



HAL
open science

Campagne nationale logements 2 : Recherche des déterminants des concentrations intérieures en PM2,5

Lisa Gauquelin, Derbez Mickaël, Sahki Nassim, Sivanantham Sutharsini, Ramalho Olivier, Virginie Desvignes

► To cite this version:

Lisa Gauquelin, Derbez Mickaël, Sahki Nassim, Sivanantham Sutharsini, Ramalho Olivier, et al.. Campagne nationale logements 2 : Recherche des déterminants des concentrations intérieures en PM2,5. OQEI - Observatoire de la qualité des environnements intérieurs. 2025. <hal-05597150>

HAL Id: hal-05597150

<https://hal.science/hal-05597150v1>

Submitted on 20 Apr 2026

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



**Observatoire de la qualité
des environnements intérieurs**

Campagne nationale logements 2 :

Recherche des déterminants
des concentrations
intérieures en $PM_{2,5}$

RAPPORT FINAL | Mai 2025

SC-QEI-2024-183



Préambule

L'Observatoire de la Qualité des Environnements Intérieurs (OQEI), est piloté par l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) et par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Dans le cadre du programme de travail de l'OQEI, l'action du présent rapport a été financée par la DGPR, l'ADEME, la DGS et la DHUP.

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'OQEI ne puisse être recherchée. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent document, faite sans l'autorisation de l'Anses et 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).

Auteurs/Contributeurs

SAHKI Nassim – CSTB DSC/QEI

SIVANANTHAM Sutharsini – CSTB DSC/QEI

DESVIGNES Virginie – CSTB DSAM/QEI/IDE

GAUQUELIN Lisa – CSTB DSAM/QEI/IDE

DERBEZ Mickaël – CSTB DSAM/QEI/AQA

Relecteurs

RAMALHO Olivier – CSTB DSAM/QEI/IDE

DESVIGNES Virginie – CSTB DSAM/QEI/IDE

Citation suggérée

GAUQUELIN Lisa, DERBEZ Mickaël, SAHKI Nassim, SIVANANTHAM Sutharsini, RAMALHO Olivier, DESVIGNES Virginie. 2024. Observatoire de la Qualité des Environnements Intérieurs – Recherche des déterminants des PM_{2,5} dans les logements français (SC-QEI-2024-183). France : OQEI. <https://doi.org/10.82199/oqei-cn12-bb85-5660>

Mots clés

Particules fines, PM_{2,5}, résidentiel, enquête nationale, modèle linéaire généralisé, CNL2, déterminant.

Particulate matter, PM_{2,5}, dwellings, national survey, generalized linear model, CNL2, determinant.

Résumé

L'Observatoire Français de la qualité des environnements intérieurs (OQEI) a mené la Campagne Nationale Logements 2 (CNL2), entre novembre 2020 et février 2023, correspondant à une post-enquête de l'étude européenne de santé EHIS 2019. Un des objectifs de cette campagne était d'établir un état des lieux de la qualité de l'air intérieur. Dans cette démarche, plus de 170 polluants et paramètres, incluant les particules fines (fraction massique de $PM_{2,5}$) ont été mesurés. Dans cette enquête, les niveaux de concentration intérieure en $PM_{2,5}$ montrent un dépassement de la valeur repère journalière de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans près de 70 % des logements en France. Cette situation pourrait accroître les risques respiratoires et cardiovasculaires, et souligne l'importance de s'intéresser à cette problématique tant sur le plan économique que sanitaire.

L'objectif de ce rapport est de rechercher les déterminants explicatifs des concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ moyennées sur la semaine au regard des caractéristiques descriptives des bâtiments enquêtés et des activités de leurs occupants. Les données relatives au logement et au ménage ont été collectées à travers l'administration de questionnaires et les concentrations de $PM_{2,5}$ ont été mesurées dans le séjour du logement pendant 7 jours à l'aide de la méthode gravimétrique (norme NF EN 12341).

La présélection des variables explicatives à inclure dans le modèle linéaire généralisé comporte une analyse bivariée entre les déterminants potentiels et le niveau de concentration en $PM_{2,5}$ via l'application de tests pondérés de type corrélation de Pearson ou d'analyses de variance ($\alpha = 20\%$). De plus des tests entre les déterminants potentiels via des corrélations de Pearson ou des tests de Kruskal-Wallis (proportionnel à égal à 5 %) ont été réalisés.

Par la suite, un modèle linéaire généralisé a été appliqué en utilisant une fonction de lien gaussienne et tenant compte des poids de sondage pour exprimer les résultats à l'échelle du parc de résidences principales.

Par ordre décroissant de contribution au modèle, les résultats suggèrent que le nettoyage des surfaces avec un nettoyant chimique, le type de logement (appartement *versus* maison individuelle), les concentrations extérieures en $PM_{2,5}$ et le tabagisme intérieur seraient des facteurs de risque de concentrations en $PM_{2,5}$ élevées.

Les résultats suggèrent aussi que la présence d'un système de chauffage individuel (comportant le chauffage au bois et les cheminées) est associée à des concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ plus faibles pour les logements équipés d'une ventilation de type mécanique centralisée ou d'une ventilation de type naturelle par rapport à ceux sans aucune ventilation.

Bien que la variation expliquée par le modèle soit relativement faible, cette étude a permis de mettre en évidence les déterminants clés de la concentration en $PM_{2,5}$ à l'intérieur des logements avec des résultats en accord avec ceux retrouvés dans la revue de littérature. Les perspectives de cette recherche incluent la poursuite des travaux au travers de modèles intégrant d'autres variables caractérisant les sources extérieures de pollution, d'autres activités domestiques et l'effet potentiel du « nuage personnel ».

Abstract

The French observatory of indoor environmental quality (OQEI) has conducted the second national survey in French dwellings (CNL2), between November 2020 and February 2023, as a post-survey of the European health study EHIS 2019. One of the objectives of this survey was to describe indoor air quality, so more than 170 pollutants and parameters, including particulate matter (PM_{2.5} mass fraction), were measured. In this survey, PM_{2.5} levels exceeded the 10 µg/m³ limit in nearly 70 % of French homes. This situation may increase respiratory and cardiovascular risks and highlight the importance of addressing the issue from both economic and public health perspective.

This report aims to determine the explanatory factors of indoor PM_{2.5} weekly-averaged concentration levels in relation to the characteristics of dwellings, households, and domestic activities. Dwelling and household data were collected via questionnaires. Indoor PM_{2.5} concentrations were measured in the living room over 7 days using the gravimetric method (standard NF EN 12341). Outdoor PM_{2.5} concentrations were retrieved from national-scale modelling with 1 to 4 km² resolution, using both the CHIMERE chemistry-transport model and Copernicus data.

The pre-selection of explanatory variables to be included in the generalized linear model includes a bivariate analysis between potential determinants and PM_{2.5} concentration levels via weighted Pearson correlation-type tests or analyses of variance ($\alpha=20\%$) as appropriate. Moreover, tests between potential determinants were conducted via Pearson correlations or Kruskal-Wallis test ($\alpha=5\%$) as appropriate.

Then a generalized linear model was applied with a Gaussian link function, incorporating dwelling survey weights to express results at the national housing stock level.

In descending order of contribution to the model, the results suggest that cleaning surfaces with a chemical cleaner more frequently than once a week, the type of dwellings (apartment versus single-family house), outdoor PM_{2.5} concentrations, and indoor smoking might represent risk factors for higher indoor PM_{2.5} concentration levels.

Results also suggest that in the presence of an individual combustion heating system (including wood stoves and fireplaces), PM_{2.5} concentration levels are lower for stack effect and mechanically ventilated compared with those using natural ventilation.

Although the variance explained by the model is relatively small (R=17%), this study highlighted some key determinants of PM_{2.5} concentration levels inside dwellings with results in agreement with those of most other studies found in the literature review. The prospects for this research include the continued work through models incorporating other variables characterizing outdoor sources of pollution, other domestic activities, and the potential effect of the personal cloud.

Table des matières

| | |
|--|----|
| Résumé..... | 4 |
| Abstract..... | 5 |
| Liste des figures..... | 8 |
| Liste des tableaux..... | 10 |
| Liste des annexes..... | 11 |
| Abréviations..... | 12 |
| 1 Introduction..... | 13 |
| 2 Schéma d'étude de la Campagne Nationale Logements 2 (CNL2)..... | 15 |
| 3 Méthodologie statistique..... | 16 |
| 3.1 Identification des variables candidates au modèle..... | 16 |
| 3.1.1 Revue bibliographique des déterminants de la concentration en PM _{2,5} | 16 |
| 3.1.2 Identification des variables disponibles dans la CNL2 au regard de celles mises en évidence dans la recherche bibliographique..... | 17 |
| 3.2 Préparation des données et analyses univariés..... | 19 |
| 3.2.1 Application du poids de sondage..... | 19 |
| 3.2.2 Effectifs déséquilibrés dans les modalités de réponses..... | 20 |
| 3.2.3 Valeurs manquantes..... | 20 |
| 3.2.4 Application de fonctions de transformation..... | 20 |
| 3.3 Analyse multivariée : élaboration du modèle de régression..... | 21 |
| 3.3.1 Modèle pondéré..... | 21 |
| 3.3.2 Modèle non-pondéré..... | 22 |
| 3.3.3 Critères d'évaluation du modèle..... | 23 |
| 3.3.4 Adéquation du modèle..... | 24 |
| 3.3.5 Paramètres statistiques descriptives des tableaux et figures..... | 24 |
| 4 Résultats..... | 25 |
| 4.1 Description des niveaux de concentration intérieure en PM _{2,5} dans les logements issus de la CNL2..... | 25 |
| 4.2 Les déterminants potentiels de la concentration en PM _{2,5} | 26 |
| 4.2.1 Sélection des variables explicatives du modèle..... | 26 |
| 4.2.2 Description des variables..... | 27 |
| 4.2.3 Les modèles explicatifs de la concentration intérieure en PM _{2,5} | 33 |
| 5 Discussion..... | 51 |
| 5.1 Résultats du modèle pondéré..... | 51 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1.1 | Modèles obtenus dans d'autres études de la revue de bibliographie | 51 |
| 5.1.2 | Comparaison des résultats du modèle pondéré avec les autres études | 52 |
| 5.1.3 | Concentration extérieure en PM _{2,5} | 53 |
| 5.1.4 | Tabagisme intérieur | 54 |
| 5.1.5 | Utilisation d'un nettoyage chimique de surface dans le logement | 54 |
| 5.1.6 | Typologie du logement..... | 55 |
| 5.1.7 | Effet de la ventilation en fonction du type de chauffage | 56 |
| 5.2 | Méthodologie et limites | 58 |
| 5.2.1 | Pertinence de la pondération | 58 |
| 5.2.2 | Choix des variables explicatives du modèle pondéré et données manquantes 59 | |
| 5.2.3 | Adéquation et pertinence du modèle pondéré..... | 60 |
| 5.3 | Perspectives et leviers d'action | 61 |
| 6 | Conclusion..... | 62 |
| 7 | Bibliographie..... | 63 |
| 8 | Annexes | 68 |
| | Annexe 1. Liste des déterminants des concentrations intérieures en PM _{2,5} identifiés dans la littérature | 68 |
| | Annexe 2. Liste des variables ayant un lien avec les concentrations intérieures en PM _{2,5} et disponibles dans CNL2 | 75 |
| | Annexe 3. Préparation des données | 77 |
| | Annexe 4. Etapes de sélection des variables pour la modélisation des concentrations intérieures en PM _{2,5} pondérées à l'échelle du parc national de la France hexagonale..... | 80 |
| | Annexe 5. Etapes de sélection des variables pour la modélisation des concentrations intérieures en PM _{2,5} pondérées à l'échelle du parc national de la France hexagonale..... | 87 |
| | Annexe 6. Variation de la déviance pour chaque variable du modèle final des concentrations intérieures en PM _{2,5} pondérées à l'échelle du parc national de la France hexagonale | 88 |
| | Annexe 7. Adéquation du modèle avec poids de sondage..... | 89 |
| | Annexe 8. Adéquation du modèle non-pondéré..... | 90 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1. Méthodologie appliquée dans ce rapport sur les données issues de la CNL2 pour identifier les déterminants de la concentration en $PM_{2,5}$ | 16 |
| Figure 2 : Distribution des niveaux de concentration en $PM_{2,5}$ dans le séjour du logement .. | 26 |
| Figure 3 : Distribution des niveaux de concentration extérieure en $PM_{2,5}$ | 27 |
| Figure 4. Distribution des concentrations en $PM_{2,5}$ log-transformée en fonction du tabagisme intérieur..... | 30 |
| Figure 5. Distribution des concentrations en $PM_{2,5}$ log-transformée en fonction du type de logement | 31 |
| Figure 6. Distribution des concentrations en $PM_{2,5}$ log-transformée en fonction du type de ventilation | 31 |
| Figure 7 : Distribution de l'âge de la personne de référence (à gauche) et du nombre moyen d'occupants durant la semaine d'enquête (à droite) | 33 |
| Figure 8 : Distribution du taux de renouvellement d'air moyen (à gauche) et le taux de présence (à droite) | 33 |
| Figure 9. Effet marginal moyen du modèle pondéré ajusté de la concentration extérieure en $PM_{2,5}$ sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ | 39 |
| Figure 10 : Effet marginal du tabagisme intérieur du modèle pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ | 40 |
| Figure 11 : Effet marginal de la fréquence d'utilisation d'un nettoyant chimique de surface du modèle pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ | 40 |
| Figure 12 : Effet marginal du type de logement du modèle pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ | 41 |
| Figure 13 : Effet marginal du type de ventilation du modèle pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ chez les logements avec un chauffage à combustion | 42 |
| Figure 14 : Effet marginal du type de ventilation du modèle pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ chez les logements avec un système de chauffage à l'arrêt..... | 42 |
| Figure 15 : Effet marginal du type de ventilation du modèle pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ chez les logements avec un chauffage sans combustion | 43 |
| Figure 16. Effet marginal de la concentration extérieure en $PM_{2,5}$ du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ | 46 |
| Figure 17. Effet marginal du TRA du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ | 47 |
| Figure 18 : Effet marginal du tabagisme intérieur du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ | 48 |
| Figure 19 : Effet marginal du type de ventilation du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ chez les logements avec un chauffage à combustion | 48 |
| Figure 20 : Effet marginal de la saison du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ chez les logements avec un chauffage à combustion | 49 |

| | |
|--|----|
| Figure 21 : Effet marginal du mode de combustion du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ | 49 |
| Figure 22 : Effet marginal du type de logement du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ | 50 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Liste des variables disponibles dans la CNL2 et potentielles candidates au modèle expliquant la concentration intérieure des PM _{2,5} | 17 |
| Tableau 2. Transformations appliquées aux variables quantitatives..... | 20 |
| Tableau 3. Distribution des concentrations de PM _{2,5} mesurés dans le séjour du logement et comparaison avec la valeur de référence..... | 25 |
| Tableau 4. Distribution des concentrations extérieures en PM _{2,5} | 27 |
| Tableau 5. Activités dans les logements au cours de la semaine de mesure..... | 28 |
| Tableau 6. Caractéristiques des logements enquêtés | 29 |
| Tableau 7. Description de la distribution de l'âge de la personne de référence, du nombre d'occupants dans le logement, de la durée de présence moyenne, du taux de renouvellement et du taux de présence..... | 32 |
| Tableau 8. Paramètres du modèle pondéré explicatif de la concentration en PM _{2,5} issus de l'exploitation des données de la CNL2 | 36 |
| Tableau 9. Paramètres du modèle pondéré explicatif de la concentration en PM _{2,5} issus de l'exploitation des données de la CNL2 stratifié en fonction du type de chauffage | 37 |
| Tableau 10. Paramètres du modèle non-pondéré explicatif de la concentration en PM _{2,5} issus de l'exploitation des données de la CNL2 | 43 |
| Tableau 11. Croisement des déterminants potentiels de la concentration en PM _{2,5} avec le type de logement (variable explicative du modèle) | 55 |
| Tableau 12. Rappels des paramètres obtenus dans le modèle pondéré versus non-pondéré explicatif de la concentration en PM _{2,5} issus de l'exploitation des données de la CNL2 | 59 |

Liste des annexes

| | |
|---|----|
| Annexe 1. Liste des déterminants des concentrations intérieures en PM _{2,5} identifiés dans la littérature..... | 68 |
| Annexe 2. Liste des variables ayant un lien avec les concentrations intérieures en PM _{2,5} et disponibles dans CNL2..... | 75 |
| Annexe 3. Préparation des données..... | 77 |
| Annexe 4. Etapes de sélection des variables pour la modélisation des concentrations intérieures en PM _{2,5} pondérées à l'échelle du parc national de la France hexagonale | 80 |
| Annexe 5. Etapes de sélection des variables pour la modélisation des concentrations intérieures en PM _{2,5} pondérées à l'échelle du parc national de la France hexagonale | 87 |
| Annexe 6. Variation de la déviance pour chaque variable du modèle final des concentrations intérieures en PM _{2,5} pondérées à l'échelle du parc national de la France hexagonale..... | 88 |
| Annexe 7. Adéquation du modèle avec poids de sondage..... | 89 |
| Annexe 8. Adéquation du modèle non-pondéré..... | 90 |

Abréviations

| | |
|-------------------|--|
| ADEME | Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie |
| AFNOR | Association Française de NORmalisation |
| ANSES | Agence Nationale de Sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'Environnement et du Travail |
| CSP | Catégorie Socioprofessionnelle |
| CSTB | Centre Scientifique et Technique du Bâtiment |
| CNL2 | Campagne nationale logements n°2 (novembre 2020 – février 2023) |
| FAP | Fraction Attribuable Populationnelle |
| HCSP | Haut Conseil de la Santé Publique |
| GLM | Modèle Linéaire Généralisé (<i>ENG : Linear Generalized Model</i>) |
| Insee | Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques |
| LDM | Limite de Détection de la Méthode globale |
| LQM | Limite de Quantification de la Méthode globale |
| OMS | Organisation Mondiale de la Santé |
| PM _{2,5} | Fraction massique de particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm |
| PTFE | Polytétrafluoroéthylène |
| RR | Risque relatif |
| TRA | Taux de Renouvellement d'Air |
| QAI | Qualité de l'Air Intérieur |

1 Introduction

Les particules fines représentent des particules solides ou liquides en suspension dans l'air avec un diamètre en général inférieur à 2,5 µm. Les particules fines sont associées à la fraction gravimétrique PM_{2,5} (OMS 2021b). C'est la fraction de particules qui reste en suspension dans l'air le plus longtemps, au contraire des plus grosses particules qui sédimentent plus rapidement ou des particules ultrafines qui ont tendance à s'agglomérer rapidement ou se déposent sur toutes les surfaces par mouvement brownien.

Les particules fines peuvent être émises directement dans l'air par des activités anthropiques (industrie, résidentiel, agriculture, transports, etc.) et par des sources naturelles (feux de forêt, éruptions volcaniques, etc.). Leur formation est le plus souvent liée à des processus de combustion, mais certains processus mécaniques peuvent en générer ou les remettre en suspension (frictions, vibrations, chocs, ...). Elles peuvent également se former directement dans l'atmosphère par réactions physico-chimiques entre des polluants gazeux (Insee 2021). Le secteur résidentiel, le chauffage au bois en particulier, et le trafic sont les principaux émetteurs de PM_{2,5} dans l'air ambiant en France (Ministère de la transition écologique et solidaire et Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales, n.d.). Dans les environnements intérieurs, la fumée de tabac et les activités de cuisson sont les principales sources d'émission de particules fines. La combustion du bois (cheminées, poêles à bois) peut également y contribuer dans certaines situations.

Les résultats de la dernière campagne nationale logement (CNL2) (Ramalho et al. 2025) ont montré que les concentrations observées en PM_{2,5} dépassait :

- La valeur repère air intérieur de **10 µg/m³** au moins une fois sur la semaine (HCSP 2013) dans **70 %** des logements ;
- La valeur maximale journalière recommandée par l'OMS 2021 de **15 µg/m³** au moins une fois sur la semaine (OMS 2021a) dans **43 %** des logements ;
- La valeur du seuil d'alerte journalier, recommandé par le Haut Conseil de Santé Publique, de **50 µg/m³** (HCSP 2013) dans **11 %** des logements.

La présence de ce polluant à des concentrations élevées, excédant les seuils réglementaires et les valeurs guides recommandées par des instances telles que l'OMS ou le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP), souligne l'importance de s'y intéresser de manière approfondie et en fait une réelle préoccupation en matière de santé publique. Il est désormais bien établi que les particules inhalées ont un large impact sanitaire, affectant principalement les systèmes respiratoires et cardiovasculaires. Leur toxicité dépend à la fois de leur composition chimique mais également de leur taille. Plus elles sont fines, plus elles pénètrent profondément dans l'arbre respiratoire jusqu'à atteindre la circulation sanguine.

D'un point de vue du coût socio-économique, la pollution de l'air intérieur, évaluée en 2014 à partir de six polluants fréquemment rencontrés dans les logements, a été estimée à 19 milliards d'euros par an, dont plus de 14 milliards imputables à la pollution particulaire (PM_{2,5} et PM₁₀) (ANSES, ABM, CSTB ; 2014).

Le travail exposé dans le présent rapport consiste à rechercher les déterminants des concentrations en $PM_{2,5}$ dans les logements des Français en analysant les données issues de la CNL2. Ce travail se découpe en 3 étapes :

1. Recherche bibliographique : identifier les variables candidates pour le modèle d'identification ;
2. Sélection des variables, à partir de cette liste ;
3. Élaboration d'un modèle final.

2 Schéma d'étude de la Campagne Nationale Logements 2 (CNL2)

La CNL2 est une post-enquête de l'étude européenne de santé EHIS 2019 (Leduc et al. 2021). Un des objectifs de la campagne était d'établir un état des lieux de la pollution intérieure dans les logements, traduit par la distribution statistique de différents indicateurs de la qualité de l'air intérieur (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.

Les données de mesure des concentrations en $PM_{2,5}$ ont été exploitées dans le cadre de la présente étude. Les $PM_{2,5}$ ont été prélevées dans le séjour du logement sur une durée de 7 jours, par pompage actif de l'air à un débit de 2 L/min au moyen d'une tête de prélèvement adaptée à la collecte de la fraction $PM_{2,5}$ sur un filtre (membrane) en téflon PTFE pré-pesé de 37 mm de diamètre (2 μm de porosité, type Teflo avec anneau en polypropylène). L'analyse des prélèvements a été réalisée par la méthode gravimétrique selon la norme NF EN 12341 (AFNOR 2023). La pesée des filtres a été effectuée dans une salle de pesée régulée en température (20 ± 1 °C) et humidité (50 ± 5 %) à l'aide d'une balance de précision dont la résolution est de 10 μg . Les filtres étaient pesés une première fois après 48 heures de conditionnement dans la salle de pesée (pesée 1), puis une seconde fois 24 heures après (pesée 2). La masse du filtre correspond à la masse moyenne des deux pesées.

Dans le cadre de ce travail, ont été exploitées :

- Des données relatives aux caractéristiques des logements, des ménages, des pièces, des équipements, des occupants, ainsi qu'à la fréquence des activités domestiques et à l'occupation du logement, recueillies via les questionnaires de la CNL2, ont été exploitées ;
- Le taux de renouvellement de l'air moyen hebdomadaire (TRA) des logements calculé sur la base des mesures de dioxyde de carbone (CO_2), des conditions d'occupation du logement, de l'état d'ouverture de la porte de la chambre de la personne de référence et du volume de la chambre et du logement. La méthode de calcul du TRA moyen hebdomadaire dans la CNL2 est précisée dans le rapport « État de la ventilation dans le parc de logement français » en cours de publication.

3 Méthodologie statistique

L'objectif de ce rapport est d'établir un modèle de régression linéaire multiple explicatif des niveaux de concentration intérieure en $PM_{2,5}$ issus de la CNL2 au regard des caractéristiques descriptives des bâtiments enquêtés et des activités de leurs occupants.

Ce travail se décompose en plusieurs étapes : une revue de la littérature visant à identifier les déterminants des concentrations en $PM_{2,5}$; une correspondance avec les variables disponibles dans la base de données issue de la CNL2, une phase de préparation des données en vue de l'application d'un modèle de régression linéaire multiple ; une analyse bivariée pour présélectionner les variables à inclure ; enfin la modélisation des variables retenues pour l'élaboration du modèle final (**Figure 1**). Ces étapes sont détaillées dans la présente section 3.

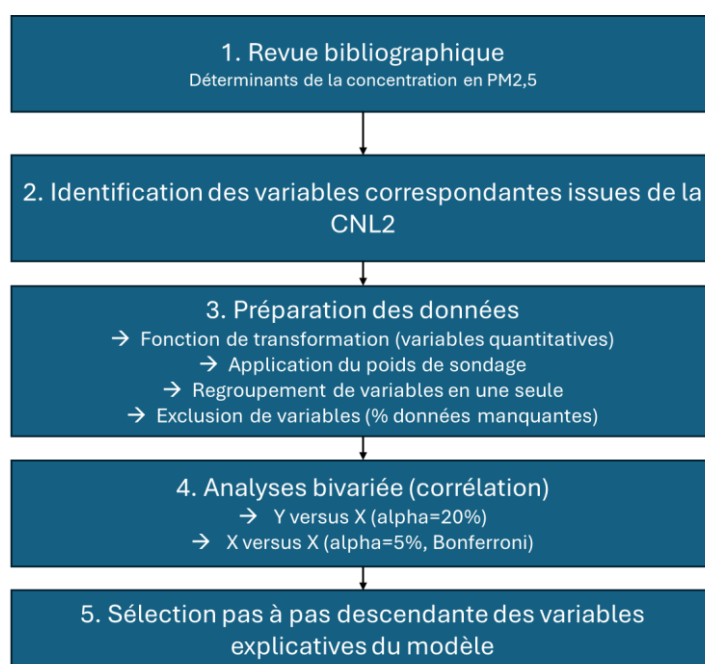


Figure 1. Méthodologie appliquée dans ce rapport sur les données issues de la CNL2 pour identifier les déterminants de la concentration en $PM_{2,5}$

3.1 Identification des variables candidates au modèle

3.1.1 Revue bibliographique des déterminants de la concentration en $PM_{2,5}$

Trois moteurs de recherche bibliographiques ont été utilisés : ScienceDirect, PubMed et Google Scholar.

Pour réaliser la recherche bibliographique, seuls les articles publiés après 2010 ont été retenus. Des mots-clés (en anglais), centrés sur les déterminants et les facteurs influençant les concentrations intérieures de $PM_{2,5}$, ont été utilisés et sont listés ci-après :

- *Determinants of Indoor $PM_{2,5}$* ;

- *Determinants of personal exposure to fine particulate ;*
- *Assessment of indoor PM_{2.5} and its influencing factors ;*
- *Factors on indoor PM_{2.5} ;*
- *Identification of influential factors of indoor PM_{2.5} ;*
- *Contribution source of Indoor PM_{2.5}.*

Au total, 32 articles ont été sélectionnés et sont présentés dans l'**Annexe 1**. Une liste des déterminants significatifs de la concentration des PM_{2.5} y est dressée pour chaque document exploité et exploré. Cette liste a été effectuée par ordre chronologique descendant sur l'année de publication du document.

Les déterminants identifiés ont été classés en 7 grandes catégories :

- L'environnement extérieur du logement ;
- Les caractéristiques du logement ;
- Les caractéristiques des individus ;
- Les habitudes de vie et comportement des ménages ;
- L'environnement intérieur ;
- Les caractéristiques spatio-temporelles ;
- La perception.

3.1.2 Identification des variables disponibles dans la CNL2 au regard de celles mises en évidence dans la recherche bibliographique

Une correspondance entre la liste des variables identifiées dans la littérature et celles à disposition a été effectuée au regard de l'ensemble des variables collectées dans la CNL2. Le **Tableau 1** présente les variables effectivement disponibles dans la CNL2 en lien avec ces déterminants identifiés dans la littérature (**Annexe 2**).

