



Caractérisation de la qualité de l'air dans les logements français équipés d'un appareil de chauffage au bois

Rapport d'étude

13/12/2024 – Sutharsini SIVANANTHAM, Olivier RAMALHO, Anthony GREGOIRE, Pierre BONNET, Emma LAFAURIE, Driss SAMRI et Virginie DESVIGNES



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).

Ce rapport a fait l'objet d'un financement de l'Anses dans le cadre d'un contrat d'une convention de recherche et développement signée entre les parties le 11 décembre 2023. Les conclusions exprimées dans ce rapport n'engagent que leurs auteurs. Le contenu de ce rapport ne fait pas l'objet d'une validation de l'Anses et ne reflète pas nécessairement son avis définitif. La responsabilité de l'Anses ne peut être engagée en cas d'informations incomplètes ou erronées. Toute utilisation ou modification de ce rapport par des tiers, sous quelque forme que ce soit, est faite sous leur seule et entière responsabilité, sans que celle de l'Anses ou du CSTB ne puisse être recherchée.

Maitre d'œuvre : CSTB

Contact responsable de l'étude : Virginie DESVIGNES (virginie.desvignes@cstb.fr)

Maitre d'ouvrage (Anses) : DER/USERA

Nature de la ressource : document

Droits d'accès : restreint

Version finale en date du 13/12/2024

Comité de suivi et relecteurs : M. REDAELLI, J. ACHILLE, M. KEIRSBULCK, F. THEVENET et C. LE DREFF

Toute citation d'extraits ou reproduction doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : **SIVANANTHAM S, RAMALHO O, GREGOIRE A, BONNET P, LAFAURIE E, SAMRI D et DESVIGNES V. 2024. Caractérisation de la qualité de l'air dans les logements français équipés d'un appareil de chauffage au bois, Rapport CSTB / SC-QEI-2024-098, Décembre 2024, 100 pages.**

© 2024 CSTB

Remerciements

Nous remercions Elsa REAL, Florian COUVIDAT, Anthony UNG, Laure MALHERBE, Blandine RAUX, Alicia GRESSENT et Augustin COLETTE de l'INERIS pour la fourniture des données quotidiennes de concentrations extérieures en $PM_{2,5}$, estimées à partir du modèle de chimie-transport CHIMERE, pour les années 2020 à 2022 (INERIS, 2024).

Nous remercions les membres du groupe de travail de l'Anses « Chauffage au bois domestique, pollution de l'air et santé » pour ses observations sur la sélection des polluants et variables : Serge COLLET, Frédéric THEVENET, Chrystelle TIAKOULOU, Frédéric CAZIER, Céline LE DREFF, Karine SARTELET, Anaïs DETOURNAY, Gontrand LEYSSENS, Sophie ACHARD, Fleur DELVA et Charles KIMMERLIN.



Wood-IAQ

Caractérisation de la qualité de l'air intérieur dans les logements français équipés d'un appareil de chauffage au bois à partir des données de la campagne nationale logements 2

Rapport d'étude

13/12/2024 – Sutharsini SIVANANTHAM, Olivier RAMALHO, Anthony GREGOIRE, Pierre BONNET, Emma LAFAURIE, Driss SAMRI et Virginie DESVIGNES

Résumé

L'étude Wood-IAQ a pour objectif d'étudier l'impact de la présence et de l'utilisation d'un appareil de chauffage au bois sur la concentration des polluants dans l'air des logements français. Elle a été réalisée sur un sous-échantillon de logements de la campagne nationale logements 2 (CNL2), constitué de maisons individuelles investiguées en période de chauffe (n = 259). Les occupants de ces logements n'ont ni fumé, ni allumé de bougies ou d'encens, ni utilisé d'appareil de chauffage d'appoint à combustion non raccordé, de type poêle à gaz ou pétrole, pendant la période d'enquête.

Les données de concentrations de polluants potentiellement émis par les appareils de chauffage au bois ont été exploitées dans le cadre de l'étude. Les polluants considérés sont les particules fines (fraction PM_{2,5}), les particules ultrafines, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (la somme de 15 congénères HAP et un sous-groupe avec la somme de 10 congénères HAP), le benzo[a]pyrène, le benzène, le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et le NO₂.

Les niveaux de concentrations des polluants dans l'air intérieur ont été décrits et comparés, en fonction de la présence d'un équipement de chauffage au bois d'une part, de son utilisation durant la période d'enquête et du type d'équipement d'autre part. Les concentrations en PM_{2,5}, HAP et benzène sont significativement corrélées à une ou plusieurs variables d'intérêt sur le chauffage au bois (test de Kruskal-Wallis, p-valeur ≤ 0,05). Les concentrations en PM_{2,5} et benzène sont plus élevées en présence d'une cheminée à foyer fermé ou d'un insert en fonctionnement pendant la période d'enquête, relativement aux autres types d'appareils de chauffage au bois (poêle à bois ou chaudière à granulés). La concentration en HAP est plus élevée dans les logements équipés d'un appareil de chauffage au bois, notamment lorsqu'il est actif. Aucune corrélation significative n'a été observée entre la présence ou l'utilisation d'un appareil de chauffage au bois et la concentration intérieure en particules ultrafines, formaldéhyde, acétaldéhyde et NO₂.

Les relations entre les concentrations de certains polluants et les variables relatives au chauffage au bois ont été évaluées en tenant compte des effets de variables de confusion potentielles. Il s'agit d'une approche « toutes choses étant égales par ailleurs », mise en œuvre à l'aide d'une méthode de régression linéaire généralisée, pour les concentrations des PM_{2,5} et HAP. Les résultats confirment l'influence du type d'équipement de chauffage au bois actif sur la concentration intérieure en PM_{2,5} (p-valeur < 0,05), en tenant compte de l'influence de la concentration extérieure en PM_{2,5} et de la densité d'occupation du logement. Ils confirment également l'impact de la présence d'un équipement de chauffage au bois actif sur la concentration intérieure en HAP (p-valeur < 0,05), en tenant compte de la période de construction du bâtiment, de la surface de la pièce de mesure et de l'écart moyen entre les températures intérieures et extérieures. Pour les HAP, les analyses réalisées à la fois sur la somme des 15 HAP recherchés dans la CNL2 et sur la somme des 10 HAP d'intérêt fournissent des résultats similaires.

Mots-clés : chauffage au bois, cheminée, insert, poêle à bois, chaudière à granulés, logement, enquête nationale, qualité de l'air intérieur, particules, PM_{2,5}, hydrocarbures aromatiques polycycliques, benzène, formaldéhyde, acétaldéhyde, NO₂.

Abstract

The Wood-IAQ study aims to analyse the influence of the presence and use of wood-burning appliances on the indoor concentration of pollutants in French dwellings. The study was carried out on a sub-sample of dwellings from the second national survey on air quality in French dwellings (CNL2). The sub-sample consists of detached houses investigated during the heating season (n = 259). The occupants of these dwellings did not smoke, burn candles or incense, nor use an unvented combustion heater, such as gas or oil stoves, during the survey period.

The concentrations of the following pollutants potentially emitted by wood-heating appliances were analysed in this study: fine particles (PM_{2.5} mass fraction), ultrafine particles, polycyclic aromatic hydrocarbons (sum of 15 PAHs and a sub-group with sum of 10 PAHs), benzo[a]pyrene, benzene, formaldehyde, acetaldehyde and NO₂.

Concentration levels of pollutants in indoor air were described and compared according to the presence of a wood-heating appliance, its use during the survey period and the type of equipment. Concentrations of PM_{2.5}, PAHs and benzene were significantly correlated with one or more variables about wood-heating (Kruskal-Wallis test, p-value ≤ 0.05). Concentrations of PM_{2.5} and benzene were higher in the presence of a closed fireplace or an insert, that was active during the survey period, compared to other types of wood-heating systems (wood stove or pellet boiler). PAH concentration was higher in dwellings equipped with a wood-heating system, particularly when the system was active. No significant correlation was observed between the presence or use of wood heating appliances and the indoor concentration of ultrafine particles, benzene, formaldehyde, acetaldehyde and NO₂.

The relationship between the concentration of some pollutants and variables about wood-heating was assessed, taking into account the effects of potential confounding variables. This was an “all else being equal” approach, implemented using a generalized linear regression method, for PM_{2.5} and PAH concentrations. The results confirm the influence of the type of the active wood-heating system on the indoor concentration of PM_{2.5} (p-value < 0.05), taking into account the influence of outdoor PM_{2.5} concentration and occupancy density in the dwelling. They also confirmed the impact of the presence of an active wood-heating system on the indoor concentration of PAH (p-value < 0.05), considering the building construction date, the surface area of the investigated room and the average difference between indoor and outdoor temperature. For PAHs, the analyses carried out both on the sum of the 15 PAHs measured in the CNL2 survey and on the sum of the 10 PAHs of interest gave similar results.

Keywords: wood-heating, chimney, insert, wood stove, pellet boiler, dwelling, national survey, indoor air quality, particulate matter, PM_{2.5}, polycyclic aromatic hydrocarbons, benzene, formaldehyde, acetaldehyde, NO₂.

Sommaire

Remerciements	3
Résumé	5
Abstract	6
Liste des tableaux	9
Liste des figures	10
Sigles et abréviations	12
1. Introduction	13
2. Matériel et méthode	14
2.1. Matériel	14
2.1.1. Données de la CNL2	14
2.1.1.1. Echantillon de logements	14
2.1.1.2. Données de mesure de la pollution et du confort	15
2.1.1.3. Données des questionnaires	16
2.1.2. Autres données publiques	21
2.1.2.1. Température extérieure	21
2.1.2.2. Concentration extérieure en PM _{2,5}	21
2.2. Méthode	22
2.2.1. Définition de la période de chauffe	22
2.2.2. Traitement des données censurées	24
2.2.3. Analyses statistiques descriptives	24
2.2.3.1. Distributions statistiques des paramètres de la QAI	24
2.2.3.2. Analyses bivariées des paramètres de la QAI en fonction des variables d'intérêt	25
2.2.3.3. Analyse des valeurs de concentrations extrêmes	25
2.2.4. Modèles explicatifs des concentrations de polluants	25
2.2.4.1. Variables à expliquer	25
2.2.4.2. Variables explicatives d'intérêt	26
2.2.4.3. Variables explicatives d'ajustement	27
2.2.4.4. Modélisation par régression linéaire généralisée et évaluation des modèles	28
3. Résultats	29
3.1. Particules fines (fraction PM _{2,5})	29
3.1.1. Distributions statistiques	29
3.1.2. Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt	29
3.1.3. Modèles explicatifs	32
3.1.3.1. Sélection des variables explicatives d'ajustement	32
3.1.3.2. Résultats de modélisation	32
3.2. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	34
3.2.1. Distribution statistique	34
3.2.2. Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt	35

3.2.3.	Modèles explicatifs de la somme des concentrations en HAP	40
3.2.3.1.	Sélection des variables explicatives d'ajustement	40
3.2.3.2.	Résultats de modélisation	41
3.2.3.2.1.	Modèles associés à la présence d'un équipement de chauffage au bois	41
3.2.3.2.2.	Modèles associés à la présence d'un équipement de chauffage au bois actif	43
3.2.3.2.3.	Modèle associé à la fréquence d'utilisation du chauffage au bois actif	45
3.2.3.3.	Evaluation et comparaison des modèles	46
3.3.	Benzo[a]pyrène.....	48
3.3.1.	Distribution statistique.....	48
3.3.2.	Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt.....	48
3.4.	Particules ultrafines (PUF)	52
3.4.1.	Distributions statistiques.....	52
3.4.2.	Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt.....	52
3.5.	Benzène	55
3.5.1.	Distribution statistique.....	55
3.5.2.	Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt.....	55
3.6.	Formaldéhyde.....	58
3.6.1.	Distribution statistique.....	58
3.6.2.	Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt.....	58
3.7.	Acétaldéhyde.....	61
3.7.1.	Distribution statistique.....	61
3.7.2.	Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt.....	61
3.8.	NO ₂	64
3.8.1.	Distributions statistiques.....	64
3.8.2.	Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt.....	64
3.9.	Analyse des valeurs de concentrations extrêmes	67
4.	Discussion.....	72
4.1.	Principaux résultats	72
4.2.	Limites et incertitudes	72
5.	Conclusion	74
6.	Références	76
7.	Annexes.....	79
7.1.	Stratégie de prélèvement et d'analyse des polluants	79
7.2.	Description de la boîte à moustaches	83
7.3.	Distributions bivariées entre les concentrations des polluants et les variables relatives au chauffage au bois détaillées.....	84

Liste des tableaux

Tableau 1. Variables issues des questionnaires CNL2	17
Tableau 2. Méthodes de calcul de la période de chauffe	23
Tableau 3. Nombre de logements communs aux trois définitions de la période de chauffe	23
Tableau 4. LDM et LQM moyennes des polluants et groupes de polluants	24
Tableau 5. Interprétation de la statistique de Fisher	28
Tableau 6. Distributions de la concentration en PM _{2,5} (µg/m ³) dans l'air des logements et des ratios des concentrations intérieures sur extérieures (n = 235).....	29
Tableau 7. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en PM _{2,5} et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	29
Tableau 8. Variables d'ajustement corrélées à la concentration en PM _{2,5} relativement au risque d'erreur de 20 %.....	32
Tableau 9. Modèle explicatif de la concentration en PM _{2,5} selon le type d'équipement de chauffage au bois actif (n = 58)	33
Tableau 10. Fréquences de détection et de quantification des 15 HAP dans l'air des logements (n = 226)	34
Tableau 11. Fréquences de détection et de quantification des 10 HAP dans l'air des logements (n = 235)	34
Tableau 12. Distribution de la somme des concentrations des 15 HAP (ng/m ³) dans l'air des logements (n = 226).....	35
Tableau 13. Distribution de la somme des concentrations des 10 HAP (ng/m ³) dans l'air des logements (n = 235).....	35
Tableau 14. Résultats des analyses bivariées entre la somme des concentrations des 15 HAP et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	35
Tableau 15. Résultats des analyses bivariées entre la somme des concentrations des 10 HAP et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	36
Tableau 16. Variables d'ajustement corrélées aux concentrations des HAP relativement au risque d'erreur de 20 %.....	41
Tableau 17. Modèle explicatif de la concentration totale en 15 HAP selon la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois (n = 221)	42
Tableau 18. Modèle explicatif de la concentration totale en 10 HAP selon la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois (n = 230)	42
Tableau 19. Modèle explicatif de la concentration totale en 15 HAP selon la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois actif (n = 148)	44
Tableau 20. Modèle explicatif de la concentration totale en 10 HAP selon la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois actif (n = 157)	44
Tableau 21. Modèle explicatif de la somme des concentrations des 15 HAP en fonction de la fréquence d'utilisation de l'équipement de chauffage au bois actif (n = 57)	45
Tableau 22. Comparatif des modèles explicatifs des concentrations totales en HAP	47
Tableau 23. Distribution de la concentration en benzo[a]pyrène (ng/m ³) dans l'air des logements (n = 237).....	48
Tableau 24. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en benzo[a]pyrène et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois.....	48
Tableau 25. Taux de quantification du benzo[a]pyrène en fonction des variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	49
Tableau 26. Distributions des moyennes hebdomadaires de la concentration en nombre, de la surface spécifique et du LDSA des PUF dans l'air des logements (n = 31)	52
Tableau 27. Distributions des moyennes hebdomadaires sur la plage horaire de 16h à 5h, de la concentration en nombre, de la surface spécifique et du LDSA des PUF dans l'air des logements (n = 31).....	52

Tableau 28. Résultats des analyses bivariées entre les paramètres de mesure des PUF sur la plage horaire de 16h à 5h et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	53
Tableau 29. Distribution de la concentration en benzène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans l'air des logements (n = 257) .	55
Tableau 30. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en benzène et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	55
Tableau 31. Distribution de la concentration en formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans l'air des logements (n = 259)	58
Tableau 32. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en formaldéhyde et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois.....	58
Tableau 33. Distribution de la concentration en acétaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans l'air des logements (n = 259)	61
Tableau 34. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en acétaldéhyde et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois.....	61
Tableau 35. Distribution de la concentration en NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans l'air des logements et du ratio des concentrations intérieures sur extérieures (n = 259).....	64
Tableau 36. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en NO_2 et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	64
Tableau 37. Distribution statistique des valeurs de concentrations extrêmes des polluants en fonction de la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois.....	67
Tableau 38. Distribution statistique des valeurs de concentrations extrêmes des polluants en fonction du type d'équipement de chauffage actif	69
Tableau 39. Stratégies de prélèvement et d'analyse des polluants.....	79
Tableau 40. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en $\text{PM}_{2,5}$ et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois.....	84
Tableau 41. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la somme des concentrations des 15 HAP et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	86
Tableau 42. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la somme des concentrations des 10 HAP et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	88
Tableau 43. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en benzo[a]pyrène et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	90
Tableau 44. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en benzène et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	92
Tableau 45. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en formaldéhyde et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	94
Tableau 46. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en acétaldéhyde et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois	96
Tableau 47. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en NO_2 et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois.....	98

Liste des figures

Figure 1. Périmètre de l'étude.....	15
Figure 2. Carte des concentrations extérieures modélisées en $\text{PM}_{2,5}$ en 2022 (exemple sur une semaine d'enquête) (INERIS).....	22
Figure 3. Variables relatives au chauffage au bois et échantillons de logements associés.....	26
Figure 4. Boîtes à moustaches de la concentration en $\text{PM}_{2,5}$ en fonction des variables relatives au chauffage au bois	31
Figure 5. Boîtes à moustaches de la somme des concentrations des 15 HAP en fonction des variables relatives au chauffage au bois	38
Figure 6. Boîtes à moustaches de la somme des concentrations des 10 HAP en fonction des variables relatives au chauffage au bois	39

Figure 7. Boîtes à moustaches de la concentration en benzo[a]pyrène en fonction des variables relatives au chauffage au bois	51
Figure 8. Boîtes à moustaches des paramètres relatifs aux PUF en fonction des variables sur le chauffage au bois	54
Figure 9. Boîtes à moustaches de la concentration en benzène en fonction des variables relatives au chauffage au bois	57
Figure 10. Boîtes à moustaches de la concentration en formaldéhyde en fonction des variables relatives au chauffage au bois	60
Figure 11. Boîtes à moustaches de la concentration en acétaldéhyde en fonction des variables relatives au chauffage au bois	63
Figure 12. Boîtes à moustaches de la concentration en NO ₂ en fonction des variables relatives au chauffage au bois	66
Figure 13. Description de la boîte à moustaches.....	83

Sigles et abréviations

AIC	Critère d'information d'Akaike (indicateur pénalisé de la Log-vraisemblance)
CAB	Chauffage au bois
CG	Chaudière à granulés
CNL2	Campagne nationale logements 2
CO₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés organiques volatils
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
LDM	Limite de détection de la méthode globale, exprimée en concentration (masse collectée sur support rapportée au volume prélevé)
LDSA	Surface de dépôt pulmonaire (lung-deposited surface area)
LQM	Limite de quantification de la méthode globale, exprimée en concentration (masse collectée sur support rapportée au volume prélevé)
NO₂	Dioxyde d'azote
QAI	Qualité de l'air intérieur
QEI	Qualité des environnements intérieurs
PB	Poêle à bois
PM_{2,5}	Particules fines de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm
PUF	Particules ultrafines de diamètre aérodynamique compris entre 20 et 150 nm
VMC	Ventilation mécanique contrôlée

1. Introduction

En France, le chauffage au bois est utilisé par un nombre croissant de ménages (+15 % entre 1999 et 2017 dans les résidences principales) (ADEME et al., 2018). Cette tendance s'explique par son coût avantageux pour les utilisateurs, ses vertus écologiques en tant qu'énergie renouvelable, ainsi que ses attraits esthétiques et de confort. De plus, le bois est une source d'énergie avec d'importantes réserves sur le territoire français.

Pour autant, le chauffage au bois peut être une source d'émission de produits de combustion, notamment de particules fines mais aussi d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), de carbone suie, de monoxyde de carbone, de benzène et d'autres composés organiques volatils (COV). Des études en conditions expérimentales contrôlées ont montré que les équipements de chauffage et les pratiques des utilisateurs ont un impact sensible sur le niveau d'émission des équipements en intérieur (Le Dreff et al., 2019) et en sortie de cheminée (ADEME, 2014). Paradoxalement, l'impact du chauffage au bois sur la qualité de l'air intérieur (QAI) en conditions réelles, sur des larges échantillons de logements en France, et plus généralement dans les pays industrialisés, est très peu documenté.

La qualité de l'air dans 571 résidences principales, situées en France métropolitaine continentale, a été mesurée dans le cadre de la récente campagne nationale logements 2 (CNL2) (Ramalho et al., 2024). Les enquêtes ont été réalisées sur la période de novembre 2020 à février 2023. Plusieurs polluants d'intérêt, dont certains notamment issus de la combustion du bois, ont été mesurés au cours de cette campagne : les particules fines et ultrafines, plusieurs congénères HAP, le benzène, des COV (dont certains aldéhydes), le dioxyde d'azote (NO₂) et le dioxyde de carbone (CO₂).

Les informations sur de nombreuses variables potentiellement associées aux émissions de polluants ont également été recueillies à l'aide de questionnaires d'enquête. Les données collectées incluent diverses variables sur les activités des occupants (dont l'activité de chauffage durant la semaine d'enquête), les caractéristiques des bâtiments et des équipements de chauffage. Parmi les 571 logements enquêtés, 257 sont équipés d'au moins un appareil de chauffage au bois, dont 246 maisons individuelles et 11 appartements.

Dans ce contexte, les données de la CNL2 ont été exploitées pour apporter des éléments de réponse à la saisine de l'Anses n°2022-SA-0043 visant entre autres à caractériser l'impact des appareils de chauffage au bois sur les concentrations de polluants dans l'air intérieur. Les travaux ont été présentés depuis leur début jusqu'à leur fin au comité de suivi et au groupe de travail de l'Anses « Chauffage au bois domestique, pollution de l'air et santé » et ont notamment permis de recueillir leurs observations tant sur les aspects méthodologiques que sur l'expertise métier pour l'identification et la sélection des polluants et variables et pour l'interprétation des résultats.

Les travaux proposés dans le cadre de cette saisine se structurent en plusieurs parties. Il s'agit dans un premier temps de décrire et comparer les niveaux de concentrations en polluants dans l'air intérieur des maisons individuelles, en lien avec la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois, et en lien avec son utilisation ou non durant la semaine d'enquête, sans prise en compte des variables de confusion. La deuxième partie du travail présentera la contribution de la présence et de l'utilisation des équipements de chauffage au bois sur la variabilité des concentrations en polluants dans l'air « toutes choses étant égales par ailleurs », c'est-à-dire ajustée sur les variables de confusion potentielles comme les activités, les usages des occupants et les caractéristiques des bâtiments.

2. Matériel et méthode

2.1. Matériel

2.1.1. Données de la CNL2

2.1.1.1. Echantillon de logements

La CNL2 est une post-enquête de l'étude européenne de santé EHIS 2019 (Leduc et al., 2021). Elle avait pour objectif, entre autres, d'établir une distribution statistique de différents indicateurs de la QAI à l'échelle du parc national de résidences principales en France métropolitaine continentale. L'échantillon de logements de la CNL2 est constitué de 571 logements. Il a été obtenu à partir d'un échantillonnage à deux degrés après définition et tirage des zones d'enquêtes. Les logements de la CNL2 ont été sélectionnés parmi 750 logements consentants à participer à la campagne sur les 3 667 foyers contactés. Les enquêtes ont été réalisées entre novembre 2020 et février 2023.

La présente étude a été réalisée sur un sous-échantillon de logements de la CNL2. **Ce sous-échantillon exclut :**

- **Les appartements**, car les logements de la CNL2 équipés d'une installation de chauffage au bois sont majoritairement des maisons individuelles (n = 246). Seuls 11 appartements disposent d'un appareil de chauffage au bois. Ils ne sont pas représentatifs de ce type de logements et sont différents des maisons individuelles notamment par leurs composants constructifs, taille, équipements et entretien ;
- **Les logements où les occupants ont fumé, brûlé des bougies, de l'encens et/ou utilisé un appareil de chauffage d'appoint à combustion non raccordé, de type poêle à gaz ou à pétrole** pendant la semaine d'enquête. Ces pratiques sont à l'origine d'émission de substances communes aux substances émises par les installations de chauffage au bois. L'exclusion des logements concernés permettra de mieux isoler et évaluer les effets du chauffage au bois sur la QAI ;
- **Les logements enquêtés hors période de chauffe**, car l'équipement de chauffage n'est en général pas utilisé sur cette période et les conditions atmosphériques et aérauliques dans les logements sont différentes entre les périodes de chauffe et hors-chauffe. La période de chauffe a été définie selon la méthode décrite dans la section 2.2.1 ;
- **Les logements avec une installation de chauffage active entre juin et août**, car les effectifs sont faibles (n = 2) et les conditions atmosphériques et aérauliques en saison estivale sont différentes des autres saisons.

Ainsi, **259 logements, dont 150 équipés d'une installation de chauffage au bois**, ont été retenus pour l'étude (cf. Figure 1).

