Journal of the Air Waste Management Association* 1995 (2002), Volume: 52, Pages: 147-159.
- Keeler, G.J., Dvonch, T., Yip, F.Y., Parker, E.A., Israel, B.A., Marsik, F.J., Morishita, M., Barres, J.A., Robins, T.G., Brakefield-Caldwell, W., Sam, M., 2002. Assessment of personal and community-level exposure to particulate matter among children with asthma in Detroit, Michigan, as part of Community Action Against Asthma (CAAA). *Environmental Health Perspectives* 110 (Suppl. 2), 173–181.
- Kirchner, S, Arenes, JF, Cochet, C, Derbez, M, Duboudin, C, Elias, P, Gregoire, A, Jedor, B, Lucas, JP, Pasquier, N, Pignoret, M et Ramalho, O (2006). Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur - Campagne nationale logements: état de la qualité de l'air intérieur dans les logements français. N°DDD/SB - 2006-57. Novembre 2006. Rapport final. *CSTB*. 183 pages.
- Lucas, JP., Ramalho O, Kirchner, S et Ribéron J. (2009). Etat de la ventilation dans le parc de logements français, N°DESE/SB - 2009-37. Juin 2009 *CSTB* : 84 pages.
- Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en oeuvre du Grenelle de l'environnement (1), *Journal officiel* n° 179 du 5 août 2009, page 13031, texte n° 2.
- Nasir Z.A., Colbeck I. (2013) : Particulate pollution in different housing types in a UK suburban location, *Science of The Total Environment*, Volumes 445–446, Pages 165-176.
- Observatoire BBC (2013) : Indicateurs 2013 – La construction BBC - Retour d'expérience sur les bâtiments certifiés BBC-Effinergie, 29 pages.

- Park J.S., Ikeda K. (2006) : Variations of formaldehyde and VOC levels during 3 years in new and older homes, *Indoor Air*, 16, 129-135.
- Rupin F. (2010). Consommations énergétiques réelles et confort des occupants des bâtiments performants en énergie, N°ESE-SB / 2010-059, Août 2010, Rapport de stage, CSTB, 134 pages.
- Toy N.J. (1989). Final Report on the safety assessment of ethyl acetate and butyl acetate.» *Journal of the American College of Toxicology*. Vol. 8, no. 4, p. 681-705.
- Yamaguchi T, Nakajima D, Ezoe Y, Fujimaki H, Shimada Y, Kozawa K, Arashidani K, Goto S. (2006). Measurement of volatile organic compounds (VOCs) in new residential buildings and VOCs behavior over time. *J UOEH*. 28(1):13-27.
- Wallace L, Emmerich S.J, Howard-Reed C (2002). Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year : the effect of temperature, wind, fans, and windows, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12, pp. 296–306.