Tableau 1. Liste des variables disponibles dans la CNL2 et potentielles candidates au modèle expliquant la concentration intérieure des PM_{2,5}

| Catégorie de variables | Variables |
|--|--|
| Environnement extérieur au logement | Température (°C) |
| | Activité commerciale dans l'immeuble |
| | A proximité (rayon 10m) de bouche(s) de rejet d'air vicié (extracteurs de garages collectifs, conduit de fumée du voisinage, etc.) |
| | A proximité (rayon 200m) d'un chantier de construction / démolition |
| | A proximité (rayon 200m) d'une zone de cultures/champ cultivé |
| Caractéristiques des logements | Type de logement |
| | Nombre de pièces d'habitation |
| | Logement composé d'une seule pièce principale |
| | Etage du logement |
| | Statut d'occupation |
| | Présence d'un jardin, terrain ou cour privative |

| Catégorie de variables | Variables |
|---|---|
| | Période de construction |
| | Matériaux des principaux murs |
| | Surface totale du logement |
| | Type de cuisine (fermée, ouverte, si pas de cuisine, installation pour faire la cuisine) |
| | Nombre de pièces à usage de cuisine indépendante |
| | Cuisine équipée d'une hotte aspirante |
| | Chauffage principal ou d'appoint à combustion (raccordé ou non raccordé) en fonctionnement |
| | Système de chauffage central, individuel ou collectif |
| | Logement équipé d'une cheminée |
| | Type de combustible principal pour le chauffage (bois, électricité, gaz, fioul, etc.) |
| | Type d'énergie pour cuire les aliments |
| | Type de ventilation du logement |
| | Taux de renouvellement d'air (TRA) |
| | Utilisation d'une unité de contrôle climatique (climatiseur central ou autre) |
| | Réalisation de travaux d'aménagement/de rénovation de l'intérieur de votre logement |
| | Présence d'un garage attenant ou communiquant |
| Caractéristiques des occupants | Age |
| | Sexe |
| | Statut activité ou catégorie socioprofessionnelle (CSP) |
| Comportements et activités des ménages | Tabagisme / Vapotage à l'intérieur |
| | Se déchausser en entrant dans le logement |
| | Activité de cuisine (événements de cuisson, ménages classés comme cuisinant) |
| | Utilisation du four traditionnel, de la cuisson à l'eau/à la vapeur ou de la poêle/friture |
| | Aération par ouverture de fenêtres |
| | Chauffage principal en fonctionnement |
| | Fréquence et type de la ventilation (ouverture des fenêtres/hotte/mécanique) utilisé lors de la cuisson |
| | Utilisation des produits nettoyant de surface (sol, mur, vitre, mobilier), |
| | Utilisation des désodorisants et/ou parfums sous forme d'aérosol (vaporisateur/pistolet) |
| | Utilisation chauffage d'appoint de type : poêle à gaz ou à pétrole, poêle à bois ou insert |
| | Fréquence et type de nettoyage des sols (aspirateur mécanique / ballet) |
| | Nettoyage à sec (récupérer les vêtements du pressing) |
| | Taux de renouvellement de l'air |
| | Utilisation d'encens et/ou de bougies |

| Catégorie de variables | Variables |
|--|--|
| | Taille de ménage (nombre de personnes vivant dans le logement) |
| | Nombre moyen de présence des personnes/semaine |
| | Densité de présence de personnes |
| | La présence des plantes dans le logement |
| | La présence animaux domestiques dans le logement |
| | La présence de composteurs dans le logement |
| | Faire des activités de loisirs créatifs et/ou travaux (usage de peintures, vernis, colles ou d'autres produits, perçage, etc.) |
| | Utilisation de produits générant des émanations odorantes / poussières |
| | Introduction dans le logement de meubles en bois/en plastique, tapis/moquettes ou autres matériaux |
| Environnement intérieur du logement | Température intérieur (°C) |
| | Humidité relative (%) |
| Perception des occupants | Jugement de l'air intérieur |
| | Source d'insatisfaction vis-à-vis de l'air |
| | Sentiment global dans le logement |
| | A l'ouverture des fenêtres, gêne liée à la poussière provenant de l'extérieur |
| Caractéristiques spatio-temporelles | Saison |
| | Période (chauffe/hors chauffe) |
| | Densité urbaine |

Dans la CNL2, aucune mesure de concentration extérieure en $PM_{2,5}$ n'a été réalisée. Les concentrations extérieures en $PM_{2,5}$, utilisées dans ce travail, proviennent des données modélisées CHIMERE de l'INERIS pour les enquêtes antérieures à 2023, et de la base Copernicus pour les enquêtes réalisées en 2023. Elles correspondent à des moyennes de concentration sur la semaine d'enquête. Les concentrations extérieures ont été appariées au logement grâce à un algorithme développé dans le cadre du Data Challenge du GD4H 2024.

Finalement, 62 variables peuvent être identifiées comme déterminants potentiels de la concentration intérieure en $PM_{2,5}$.

3.2 Préparation des données et analyses univariés

3.2.1 Application du poids de sondage

Afin que les résultats soient interprétables au niveau du parc des résidences principales en France hexagonale continentale (cible de la CNL2), une analyse utilisant les poids de sondage a été réalisée. La méthode de calcul des poids de sondage est disponible dans le rapport de l'OQAI (Ramalho et al. 2025).

3.2.2 Effectifs déséquilibrés dans les modalités de réponses

La préparation des données a impliqué une sélection rigoureuse des variables afin de garantir la robustesse des analyses. A cette fin, près d'une cinquantaine de variables catégorielles avec des effectifs déséquilibrés ont été retravaillées ou écartées de l'analyse, notamment :

- Les variables binaires dont une classe représentait moins de 10 % de l'échantillon ont été exclues, à l'exception de la variable d'intérêt « Activité commerciale dans l'immeuble » ;
- Lorsque cela était justifié, les variables à plus de deux niveaux de modalités ont été regroupées, permettant ainsi de limiter les déséquilibres dans leur distribution ;

D'autres variables ont été regroupées afin de ne pas être éliminées (**Annexe 3**).

3.2.3 Valeurs manquantes

Concernant la gestion des données manquantes, les valeurs manquantes/non disponibles ont été recodées lorsque suffisamment d'information permettait de le faire afin de ne pas être écartées de l'analyse. Ainsi, par défaut si l'information était manquante, la modalité négative (pire cas) a été imputée, c'est-à-dire où les ménages sont considérés comme n'étant pas équipés de « ... », ne faisant pas l'activité « ... » ou encore n'utilisant pas le produit « ... » (**Annexe 3**).

À la suite de cette reconstruction d'information, les variables présentant plus de 10 % de valeurs manquantes (en pourcentages sur le parc national de logement) ont été exclues de la modélisation.

3.2.4 Application de fonctions de transformation

Afin de respecter l'hypothèse de linéarité relative au modèle de régression multiple, les variables explicatives quantitatives (X) potentiellement intégrées au modèle et dont la distribution ne suivait pas une Loi Normale ont été transformées.

Le choix de la fonction de transformation a été guidé à la fois par une évaluation graphique des relations entre les variables et par la complexité de la fonction envisagée. L'objectif était de simplifier l'interprétation des paramètres du modèle, tout en assurant une représentation fidèle des tendances observées. Ainsi, parmi les transformations possibles, celles qui permettaient une linéarisation visuelle satisfaisante et restaient relativement simples à exprimer et à interpréter ont été privilégiées (**Tableau 2**). Ces transformations permettent de respecter au mieux les hypothèses de construction du modèle.

Tableau 2. Transformations appliquées aux variables quantitatives

| Variables (X) | Fonction de transformation | Formule de la fonction de transformation ($F(X)$) |
|--|----------------------------|---|
| Concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ | Logarithme népérien | $\log(X)$ |

| Variables (X) | Fonction de transformation | Formule de la fonction de transformation ($F(X)$) |
|---|-----------------------------------|---|
| Concentrations extérieures en PM _{2,5} | Logarithme népérien | $\log(X)$ |
| Densité de présence dans le logement | Logarithme népérien | $\log(X)$ |
| Surface du logement | Logarithme népérien | $\log(X)$ |
| Taux de renouvellement de l'air | Logarithme népérien | $\log(X)$ |

3.3 Analyse multivariée : élaboration du modèle de régression

L'objectif de ce modèle est explicatif, c'est-à-dire qu'il vise à comprendre les relations entre les niveaux de concentration en PM_{2,5} et les variables explicatives recueillies dans le cadre de la CNL2.

Une analyse de sensibilité a été réalisée afin de déterminer l'impact de l'application des poids de sondage sur les résultats du modèle. Ainsi, deux modèles de régression linéaires sont présentés dans ce rapport : un modèle pondéré (modèle linéaire généralisé (GLM)) et un modèle non-pondéré (régression linéaire classique).

Afin de faciliter l'interprétation des paramètres du modèle, le choix des modalités de référence des variables qualitatives a été établi selon les critères suivants :

- Lorsque la modalité « Non » ou « Jamais » était présente, elle a été choisie comme modalité de référence ;
- À défaut, la modalité associée aux plus faibles valeurs a été désignée comme modalité de référence.

Dans la suite du document le modèle « complet » correspond à un modèle contenant l'ensemble des variables et le « modèle réduit » correspond au modèle final plus simple avec moins de variables.

3.3.1 Modèle pondéré

3.3.1.1 Application du modèle linéaire multiple pondéré

Un modèle linéaire généralisé tenant compte du plan de sondage a été appliqué via la fonction `svyglm` avec l'option de fonction de lien de type gaussienne.

3.3.1.2 Sélection des variables à intégrer dans le modèle

La sélection des variables à intégrer dans le modèle de régression linéaire multiple s'effectue en deux étapes. Dans un premier temps, les relations entre chaque variable explicative potentielle et les niveaux de concentration intérieure en PM_{2,5} ont été explorées à l'aide d'une analyse bivariée. Ensuite, afin de vérifier la condition d'indépendance de ce type de modèle, les associations entre les différentes variables explicatives ont été examinées.

À la suite de l'exploration des résultats de ces analyses bivariées, un ensemble de variables a été sélectionné par les experts pour être intégré au modèle.

La méthode de sélection pas à pas descendante d'élimination progressive (seuil $\alpha=5\%$) a été appliquée aux variables intégrées au modèle. Le type « *both* » a également été utilisé pour vérifier que le choix de cette méthode de sélection de variables explicatives n'influçait pas les résultats.

3.3.1.2.1 Corrélation entre les potentielles variables explicatives et les concentrations intérieures en PM_{2,5}:

Pour les variables quantitatives, ces associations ont été réalisées au moyen de **tests** :

- **Tests de corrélation de Pearson** (Pearson and Galton 1997a) **pondérés** (Josh Pasek, 2011) ;
- **Analyses de variance** (ANOVA, (Fisher 1992)) **pondérées** pour les variables qualitatives.

Les variables ayant un test statistique avec une **p-valeur inférieure à 20%** (seuil de significativité retenu pour cette sélection) ont été retenues pour les étapes ultérieures de corrélations entre variables explicatives.

3.3.1.2.2 Corrélation entre les potentielles variables explicatives entre elles :

Les associations entre deux variables explicatives quantitatives ont été évaluées au moyen de **corrélation de Pearson** (Pearson and Galton 1997b; Spearman 1904).

Les associations impliquant une variable explicative quantitative et une variable explicative qualitative ont été examinées à l'aide de tests de **Kruskal-Wallis** (Kruskal and Wallis 1952) via la fonction *svyranktest* du package *survey* (Lumley 2020).

Enfin, les associations entre deux variables explicatives qualitatives ont été analysées par le test du **Chi²** (Pearson 1900) via la fonction *svychisq* du package *srvyr* (Freedman Ellis and Schneider 2024).

Afin de corriger l'inflation du risque alpha due au nombre important de tests statistiques réalisés, une correction des p-values obtenues selon la méthode de **Bonferroni** (Dunn 1961) via la fonction *p.adjust* a été appliquée.

Les variables ayant un test statistique avec une **p-valeur inférieure à 5%** (seuil de significativité défini pour cette sélection) ont été retenues pour les étapes ultérieures de modélisation.

3.3.2 **Modèle non-pondéré**

3.3.2.1 Application du modèle linéaire multiple non-pondéré

Un modèle de régression linéaire ne tenant pas compte du plan de sondage a été appliqué via la fonction *lm*.

3.3.2.2 Sélection des variables à intégrer dans le modèle

À des fins de comparaison, la même méthodologie de sélection de variables que celle utilisée pour le modèle pondéré final a été appliquée pour le modèle non-pondéré.

La **multicolinéarité** a été vérifiée dans le modèle non-pondéré. Les associations entre deux variables explicatives quantitatives ont été évaluées au moyen de la **corrélation de Pearson** (fonction *cor.test*).

Les associations entre deux variables explicatives quantitatives ont été évaluées au moyen de la **corrélation de Pearson** (Pearson and Galton 1997b; Spearman 1904).

Les associations impliquant une variable explicative quantitative et une variable explicative qualitative ont été examinées à l'aide de tests de **Kruskal-Wallis** (Kruskal and Wallis 1952) via la fonction *kruskal.test*.

Enfin, les associations entre deux variables explicatives qualitatives ont été analysées par le test du **Chi²** (Pearson 1900) via la fonction *chisq.test*.

Afin de corriger l'inflation du risque alpha due au nombre important de tests statistiques réalisés, une correction des p-values obtenues selon la méthode de **Bonferroni** (Dunn 1961) via la fonction *p.adjust* a été appliquée.

3.3.3 Critères d'évaluation du modèle

3.3.3.1 Apport de chaque variable au modèle

Concernant les variables explicatives du modèle de régression linéaire multiple, différents tests (De Boeck Supérieur 2019) ont été appliqués pour sélectionner le modèle final :

- Test de **Fisher globaux** : teste l'**apport global et conjoint** de l'ensemble des variables explicatives du modèle par rapport à la variable à expliquer (concentrations de PM_{2,5}) ;
- Test de **Student** : teste l'**apport spécifique** des variables explicatives du modèle avec un seuil de significativité fixé à 5 % (risque alpha de première espèce).

3.3.3.2 Performance

La **performance** du modèle a également été quantifiée par deux grandeurs :

- **R²** : le coefficient de détermination qui mesure l'adéquation entre un modèle issu d'une régression linéaire multiple et les données observées qui ont permis de l'établir. Il mesure ainsi le pourcentage de variation des concentrations de PM_{2,5} expliquées par les variables explicatives ;
- **R² ajusté** : le coefficient de détermination ajusté qui tient compte du nombre de variables, le R² pouvant croître avec le nombre de variables explicatives.

3.3.3.3 Contribution à la construction du modèle

La **contribution des variables** dans le modèle pondéré sera évaluée par la variation de la déviance (modèle complet versus modèle restreint). Une déviance élevée indique que la variable est pertinente à garder dans le modèle

La **contribution des variables** dans le modèle non-pondéré sera évaluée par la fonction *calc.relimp* du package Relaimpo (Groemping 2007) avec l'option « LMG » (Lindeman, Merenda et Gold) qui décompose la variance R^2 . Ces contributions ont été normalisées afin que la somme fasse 100 %.

3.3.3.4 Pourcentage d'évitement ou fraction attribuable (FAP) sur l'ensemble des logements :

Ce pourcentage est calculé selon les notions de fraction attribuable dans la population ou de pourcentage de changement utilisé dans le domaine de l'épidémiologie (Giles 1982; Greenland and Drescher 1993).

- **Variables explicatives qualitatives** : $FAP = \left(\frac{p \times (RR-1)}{p \times (RR-1) + 1} \right) \times 100$
- **Variable quantitative** : le scénario de référence X_0 correspond au plus bas niveau de concentration en $PM_{2,5}$ extérieure mesuré soit $2,8 \mu g/m^3$ et X_1 les logements les plus exposés soit le 75^{ème} centile soit $10,6 \mu g/m^3$. Si on considère la variation suivante :

$$\Delta(X) = \log(X_1) - \log(X_0) = \log(10,6) - \log(2,8) = 2,36 - 1,03 = 1,33 \mu g/m^3$$

$$Ratio = \exp(\beta \times \Delta X) = \exp(\beta \times 1,33)$$

Par définition, la probabilité p d'être supérieure ou égale au 75^{ème} centile est de 15 %. En considérant comme population exposée les logements avec des concentration supérieures au 75^{ème} centile, alors :

$$FAP = \left(\frac{p \times (Ratio - 1)}{p \times (Ratio - 1) + 1} \right) \times 100$$

3.3.4 Adéquation du modèle

L'adéquation des modèles pondérés et non pondérés sera vérifiée graphiquement notamment l'homoscédasticité via l'analyse des résidus et la linéarité via un graphique quantile-quantile.

3.3.5 Paramètres statistiques descriptives des tableaux et figures

Les variables **numériques** sont décrites grâce à des estimateurs de tendance centrale (moyenne, médiane) et de dispersion (centiles, minimum, maximum). Leurs distributions, redressées au niveau du parc national de logements français, sont illustrées par des histogrammes et des boîtes à moustache, où le trait épais indique la médiane et les moustaches s'étendent jusqu'à 1,5 fois l'écart interquartile (écart entre le 25^e centile et le 75^e centile).

Quant aux variables **catégorielles**, leur distribution est présentée en pourcentage de résidences principales issues du parc de logements de la France hexagonale continentale.

4 Résultats

Pour rappel, les distributions des variables de ce rapport sont présentées en termes de pourcentage de résidences principales issues du parc de logements de la France hexagonale continentale.

4.1 Description des niveaux de concentration intérieure en PM_{2,5} dans les logements issus de la CNL2

Les mesures de concentration intérieure en PM_{2,5} sont exploitables dans 515/571 logements représentant environ 27 millions de résidences principales. Le **Tableau 3** présente les fréquences de détection et de quantification des concentrations ainsi que des statistiques descriptives des niveaux de concentration mesurés dans les logements.

Tableau 3. Distribution des concentrations de PM_{2,5} mesurés dans le séjour du logement et comparaison avec la valeur de référence

| Estimateur | PM _{2,5} (µg/m ³) |
|--|--|
| Limite de détection de la méthode (LDM) | 3,0 |
| Limite de quantification de la méthode (LQM) | 3,0 |
| Pourcentage de valeurs supérieures à la LDM | 99,5 |
| Pourcentage de valeurs supérieures à la LQM | 99,5 |
| N échantillon | 515 |
| N parc national de logements | 27 291 803 |
| Minimum échantillon | <LDM |
| Maximum échantillon | 620,6 |
| 25 ^{ème} centile | 9,5 |
| Médiane | 13,2 |
| Moyenne géométrique | 15,9 |
| Intervalle de confiance à 95% | [14 ; 18] |
| 75 ^{ème} centile | 22,4 |
| 90 ^{ème} centile | 52,8 |

La description met en évidence une distribution fortement asymétrique des valeurs observées (**Figure 2**). La majorité des logements se situent entre 3 et 50 µg/m³ avec une moyenne arithmétique, s'élevant à 27,6 µg/m³, nettement supérieure à la médiane (13,2 µg/m³). Il y a donc une asymétrie avec des valeurs rapprochées sur la gauche du graphique et des valeurs élevées voire extrêmes sur la droite (maximum à 620,6 µg/m³). Les valeurs mesurées dans la CNL2 sont donc en partie supérieures aux recommandations mondiales de l'OMS (seuil de 10 µg/m³) avec des logements extrêmes faiblement pollués (<LDM) comme fortement pollués (90^{ème} centile=52,8 µg/m³).

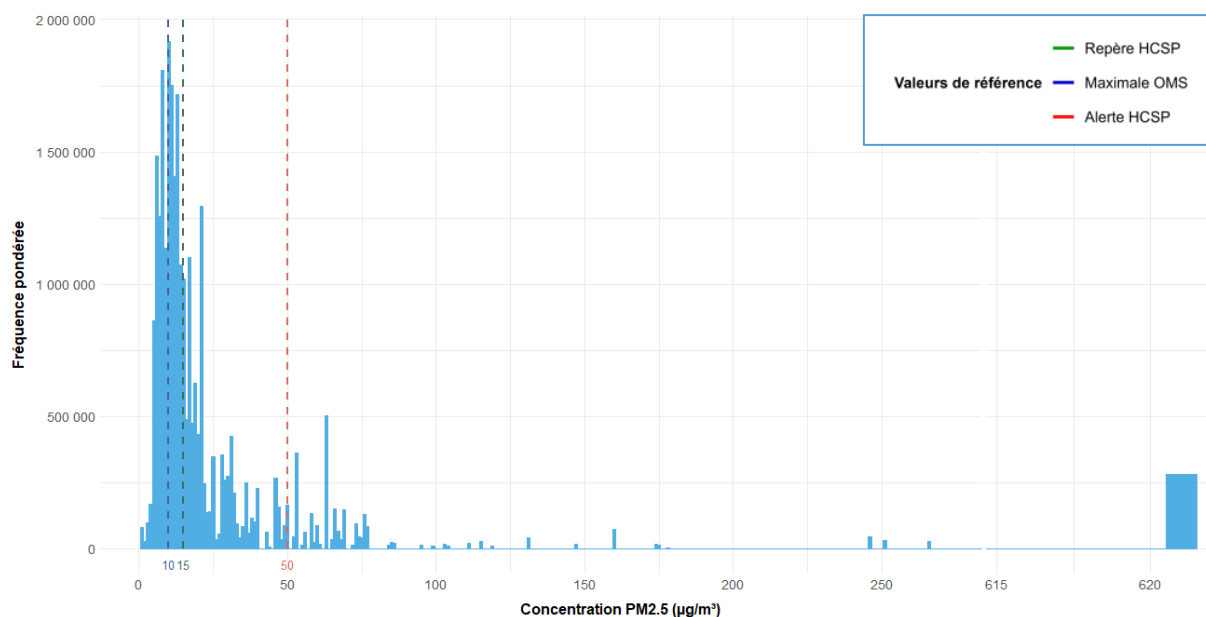


Figure 2 : Distribution des niveaux de concentration en PM_{2,5} dans le séjour du logement

4.2 Les déterminants potentiels de la concentration en PM_{2,5}

4.2.1 Sélection des variables explicatives du modèle

Sélection univariée des déterminants potentiels :

La base de données CNL2 comporte un peu plus de 200 variables brutes, parmi lesquelles des variables ont été exclues :

- Variables non pertinentes selon les experts ;
- Effectif de réponse par modalité faible ($n < 5$) ;
- Variables dont les résultats semblaient non cohérents ;
- Variables brutes dont l'information a été combinée avec d'autres variables dérivées.

Ainsi, 79 variables ont été identifiées comme déterminants potentiels de la concentration en PM_{2,5} pour le modèle explicatif.

Sélection bivariée des déterminants potentiels (Annexe 4) :

Une analyse bivariée de corrélation entre les variables explicatives et les concentrations en PM_{2,5} a été menée sur les 79 variables restantes. Sur la base du critère retenu pour les analyses bivariées (p -valeur $< 20\%$), 42 variables ont été exclues, ce qui ramène à 37 le nombre de déterminants potentiels de la concentration en PM_{2,5}.

À l'issue de cette première étape, une analyse des corrélations entre les 37 variables explicatives a été réalisée (Annexe 4), permettant de retenir 20 variables pour la modélisation des déterminants de la concentration en PM_{2,5}, décrites dans les sections suivantes (4.2.3).

4.2.2 Description des variables

Variables décrivant l'environnement extérieur du logement :

L'unique variable retenue, à la suite de la sélection de variables, décrivant l'environnement extérieur au logement, est la concentration extérieure en $PM_{2,5}$. Le **Tableau 4** décrit la distribution des niveaux de concentration extérieure en $PM_{2,5}$.

Tableau 4. Distribution des concentrations extérieures en $PM_{2,5}$

| Estimateur | $PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|--------------------------------|---|
| N échantillon | 515 |
| N parc national de logements | 27 291 803 |
| Minimum | 2,8 |
| 25 ^{ème} centile | 6,0 |
| Médiane | 8,5 |
| Moyenne géométrique | 8,5 |
| Intervalle de confiance à 95 % | [7,9 ; 9,1] |
| Moyenne arithmétique | 9,4 |
| Ecart-type | 4,7 |
| 75 ^{ème} centile | 10,6 |
| 90 ^{ème} centile | 16,1 |
| Maximum | 31,3 |

La **Figure 3** illustre la distribution des niveaux de concentration **extérieure** en $PM_{2,5}$ et montre l'aspect asymétrique de la distribution, moins prononcé que pour la distribution des niveaux de concentration intérieure en $PM_{2,5}$ avec une médiane/moyenne géométrique à $8,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et un maximum à $31,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

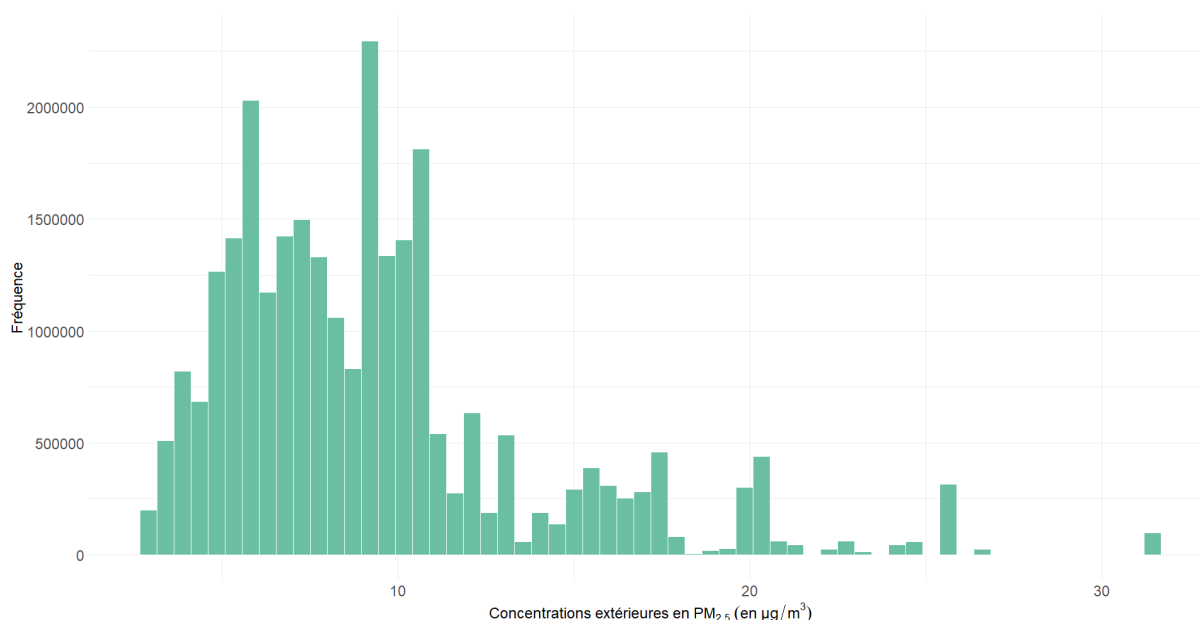


Figure 3 : Distribution des niveaux de concentration extérieure en $PM_{2,5}$

Variables décrivant les activités du ménage :

Le **Tableau 5** présente le descriptif de 14 variables, issues de la CNL2, relatives aux activités des ménages durant la semaine d'enquête et identifiées comme un déterminant potentiel de la concentration intérieure des PM_{2,5}. Il se lit de la façon suivante : pour l'activité « Fréquence d'utilisation d'un nettoyeur chimique de surface », la troisième colonne indique que dans 35,5 % des logements, les surfaces n'ont pas été nettoyées durant la semaine d'enquête (1^{ère} ligne), dans 31,5 % des logements, un seul nettoyage a eu lieu (2^{ème} ligne) et dans 33 % des logements au moins 2 nettoyages des surfaces ont eu lieu (3^{ème} ligne).