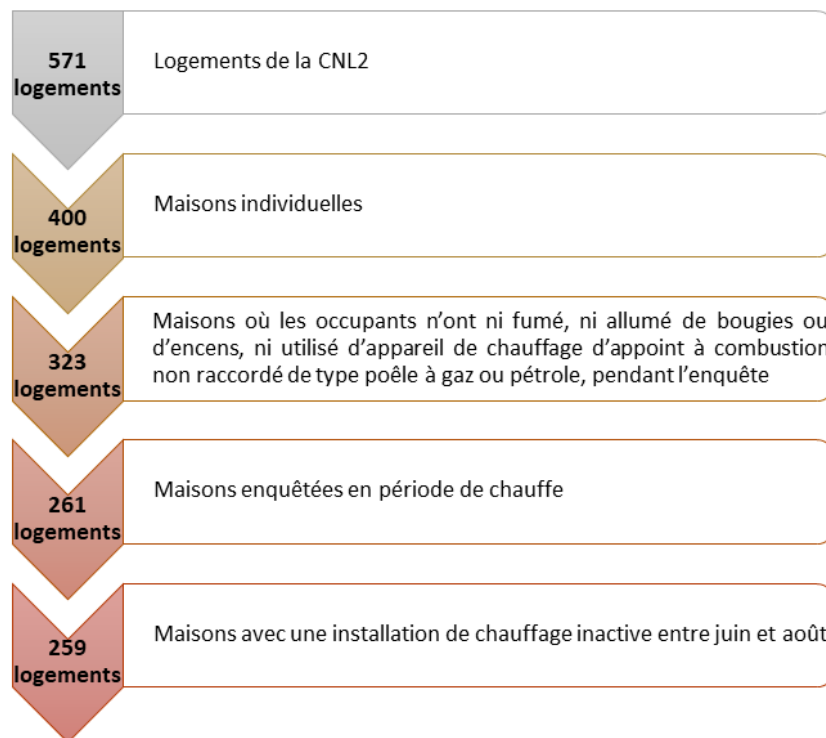


Figure 1. Périmètre de l'étude

2.1.1.2. Données de mesure de la pollution et du confort

Parmi les polluants recherchés dans l'air des logements de la CNL2, les 9 polluants/groupes de polluants suivants ont été retenus pour l'étude, car le chauffage au bois contribue à leur émission (Allemand et al., 2008) :

- **les particules fines (fraction massique PM_{2,5}) ;**
- **les particules ultrafines [20 – 150 nm] (PUF) :** les paramètres retenus pour l'étude sont les concentrations en nombre (pt/cm³), la surface spécifique (µm²/cm³) et la surface de dépôt pulmonaire (LDSA) (µm²/cm³) des PUF ;
- **les 15 HAP** recherchés dans la CNL2 : acénaphène, acénaphylène, anthracène, benzo[a]anthracène, benzo[a]pyrène, benzo[b]fluoranthène, benzo[g,h,i]perylène, benzo[k]fluoranthène, chrysène, dibenzo[a,h]anthracène, fluoranthène, fluorène, indéno[1,2,3-cd]pyrène, phénanthrène et pyrène. La somme des concentrations des 15 HAP a été utilisée pour l'étude ;
- **un groupe de 10 HAP d'intérêt :** acénaphène, acénaphylène, anthracène, benzo[a]pyrène, benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, chrysène, fluoranthène, phénanthrène et pyrène. Ce groupe de HAP a été sélectionné à partir d'études d'émissions (Allemand et al., 2008; Collet, 2009) et d'une étude en air extérieur proche (Khalili et al., 1995). La somme des concentrations des 10 HAP d'intérêt a été utilisée pour l'étude ;
- **le benzo[a]pyrène ;**
- **le benzène ;**
- **le formaldéhyde ;**
- **l'acétaldéhyde ;**

- **et le NO₂.**

Les PM_{2,5}, PUF et HAP ont été mesurés dans le séjour principal du logement et les autres polluants ont été mesurés dans la chambre de la personne de référence. Les stratégies de prélèvement et d'analyse des polluants sont décrites en annexe 7.1. Les prélèvements réalisés dans certains logements ont été invalidés pour les PM_{2,5}, les groupes de 15 et 10 HAP et le benzène. Pour les HAP, si la mesure est invalide pour un congénère alors la somme des HAP est invalidée. La taille des échantillons de logements pour les PM_{2,5}, les groupes de 15 et 10 HAP et le benzène est respectivement de 235, 226, 235 et 257 logements, sur un total de 259 logements. Quant aux PUF, elles n'ont été mesurées que dans 74 logements de la CNL2, dont 31 sur le périmètre de l'étude.

Des paramètres de confort ont également été mesurés dans le cadre de la CNL2. Les températures intérieures et les concentrations intérieures en CO₂ sont utilisées dans la présente étude en tant que variables d'ajustement :

- la **température intérieure** a été mesurée à la fois dans la chambre de la personne de référence et dans le séjour principal du logement. Pour le périmètre de l'étude, seule la température mesurée dans le séjour principal est prise en compte. Elle a été mesurée par un capteur QAI Cozy Air en continu sur une durée de 7 jours, à un pas de temps de 10 min. Les séries de mesures ont été moyennées sur la semaine d'enquête afin d'obtenir une température moyenne hebdomadaire, exploitée dans le cadre de l'étude ;
- la **concentration en CO₂** a été mesurée à la fois dans la chambre de la personne de référence avec un capteur Class'Air (Pyrescom) et dans le séjour principal du logement avec un capteur QAI Cozy Air. Dans les deux cas, elle a été mesurée en continu sur une durée de 7 jours, à un pas de temps de 10 min. Les mesures réalisées ont permis de calculer le **taux de renouvellement de l'air** moyen dans les logements, utilisé dans l'étude en tant que variable de confusion potentielle. Le taux de renouvellement de l'air moyen est calculé en considérant la concentration moyenne en CO₂ dans le logement en journée et dans la chambre la nuit, en tenant compte du nombre moyen d'occupants et de leur production métabolique déduite de leur âge, sexe et activité (sédentaire ou sommeil).

2.1.1.3. Données des questionnaires

Des données relatives aux caractéristiques des logements, des ménages, des pièces, des équipements, des occupants, ainsi qu'à la fréquence des activités domestiques, à l'occupation du logement sur la semaine d'enquête et à la perception des occupants sur leur confort ont été recueillies via les questionnaires de la CNL2. De nouvelles variables ont également été construites à partir des variables d'origine.

Les variables exploitées dans le cadre de l'étude sont présentées dans le Tableau 1. Elles se classent en deux catégories :

- les **variables d'intérêt relatives au chauffage au bois** : elles ont été construites à partir de variables des questionnaires de la CNL2, décrivant les types d'appareils de chauffage et leur utilisation ;
- les **variables d'ajustement (ou de confusion) potentielles**, décrivant les autres facteurs pouvant influencer les niveaux de concentrations des polluants.

Tableau 1. Variables issues des questionnaires CNL2

Catégorie de variables	Thème	Variable	Modalités
Variables d'intérêt	Chauffage	Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	<ul style="list-style-type: none"> • Au moins un équipement de chauffage au bois ; • Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois.
		Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif pendant la semaine d'enquête <i>versus</i> au moins un équipement actif pendant la semaine d'enquête et utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	<ul style="list-style-type: none"> • Au moins un équipement de chauffage au bois actif ; • Au moins un équipement actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois) ; • Au moins un équipement actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif).
		Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	<ul style="list-style-type: none"> • Cheminée à foyer fermé ou insert ; • Cheminée à foyer ouvert ; • Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ; • Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique ; • Plusieurs types d'appareils de chauffage au bois actifs ; • Autre type d'appareil de chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois) ; • Autre type d'appareil de chauffage actif (chauffage au bois inactif).
		Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	<ul style="list-style-type: none"> • Cheminée à foyer fermé ou insert ; • Cheminée à foyer ouvert ; • Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ; • Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique ; • Plusieurs types d'appareils de chauffage au bois actifs.
		Variable quantitative discrète correspondant au nombre de jours d'utilisation de l'appareil de chauffage au bois actif, au cours de la semaine d'enquête	[1 ; 8]

Catégorie de variables	Thème	Variable	Modalités
		Variable qualitative ordinale correspondant au nombre de jours d'utilisation de l'appareil de chauffage au bois actif, au cours de la semaine d'enquête	<ul style="list-style-type: none"> • Entre 1 et 2 jours ; • Entre 3 et 5 jours ; • Entre 6 et 8 jours.
		Variable qualitative ordinale correspondant au nombre de jours d'utilisation de l'appareil de chauffage au bois actif, au cours de la semaine d'enquête	<ul style="list-style-type: none"> • Entre 1 et 4 jours ; • Entre 5 et 8 jours.
Variables d'ajustement	Logement	Nombre d'étages du bâtiment	[0 ; 50]
		Nombre de pièces d'habitation du logement	[1 ; 20]
		Surface du logement (m ²)	[7 ; 1 500]
		Surface de la pièce équipée de l'instrument de mesure de la pollution de l'air (m ²)	[2 ; 200]
		Période de construction du bâtiment	<ul style="list-style-type: none"> • Avant 1948 ; • Entre 1949 et 1967 ; • Entre 1968 et 1981 ; • Entre 1982 et 2000 ; • Après 2001.
		Ancienneté des travaux de réhabilitation	<ul style="list-style-type: none"> • Jamais ; • ≤ 5 ans ; • 6 à 10 ans ; • > 10 ans.
		Réhabilitation : changement de plus de 50 % des fenêtres	Oui ; non
		Réhabilitation : isolation thermique ou acoustique des murs extérieurs	Oui ; non
		Réhabilitation : isolation thermique ou acoustique des toitures ou planchers de combles	Oui ; non
		Travaux de rénovation au cours des 12 derniers mois	Oui ; non
		Rénovation : pose de papier peint ou textiles muraux	Oui ; non
		Rénovation : peinture, vitrification de parquet ou traitement du bois	Oui ; non
		Rénovation : pose de moquette	Oui ; non
		Rénovation : pose de sols plastiques	Oui ; non
Rénovation : pose de faïence ou carrelage	Oui ; non		

Catégorie de variables	Thème	Variable	Modalités
		Rénovation : isolation des murs ou combles	Oui ; non
		Rénovation : menuiserie extérieure ou vitrage	Oui ; non
		Rénovation : aménagement intérieur (cuisine, placard)	Oui ; non
		Rénovation : installation ou modification de cheminée	Oui ; non
		Rénovation : chauffage ou eau chaude sanitaire	Oui ; non
		Rénovation : installation ou changement du système de ventilation	Oui ; non
		Configuration de la cuisine par rapport au salon	<ul style="list-style-type: none"> Fermée ou absence d'installation de cuisine ; Ouverte.
	Présence d'un garage communiquant et présence de voiture(s) dans le garage	<ul style="list-style-type: none"> Garage communiquant avec voiture(s) ; Garage non communiquant avec voiture(s) ; Absence de garage ou de voiture(s) (ou stationnement rare). 	
	Equipements	Type de système de ventilation	<ul style="list-style-type: none"> Ventilation mécanique contrôlée (VMC) ; Ventilation naturelle ; Aucun dispositif spécifique de ventilation.
		Présence d'un épurateur d'air	Oui ; non
		Présence d'un appareil à combustion indépendant et non raccordé à un conduit de fumée	Oui ; non
		Présence d'une hotte en cuisine	Oui ; non
	Activités domestiques	Vapotage	Oui (au moins un jour) ; non (jamais)
		Cuisson à la poêle, par friture ou au four traditionnel	Oui (au moins un jour) ; non (jamais)
		Cuisson à la poêle, par friture ou au four traditionnel	<ul style="list-style-type: none"> Pas de cuisson ; 1 fois par semaine ; Plusieurs fois par semaine.
		Cuisson à la poêle, par friture ou au four traditionnel en fonction de la configuration de la cuisine	<ul style="list-style-type: none"> Pas de cuisson ou cuisson dans une cuisine fermée ; Cuisson dans une cuisine ouverte.
		Utilisation de peinture, vernis et/ou colle	Oui (au moins un jour) ; non (jamais)
		Perçage, ponçage et/ou sciage	Oui (au moins un jour) ; non (jamais)
	Occupation	Nombre moyen d'occupants dans le logement sur la semaine d'enquête	[0,03 ; 4,44]

Catégorie de variables	Thème	Variable	Modalités
		Densité d'occupation (= nombre moyen d'occupants/surface du logement) (nombre d'occupants/m ²)	[0,0004 ; 0,0647]
	Localisation géographique	Logement sous influence des poussières de la circulation, de chantiers, d'établissements environnants, d'activités agricoles et/ou du voisinage	Oui ; non
		Logement sous influence des odeurs de la circulation	Oui ; non
		Logement situé à proximité de conduits de fumée	Oui ; non
		Logement sous influence des poussières de la circulation, de chantiers, d'établissements environnants, d'activités agricoles, du voisinage et/ou sous influence des odeurs de la circulation et/ou situé à proximité de conduits de fumée	Oui ; non
		Logement situé à moins de 200 m d'une circulation routière, d'un chantier de construction ou de démolition, d'une station-service, d'activités industrielles et/ou d'un centre de traitement de déchets	Oui ; non

2.1.2. Autres données publiques

2.1.2.1. Température extérieure

Les données quotidiennes de températures extérieures minimales, maximales et moyennes ont été téléchargées à partir du portail web de données publiques de Météo France (Météo France, 2024). Les températures extérieures journalières de la station la plus proche de chaque logement, sur la semaine d'enquête du logement, ont été intégrées à la base de données.

Ces données ont permis de calculer :

- **Le nombre de degrés-jours** sur la semaine d'enquête. Il s'agit d'une mesure du besoin de chauffage sur une période donnée. Il est calculé par rapport à un seuil de référence de 17°C (SDES, 2024). Cette variable est utilisée pour la détermination de la période de chauffe (cf. section 2.2.1) et en tant que variable d'ajustement potentielle des modèles explicatifs ;
- **L'écart moyen entre les températures intérieures et extérieures** sur la semaine d'enquête (moyenne hebdomadaire de la température intérieure – moyenne hebdomadaire de la température extérieure). Cette variable est exploitée en tant que variable d'ajustement potentielle des modèles explicatifs, car elle caractérise l'aspect saisonnier.

2.1.2.2. Concentration extérieure en PM_{2,5}

Les données journalières de concentrations extérieures en PM_{2,5} ont été mises à disposition par l'INERIS (Real et al., 2022) (Figure 2). Elles ont été modélisées selon le modèle de chimie-transport CHIMERE, pour des mailles de résolution spatiale de 2 km x 2 km, sur la période de 2020 à 2022.

Huit logements du périmètre de l'étude ont été enquêtés en 2023. Pour ces logements, les données de concentrations mises en ligne sur la plateforme Copernicus ont été récupérées (Copernicus, 2024). Ces données ont également été modélisées selon le modèle CHIMERE, pour des mailles de résolution spatiale de 10 km x 10 km, et sont en cours de validation.

Les **concentrations extérieures journalières en PM_{2,5}**, modélisées pour les mailles où sont situés les logements, ont été **moyennées sur la semaine d'enquête** et exploitées en tant que variable d'ajustement potentielle des modèles explicatifs.

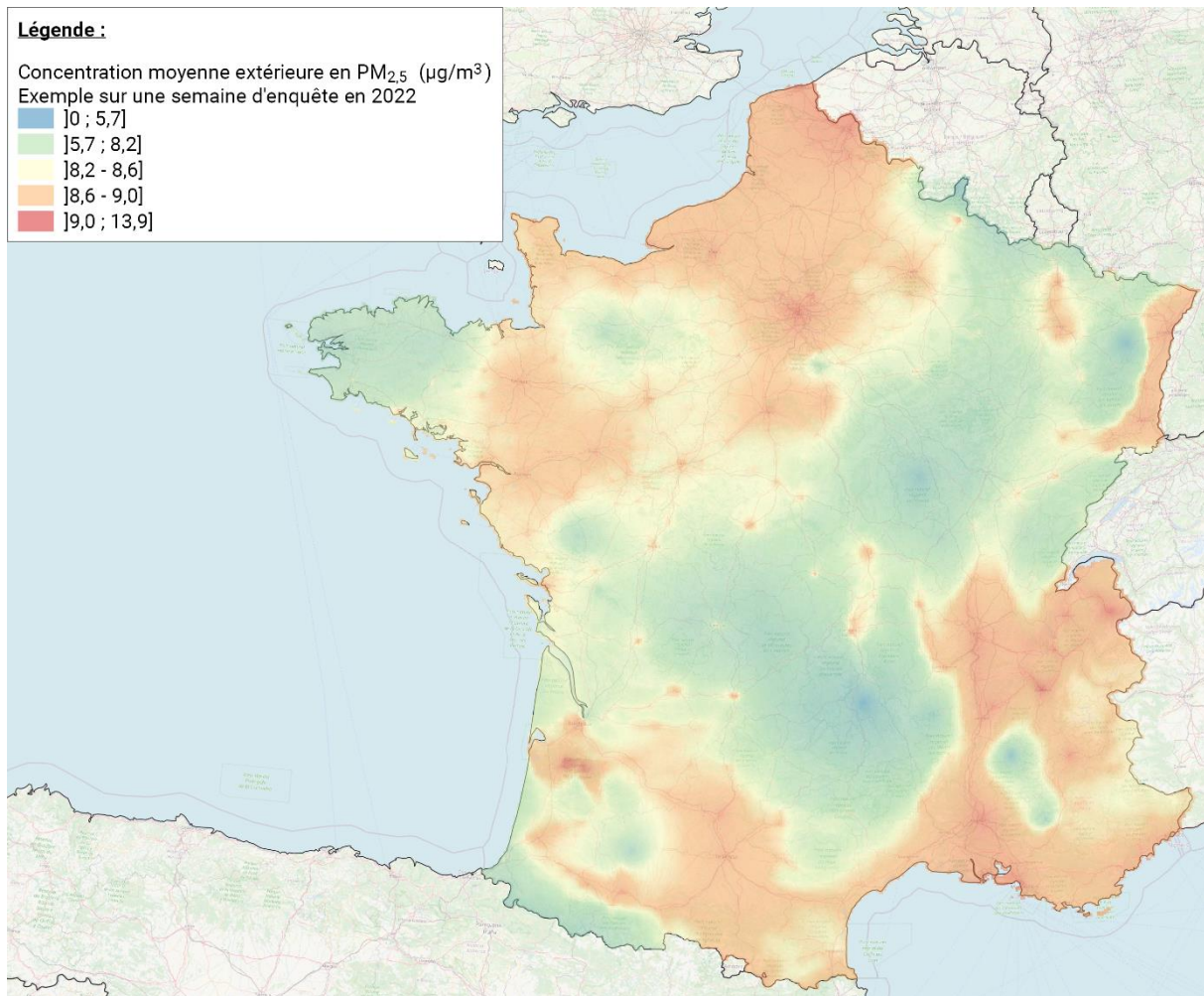


Figure 2. Carte des concentrations extérieures modélisées en PM_{2,5} en 2022 (exemple sur une semaine d'enquête) (INERIS)

2.2. Méthode

2.2.1. Définition de la période de chauffe

L'étude porte uniquement sur les logements investigués en période de chauffe. Plusieurs définitions de la période de chauffe ont été considérées et comparées, en vue de retenir la définition la plus pertinente :

- La période de chauffe conventionnelle déterminée en fonction des **zones climatiques d'hiver et de la période calendaire** (CSTB, 1985) ;
- La période de chauffe selon le **fonctionnement du chauffage** déclaré par les occupants dans les questionnaires de la CNL2 ;
- La période de chauffe déterminée en fonction du **nombre de degrés-jours**.

Les méthodes de calcul de la période de chauffe pour ces trois définitions sont décrites dans le Tableau 2. La définition de la **période de chauffe en fonction du nombre de degrés-jours a été retenue** pour l'étude, car elle prend en compte les conditions météorologiques sur la globalité de la semaine d'enquête et permet de conserver un plus grand nombre de logements dans l'étude (n = 259). De plus, cette définition est cohérente avec les deux autres : plus de 73 % des logements classés en période de

chauffe selon la méthode des degrés-jours sont également classés en période de chauffe selon les deux autres méthodes (Tableau 3).

Tableau 2. Méthodes de calcul de la période de chauffe

Critères considérés	Méthode de calcul de la période de chauffe	Nombre de logements enquêtés en période de chauffe
Zones climatiques d'hiver et période calendaire	Si le logement a été enquêté dans les zones climatiques suivantes et durant les périodes mentionnées, alors l'enquête a eu lieu en période de chauffe (CSTB, 1985) : - en zone H1 entre le 26 septembre et le 24 mai ; - en zone H2 entre le 2 octobre et le 24 mai ; - en zone H3 entre le 11 novembre et le 20 avril. Sinon, l'enquête a eu lieu hors période de chauffe.	224
Fonctionnement du chauffage déclaré dans les questionnaires de la CNL2	Si les occupants ont déclaré avoir utilisé le système de chauffage principal ou un appareil de chauffage d'appoint à combustion (de type cheminée, poêle à bois ou insert) au cours de la semaine d'enquête, alors l'enquête a eu lieu en période de chauffe. Sinon, l'enquête a eu lieu hors période de chauffe.	190
Nombre de degrés-jours	Pour chaque logement : - A partir des données de températures extérieures, la moyenne entre la température minimale et maximale a été calculée pour chaque jour de la semaine d'enquête. Si cette valeur moyenne est supérieure ou égale à 17 °C, le nombre de degrés-jours sur la journée est nul. Sinon, il est égal à la différence entre 17 °C et la température moyenne (SDES, 2024). La période de chauffe a été déterminée en fonction de la règle suivante : - Si le nombre de degrés-jours est supérieur à 0 au moins 2 jours de la semaine, alors l'enquête a eu lieu en période de chauffe ; - Sinon, l'enquête a eu lieu hors période de chauffe. Le choix du seuil de 2 jours résulte d'un compromis permettant de conserver dans l'échantillon de l'étude un maximum de logements investigués en période de chauffe, tout en vérifiant que les températures extérieures étaient faibles (< 17 °C) sur plusieurs jours pendant l'enquête.	259

Tableau 3. Nombre de logements communs aux trois définitions de la période de chauffe

	Période de chauffe en fonction du nombre de degrés-jours (n = 259)
Période de chauffe en fonction des zones climatiques et périodes calendaires (n = 224)	216 (83 % de l'échantillon retenu)
Période de chauffe selon le fonctionnement du chauffage (n = 190)	190 (73 % de l'échantillon retenu)

2.2.2. Traitement des données censurées

Les concentrations inférieures à la limite de détection de la méthode de mesure (LDM) ont été imputées par la valeur de LDM/2. Les valeurs brutes fournies par les laboratoires ont été conservées pour les concentrations comprises entre la LDM et la limite de quantification de la méthode de mesure (LQM). Ces valeurs ont été utilisées pour le calcul des moyennes des concentrations.

Pour la somme des HAP, le paramètre est considéré détecté ou quantifié dès qu'une des substances prise en compte dans le calcul est détecté ou quantifié. La LDM et la LQM de la somme des HAP correspondent respectivement aux LDM et LQM minimales observées au sein du groupe de HAP considéré.

Les LDM et LQM moyennes des polluants et groupes de polluants, exprimées en concentration, sont renseignées dans le Tableau 4. Les LDM et LQM tiennent compte des traces résiduelles éventuelles observées dans les blancs de laboratoire et de terrain.

Tableau 4. LDM et LQM moyennes des polluants et groupes de polluants

Polluant	Unité de mesure	LDM	LQM
PM _{2,5}	µg/m ³	3,0	3,0
PUF*	pt/cm ³	-	-
Somme des 15 HAP recherchés dans la CNL2	ng/m ³	0,025	0,061
Somme de 10 HAP d'intérêt	ng/m ³	0,025	0,061
Benzo[a]pyrène	ng/m ³	0,026	0,061
Benzène	µg/m ³	0,38	0,38
Formaldéhyde	µg/m ³	0,20	0,20
Acétaldéhyde	µg/m ³	0,23	0,23
NO ₂	µg/m ³	4,4	4,4

*La résolution de l'appareil est de 1 pt/cm³ avec une incertitude de l'ordre de ± 30 % ou ± 1000 pt/cm³.

2.2.3. Analyses statistiques descriptives

2.2.3.1. Distributions statistiques des paramètres de la QAI

Les analyses portent sur les concentrations intérieures des 9 polluants et groupes de polluants décrits dans la section 2.1.1.2, ainsi que les ratios de concentrations intérieures sur extérieures pour les PM_{2,5} et le NO₂. Pour le calcul de ces ratios, les concentrations en PM_{2,5} issues des modèles CHIMERE (cf. section 2.1.2.2) et les concentrations extérieures en NO₂ mesurées dans la CNL2 ont été exploitées.

Pour les PUF, les trois paramètres décrits dans la section 2.1.1.2 ont été analysés. Pour chacun d'eux, la moyenne hebdomadaire de toutes les observations et la moyenne hebdomadaire sur la plage horaire de soirée comprise entre 16h et 5h ont été calculées. Cette plage horaire a été choisie conformément aux suggestions du comité de suivi, car les appareils de chauffage au bois domestique sont généralement allumés en soirée et ce créneau tient compte de la période d'extinction du feu, comme en témoignent les horaires du principal pic journalier de concentration atmosphérique en polluants traceurs (carbone organique, carbone brun, carbone suie biomasse) (Atmo Nouvelle-Aquitaine, 2018; INERIS, 2022; Lig'Air, 2020; Zhang et al., 2020).

Les statistiques descriptives suivantes ont été calculées pour l'ensemble des paramètres : nombre de logements, fréquences de détection et de quantification, moyenne géométrique et son intervalle de confiance à 95 %, minimum, maximum, 10^{ème}, 25^{ème}, 50^{ème}, 75^{ème} et 90^{ème} centiles de distribution.

2.2.3.2. Analyses bivariées des paramètres de la QAI en fonction des variables d'intérêt

Les concentrations des polluants en fonction des variables d'intérêt relatives au chauffage au bois (cf. Tableau 1) ont été analysées.

Les statistiques suivantes ont été calculées : nombre, pourcentage de logements et médiane des concentrations des polluants en fonction des variables sur le chauffage au bois. Des tests de corrélation statistique entre les concentrations des polluants et les variables relatives au chauffage au bois ont été réalisés (Kruskal & Wallis, 1952). La significativité de la corrélation a été évaluée relativement au risque d'erreur de 5 %. Des boîtes à moustaches ont également été construites pour représenter les distributions des concentrations des polluants en fonction des variables liées au chauffage au bois. Les paramètres figurant sur les boîtes à moustaches sont décrits en annexe 7.21.1. Par souci de parcimonie, la variable décrivant le type d'équipement de chauffage actif n'a pas été exploitée dans l'analyse graphique car elle comprend les cinq modalités de la variable décrivant le type d'équipement de chauffage au bois actif et deux modalités supplémentaires (cf. Tableau 1).

2.2.3.3. Analyse des valeurs de concentrations extrêmes

Pour chaque polluant ou groupe de polluants, les 5 % des logements de l'échantillon présentant les concentrations les plus élevées ont été identifiés. Les distributions statistiques de ces logements ont ensuite été établies en fonction de la présence ou non d'un système de chauffage au bois, ainsi que du type d'équipement de chauffage en fonctionnement.

L'analyse n'a pas été effectuée pour les PUF en raison d'un effectif insuffisant (les 5 % de l'échantillon correspondent à environ 2 logements et les 10 % à 3 logements) et de l'absence de corrélation entre les concentrations des PUF et les variables liées au chauffage au bois (test de Kruskal-Wallis, p-valeur > 0,05).

2.2.4. Modèles explicatifs des concentrations de polluants

2.2.4.1. Variables à expliquer

Pour mieux déterminer l'influence des installations de chauffage au bois sur les concentrations intérieures de polluants, des modèles statistiques explicatifs ont été mis en œuvre sur trois paramètres emblématiques des émissions de chauffage au bois : **les particules fines (fraction massique PM_{2,5})**, **la somme des 15 HAP recherchés dans la CNL2** et **la somme des 10 HAP identifiés comme d'intérêt**. La concentration de ces polluants représente la variable à expliquer de ces modèles. Les trois paramètres ont été modélisés séparément.

Le choix s'est porté sur ces polluants car les équipements de chauffage au bois contribuent à leur émission (Allemand et al., 2008). De plus, ces paramètres ont été mesurés dans le séjour principal, qui est la pièce où les appareils de chauffage au bois sont habituellement installés. Les autres polluants étudiés ont été mesurés dans la chambre de la personne de référence du logement, à l'exception du benzo[a]pyrène et des PUF. Le benzo[a]pyrène n'a pas été retenu pour la modélisation en raison des faibles niveaux de concentrations mesurés (concentrations quantifiées uniquement dans 38 % des logements). Les PUF ont été mesurés dans un nombre de logements très restreint et insuffisant pour une modélisation robuste (n = 31). Pour les polluants mesurés dans la chambre, il subsiste un doute sur le fait qu'il s'agisse d'une pollution directe, par diffusion dans le logement de composés produits dans le salon par l'appareil de chauffage par exemple, ou indirecte, par réintroduction dans l'habitat de composés évacués par le conduit par exemple.

Les variables à expliquer ont été **log-transformées** afin de normaliser leurs distributions statistiques et réduire l'influence des valeurs extrêmes sur les distributions. La normalité des distributions des variables à expliquer est une condition requise pour l'application du test statistique de Student (Student, 1908), permettant d'évaluer la significativité des coefficients de régression.

2.2.4.2. Variables explicatives d'intérêt

Les **cinq variables explicatives d'intérêt, relatives au chauffage au bois**, sont décrites dans le Tableau 1 et sur la Figure 3. Elles sont emboîtées et ne couvrent pas le même périmètre de logements selon la prise en compte du fonctionnement de l'appareil de chauffage et/ou du type d'appareil. Par ailleurs, dans le recueil des données de la CNL2, la question relative au nombre de jours d'utilisation de l'appareil de chauffage au bois a été posée de telle sorte à documenter l'utilisation d'un chauffage d'appoint à combustion (de type cheminée, poêle, insert ou un type de chauffage non raccordé) sans forcément considérer l'équipement de chauffage principal. De ce fait, les données collectées ne permettent pas d'estimer le nombre de jours d'utilisation d'un système de chauffage principal au bois.

Le type d'équipement de chauffage au bois actif n'était pas renseigné pour un logement, celui-ci a donc été exclu de l'étude. Les logements disposant d'une cheminée à foyer ouvert actif pendant la semaine d'enquête sont peu nombreux (n = 5) et la modalité correspondante ne peut pas être conservée telle quelle dans les analyses. De plus, un regroupement de modalités ne peut pas être envisagé car les émissions provenant des cheminées à foyer ouvert diffèrent de celles des autres types d'équipements de chauffage au bois. Les logements équipés d'une cheminée à foyer ouvert actif pendant l'enquête ont donc été exclus des analyses. Les logements disposant d'un poêle à bois ou d'une chaudière à granulés à alimentation automatique et actif pendant l'enquête sont également peu nombreux (n = 3). Ils ont été regroupés avec ceux équipés d'un poêle à bois ou d'une chaudière à granulés à alimentation manuelle.

La fréquence d'utilisation de l'équipement de chauffage au bois a été ventilée en deux classes (entre 1 et 4 jours, entre 5 et 8 jours) car certaines modalités d'origine sont très peu représentées en nombre de logements (n < 10). Un regroupement en trois classes (entre 1 et 2 jours, entre 3 et 5 jours, entre 6 et 8 jours) a également été testé mais il n'a pas été retenu car les résultats des tests de corrélation étaient moins bons que ceux obtenus avec le regroupement en deux classes.

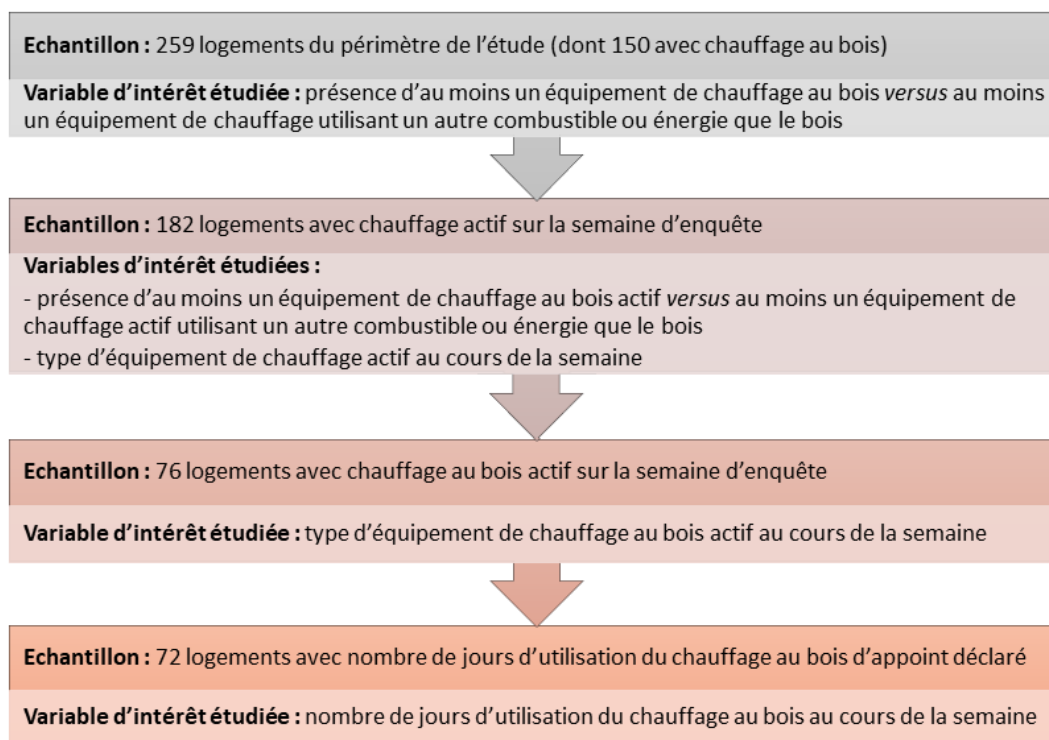


Figure 3. Variables relatives au chauffage au bois et échantillons de logements associés

2.2.4.3. Variables explicatives d'ajustement

Les variables d'ajustement (ou de confusion) potentielles correspondent aux **facteurs autres que les variables d'intérêt pouvant influencer les niveaux de concentrations des polluants**. Elles ont été sélectionnées à dire d'experts, parmi les variables documentées dans la CNL2 et autres données publiques, et sont décrites dans la section 2.1.

Parmi ces facteurs, une **sélection de variables** basée sur des critères statistiques a été réalisée en amont de chaque modélisation. Elle s'est déroulée en quatre étapes :

1. Les variables explicatives présentant un taux élevé de données manquantes ($\geq 10\%$) ou une mauvaise répartition des effectifs (modalité avec un effectif $\leq 5\%$) n'ont pas été retenues pour la modélisation. En revanche, lorsqu'une mauvaise répartition des effectifs était constatée, un regroupement des modalités de la variable a été effectué pour la conserver dans la mesure du possible ;
2. Les corrélations entre la variable à expliquer (concentration log-transformée du polluant/groupe de polluants) et les variables explicatives ont été testées à l'aide des tests de Kruskal-Wallis ou de Spearman (Spearman, 1987), selon la nature qualitative ou quantitative de la variable explicative, relativement au risque d'erreur de 20 %. Lorsque la p-valeur était inférieure ou égale à 20 %, alors la variable explicative a été retenue. La correction de Bonferroni n'a pas été appliquée car elle est trop restrictive au regard du nombre de tests réalisés (Dunn, 1961) et que l'objectif de ce test était d'effectuer une première sélection des variables qui sera affinée aux étapes suivantes ;
3. Une matrice de corrélations entre les variables explicatives a été construite pour identifier les variables colinéaires, car la multicolinéarité biaise l'estimation des coefficients de régression des modèles. Les corrélations ont été évaluées à l'aide des tests du Chi² (Yates, 1964), de Kruskal-Wallis ou de Spearman, selon la nature qualitative ou quantitative des variables. Lorsque la corrélation entre deux variables était significative relativement au risque d'erreur de 5 %, seule une des deux variables a été retenue pour la modélisation. Le choix a été effectué à dire d'experts ou par un algorithme de sélection automatique pas-à-pas. Le seuil de risque de 5 % a été retenu et la correction de Bonferroni a été appliquée aux tests afin de supprimer le moins de variables possible à cette étape ;
4. Une sélection automatique pas-à-pas (stepwise/both forward and backward) des variables a été réalisée en fonction du critère d'information d'Akaike AIC (indicateur statistique permettant de comparer les performances des modèles), pour gérer la multicolinéarité et retenir le modèle le plus performant.

Lorsqu'une **relation entre la variable à expliquer et une variable explicative continue** était observée, la **linéarité de la relation** était vérifiée en projetant graphiquement les logements en fonction des deux variables. L'objectif de cette étape était de transformer la variable explicative continue afin de tenir compte de la nature de la relation entre les deux variables (ex. : exponentielle, logarithmique, polynomiale, etc.). A l'issue de cette analyse, seule une variable a été log-transformée : la concentration extérieure en PM_{2,5}, pour le modèle explicatif de la concentration intérieure en PM_{2,5} (également log-transformée).

Trois variables avec des taux élevés de données manquantes ($> 10\%$ de l'échantillon) ont été exclues de la modélisation. Il s'agit des variables renseignant sur le vapotage, l'utilisation de peinture, de vernis et/ou de colle et les activités de perçage, ponçage et sciage pendant la semaine d'enquête.

2.2.4.4. Modélisation par régression linéaire généralisée et évaluation des modèles

Un modèle explicatif de chaque variable à expliquer (concentration log-transformée du polluant ou groupe de polluants) en fonction de chaque variable explicative d'intérêt (variable relative au chauffage au bois) a été construit, lorsque la **corrélacion entre les deux variables était jugée significative relativement au risque d'erreur de 20 %** (test de Kruskal-Wallis). Le seuil de risque de 20 % a été retenu pour effectuer une sélection large des variables, tel que décrit pour les variables explicatives d'ajustement.

Les variables explicatives d'ajustement, sélectionnées selon la méthode décrite dans la section 2.2.4.3, ont également été intégrées aux modèles.

Les modèles ont été développés selon une **méthode de régression linéaire généralisée, l'analyse de la covariance (ANCOVA)**, car la variable à expliquer est une variable quantitative continue et les variables explicatives comprennent à la fois des variables quantitatives et qualitatives (Tabachnick & Fidell, 2013).

Les modalités de référence des variables explicatives qualitatives ont été choisies pour leur **pertinence interprétative** et le **nombre élevé de logements** qu'elles représentent, afin de garantir une comparaison robuste entre les modalités.

Le pouvoir explicatif des modèles a été apprécié à l'aide du coefficient de détermination R^2 ajusté, qui mesure la **part de la variance expliquée** par les modèles. La **significativité des effets** des variables explicatives a été évaluée à l'aide des p-valeurs des coefficients de régression. Les **variations des concentrations** en $PM_{2,5}$ et HAP associées à chaque effet ont été estimées. La **contribution des variables explicatives** aux modèles a été quantifiée à l'aide de la statistique de Fisher (Fisher, 1934) (Tableau 5). Les modèles construits sur un même périmètre de logements ont été **comparés** à l'aide d'un indicateur pénalisé de la log-vraisemblance, le critère d'information d'Akaike (AIC).

Tableau 5. Interprétation de la statistique de Fisher

Statistique de Fisher	Contribution de la variable au modèle
≤ 2	Faible
$]2 ; 4]$	Modérée
$]4 ; 10]$	Forte
>10	Très forte

Les traitements statistiques ont été réalisés sur les logiciels de programmation SAS Enterprise Guide (version 8.3 Update 5, SAS Institute Inc., USA) et R (version 4.1.0, R Foundation for Statistical Computing, Austria). Les packages R suivants ont permis de manipuler, analyser, visualiser les données et construire les modèles de régression linéaire généralisée : tidyverse (Wickam et al., 2019), ggplot2 (Wickam, 2016) et stats (R Core Team, 2023).

3. Résultats

3.1. Particules fines (fraction PM_{2,5})

3.1.1. Distributions statistiques

Les PM_{2,5} ont été détectées et quantifiées dans 99,6 % des logements du périmètre de l'étude, défini dans la section 2.1.1.1.

Les distributions statistiques de la concentration en PM_{2,5} dans les logements et du ratio des concentrations intérieures sur extérieures sont présentées dans le Tableau 6. La concentration moyenne en PM_{2,5} dans l'air des logements retenus est de 14,5 µg/m³. Une variation notable du ratio intérieur/extérieur est observée au sein de l'échantillon de logements, avec des valeurs allant de 0,18 à 25,5. Une médiane des ratios de 1,34 implique que pour moins de 50 % des logements, la contribution des sources intérieures n'est pas prépondérante. En revanche, elle devient majoritaire pour au moins 25 % des logements.

Tableau 6. Distributions de la concentration en PM_{2,5} (µg/m³) dans l'air des logements et des ratios des concentrations intérieures sur extérieures (n = 235)

Paramètre	MG	IC 95%	Min	P10	P25	Médiane	P75	P90	Max
Concentration intérieure en PM _{2,5}	14,5	[13,0 ; 16,1]	<LDM	6,35	8,24	11,4	22,0	52,9	251
Ratio int./ext.	1,70	[1,51 ; 1,91]	0,18	0,62	0,89	1,34	2,55	7,60	25,5

MG : moyenne géométrique ; IC : intervalle de confiance de la moyenne géométrique ; min : minimum ; max : maximum ; P : centile ; LDM : limite de détection de la méthode (moyenne) ; int. : concentration intérieure ; ext. : concentration extérieure.

3.1.2. Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt

Les résultats des analyses bivariées entre la concentration en PM_{2,5} et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois sont présentés dans le Tableau 7 et en annexe 7.3.

Tableau 7. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en PM_{2,5} et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

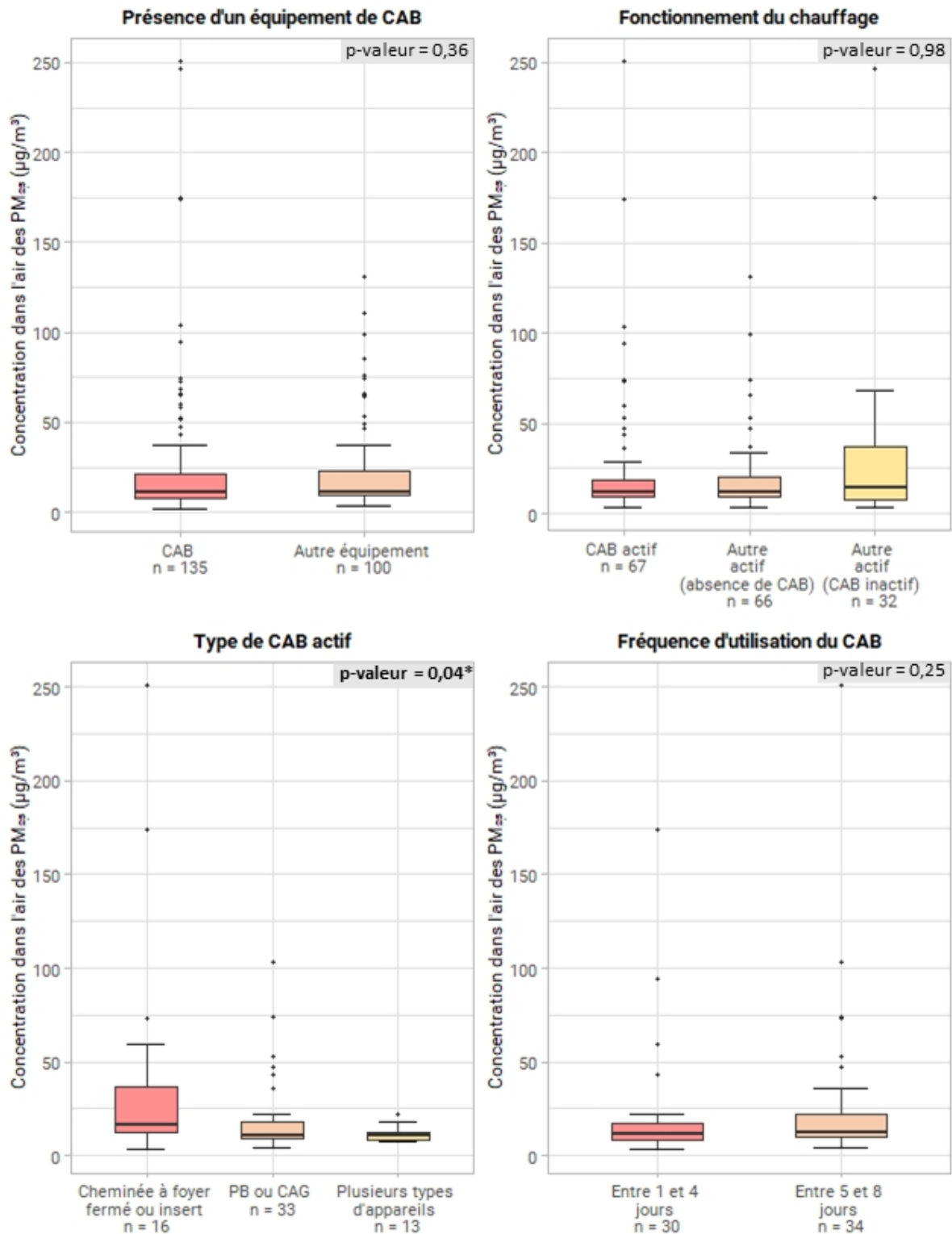
Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en PM _{2,5} (µg/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	135	57,4	11,4	0,36
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	100	42,6	11,5	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	67	40,6	11,6	0,98

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en PM _{2,5} (µg/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	66	40,0	11,6	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	32	19,4	13,9	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	16	10,0	16,4	0,25
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	33	20,6	10,9	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	8,1	10,8	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	66	41,3	11,6	
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	32	20,0	13,9	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	16	25,8	16,4	0,04
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	33	53,2	10,9	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	21,0	10,8	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	Entre 1 et 4 jours	30	46,9	11,2	0,25
	Entre 5 et 8 jours	34	53,1	12,4	

p-valeur du test de Kruskal-Wallis en gras inférieure à 0,05.

Seule la variable décrivant le type d'équipement de chauffage au bois actif pendant l'enquête est significativement corrélée à la concentration en PM_{2,5}, relativement au risque d'erreur de 5 %. Des concentrations élevées en PM_{2,5} sont notamment constatées dans les logements équipés d'une cheminée à foyer fermé ou insert en fonctionnement (concentration médiane = 16,4 µg/m³). Cette variable a été retenue pour la modélisation de la concentration en PM_{2,5}. Aucune autre variable n'est corrélée à la concentration en PM_{2,5} relativement au risque d'erreur de 5 %.

Les distributions statistiques de la concentration en PM_{2,5} en fonction des variables relatives au chauffage bois sont représentées par des boîtes à moustaches sur la Figure 4. Elles illustrent les résultats précédents, la concentration en PM_{2,5} est plus élevée dans les logements équipés d'une cheminée à foyer fermé ou d'un insert en fonctionnement, comparativement aux autres types d'équipements de chauffage au bois.



* p-valeur du test de Kruskal-Wallis inférieure à 0,05. CAB : chauffage au bois ; PB : poêle à bois ; CG : chaudière à granulés.

Figure 4. Boîtes à moustaches de la concentration en PM_{2,5} en fonction des variables relatives au chauffage au bois

3.1.3. Modèles explicatifs

3.1.3.1. Sélection des variables explicatives d'ajustement

Les variables d'ajustement corrélées à la concentration en $PM_{2,5}$, relativement au risque d'erreur de 20 %, sont présentées dans le Tableau 8.

Le nombre de pièces d'habitation, la surface du logement, le nombre moyen d'occupants dans le logement et la densité d'occupation du logement durant la semaine d'enquête sont significativement corrélés entre eux (test de Spearman, p-valeur < 0,05). Ces variables ne pouvaient pas toutes être conservées dans le modèle, au risque de générer de la multicollinéarité. La densité d'occupation a donc été retenue à dire d'experts pour la modélisation, car elle renseigne à la fois sur la taille du logement et son occupation.

L'écart moyen entre les températures intérieures et extérieures, la moyenne des degrés-jours et la moyenne de la concentration extérieure en $PM_{2,5}$ sur la semaine d'enquête sont également significativement corrélés entre eux (test de Spearman, p-valeur < 0,05). La moyenne de la concentration extérieure en $PM_{2,5}$ a été retenue pour la modélisation, car les deux autres variables sont aussi significativement corrélées au type de chauffage au bois actif, qui est une variable explicative d'intérêt du modèle.

Enfin, le nombre d'étages du logement n'a pas été retenu par l'algorithme de sélection automatique pas-à-pas.

In fine, seules deux variables d'ajustement ont été sélectionnées pour la modélisation : la **densité d'occupation** et la **concentration moyenne extérieure en $PM_{2,5}$** au cours de la semaine d'enquête.

Tableau 8. Variables d'ajustement corrélées à la concentration en $PM_{2,5}$ relativement au risque d'erreur de 20 %

Variable	Test de corrélation p-valeur
Nombre de pièces d'habitation du logement	0,07
Nombre d'étages du logement	0,08
Surface du logement (m ²)	0,02
Nombre moyen d'occupants dans le logement sur la semaine d'enquête	0,02
Densité d'occupation (= nombre moyen d'occupants / surface du logement) (nombre d'occupants/m ²)	0,0001
Ecart moyen entre les températures intérieures et extérieures, sur la semaine d'enquête (°C)	0,01
Moyenne des degrés-jours sur la semaine d'enquête (°C)	0,01
Moyenne des concentrations extérieures en $PM_{2,5}$ sur la semaine d'enquête (µg/m ³)	0,08

3.1.3.2. Résultats de modélisation

Les logements disposant d'une cheminée à foyer ouvert active pendant la semaine d'enquête sont peu nombreux (n = 4) et la modalité correspondante ne peut pas être conservée telle quelle pour la modélisation. Les émissions provenant des cheminées à foyer ouvert sont différentes des émissions des autres équipements de chauffage au bois. De ce fait, le comité de suivi a suggéré de ne pas regrouper ces modalités et d'exclure les logements équipés d'une cheminée à foyer ouvert active pendant l'enquête pour la modélisation.