Tableau 5. Activités dans les logements au cours de la semaine de mesure

| Activité | Modalités | Pourcentage (%) |
|---|--------------------------------|------------------------|
| Durée d' aération du séjour par jour | <0,5h | 24,7 |
| | Entre 0,5 et 1h | 53,6 |
| | >1h | 21,7 |
| Utilisation de bougie ou d'encens | Non | 85,4 |
| | Oui | 14,6 |
| Combustion | Pas de combustion | 28,7 |
| | Gaz étanche | 12,9 |
| | Gaz ouvert | 23,3 |
| | Solide fermée | 28,8 |
| | Solide ouverte | 6,3 |
| Utilisation d'un DESODORISANT ou PARFUM D'AMBIANCE sous forme d' AEROSOL ou VAPORISATEUR ou PISTOLET | Non | 78,2 |
| | Oui | 21,8 |
| Utilisation de la ventilation mécanique en grand débit (vitesse maximale) lors de la préparation des repas | Non | 86,6 |
| | Oui | 14,4 |
| Nettoyage hebdomadaire avec un balais | Jamais | 48,8 |
| | Une à trois fois | 26,9 |
| | Plus de trois fois | 24,3 |
| Tabagisme à l'intérieur du logement | Non | 88,8 |
| | Oui | 11,2 |
| Fréquence d'utilisation d'un nettoyeur chimique de surface (pour carrelage, céramique, faïence, plastique, vitres, cire, dépoussiérant) y compris mousse pour tapis/moquette | Pas de nettoyage | 35,5 |
| | Une fois par semaine | 31,5 |
| | Au moins deux fois par semaine | 33,0 |
| Saison* | Chauffe | 75,8 |
| | Hors-chauffe | 24,2 |
| Fréquence d'utilisation de la hotte de cuisson | Jamais | 55,5 |
| | Temps en temps | 27,8 |
| | Tous les jours | 16,7 |

| Activité | Modalités | Pourcentage (%) |
|--|-----------|-----------------|
| Présence de tapis ou de moquette | Non | 56,8 |
| | Oui | 43,2 |
| Travaux (peintures, aménagements, isolation, moquettes, carrelage, parquets, chauffage etc...) dans le logement | Non | 61,0 |
| | Oui | 39,0 |

* En fonction des degrés-jours (DJ) (source : Météo France, 2024) : Si les DJ sont supérieurs à 0°C au moins 2 jours de la semaine => période de chauffe ; Sinon => hors période de chauffe.

Variables décrivant le logement :

Le **Tableau 6** présente le descriptif de 12 variables, issues de la CNL2, relatives aux caractéristiques du logement et identifiées comme un déterminant potentiel de la concentration intérieure des PM_{2,5}.

Tableau 6. Caractéristiques des logements enquêtés

| Caractéristiques | Modalités | Pourcentage (%) |
|---|--|-----------------|
| Type de logement | Appartement | 42,8 |
| | Maison | 57,2 |
| Type de ventilation | Aucune | 14,4 |
| | Mécanique Centralisée | 50,7 |
| | Mécanique ponctuelle répartie | 13,7 |
| | Naturelle | 21,2 |
| Type et fonctionnement du chauffage central pendant la semaine de mesure | Arrêt du système de chauffage | 36,6 |
| | Fonctionnement du système de chauffage à combustion (bois, butane/propane, charbon, fioul, gaz de ville) | 38,9 |
| | Fonctionnement du système de chauffage sans combustion (chauffage collectif quel que soit le combustible, individuel électrique ou par réseau de chaleur) | 24,5 |
| Présence d'une climatisation | Non | 79,4 |
| | Oui | 20,6 |
| Type de cuisine | Aucune ou cuisine fermée | 46,3 |
| | Cuisine ouverte | 53,7 |
| Numéro d'étage | -1 ou 0 | 66,5 |
| | 1 ou 2 | 19,9 |
| | ≥3 | 13,6 |
| Présence d'une bouche d'aération | Non | 62,6 |
| | Oui | 37,4 |
| Présence d'une hotte dans la cuisine | Non | 31,3 |
| | Oui, sans recyclage | 32,8 |
| | Oui, à recyclage | 35,9 |

| Caractéristiques | Modalités | Pourcentage (%) |
|--|--------------------|-----------------|
| Murs principaux en brique | Non | 74,3 |
| | Oui | 25,7 |
| Murs principaux en parpaing | Non | 63,5 |
| | Oui | 36,5 |
| Présence d'au moins une bouche d'extraction d'air vicié* à proximité (<10m) | Non | 62,6 |
| | Oui | 37,4 |
| Type d'unité urbaine (source Insee) | Hors unité urbaine | 21,4 |
| | [2000 ; 200000[| 26,6 |
| | [200000 ; 2000000[| 21,4 |
| | Paris | 17,0 |

* Extracteurs de garages collectifs, conduit de fumée du voisinage, etc.

Les **Figure 4** à **Figure 6**, représentent les concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ en fonction du tabagisme intérieur, du type de logement et du type de ventilation.

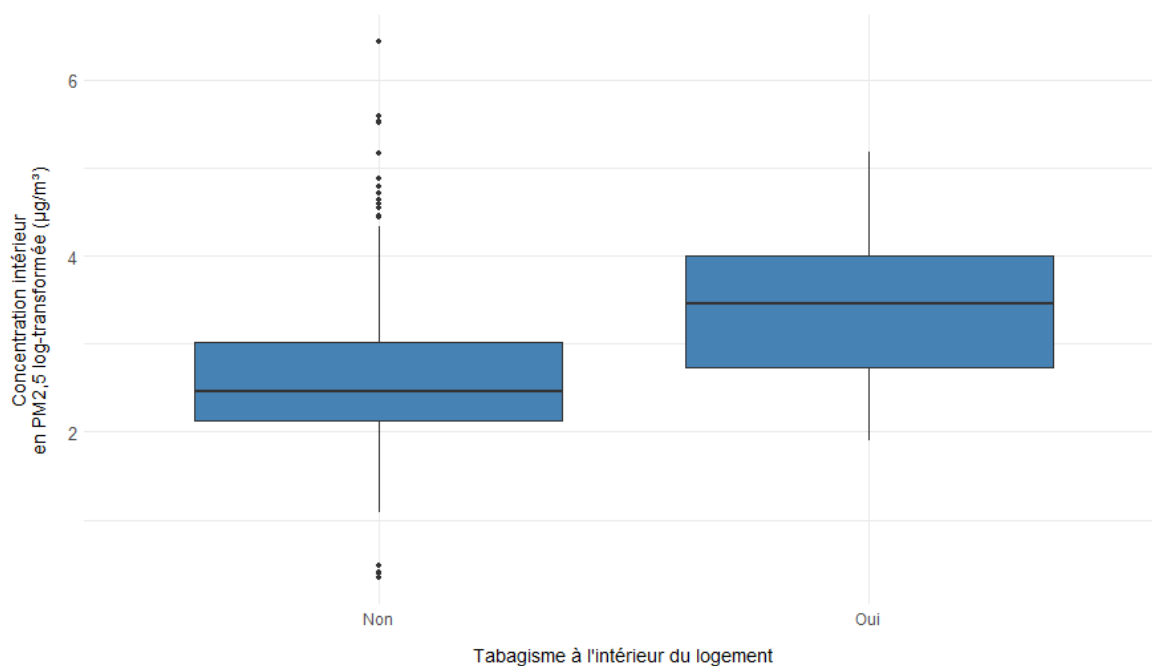


Figure 4. Distribution des concentrations en $PM_{2,5}$ log-transformée en fonction du tabagisme intérieur

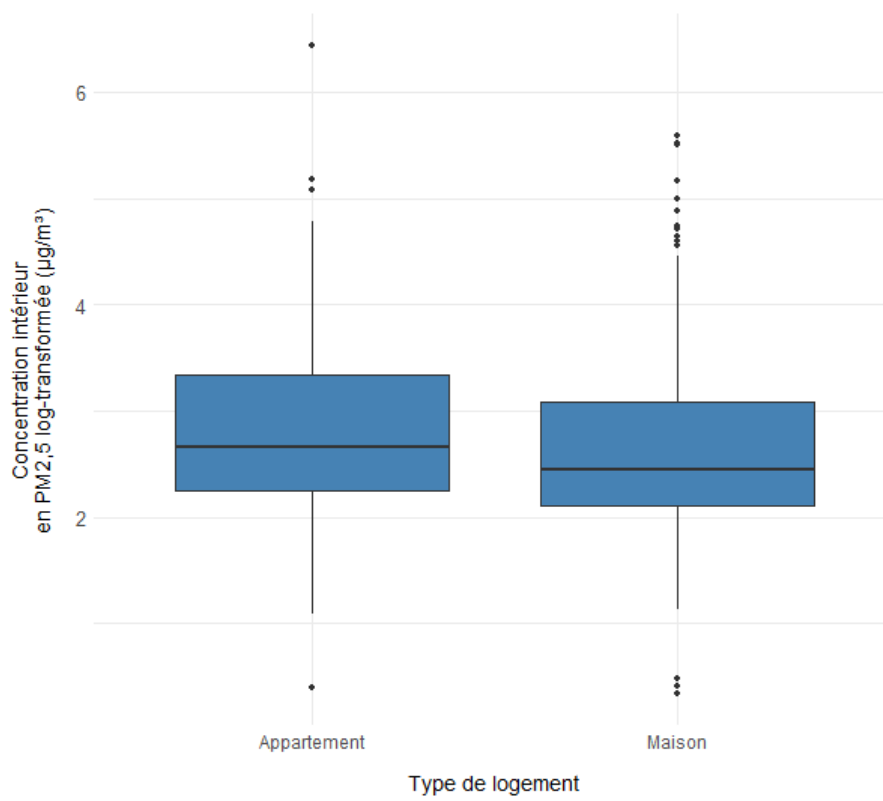


Figure 5. Distribution des concentrations en PM_{2,5} log-transformée en fonction du type de logement

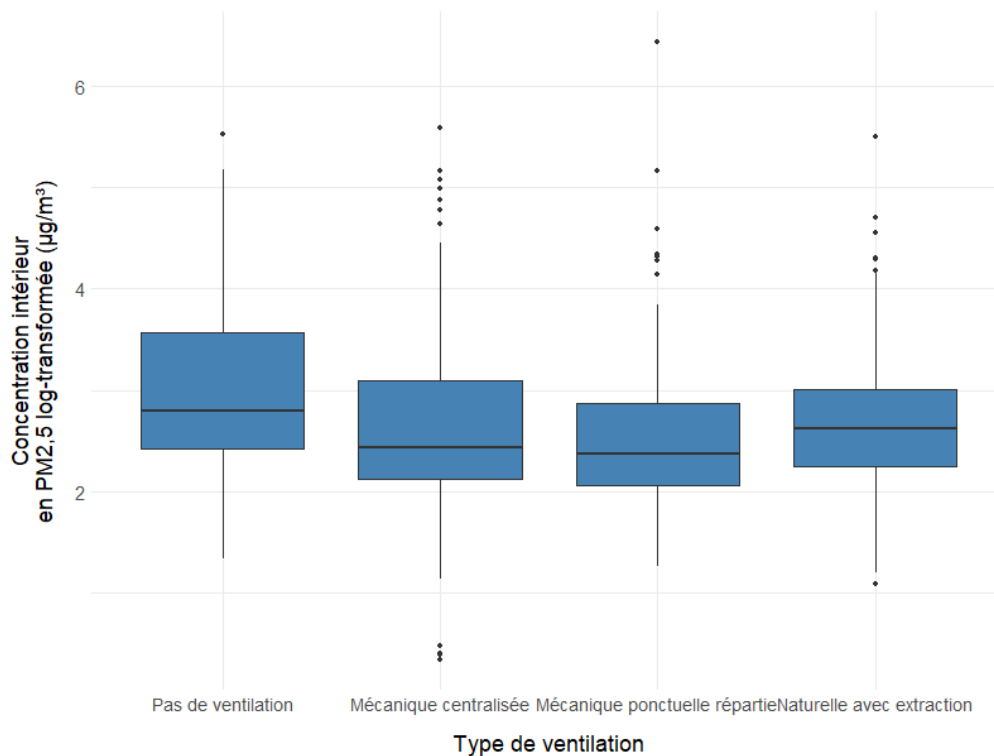


Figure 6. Distribution des concentrations en PM_{2,5} log-transformée en fonction du type de ventilation

Description des variables quantitatives :

La **Figure 7** illustre les deux caractéristiques retenues concernant les occupants : l'âge de la personne de référence et le nombre moyen d'occupants durant la semaine d'enquête, identifiées comme un déterminant potentiel de la concentration intérieure des PM_{2,5}.

La **Figure 8** illustre la répartition du taux de renouvellement d'air qui a également été testé comme déterminant potentiel.

Le **Tableau 7** correspond au descriptif relatif de ces deux variables.

Tableau 7. Description de la distribution de l'âge de la personne de référence, du nombre d'occupants dans le logement, de la durée de présence moyenne, du taux de renouvellement et du taux de présence

| Estimateurs | Age (ans) | Nombre moyen d'occupants durant la semaine | Durée de présence moyenne * | Taux renouvellement d'air (TRA) | Taux de présence ** |
|--------------------|------------------|---|------------------------------------|--|----------------------------|
| Moyenne | 55 | 1,1 | 18,8 | 0,60 | 0,79 |
| Écart-type | 16 | 0,3 | 0,276 | 0,04 | 0,01 |
| Minimum | 23 | 0,18 | 0,75 | 0,07 | 0,03 |
| 1er Quartile (Q25) | 42 | 0,9 | 17,2 | 0,30 | 0,72 |
| Médiane | 54 | 1,1 | 19,5 | 0,45 | 0,81 |
| 3e Quartile (Q75) | 67 | 1,3 | 21,2 | 0,75 | 0,88 |
| Q90 | 76 | 1,6 | 22,4 | 1,12 | 0,94 |
| Q95 | 84 | 1,7 | 23 | 1,51 | 0,96 |
| Maximum | 90 | 2,10 | 24 | 3,97 | 1,00 |

**Nombre de pas de temps cumulé où une présence de l'individu est déclarée, rapporté au nombre de pas de temps renseigné et multiplié par 24 heures.*

*** Le taux de présence sur la semaine correspond au cumul des périodes pour lesquelles au moins un occupant est présent dans le logement rapporté à l'ensemble de la semaine. Un taux de présence de 50 % correspond ainsi à la présence d'au moins un occupant dans le logement sur la moitié de la semaine.*

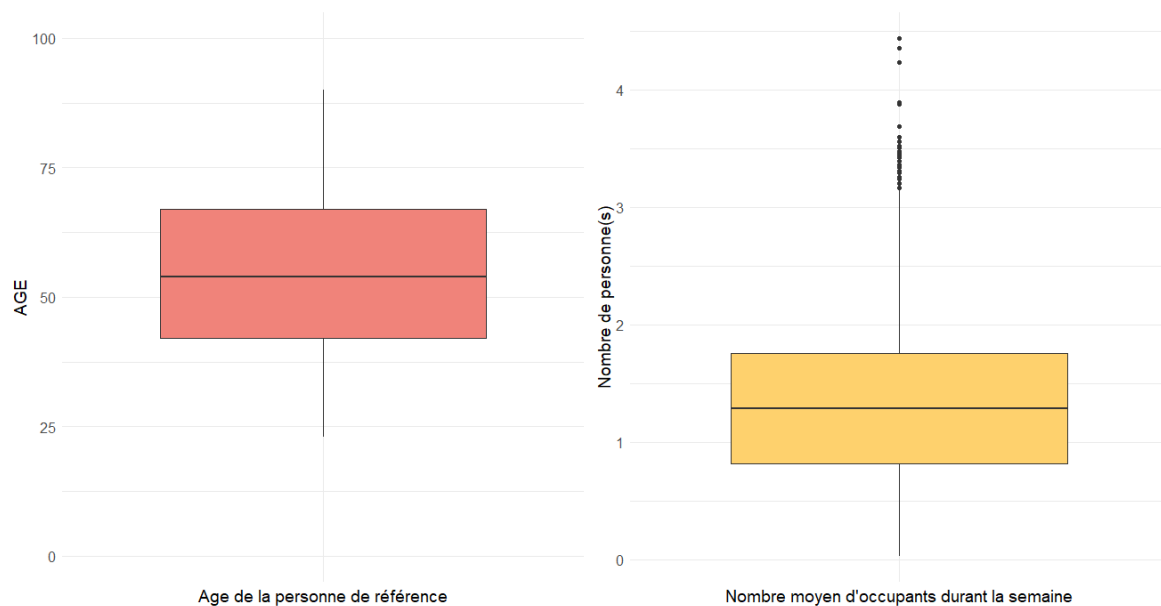


Figure 7 : Distribution de l'âge de la personne de référence (à gauche) et du nombre moyen d'occupants durant la semaine d'enquête (à droite)

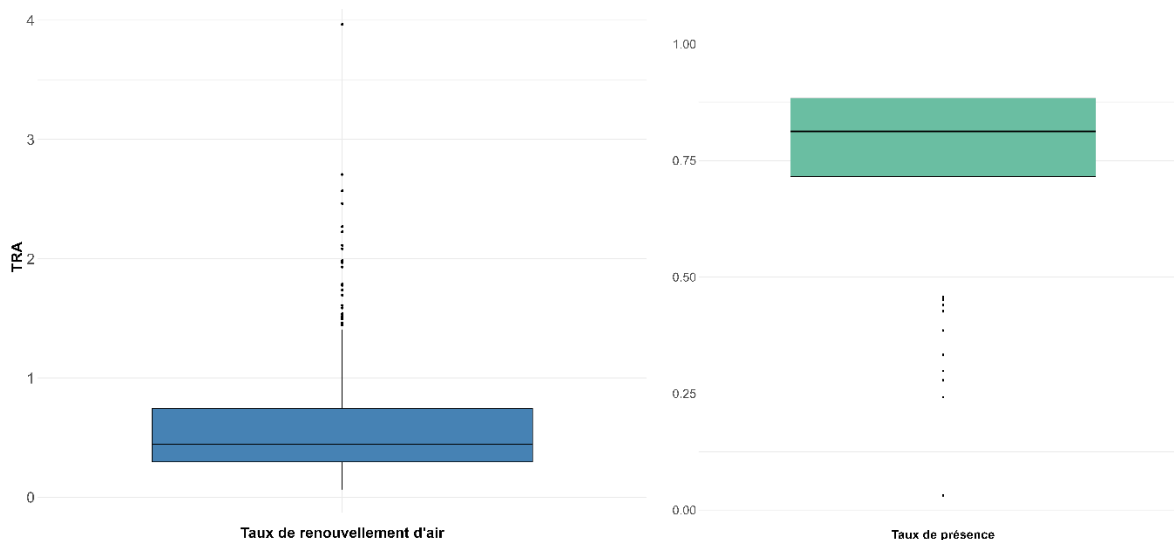


Figure 8 : Distribution du taux de renouvellement d'air moyen (à gauche) et le taux de présence (à droite)

4.2.3 Les modèles explicatifs de la concentration intérieure en PM_{2,5}

Deux types de modèles explicatifs de la concentration intérieure en PM_{2,5} ont été réalisés et sont présentés ci-après :

- Modèle **pondéré** et redressé à l'échelle du parc national de logements de l'Hexagone ;
- Modèle **non-pondéré** représentatif de l'échantillon des logements enquêtés.

4.2.3.1 Modèle pondéré et redressé à l'échelle du parc national logement

4.2.3.1.1 Modèle pondéré estimé sur l'ensemble des logements

L'ensemble des 20 variables présentées dans la partie 4.2 ont été introduites dans le modèle puis une procédure de sélection des variables explicatives selon la méthode pas à pas descendante a été effectuée (**Annexe 5**).

Le modèle final retenu a pour formule générale (formule simplifiée dans un but explicatif) :

$$\log(PM_{2,5}^{INT}) = \beta_0 + \beta_1 \times CHAUFFAGE + \beta_2 \times TABAC^{INT} + \beta_3 \times PM_{2,5}^{EXT} + \beta_4 \times NETTOYAGE^{CHIM} + \beta_5 \times LOGEMENT + \beta_6 \times VENTILATION + \beta_7 \times CHAUFFAGE \times VENTILATION$$

Et la formule statistique non simplifiée fait apparaître les modalités :

$$\begin{aligned} \log(PM_{2,5}^{INT}) = & \beta_0 + \beta_{11} \times CHAUFFAGE_{combustion} + \beta_{12} \times CHAUFFAGE_{sanscombustion} + \beta_2 \times TABAC^{INT} + \beta_3 \times PM_{2,5}^{EXT} \\ & + \beta_{41} \times NETTOYAGE_{1}^{CHIM} + \beta_{42} \times NETTOYAGE_{>sem}^{CHIM} + \beta_5 \times LOGEMENT_{maison} \\ & + \beta_{61} \times VENTILATION_{meca.central} + \beta_{62} \times VENTILATION_{meca.ponct} + \beta_{63} \times VENTILATION_{naturelle} \\ & + \beta_{71} \times CHAUFFAGE_{combustion} \times VENTILATION_{meca.central} \\ & + \beta_{72} \times CHAUFFAGE_{combustion} \times VENTILATION_{meca.ponct} \\ & + \beta_{73} \times CHAUFFAGE_{combustion} \times VENTILATION_{naturelle} \\ & + \beta_{74} \times CHAUFFAGE_{sanscombustion} \times VENTILATION_{meca.central} \\ & + \beta_{75} \times CHAUFFAGE_{sanscombustion} \times VENTILATION_{meca.ponct} \\ & + \beta_{76} \times CHAUFFAGE_{sanscombustion} \times VENTILATION_{naturelle} \end{aligned}$$

Les résultats des coefficients bêta de ce modèle associés aux **variables catégorielles** sont exprimés en exponentielle afin de faciliter l'interprétation des paramètres des modèles. Ces derniers, ainsi que leur écart-type et leur p-valeur sont présentés dans le Tableau 8 ci-dessous.

Voici un **exemple d'interprétation des paramètres bêtas** issus des modèles pondérés :

- L'intercept (β_0) est rarement interprété en régression multiple. Son interprétation ne sera pas donnée ici.
- Les autres coefficients relatifs aux **variables catégorielles** (exprimés en exponentielle dans les tableaux) peuvent s'interpréter sous différents angles de vue.
- Cet exemple porte sur l'interprétation du paramètre du modèle pondéré associé au **tabagisme intérieur** ($TABAC^{INT}$). La valeur moyenne de concentration de $PM_{2,5}$ en présence de tabagisme intérieur ($TABAC^{INT} = 1$) par rapport en l'absence de tabagisme intérieur ($TABAC^{INT} = 0$), toutes choses étant égales par ailleurs est de :

$$RR = \frac{\text{Exp}(\beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \beta_2 \times 1 + \dots + \beta_7 \times X_7)}{\text{Exp}(\beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \beta_2 \times 0 + \dots + \beta_7 \times X_7)} = \text{Exp}^{\beta_2} = 1,55$$

Cette formule fait appel aux propriétés logarithmiques et exponentielles

- En moyenne, les logements où du tabagisme intérieur a été déclaré présentent des concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ 1,55 fois plus élevées que

les logements sans tabagisme intérieur, toutes choses égales par ailleurs (p-valeur < 5%).

- Autrement dit, le tabagisme intérieur est associé à une augmentation de 55% de la moyenne géométrique des concentrations intérieures en PM_{2,5} dans les logements avec du tabagisme intérieur par rapport à ceux sans tabagisme (référence), toutes choses étant égales par ailleurs.
- Pour la **variable quantitative** (concentration en PM_{2,5} extérieure) : une augmentation de 10% de la concentration en PM_{2,5} extérieure est associée à $(1,10^\beta - 1) \times 100 \%$ variation de la moyenne géométrique de PM_{2,5}. Ainsi, **une augmentation de 10% de la concentration en PM_{2,5} extérieure est associée à une augmentation de 2,6 % de la moyenne géométrique des concentrations de PM_{2,5} intérieures** (Carilli, n.d.; 'FAQ How Do I Interpret a Regression Model When Some Variables Are Log Transformed?', n.d.).

Tableau 8. Paramètres du modèle pondéré explicatif de la concentration en PM_{2,5} issus de l'exploitation des données de la CNL2

| Variable | Coeff ^a [IC95%] | p-valeur ^b modalité | p-valeur ^c variable |
|--|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Intercept | 11,2 [6,27 ; 20] | | <0,001 |
| Type et fonctionnement de chauffage | | | 0,003 |
| Arrêt du système de chauffage | - | - | |
| A combustion* | 1,46 [0,96 ; 2,22] | 0,078 | |
| Sans combustion ** | 0,61 [0,37 ; 1,01] | 0,055 | |
| Tabagisme à l'intérieur du logement | | | 0,007 |
| Non | - | - | |
| Oui | 1,55 [1,13 ; 2,12] | - | |
| Concentration extérieure en PM_{2,5} log-transformée^d (µg/m³) | 0,27 [0,06 ; 0,47] | | 0,010 |
| Fréquence d'utilisation d'un nettoyant chimique de surface | | | 0,012 |
| Pas de nettoyage | - | - | |
| Une fois par semaine | 0,97 [0,80 ; 1,18] | 0,753 | |
| Au moins deux fois par semaine | 1,44 [1,11 ; 1,87] | 0,010 | |
| Type de logement | | | 0,018 |
| Appartement | - | - | |
| Maison | 0,75 [0,59 ; 0,95] | 0,002 | |
| Type de ventilation | | | 0,291 |
| Pas de ventilation | - | - | |
| Mécanique centralisée | 0,71 [0,48;1,05] | 0,084 | |
| Mécanique ponctuelle répartie | 0,87 [0,58;1,33] | 0,523 | |
| Naturelle | 0,81 [0,50;1,29] | 0,370 | |
| Ventilation × chauffage | | | 0,033 |
| A combustion* × Mécanique centralisée | 0,78 [0,48;1,27] | 0,321 | |
| A combustion* × Mécanique ponctuelle répartie | 1,31 [0,58 ; 2,93] | 0,516 | |
| A combustion* × Naturelle | 0,66 [0,37 ; 1,17] | 0,156 | |
| Sans Combustion** × Mécanique centralisée | 1,24 [0,68 ; 2,24] | 0,480 | |
| Sans Combustion** × Mécanique ponctuelle répartie | 1,09 [0,60 ; 2,00] | 0,767 | |
| Sans Combustion** × Naturelle | 1,52 [0,84 ; 2,76] | 0,168 | |

Abréviation : IC95% = Intervalle de Confiance à 95%

a EXP^β : Coefficients du modèle exprimés en exponentielle car transformation logarithmique de la variable initiale ;

b Test de Student ;

c Test Fisher global ;

d Coefficients du modèle (≠exprimés en exponentielle) représentant le ratio des pourcentages de variation (élasticité log-log)

* Bois, butane, propane, charbon, fioul, gaz de ville

** Individuel électrique, réseau de chaleur ou collectif

4.2.3.1.2 Modèle pondéré stratifié sur la variable type de chauffage

Lors de la spécification du modèle pondéré (**Tableau 8**) des interactions ont été testées dont une s'est révélée être significative. Il s'agit de **l'interaction entre le type de chauffage et le type de ventilation** qui est ressortie significative (p -valeur $<0,001$). **Trois modèles distincts** ont été estimés et sont présentés dans le **Tableau 9**. Chaque modèle correspond à une modalité de chauffage donnée (pas de chauffage, chauffage avec combustion, chauffage sans combustion). Cette manière de représenter les résultats appelée stratification permet d'évaluer l'effet de la ventilation pour un type de chauffage fixé.

En effet, les poids de sondage initiaux conçus pour représenter le parc national de logement ne permettent plus d'équilibrer les logements dans les modèles stratifiés puisque l'analyse porte sur un sous-échantillon. Par exemple, le sous-échantillon de logements ayant un système de chauffage sans combustion est principalement composé d'appartements à 67% contre 34% et 36% pour les autres modalités de chauffage hors fonctionnement et chauffage à combustion respectivement.

Seuls les coefficients associés à la variable type de ventilation seront présentés pour les modèles stratifiés dans le tableau ci-dessous, bien que l'ajustement ait été réalisé sur les mêmes variables que celles du modèle précédemment présenté dans le **Tableau 8**.