Le Tableau 9 présente les résultats du modèle explicatif de la concentration en $PM_{2,5}$, dans les logements ayant utilisé un équipement de chauffage au bois pendant la semaine d'enquête.

Le modèle présente un **pouvoir explicatif faible** (R^2 ajusté = 0,13). Deux variables ont des effets significatifs sur la concentration en $PM_{2,5}$ (p -valeur < 0,05) : **le type d'équipement de chauffage au bois actif et la densité d'occupation**.

La concentration en $PM_{2,5}$ augmente en moyenne de $+6,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en présence d'une cheminée à foyer fermé actif ou d'un insert actif pendant la semaine d'enquête, relativement à la concentration moyenne de l'échantillon. La contribution de cette variable au modèle est modérée (statistique de Fisher = 2,7).

Plus la densité d'occupation est importante, plus la concentration en $PM_{2,5}$ est élevée. La densité d'occupation contribue fortement à l'explication des écarts de concentrations en $PM_{2,5}$ entre les logements (statistique de Fisher = 6,1). La concentration en $PM_{2,5}$ augmente en moyenne de $10,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour un occupant supplémentaire pour 20 m^2 (surface définie à titre d'exemple). La densité d'occupation pourrait être un proxy de plusieurs autres facteurs tels que la remise en suspension des particules, la mise en œuvre de plus d'activités domestiques générant des particules mais aussi de manière indirecte la localisation géographique du logement (environnement urbain ou rural).

La concentration extérieure en $PM_{2,5}$ ne présente pas d'effet significatif sur la concentration intérieure.

Tableau 9. Modèle explicatif de la concentration en $PM_{2,5}$ selon le type d'équipement de chauffage au bois actif ($n = 58$)

Variable	Modalité	n	Coefficient de régression	p-valeur	Variation de la concentration moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Statistique de Fisher
Constante	-	58	1,52	0,0090	-	-
Type d'équipement de chauffage au bois actif	Poêle à bois ou chaudière à granulés*	32	-	-	-2,1	2,7
	Cheminée à foyer fermé ou insert	16	0,52	0,0424	+6,8	
	Plusieurs types d'appareils de chauffage au bois	10	0,04	0,9065	-1,6	
Densité d'occupation du logement (nombre d'occupants/ m^2)	-	58	46,24	0,0226	+10,1 ¹	6,1
Log-concentration extérieure en $PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	58	0,19	0,4108	+0,2 ²	0,7

* Modalité de référence de la variable explicative, associée à un coefficient de régression nul ; ¹ : variation estimée pour une augmentation d'un occupant pour 20 m^2 ; ² : variation estimée pour une augmentation de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentration extérieure en $PM_{2,5}$. Les effets significatifs sur la concentration (p -valeur < 0,05) sont surlignés en gris.

3.2. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

3.2.1. Distribution statistique

Les fréquences de détection et de quantification des concentrations totales en 15 et 10 HAP, dans l'air des logements du périmètre de l'étude, sont présentées dans le Tableau 10 et le Tableau 11. Les HAP ont été détectés et quantifiés dans tous les logements de l'étude. Leurs distributions statistiques sont présentées dans le Tableau 12 et le Tableau 13.

Tableau 10. Fréquences de détection et de quantification des 15 HAP dans l'air des logements (n = 226)

Paramètre	LDM (ng/m ³)	LQM (ng/m ³)	%>LDM	%>LQM
Acénaphène	0,024	0,061	99,1	98,1
Acénaphthylène	0,049	0,120	69,6	47,9
Anthracène	0,090	0,120	89,2	81,3
Benzo[a]anthracène	0,024	0,061	55,7	33,1
Benzo[a]pyrène	0,026	0,061	56,1	34,1
Benzo[b]fluoranthène	0,049	0,120	70,2	39,0
Benzo[g,h,i]perylène	0,049	0,120	64,5	30,1
Benzo[k]fluoranthène	0,049	0,120	32,3	9,68
Chrysène	0,024	0,061	75,3	43,9
Dibenzo[a,h]anthracène	0,049	0,120	8,63	0,43
Fluoranthène	0,024	0,061	99,6	99,5
Fluorène	0,037	0,061	99,7	99,7
Indéno[1,2,3-cd]pyrène	0,049	0,120	57,1	29,2
Phénanthrène	0,082	0,120	99,8	99,8
Pyrène	0,024	0,061	99,5	99,5
Somme des concentrations des 15 HAP	0,025	0,061	100	100

LDM : limite de détection de la méthode (moyenne) ; LQM : limite de quantification de la méthode (moyenne).

Tableau 11. Fréquences de détection et de quantification des 10 HAP dans l'air des logements (n = 235)

Paramètre	LDM (ng/m ³)	LQM (ng/m ³)	%>LDM	%>LQM
Acénaphène	0,024	0,061	99,1	98,1
Acénaphthylène	0,049	0,120	69,6	47,9
Anthracène	0,090	0,120	89,2	81,3
Benzo[a]pyrène	0,026	0,061	56,1	34,1
Benzo[b]fluoranthène	0,049	0,120	70,2	39,0
Benzo[k]fluoranthène	0,049	0,120	32,3	9,68
Chrysène	0,024	0,061	75,3	43,9
Fluoranthène	0,024	0,061	99,6	99,5
Phénanthrène	0,082	0,120	99,8	99,8
Pyrène	0,024	0,061	99,5	99,5
Somme des concentrations des 10 HAP	0,025	0,061	100	100

LDM : limite de détection de la méthode (moyenne) ; LQM : limite de quantification de la méthode (moyenne).

Tableau 12. Distribution de la somme des concentrations des 15 HAP (ng/m³) dans l'air des logements (n = 226)

Paramètre	MG	IC 95%	Min	P10	P25	Médiane	P75	P90	Max
Somme des concentrations des 15 HAP	13,1	[12,0 ; 14,3]	0,323	7,29	9,57	12,3	18,3	28,0	121

MG : moyenne géométrique ; IC : intervalle de confiance de la moyenne géométrique ; min : minimum ; max : maximum ; P : centile.

Tableau 13. Distribution de la somme des concentrations des 10 HAP (ng/m³) dans l'air des logements (n = 235)

Paramètre	MG	IC 95%	Min	P10	P25	Médiane	P75	P90	Max
Somme des concentrations des 10 HAP	11,2	[10,3 ; 12,3]	0,219	6,25	8,12	10,6	15,4	23,2	106

MG : moyenne géométrique ; IC : intervalle de confiance de la moyenne géométrique ; min : minimum ; max : maximum ; P : centile.

3.2.2. Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt

Les résultats des analyses bivariées entre les sommes des concentrations en HAP et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois sont présentés dans le Tableau 14, le Tableau 15 et en annexe 7.3.

Tableau 14. Résultats des analyses bivariées entre la somme des concentrations des 15 HAP et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en 15 HAP (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	132	58,4	13,0	0,05
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	94	41,6	11,5	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	65	42,5	14,5	0,10
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	61	39,9	12,1	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	27	17,6	13,6	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en 15 HAP (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	14	9,5	15,3	0,43
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	33	22,4	12,3	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	12	8,2	16,6	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	61	41,5	12,1	
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	27	18,4	13,6	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	14	23,7	15,3	0,65
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	33	55,9	12,3	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	12	20,3	16,6	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	Entre 1 et 4 jours	32	51,6	13,7	0,17
	Entre 5 et 8 jours	30	48,4	17,8	

p-valeur du test de Kruskal-Wallis en gras inférieure à 0,05.

Tableau 15. Résultats des analyses bivariées entre la somme des concentrations des 10 HAP et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en 10 HAP (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	138	58,7	11,4	0,04
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	97	41,3	9,8	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	69	42,6	12,8	0,05
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	39,5	10,1	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	29	17,9	11,6	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en 10 HAP (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	15	9,6	13,4	0,33
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	35	22,4	12,1	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	8,3	12,7	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	41,0	10,1	
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	29	18,6	11,6	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	15	23,8	13,4	0,65
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	35	55,6	12,1	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	20,6	12,7	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	Entre 1 et 4 jours	33	50,8	12,1	0,27
	Entre 5 et 8 jours	32	49,2	13,6	

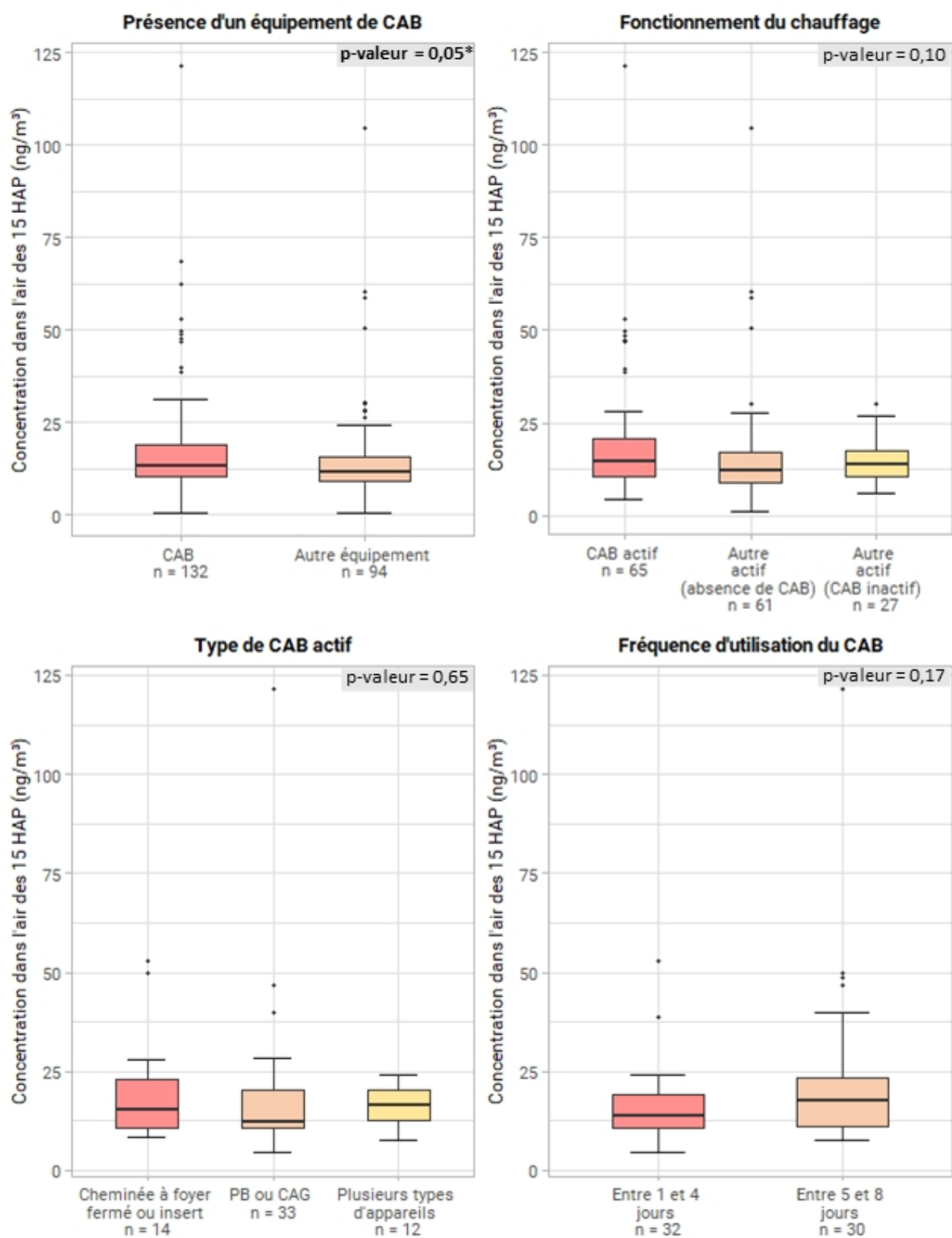
p-valeurs du test de Kruskal-Wallis en gras inférieures à 0,05.

Seule la variable indiquant la présence d'un équipement de chauffage au bois est significativement corrélée à la somme des concentrations des 15 HAP recherchés dans la CNL2, relativement au risque d'erreur de 5 %. Deux autres variables sont corrélées à la concentration totale des 15 HAP par rapport au risque d'erreur de 20 % : la présence d'un équipement de chauffage au bois actif et la fréquence d'utilisation de l'équipement de chauffage au bois. Ces trois variables ont été retenues pour la modélisation de la somme des concentrations des 15 HAP.

Les deux variables décrivant la présence et le fonctionnement d'un équipement de chauffage au bois sont significativement corrélées à la somme des concentrations des 10 HAP d'intérêt, relativement au risque d'erreur de 5 %. La concentration totale des 10 HAP est plus élevée en présence d'un équipement de chauffage au bois, en particulier lorsqu'il est actif. Ces deux variables ont donc été retenues pour la modélisation de la somme des concentrations des 10 HAP.

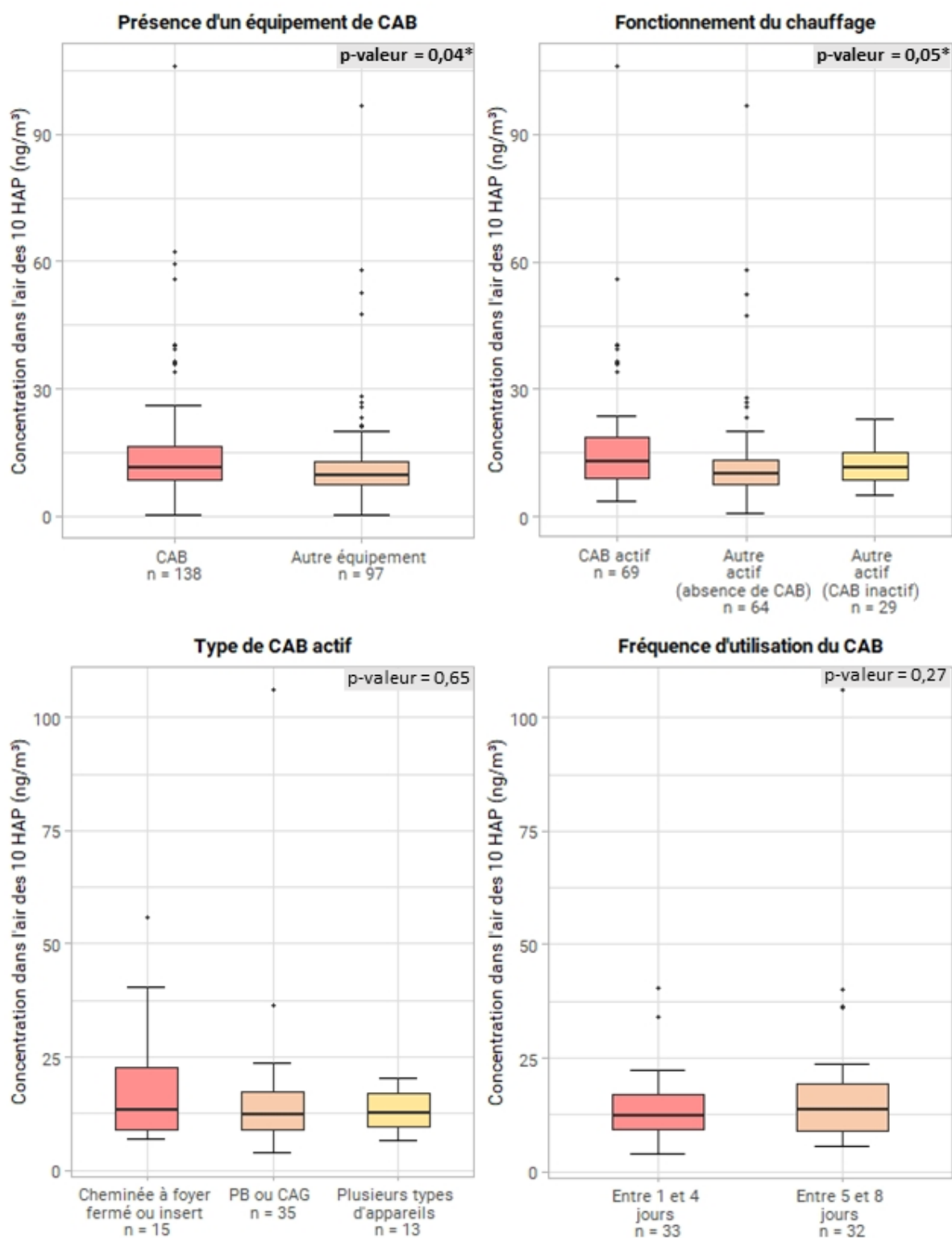
Les concentrations médianes les plus élevées sont observées dans les logements avec les types d'équipement de chauffage actif suivants : cheminée à foyer ouvert, cheminée à foyer fermé ou insert (annexe 7.3), bien que le type d'équipement de chauffage actif ne soit pas statistiquement corrélé à la somme des concentrations en HAP.

Les distributions statistiques des sommes des concentrations en HAP en fonction des variables relatives au chauffage bois sont représentées par des boîtes à moustaches sur la Figure 5 et la Figure 6. Elles illustrent les résultats précédents. Les concentrations en HAP sont plus élevées en présence d'un appareil de chauffage au bois, notamment lorsqu'il est actif pour la somme des concentrations des 10 HAP.



* p-valeur du test de Kruskal-Wallis inférieure ou égale à 0,05. CAB : chauffage au bois ; PB : poêle à bois ; CG : chaudière à granulés.

Figure 5. Boîtes à moustaches de la somme des concentrations des 15 HAP en fonction des variables relatives au chauffage au bois



* p-valeurs du test de Kruskal-Wallis inférieures ou égales à 0,05. CAB : chauffage au bois ; PB : poêle à bois ; CG : chaudière à granulés.

Figure 6. Boîtes à moustaches de la somme des concentrations des 10 HAP en fonction des variables relatives au chauffage au bois

3.2.3. Modèles explicatifs de la somme des concentrations en HAP

Les modèles explicatifs de la somme des concentrations des 15 ou des 10 HAP fournissent des résultats comparables. La restitution des résultats de modélisation a donc été mutualisée pour ces deux paramètres.

Les logements disposant d'une cheminée à foyer ouvert active pendant la semaine d'enquête ont été exclus des modèles car ils sont peu nombreux (n = 5) et les émissions provenant de ces cheminées diffèrent des émissions issues des autres installations de chauffage au bois.

3.2.3.1. Sélection des variables explicatives d'ajustement

Les variables d'ajustement corrélées aux concentrations des HAP, relativement au risque d'erreur de 20 %, sont présentées dans le Tableau 16.

La surface du logement, le nombre moyen d'occupants dans le logement et la densité d'occupation du logement durant la semaine d'enquête sont significativement corrélés entre eux (test de Spearman, p-valeur < 0,05). Comme pour les particules PM_{2,5}, ces variables ne peuvent pas toutes être conservées dans le modèle, au risque de générer de la multicollinéarité. La densité d'occupation a donc été privilégiée à dire d'experts pour la modélisation car elle renseigne à la fois sur la taille du logement et son occupation.

L'écart moyen entre les températures intérieures et extérieures et la moyenne des degrés-jours sur la semaine d'enquête sont également significativement corrélés entre eux (test de Spearman, p-valeur < 0,05). Sur ces deux variables, l'écart moyen de températures a été sélectionné par l'algorithme de sélection automatique pas-à-pas.

La période de construction du bâtiment est significativement corrélée au nombre d'étages du logement, au type de système de ventilation, à la configuration de la cuisine et à l'ancienneté des travaux de réhabilitation. Parmi ces variables, le nombre d'étages a été jugé moins pertinent que les autres et a été exclu d'office. Pour les autres variables, des modèles avec des termes d'interaction et une sélection automatique pas-à-pas ont été testés :

- un modèle avec l'effet croisé **période de construction x type de système de ventilation** et les effets propres de chaque variable ;
- un modèle avec l'effet croisé **période de construction x configuration cuisine** et les effets propres de chaque variable ;
- un modèle avec l'effet croisé **période de construction x travaux de réhabilitation** et les effets propres de chaque variable ;
- un modèle avec **tous les effets croisés** et effets propres.

Ces modèles ont été construits pour les trois variables d'intérêt sur le chauffage au bois corrélées aux concentrations des 15 HAP (soit 12 modèles). Les effets croisés n'ont jamais été retenus dans les modèles résultants, l'effet propre de la période de construction a été retenu dans les 12 modèles testés et l'effet propre de la configuration de la cuisine a été retenu dans 2 modèles sur 12, bien qu'il soit corrélé à la période de construction. Au vu des résultats, la période de construction a été privilégiée pour la modélisation par rapport aux trois autres variables. Elle doit être interprétée comme un proxy de plusieurs facteurs : le type de système de ventilation, la configuration de la cuisine et la réalisation de travaux de réhabilitation.

La densité d'occupation, les travaux d'isolation des murs et combles et le vapotage n'ont pas été retenus par l'algorithme de sélection automatique pas-à-pas, pour l'ensemble des modèles. L'écart moyen entre les températures intérieures et extérieures n'a pas été retenu par l'algorithme de sélection automatique pour le modèle intégrant la fréquence d'utilisation de l'équipement de chauffage au bois.

Trois variables d'ajustement ont donc été sélectionnées pour la modélisation : la **surface de la pièce de mesure**, la **période de construction du bâtiment** et l'**écart moyen entre les températures intérieures et extérieures** pour 2 modèles sur 3. La surface de la pièce de mesure a été discrétisée en trois classes de taille équivalente, afin qu'elle ne soit pas colinéaire aux concentrations des HAP, exprimées en masse rapportée au volume de la pièce de mesure.

Tableau 16. Variables d'ajustement corrélées aux concentrations des HAP relativement au risque d'erreur de 20 %

Variable	Test de corrélation p-valeur	
	15 HAP	10 HAP
Nombre d'étages du logement	0,03	0,03
Surface du logement (m ²)	<0,0001	<0,0001
Nombre moyen d'occupants dans le logement sur la semaine d'enquête	0,09	0,06
Densité d'occupation (= nombre moyen d'occupants / surface du logement) (nombre d'occupants/m ²)	0,10	0,09
Période de construction du logement	<0,0001	<0,0001
Ancienneté des travaux de réhabilitation	0,01	0,01
Rénovation : isolation des murs ou combles	0,11	0,13
Rénovation : pose de moquette	0,08	0,08
Rénovation : pose de sols plastiques	0,10	0,17
Type de système de ventilation	0,004	0,001
Ecart moyen entre les températures intérieures et extérieures sur la semaine d'enquête (°C)	0,01	0,03
Moyenne des degrés-jours sur la semaine d'enquête (°C)	0,01	0,04
Vapotage	0,02	0,02
Configuration de la cuisine et du salon	0,05	0,05

3.2.3.2. Résultats de modélisation

3.2.3.2.1. Modèles associés à la présence d'un équipement de chauffage au bois

Le Tableau 17 et le Tableau 18 présentent les résultats des modèles explicatifs de la somme des concentrations en 15 ou 10 HAP, en fonction de la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois.

Les modèles présentent des **pouvoirs explicatifs faibles** (R^2 ajusté de 0,15 pour les 15 HAP et de 0,14 pour les 10 HAP). **La présence d'un équipement de chauffage au bois n'a pas d'effet significatif sur la somme des concentrations des HAP.** En revanche, deux variables d'ajustement présentent des effets significatifs (p-valeurs < 0,05) : **la période de construction du bâtiment et l'écart moyen entre les températures intérieures et extérieures.** La surface de la pièce de mesure présente un effet significatif sur la somme des concentrations en 10 HAP uniquement (p-valeur < 0,05).

Plus la période de construction du bâtiment est ancienne, plus la somme des concentrations en HAP est élevée. La concentration dans les bâtiments construits avant 1948 est en moyenne plus élevée de +4,8 ng/m³ pour la somme des 15 HAP et de +4,0 ng/m³ pour la somme des 10 HAP, relativement à la concentration moyenne de l'échantillon. La période de construction du bâtiment doit être interprétée comme un proxy de plusieurs facteurs, notamment du type de système de ventilation, de la configuration de la cuisine et de l'ancienneté des travaux de réhabilitation. La contribution de cette variable aux modèles est forte (statistique de Fisher ≥ 8).

Par ailleurs, plus l'écart moyen entre la température intérieure et extérieure est important (correspondant notamment à des journées très froides), plus la somme des concentrations en HAP est élevée. Un écart moyen d'un degré augmente la somme des concentrations en HAP de +1 ng/m³. La contribution de cette variable aux modèles est forte (statistique de Fisher ≥ 9,6).

La somme des concentrations des 10 HAP est significativement plus élevée pour un séjour de surface inférieure ou égale à 32 m², relativement aux séjours de surface supérieure ou égale à 50 m² (+2,5 ng/m³ en moyenne). Cet effet pourrait s'expliquer entre autres par le volume d'air réduit dans les petites pièces, augmentant ainsi la concentration des polluants. La contribution de cette variable au modèle est modérée (statistique de Fisher = 3,2). Cette variable n'a pas d'effet significatif sur la somme des concentrations des 15 HAP.

Les modèles explicatifs sont similaires pour la concentration totale des 15 HAP et celle des 10 HAP, avec respectivement des R² ajustés de 0,15 et de 0,14, et des AIC de 427 et de 460, sur des échantillons de tailles comparables (respectivement 221 et 230 logements).