Tableau 9. Paramètres du modèle pondéré explicatif de la concentration en PM_{2,5} issus de l'exploitation des données de la CNL2 stratifié en fonction du type de chauffage

| | Type de chauffage | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Sans chauffage | | | Avec combustion * | | | Sans combustion ** | | |
| | N=163 ; R ₂ ajusté=17% | | | N= 231 ; R ₂ ajusté=30% | | | N= 121 ; R ₂ ajusté=24% | | |
| | Coeff ^a [IC95%] | P- valeu r ^b | P- vale ur ^c | Coeff ^a [IC95%] | P- valeu r ^b | P- valeu r ^c | Coeff ^a [IC95%] | P- vale ur ^b | P- vale ur ^c |
| Type de ventilation | | | | | | | | | |
| Pas de ventilation | - | - | 0,236 | - | - | <0,001 | - | - | 0,132 |
| Mécanique centralisée | 0,71 [0,48 ; 1,03] | 0,071 | - | 0,50 [0,36 ; 0,68] | <0,001 | 1 | 1,24 [0,72 ; 2,13] | 0,42 5 | - |
| Mécanique ponctuelle répartie | 0,86 [0,58 ; 1,28] | 0,457 | - | 1 [0,55 ; 1,80] | 0,991 | - | 1,1 [0,66 ; 1,82] | 0,70 4 | - |
| Naturelle | 0,83 [0,51 ; 1,35] | 0,445 | - | 0,49 [0,34 ; 0,70] | <0,001 | 1 | 1,68 [0,98 ; 2,9] | 0,612 | - |

Abréviation : IC95% = Intervalle de Confiance à 95%

a Coefficients du modèle exprimés en exponentielle car transformation logarithmique de la variable initiale ;

b Test de Student ;

c Test Fisher global ;

d Coefficients du modèle (\neq exprimés en exponentielle) représentant le ratio des pourcentages de variation (élasticité log-log)

* Bois, butane, propane, charbon, fioul, gaz de ville

** Individuel électrique, réseau de chaleur ou collectif

4.2.3.1.3 Pourcentage d'évitement du modèle pondéré

Comme indiqué dans la section 4.2.3.1.1, des pourcentages d'évitement peuvent être calculés. Ainsi, toutes choses étant égales par ailleurs, près de :

- 6% de la pollution intérieure en $PM_{2,5}$ aurait pu être évitée si aucun logement n'était exposé à une pollution extérieure supérieure à $7,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en prenant comme scénario de référence une pollution de $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$;

$$\begin{aligned} \text{Ratio} &= \exp(\beta \times \Delta X) = \exp(0,27 \times 1,33) = \exp(0,36) = 1,43 \\ \left(\frac{p \times (\text{Ratio} - 1)}{p \times (\text{Ratio} - 1) + 1} \right) \times 100 &= \left(\frac{0,15 \times (1,43 - 1)}{0,15 \times (1,43 - 1) + 1} \right) \times 100 \\ &= \frac{0,07}{1,07} \times 100 = 0,061 \times 100 = 6,1\% \end{aligned}$$

- 6% de la pollution intérieure en $PM_{2,5}$ aurait pu être évitée dans l'ensemble des logements en l'absence de tabagisme intérieur

$$\left(\frac{p \times (\exp(\beta) - 1)}{p \times (\exp(\beta) - 1) + 1} \right) \times 100 = \left(\frac{0,112 \times (1,55 - 1)}{0,112 \times (1,55 - 1) + 1} \right) \times 100 = 0,058 \times 100 \cong 6\%$$

- 13% de la pollution intérieure en $PM_{2,5}$ aurait pu être évitée dans l'ensemble des logements si aucun logement n'effectuait de nettoyage des surfaces fréquent avec un produit nettoyant chimique de surface ;
- Vivre en maison est associé à une réduction de 25 % de la pollution intérieure en $PM_{2,5}$, par rapport aux ménages habitant en appartement ;
- En période de chauffe et uniquement pour les logements équipés de systèmes de chauffage à combustion en fonctionnement, avoir une ventilation de type naturelle ou mécanique centralisée réduirait de 1% la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ par rapport aux logements sans ventilation.

4.2.3.1.4 Effets marginaux du modèle pondéré estimé sur l'ensemble des logements

Les figures suivantes illustrent l'**effet moyen pondéré** ajusté de chaque variable considérée **sur la concentration en $PM_{2,5}$** . Ainsi, cet effet dit marginal tient compte des autres variables du modèle en les moyennant. Ces figures fournissent donc une visualisation claire des relations entre les variables explicatives et la concentration intérieure en $PM_{2,5}$, et mettent en évidence les effets marginaux des variables sur la réponse, permettant une interprétation intuitive des coefficients estimés.

La **Figure 9** représente l'effet marginal de la seule variable quantitative du modèle pondéré. L'interprétation de cette figure doit tenir compte du fait que des concentrations log-transformées sont présentées. Le graphique représente une relation linéaire de « log par log ».

Pour pouvoir interpréter ce type de graphique, il faut dans un premier temps définir la pente ($P = \frac{Y_B - Y_A}{X_A - X_B} \approx \frac{2,7 - 2,4}{2 - 1} \approx 0,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de cette relation linéaire log/log.

Cette pente représente la variation lorsque pour une augmentation d'une unité sur l'axe des abscisses, soit $\Delta(\log(PM_{2,5_{EXT}})) = 1$, les concentrations intérieures varient de $0,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\Delta(\log(PM_{2,5_{INT}})) \approx 0,30$).

Sans la notion de log-transformation, cela revient à dire que la variation des concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ correspond à une augmentation de $10^{0,30}=2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ainsi, lorsque les concentrations extérieures en $PM_{2,5}$ augmentent, les concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ augmentent également mais cette variation est moins importante que celle des $PM_{2,5}$ extérieure ($\Delta(\log(PM_{2,5_{INT}})) < \Delta(\log(PM_{2,5_{EXT}}))$).

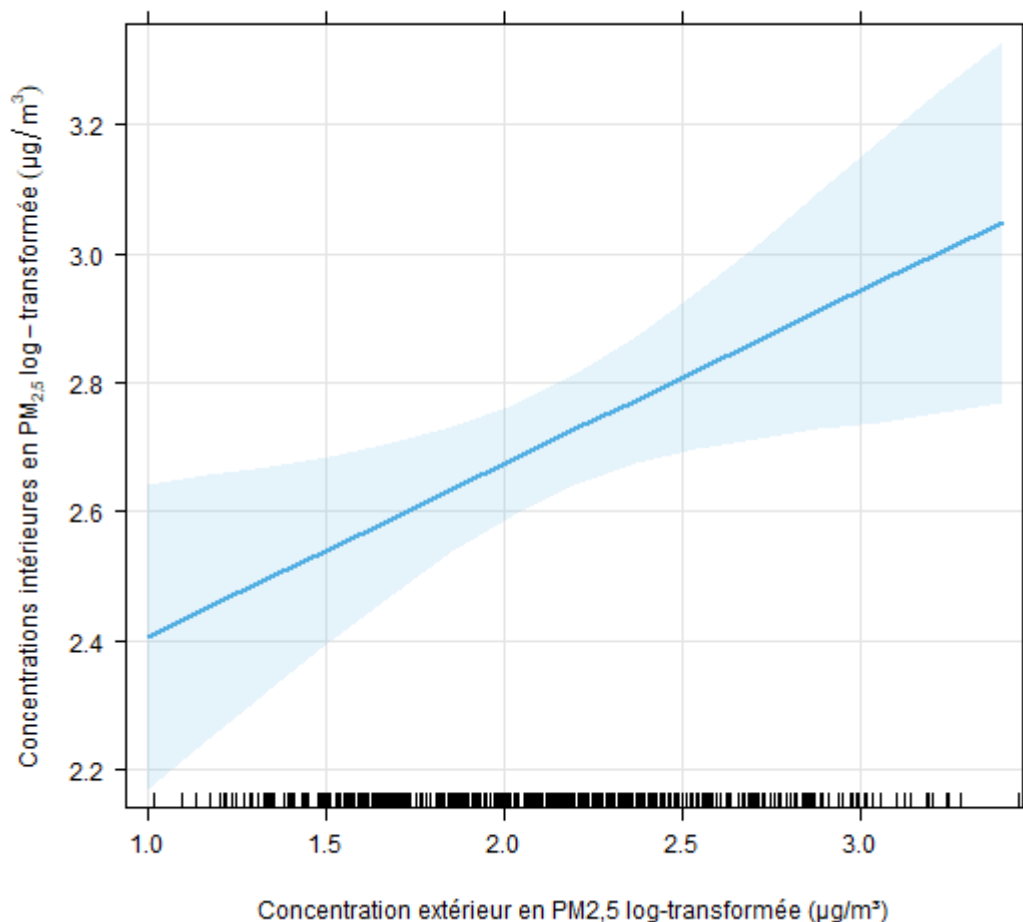


Figure 9. Effet marginal moyen du modèle pondéré ajusté de la concentration extérieure en $PM_{2,5}$ sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$

L'effet marginal de la variable « Tabagisme à l'intérieur du logement » sur les concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ (**Figure 10**) suggère que ces concentrations sont plus importantes lorsqu'il y a du tabagisme dans le logement par rapport à l'absence de tabagisme intérieur ($22,6[16,7 ; 30,5] \mu\text{g}/\text{m}^3$ versus $14,5 [13,3 ; 15,9] \mu\text{g}/\text{m}^3$) avec une p-valeur associée de 0,007.

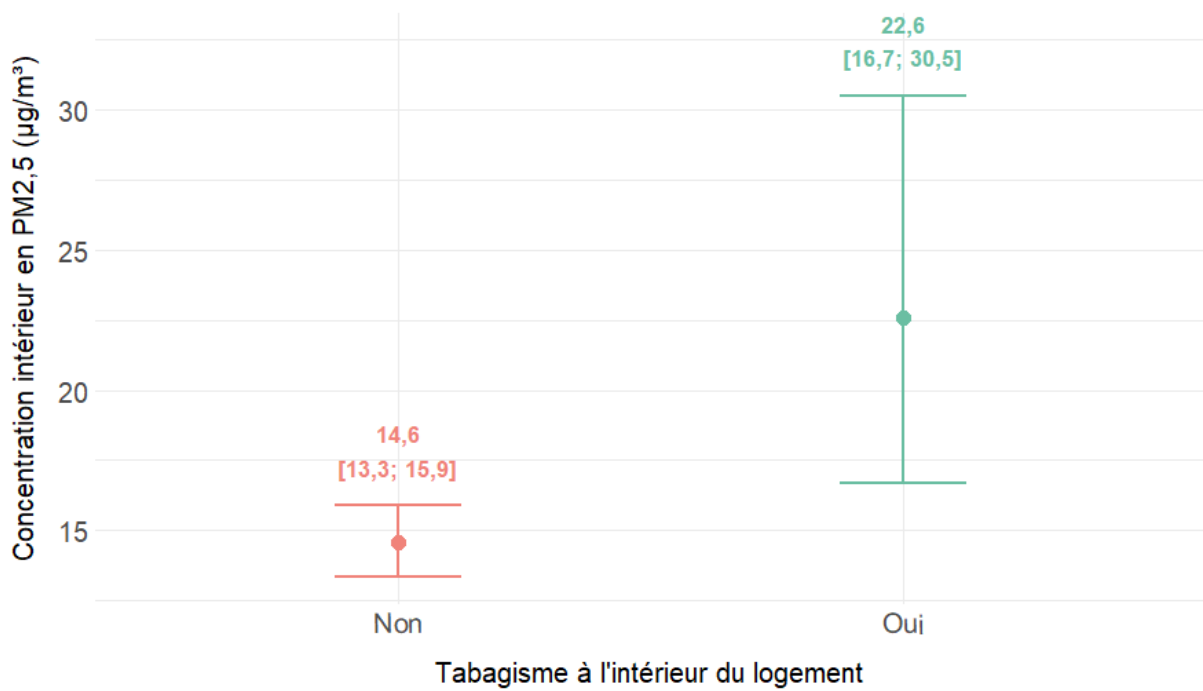


Figure 10 : Effet marginal du tabagisme intérieur du modèle pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5}

L'effet marginal de la variable « Fréquence d'utilisation d'un nettoyant chimique de surfaces » sur les concentrations intérieures en PM_{2,5} (**Figure 11**) suggère qu'une fréquence de nettoyage plus élevée (plus d'une fois par semaine) est associée à des concentrations en PM_{2,5} plus importantes (19,4 [15,8 ; 23,7] µg/m³ versus 13,0 [11,1 ; 15,3] µg/m³) avec un une p-valeur associée de 0,012.

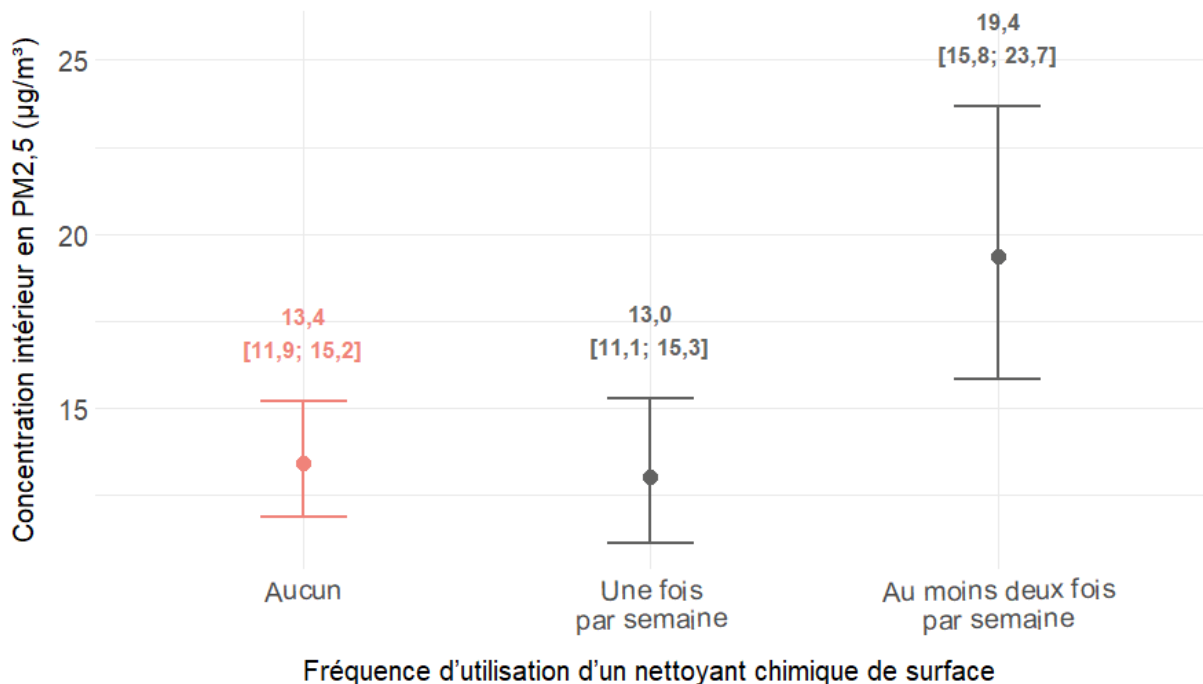


Figure 11 : Effet marginal de la fréquence d'utilisation d'un nettoyant chimique de surface du modèle pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5}

L'effet marginal de la variable « Type de logement » sur les concentrations intérieures en PM_{2,5} (**Figure 12**) suggère que les concentrations en PM_{2,5} sont plus basses dans les maisons 13,8 [12,3 ; 15,4] µg/m³ par rapport à celles mesurées dans les appartements 18,4 [15,3 ; 22,2] µg/m³ avec une p-valeur associée de 0,017.

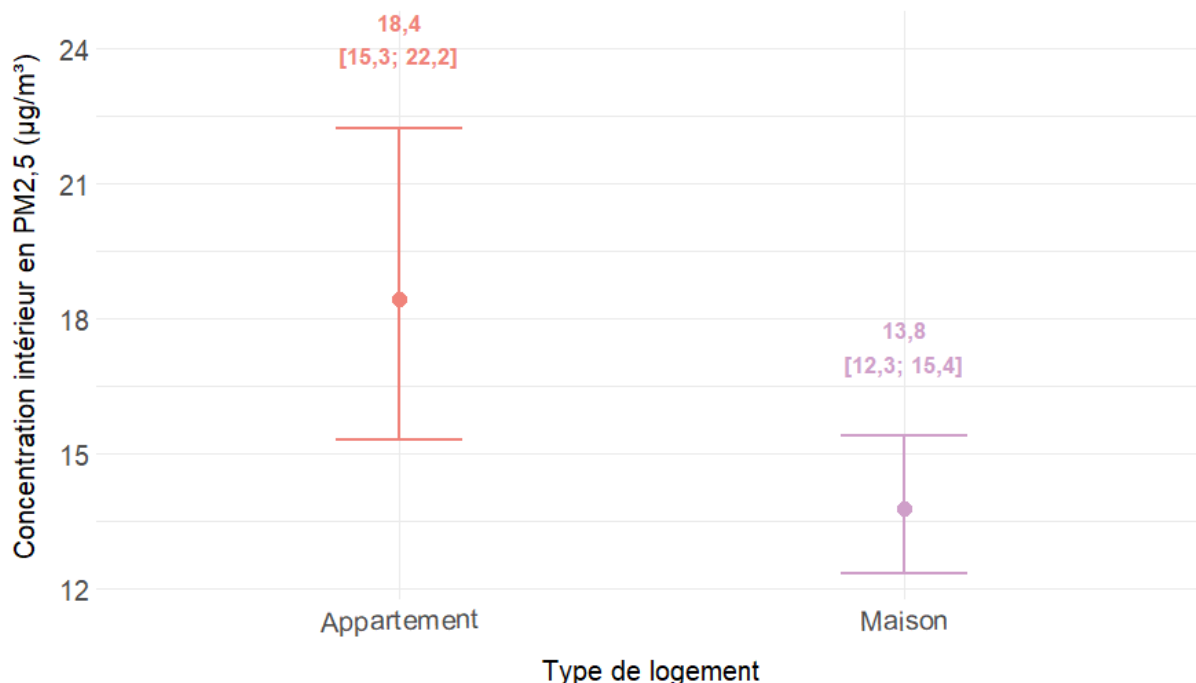


Figure 12 : Effet marginal du type de logement du modèle pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5}

Etant donné que l'effet entre le **type de ventilation varie en fonction du type de chauffage** considéré, les effets marginaux de la variable type de ventilation ont été estimés séparément selon les modalités de chauffage.

Lorsqu'il y a un **chauffage avec combustion** (bois, butane, propane, charbon, fioul, gaz de ville) en fonctionnement, en moyenne si (**Figure 13**) :

- Il y a une ventilation de type **mécanique centralisée**, les logements présentent des concentrations intérieures en PM_{2,5} 0,44 fois inférieures aux logements sans ventilation, toutes choses égales par ailleurs (15,2 [12,5 ; 18,4] µg/m³ versus 27,2 [21,0 ; 35,2] µg/m³) p-valeur égale à 0,001 dans le modèle stratifié ;
- Il y a une ventilation de type **naturelle**, les logements présentent des concentrations intérieures en PM_{2,5} 0,47 fois inférieures aux logements sans ventilation, toutes choses égales par ailleurs (14,5 [11,6 ; 18,1] µg/m³ versus 27,2 [21,0 ; 35,2] µg/m³) avec une p-valeur égale à 0,001 dans le modèle stratifié ;
- Il y a une ventilation de type **mécanique ponctuelle répartie** les logements présentent des concentrations intérieures en PM_{2,5} non statistiquement différentes des logements sans ventilation, toutes choses égales par ailleurs avec une p-valeur non significative de 0,991 dans le modèle stratifié.

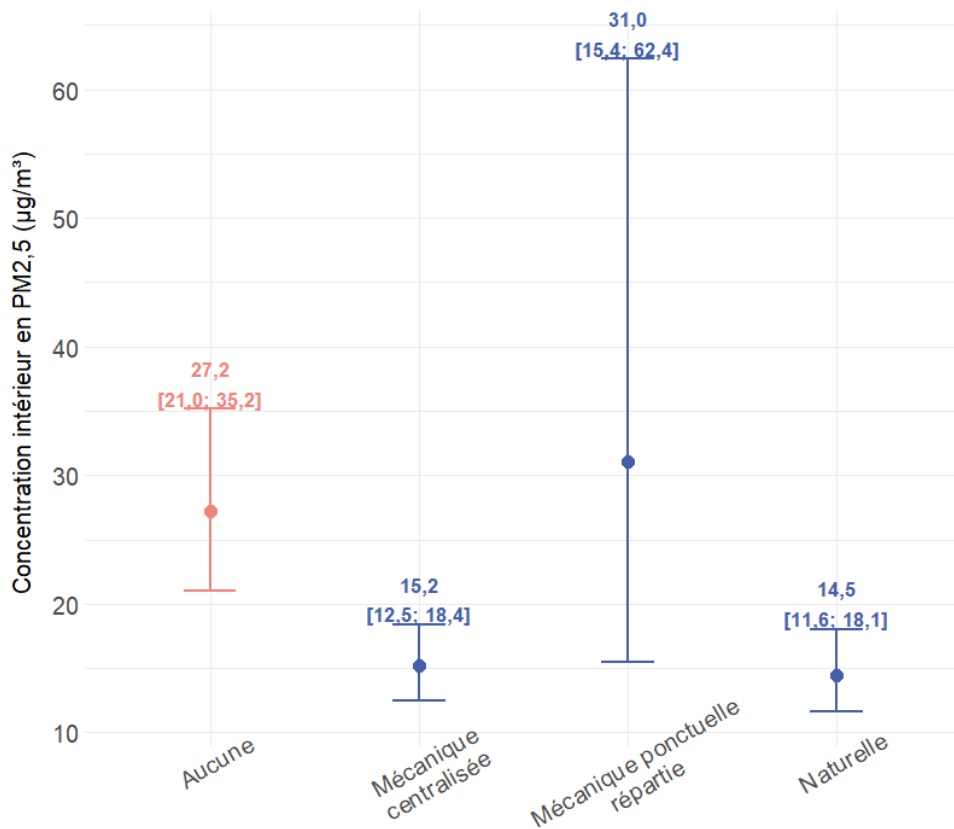


Figure 13 : Effet marginal du type de ventilation du modèle pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5} chez les logements avec un chauffage à combustion

Lorsqu'il y a un **chauffage sans combustion** (Figure 15) ou **que le système de chauffage est à l'arrêt** (Figure 14), en moyenne le type de ventilation n'a pas d'impact sur les concentrations intérieures en PM_{2,5} toutes choses égales par ailleurs (respectivement **p-valeur=0,239** et **p-valeur=0,132** dans le modèle stratifié).

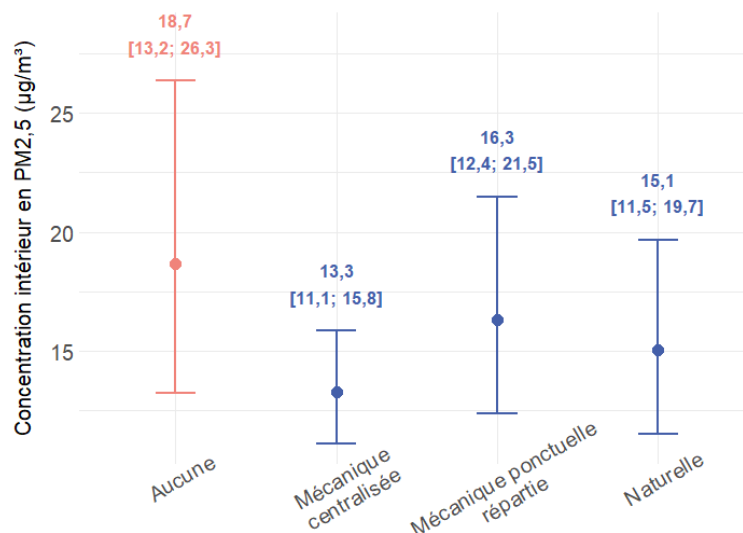


Figure 14 : Effet marginal du type de ventilation du modèle pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5} chez les logements avec un système de chauffage à l'arrêt

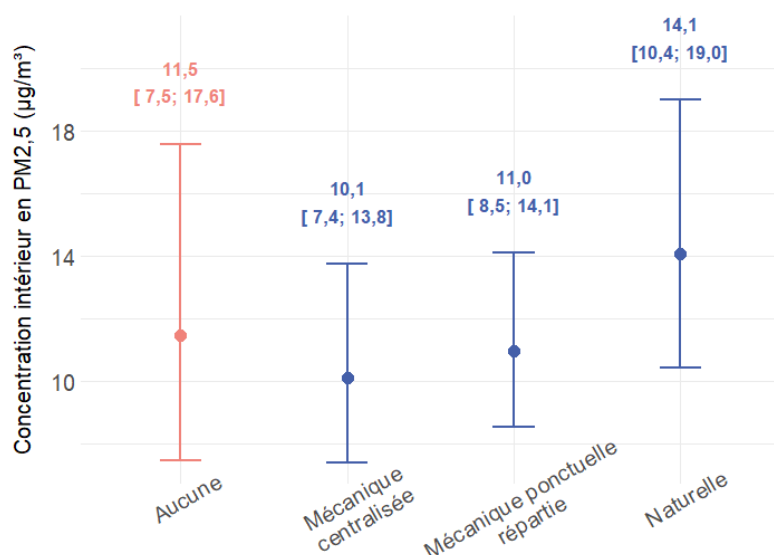


Figure 15 : Effet marginal du type de ventilation du modèle pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5} chez les logements avec un chauffage sans combustion

4.2.3.2 Modèle non-pondéré

4.2.3.2.1 Modèle non-pondéré estimé sur l'ensemble des logements enquêtés

Les variables du modèle non-pondéré final ne sont pas les mêmes que celles utilisées pour créer le modèle pondéré.

Les résultats du modèle non-pondéré ne s'interprètent pas à l'échelle du parc de logement national mais uniquement au niveau de l'échantillon composé des logements enquêtés.

Dans ce modèle non-pondéré, il n'y a pas d'effet de la ventilation sur les concentrations de PM_{2,5} intérieures en fonction du type de chauffage en fonctionnement. Le modèle est donc présenté sans terme d'interaction.

Les variables participant le plus à expliquer les variations de concentration en PM_{2,5} intérieures sont le tabagisme intérieur (35%), la concentration extérieure en PM_{2,5} (26%), le type de ventilation (16%), la saison (11%), le type de logement (7%), le type de combustion (4%) et le taux de renouvellement d'air (<1%) (**Tableau 10**).

Tableau 10. Paramètres du modèle non-pondéré explicatif de la concentration en PM_{2,5} issus de l'exploitation des données de la CNL2

| Variable (contribution au modèle %) | Coeff ^a [IC95%] | p-valeur ^b modalité | p-valeur ^c variable |
|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Intercept | 9,04 [5,54 ; 14,8] | | <0,001 |
| Type de combustion (4%) | | | 0,976 |
| Pas de combustion | | - | |
| Gaz étanche | 1,01 [0,74 ; 1,39] | 0,926 | |
| Gaz ouvert | 1,02 [0,79 ; 1,3] | 0,904 | |
| Solide fermée | 0,96 [0,75 ; 1,22] | 0,717 | |

| Variable (contribution au modèle %) | Coeff^a [IC95%] | p-valeur^b modalité | p-valeur^c variable |
|---|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Solide ouverte | 0,93 [0,67 ; 1,28] | 0,654 | |
| Concentration extérieure en PM_{2,5} log-transformée^d (26%) | 0,31 [0,12 ; 0,50] | | 0,002 |
| Tabagisme à l'intérieur du logement (35%) | | | <0,001 |
| Non | | - | |
| Oui | 1,98 [1,44 ; 2,72] | - | |
| Saison (11%) | | | 0,022 |
| Hors-chauffe | | | |
| Chauffe | 1,27 [1,04 ; 1,56] | | |
| Taux renouvellement d'air (0,8%) | 0,99 [0,88 ; 1,11] | | 0,887 |
| Type de logement (7%) | | | 0,235 |
| Appartement | | - | |
| Maison | 0,88 [0,71 ; 1,09] | - | |
| Type de ventilation (12%) | | | 0,108 |
| Pas de ventilation | | - | |
| Mécanique centralisée | 0,71 [0,55 ; 0,91] | 0,006 | |
| Mécanique ponctuelle répartie | 0,71 [0,52 ; 0,97] | 0,031 | |
| Naturelle | 0,78 [0,59 ; 1,03] | 0,079 | |

Abréviation : IC95% = Intervalle de Confiance à 95%

a Coefficients du modèle exprimés en exponentielle car transformation logarithmique de la variable initiale ;

b Test de Student ;

c Test Fisher global ;

d Coefficients du modèle (≠ exprimés en exponentielle) représentant le ratio des pourcentages de variation (élasticité log-log) ;

e Contribution au modèle, de 1 (faible contribution) à 100% (forte contribution)

* Bois, butane, propane, charbon, fioul, gaz de ville

** Individuel électrique, réseau de chaleur ou collectif

La manière d'interpréter les paramètres de ce modèle non-pondéré est identique à celle décrite pour l'interprétation des paramètres du modèle pondéré (voir section 4.2.3.1.1).

4.2.3.2.2 Pourcentage d'évitement du modèle non-pondéré

Comme indique dans la section 4.2.3.1.1, des pourcentages d'évitement peuvent être calculés :

- 7% de la pollution intérieure en PM_{2,5} aurait pu être évitée si aucun logement n'était exposé à une pollution extérieure supérieure à 10,8 µg/m³, en prenant comme scénario de référence une pollution de 2,8 µg/m³;

Pour le calcul du pourcentage ci-dessus, le scénario de référence est le même que celui du calcul de la FAP du modèle pondéré :

$$\overline{RR} = \exp(\beta \times \Delta X) = \exp(0,31 \times 1,33) = \exp(0,36) = 1,51$$

$$\left(\frac{p \times (RR - 1)}{p \times (RR - 1) + 1} \right) \times 100 = \left(\frac{0,15 \times (1,51 - 1)}{0,15 \times (1,51 - 1) + 1} \right) \times 100 = \frac{0,08}{1,08} \times 100 = 0,07 \times 100 = 7\%$$

- 7% de la pollution intérieure en PM_{2,5} aurait pu être évitée dans l'ensemble des logements en l'absence de tabagisme intérieur ;

$$\left(\frac{p \times (RR - 1)}{p \times (RR - 1) + 1} \right) \times 100 = \left(\frac{0,074 \times (1,98 - 1)}{0,074 \times (1,98 - 1) + 1} \right) \times 100 = \frac{0,08}{1,08} \times 100 = 0,07 \times 100 = 7\%$$

- 20% de la pollution intérieure en PM_{2,5} aurait pu être évitée en période hors-chauffe

$$\left(\frac{p \times (RR - 1)}{p \times (RR - 1) + 1} \right) \times 100 = \left(\frac{0,76 \times (1,27 - 1)}{0,76 \times (1,27 - 1) + 1} \right) \times 100 = \frac{0,21}{1,21} \times 100 = 0,20 \times 100 = 20\%$$

4.2.3.2.3 Effets marginaux du modèle non-pondéré estimé sur l'ensemble des logements

Les figures suivantes illustrent l'**effet moyen non-pondéré** ajusté de chaque variable considérée **sur la concentration en PM_{2,5}**. Ainsi, cet effet dit marginal tient compte des autres variables du modèle en les moyennant. Ces figures fournissent donc une visualisation claire des relations entre les variables explicatives et la concentration intérieure en PM_{2,5}, et mettent en évidence les effets marginaux des variables sur la réponse, permettant une interprétation intuitive des coefficients estimés.

La **Figure 16** représente l'effet marginal de la seule variable de type quantitative du modèle non-pondéré. L'interprétation de cette figure doit tenir compte du fait que des concentrations log-transformées sont représentées. Le graphique représente une relation linéaire de « log par log ».

Pour pouvoir interpréter ce type de graphique, il faut dans un premier temps définir la pente $\left(p = \frac{Y_B - Y_A}{X_A - X_B} \simeq \frac{2,72 - 2,36}{2 - 1} \simeq 0,36 \mu\text{g}/\text{m}^3 \right)$ de cette relation linéaire log/log.

Cette pente représente la variation lorsque pour une augmentation d'une unité sur l'axe des abscisses, soit $\Delta(\log(\text{PM}_{2,5\text{EXT}})) = 1$, les concentrations intérieures varient de $0,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\Delta(\log(\text{PM}_{2,5\text{INT}})) = 0,36$). Sans la notion de log-transformation, cela revient à dire que la variation des concentrations intérieures en PM_{2,5} correspond à une augmentation de $10^{0,36} = 2,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ainsi, lorsque les concentrations extérieures en PM_{2,5} augmentent, les concentrations intérieures en PM_{2,5} augmentent également mais cette variation est moins importante que celle des PM_{2,5} extérieure ($\Delta(\log(\text{PM}_{2,5\text{INT}})) < \Delta(\log(\text{PM}_{2,5\text{EXT}}))$).

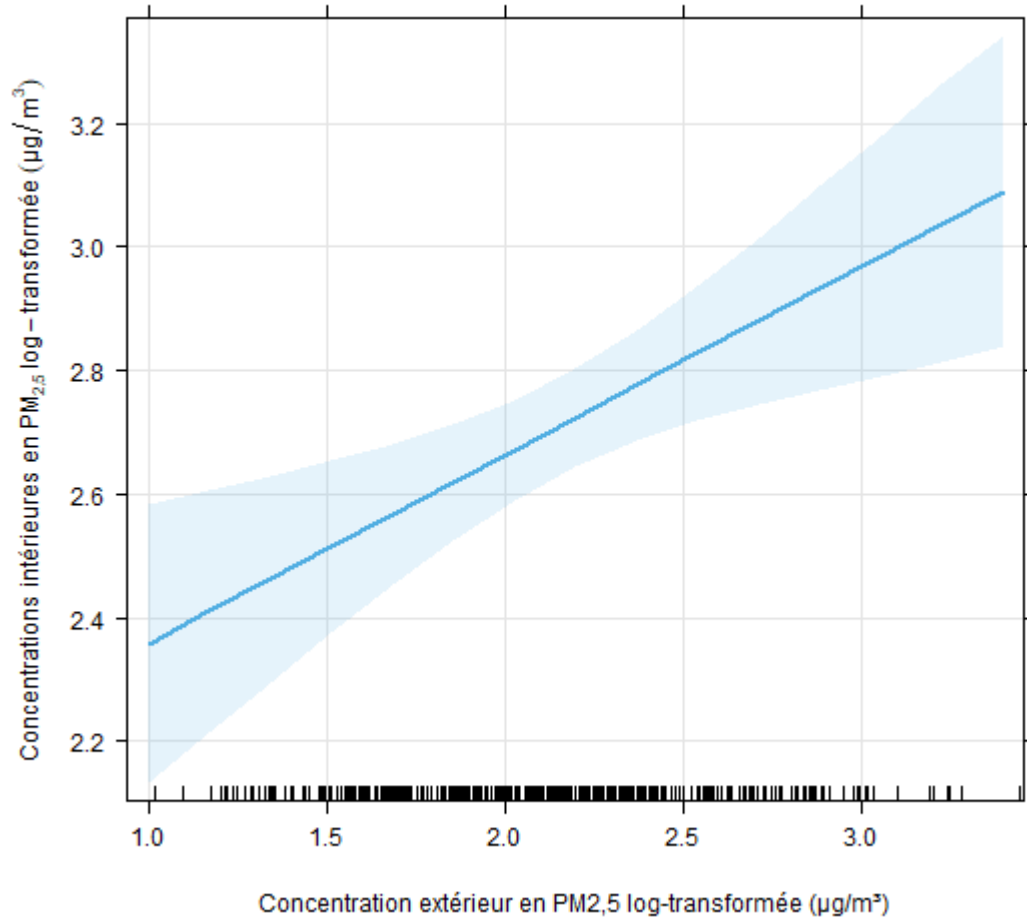


Figure 16. **Effet marginal de la concentration extérieure en PM_{2,5} du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5}**

Lorsque le TRA augmente (**Figure 17**), les concentrations intérieures en PM_{2,5} diminuent : soit pour une variation de $\Delta(\log(TRA)) = 1$ les concentrations intérieures varient de $0,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\Delta(\log(PM_{2,5}_{INT})) = 0,08$). Sans la notion de log-transformation, cela revient à dire que la variation des concentrations intérieures en PM_{2,5} correspond à une diminution de $10^{0,08} = 1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

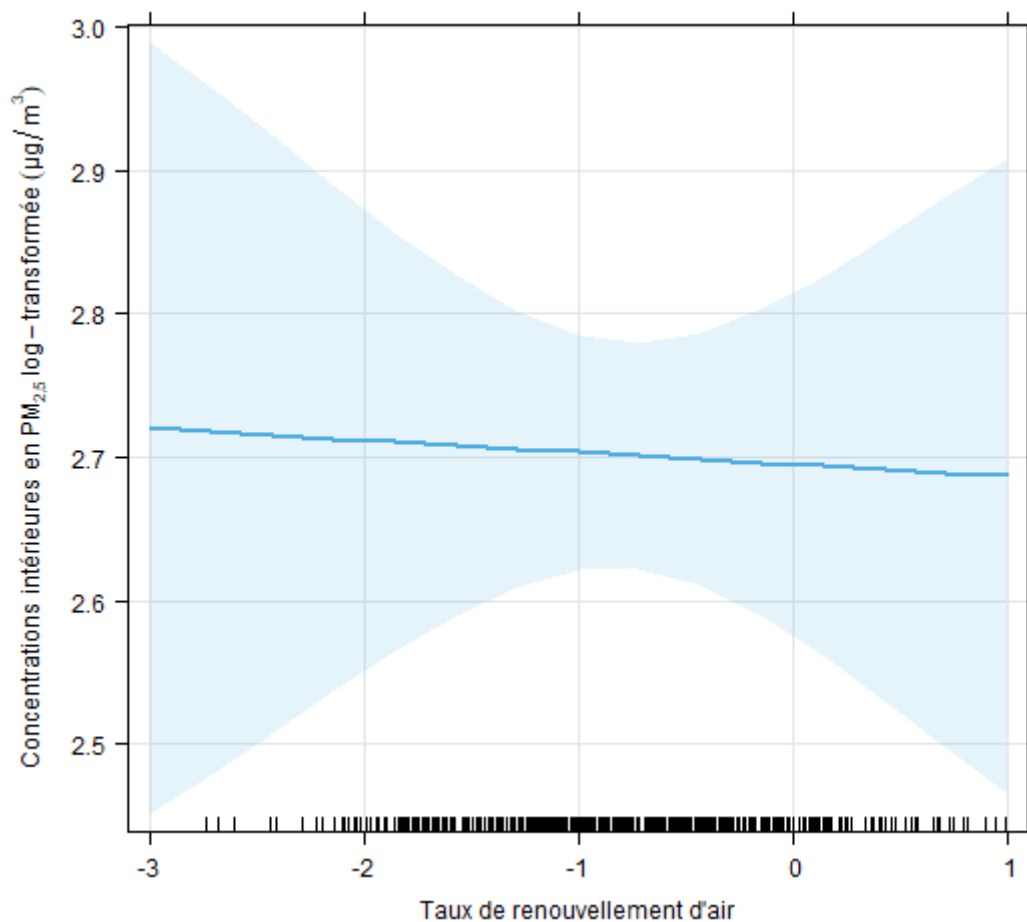


Figure 17. Effet marginal du TRA du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5}

L'effet marginal de la variable « Tabagisme à l'intérieur du logement » sur les concentrations intérieures en PM_{2,5} (**Figure 18**) suggère que ces concentrations sont plus importantes lorsqu'il y a du tabagisme dans le logement par rapport à l'absence de tabagisme intérieur (28,1 [20,7 ; 38,3] µg/m³ versus 14,2 [13,1 ; 15,4] µg/m³) avec une p-valeur associée inférieure à 0,001.

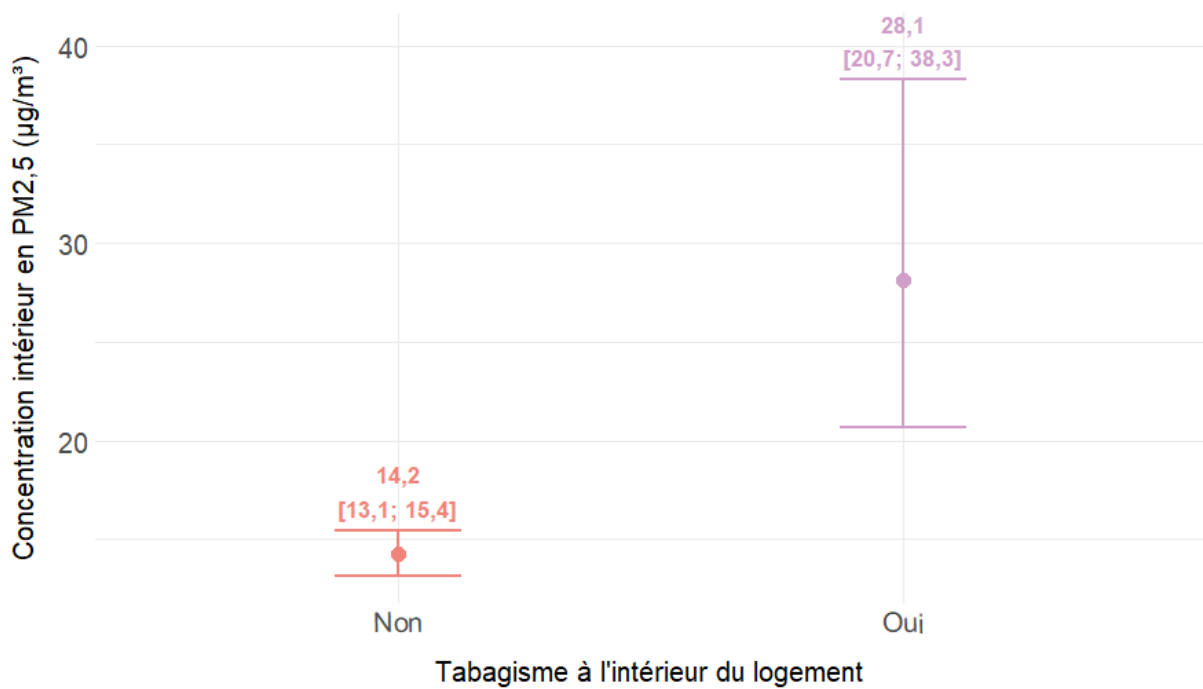


Figure 18 : Effet marginal du tabagisme intérieur du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5}

L'effet marginal de la variable « VENTILATION » sur les concentrations intérieures en PM_{2,5} (Figure 19) suggère que ces concentrations sont moins importantes lorsqu'il y a un type de ventilation mécanique centralisée dans le logement par rapport à l'absence de ventilation (14,0 [12,5 ; 15,6] µg/m³ versus 19,7 [15,8 ; 24,5] µg/m³) avec une p-valeur associée de 0,048.

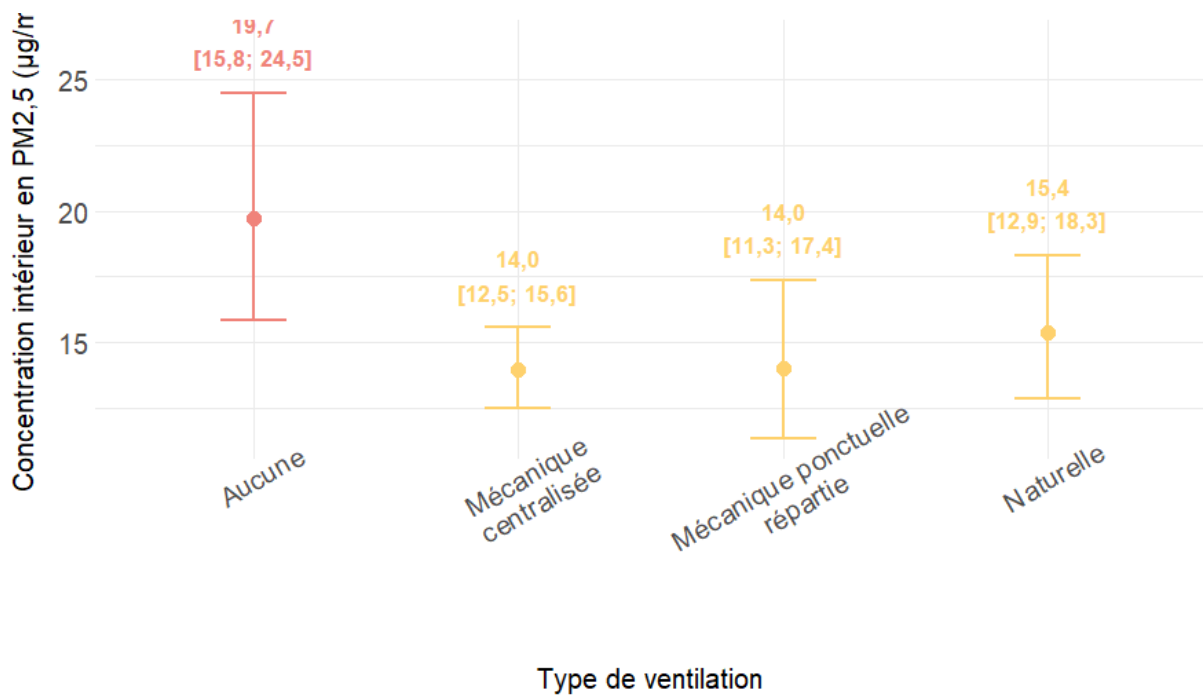


Figure 19 : Effet marginal du type de ventilation du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5} chez les logements avec un chauffage à combustion

L'effet marginal de la variable « SAISON » sur les concentrations intérieures en PM_{2,5} (**Figure 20**) suggère que ces concentrations sont plus en période de chauffe par rapport à la période hors-chauffe (15,7 [14,4 ; 17,2] µg/m³ versus 12,3 [10,3 ; 14,8] µg/m³) avec une p-valeur associée de 0,022.

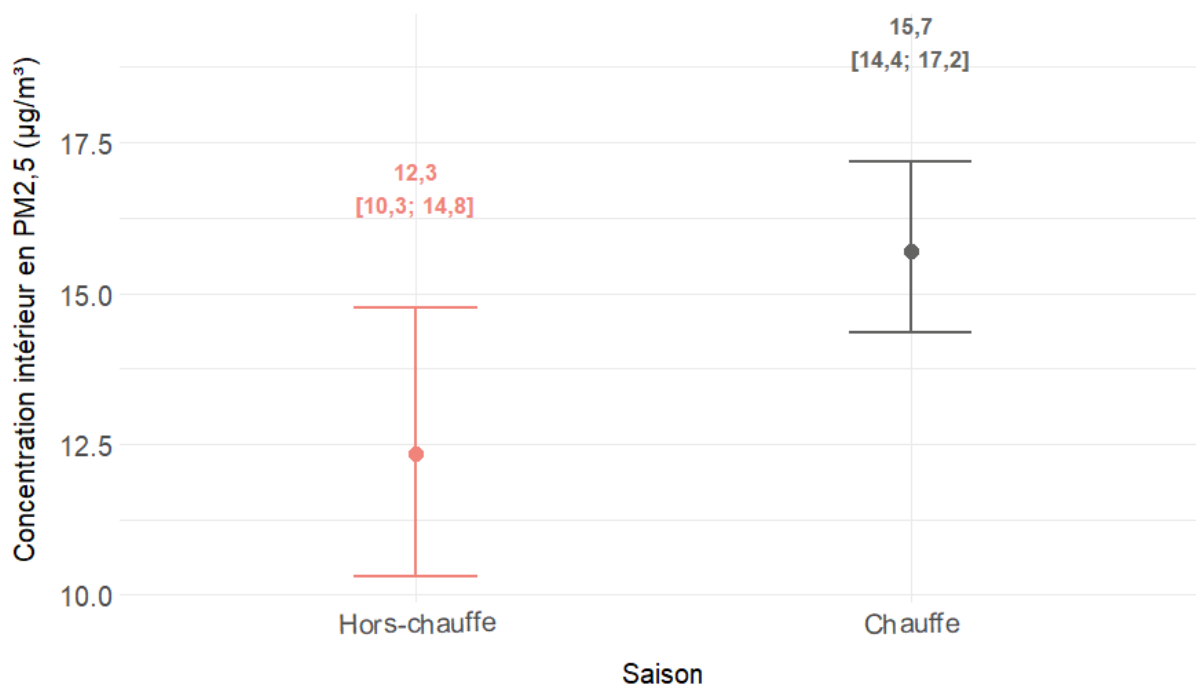


Figure 20 : Effet marginal de la saison du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5} chez les logements avec un chauffage à combustion

L'effet marginal de la variable « COMBUSTION » sur les concentrations intérieures en PM_{2,5} (**Figure 21**) ne suggère pas de concentrations en PM_{2,5} statistiquement différentes selon les modalités de cette variable avec une p-valeur associée de 0,976.

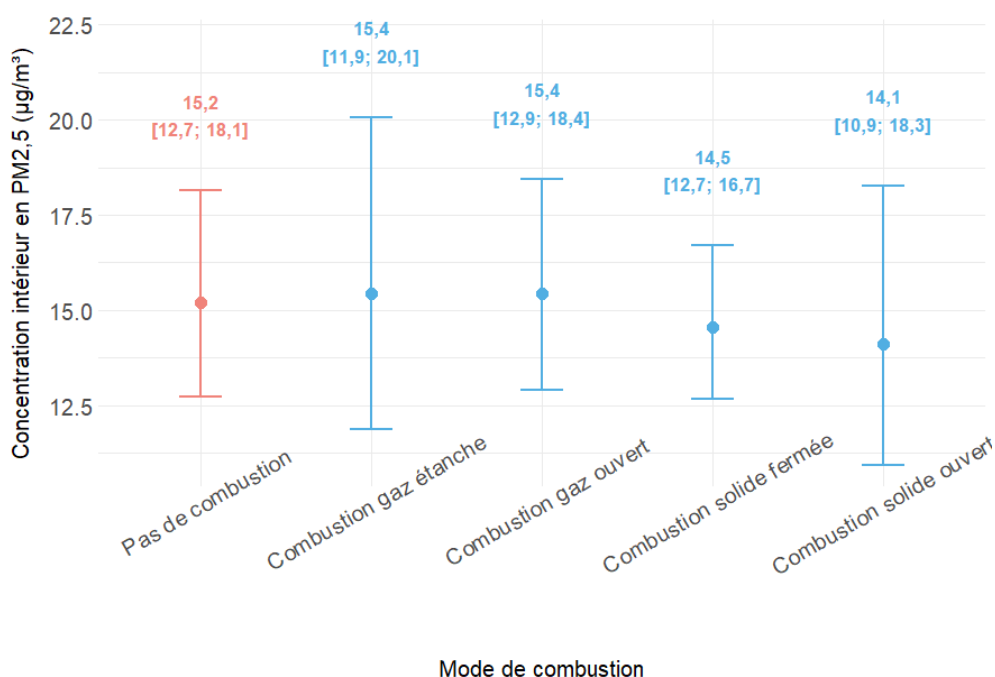


Figure 21 : Effet marginal du mode de combustion du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en PM_{2,5}

L'effet marginal de la variable « Type de logement » sur les concentrations en $PM_{2,5}$ (**Figure 22**) ne suggère pas de concentrations en $PM_{2,5}$ statistiquement différentes selon le type de logement avec une p-valeur associée de 0,235.

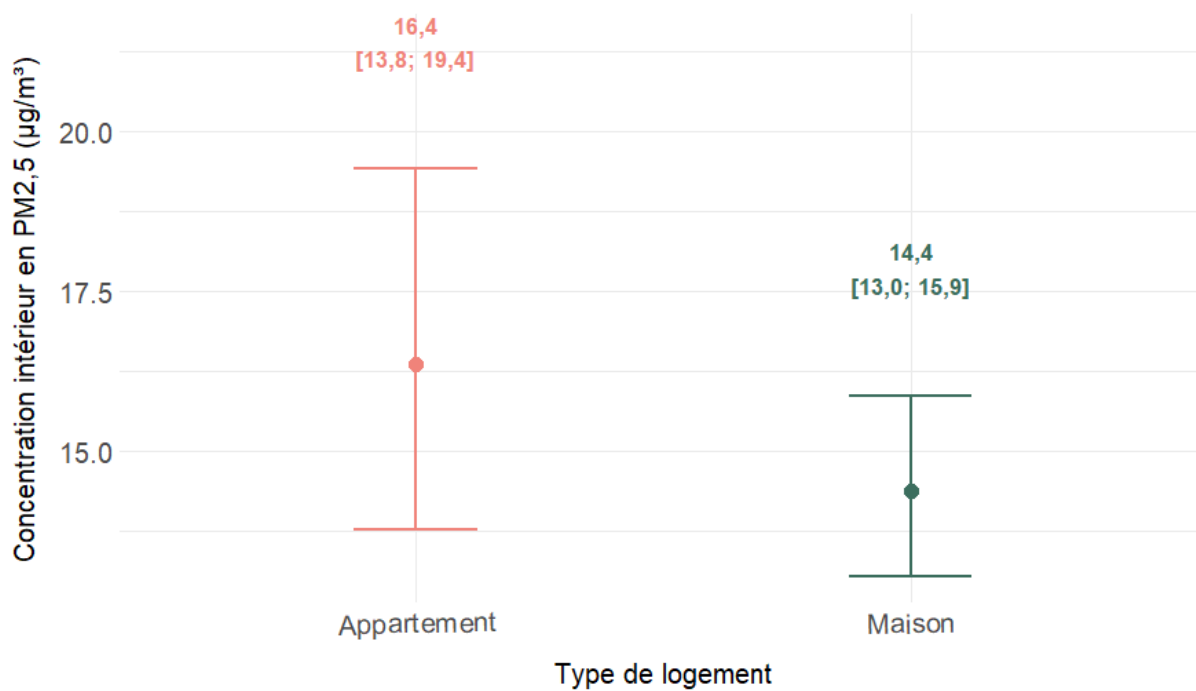


Figure 22 : Effet marginal du type de logement du modèle non-pondéré sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$

5 Discussion

La recherche bibliographique a permis d'identifier près de 80 variables collectées lors de la CNL2 pouvant potentiellement influencer la concentration intérieure en $PM_{2,5}$. Ces variables ont ensuite été préparées, transformées afin d'être testées et intégrées au modèle explicatif de la concentration intérieure en $PM_{2,5}$.

Deux modèles explicatifs ont été élaborés : un modèle pondéré et un modèle non-pondéré. Les analyses bivariées ont permis de retenir sept variables dans les deux modèles explicatifs.

Il a été choisi de discuter des résultats du modèle pondéré car c'est celui pour lequel les conclusions peuvent être tirées au niveau du parc de résidences principales de l'Hexagone.

Concernant le modèle pondéré, par ordre décroissant de contribution aux modèles, les variables sélectionnées sont : la fréquence d'utilisation d'un nettoyant chimique de surface, le type de logement, la concentration extérieure en $PM_{2,5}$, le tabagisme à l'intérieur de son logement et le type de ventilation (en fonction du chauffage considéré).

5.1 Résultats du modèle pondéré

Certaines variables incluses dans le modèle pondéré peuvent avoir un lien direct avec les concentrations intérieures en $PM_{2,5}$. C'est le cas notamment de la concentration extérieure en $PM_{2,5}$, qui constitue une source d'infiltration dans les logements, ou encore du type de ventilation, qui influence l'évacuation de pollution de l'air intérieur vers l'extérieur.

D'autres variables doivent être interprétées plutôt de manière plus indirecte, reflétant des caractéristiques structurelles ou contextuelles des logements. Par exemple, la période de construction peut être vue comme un indicateur indirect de l'isolation, des matériaux utilisés ou des normes de ventilation en vigueur à l'époque. Cette distinction entre variables à effet direct et indirect est importante pour l'interprétation des coefficients du modèle, et pour éviter des conclusions erronées sur la causalité.

Cette section fait le parallèle entre les résultats du modèle explicatif pondéré et ceux retrouvés dans la littérature scientifique. De manière générale, les déterminants identifiés dans le modèle pondéré et non pondéré concordent avec ceux décrits dans la littérature scientifique.

5.1.1 Modèles obtenus dans d'autres études de la revue de bibliographie

Des travaux similaires de modélisation ont été menés au Japon via une cohorte nationale (Nishihama et al. 2021). Ils ont notamment évalué les concentrations médianes en $PM_{2,5}$ intérieures, extérieures ainsi que leur ratio (intérieures/extérieures) pour les ménages comportant un enfant de 1,5 ans avec respectivement $12,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $12,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et ceux comportant un enfant de 3 ans avec respectivement $12,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $11,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En comparaison, les concentrations médianes en PM_{2,5} mesurées à l'intérieur des logements obtenues dans le cadre de l'enquête CNL2 sont du même ordre de grandeur (13,2 µg/m³). Au niveau de la pollution extérieure, les concentrations médianes semblent moins importantes en France avec 8,5 µg/m³ et, par conséquent, le ratio des médianes intérieures/extérieures est plus élevé avec 1,6 µg/m³. Ces différences de pollution extérieure peuvent s'expliquer par la proximité géographique du Japon avec la Chine, pays à forte émission de pollution. De plus, le Japon est un territoire au moins deux fois plus peuplé que la France avec une densité de population s'élevant à 343 habitants/km² en 2020 (World Bank Open Data, n.d.).