Tableau 17. Modèle explicatif de la concentration totale en 15 HAP selon la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois (n = 221)

Variable	Modalité	n	Coefficient de régression	p-valeur	Variation de la concentration moyenne (ng/m ³)	Statistique de Fisher
Constante	-	221	2,68	<0,0001	-	-
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois	<i>Au moins un équipement de chauffage au bois*</i>	127	-	-	+1,2	2,8
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible (ou énergie) que le bois	94	-0,14	0,1119	-0,6	
Période de construction du bâtiment	<i>Avant 1948*</i>	62	-	-	+4,8	8,3
	Entre 1949 et 1981	55	-0,37	0,0016	-0,7	
	Entre 1982 et 2000	41	-0,32	0,0142	0,0	
	Après 2001	63	-0,58	<0,0001	-3,0	
Surface de la pièce de mesure (m²)	<i>Surface ≤ 32 m²*</i>	76	-	-	+1,0	3,6
	Surface entre 33 et 49 m ²	71	0,04	0,6911	+1,6	
	Surface ≥ 50 m ²	74	-0,22	0,0536	-1,7	
Ecart de températures (int. - ext.) (°C)	-	221	0,03	0,0008	+1,0¹	11,6

* Modalité de référence de la variable explicative, associée à un coefficient de régression nul ; ¹ : variation estimée pour une augmentation d'un degré. Les effets significatifs sur la concentration (p-valeur < 0,05) sont surlignés en gris. Int. : intérieur ; ext. : extérieur.

Tableau 18. Modèle explicatif de la concentration totale en 10 HAP selon la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois (n = 230)

Variable	Modalité	n	Coefficient de régression	p-valeur	Variation de la concentration moyenne (ng/m ³)	Statistique de Fisher
Constante	-	230	2,57	<0,0001	-	-
	<i>Au moins un équipement de chauffage au bois*</i>	133	-	-	+1,1	2,9

Variable	Modalité	n	Coefficient de régression	p-valeur	Variation de la concentration moyenne (ng/m ³)	Statistique de Fisher
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois	Au moins un équipement utilisant un autre combustible (ou énergie) que le bois	97	-0,16	0,0853	-0,7	
	Période de construction du bâtiment	<i>Avant 1948*</i>	-	-	+4,0	8,0
		Entre 1949 et 1981	61	-0,36	0,0024	
		Entre 1982 et 2000	43	-0,31	0,0188	
	Après 2001	63	-0,57	<0,0001		
Surface de la pièce de mesure (m²)	<i>Surface ≤ 32 m²*</i>	79	-	-	+1,0	3,2
	Surface entre 33 et 49 m ²	74	0,003	0,9803	+1,0	
	Surface ≥ 50 m ²	77	-0,23	0,0389	-1,5	
Ecart de températures (int. - ext.) (°C)	-	230	0,03	0,0022	+1,0¹	9,6

* Modalité de référence de la variable explicative, associée à un coefficient de régression nul ; ¹ : variation estimée pour une augmentation d'un degré. Les effets significatifs sur la concentration (p-valeur < 0,05) sont surlignés en gris. Int. : intérieur ; ext. : extérieur.

3.2.3.2.2. Modèles associés à la présence d'un équipement de chauffage au bois actif

Le Tableau 19 et le Tableau 20 présentent les résultats des modèles explicatifs de la somme des concentrations des 15 et 10 HAP, en fonction de la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois actif pendant la semaine d'enquête.

Les modèles présentent des **pouvoirs explicatifs faibles** (R² ajusté de 0,21 pour les 15 HAP et de 0,20 pour les 10 HAP). Les quatre variables explicatives des modèles ont des effets significatifs sur les concentrations des HAP (p-valeurs < 0,05) :

- La **présence ou non d'un équipement de chauffage au bois actif** pendant la semaine d'enquête ;
- La **période de construction** du bâtiment ;
- La **surface de la pièce de mesure** (séjour) ;
- L'**écart moyen entre les températures intérieures et extérieures**.

La somme des concentrations des HAP est significativement plus élevée en présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif pendant la semaine d'enquête (+2,7 ng/m³ pour la somme des 15 HAP et +2,6 ng/m³ pour la somme des 10 HAP, relativement à la concentration moyenne de l'échantillon). Toutefois, la contribution de cette variable au modèle est faible (statistique de Fisher ≤ 2,4).

Plus la période de construction du bâtiment est ancienne, plus la somme des concentrations en HAP est élevée. La concentration dans les bâtiments construits avant 1948 est en moyenne plus élevée de +4,7 ng/m³ pour la somme des 15 HAP et de +3,6 ng/m³ pour la somme des 10 HAP, relativement à la concentration moyenne de l'échantillon. Par ailleurs, plus l'écart moyen entre les températures intérieures et extérieures est important, plus la concentration totale en HAP est élevée. Un écart moyen d'un degré augmente la concentration totale en HAP de +1 ng/m³. La contribution de ces variables aux modèles est forte (statistique de Fisher ≥ 7,5).

La concentration totale en HAP est significativement plus élevée pour un séjour de surface inférieure ou égale à 32 m², relativement aux séjours de surface supérieure ou égale à 50 m² (+4,5 ng/m³ en moyenne). La contribution de cette variable au modèle est forte (statistique de Fisher comprise entre 4,3 et 4,8).

Les modèles explicatifs sont similaires pour la concentration totale des 15 HAP et celle des 10 HAP, avec respectivement des R² ajustés de 0,21 et de 0,20, et des AIC de 250 et de 274, sur des échantillons de tailles comparables (respectivement 148 et 157 logements).

Tableau 19. Modèle explicatif de la concentration totale en 15 HAP selon la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois actif (n = 148)

Variable	Modalité	n	Coefficient de régression	p-valeur	Variation de la concentration moyenne (ng/m ³)	Statistique de Fisher
Constante	-	148	2,79	<0,0001	-	-
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif	Au moins un équipement de chauffage au bois actif*	60	-	-	+2,7	2,0
	Au moins un équipement actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	61	-0,27	0,0098	-1,5	
	Au moins un équipement actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	27	-0,24	0,0657	-0,4	
Période de construction du bâtiment	Avant 1948*	40	-	-	+4,7	7,7
	Entre 1949 et 1981	37	-0,26	0,0407	+0,8	
	Entre 1982 et 2000	30	-0,33	0,0164	-0,2	
	Après 2001	41	-0,57	<0,0001	-3,5	
Surface de la pièce de mesure (m ²)	Surface ≤ 32 m ² *	54	-	-	+2,4	4,3
	Surface entre 33 et 49 m ²	48	-0,06	0,5820	+0,8	
	Surface ≥ 50 m ²	46	-0,32	0,0079	-2,1	
Ecart de températures (int. - ext.) (°C)	-	148	0,04	0,0016	+1,0 ¹	10,3

* Modalité de référence de la variable explicative, associée à un coefficient de régression nul ; ¹ : variation estimée pour une augmentation d'un degré. Les effets significatifs sur la concentration (p-valeur < 0,05) sont surlignés en gris. Int. : intérieur ; ext. : extérieur.

Tableau 20. Modèle explicatif de la concentration totale en 10 HAP selon la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois actif (n = 157)

Variable	Modalité	n	Coefficient de régression	p-valeur	Variation de la concentration moyenne (ng/m ³)	Statistique de Fisher
Constante	-	157	2,68	<0,0001	-	-
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif	Au moins un équipement de chauffage au bois actif*	64	-	-	+2,6	2,4
	Au moins un équipement actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	-0,31	0,0037	-1,2	

Variable	Modalité	n	Coefficient de régression	p-valeur	Variation de la concentration moyenne (ng/m ³)	Statistique de Fisher
	Au moins un équipement actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	29	-0,28	0,0347	-0,5	
Période de construction du bâtiment	Avant 1948*	41	-	-	+3,6	7,5
	Entre 1949 et 1981	43	-0,24	0,0554	+0,3	
	Entre 1982 et 2000	32	-0,31	0,0224	-0,1	
	Après 2001	41	-0,55	<0,0001	-3,0	
Surface de la pièce de mesure (m ²)	Surface ≤ 32 m ² *	57	-	-	+2,5	4,8
	Surface entre 33 et 49 m ²	51	-0,12	0,2946	+0,5	
	Surface ≥ 50 m ²	49	-0,36	0,0026	-2,0	
Ecart de températures (int. - ext.) (°C)	-	157	0,03	0,0025	+1,0 ¹	9,5

* Modalité de référence de la variable explicative, associée à un coefficient de régression nul ; ¹ : variation estimée pour une augmentation d'un degré. Les effets significatifs sur la concentration (p-valeur < 0,05) sont surlignés en gris. Int. : intérieur ; ext. : extérieur.

3.2.3.2.3. Modèle associé à la fréquence d'utilisation du chauffage au bois actif

La modélisation n'a été réalisée que pour la somme des concentrations des 15 HAP car la fréquence d'utilisation de l'appareil de chauffage au bois actif n'est pas corrélée à la somme des concentrations des 10 HAP (p-valeur = 0,27).

Le Tableau 21 présente les résultats du modèle explicatif de la concentration totale en 15 HAP, en fonction de la fréquence d'utilisation de l'appareil de chauffage au bois actif.

Le modèle présente un **pouvoir explicatif faible** (R^2 ajusté = 0,18). **La fréquence d'utilisation de l'appareil de chauffage au bois actif n'a pas d'effet significatif sur la concentration totale en 15 HAP.** En revanche, deux variables d'ajustement présentent des effets significatifs sur les concentrations des HAP (p-valeur < 0,05) : **la période de construction du bâtiment et la surface de la pièce de mesure.**

La concentration totale en 15 HAP est significativement plus faible dans les constructions ultérieures à 2001, par rapport aux bâtiments construits avant 1948 (-7,3 ng/m³ en moyenne). La concentration en HAP est significativement plus élevée dans les séjours de surface inférieure ou égale à 32 m², relativement aux séjours de surface supérieure ou égale à 50 m² (+5,5 ng/m³ en moyenne). La contribution de ces variables au modèle est modérée (statistique de Fisher comprise entre 3,0 et 3,4).

Tableau 21. Modèle explicatif de la somme des concentrations des 15 HAP en fonction de la fréquence d'utilisation de l'équipement de chauffage au bois actif (n = 57)

Variable	Modalité	n	Coefficient de régression	p-valeur	Variation de la concentration moyenne (ng/m ³)	Statistique de Fisher
Constante	-	57	2,99	<0,0001	-	-
Fréquence d'utilisation de l'équipement de chauffage au bois actif	Entre 1 et 4 jours*	28	-	-	-1,0	2,6
	Entre 5 et 8 jours	29	0,27	0,0665	+3,0	
Période de construction du bâtiment	Avant 1948*	18	-	-	+4,3	3,4
	Entre 1949 et 1981	10	-0,08	0,6971	+1,6	

Variable	Modalité	n	Coefficient de régression	p-valeur	Variation de la concentration moyenne (ng/m ³)	Statistique de Fisher
	Entre 1982 et 2000	13	-0,18	0,3533	+1,0	
	Après 2001	16	-0,46	0,0148	-3,0	
Surface de la pièce de mesure (m²)	Surface ≤ 32 m ² *	13	-	-	+3,4	3,0
	Surface entre 33 et 49 m ²	19	-0,13	0,5092	+1,8	
	Surface ≥ 50 m ²	25	-0,38	0,0423	-2,1	

* Modalité de référence de la variable explicative, associée à un coefficient de régression nul. Les effets significatifs sur la concentration (p-valeur < 0,05) sont surlignés en gris.

3.2.3.3. Evaluation et comparaison des modèles

Les modèles explicatifs de la concentration totale en 15 ou 10 HAP sont comparés dans le Tableau 22.

Sur les trois variables d'intérêt relatives au chauffage au bois retenues pour la modélisation, seule une variable présente un effet significatif sur les deux sommes de concentrations en HAP, il s'agit de la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois actif dans le logement. Les modèles associés à cette variable présentent les meilleurs résultats (R² ajusté compris entre 0,20 et 0,21 selon le nombre d'HAP intégrés). Les modèles ont été ajustés en fonction de trois variables explicatives de confusion : la période de construction du bâtiment, la surface de la pièce de mesure et l'écart moyen entre les températures intérieures et extérieures.

Dans les modèles associés aux deux autres variables d'intérêt sur le chauffage au bois, seules les variables explicatives d'ajustement présentent des effets significatifs sur la concentration totale en HAP. Le nombre de variables d'ajustement à effet significatif varie entre 2 et 3. Le coefficient de détermination R² ajusté des modèles est compris entre 0,14 et 0,18, indiquant un pouvoir explicatif faible.

L'AIC permet de comparer les performances des modèles explicatifs de la concentration totale en 15 ou 10 HAP construits sur des effectifs similaires. Les modèles sont de qualité comparable.

Tableau 22. Comparatif des modèles explicatifs des concentrations totales en HAP

	Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois		Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif		Fréquence d'utilisation de l'équipement de chauffage au bois actif
	15 HAP	10 HAP	15 HAP	10 HAP	15 HAP
Taille de l'échantillon	221	230	148	157	57
Effet significatif du chauffage au bois	Non	Non	Oui	Oui	Non
Nombre de variables d'ajustement à effet significatif	2	3	3	3	2
Variables d'ajustement à effet significatif	- Période de construction du bâtiment - Ecart de températures (int. - ext.)	- Période de construction du bâtiment - Surface de la pièce de mesure - Ecart de températures (int. - ext.)	- Période de construction du bâtiment - Surface de la pièce de mesure - Ecart de températures (int. - ext.)	- Période de construction du bâtiment - Surface de la pièce de mesure - Ecart de températures (int. - ext.)	- Période de construction du bâtiment - Surface de la pièce de mesure
R ² ajusté	0,15	0,14	0,21	0,20	0,18
AIC	427	460	250	274	96

3.3. Benzo[a]pyrène

3.3.1. Distribution statistique

Le benzo[a]pyrène a été détecté dans 67 % des logements et quantifié dans 38 % des logements du périmètre de l'étude, défini dans la section 2.1.1.1. La distribution statistique de la concentration en benzo[a]pyrène dans les logements est présentée dans le Tableau 23. Les niveaux de concentrations relevés sont faibles en regard de la LDM (0,026 ng/m³) et de la LQM (0,061 ng/m³) du benzo[a]pyrène.

Tableau 23. Distribution de la concentration en benzo[a]pyrène (ng/m³) dans l'air des logements (n = 237)

Paramètre	MG	IC 95%	Min	P10	P25	Médiane	P75	P90	Max
Concentration en benzo[a]pyrène	<LQM	<LQM	<LDM	<LDM	<LDM	<LQM	0,112	0,296	5,33

MG : moyenne géométrique ; IC : intervalle de confiance de la moyenne géométrique ; min : minimum ; max : maximum ; P : centile ; LDM : limite de détection de la méthode (moyenne) ; LQM : limite de quantification de la méthode (moyenne).

3.3.2. Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt

Les résultats des analyses bivariées entre la concentration en benzo[a]pyrène et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois sont présentés dans le Tableau 24, le Tableau 25 et en annexe 7.3.

Tableau 24. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en benzo[a]pyrène et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en benzo[a]pyrène (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	139	58,6	0,047	0,003
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	98	41,4	0,030	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	69	42,6	0,080	0,001
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	39,5	0,053	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	29	17,9	0,044	
	Cheminée à foyer fermé ou insert	15	9,6	0,152	0,004

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en benzo[a]pyrène (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	35	22,4	0,065	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	8,3	0,072	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	41,0	0,053	
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	29	18,6	0,044	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	15	23,8	0,152	0,14
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	35	55,6	0,065	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	20,6	0,072	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	Entre 1 et 4 jours	33	50,8	0,068	0,09
	Entre 5 et 8 jours	32	49,2	0,174	

p-valeurs du test de Kruskal-Wallis en gras inférieures à 0,05.

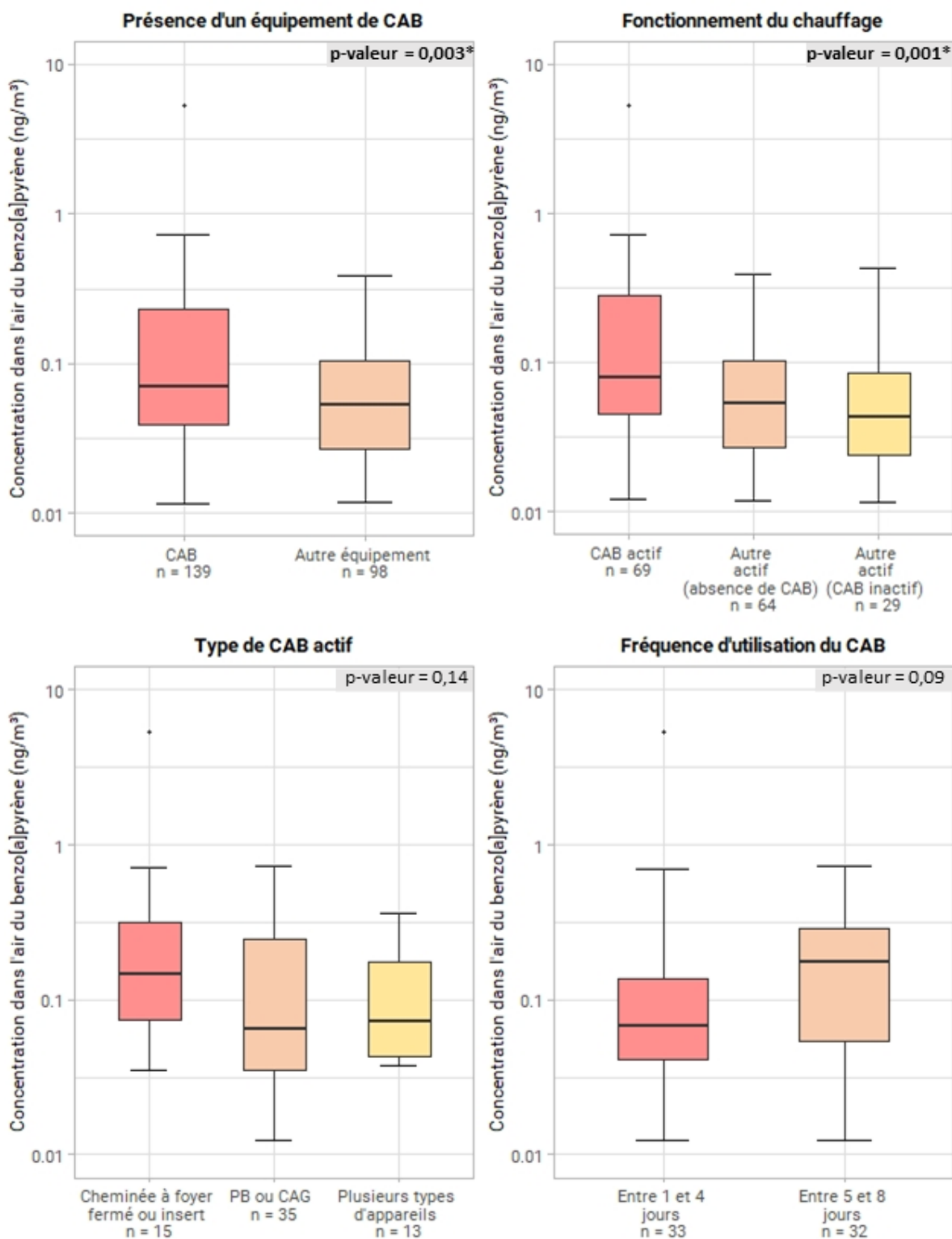
Tableau 25. Taux de quantification du benzo[a]pyrène en fonction des variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	%>LQM
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	139	42,4
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	98	34,7
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	69	62,3
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	46,9
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	29	34,5
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	15	73,3
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	35	54,3
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	61,5

Variable	Modalité	Nombre de logements	%>LQM
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	46,9
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	29	34,5
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	15	73,3
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	35	54,3
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	61,5
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	Entre 1 et 4 jours	33	51,5
	Entre 5 et 8 jours	32	71,9

La concentration en benzo[a]pyrène est significativement plus élevée en présence d'un équipement de chauffage au bois, en particulier lorsqu'il est actif et qu'il s'agit d'une cheminée à foyer fermé ou d'un insert, relativement au risque d'erreur de 5 %.

Les distributions statistiques de la concentration en benzo[a]pyrène en fonction des variables relatives au chauffage bois sont représentées par des boîtes à moustaches sur la Figure 7. Les graphiques sont projetés sur une échelle logarithmique afin de mieux visualiser la dispersion, car les niveaux de concentrations mesurés sont très faibles. La concentration en benzo[a]pyrène est plus élevée en présence d'un appareil de chauffage au bois, en particulier lorsqu'il est actif. Toutefois, il convient d'être vigilant quant à l'interprétation des résultats, en raison du taux important de valeurs de concentrations inférieures à la LQM (62 %).



* p-valeurs du test de Kruskal-Wallis inférieures à 0,05. CAB : chauffage au bois ; PB : poêle à bois ; CG : chaudière à granulés.

Figure 7. Boîtes à moustaches de la concentration en benzo[a]pyrène en fonction des variables relatives au chauffage au bois

3.4. Particules ultrafines (PUF)

3.4.1. Distributions statistiques

Les distributions statistiques de la concentration en nombre, de la surface spécifique et du LDSA des PUF mesurées dans les logements du périmètre de l'étude (cf. section 2.1.1.1) sont présentées dans le Tableau 26 et le Tableau 27. Les médianes des trois paramètres sont plus élevées pour les moyennes hebdomadaires calculées sur l'ensemble des observations.

Tableau 26. Distributions des moyennes hebdomadaires de la concentration en nombre, de la surface spécifique et du LDSA des PUF dans l'air des logements (n = 31)

Paramètre	MG	IC 95%	Min	P10	P25	Médiane	P75	P90*	Max
Concentration en nombre (pt/cm ³)	8 167	[6 922 ; 9 636]	108	4 616	6 230	8 447	11 552	14 524	458 633
Surface spécifique (µm ² /cm ³)	148	[124 ; 176]	3,03	86,7	106	147	193	220	8 050
LDSA (µm ² /cm ³)	22,3	[19,2 ; 25,9]	0,34	15,3	17,3	22,5	28,7	38,0	996

* Valeur non robuste fournie à titre indicatif, le P90 n'est robuste qu'à partir de 80 observations (European Food Safety Authority, 2011). MG : moyenne géométrique ; IC : intervalle de confiance de la moyenne géométrique ; min : minimum de la moyenne hebdomadaire ; max : maximum de la moyenne hebdomadaire ; P : centile ; LDSA : surface de dépôt pulmonaire.

Tableau 27. Distributions des moyennes hebdomadaires sur la plage horaire de 16h à 5h, de la concentration en nombre, de la surface spécifique et du LDSA des PUF dans l'air des logements (n = 31)

Paramètre	MG	IC 95%	Min	P10	P25	Médiane	P75	P90*	Max
Concentration en nombre (pt/cm ³)	7 884	[6 422 ; 9 678]	108	3 973	5 293	6 658	11 612	15 441	458 633
Surface spécifique (µm ² /cm ³)	154	[122 ; 194]	3,03	74	96	143	218	328	8 050
LDSA (µm ² /cm ³)	22,5	[18,4 ; 27,5]	0,34	12,6	14,3	19,9	29,7	56,9	996

* Valeur non robuste fournie à titre indicatif, le P90 n'est robuste qu'à partir de 80 observations (European Food Safety Authority, 2011). MG : moyenne géométrique ; IC : intervalle de confiance de la moyenne géométrique ; min : minimum de la moyenne hebdomadaire ; max : maximum de la moyenne hebdomadaire ; P : centile ; LDSA : surface de dépôt pulmonaire.

3.4.2. Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt

Les résultats des analyses bivariées entre les paramètres de mesure des PUF sur la plage horaire de 16h à 5h et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois sont présentés dans le Tableau 28. Les analyses ont été réalisées pour uniquement deux variables d'intérêt : la présence d'au moins un équipement de chauffage au bois et la présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif, car la taille de l'échantillon de logements est faible (n = 31) et ne permet pas une granularité plus fine pour les analyses bivariées. Les tests statistiques ne montrent **aucune corrélation significative entre ces deux variables et les paramètres de mesure des PUF** (test de Kruskal-Wallis, p-valeur > 0,05).

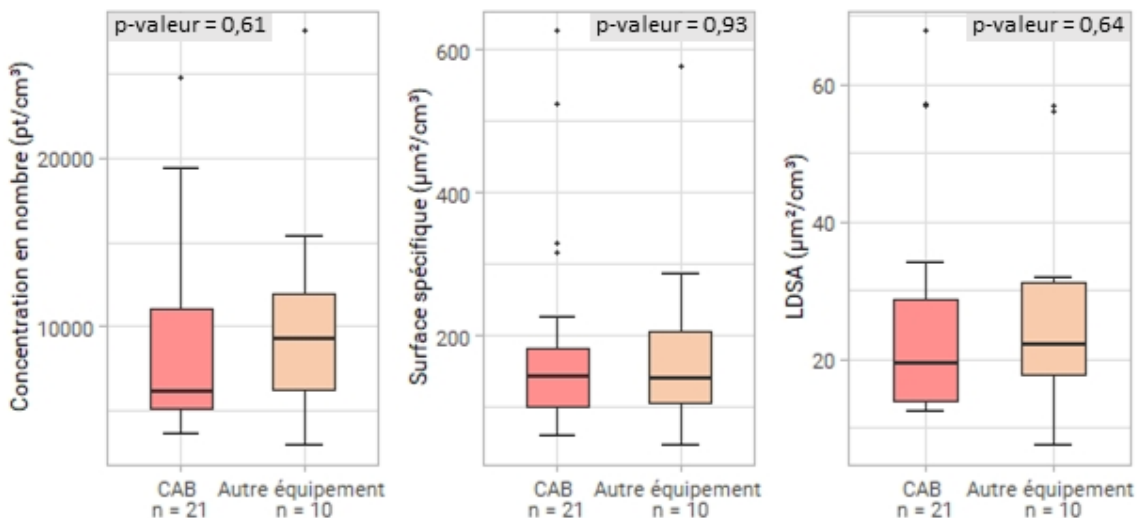
Tableau 28. Résultats des analyses bivariées entre les paramètres de mesure des PUF sur la plage horaire de 16h à 5h et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion de logements (%)	Médiane			Test de Kruskal-Wallis p-valeur
				Concentration en nombre (pt/cm ³)	Surface spécifique (µm ² /cm ³)	LDSA (µm ² /cm ³)	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	21	67,7	6 109	143	19,4	Entre 0,61 et 0,93
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	10	32,3	9 206	141	22,2	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	16	51,6	8 828	171	25,7	Entre 0,72 et 0,87
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	7	22,6	8 972	144	20,1	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	2	6,5	5 041	124	16,6	

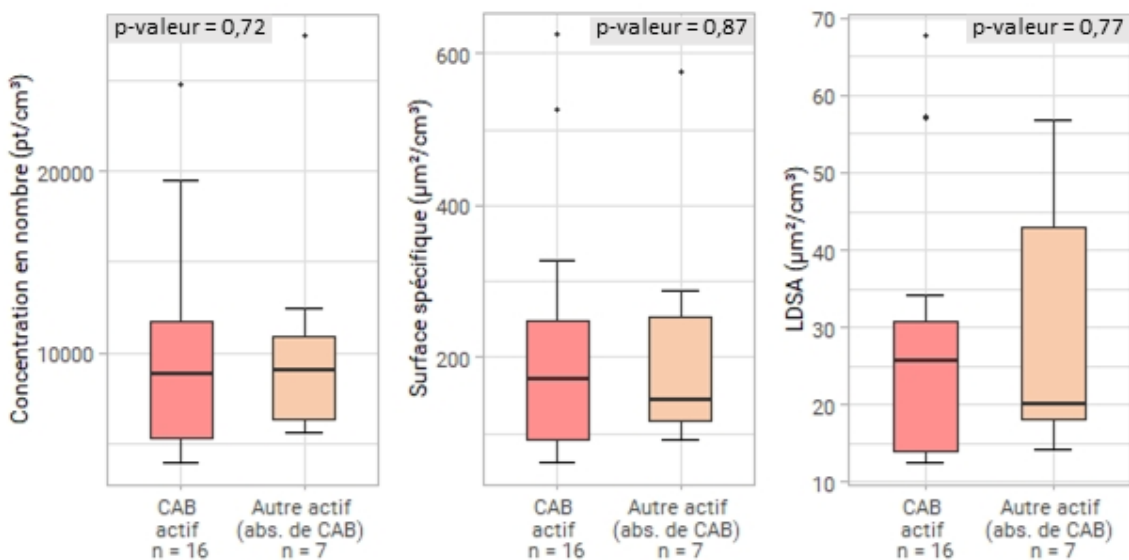
LDSA : surface de dépôt pulmonaire.

Les distributions statistiques des paramètres de mesure des PUF sur la plage horaire de 16h à 5h, en fonction des variables relatives au chauffage bois, sont représentées par des boîtes à moustaches sur la Figure 8. Une forte variance des paramètres est constatée et aucune différence nette n'est relevée entre les modalités des variables.

Présence d'un équipement de chauffage au bois



Fonctionnement du chauffage



La modalité « Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif) » n'est pas représentée compte tenu du faible nombre d'observations (n = 2). CAB : chauffage au bois ; abs. : absence.

Figure 8. Boîtes à moustaches des paramètres relatifs aux PUF en fonction des variables sur le chauffage au bois

3.5. Benzène

3.5.1. Distribution statistique

Le benzène a été détecté et quantifié dans 98 % des logements du périmètre de l'étude, défini dans la section 2.1.1.1. La distribution statistique de la concentration en benzène dans les logements est présentée dans le Tableau 29.

Tableau 29. Distribution de la concentration en benzène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans l'air des logements ($n = 257$)

Paramètre	MG	IC 95%	Min	P10	P25	Médiane	P75	P90	Max
Concentration intérieure en benzène	1,22	[1,10 ; 1,34]	<LDM	0,512	0,719	1,08	1,82	3,60	15,4

MG : moyenne géométrique ; IC : intervalle de confiance de la moyenne géométrique ; min : minimum ; max : maximum ; P : centile ; LDM : limite de détection de la méthode (moyenne).

3.5.2. Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt

Les résultats des analyses bivariées entre la concentration en benzène et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois sont présentés dans le Tableau 30 et en annexe 7.3.

Tableau 30. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en benzène et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

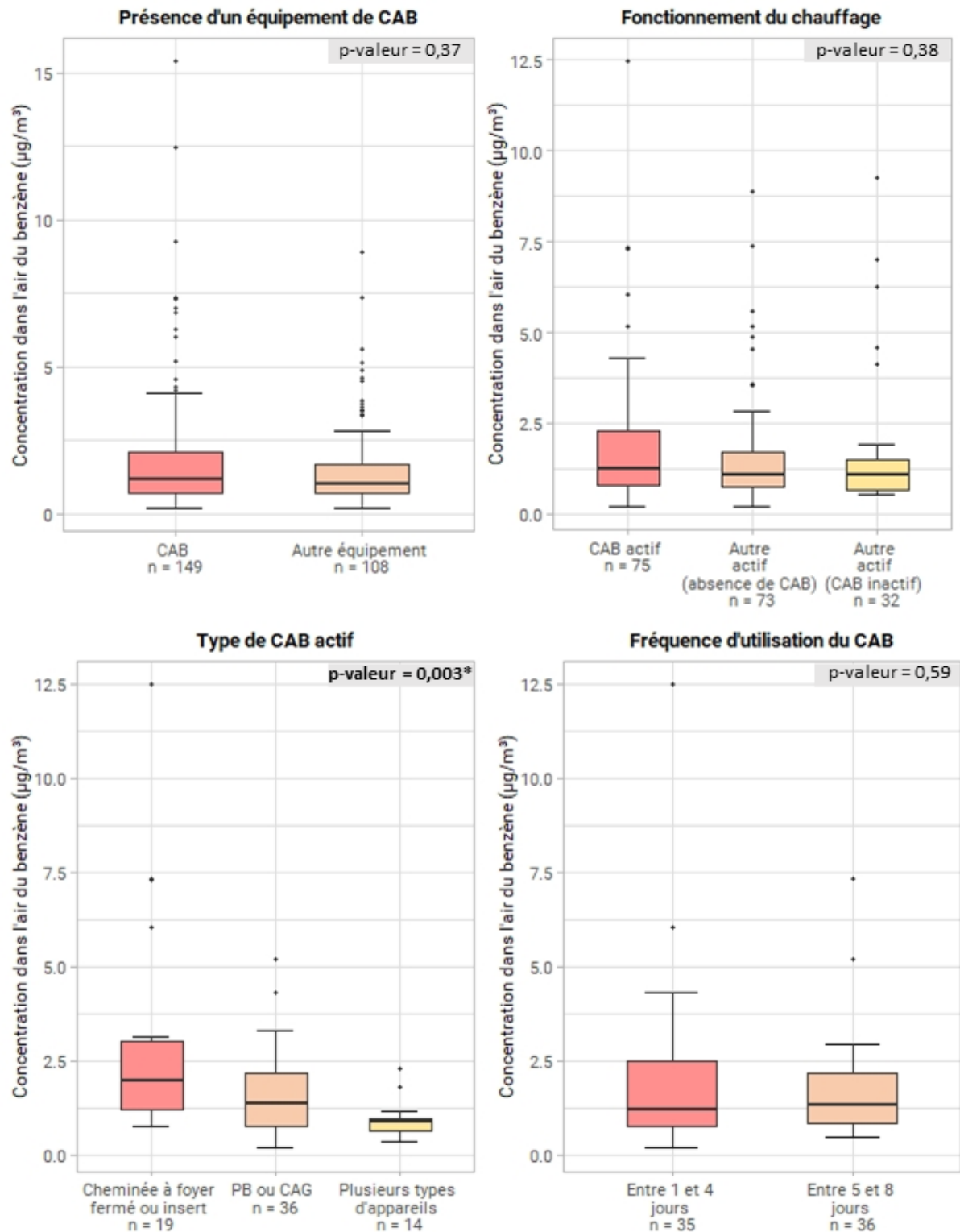
Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en benzène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	149	58,0	1,17	0,37
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	108	42,0	1,03	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	75	41,7	1,24	0,38
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	73	40,6	1,10	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	32	17,8	1,09	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	10,9	1,99	0,01
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	36	20,7	1,35	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en benzène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	8,0	0,87	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	73	42,0	1,10	
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	32	18,4	1,09	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	27,5	1,99	0,003
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	36	52,2	1,35	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	20,3	0,87	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	Entre 1 et 4 jours	35	49,3	1,22	0,59
	Entre 5 et 8 jours	36	50,7	1,34	

p-valeurs du test de Kruskal-Wallis en gras inférieures à 0,05.

La concentration en benzène est significativement corrélée au type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête, relativement au risque d'erreur de 5 %. Elle est plus élevée dans les logements équipés d'une cheminée à foyer fermé, d'un insert, d'un poêle à bois ou d'une chaudière à granulés en fonctionnement (concentrations médianes $\geq 1,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$), par rapport aux autres appareils de chauffage.

Les distributions statistiques de la concentration en benzène en fonction des variables relatives au chauffage bois sont représentées par des boîtes à moustaches sur la Figure 9. Elles illustrent les résultats précédents. La concentration en benzène est plus élevée dans les logements équipés d'une cheminée à foyer fermé actif ou d'un insert actif par rapport aux autres types d'appareils de chauffage au bois.



* p-valeur du test de Kruskal-Wallis inférieure à 0,05. CAB : chauffage au bois ; PB : poêle à bois ; CG : chaudière à granulés.

Figure 9. Boîtes à moustaches de la concentration en benzène en fonction des variables relatives au chauffage au bois

3.6. Formaldéhyde

3.6.1. Distribution statistique

Le formaldéhyde a été détecté et quantifié dans tous les logements du périmètre de l'étude, défini dans la section 2.1.1.1. La distribution statistique de la concentration en formaldéhyde dans les logements est présentée dans le Tableau 31.

Tableau 31. Distribution de la concentration en formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans l'air des logements ($n = 259$)

Paramètre	MG	IC 95%	Min	P10	P25	Médiane	P75	P90	Max
Concentration intérieure en formaldéhyde	14,9	[14,1 ; 15,9]	3,37	8,16	10,8	14,9	21,1	28,7	44,7

MG : moyenne géométrique ; IC : intervalle de confiance de la moyenne géométrique ; min : minimum ; max : maximum ; P : centile.

3.6.2. Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt

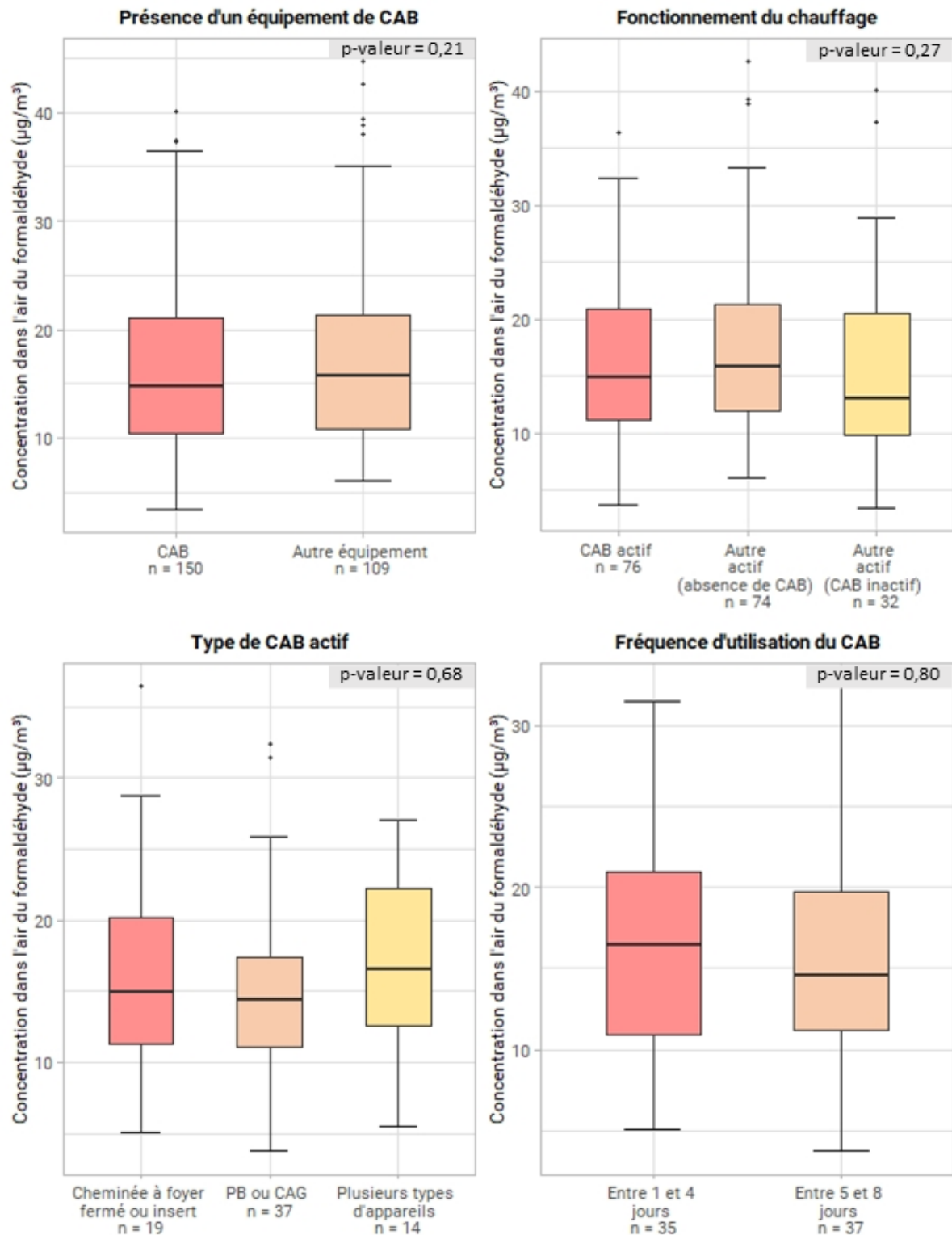
Les résultats des analyses bivariées entre la concentration en formaldéhyde et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois sont présentés dans le Tableau 32 et en annexe 7.3.

Tableau 32. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en formaldéhyde et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	150	57,9	14,8	0,21
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	109	42,1	15,8	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	76	41,8	14,8	0,27
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	40,7	15,8	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	32	17,6	13,1	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	10,8	14,9	0,47
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	37	21,0	14,3	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	8,0	16,6	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	42,0	15,8	
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	32	18,2	13,1	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	27,1	14,9	0,68
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	37	52,9	14,3	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	20,0	16,6	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	Entre 1 et 4 jours	35	48,6	16,4	0,80
	Entre 5 et 8 jours	37	51,4	14,6	

Aucune corrélation significative n'est constatée entre la concentration en formaldéhyde et les variables relatives au chauffage au bois, relativement au risque d'erreur de 5 %. Ces résultats sont illustrés sur la Figure 10, par des boîtes à moustaches.



CAB : chauffage au bois ; PB : poêle à bois ; CG : chaudière à granulés.

Figure 10. Boîtes à moustaches de la concentration en formaldéhyde en fonction des variables relatives au chauffage au bois

3.7. Acétaldéhyde

3.7.1. Distribution statistique

L'acétaldéhyde a été détecté et quantifié dans tous les logements du périmètre de l'étude, défini dans la section 2.1.1.1. La distribution statistique de la concentration en acétaldéhyde dans les logements est présentée dans le Tableau 33.

Tableau 33. Distribution de la concentration en acétaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans l'air des logements ($n = 259$)

Paramètre	MG	IC 95%	Min	P10	P25	Médiane	P75	P90	Max
Concentration intérieure en acétaldéhyde	8,62	[8,10 ; 9,17]	1,60	4,63	6,07	8,53	11,7	16,9	38,3

MG : moyenne géométrique ; IC : intervalle de confiance de la moyenne géométrique ; min : minimum ; max : maximum ; P : centile.

3.7.2. Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt

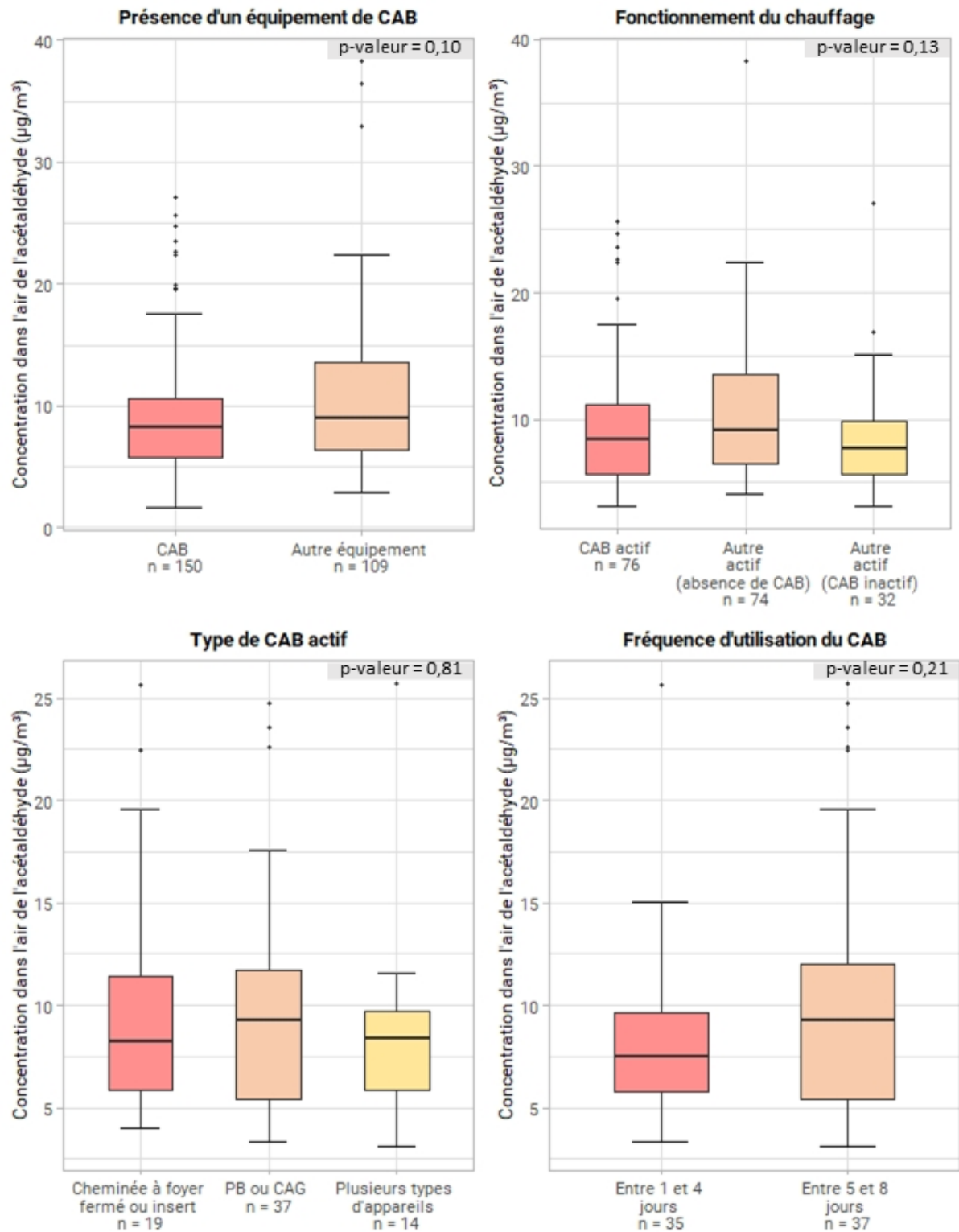
Les résultats des analyses bivariées entre la concentration en acétaldéhyde et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois sont présentés dans le Tableau 34 et en annexe 7.3.

Tableau 34. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en acétaldéhyde et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en acétaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	150	57,9	8,27	0,10
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	109	42,1	9,01	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	76	41,8	8,36	0,13
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	40,7	9,07	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	32	17,6	7,67	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	10,8	8,27	0,34
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	37	21,0	9,23	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en acétaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	8,0	8,39	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	42,0	9,07	
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	32	18,2	7,67	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	27,1	8,27	0,81
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	37	52,9	9,23	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	20,0	8,39	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	Entre 1 et 4 jours	35	48,6	7,52	0,21
	Entre 5 et 8 jours	37	51,4	9,25	

Aucune corrélation significative n'est constatée entre la concentration en acétaldéhyde et les variables relatives au chauffage au bois, relativement au risque d'erreur de 5 %. Ces résultats sont illustrés sur la Figure 11, par des boîtes à moustaches.



CAB : chauffage au bois ; PB : poêle à bois ; CG : chaudière à granulés.

Figure 11. Boîtes à moustaches de la concentration en acétaldéhyde en fonction des variables relatives au chauffage au bois

3.8. NO₂

3.8.1. Distributions statistiques

Le NO₂ a été détecté et quantifié dans 54 % des logements du périmètre de l'étude, défini dans la section 2.1.1.1.

Les distributions statistiques de la concentration en NO₂ dans les logements et du ratio des concentrations intérieures sur extérieures sont présentées dans le Tableau 35. La concentration moyenne en NO₂ dans l'air des logements est de 4,5 µg/m³. Le ratio moyen air intérieur/extérieur est de 0,85, indiquant que la pollution intérieure en NO₂ provient principalement de sources extérieures. Les concentrations en NO₂ dans l'air intérieur et extérieur sont significativement corrélées (test de Spearman, p-valeur < 0,0001) et présentent un coefficient de corrélation de Spearman de 0,37.

Tableau 35. Distribution de la concentration en NO₂ (µg/m³) dans l'air des logements et du ratio des concentrations intérieures sur extérieures (n = 259)

Paramètre	MG	IC 95%	Min	P10	P25	Médiane	P75	P90	Max
Concentration intérieure en NO ₂	4,54	[4,16 ; 4,96]	1,81	2,16	2,22	4,69	8,01	11,1	30,7
Ratio int./ext.	0,85	[0,764 ; 0,949]	0,073	0,262	0,529	0,90	1,34	2,65	12,0

MG : moyenne géométrique ; IC : intervalle de confiance de la moyenne géométrique ; min : minimum ; max : maximum ; P : centile ; int. : concentrations intérieures ; ext. : concentrations extérieures.