Concernant les résultats du modèle prédictif de l'étude japonaise, avec un coefficient de détermination de 0,42 et par ordre décroissant de contribution au modèle, les prédicteurs majeurs mis en évidence sont entre autres : la concentration extérieure en PM_{2,5} et PM₁₀, la concentration intérieure en benzène, le tabagisme intérieur, la fumée observée, la température extérieure, la concentration intérieure en dioxyde d'azote et ozone, la température intérieure, la concentration intérieure en acétaldéhyde, l'aération du logement via les fenêtres, l'humidité extérieure.

Une autre étude réalisée au Massachusetts, issue de la revue de bibliographie, et appliquant une régression linéaire multiple a identifié, comme prédicteurs des concentrations intérieures en PM_{2,5} relatives aux activités alpha, la pollution externe (béta=0,152, p-valeur=0,005) et la présence de poussière intérieure sur ces concentrations (béta=0,152, p-valeur<0,001) (Matthaios et al. 2021).

Avec la même méthodologie et un coefficient de détermination de 0,45, une autre étude américaine portant sur 65 logements ruraux à combustibles solides a mis en lumière l'impact pendant la période de chauffe du nombre de portes intérieures (béta=-0,135, p-valeur=0,014), la présence de parasite (béta=-0,136, p-valeur=0,644), la présence de rongeur (béta=0,646, p-valeur=0,05), l'utilisation de climatiseur (béta=-0,612, p-valeur=0,06), le type de combustible (électricité gaz et bois versus électricité gaz) (béta=0,546, p-valeur=0,073), l'humidité relative (béta=0,031, p-valeur=0,029) (Hadeed et al. 2021). Pendant la période hors chauffe, avec pour coefficient de détermination 0,60, d'autres déterminants ont été relevés comme la surface du logement (béta=-0,00023, p-valeur=0,042), la hauteur du logement (béta=-0,048, p-valeur=0,038), l'aération (béta=-0,947, p-valeur=0,001), la présence de fumée ou l'utilisation d'encens (béta=0,783, p-valeur=0,004) ou encore les concentrations extérieures en PM_{2,5} (béta=0,026, p-valeur=0,005).

Enfin globalement les mêmes déterminants étaient retrouvés dans les publications de la revue de bibliographie (Annexe 1) avec quelques déterminants moins souvent cités comme l'étage, l'usure des meubles, le type de décoration comme les plantes (Zhang et al. 2021; Huang et al. 2015), la présence de métaux lourds, sulfate, les animaux de compagnie (MacNeill et al. 2012) et les rénovations (Raaschou-Nielsen et al. 2011).

5.1.2 Comparaison des résultats du modèle pondéré avec les autres études

Certains déterminants, mis en évidence dans ces études et disponibles dans la CNL2 (voir section 3.1.2), n'ont pas été intégrés au modèle final pour des raisons de colinéarité (voir

section 4.2.1). Notamment, la température extérieure (Anova, p-valeur<0,001) et l'aération du logement (Kruskal-Wallis, p-valeur<0,001) étaient corrélées aux concentrations extérieures en PM_{2,5}. De même que la surface du logement était corrélée avec d'autres variables comme la fréquence de nettoyage des surfaces, le tabagisme intérieur et le type de logement (tests de Kruskal-Wallis, p-valeur<0,001).

L'information relative aux poussières provenant de l'extérieur observées lors de l'ouverture des fenêtres n'a pas été incluse dans le modèle car elle n'était pas corrélée aux concentrations intérieures en PM_{2,5} (p-valeur=0,56). De même pour l'utilisation d'insecticides sous forme d'aérosol dans les logements (p-valeur=0,23)

Concernant les déterminants en lien avec l'environnement extérieur mentionnés dans la revue de littérature (présence de fumée, concentrations extérieures en PM10, concentrations intérieures en ozone, humidité extérieure, etc.), ces informations n'ont pas été relevées dans le cadre de la CNL2 et par conséquent n'ont pas pu être incluses dans le modèle.

Les concentrations intérieures en benzène, dioxyde d'azote, acétaldéhyde et radon relevées dans le cadre de la CNL2 n'ont, quant-à-elles, pas été exploitées dans le cadre de cette analyse qui s'est focalisée uniquement sur les caractéristiques des logements, des occupants, de leur activité et de l'environnement extérieur à proximité.

Le concept de co-exposition a été exploité dans un autre rapport d'analyse distinct via une classification des logements en fonction de leur exposition aux polluants. Dans ce dernier, aucun lien entre les concentrations de PM_{2,5} et les concentrations intérieures en benzène, dioxyde d'azote et acétaldéhyde n'a été mis en évidence. De plus, ces 3 polluants (benzène, dioxyde d'azote et acétaldéhyde) étaient projetés dans une même direction sur l'analyse en composantes principales indiquant une certaine relation linéaire entre elles.

Enfin la variable relative à la présence d'une climatisation dans les logements n'a pas contribué de manière significative au modèle et a été exclus du modèle final (p-valeur=0,11), tout comme l'étage (p-valeur=0,84) et la fréquence de cuisson à la poêle (p-valeur=0,22) entre autres.

5.1.3 Concentration extérieure en PM_{2,5}

Les résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature, près de 16 publications issues de la revue de bibliographie interprètent les concentrations de PM_{2,5} extérieures comme facteur déterminant des concentrations intérieures. Notamment une étude menée à Cracovie qui met en évidence une forte influence de la concentration extérieure de PM_{2,5} sur les niveaux mesurés à l'intérieur de 179 logements avec une corrélation significative très élevée entre les deux concentrations ($r = 0,82, p < 0,001$) (Ścibor et al. 2019). Ainsi les résultats montrent que l'augmentation des concentrations extérieures en PM_{2,5} est associée à une élévation des concentrations intérieures en PM_{2,5}. Une autre étude menée au Japon sur les concentrations de particules fines (PM_{2,5} et PM_{10-2,5}) mesurées à l'intérieur et à l'extérieur de 5 000 foyers a mis en évidence que les principaux déterminants des concentrations intérieures en PM_{2,5} comprenaient, entre autres, les niveaux extérieurs de PM_{2,5} (Nishihama et al. 2021). Ces résultats sont également en accord avec ceux d'une étude menée à Hanoï dans trois immeubles collectifs (Vo et al. 2022). Les auteurs attribuent cette influence à la proximité des habitations aux axes routiers, soulignant que les émissions de particules liées

au trafic constituent la principale source de pollution observée en intérieur. Enfin, une étude évaluant l'exposition humaine de plusieurs adultes habitant la ville de Hong-Kong via un modèle mixte a mis en évidence que le principal déterminant et le principal contributeur à l'exposition individuelle aux $PM_{2,5}$ étaient les concentrations extérieures des $PM_{2,5}$ ($R^2=0,12-0,59, p<0,01$) (Chen et al. 2018).

5.1.4 Tabagisme intérieur

L'influence du tabagisme à l'intérieur du logement sur la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ a souvent été citée comme un déterminant important dans la littérature scientifique (12/30 publications). Le tabagisme est devenu progressivement la principale source de particules intérieures ($PM_{2,5}$) dans les pays développés ou riches (Ni et al. 2020). Une étude réalisée dans 5 000 foyers au Japon a identifié le tabagisme à l'intérieur du logement comme faisant partie des principaux déterminants des concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ (Nishihama et al. 2021). Le tabagisme constitue l'une des sources majeures de pollution particulaire en intérieur, en raison de l'émission directe de particules ultrafines lors de la combustion du tabac (Zhang et al. 2021).

5.1.5 Utilisation d'un nettoyage chimique de surface dans le logement

Bien que le nettoyage humide domestique des surfaces permette globalement de réduire les concentrations de $PM_{2,5}$ à l'intérieur des logements contrairement au balayage ou au dépoussiérage à sec qui tendent à remettre les particules en suspension dans l'air ambiant (Urso et al. 2015; Zhang et al. 2021), il pourrait également contribuer à une augmentation temporaire des concentrations de $PM_{2,5}$ à l'intérieur des logements. Ceci pourrait être lié à la fréquence de nettoyage, en raison des micro-remous créés et de l'usage de produits chimiques de nettoyage qui peuvent aussi réagir chimiquement avec l'air ambiant. La formation de ces particules organiques secondaires fréquemment observées est liée à l'ozonolyse des alcènes : d'abord de très petites tailles, elles augmentent de taille par coagulation avec d'autres particules et par nucléation (Salonen et al. 2024 ; 'Utilisation de produits ménagers et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires, substances d'intérêt, bonnes pratiques | Ineris', n.d.). Certains produits de nettoyage à base de terpènes (citrus, lavande, etc.) émettraient des composés organiques volatils (COV) qui pourraient générer de nouvelles particules fines secondaires (Tamás et al. 2006).

Ces résultats de la revue de bibliographie appuient l'importance de prendre en compte le type de produit, la méthode de nettoyage et la fréquence dans l'analyse des déterminants de la pollution intérieure, ce qui est en accord avec les résultats obtenus dans la section 4.2.3.

5.1.6 Typologie du logement

Le modèle a mis en évidence que les logements de type appartement présentaient des concentrations moyennes en PM_{2,5} significativement plus élevées que celles de type maison (p-valeur < 0,001).

Afin d'expliquer les résultats sur la typologie des logements étudiés, des analyses exploratoires bivariées additionnelles ont été menées, notamment le croisement de la variable explicative type de logement (appartement/maison individuelle) avec d'autres variables collectées dans la CNL2 (**Tableau II**).

Tableau II. Croisement des déterminants potentiels de la concentration en PM_{2,5} avec le type de logement (variable explicative du modèle)

| Variable | Appartement | Maison individuelle | p-valeur |
|---|-----------------------|-----------------------|------------------|
| Cuisine équipée d'une hotte aspirante | | | <0,001 |
| Absence de hotte | 6601896,8 (56,5%) | 1939644,6 (12,4%) | |
| Hotte raccordée à l'extérieur | 555956,2 (4,8%) | 8383320 (53,7%) | |
| Hotte à recyclage (non raccordée à l'extérieur) | 4525446,3 (38,7%) | 5285538,8 (33,9%) | |
| Situation du logement | | | <0,001 |
| Hors unité urbaine | 103214 (0,9%) | 5745074,4 (36,8%) | |
| [2 000 ; 200 000[| 3008859 (25,8%) | 6512935,3 (41,7%) | |
| [200 000 ; 2 000 000[| 4610056,7 (39,5%) | 2662842,3 (17,1%) | |
| Paris | 3961169,6 (33,9%) | 687651,5 (4,4%) | |
| Nombre de pièces du logement | | | <0,001 |
| [1, 2] | 5912080,3 (50,6%) | 1248457,5 (8%) | |
| [3, 4] | 4604072,5 (39,4%) | 4244314,5 (27,2%) | |
| [5, 6] | 1128949,1 (9,7%) | 7721074,6 (49,5%) | |
| [> 6] | 38197,5 (0,3%) | 2394656,8 (15,3%) | |
| Composition du ménage | | | <0,001 |
| [1] | 7105865,4 (60,8%) | 3821228,7 (24,5%) | |
| [2] | 1954216,3 (16,7%) | 4611416,2 (29,5%) | |
| [3] | 1045048,5 (8,9%) | 5968978,3 (38,2%) | |
| [4 ; 5] | 1578169,2 (13,5%) | 1206880,3 (7,7%) | |
| Densité d'occupation¹ | | | <0,001 |
| Moyenne [IC95%] | 0,019 [0,016 ; 0,022] | 0,015 [0,014 ; 0,016] | |

¹ Nombre moyen de présence sur la surface du logement

Les maisons individuelles présentent significativement (p -valeur $<0,001$) des niveaux de concentration en $PM_{2,5}$ plus faibles que ceux des appartements (voir section 4.2.3) possiblement du fait de la présence d'une hotte aspirante dans leur cuisine. Les maisons individuelles présentées dans l'étude sont majoritairement équipées d'une hotte (raccordée à l'extérieur ou à recyclage) pour 87 % d'entre elles contre seulement 43% des appartements. Il faut noter que la majorité des hottes équipant les maisons individuelles sont raccordées à l'extérieur et que plus de la moitié des appartements ne sont pas du tout équipés de hotte. La différence de concentration intérieure de $PM_{2,5}$ peut être expliquée par le fait que les particules fines issues de la cuisson des aliments sont mieux extraites des cuisines des logements ayant une hotte à extraction raccordée à l'extérieur comme le suggère l'étude italienne de la revue de bibliographie (Urso et al. 2015).

Par ailleurs, la différence de pollution intérieure en $PM_{2,5}$ entre appartement et maison du parc national de logement peut s'expliquer en croisant les tranches d'unité urbaine 2020 calculées selon l'Insee sur la population 2017 des logements enquêtés par type de logement. En effet, en considérant ces tranches urbaines, près de 73% des appartements se situent dans des tranches urbaines de plus de 200 000 habitants (Tranche d'unité urbaine 2020 calculée selon l'Insee sur la population 2017), potentiellement soumises à des niveaux de pollution extérieure élevés, contre seulement 22% des maisons (p -valeur $<0,001$). Le calcul de la concentration moyenne arithmétique extérieure en $PM_{2,5}$ en fonction du type de logement montre une différence significative (p -valeur $< 0,001$) entre les appartements et les maisons (respectivement $10,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $8,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Enfin, comme l'a relevé la revue de bibliographie le nombre de pièce des logements enquêtés et la densité d'occupation peuvent être également des axes d'explications des résultats (Liu, Dong, et al. 2022; Liu, Ma, et al. 2022), avec dans l'étude une répartition du nombre de pièces par logement significativement différente entre les appartements et les maisons (p -valeur $<0,001$) et une densité d'occupation des appartements légèrement supérieure à celle des maisons avec respectivement $0,019 [0,016;0,022]$ et $0,015 [0,014 ;0,016]$ (p -valeur $<0,001$).

Tous ces éléments suggèrent dans les appartements une extraction insuffisante des particules rejetées lors de la cuisson, une remise en suspension des particules et un apport de particules provenant de l'extérieur via un nombre d'occupants plus élevé par surface de logement et une pollution extérieure plus importante.

5.1.7 Effet de la ventilation en fonction du type de chauffage

Comme présenté précédemment dans les déterminants des concentrations intérieures en $PM_{2,5}$, un terme d'interaction a été identifié entre la variable « chauffage » et la variable « ventilation ». Plus précisément, l'effet du type de ventilation sur les concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ dépend du type et du fonctionnement du chauffage. L'utilisation d'un chauffage individuel avec combustion (bois, butane, propane, charbon, fioul, gaz de ville), le modèle a montré que les concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ sont plus faibles pour les logements équipés d'une ventilation de type mécanique centralisée ou d'une ventilation de type naturelle par rapport à ceux sans ventilation.

Concernant le type de chauffage, la combustion des combustibles fossiles (également pour la cuisson des aliments) est une source importante de particules dans les logements en lien direct avec l'émission de fumée directement dans l'espace habitable et indirectement lorsque les panaches de fumée émis à l'extérieur pénètrent dans le logement à travers les défauts d'étanchéité, l'aération par ouverture de fenêtres ou par le système de ventilation. En hiver, le chauffage à combustible fossile contribue significativement à la concentration intérieure des $PM_{2,5}$ mesurées dans des maisons rurales du sud de la Chine et bien plus que la cuisson des aliments réalisée ponctuellement (Huang et al. 2022). Dans plus de 200 logements situés à Cracovie, Scibor et al. 2019 ont montré que le type de combustible du chauffage avait un impact significatif sur la concentration intérieure des $PM_{2,5}$ mesurées en particulier le chauffage au charbon ou le feu de cheminée par rapport notamment au chauffage au gaz ou à l'électricité. Le chauffage au bois constituerait l'un des principaux contributeurs aux particules en suspension dans l'air intérieur selon l'étude réalisée dans 60 maisons en Italie (Urso et al. 2015). Ces mêmes observations ont été faites dans les logements de type rural chauffés au poêle à bois (Semmens et al. 2015). Plus généralement, les études réalisées sur l'impact du chauffage montrent que les concentrations intérieures en $PM_{2,5}$ sont plus faibles dans les habitations utilisant des énergies non fossiles que dans celles utilisant des combustibles fossiles (charbon et biomasse) (Liu, Ma, et al. 2022; Abdel-Salam 2021), ce qui rejoint les résultats du modèle explicatif.

Le type et le fonctionnement du chauffage principal sont les variables qui contribuent le plus à expliquer les variations des niveaux intérieurs des $PM_{2,5}$ du logement dans le modèle. Sa contribution est plus importante que celle des autres variables incluses dans le modèle. Elle se place aussi bien devant les sources intérieures (tabagisme à l'intérieur du logement, production de particules secondaires liée à l'utilisation d'un nettoyant chimique de surface) qu'extérieures (pollution extérieure). Dans ce contexte, le renouvellement de l'air du logement et en particulier la ventilation des logements a un rôle majeur dans la diminution de la pollution particulaire intérieure. Ces observations sont cohérentes avec l'interaction retrouvée dans le modèle entre le type de chauffage et le type de ventilation.

Le modèle a montré, en période de chauffage uniquement, l'efficacité de la ventilation de type mécanique centralisée ou de type naturel dans les logements équipés d'un chauffage à combustion par rapport à des logements non ventilés. Néanmoins cette diminution significative des particules n'a pas été observée dans les logements équipés d'une ventilation mécanique répartie. Ce résultat pourrait être lié à un meilleur renouvellement de l'air de l'ensemble des pièces des logements équipés d'un système de ventilation mécanique contrôlée (par extraction/insufflation mécanique) ou d'une ventilation naturelle (par tirage thermique) que des logements équipés d'un système de ventilation mécanique répartie. Ce type de système est capable d'assurer une ventilation générale du logement à partir du moment où 2 extracteurs minima sont installés dans le logement.

La littérature a mis en évidence qu'un système de ventilation avec extraction mécanique peut significativement diminuer les niveaux de $PM_{2,5}$ intérieurs comparés à des systèmes purement naturels sans extraction (Urso et al. 2015).

Ces études et les résultats du modèle pondéré suggèrent l'importance du choix de systèmes de ventilation par rapport à l'utilisation d'appareils de chauffage à combustion situés dans le logement.

5.2 Méthodologie et limites

5.2.1 Pertinence de la pondération

Les résultats obtenus avec le modèle pondéré (section 4.2.3.1) sont forcément impactés par l'utilisation des poids de sondage. Pour rappel, ces derniers permettent de **redresser les caractéristiques structurelles** des logements et **les profils** de leurs occupants afin d'obtenir les résultats exprimés au niveau de la population cible du parc de logement national.

Cette pondération est indiquée ici car certaines caractéristiques de logements et des occupants ont pu être plus fréquemment enquêtées en fonction de leur disponibilité lors de l'enquête CNL2. En effet, il existe dans l'échantillon CNL2 des sous-groupes de logements sur-représentés par rapport au parc national hexagonal. C'est le cas par exemple des ménages vivant dans des logements de type maison (70 % dans l'échantillon CNL2 contre 56% au niveau national), des ménages en couple sans enfants (respectivement 41% versus 26 %) ou bien des ménages de 4 personnes (respectivement 20% versus 12 %), entre autres.

La pondération appliquée ici permet de limiter le biais de recrutement des logements enquêtés dans la CNL2 ainsi que d'optimiser **la précision des estimations** du modèle et d'exprimer les leviers en termes de recommandations nationales en ayant une validité externe.

Au niveau des résultats du modèle, le modèle pondéré final obtenu permet d'expliquer 16,6 % de la variabilité (coefficient de détermination R^2 ajusté) de la concentration intérieure en $PM_{2,5}$ contre 9 % pour le modèle non-pondéré. Ces coefficients représentent une performance modérée en comparaison des autres modèles appliqués dans le même contexte (voir section 5.1.1).

Le nombre de déterminants trouvé au niveau du modèle non-pondéré était plus faible que pour le modèle pondéré (respectivement 3 contre 6), cependant, les effets, lorsqu'ils étaient statistiquement significatifs, y étaient plus prononcés que dans le modèle pondéré (**Tableau 12**). C'est le cas pour la variable relative au tabagisme intérieur avec un pourcentage d'évitement égal à 6 % versus 7 % respectivement entre le modèle pondéré et le non pondéré et pour la variable relative à la concentration extérieure en $PM_{2,5}$ avec une augmentation intérieure en $PM_{2,5}$ de $0,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ versus $0,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une augmentation de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentration extérieure en $PM_{2,5}$.

Certaines associations observées, comme la fréquence de nettoyage des surfaces avec un produit chimique, semblent dépendre uniquement de l'ajustement de l'échantillon.

Tableau 12. Rappels des paramètres obtenus dans le modèle pondéré versus non-pondéré explicatif de la concentration en PM_{2,5} issus de l'exploitation des données de la CNL2

| Coefficients | MODELE Pondéré | p- valeur | MODELE Non-pondéré | p-valeur |
|--|------------------------------|--------------|------------------------------|------------------|
| Tabagisme à l'intérieur du logement (réf : Non) | | 0,007 | | <0,001 |
| Non | - | | - | |
| Oui | 1,55 [1,13 ; 2,12] | | 1,98 [1,44 ; 2,72] | |
| PM_{2,5} extérieure | 0,27 [0,06 ; 0,47] | 0,010 | 0,31 [0,12 ; 0,50] | 0,002 |
| Type de logement | | 0,018 | | 0,235 |
| Appartement | - | | - | |
| Maison | 0,75 [0,59 ; 0,95] | | 0,88 [0,71;1,09] | |

5.2.2 Choix des variables explicatives du modèle pondéré et données manquantes

Une première sélection des déterminants potentiels a été réalisée en retenant uniquement les variables corrélées avec la concentration intérieure en PM_{2,5} (p-valeur < 20 %). Néanmoins, une variable peut être peu corrélée en bivariée et devenir informative dans un contexte multivarié, en interaction ou en combinaison avec d'autres facteurs explicatifs. Dans ce contexte, il est préférable d'adopter une démarche restrictive pour garantir la robustesse du modèle, plutôt que d'inclure un trop grand nombre de variables qui pourrait complexifier l'interprétation des coefficients.

Comme indiqué dans la section Méthodologie statistique, les corrélations entre les variables candidates au modèle ont été menées, permettant d'exclure celles fortement corrélées entre elles et de limiter les biais de multicollinéarité. Près de 30 % de ces tests n'ont pas abouti.

Les variables explicatives ainsi retenues peuvent être sources de biais, en raison notamment d'erreurs de mesure, de variables non collectées ou de proxys imparfaits d'exposition. Les aspects météorologiques (vents, humidité extérieure, précipitations) n'ont pas été pris en compte dans l'analyse et auraient pu impacter l'infiltration des particules dans les logements comme cela a été le cas dans certaines publications (Fu et al. 2022; MacNeill et al. 2012; Abdel-Salam 2021).

Sur les 571 logements de l'échantillon, 515 (soit 90 %) présentaient des données complètes sur l'ensemble des variables explicatives retenues dans le modèle final. Cette réduction d'effectif peut limiter la puissance statistique de l'analyse et introduire un biais de sélection si les logements exclus diffèrent systématiquement des autres (par exemple en termes de type de chauffage, d'occupation ou de pratiques de ventilation). Toutefois, cette stratégie permet de garantir la comparabilité entre observations et d'éviter les imprécisions liées à l'imputation ou à l'inclusion partielle de covariables.

Le taux de renouvellement d'air (TRA) a été introduit dans d'autres modèles pondérés et non-pondérés testés mais sans la variable relative au type de ventilation pour des raisons de multicolinéarité. Que ce soit dans le modèle pondéré ou non-pondéré, la variable n'est pas ressortie comme un déterminant. Ceci pourrait être lié au calcul du TRA qui est une moyenne journalière et non un TRA dynamique. Cela pourrait aussi être dû au fait que l'effet du renouvellement de l'air a pu être masqué par l'impact de la pollution extérieure en $PM_{2,5}$. Toutefois à ce jour, aucun modèle de la revue de bibliographie n'a fait ressortir ce paramètre comme étant un déterminant des concentrations en $PM_{2,5}$.

D'autres variables dérivées, telles que la combustion, ont été également testées dans des modèles annexes (pondérés et non-pondérés) mais le degré d'information et la complexité de cette dernière n'étaient pas appropriés pour faire ressortir des éléments intéressants ici.

5.2.3 Adéquation et pertinence du modèle pondéré

L'adéquation et la pertinence des modèles ont été rigoureusement vérifiées (**Annexe 7 et Annexe 8**) par l'analyse des résidus, l'étude de la normalité des erreurs, la vérification de l'homoscédasticité ainsi que l'identification d'éventuelles valeurs influentes. Ces étapes ont permis de s'assurer de la validité des hypothèses sous-jacentes à la régression linéaire.

La part relativement faible de variation expliquée par le modèle pondéré (mais également non-pondéré) pourrait être expliquée par l'homogénéité relative des concentrations intérieures des $PM_{2,5}$ de la plupart des logements. En effet, 90 % des logements ne dépassent pas $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que pour les 10 % des logements restants, les concentrations peuvent être extrêmes (valeur maximale à $621 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Il est également possible que cela reflète également la complexité du phénomène étudié, probablement liée à la diversité des sources de $PM_{2,5}$ en milieu intérieur et à la difficulté de saisir l'ensemble des facteurs d'exposition à partir des variables disponibles. Certaines dimensions du problème ont pu ainsi échapper à cette modélisation.

En particulier, l'effet de la concentration extérieure pourrait être sous-estimé ou entaché d'incertitude, dans la mesure où les données utilisées ne proviennent pas de mesures réalisées à proximité immédiate des logements. Elles ont été estimées à l'aide d'un algorithme de modélisation spatiale (chimère INERIS, 2023), et le millésime des données peut ne pas correspondre exactement à la période de mesure en intérieur, introduisant un potentiel biais de mesure.

Une piste d'amélioration serait de prendre en compte dans la modélisation les différentes sources extérieures de manière plus fine en intégrant par exemple des variables spécifiques liées au trafic routier ou à l'environnement urbain immédiat des logements. De telles données permettraient de mieux cerner certaines sources d'exposition peu ou mal captées par les estimations actuelles de pollution ambiante.

Enfin, une modélisation du facteur d'infiltration pourrait être estimée en utilisant entre autres le ratio des concentrations intérieures et des concentrations extérieures de $PM_{2,5}$ et permettrait d'adapter des préconisations constructives selon l'enveloppe du bâtiment, les systèmes de ventilation et les conditions environnementales.

5.3 Perspectives et leviers d'action

Les résultats de cette étude mettent en lumière la complexité des déterminants des concentrations en $PM_{2,5}$ à l'intérieur des logements, ainsi que les limites actuelles dans la caractérisation de certaines expositions. Cette complexité, associée à la diversité des sources et à l'hétérogénéité des pratiques domestiques, invite à une approche multifactorielle, tant en termes d'action sanitaire.

Sur le plan de la santé publique, plusieurs leviers d'action concrets peuvent être mobilisés pour réduire l'exposition aux particules fines dans les environnements intérieurs. Il s'agit d'agir en premier lieu sur les sources intérieures en limitant drastiquement le tabagisme en intérieur, en utilisant correctement et en entretenant régulièrement tous les appareils à combustion (chauffage et cuisson) et en utilisant des produits ménagers sans produits chimiques réactifs susceptibles de former des particules. L'utilisation d'énergie renouvelable pour le chauffage et la cuisson pourrait être une alternative intéressante pour limiter les sources intérieures de pollution. En parallèle, il convient d'assurer un renouvellement d'air intérieur suffisant en entretenant et en utilisant correctement les systèmes de ventilation spécifiques, en privilégiant dans la mesure du possible l'utilisation d'une hotte raccordée à l'extérieur dans les cuisines et en aérant régulièrement les pièces des logements. Enfin, il faudrait veiller à poursuivre les efforts de réduction des niveaux de pollution de l'air extérieur en $PM_{2,5}$.