3.8.2. Analyse bivariée en fonction des variables d'intérêt

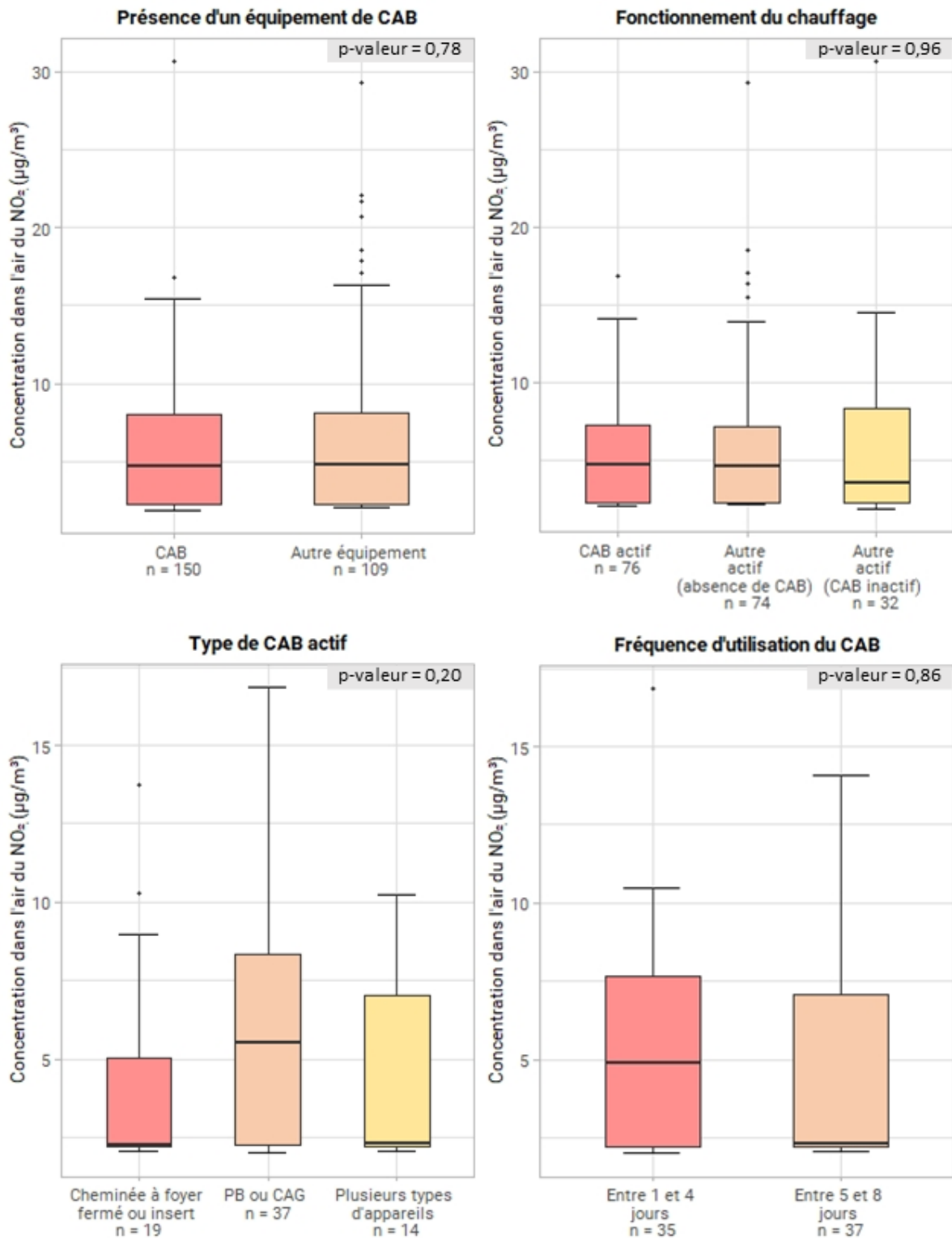
Les résultats des analyses bivariées entre la concentration en NO₂ et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois sont présentés dans le Tableau 36 et en annexe 7.3.

Tableau 36. Résultats des analyses bivariées entre la concentration en NO₂ et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en NO ₂ (µg/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	150	57,9	4,66	0,78
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	109	42,1	4,77	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	76	41,8	4,69	0,96
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	40,7	4,54	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en NO ₂ (µg/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	32	17,6	3,49	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	10,8	2,27	0,51
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	37	21,0	5,52	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	8,0	2,31	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	42,0	4,54	
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	32	18,2	3,49	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	27,1	2,27	0,20
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle ou automatique	37	52,9	5,52	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	20,0	2,31	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	Entre 1 et 4 jours	35	48,6	4,88	0,86
	Entre 5 et 8 jours	37	51,4	2,32	

Aucune corrélation significative n'est constatée entre la concentration en NO₂ et les variables relatives au chauffage au bois, relativement au risque d'erreur de 5 %. Ces résultats sont illustrés sur la Figure 12, par des boîtes à moustaches.



CAB : chauffage au bois ; PB : poêle à bois ; CG : chaudière à granulés.

Figure 12. Boîtes à moustaches de la concentration en NO₂ en fonction des variables relatives au chauffage au bois

3.9. Analyse des valeurs de concentrations extrêmes

Pour chaque polluant ou groupe de polluants, les 5 % des logements de l'échantillon de l'étude (cf. section 2.1.1.1), avec les valeurs de concentrations les plus élevées ont été identifiés, correspondant à un total de 11 à 13 logements selon le polluant. Les distributions statistiques de ces logements ont été établies en fonction de la présence ou non d'un système de chauffage au bois, ainsi que du type d'équipement de chauffage en fonctionnement.

La prévalence de l'équipement de chauffage au bois est de 58 % sur l'échantillon de l'étude (soit 150 logements équipés d'un appareil de chauffage au bois sur les 259 logements étudiés). Pour 5 des 8 polluants ou groupes de polluants étudiés, la prévalence de l'équipement de chauffage au bois dans l'échantillon des valeurs extrêmes est similaire à celle de l'échantillon de l'étude (entre 46 % et 64 %). Pour le benzo[a]pyrène et le benzène, les logements équipés d'un appareil de chauffage au bois sont surreprésentés dans l'échantillon des valeurs extrêmes (respectivement 91 % et 75 %), relativement à l'échantillon de l'étude. Pour le NO₂, les logements équipés d'un appareil de chauffage au bois sont au contraire sous-représentés (15 %) (Tableau 37).

La prévalence de l'équipement de chauffage au bois parmi les logements ayant allumé le chauffage est de 42% (soit 76 logements avec un appareil de chauffage au bois actif sur les 182 logements avec un appareil de chauffage actif). Pour les PM_{2,5}, les groupes de 15 et 10 HAP, le benzène et l'acétaldéhyde, la proportion de logements ayant utilisé un appareil de chauffage au bois pendant l'enquête est similaire à celle des logements ayant utilisé un autre type de chauffage (entre 40 % et 60 %). Pour le benzo[a]pyrène, les logements avec un équipement de chauffage au bois actif pendant l'enquête sont fortement surreprésentés dans l'échantillon des valeurs extrêmes (89 %). A l'inverse, pour le formaldéhyde et le NO₂, ces logements sont sous-représentés (≤ 17 %) (Tableau 38).

Tableau 37. Distribution statistique des valeurs de concentrations extrêmes des polluants en fonction de la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois

Paramètre	Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois versus au moins un autre équipement de chauffage	Nombre de logements avec concentration > P95	Proportion (%)	Médiane *	Min	Max
PM _{2,5}	Au moins un équipement de chauffage au bois	6	54,5%	174	95	251
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	5	45,5%	99	76	131
Σ15 HAP	Au moins un équipement de chauffage au bois	7	63,6%	53	47	121
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	4	36,4%	60	50	105
Σ10 HAP	Au moins un équipement de chauffage au bois	7	63,6%	56	39	106
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	4	36,4%	55	47	97
Benzo[a]pyrène	Au moins un équipement de chauffage au bois	10	90,9%	0,56	0,41	5,3

Paramètre	Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois versus au moins un autre équipement de chauffage	Nombre de logements avec concentration > P95	Proportion (%)	Médiane *	Min	Max
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	1	9,1%	1,2		
Benzène	Au moins un équipement de chauffage au bois	9	75,0%	7,3	6,0	15
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	3	25,0%	7,4	5,6	8,9
Formaldéhyde	Au moins un équipement de chauffage au bois	6	46,2%	37	34	40
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	7	53,8%	39	35	45
Acétaldéhyde	Au moins un équipement de chauffage au bois	8	61,5%	24	22	27
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	5	38,5%	33	22	38
NO₂	Au moins un équipement de chauffage au bois	2	15,4%	[17 ; 31]		
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	11	84,6%	18	15	29

* Valeur non robuste fournie à titre indicatif lorsque l'effectif est supérieur ou égal à 3, la médiane n'est robuste qu'à partir de 16 observations (European Food Safety Authority, 2011). Min : minimum calculé lorsque l'effectif est supérieur ou égal à 3 ; max : maximum calculé lorsque l'effectif est supérieur ou égal à 3.

Tableau 38. Distribution statistique des valeurs de concentrations extrêmes des polluants en fonction du type d'équipement de chauffage actif

Paramètre	Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Nombre de logements	Proportion (%)	Médiane *	Min	Max
PM_{2,5}	Cheminée à foyer fermé ou insert	2	25,0%	[174 ; 251]		
	Cheminée à foyer ouvert	1	12,5%	95		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	1	12,5%	104		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	0	0,0%	-		
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	0	0,0%	-		
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	2	25,0%	[99 ; 131]		
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	2	25,0%	[175 ; 246]		
15 HAP	Cheminée à foyer fermé ou insert	2	25,0%	[50 ; 53]		
	Cheminée à foyer ouvert	1	12,5%	49		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	1	12,5%	121		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	0	0,0%	-		
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	0	0,0%	-		
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	4	50,0%	60	50	105
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	0	0,0%	-		
10 HAP	Cheminée à foyer fermé ou insert	2	25,0%	[40 ; 56]		
	Cheminée à foyer ouvert	1	12,5%	40		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	1	12,5%	106		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	0	0,0%	-		
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	0	0,0%	-		
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	4	50,0%	55	47	97
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	0	0,0%	-		
Benzo[a]pyrène	Cheminée à foyer fermé ou insert	3	33,3%	0,71	0,41	5,33
	Cheminée à foyer ouvert	1	11,1%	0,51		

Paramètre	Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Nombre de logements	Proportion (%)	Médiane *	Min	Max
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	4	44,4%	0,58	0,43	0,72
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	0	0,0%	-		
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	0	0,0%	-		
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	0	0,0%	-		
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	1	11,1%	0,43		
Benzène	Cheminée à foyer fermé ou insert	4	40,0%	7,3	6,0	12,5
	Cheminée à foyer ouvert	0	0,0%	-		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	0	0,0%	-		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	0	0,0%	-		
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	0	0,0%	-		
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	3	30,0%	7,4	5,6	8,9
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	3	30,0%	7,0	6,3	9,3
Formaldéhyde	Cheminée à foyer fermé ou insert	1	16,7%	36		
	Cheminée à foyer ouvert	0	0,0%	-		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	0	0,0%	-		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	0	0,0%	-		
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	0	0,0%	-		
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	3	50,0%	39	39	43
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	2	33,3%	[37 ; 40]		
Acétaldéhyde	Cheminée à foyer fermé ou insert	2	20,0%	[22 ; 26]		
	Cheminée à foyer ouvert	0	0,0%	-		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	3	30,0%	24	23	25
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	0	0,0%	-		

Paramètre	Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Nombre de logements	Proportion (%)	Médiane *	Min	Max
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	1	10,0%	26		
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	3	30,0%	22	22	38
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	1	10,0%	27		
NO₂	Cheminée à foyer fermé ou insert	0	0,0%	-		
	Cheminée à foyer ouvert	0	0,0%	-		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	1	14,3%	17		
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	0	0,0%	-		
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	0	0,0%	-		
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	5	71,4%	17	15	29
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	1	14,3%	31		

* Valeur non robuste fournie à titre indicatif lorsque l'effectif est supérieur ou égal à 3, la médiane n'est robuste qu'à partir de 16 observations (European Food Safety Authority, 2011). Min : minimum calculé lorsque l'effectif est supérieur ou égal à 3 ; max : maximum calculé lorsque l'effectif est supérieur ou égal à 3.

4. Discussion

4.1. Principaux résultats

La concentration dans l'air des logements des polluants suivants : particules fines (fraction $PM_{2,5}$), benzo[a]pyrène, somme des 15 HAP recherchés dans la CNL2 (ou des 10 HAP d'intérêt) et benzène, montre une corrélation significative avec une ou plusieurs variables de présence et d'activité de chauffage au bois, et ce pour un risque d'erreur inférieur à 5 %. En revanche, aucune corrélation significative n'a été observée pour les particules ultrafines, le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et le NO_2 . Les équipements de chauffage au bois étudiés comprennent les équipements principaux et d'appoint. Les analyses n'ont pas été réalisées pour les logements équipés d'une cheminée à foyer ouvert actif pendant la semaine d'enquête en raison de leur faible effectif ($n = 5$).

La concentration en $PM_{2,5}$ et benzène n'est pas significativement plus élevée en présence d'un appareil de chauffage au bois, comparativement à un autre mode de chauffage. En revanche, elle est plus élevée en présence d'une cheminée à foyer fermé actif ou d'un insert actif pendant la semaine d'enquête, comparativement aux autres types d'appareils de chauffage au bois (poêle à bois ou chaudières à granulés). La concentration totale en HAP (15 HAP et 10 HAP) est plus élevée dans les logements équipés d'un appareil de chauffage au bois, en particulier lorsque l'appareil est actif. La concentration totale en HAP la plus élevée est observée dans les logements équipés d'un poêle à bois ou d'une chaudière à granulés à alimentation manuelle. La concentration en benzo[a]pyrène est plus élevée en présence d'un équipement de chauffage au bois, en particulier lorsqu'il est actif et qu'il s'agit d'une cheminée à foyer fermé ou d'un insert.

Pour les particules fines ($PM_{2,5}$) et la somme des HAP, ces résultats ont été observés d'une part dans les analyses bivariées et, confirmés en partie, dans les analyses multivariées (modèles de régression linéaire généralisée). La concentration en $PM_{2,5}$ est significativement plus élevée en présence d'une cheminée à foyer fermé actif ou d'un insert actif pendant l'enquête, comparativement aux autres types d'appareils de chauffage au bois. La concentration totale en HAP est significativement plus élevée en présence d'un appareil de chauffage au bois actif pendant l'enquête, relativement aux autres modes de chauffage. Toutefois, la contribution au modèle de cette variable sur le chauffage au bois est faible. Les analyses multivariées tiennent compte de variables d'ajustement pour quantifier l'impact du chauffage au bois sur la concentration des polluants (approche « toutes choses étant égales par ailleurs »). Pour l'analyse de la concentration intérieure en $PM_{2,5}$, les variables d'ajustement sont la densité d'occupation et la concentration extérieure en $PM_{2,5}$. Pour l'analyse de la concentration totale en HAP, il s'agit de la période de construction du bâtiment, de la surface de la pièce de mesure et de l'écart moyen entre les températures intérieures et extérieures.

4.2. Limites et incertitudes

La CNL2 n'a pas été initialement dimensionnée pour réaliser une étude spécifique sur le chauffage au bois. Des traceurs importants de la combustion de biomasse, comme par exemple le levoglucosan pour la combustion de bois bûche, n'ont pas été mesurés. Parmi les HAP, le naphthalène n'a pas été mesuré durant toute la semaine d'enquête, mais uniquement pendant deux heures par prélèvement actif, alors qu'il est d'intérêt pour l'étude sur le chauffage au bois. Ces résultats ne sont donc pas exploitables dans le cadre de l'étude. La campagne ne vise pas exclusivement des logements équipés de chauffage au bois, dont l'impact aurait pu être mieux estimé en réalisant des mesures aux deux périodes de chauffe et hors-chauffe. Cette campagne est une étude transversale qui vise avant tout à établir un état de la qualité de l'air à l'échelle du parc national de résidences principales en France métropolitaine continentale, par le biais de distributions statistiques de différents indicateurs de la QAI. De ce fait, certaines modalités des variables d'intérêt sur le chauffage au bois sont peu représentées en nombre de logements. Par exemple, seulement cinq logements du périmètre de l'étude ont utilisé une cheminée

à foyer ouvert pendant la semaine d'enquête. Ces données n'ont pas pu être exploitées dans certaines analyses. Par ailleurs, les questionnaires n'ont pas été spécifiquement conçus pour l'étude sur le chauffage au bois. De ce fait, certains paramètres d'intérêt n'ont pas été renseignés, tels que des caractéristiques plus détaillées relatives aux équipements (âge de l'équipement, labellisation Flamme Verte) ou à leur utilisation (périodes précises de fonctionnement, type d'allumage, essence de bois utilisée, autres caractéristiques du combustible, etc.). S'agissant des types d'appareils justement, la construction même du questionnaire réunit dans une même catégorie les poêles et les chaudières, rendant impossible une distinction plus fine pour les équipements suivants : poêles à bûches, poêles à granulés et chaudière à granulés. De plus, la question relative au mode d'alimentation « manuel » ou « automatique » a pu être interprétée d'une manière erronée par les répondants. Enfin, les informations relatives à la perméabilité du logement (infiltration d'air au travers de l'enveloppe du bâtiment) seule ne sont pas disponibles dans cette étude. Les menuiseries et la qualité de leur isolation sont renseignées, tout comme le matériau principal de construction du bâtiment, le système de ventilation et les pratiques d'aération. Ces éléments ne permettent toutefois pas de qualifier la perméabilité d'un bâtiment, mais participe de manière globale au renouvellement d'air du logement qui régit le transfert de l'air extérieur vers l'intérieur du logement (et inversement).

L'influence des installations de chauffage au bois sur la concentration intérieure en polluants a été estimée au travers de modèles statistiques. Les polluants ciblés étaient les particules fines (fraction massique $PM_{2,5}$) et les HAP (concentration totale en 15 ou 10 HAP d'intérêt). Les 10 HAP d'intérêt ont été sélectionnés à partir d'études d'émissions (Allemand et al., 2008; Collet, 2009) et d'une étude en air extérieur proche (Khalili et al., 1995). Le choix s'est porté sur ces polluants car les études précédentes ont montré que les équipements de chauffage au bois contribuent à leur émission (Allemand et al., 2008). De plus, ces polluants, ainsi que le benzo[a]pyrène et des PUF, ont été mesurés dans le séjour principal, qui est la pièce où les appareils de chauffage au bois sont habituellement installés. Les autres polluants étudiés (benzène, formaldéhyde, acétaldéhyde et NO_2) ont été mesurés dans la chambre de la personne de référence du logement car l'objectif de la campagne CNL2 visait avant tout de se rapprocher de l'exposition des occupants, au travers du temps passé dans leur logement, qui se fait le plus souvent dans la chambre. Néanmoins, les écarts entre les pièces d'un même logement restent en général limités et se retrouvent lissés du fait de l'agrégation des données à l'échelle de la semaine et de l'homogénéisation des concentrations entre les pièces liée au déplacement des occupants d'une pièce à l'autre et à l'ouverture des fenêtres qui vient perturber le schéma classique de balayage de la ventilation des pièces de vie aux pièces de service. Le benzo[a]pyrène n'a pas pu être retenu pour la modélisation en raison des faibles niveaux de concentrations mesurées (concentrations quantifiées dans 38 % des logements). Il est en revanche intégré dans la somme des concentrations en 10 ou 15 HAP. Les particules ultrafines (PUF) ont été mesurées dans un nombre de logements restreint et insuffisant pour une modélisation robuste ($n = 31$).

La période de construction est une des principales variables explicatives des concentrations en HAP. Elle doit être interprétée comme un proxy de plusieurs facteurs auxquels elle est significativement corrélée, notamment le type de système de ventilation, la configuration de la cuisine et la réalisation de travaux de réhabilitation. Ces variables influencent la pollution de l'air intérieur en HAP et sont donc également des facteurs de confusion, mais elles n'ont pas été intégrées aux modèles afin de limiter la multicollinéarité.

5. Conclusion

L'étude a permis d'apporter des éléments de réponse à la saisine n°2022-SA-0043 qui avait pour objectif, entre autres, de caractériser l'impact des appareils de chauffage au bois sur les concentrations de polluants dans l'air intérieur.

Les données de la CNL2 ont été exploitées dans le cadre de cette étude. Le périmètre a été limité aux 259 maisons individuelles enquêtées en période de chauffe, sans installation de chauffage active en saison estivale, et dont les occupants n'ont ni fumé, ni allumé de bougies ou d'encens, ni utilisé d'appareil de chauffage d'appoint à combustion non raccordé, de type poêle à gaz ou pétrole, pendant la semaine d'enquête, afin de mieux isoler et évaluer les effets du chauffage au bois sur la QAI.

L'étude se focalise sur la concentration dans l'air intérieur de plusieurs polluants identifiés comme potentiellement d'intérêt, en lien avec l'utilisation d'appareils de chauffage au bois. Ces polluants d'intérêt sont les particules fines (fraction massique $PM_{2,5}$), les particules ultrafines (PUF), les HAP (concentration totale en 15 HAP d'une part et de 10 HAP d'intérêt d'autre part), le benzo[a]pyrène, le benzène, le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et le NO_2 .

Dans un premier temps, les niveaux de concentrations des polluants ont été décrits et comparés en fonction de la présence ou non d'un équipement de chauffage au bois, et de son utilisation ou non durant la semaine d'enquête, sans prise en compte des variables de confusion. Les résultats montrent que la concentration dans l'air des $PM_{2,5}$, de la somme des 15 HAP recherchés dans la CNL2, de la somme des 10 HAP d'intérêt et du benzène, est corrélée à une ou plusieurs variables sur le chauffage au bois, avec un risque d'erreur inférieur à 5 %. La concentration en $PM_{2,5}$ et benzène n'est pas significativement plus élevée en présence d'un appareil de chauffage au bois actif, comparativement à un autre mode de chauffage. En revanche, elle est plus élevée en présence d'une cheminée à foyer fermé actif ou d'un insert actif pendant la semaine d'enquête, relativement aux autres types d'appareils de chauffage au bois (poêle à bois ou chaudières à granulés). La concentration totale en HAP est plus élevée dans les logements équipés d'un appareil de chauffage au bois, en particulier lorsque l'appareil est actif. La concentration totale en HAP la plus élevée est observée dans les logements équipés d'un poêle à bois actif ou d'une chaudière à granulés active. La concentration en benzo[a]pyrène la plus élevée est constatée dans les logements avec une cheminée à foyer fermé actif ou un insert actif.

Dans un second temps, l'impact du chauffage au bois sur la concentration dans l'air de certains polluants a été évalué en tenant compte des variables de confusion potentielles. Il s'agit d'une approche « toutes choses étant égales par ailleurs », mise en œuvre à l'aide d'une méthode de régression linéaire généralisée, pour la concentration des $PM_{2,5}$ et de la somme des 15 et 10 HAP. Les résultats confirment un impact du type d'équipement de chauffage au bois actif sur la concentration en $PM_{2,5}$ (p-valeur < 0,05), en tenant compte de l'influence de la concentration extérieure en $PM_{2,5}$ ainsi que de la densité d'occupation, qui présente un effet important sur la concentration en $PM_{2,5}$ dans le logement. Un impact de la présence d'un équipement de chauffage au bois actif sur la concentration totale en 15 ou en 10 HAP a également été observé (p-valeur < 0,05), en tenant compte des fortes influences de la période de construction du bâtiment, de la surface de la pièce de mesure et de l'écart moyen entre les températures intérieures et extérieures sur la concentration totale en HAP. Les résultats obtenus pour la concentration totale en 15 ou en 10 HAP sont similaires.

La CNL2 n'est pas une campagne initialement dimensionnée pour l'étude spécifique de l'impact du chauffage au bois sur la qualité de l'air intérieur. De ce fait, certaines informations n'ont pas été pleinement exploitées en raison des faibles effectifs observés. Par exemple, seulement cinq logements ont utilisé une cheminée à foyer ouvert pendant la période d'enquête et les PUF n'ont été mesurées que dans un sous-échantillon de 31 logements. Néanmoins, les résultats sont cohérents avec les conclusions de précédentes études (Allemand et al., 2008) et ouvrent de nouvelles perspectives, telles que l'exploitation des données de concentrations en polluants mesurés en continu dans la CNL2 afin

d'étudier l'évolution temporelle des niveaux de concentration au cours de la semaine d'enquête, en lien avec l'utilisation ou non d'un équipement de chauffage au bois sur les jours enquêtés, ou la réalisation d'une campagne de mesure de la QAI sur un échantillon de logements spécifiquement dimensionné pour la problématique du chauffage au bois.

6. Références

- ADEME. (2014). *Projet ESPACE Bois—Etude de la sensibilité des paramètres de fonctionnement des appareils de chauffage domestique au bois sur la composition et l'émission des particules fines [Rapport final]*.
- ADEME, Biomasse Normandie, BVA, & Solagro. (2018). *Connaissance des usages liés au chauffage domestique au bois en France—Enquêtes sur les pratiques d'utilisation des équipements domestiques de chauffage au bois* (p. 53). ADEME.
- AFNOR. (2009). NF ISO 16000-14. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-iso-1600014/air-interieur-partie-14-dosage-des-polychlorobiphenyles-pcb-de-type-dioxine/fa153835/33670>
- AFNOR. (2023). NF EN 12341. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-12341/air-ambient-methode-normalisee-de-mesurage-gravimetrique-pour-la-determinat/fa186364/351830>
- Allemand, N., Besombes, J.-L., Collet, S., Mandin, C., Riberon, 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* (No. DRC-08-70801-15219A; p. 156). INERIS.
- Atmo Nouvelle-Aquitaine. (2018). *Caractérisation des particules fines sur Bordeaux et Poitiers—Etude de la composition chimique et des sources de particules—Bilan 2017*. <https://www.atmo-nouvelleaquitaine.org/publications/caracterisation-des-particules-fines-sur-bordeaux-et-poitiers-etude-de-la-composition>
- Collet, S. (2009). *Les émissions de polluants par les foyers domestiques*. *Pollution atmosphérique*, 83.
- Copernicus. (2024). *Atmosphere Data Store [Jeu de données]*. <https://ads.atmosphere.copernicus.eu>
- CSTB. (1985). *Conventions unifiées pour le calcul du coefficient B (Cahier 2000)*. Centre scientifique et technique du bâtiment.
- Dunn, O. J. (1961). *Multiple Comparisons among Means*. *Journal of the American Statistical Association*, 56(293), 52-64. <https://doi.org/10.1080/01621459.1961.10482090>
- European Food Safety Authority. (2011). *Use of the EFSA Comprehensive European Food Consumption Database in Exposure Assessment*. *EFSA Journal*, 9(3), 2097. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2097>
- Fisher, R. A. (1934). *Statistical Method For Research Workers*. <http://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.205971>
- INERIS. (2022). *Synthèse des principaux résultats du programme CARA (2008-2020) (Rapport LCSQA No. Ineris-MIV-22-207922-00600A)*.