Par ailleurs, ces résultats soulignent la nécessité de sensibiliser les ménages, notamment les plus vulnérables (présence d'enfants, de personnes âgées ou atteintes de pathologies respiratoires), à l'impact des comportements domestiques sur la qualité de l'air intérieur. Un renforcement des campagnes d'information et d'éducation à la santé environnementale pourrait constituer un axe d'intervention efficace.

D'un point de vue réglementaire et structurel, le renforcement des normes relatives à la qualité de l'air intérieur, en lien avec les recommandations actualisées de l'OMS, apparaît comme une priorité. L'intégration de ces critères dans les politiques de rénovation énergétique, les diagnostics de performance des logements ou les programmes de santé environnementale permettrait de systématiser la prise en compte de cette problématique.

Sur le plan statistique, une analyse des cas les plus extrêmes de pollution intérieure ($>P90$) pourrait être menée et permettrait d'expliquer des variations plus importantes de pollution que celles observées dans ce travail qui prend en compte l'intégralité des logements.

Enfin, sur le plan scientifique, les deux sources majeures de pollution externe sont l'industrie et l'agriculture (Abdel-Salam 2021). Des travaux complémentaires sont à envisager pour affiner la compréhension des sources spécifiques de $PM_{2,5}$. Il serait notamment pertinent de mieux caractériser les expositions liées au trafic routier en développant des variables géographiques fines. Le développement de capteurs peu coûteux et la mise en œuvre d'approches intégrant des mesures de terrain extérieures en temps réel et des données contextuelles contribueront également à améliorer la précision des estimations et à guider plus efficacement les actions de prévention.

6 Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence plusieurs déterminants clés de la concentration en $PM_{2,5}$ à l'intérieur des logements comme l'impact de la pollution extérieure en $PM_{2,5}$, l'impact de certaines sources de pollution intérieure (tabagisme, usage de produits chimiques de ménage) et le rôle des systèmes spécifiques de ventilation. Afin de diminuer l'exposition humaine aux $PM_{2,5}$ dans les logements, la réduction des émissions des sources intérieures et des stratégies de ventilation et d'aération adaptées pourraient être des leviers d'action majeurs. Il conviendrait également de poursuivre les efforts de réduction de la pollution atmosphérique particulaire.

Cependant, la part relativement faible de variation expliquée par le modèle indique la complexité du phénomène étudié, marqué par la multiplicité des sources de pollution intérieure. Cette complexité est accentuée par des difficultés à capturer l'impact des sources extérieures, notamment à travers la prise en compte de données de concentration extérieure en particules issues de travaux de modélisation dans l'air ambiant et qui, bien que rapprochées des logements, présentent une incertitude susceptible d'introduire des biais.

Les perspectives de cette recherche incluent la possibilité d'affiner les outils de mesure des concentrations en $PM_{2,5}$ à l'extérieur, d'isoler les contributions des différentes sources extérieures (trafic routier et évolution des conditions environnementales extérieures) de continuer à explorer l'impact des pratiques domestiques sur la qualité de l'air intérieur et de documenter l'impact du « nuage personnel »² pour mieux estimer l'exposition individuelle.

² Accumulation de particules autour de la personne

7 Bibliographie

- Abdel-Salam, Mahmoud M. M. 2021. 'Outdoor and Indoor Factors Influencing Particulate Matter and Carbon Dioxide Levels in Naturally Ventilated Urban Homes'. *Journal of the Air & Waste Management Association* 71 (1): 60–69. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1834009>.
- AFNOR. 2023. 'NF EN 12341'. Afnor EDITIONS. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-12341/air-ambient-methode-normalisee-de-mesurage-gravimetrique-pour-la-determinat/fa186364/351830>.
- Bhaskar, Sanjana, Andrew Shapero, Futu Chen, et al. 2024. 'Algorithm-Driven Estimation of Household Cooking Activity and Its Impact on Indoor PM_{2.5} Assessments'. *Indoor Environments* 1 (3): 100032. <https://doi.org/10.1016/j.indenv.2024.100032>.
- Carilli, Tony. n.d. 'Chapter 8 Specifying Models | R Companion to Real Econometrics'. Accessed 17 April 2025. <https://bookdown.org/carillitony/bailey/chp7.html>.
- Carrion-Matta, Aleshka, Choong-Min Kang, Jonathan M. Gaffin, et al. 2019. 'Classroom Indoor PM_{2.5} Sources and Exposures in Inner-City Schools'. *Environment International* 131 (October): 104968. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104968>.
- Chen, Xiao-Cui, Heiko J. Jahn, Tony J. Ward, et al. 2020. 'Characteristics and Determinants of Personal Exposure to PM_{2.5} Mass and Components in Adult Subjects in the Megacity of Guangzhou, China'. *Atmospheric Environment* 224 (March): 117295. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117295>.
- Chen, Xiao-Cui, Tony J. Ward, Jun-Ji Cao, et al. 2018. 'Determinants of Personal Exposure to Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) in Adult Subjects in Hong Kong'. *Science of The Total Environment* 628–629 (July): 1165–77. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.049>.
- De Boeck Supérieur. 2019. 'Modèles biostatistiques pour l'épidémiologie'. July 20. <https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782807300262-modeles-biostatistiques-pour-l-epidemiologie>.
- Dunn, Olive Jean. 1961. 'Multiple Comparisons among Means'. *Journal of the American Statistical Association* 56 (293): 52–64. <https://doi.org/10.1080/01621459.1961.10482090>.
- 'FAQ How Do I Interpret a Regression Model When Some Variables Are Log Transformed?' n.d. Accessed 6 November 2025. <https://stats.oarc.ucla.edu/other/mult-pkg/faq/general/faqhow-do-i-interpret-a-regression-model-when-some-variables-are-log-transformed/>.
- Fisher, R. A. 1992. 'Statistical Methods for Research Workers'. In *Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution*, edited by Samuel Kotz and Norman L. Johnson. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_6.
- Freedman Ellis, Greg, and Ben Schneider. 2024. *Srvyr: 'Dplyr'-Like Syntax for Summary Statistics of Survey Data*. Released.
- Fu, Nuodi, Moon Keun Kim, Bing Chen, and Stephen Sharples. 2022. 'Investigation of Outdoor Air Pollutant, PM_{2.5} Affecting the Indoor Air Quality in a High-Rise Building'. *Indoor and Built Environment* 31 (4): 895–912. <https://doi.org/10.1177/1420326X211038279>.

- Giles, David E. A. 1982. 'The Interpretation of Dummy Variables in Semilogarithmic Equations: Unbiased Estimation'. *Economics Letters* 10 (1): 77–79. [https://doi.org/10.1016/0165-1765\(82\)90119-7](https://doi.org/10.1016/0165-1765(82)90119-7).
- Greenland, S., and K. Drescher. 1993. 'Maximum Likelihood Estimation of the Attributable Fraction from Logistic Models'. *Biometrics* 49 (3): 865–72.
- Groemping, Ulrike. 2007. 'Relative Importance for Linear Regression in R: The Package Relaimpo'. *Journal of Statistical Software* 17: 1–27. <https://doi.org/10.18637/jss.v017.i01>.
- Guak, Sooyoung, Sang-Gyu Lee, Jaehoon An, Hunjoo Lee, and Kiyoung Lee. 2021. 'A Model for Population Exposure to PM_{2.5}: Identification of Determinants for High Population Exposure in Seoul'. *Environmental Pollution* 285 (September): 117406. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117406>.
- Gurley, Emily S., Henrik Salje, Nusrat Homaira, et al. 2013. 'Seasonal Concentrations and Determinants of Indoor Particulate Matter in a Low-Income Community in Dhaka, Bangladesh'. *Environmental Research* 121 (February): 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.10.004>.
- Hadeed, Steven J., Mary Kay O'Rourke, Robert A. Canales, et al. 2021. 'Household and Behavioral Determinants of Indoor PM_{2.5} in a Rural Solid Fuel Burning Native American Community'. *Indoor Air* 31 (6): 2008–19. <https://doi.org/10.1111/ina.12904>.
- HCSP. 2013. *Valeurs repères d'aide à la gestion pour les particules dans l'air intérieur*. Haut Conseil de la Santé Publique. <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=371>.
- Huang, Lihui, Philip K. Hopke, Weiping Zhao, and Mu Li. 2015. 'Determinants on Ambient PM_{2.5} Infiltration in Non-Heating Season for Urban Residences in Beijing: Building Characteristics, Interior Surface Coverings and Human Behavior'. *Atmospheric Pollution Research* 6 (6): 1046–54. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.05.009>.
- Huang, Ye, Jinze Wang, Yan Chen, et al. 2022. 'Household PM_{2.5} Pollution in Rural Chinese Homes: Levels, Dynamic Characteristics and Seasonal Variations'. *Science of The Total Environment* 817 (April): 153085. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153085>.
- Ineris. n.d. 'Utilisation de produits ménagers et qualité de l'air intérieur : enjeux sanitaires, substances d'intérêt, bonnes pratiques | Ineris'. Accessed 29 April 2025. <https://www.ineris.fr/fr/utilisation-produits-menagers-qualite-air-interieur-enjeux-sanitaires-substances-interet-bonnes>.
- Insee. 2021. 'Particules PM₁₀ et PM_{2,5}'. January 15. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2196>.
- Josh Pasek [aut, cre], with some assistance from Alex Tahk and some code modified from R-core; Additional contributions by Gene Culter and Marcus Schwemmler. 2011. 'Weights: Weighting and Weighted Statistics'. March 5. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.weights>.
- Keyes, Tim, Rea Domingo, Samantha Dynowski, et al. 2023. 'Low-Cost PM_{2.5} Sensors Can Help Identify Driving Factors of Poor Air Quality and Benefit Communities'. *Heliyon* 9 (9): e19876. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19876>.
- Kruskal, William H, and W Allen Wallis. 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>.

- Leduc, Aude, Thomas Deroyon, Thierry Rochereau, and Auriane Renaud. 2021. *Premiers résultats de l'enquête santé européenne (EHIS) 2019*.
- Li, Zehao, Zhenzhen Di, Miao Chang, Ji Zheng, Toshio Tanaka, and Kiyoshi Kuroi. 2023. 'Study on the Influencing Factors on Indoor PM_{2.5} of Office Buildings in Beijing Based on Statistical and Machine Learning Methods'. *Journal of Building Engineering* 66 (May): 105240. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105240>.
- Lim, J.-M., J.-H. Jeong, J.-H. Lee, J.-H. Moon, Y.-S. Chung, and K.-H. Kim. 2011. 'The Analysis of PM_{2.5} and Associated Elements and Their Indoor/Outdoor Pollution Status in an Urban Area'. *Indoor Air* 21 (2): 145–55. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00691.x>.
- Liu, Yu, Jiankai Dong, Hongqiang Ma, Yiqiang Jiang, Wenke Zheng, and Xinmei Luo. 2022. 'An Overview: PM_{2.5} Concentration Levels in Urban Residential Buildings during the Past Two Decades'. *Aerosol and Air Quality Research* 22 (10): 220174. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220174>.
- Liu, Yu, Hongqiang Ma, Na Zhang, and Qinghua Li. 2022. 'A Systematic Literature Review on Indoor PM_{2.5} Concentrations and Personal Exposure in Urban Residential Buildings'. *Heliyon* 8 (8): e10174. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10174>.
- Lumley, T. 2020. *Survey: Analysis of Complex Survey Samples. R Package*. Released.
- Luo, Ruijiang, Ying Han, and Zheng Liu. 2017. 'The Current Status and Factors of Indoor PM_{2.5} in Tangshan, China'. *Procedia Engineering*, 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19–22 October 2017, Jinan, China, vol. 205 (January): 3824–29. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.086>.
- MacNeill, M., L. Wallace, J. Kearney, et al. 2012. 'Factors Influencing Variability in the Infiltration of PM_{2.5} Mass and Its Components'. *Atmospheric Environment* 61 (December): 518–32. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.005>.
- Matthaios, Vasileios N., Man Liu, Longxiang Li, et al. 2021. 'Sources of Indoor PM_{2.5} Gross α and β Activities Measured in 340 Homes'. *Environmental Research* 197 (June): 111114. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111114>.
- Men, Yatai, Jianpeng Li, Xinlei Liu, et al. 2021. 'Contributions of Internal Emissions to Peaks and Incremental Indoor PM_{2.5} in Rural Coal Use Households'. *Environmental Pollution* 288 (November): 117753. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117753>.
- Ministère de la transition écologique et solidaire et Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales. n.d. 'La Pollution de l'air Par Les Particules (PM₁₀ et PM_{2,5})'.
- Mohammadyan, Mahmoud, Ahmad Alizadeh-Larimi, Siavash Etemadinejad, et al. 2017. 'Particulate Air Pollution at Schools: Indoor–Outdoor Relationship and Determinants of Indoor Concentrations'. *Aerosol and Air Quality Research* 17 (3): 857–64. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.03.0128>.
- Ni, Yingmeng, Guochao Shi, and Jieming Qu. 2020. 'Indoor PM_{2.5}, Tobacco Smoking and Chronic Lung Diseases: A Narrative Review'. *Environmental Research* 181 (February): 108910. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108910>.
- Nishihama, Yukiko, Chau-Ren Jung, Shoji F. Nakayama, et al. 2021. 'Indoor Air Quality of 5,000 Households and Its Determinants. Part A: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM_{10–2.5}) Concentrations in the Japan Environment and Children's Study'. *Environmental Research* 198 (July): 111196. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111196>.

- OMS. 2021a. *Global Air Quality Guidelines. Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*.
- OMS. 2021b. 'WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide'.
- Pearson, Karl. 1900. 'On the Criterion That a given System of Deviations from the Probable in the Case of a Correlated System of Variables Is Such That It Can Be Reasonably Supposed to Have Arisen from Random Sampling'. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 50 (302): 157–75. <https://doi.org/10.1080/14786440009463897>.
- Pearson, Karl, and Francis Galton. 1997a. 'VII. Note on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents'. *Proceedings of the Royal Society of London* 58 (347–352): 240–42. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>.
- Pearson, Karl, and Francis Galton. 1997b. 'VII. Note on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents'. *Proceedings of the Royal Society of London* 58 (347–352): 240–42. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>.
- Peng, Zhen, Wu Deng, and Rosangela Tenorio. 2017. 'Investigation of Indoor Air Quality and the Identification of Influential Factors at Primary Schools in the North of China'. *Sustainability (Switzerland)* 9 (July). <https://doi.org/10.3390/su9071180>.
- Raaschou-Nielsen, Ole, Mette Sørensen, Ole Hertel, et al. 2011. 'Predictors of Indoor Fine Particulate Matter in Infants' Bedrooms in Denmark'. *Environmental Research* 111 (1): 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.10.007>.
- Ramalho, Olivier, Claire Dassonville, Sutharssini Sivanantham, et al. 2025. 'Campagne Nationale Logements 2: Etat de La Qualité de l'air Dans Les Logements En France Métropolitaine. Rapport Final SC-QEI-2024-020'. OQAI, 266.
- Salonen, Heidi, Tunga Salthammer, Emmanuelle Castagnoli, Martin Täubel, and Lidia Morawska. 2024. 'Cleaning Products: Their Chemistry, Effects on Indoor Air Quality, and Implications for Human Health'. *Environment International* 190 (August): 108836. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108836>.
- Ścibor, Monika, Bartosz Balcerzak, Andrzej Galbarczyk, Nikodem Targosz, and Grazyna Jasienska. 2019. 'Are We Safe inside? Indoor Air Quality in Relation to Outdoor Concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} and to Characteristics of Homes'. *Sustainable Cities and Society* 48 (July): 101537. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101537>.
- Semmens, Erin O., Curtis W. Noonan, Ryan W. Allen, Emily C. Weiler, and Tony J. Ward. 2015. 'Indoor Particulate Matter in Rural, Wood Stove Heated Homes'. *Environmental Research* 138 (April): 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.005>.
- Shao, Zhijuan, Jun Bi, Jie Yang, and Zongwei Ma. 2023. 'Indoor PM_{2.5}, Home Environmental Factors and Lifestyles Are Related to Sick Building Syndrome among Residents in Nanjing, China'. *Building and Environment* 235 (May): 110204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110204>.
- Spearman, C. 1904. 'The Proof and Measurement of Association between Two Things'. *The American Journal of Psychology* 15 (1): 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159>.
- Tamás, G., C. J. Weschler, J. Toftum, and P. O. Fanger. 2006. 'Influence of Ozone-Limonene Reactions on Perceived Air qualityAbstract'. *Indoor Air* 16 (3): 168–78. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00413.x>.

- 'The Korean Journal of Public Health'. n.d. Accessed 9 April 2025. http://kj-ph.snu.ac.kr/_common/do.php?a=full&bidx=1399&aidx=18154.
- Urso, Patrizia, Andrea Cattaneo, Gaetano Garramone, Carlo Peruzzo, Domenico Maria Cavallo, and Paolo Carrer. 2015. 'Identification of Particulate Matter Determinants in Residential Homes'. *Building and Environment* 86 (April): 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.019>.
- Vo, Le-Ha T., Minoru Yoneda, Trung-Dung Nghiem, et al. 2022. 'Indoor PM0.1 and PM2.5 in Hanoi: Chemical Characterization, Source Identification, and Health Risk Assessment'. *Atmospheric Pollution Research* 13 (2): 101324. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101324>.
- Wang, Hanning. 2024. 'Indoor PM2.5 and Building Energy Consumption in Nine Typical Residential Neighborhoods in Nanjing under Different Ventilation Strategies Caused by Traffic-Related PM2.5 Dispersion'. *Journal of Building Engineering*.
- World Bank Open Data. n.d. 'World Bank Open Data'. Accessed 7 May 2025. <https://data.worldbank.org>.
- Yassin, Mohamed F., Bothaina E. Y. AlThaqeb, and Eman A. E. Al-Mutiri. 2012. 'Assessment of Indoor PM2.5 in Different Residential Environments'. *Atmospheric Environment* 56 (September): 65–68. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.051>.
- Zhang, Ling, Changjin Ou, Dhammika Magana-Arachchi, et al. 2021. 'Indoor Particulate Matter in Urban Households: Sources, Pathways, Characteristics, Health Effects, and Exposure Mitigation'. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (21): 21. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111055>.
- Zwoździak, Anna, Izabela Sówka, Barbara Krupińska, Jerzy Zwoździak, and Alicja Nych. 2013. 'Infiltration or Indoor Sources as Determinants of the Elemental Composition of Particulate Matter inside a School in Wrocław, Poland?' *Building and Environment* 66 (August): 173–80. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.023>.

8 Annexes

Annexe 1. Liste des déterminants des concentrations intérieures en PM_{2,5} identifiés dans la littérature

Tableau A.1. Liste des déterminants du polluant PM_{2,5} identifiés dans la littérature

| Citation de l'article | Déterminants des PM _{2,5} |
|-----------------------|---|
| (Wang 2024) | <ul style="list-style-type: none">• Les stratégies de ventilation ;• Ouverture de fenêtre ;• Ventilation naturelle et/ou mécanique ;• Purificateur d'air intérieur ;• Ventilation hybride ;• Étage de l'appartement (rez-de-chaussée ;• Étages intermédiaires ou supérieurs) ;• Indice de surface frontale (λf) ;• Saison chauffe/hors chauffe ;• Concentration extérieure de PM_{2,5} |
| (Bhaskar et al. 2024) | <ul style="list-style-type: none">• Les ménages classés comme cuisinant ;• Les comportements et activités en matière de cuisine (les paramètres de cuisson) ;• Événements de cuisson autodéclarés (utilisation de la cuisinière, utilisation sur le grill/ friture/ grillade/ sauteuse) ;• Événements de cuisson identifiés par capteurs de température. |
| (Keyes et al. 2023) | <ul style="list-style-type: none">• Complexe de production énergétique CPV/OA (centrale électrique alimentée au gaz fossile et station de compression) ;• La température et l'humidité relative ;• Variables météorologiques ;• Visibilité ;• Vitesse du vent ;• Direction du vent relatif ;• Précipitations. |
| (Li et al. 2023) | <ul style="list-style-type: none">• Etat des fenêtres (ouverture/fermeture) ;• La contribution des PM_{2,5} extérieures ;• La contribution de la météorologie extérieure :<ul style="list-style-type: none">○ La direction du vent ;○ La vitesse du vent ;○ La température ;○ L'humidité ;• Fortes activités des personnes à l'intérieur ;• Nombre de personnes à l'intérieur. |

| Citation de l'article | Déterminants des PM _{2,5} |
|-------------------------|--|
| (Shao et al. 2023) | <ul style="list-style-type: none"> • La ventilation par l'ouverture des fenêtres pendant plus de 6 heures par jour ; • La pollution de l'air extérieur ; • Les émissions de la cuisine intérieure ; • Le facteur de pénétration. |
| (Vo et al. 2022) | <ul style="list-style-type: none"> • Saison (été/hiver) ; • Zone (Ville/hors ville) ; • Type habitation (habitation de la périphérie urbaine (K1), habitation en bordure de route (K2), habitation urbaine (K3)) ; • Contributions extérieures : <ul style="list-style-type: none"> ○ La combustion de charbon domestique ; ○ Le trafic ; ○ Les émissions industrielles ; • Contributions intérieures : <ul style="list-style-type: none"> ○ La poussière domestique ; ○ La combustion intérieure. |
| (Huang et al. 2022) | <ul style="list-style-type: none"> • La saison (hiver/été) ; • L'activité de cuisine ; • Le chauffage et le type de combustible (combustibles solides tels que le bois et le charbon, électricité, gaz de pétrole liquéfié (GPL)) ; • Les émissions des serpentins anti-moustiques ; • La ventilation. |
| (Peng et al. 2017) | <ul style="list-style-type: none"> • La ventilation ; • Ventilation naturelle ; • Ventilation mécanique avec purification de l'air ; • L'étanchéité d'un bâtiment (le niveau d'étanchéité à l'air) ; • Le niveau PM_{2,5} ambiant (extérieur). |
| (Nishihama et al. 2021) | <ul style="list-style-type: none"> • Les PM₁₀ intérieures ; • Les PM_{2,5} extérieures ; • Le tabagisme intérieur ; • La fumée observable ; • L'ouverture des fenêtres ; • La concentration intérieure de benzène. |
| (Men et al. 2021) | <ul style="list-style-type: none"> • Les PM_{2,5} extérieures ; • La période de chauffage et de non-chauffage ; • Les sources intérieures typiques : <ul style="list-style-type: none"> ○ La cuisine (les émissions liées à la cuisson des aliments à l'aide de combustibles solides) ; ○ Le chauffage associé à l'utilisation du charbon ; ○ Le tabagisme ; ○ Le nettoyage ; ○ Le mouvement des personnes ; |

| Citation de l'article | Déterminants des PM _{2,5} |
|-------------------------|---|
| (Matthaios et al. 2021) | <ul style="list-style-type: none"> • Les PM_{2,5} extérieure ; • La saison (été/hiver) ; • L'ouverture des fenêtres ; • Les aérosols salins ; • La fumée de tabac ; • Les feux d'artifice ; • Les poussières fines d'origine intérieure ; • Le radon intérieur. |
| (Hadeed et al. 2021) | <ul style="list-style-type: none"> • La saison de chauffage et de non-chauffage ; • L'humidité relative intérieure ; • Les PM_{2,5} extérieures ; • Les facteurs comportementaux saisonniers et caractéristiques des ménages ; • Le type de combustible de chauffage (charbon et/ou au bois, ou une combinaison de charbon et/ou de bois avec de l'électricité et/ou du gaz naturel) ; • Utilisation d'une unité de contrôle climatique ; • Ouverture des portes et/ou des fenêtres ; • Fumer et/ou brûler de l'encens à l'intérieur ; • Le type de logement ; • La présence de parasites à l'intérieur des bâtiments ; • Le nombre de portes intérieures ; • La surface de l'environnement ; • La taille et la hauteur du bâtiment. |
| (Guak et al. 2021) | <ul style="list-style-type: none"> • La saison (les 4 saisons) ; • Les PM_{2,5} extérieures ; • Le sexe ; • L'âge ; • Les heures de travail (quantitatif) ; • L'état de santé (bonne santé, normal, mauvaise santé). |
| (Fu et al. 2022) | <ul style="list-style-type: none"> • La saison (4 saisons) ; • PM_{2,5} extérieures ; • La disposition d'une cheminée ; • Le vent (la vitesse du vent) ; • Le taux d'infiltration ; • La disposition des filtres à air ; • L'étage du bâtiment ; • L'étanchéité à l'air. |
| (Zhang et al. 2021) | <ul style="list-style-type: none"> • Les PM_{2,5} extérieures ; • Les cheminées ; • Le type de combustible pour le chauffage ; • L'usure régulière des meubles de maison ; • La décoration intérieure appropriée (plantes d'intérieur et des purificateurs d'air) ; • La ventilation (La précipitation et la filtration électrostatiques, la ventilation naturelle) ; |

| Citation de l'article | Déterminants des PM _{2,5} |
|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Les contaminants inorganiques et organiques (métaux lourds toxiques, COV, ...). • Les activités humaines : <ul style="list-style-type: none"> ○ Les activités sportives en intérieur ; ○ La cuisine ; ○ Le tabagisme ; ○ Brûler de l'encens ; ○ Le nettoyage régulier des intérieurs. |
| (Abdel-Salam 2021) | <ul style="list-style-type: none"> • Les concentrations de PM_{2,5} extérieures ; • La pièce du logement (cuisine ou séjour) ; • Les activités domestiques : <ul style="list-style-type: none"> ○ Le tabagisme ; ○ La cuisine ; ○ Le nettoyage. ○ La ventilation : <ul style="list-style-type: none"> ○ La ventilation naturelle (ouverture des portes et/ou des fenêtres) ; ○ L'utilisation de systèmes mécaniques (les ventilateurs d'extraction et les hottes de désenfumage) ; |
| (Chen et al. 2020) | <ul style="list-style-type: none"> • Les PM_{2,5} extérieures ; • La saison (été/hiver) ; • Le type de quartier (Rural, Urbain central, Banlieue) ; • Le temps passé à l'intérieur et à l'extérieur. |
| (Carrion-Matta et al. 2019) | <ul style="list-style-type: none"> • La saison (automne, hiver et printemps) ; • Les particules riches en calcium et la poussière de sol liés à l'activités des enfants ; • Les facteurs concomitants au transfère extérieur : <ul style="list-style-type: none"> ○ Les véhicules à moteur ; ○ La pollution secondaire (due à des contributions élevées de sulfate et de Na) ; ○ Les aérosols marins ; ○ La poussière de sol ; ○ La poussière de route ; ○ La combustion de la biomasse. |
| (Ścibor et al. 2019) | <ul style="list-style-type: none"> • Les concentrations extérieures PM_{2,5} ; • La saison de chauffage ; • Le type de fenêtres (anciennes - simple vitrage avec cadre en bois - ou nouvelles - double vitrage et calfeutrage) ; • Le type de système de chauffage (gaz, électricité, chauffage central, charbon). |
| ('The Korean Journal of Public Health', n.d.) | <ul style="list-style-type: none"> • La concentration extérieure de PM_{2,5} ; • Les activités des résidents : <ul style="list-style-type: none"> • L'utilisation de combustibles ; • La cuisine ; |

| Citation de l'article | Déterminants des PM _{2,5} |
|---------------------------|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Le tabagisme à l'intérieur ; |
| (Chen et al. 2018) | <ul style="list-style-type: none"> • La saison (été/hiver). ; • Les caractéristiques et les activités des individus : <ul style="list-style-type: none"> ○ La profession ; ○ Le temps passé à l'intérieur du domicile et à l'extérieur ○ Le temps passé dans les transports ; ○ Le temps passé au nettoyage. |
| (Mohammadyan et al. 2017) | <ul style="list-style-type: none"> • La saison (été/hiver) ; • Les PM_{2,5} extérieures ; • Des variables météorologiques : <ul style="list-style-type: none"> • Température ambiante ; • Humidité relative. |
| (Luo et al. 2017) | <ul style="list-style-type: none"> • Les PM_{2,5} extérieures ; • Des variables météorologiques (niveau du vent, les précipitations). ; • Les fumées d'huile de cuisson. ; • Le tabagisme. |
| (Semmens et al. 2015) | <ul style="list-style-type: none"> • Le revenu du ménage ; • L'heure du jour ; • Activités à l'intérieur ou à proximité de la maison : <ul style="list-style-type: none"> • Ouvrir une porte ou une fenêtre ; • Brûlage de l'encens et/ou bougie ; • Chauffage au bois. |
| (Huang et al. 2015) | <ul style="list-style-type: none"> - Le trafic automobile (routes à trois types de trafic : voies rapides ou artères (périphérique), autoroutes locales et rues tranquilles) ; - Caractéristiques du bâtiment : <ul style="list-style-type: none"> ○ L'âge du bâtiment ; ○ La structure de la cuisine (close-style, open-style) ; ○ Le taux de renouvellement de l'air (AER) ; ○ La surface d'ouverture des fenêtres. • Conditions de circulation et décoration intérieure : • Les décorations et les revêtements muraux ; • Les matériaux de sol ; • La présence des plantes à l'intérieur. • Comportement humain : • Le nettoyage intérieur (la méthode et la fréquence de nettoyage des sols) ; • L'activité de tabagisme à l'intérieur ; • L'activité de cuisine. |

| Citation de l'article | Déterminants des PM _{2,5} |
|-------------------------|---|
| (Urso et al. 2015) | <ul style="list-style-type: none"> • Le trafic routier à proximité ; • Les PM_{2,5} ambiantes ; • Les PM₁₀ ambiantes ; • La saison (été/hiver) ; • Le volume de la maison ; • La présence d'un garage attenant ; • L'occupation de la maison ; • L'activité de nettoyage. |
| (Zwoździak et al. 2013) | <ul style="list-style-type: none"> • Les PM_{2,5} extérieures ; • La saison (hiver, été). |
| (Gurley et al. 2013) | <ul style="list-style-type: none"> • La saison (été/hiver) ; • La combustion de la biomasse pour la cuisson ; • Le tabagisme à l'intérieur ; • La ventilation. |
| (MacNeill et al. 2012) | <ul style="list-style-type: none"> • La saison (été/hiver) ; • Caractéristiques du logement : <ul style="list-style-type: none"> ○ Âge du logement ; ○ Climatiseur central dans le logement ; ○ Chats à l'intérieur du logement ; ○ La ventilation du logement a été améliorée ; ○ Nombre de personnes vivant dans le foyer ; ○ Cheminée utilisée comme chauffage d'appoint ; • Comportement des individus : <ul style="list-style-type: none"> ○ Utilisation de dépoussiéreurs électrostatiques et de purificateurs d'air ; ○ Ouverture des fenêtres ; ○ Durée totale de la cuisson ; ○ Utilisation de bougies ; ○ Fréquence du nettoyage ; ○ Pourcentage de la journée passée à l'extérieur. • Variables météorologiques : <ul style="list-style-type: none"> ○ Différence de température I-E absolue ; ○ Vitesse moyenne du vent. |
| (Yassin et al. 2012) | <ul style="list-style-type: none"> • Comportement des habitants : <ul style="list-style-type: none"> ○ L'activité de cuisine ; ○ La combustion d'encens ; ○ Le tabagisme à l'intérieur ; ○ Utilisation des produits chimiques pour le nettoyage ; ○ Utilisation des sprays ; ○ Passage de l'aspirateur. |
| (Lim et al. 2011) | <ul style="list-style-type: none"> • Les PM_{2,5} extérieures. ; • Logement à proximité d'une route à forte densité de trafic (environ 8000 véhicules/h) ; • La poussière de sol et de de route ; • Les activités intérieures : |

| Citation de l'article | Déterminants des PM _{2,5} |
|--------------------------------|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> ○ Environmental Tobacco Smoke (ETS) ; ○ L'activité de cuisine ; ○ La combustion de pétrole/charbon. |
| (Raaschou-Nielsen et al. 2011) | <ul style="list-style-type: none"> ● La saison (été, printemps-automne, hiver) ; ● Le tabagisme à l'intérieur ; ● Le type de cuisson (avec hotte/sans hotte) ; ● L'utilisation d'une cheminée ou d'un poêle à bois ; ● L'utilisation de bougies ; ● L'utilisation d'un aspirateur ; ● Le trafic routier < 20 m de la résidence ; ● La zone de résidence (rurale, ville de province, 5-10 km du centre, < 5 km du centre) ; ● La reconstruction ou la rénovation d'un intérieur ; ● L'ouverture des fenêtres (par 10 h par jour). |