- INERIS. (2024). La qualité de l'air en France métropolitaine cartographiée de 2000 à aujourd'hui par l'Ineris [Jeu de données]. <https://www.ineris.fr/fr/recherche-appui/risques-chroniques/mesure-prevision-qualite-air/qualite-air-france-metropolitaine>
- Khalili, N. R., Scheff, P. A., & Holsen, T. M. (1995). PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and, gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions. *Atmospheric Environment*, 29(4), 533-542. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00275-P](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00275-P)
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Le Dreff, C., Nicolas, M., & Saal, T. (2019). Impact de l'usage d'appareils domestiques de chauffage au bois sur la qualité de l'air intérieur—CAB-QAI 2 : Étude d'un poêle étanche à granulés et d'une cheminée traditionnelle à foyer ouvert en fonction des caractéristiques de perméabilité et de ventilation du logement (p. 142). ADEME.
- Leduc, A., Deroyon, T., Rochereau, T., & Renaud, A. (2021). Premiers résultats de l'enquête santé européenne (EHIS) 2019 (No. 78; Les dossiers de la DREES, p. 89).
- Lig'Air. (2020). Caractérisation des particules en suspension sur la zone des Groues à Orléans (p. 32) [Rapport final].
- Météo France. (2024). Portail de données publiques de Météo France [Jeu de données]. donneespubliques.meteofrance.fr
- R Core Team. (2023). stats : The R Stats Package (Version 4.1.0) [Logiciel]. <https://cran.r-project.org/web/packages/STAT/index.html>
- Ramalho, O., Dassonville, C., Grégoire, A., Sivanantham, S., Lafaurie, E., Rueda Lopez, M. J., Bonnet, P., Desvignes, V., & Samri, D. (2024). Campagne Nationale Logements 2 : État de la qualité de l'air dans les logements en France métropolitaine (Rapport final No. SC-QEI-2024-020; p. 266). CSTB.
- Real, E., Couvidat, F., Ung, A., Malherbe, L., Raux, B., Gressent, A., & Colette, A. (2022). Historical reconstruction of background air pollution over France for 2000–2015. *Earth System Science Data*, 14(5), 2419-2443. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2419-2022>
- SDES. (2024). Estimation des nombres de degrés-jours unifiés au niveau régional et départemental. Ministère de la Transition Énergétique. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/204/download?inline>

- Spearman, C. (1987). The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 100(3/4), 441-471. <https://doi.org/10.2307/1422689>
- Student. (1908). The probable error of a mean. *Biometrika*, 1-25.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using Multivariate Statistics*. Pearson Education.
- Wickam, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis (Version 3.4.4)* [Logiciel]. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>
- Wickam, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., D'Agostino McGowan, L., & Romain, F. (2019). *tidyverse: Welcome to the Tidyverse (Version 1.3.1)* [Logiciel]. <https://cran.r-project.org/web/packages/tidyverse/index.html>
- Yates, F. (1964). Sir Ronald Fisher and the Design of Experiments. *Biometrics*, 20(2), 307. <https://doi.org/10.2307/2528399>
- Zhang, Y., Albinet, A., Petit, J.-E., Jacob, V., Chevrier, F., Gille, G., Pontet, S., Chrétien, E., Dominik-Sègue, M., Levigoureux, G., Močnik, G., Gros, V., Jaffrezo, J.-L., & Favez, O. (2020). Substantial brown carbon emissions from wintertime residential wood burning over France. *Science of The Total Environment*, 743, 140752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140752>

7. Annexes

7.1. Stratégie de prélèvement et d'analyse des polluants

Tableau 39. Stratégies de prélèvement et d'analyse des polluants

Paramètre	N° CAS	Pièce de mesure	Méthode de prélèvement	Durée de prélèvement	Méthode d'analyse	Autre(s) observation(s)
PM_{2,5}	-	Séjour principal	Prélèvement par pompage actif de l'air à un débit de 2 L/min, au moyen d'une tête de prélèvement (PEMS, Ecomesure) adaptée à la collecte de la fraction massique PM _{2,5} sur un filtre (membrane) en téflon PTFE pré-pesé de 37 mm de diamètre (2 µm de porosité, type Teflon avec anneau en polypropylène).	7 jours	Analyse en laboratoire réalisée selon la méthode gravimétrique, conformément à la norme NF EN 12341 (AFNOR, 2023).	<ul style="list-style-type: none"> Données exploitables : 235 ; Résultats invalidés pour 24 logements sur 259.
Particules ultrafines [20 - 150 nm] (PUF)	-	Séjour principal	Mesure en continu à l'aide d'un détecteur de nanoparticules (PARTECTOR 2, Ecomesure).	7 jours, à un pas de temps d'une seconde	Détection électrique des particules préalablement chargées.	<ul style="list-style-type: none"> Données exploitables pour un sous-échantillon de 31 logements sur le périmètre de l'étude.

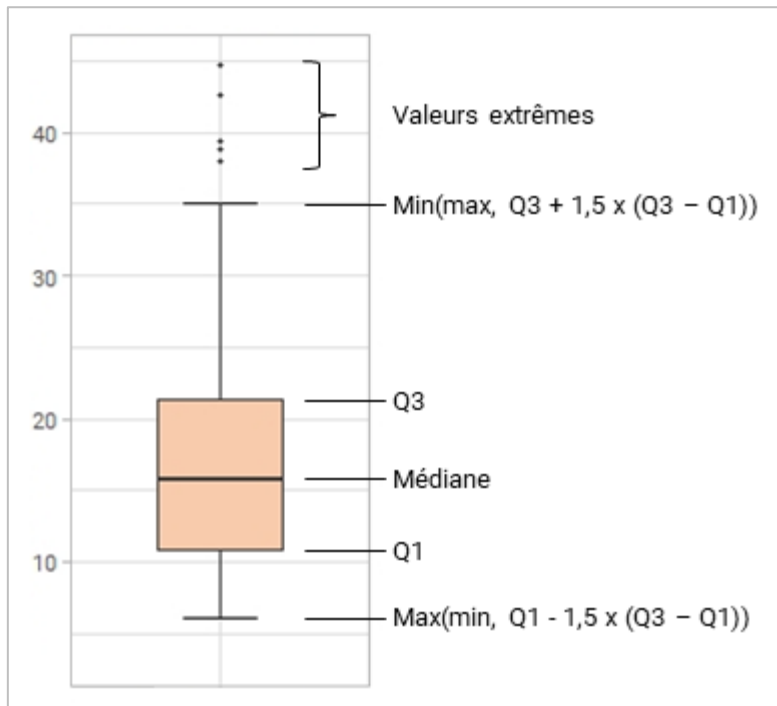
Paramètre	N° CAS	Pièce de mesure	Méthode de prélèvement	Durée de prélèvement	Méthode d'analyse	Autre(s) observation(s)
15 HAP Acénaphène Acénaphylène Anthracène Benzo[a]anthracène Benzo[a]pyrène Benzo[b]fluoranthène Benzo[g,h,i]perylène Benzo[k]fluoranthène Chrysène Dibenzo[a,h]anthracène Fluoranthène Fluorène Indéno[1,2,3-cd]pyrène Phénanthrène Pyrène	83-32-9 208-96-8 120-12-7 56-55-3 50-32-8 205-99-2 191-24-2 207-08-9 218-01-9 53-70-3 206-44-0 86-73-7 193-39-5 85-01-8 129-00-0	Séjour principal	Prélèvement par pompage actif de l'air à un débit de 4 L/min sur un support permettant de collecter à la fois la phase gazeuse et la phase particulaire (avec sélection de la fraction massique PM _{2,5}). Le support de prélèvement est une cartouche URG (URG Corporation, Chapel Hill, NC 27516 États-Unis), associée à un impacteur PM _{2,5} et composée d'un filtre de quartz et d'une mousse en polyuréthane. Le filtre et la mousse ont été préconditionnés au laboratoire avant utilisation.	7 jours	Analyse en laboratoire réalisée selon un protocole d'analyse interne adapté des normes NF XP X43-058 (2007) et NF ISO 16000-14 (AFNOR, 2009). Le filtre et la mousse sont extraites ensemble dans du dichlorométhane sous haute pression (ASE), avec une analyse en chromatographie en phase gazeuse couplée à une spectrométrie de masse en tandem (GC-MS/MS) en mode MRM (multiple mass monitoring) pour la détection et la quantification.	<ul style="list-style-type: none"> Concentrations des HAP dans l'air, intégrant phase gazeuse et phase particulaire ; La somme des concentrations des 15 HAP est utilisée pour l'exploitation ; Si le prélèvement est invalide pour un HAP alors la somme des HAP est invalidée ; Données exploitables : 226. Résultats invalidés pour 33 logements sur 259.
Groupe de 10 HAP d'intérêt Acénaphène Acénaphylène Anthracène Benzo[a]pyrène Benzo[b]fluoranthène Benzo[k]fluoranthène Chrysène Fluoranthène Phénanthrène Pyrène	83-32-9 208-96-8 120-12-7 50-32-8 205-99-2 207-08-9 218-01-9 206-44-0 85-01-8 129-00-0	Séjour principal	Prélèvement par pompage actif de l'air à un débit de 4 L/min sur un support permettant de collecter à la fois la phase gazeuse et la phase particulaire (avec sélection de la fraction massique PM _{2,5}). Le support de prélèvement est une cartouche URG (URG Corporation, Chapel Hill, NC 27516 États-Unis), associée à un impacteur PM _{2,5} et composée d'un filtre de quartz et d'une mousse en polyuréthane. Le filtre et la mousse ont été préconditionnés au laboratoire avant utilisation.	7 jours	Analyse en laboratoire réalisée selon un protocole d'analyse interne adapté des normes NF XP X43-058 (2007) et NF ISO 16000-14 (AFNOR, 2009). Le filtre et la mousse sont extraites ensemble dans du dichlorométhane sous haute pression (ASE), avec une analyse en chromatographie en phase gazeuse couplée à une spectrométrie de masse en tandem (GC-MS/MS) en mode MRM (multiple mass monitoring) pour la détection et la quantification.	<ul style="list-style-type: none"> Concentrations des HAP dans l'air, intégrant phase gazeuse et phase particulaire ; La somme des concentrations des 10 HAP est utilisée pour l'exploitation ; Si le prélèvement est invalide pour un HAP alors la somme des HAP est invalidée ; Données exploitables : 235 ; Résultats invalidés pour 24 logements sur 259.

Paramètre	N° CAS	Pièce de mesure	Méthode de prélèvement	Durée de prélèvement	Méthode d'analyse	Autre(s) observation(s)
Benzo[a]pyrène	50-32-8	Séjour principal	Prélèvement par pompage actif de l'air à un débit de 4 L/min sur un support permettant de collecter à la fois la phase gazeuse et la phase particulaire (avec sélection de la fraction massique PM _{2,5}). Le support de prélèvement est une cartouche URG (URG Corporation, Chapel Hill, NC 27516 États-Unis), associée à un impacteur PM _{2,5} et composée d'un filtre de quartz et d'une mousse en polyuréthane. Le filtre et la mousse ont été préconditionnés au laboratoire avant utilisation.	7 jours	Analyse en laboratoire réalisée selon un protocole d'analyse interne adapté des normes NF XP X43-058 (2007) et NF ISO 16000-14 (AFNOR, 2009). Le filtre et la mousse sont extraites ensemble dans du dichlorométhane sous haute pression (ASE), avec une analyse en chromatographie en phase gazeuse couplée à une spectrométrie de masse en tandem (GC-MS/MS) en mode MRM (multiple mass monitoring) pour la détection et la quantification.	<ul style="list-style-type: none"> Données exploitables : 259.
Benzène	71-43-2	Chambre de la personne de référence du logement	Prélèvement diffusif radial (cartouche Radiello® code 145 – Carbograph 4).	7 jours	Analyse en laboratoire réalisée conformément aux spécifications de la norme NF EN ISO 16017-2 (2003). Thermodésorption suivie d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à une spectrométrie de masse (TD-GC-MS).	<ul style="list-style-type: none"> Données exploitables : 257 ; Résultats invalidés pour 2 logements sur 259.
Formaldéhyde	50-00-0	Chambre de la personne de référence du logement	Prélèvement diffusif (cartouche Radiello® code 165 – Florisil® enrobé de 2,4-dinitrophenylhydrazine (2,4-DNPH)).	7 jours	Analyse en laboratoire réalisée conformément aux spécifications de la norme NF EN ISO 16000-4 (2011). Extraction des hydrazones formés à l'acétonitrile suivie d'une analyse par chromatographie en phase	<ul style="list-style-type: none"> Données exploitables : 259.

Paramètre	N° CAS	Pièce de mesure	Méthode de prélèvement	Durée de prélèvement	Méthode d'analyse	Autre(s) observation(s)
					liquide couplée à une détection UV (SPE-HPLC-UV).	
Acétaldéhyde	75-07-0	Chambre de la personne de référence du logement	Prélèvement diffusif (cartouche Radiello® code 165 – Florisil® enrobé de 2,4-dinitrophenylhydrazine (2,4-DNPH)).	7 jours	Analyse en laboratoire réalisée conformément aux spécifications de la norme NF EN ISO 16000-4 (2011). Extraction des hydrazones formés à l'acétonitrile suivie d'une analyse par chromatographie en phase liquide couplée à une détection UV (SPE-HPLC-UV).	• Données exploitables : 259.
NO₂	10102-44-0	Chambre de la personne de référence du logement	Prélèvement à l'aide d'un échantillonneur passif de type Passam Ag ® contenant un réactif, la triéthanolamine.	7 jours	Analyse en laboratoire réalisée conformément aux spécifications de la norme NF EN 16339 (AFNOR, 2013). Extraction des nitrites formés en phase aqueuse et analyse par spectrophotométrie à 542 nm (méthode de Griess-Saltzman).	• Données exploitables : 259.

7.2. Description de la boîte à moustaches

La boîte à moustaches est un diagramme décrivant la distribution statistique d'une variable quantitative (Figure 13). Le côté inférieur du rectangle représente le premier quartile (Q1) et le côté supérieur représente le troisième quartile (Q3). La ligne à l'intérieur du rectangle indique la médiane. Le segment à l'extrémité inférieure du diagramme correspond à $\max(\min, Q1 - 1,5 \cdot (Q3 - Q1))$ et le segment à l'extrémité supérieure correspond à $\min(\max, Q3 + 1,5 \cdot (Q3 - Q1))$. Les points à l'extérieur du diagramme représentent les valeurs extrêmes.



Min : minimum ; max : maximum

Figure 13. Description de la boîte à moustaches

7.3. Distributions bivariées entre les concentrations des polluants et les variables relatives au chauffage au bois détaillées

Tableau 40. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en $PM_{2,5}$ et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	135	57,4	11,4	0,36
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	100	42,6	11,5	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	67	40,6	11,6	0,98
	Au moins un équipement actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	66	40,0	11,6	
	Au moins un équipement actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	32	19,4	13,9	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	16	9,7	16,4	0,41
	Cheminée à foyer ouvert	4	2,4	18,4	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	30	18,2	10,6	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	1,8	17,7	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	7,9	10,8	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	0,6	10,1	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en PM _{2,5} (µg/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	66	40,0	11,6	
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	32	19,4	13,9	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	16	23,9	16,4	0,12
	Cheminée à foyer ouvert	4	6,0	18,4	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	30	44,8	10,6	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	4,5	17,7	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	19,4	10,8	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	1,5	10,1	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	1 jour	9	13,4	12,3	0,56
	2 jours	9	13,4	11,8	
	3 jours	5	7,5	8,61	
	4 jours	7	10,4	9,32	
	5 jours	13	19,4	12,7	
	6 jours	2	3,0	42,0	
	7 jours	7	10,4	10,9	
	8 jours	12	17,9	14,0	
	Fréquence d'utilisation non renseignée	3	4,5	10,1	

Tableau 41. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la somme des concentrations des 15 HAP et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en HAP (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	132	58,4	13,0	0,05
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	94	41,6	11,5	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	65	42,5	14,5	0,10
	Au moins un équipement actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	61	39,9	12,1	
	Au moins un équipement actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	27	17,6	13,6	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	14	9,2	15,3	0,26
	Cheminée à foyer ouvert	5	3,3	18,7	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	30	19,6	12,8	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	2,0	12,3	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	12	7,8	16,6	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	0,7	47,4	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	61	39,9	12,1	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en HAP (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	27	17,6	13,6	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	14	21,5	15,3	0,51
	Cheminée à foyer ouvert	5	7,7	18,7	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	30	46,2	12,8	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	4,6	12,3	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	12	18,5	16,6	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	1,5	47,4	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	1 jour	10	15,4	14,2	0,62
	2 jours	10	15,4	14,6	
	3 jours	6	9,2	11,7	
	4 jours	6	9,2	11,9	
	5 jours	12	18,5	17,4	
	6 jours	2	3,1	71,1	
	7 jours	6	9,2	18,5	
	8 jours	10	15,4	15,6	
	Fréquence d'utilisation non renseignée	3	4,6	12,3	

Tableau 42. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la somme des concentrations des 10 HAP et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en HAP (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	138	58,7	11,4	0,04
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	97	41,3	9,79	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	69	42,6	12,8	0,05
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	39,5	10,1	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	29	17,9	11,6	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	15	9,3	13,4	0,19
	Cheminée à foyer ouvert	5	3,1	16,5	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	32	19,8	12,1	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	1,9	9,24	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	8,0	12,7	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	0,6	39,5	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	39,5	10,1	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en HAP (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	29	17,9	11,6	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	15	21,7	13,4	0,50
	Cheminée à foyer ouvert	5	7,2	16,5	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	32	46,4	12,1	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	4,3	9,24	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	18,8	12,7	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	1,4	39,5	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	1 jour	10	14,5	12,5	0,65
	2 jours	10	14,5	12,4	
	3 jours	6	8,7	10,0	
	4 jours	7	10,1	10,2	
	5 jours	12	17,4	14,8	
	6 jours	2	2,9	62,0	
	7 jours	7	10,1	15,4	
	8 jours	11	15,9	12,9	
	Fréquence d'utilisation non renseignée	4	5,8	24,1	

Tableau 43. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en benzo[a]pyrène et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en benzo[a]pyrène (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	139	58,6	0,047	0,003
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	98	41,4	0,030	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	69	42,6	0,080	0,001
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	39,5	0,053	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	29	17,9	0,044	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	15	9,3	0,152	0,01
	Cheminée à foyer ouvert	5	3,1	0,121	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	32	19,8	0,063	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	1,9	0,069	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	8,0	0,072	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	0,6	0,604	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	64	39,5	0,053	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en benzo[a]pyrène (ng/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	29	17,9	0,044	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	15	21,7	0,152	0,34
	Cheminée à foyer ouvert	5	7,2	0,121	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	32	46,4	0,0631	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	4,3	0,0691	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	13	18,8	0,0720	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	1,4	0,604	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	1 jour	10	14,5	0,061	0,53
	2 jours	10	14,5	0,053	
	3 jours	6	8,7	0,087	
	4 jours	7	10,1	0,071	
	5 jours	12	17,4	0,126	
	6 jours	2	2,9	0,181	
	7 jours	7	10,1	0,264	
	8 jours	11	15,9	0,168	
	Fréquence d'utilisation non renseignée	4	5,8	0,337	

Tableau 44. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en benzène et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en benzène (µg/m³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	149	58,0	1,17	0,37
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	108	42,0	1,03	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	75	41,7	1,24	0,38
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	73	40,6	1,10	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	32	17,8	1,09	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	10,6	1,99	0,02
	Cheminée à foyer ouvert	5	2,8	1,22	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	33	18,3	1,36	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	1,7	0,91	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	7,8	0,87	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	0,6	1,19	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	73	40,6	1,10	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en benzène (µg/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	32	17,8	1,09	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	25,3	1,99	0,01
	Cheminée à foyer ouvert	5	6,7	1,22	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	33	44,0	1,36	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	4,0	0,91	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	18,7	0,87	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	1,3	1,19	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	1 jour	11	14,7	1,22	0,37
	2 jours	10	13,3	0,968	
	3 jours	7	9,3	2,73	
	4 jours	7	9,3	0,924	
	5 jours	13	17,3	1,32	
	6 jours	3	4,0	1,04	
	7 jours	7	9,3	0,820	
	8 jours	13	17,3	1,99	
	Fréquence d'utilisation non renseignée	4	5,3	1,08	

Tableau 45. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en formaldéhyde et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	150	57,9	14,8	0,21
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	109	42,1	15,8	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	76	41,8	14,8	0,27
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	40,7	15,8	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	32	17,6	13,1	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	10,4	14,9	0,69
	Cheminée à foyer ouvert	5	2,7	19,8	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	34	18,7	13,6	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	1,6	14,3	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	7,7	16,6	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	0,5	21,3	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	40,7	15,8	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	32	17,6	13,1	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	25,0	14,9	0,82
	Cheminée à foyer ouvert	5	6,6	19,8	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	34	44,7	13,6	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	3,9	14,3	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	18,4	16,6	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	1,3	21,3	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	1 jour	11	14,5	19,8	0,61
	2 jours	10	13,2	16,6	
	3 jours	7	9,2	16,40	
	4 jours	7	9,2	12,79	
	5 jours	14	18,4	15,0	
	6 jours	3	3,9	11,3	
	7 jours	7	9,2	12,5	
	8 jours	13	17,1	17,0	
	Fréquence d'utilisation non renseignée	4	5,3	17,3	

Tableau 46. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en acétaldéhyde et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en acétaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	150	57,9	8,27	0,10
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	109	42,1	9,01	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	76	41,8	8,36	0,13
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	40,7	9,07	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	32	17,6	7,67	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	10,4	8,27	0,43
	Cheminée à foyer ouvert	5	2,7	7,52	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	34	18,7	8,83	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	1,6	11,4	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	7,7	8,39	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	0,5	14,4	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	40,7	9,07	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en acétaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	32	17,6	7,67	
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	25,0	8,27	0,81
	Cheminée à foyer ouvert	5	6,6	7,52	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	34	44,7	8,83	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	3,9	11,4	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	18,4	8,39	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	1,3	14,4	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	1 jour	11	14,5	7,52	0,32
	2 jours	10	13,2	7,71	
	3 jours	7	9,2	8,43	
	4 jours	7	9,2	5,78	
	5 jours	14	18,4	9,54	
	6 jours	3	3,9	9,69	
	7 jours	7	9,2	5,08	
	8 jours	13	17,1	10,1	
	Fréquence d'utilisation non renseignée	4	5,3	13,60	

Tableau 47. Résultats des analyses bivariées détaillées entre la concentration en NO₂ et les variables d'intérêt relatives au chauffage au bois

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en NO ₂ (µg/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois	150	57,9	4,66	0,78
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	109	42,1	4,77	
Présence d'au moins un équipement de chauffage au bois actif <i>versus</i> au moins un équipement de chauffage actif utilisant un autre combustible ou énergie que le bois	Au moins un équipement de chauffage au bois actif	76	41,8	4,69	0,96
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	40,7	4,54	
	Au moins un équipement utilisant un autre combustible ou énergie que le bois (chauffage au bois inactif)	32	17,6	3,49	
Type d'équipement de chauffage actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	10,4	2,27	0,69
	Cheminée à foyer ouvert	5	2,7	4,45	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	34	18,7	5,82	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	1,6	4,71	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	7,7	2,31	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	0,5	6,81	
	Autre chauffage actif (logement non équipé d'un appareil de chauffage au bois)	74	40,7	4,54	
	Autre chauffage actif (chauffage au bois inactif)	32	17,6	3,49	

Variable	Modalité	Nombre de logements	Proportion (%)	Concentration médiane en NO ₂ (µg/m ³)	Test de Kruskal-Wallis p-valeur
Type d'équipement de chauffage au bois actif au cours de la semaine d'enquête	Cheminée à foyer fermé ou insert	19	25,0	2,27	0,42
	Cheminée à foyer ouvert	5	6,6	4,45	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation manuelle	34	44,7	5,82	
	Poêle à bois ou chaudière à granulés à alimentation automatique	3	3,9	4,71	
	Plusieurs appareils de chauffage au bois actifs	14	18,4	2,31	
	Type d'équipement de chauffage au bois non renseigné	1	1,3	6,81	
Nombre de jours d'utilisation du chauffage au bois au cours de la semaine d'enquête	1 jour	11	14,5	2,31	0,56
	2 jours	10	13,2	3,49	
	3 jours	7	9,2	8,34	
	4 jours	7	9,2	5,55	
	5 jours	14	18,4	4,76	
	6 jours	3	3,9	2,28	
	7 jours	7	9,2	9,15	
	8 jours	13	17,1	2,30	
	Fréquence d'utilisation non renseignée	4	5,3	4,52	



Le futur en construction

Établissement public au service de l'innovation dans le bâtiment, le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, exerce quatre activités clés : la recherche et expertise, l'évaluation, la certification et la diffusion des connaissances, organisées pour répondre aux enjeux de la transition énergétique dans le monde de la construction. Son champ de compétence couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans les quartiers et les villes.

Avec plus de 900 collaborateurs, ses filiales et ses réseaux de partenaires nationaux, européens et internationaux, le groupe CSTB est au service de l'ensemble des parties prenantes de la construction pour faire progresser la qualité et la sécurité des bâtiments.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

Siège social > 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

Tél. : +33 (0)1 64 68 82 82 – www.cstb.fr