Annexe 2. Liste des variables ayant un lien avec les concentrations intérieures en PM_{2,5} et disponibles dans CNL2

- **Environnement extérieur du logement :**
 - Concentration extérieure en PM_{2,5} : CONC_EXT_PM25 ;
 - Source de pollution extérieure : SOURCE_POLLU_EXTE, POLLUTION_EXT_COMBUST ;
 - Type de tranche urbaine (Insee) : TYPE_UU (unité urbaine) ;
 - Caractéristiques météorologiques : TEMP_EXT, SAISON_DJ ;
 - Présence de chantier : PRESENCE_CHANTIER.
- **Activités du ménage :**
 - Aération du logement : AERA_JOUR, AERA NUIT, AERATION_SEJOUR ;
 - Utilisation de bougies ou d'encens : BOUGIE_ENCENS ;
 - Aération pendant la cuisson : FREQ_AERA_FENET_CUISSON ;
 - Utilisation de la hotte : FREQ_AERA_HOTTE_CUISSON ;
 - Utilisation de la ventilation : FREQ_AERA_VENTIL_CUISSON ;
 - Utilisation d'un climatiseur : CLIM ;
 - Présence de combustion (solide/fermée sur le chauffage ou la cuisson) : COMBUSTION ;
 - Cuisson à la poêle : FREQ_CUISSON_POELE ;
 - Cuisson vapeur : FREQ_CUISSON_VAPEUR ;
 - Tabagisme intérieur : FREQ_FUM_CIG, FUM_CIG ;
 - Nettoyage : FREQ_NETTOY_SURF ;
 - Moquette et tapis : TAPIS_MOQUETTE ;
 - Travaux et rénovation : TRAV_LOG, TRAV_REHAB_LOG ;
 - Utilisation d'un compost : UTIL_COMPOST ;
 - Utilisation de désodorisant : FREQ_UTIL_DESODO, FREQ_UTIL_DESODO_AUTRES ;
 - Animaux de compagnie : ANIMAUX_COMPAGNIE ;
 - Déchaussage : DECHAUSSAGE.
- **Logement :**
 - Type de chauffage : CHAUFFAGE, CHAUFFAGE_avec_CHEM_POELE, POELE_A_BOIS, TYPE_CHAUFF_CENTRAL ;
 - Climatiseur : CLIM,
 - Equipement de la cuisine : CUISINE_EQUIP_HOTTE, ENERGIE_CUISSON ;
 - Présence de bouche de ventilation : PRESENCE_BOUCHE ;
 - Type de cuisine, nombre de pièce de cuisine : TYPE_CUISINE_QPIECE, NB_CUISINE ;
 - Type de logement, étage, surface, nombre de pièces, jardin : TYPE_LOG, ETAGE, SURFACE, NB_PIECES, JARDIN ;
 - Type de ventilation : VENTILATION ;
 - Taux de renouvellement d'air : TRA ;

- Matériaux de construction des murs : MATER_PIERRE, MATER_PARPAING ;
- **Occupants :**
 - Composition du ménage, nombre d'habitants : COMPOSITION_MENAGE, NB_HABITANTS ;
 - Occupation : NMOY_OCCUP, DUREE_PRESENCE;
 - Perception odeurs : ODEURS_EXT ;
 - Propriétaire/Locataire : PROPIO_LOCAT.

Annexe 3. Préparation des données

Le tableau ci-dessous présente les variables regroupées afin de ne pas les éliminer de l'analyse.

Tableau A.2. Description des variables ayant subi un regroupement

| Variables à regrouper | Variable finale | Règle |
|---|----------------------------|---|
| FREQ_BOUGIES FREQ_ENCENS | BOUGIE_ENCENS | Si au moins une des 2 variables = « Oui » alors BOUGIE_ENCENS = « Oui », sinon « Non » |
| FREQ_DESODO_AEROSOL FREQ_INSECTICIDE_AEROSOL_LOG | DESODO_INSECTICIDE_AEROSOL | Si au moins une des 2 variables = « Oui » alors DESODO_INSECTICIDE_AEROSOL = « Oui », sinon « Non » |
| FREQ_UTIL_DESODO_AUTRES FREQ_INSECTICIDE_AUTRE_LOG | DESODO_INSECTICIDE_AUTRE | Si au moins une des 2 variables = « Oui » alors DESODO_INSECTICIDE_AUTRE = « Oui », sinon « Non » |
| FREQ_ACTIV_PEINTURE FREQ_ACTIV_ODEURS FREQ_TRAV_PEINTURE FREQ_TRAV_ODEURS FREQ_UTIL_PRODUITS_ODEURS | PEINTURE_ODEUR | Si au moins une des 5 variables = « Oui » alors PEINTURE_ODEUR = « Oui », sinon « Non » |
| FREQ_ACTIV_PERCAGE FREQ_TRAV_PERCAGE | PERCAGE | Si au moins une des 2 variables = « Oui » alors PERCAGE = « Oui », sinon « Non » |
| FREQ_INTRO_MEUBLES_BOIS FREQ_INTRO_MEUBLES_PLASTIQUE FREQ_INTRO_MEUBLES_AUTRES FREQ_INTRO_MOBILIERS_AUTRES | INTRO_MEUBLE | Si au moins une des 4 variables = « Oui » alors INTRO_MEUBLE = « Oui », sinon « Non » |
| FREQ_INTRO_TAPIS MOQUETTE | TAPIS_MOQUETTE | Si au moins une des 2 variables = « Oui » alors TAPIS_MOQUETTE = « Oui », sinon « Non » |

Le tableau ci-dessous liste les variables pour lesquels les valeurs manquantes ont été remplacées. Elles correspondent à des cas où les logements ne sont pas équipés de « ... », ne font pas l'activité « ... » ou encore n'utilisent pas le produit « ... ».

Tableau A.3. Recodage des données manquantes

| Variables | | Choix de modalité pour le recodage | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------|
| FREQ_CHAUFF_BOIS | FREQ_INTRO_TAPIS | « Non » | |
| FREQ_CHAUFF_GAZ_PETROLE | FREQ_INTRO_MEUBLES_PLASTIQUE | | |
| FREQ_DESODO_AEROSOL | FREQ_INTRO_MEUBLES_AUTRES | | |
| FREQ_BOUGIES | FREQ_INTRO_MOBILIERS_AUTRES | | |
| FREQ_ENCENS | FREQ_UTIL_PRODUITS_ODEURS | | |
| FREQ_UTIL_DESODO_AUTRES | FREQ_INSECTICIDE_AEROSOL_EXT | | |
| FREQ_FUM_CIG | FREQ_AERA_VENTIL_CUISSON | | |
| FREQ_FUM_VAP | POUSSIERE_EXT | | |
| FREQ_INSECTICIDE_AEROSOL_LOG | ODEURS_EXT | | |
| FREQ_INSECTICIDE_AUTRE_LOG | TRAV_REHAB_LOG | | |
| FREQ_VETEM_PRESSING | TRAV_LOG | | |
| FREQ_ACTIV_PEINTURE | AERA NUIT | | |
| FREQ_ACTIV_PERCAGE | NETTOY_SURF | | |
| FREQ_ACTIV_ODEURS | NETTOY_AUTRE | | |
| FREQ_TRAV_PEINTURE | DESODO_AEROSOL | | |
| FREQ_TRAV_PERCAGE | UTIL_DESODO_AUTRE | | |
| FREQ_TRAV_ODEURS | PRESENCE_BOUCHE | | |
| FREQ_INTRO_MEUBLES_BOIS | CUISINE_EQUIP_HOTTE | | |
| FREQ_ASPI | FREQ_CUISSON_FOUR | | « 0 » |
| FREQ_BALAIS | FREQ_CUISSON_POELE | | |
| FREQ_NETTOY_SURF | FREQ_CUISSON_VAPEUR | | |
| FREQ_NETTOY_AUTRE | | | |
| AERA_JOUR | | « [0-1h] » | |

| | | |
|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| FREQ_AERA_HOTTE_CUISSON | FREQ_AERA_FENET_CUISSON | « Jamais » |
| VENTILATION | | « Aucune » |
| AERATION_SEJOUR | AERATION_LOGEMENT | « [$<0.5h$] » |
| OCCUPATION_PERSONNE_REF | | « [Autre] » |

Annexe 4. Etapes de sélection des variables pour la modélisation des concentrations intérieures en PM_{2,5} pondérées à l'échelle du parc national de la France hexagonale

| Variables (N=79) | Step1: Corr Y ^a | Step2: Corr X (Détailé) ^b | Variable d'intérêt à forcer dans le modèle | Etape de rejet de la variable | Sélectionnée pour le modèle complet (N=20) |
|--------------------------|----------------------------|--|---|----------------------------------|---|
| AERA_JOUR | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| AERA NUIT | Oui | UTIL_CHAUFF + AERATION_SEJOUR + FREQ_AERA_FENET_CUISSON + CUISINE_EQUIP_HOTTE + SAISON_DJ + TEMP_EXT + COMB_GAZ_ETANCHE + FREQ_FUM_CIG + TAUX_RENOUV_AIR | Non | Step 2 : CorrX | Non |
| AERATION_LOGEMENT | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| AERATION_SEJOUR | Oui | COMBUSTION + FREQ_BALAIS + SAISON_DJ + TEMP_EXT + FREQ_AERA_FENET_CUISSON + COMB_GAZ_ETANCHE + UTIL_CHAUFF + AERA NUIT + FUM_CIG | Non | Step 2 : CorrX | Oui |
| ANIMAUX_COMPAGNIE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| BOUGIE_ENCENS | Non | COMB_GAZ_OUVERT | Oui | | Oui |
| CHAUFFAGE | Oui | | Oui | | Oui |
| CHEMINEE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| CLIM | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| COMB_GAZ_ETANCHE | Oui | UTIL_CHAUFF + COMBUSTION + AERATION_SEJOUR + AERA NUIT + COMBUST_CHAUFF + SAISON_DJ + TEMP_EXT | Oui | Step 2 : CorrX | Non |
| COMB_GAZ_OUVERT | Oui | ENERGIE_CUISSON + COMBUSTION + FREQ_CUISSON_FOUR + VENTILATION + FREQ_NETTOY_SURF + TYPE_LOG + TYPE_UU + BOUGIE_ENCENS + COMB_SOLIDE_FERME + COMBUST_CHAUFF | Oui | Step 2 : CorrX | Non |

| Variables (N=79) | Step1: Corr Y^a | Step2: Corr X (Détailé)^b | Variable d'intérêt à forcer dans le modèle | Etape de rejet de la variable | Sélectionnée pour le modèle complet (N=20) |
|-----------------------------------|----------------------------------|--|---|--|---|
| COMB_SOLIDE_FERME | Oui | COMBUSTION + TYPE_LOG + UTIL_COMPOST + CUISINE_EQUIP_HOTTE + TYPE_UU + STATUT_COMMUNE + ACT_COMMERCE_IMMEUBLE + POELE_A_BOIS + SURFACE + COMBUST_CHAUFF + PROPIO_LOCAT + FREQ_CUISSON_FOUR + OCCUPATION_PERSONNE_REF + ENERGIE_CUISSON + COMB_GAZ_OUVERT | Oui | Step 2 : CorrX | Non |
| COMB_SOLIDE_OUVERTE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| COMBUSTION | Non | TYPE_UU + VENTILATION + FREQ_CUISSON_VAPEUR + COMB_SOLIDE_FERME + COMB_GAZ_OUVERT + POELE_A_BOIS + ENERGIE_CUISSON + COMB_GAZ_ETANCHE + SURFACE + TYPE_LOG + PROPIO_LOCAT + UTIL_COMPOST + UTIL_CHAUFF + CUISINE_EQUIP_HOTTE + FREQ_CUISSON_FOUR + AERATION_SEJOUR + SAISON_DJ + STATUT_COMMUNE + TEMP_EXT + ACT_COMMERCE_IMMEUBLE | Oui | | Non |
| COMPOSITION_MENAGE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| CONC_EXT_PM25 | Oui | COMBUST_CHAUFF + UTIL_CHAUFF + TEMP_EXT | Oui | | Oui |
| CUISINE_EQUIP_HOTTE | Oui | STATUT_COMMUNE + UTIL_COMPOST + COMBUSTION + TYPE_UU + TYPE_LOG + PROPIO_LOCAT + SURFACE + COMB_SOLIDE_FERME + SAISON_DJ + AERA_NUIT + FREQ_AERA_FENET_CUISSON + UTIL_CHAUFF + POELE_A_BOIS + MATER_PARPAING + OCCUPATION_PERSONNE_REF | Oui | | Oui |
| DECHAUSSAGE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| DESODO_AEROSOL | Non | FREQ_NETTOY_SURF + FREQ_BALAIS + FREQ_CUISSON_FOUR | Oui | | Oui |
| DESODO_INSECTICIDE_AEROSOL | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| DESODO_INSECTICIDE_AUTRE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| DUREE_PRESENCE | Oui | TX_PRESENCE + COMBUST_CHAUFF + FREQ_BALAIS + DENSITE_PRESENCE | Non | Step 2 : CorrX | Oui |

| Variables (N=79) | Step1: Corr Y ^a | Step2: Corr X (Détailé) ^b | Variable d'intérêt à forcer dans le modèle | Etape de rejet de la variable | Sélectionnée pour le modèle complet (N=20) |
|---------------------------------|----------------------------|---|---|----------------------------------|---|
| ENERGIE_CUISSON | Oui | COMBUSTION + FREQ_CUISSON_FOUR + TYPE_LOG + FREQ_NETTOY_SURF + VENTILATION + UTIL_COMPOST + COMB_SOLIDE_FERME + TYPE_UU + FREQ_CUISSON_VAPEUR + ACT_COMMERCE_IMMEUBLE + COMB_GAZ_OUVERT + COMBUST_CHAUFF | Non | Step 2 : CorrX | Non |
| ETAGE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| FREQ_AERA_FENET_CUISSON | Oui | AERATION_SEJOUR + UTIL_COMPOST + CUISINE_EQUIP_HOTTE + TYPE_LOG + UTIL_CHAUFF + AERA NUIT + SAISON_DJ | Non | Step 2 : CorrX | Non |
| FREQ_AERA_HOTTE_CUISSON | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| FREQ_AERA_VENTIL_CUISSON | Oui | VENTILATION | Non | Step 2 : CorrX | Oui |
| FREQ_ASPI | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| FREQ_BALAIS | Non | DESODO_AEROSOL + DUREE_PRESENCE + TX_PRESENCE + OCCUPATION_PERSONNE_REF + AERATION_SEJOUR | Oui | | Oui |
| FREQ_CHAUFF_BOIS | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| FREQ_CUISSON_FOUR | Oui | FREQ_CUISSON_POELE + COMBUSTION + FREQ_CUISSON_VAPEUR + COMB_SOLIDE_FERME + POELE_A_BOIS + MATER_BRIQUES + DESODO_AEROSOL + FREQ_NETTOY_SURF + ENERGIE_CUISSON + COMB_GAZ_OUVERT + OCCUPATION_PERSONNE_REF + SAISON_DJ | Oui | Step 2 : CorrX | Non |
| FREQ_CUISSON_POELE | Oui | FREQ_CUISSON_VAPEUR + FREQ_CUISSON_FOUR + FUM_CIG + POELE_A_BOIS | Oui | | Oui |
| FREQ_CUISSON_VAPEUR | Non | FREQ_CUISSON_FOUR + PRESENCE_BOUCHE + FUM_CIG + COMBUSTION + FREQ_CUISSON_POELE + ENERGIE_CUISSON + TYPE_LOG | Oui | | Oui |
| FREQ_FUM_CIG | Oui | FUM_CIG + UTIL_COMPOST + TYPE_LOG + AERA NUIT + PROPIO_LOCAT | Oui | | Oui |

| Variables (N=79) | Step1: Corr Y^a | Step2: Corr X (Détailé)^b | Variable d'intérêt à forcer dans le modèle | Etape de rejet de la variable | Sélectionnée pour le modèle complet (N=20) |
|-----------------------------|----------------------------------|--|---|--|---|
| FREQ_NETTOY_AUTRE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| FREQ_NETTOY_SURF | Non | FREQ_CUISSON_FOUR + DESODO_AEROSOL + ENERGIE_CUISSON + COMBUST_CHAUFF + COMB_GAZ_OUVERT | Non | Step 2 : CorrX | Oui |
| GARAGE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| INTRO_MEUBLE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| JARDIN | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| LOCAL_QUARTIER_PRIO | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| MATER_BETON | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| MATER_BRIQUES | Oui | FREQ_CUISSON_FOUR + TYPE_LOG | Non | Step 2 : CorrX | Oui |
| MATER_PARPAING | Oui | TYPE_UU + ACT_COMMERCE_IMMEUBLE + CUISINE_EQUIP_HOTTE + STATUT_COMMUNE + TYPE_LOG | Non | Step 2 : CorrX | Oui |
| MATER_PIERRE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| NB_CUISINE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| NB_HABITANTS | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| NB_PIECES | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| NETTOY_AUTRE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| NETTOY_SURF | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| NMOY_OCCUP | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| ODEURS_EXT | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| PEINTURE_ODEUR | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| PERCAGE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| PERIODE_CONSTRU | Oui | VENTILATION + DENSITE_PRESENCE + UTIL_CHAUFF | Non | Step 2 : CorrX | Non |

| Variables (N=79) | Step1: Corr Y^a | Step2: Corr X (Détailé)^b | Variable d'intérêt à forcer dans le modèle | Etape de rejet de la variable | Sélectionnée pour le modèle complet (N=20) |
|------------------------------|----------------------------------|---|---|--|---|
| POELE_A_BOIS | Oui | COMB_SOLIDE_FERME + COMBUSTION + UTIL_COMPOST + TYPE_LOG + TYPE_UU + STATUT_COMMUNE + CUISINE_EQUIP_HOTTE + FREQ_CUISSON_POELE + SURFACE + COMBUST_CHAUFF + PROPIO_LOCAT + FREQ_CUISSON_FOUR + OCCUPATION_PERSONNE_REF | Non | Step 2 : CorrX | Non |
| POLLUTION_EXT_COMBUST | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| POUSSIERE_EXT | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| PRESENCE_BOUCHE | Non | FREQ_CUISSON_VAPEUR + OCCUPATION_PERSONNE_REF | Oui | | Oui |
| PRESENCE_CHANTIER | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| PRESENCE_ZONE_CULTURE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| PROPIO_LOCAT | Oui | UTIL_COMPOST + CUISINE_EQUIP_HOTTE + COMBUSTION + COMB_SOLIDE_FERME + TYPE_LOG + POELE_A_BOIS + SURFACE + COMBUST_CHAUFF + DENSITE_PRESENCE + FUM_CIG + FREQ_FUM_CIG | Non | Step 2 : CorrX | Non |
| SAISON_DJ | Oui | UTIL_CHAUFF + AERA_NUIT + AERATION_SEJOUR + COMB_GAZ_ETANCHE + CUISINE_EQUIP_HOTTE + FREQ_AERA_FENET_CUISSON + COMBUSTION + FREQ_CUISSON_FOUR + TEMP_EXT | Oui | Avis expert | Non |
| SEXE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| SOURCE_POLLU_EXTE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| SURFACE | Oui | COMBUST_CHAUFF + TYPE_LOG + COMBUSTION + PROPIO_LOCAT + COMB_SOLIDE_FERME + POELE_A_BOIS + DENSITE_PRESENCE + UTIL_COMPOST + CUISINE_EQUIP_HOTTE + TYPE_UU | Non | Step 2 : CorrX | Non |
| TAPIS_MOQUETTE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| TAUX_RENOUV_AIR | Oui | COMBUST_CHAUFF + DENSITE_PRESENCE + AERA_NUIT | Oui | Avis expert | Non |

| Variables (N=79) | Step1: Corr Y^a | Step2: Corr X (Détailé)^b | Variable d'intérêt à forcer dans le modèle | Etape de rejet de la variable | Sélectionnée pour le modèle complet (N=20) |
|-----------------------------|----------------------------------|--|---|--|---|
| TEMP_EXT | Oui | SAISON_DJ + COMBUST_CHAUFF + UTIL_CHAUFF + AERATION_SEJOUR + AERA_NUIT + COMB_GAZ_ETANCHE + CONC_EXT_PM25 + COMBUSTION | Non | Step 2 : CorrX | Non |
| TRAV_LOG | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| TRAV_REHAB_LOG | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| TX_PRESENCE | Oui | COMBUST_CHAUFF + FREQ_BALAIS + DUREE_PRESENCE + DENSITE_PRESENCE | Non | Step 2 : CorrX | Oui |
| TYPE_CHAUFF_CENTRAL | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| TYPE_CUISINE_QPIECE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| TYPE_LOG | Oui | CUISINE_EQUIP_HOTTE + ACT_COMMERCE_IMMEUBLE + TYPE_UU + STATUT_COMMUNE + COMBUSTION + UTIL_COMPOST + MATER_PARPAING + MATER_BRIQUES + FREQ_CUISSON_VAPEUR + SURFACE + COMB_SOLIDE_FERME + POELE_A_BOIS + PROPIO_LOCAT + COMBUST_CHAUFF + ENERGIE_CUISSON + FREQ_FUM_CIG + COMB_GAZ_OUVERT + FREQ_AERA_FENET_CUISSON | Oui | | Oui |
| TYPE_UU | Non | TYPE_LOG + COMB_SOLIDE_FERME + POELE_A_BOIS + COMBUSTION + COMBUST_CHAUFF + MATER_PARPAING + CUISINE_EQUIP_HOTTE + UTIL_COMPOST + ACT_COMMERCE_IMMEUBLE + SURFACE + ENERGIE_CUISSON + COMB_GAZ_OUVERT | Oui | | Oui |
| UTIL_CHAUFF | Oui | COMBUSTION + AERATION_SEJOUR + FREQ_AERA_FENET_CUISSON + CUISINE_EQUIP_HOTTE + PERIODE_CONSTRU + SAISON_DJ + COMB_GAZ_ETANCHE + TEMP_EXT + AERA_NUIT + CONC_EXT_PM25 | Non | Step 2 : CorrX | Non |

| Variables (N=79) | Step1: Corr Y^a | Step2: Corr X (Détailé)^b | Variable d'intérêt à forcer dans le modèle | Etape de rejet de la variable | Sélectionnée pour le modèle complet (N=20) |
|-----------------------------|----------------------------------|---|---|--|---|
| UTIL_COMPOST | Oui | COMBUSTION + ACT_COMMERCE_IMMEUBLE + TYPE_UU + COMB_SOLIDE_FERME + POELE_A_BOIS + PROPIO_LOCAT + SURFACE + TYPE_LOG + CUISINE_EQUIP_HOTTE + FREQ_AERA_FENET_CUISSON + FREQ_FUM_CIG + ENERGIE_CUISSON | Non | Step 2 : CorrX | Non |
| UTIL_DESODO_AUTRE | Non | | Non | Step 1 : CorrY | Non |
| VENTILATION | Non | FREQ_AERA_VENTIL_CUISSON + FUM_CIG + COMBUSTION + COMB_GAZ_OUVERT + ENERGIE_CUISSON + PERIODE_CONSTRU | Oui | | Oui |

^a **Etape 1** : Corrélation avec la variable dépendante Y (PM_{2,5}) avec un seuil alpha à 20 % ;

^b **Variables à forcer** dans le modèle complet selon la littérature et les avis expert ;

^c Variable sélectionner pour **le modèle complet** avec un seuil alpha à 5 %.

Annexe 5. Etapes de sélection des variables pour la modélisation des concentrations intérieures en PM_{2,5} pondérées à l'échelle du parc national de la France hexagonale

Cette annexe retrace les étapes de sélection des différentes

Exemple d'interprétation (variable **FREQ_CUISSON_VAPEUR**) :

Dans le modèle complexe (= modèle contenant la variable **FREQ_CUISSON_VAPEUR**), la p-valeur associée à son coefficient n'était pas statistiquement significative avec une p-valeur de 0,91 (**ligne 1**: p-valeur > 0,05). Toujours sur la première ligne, l'AIC du modèle complexe (contenant la variable **FREQ_CUISSON_VAPEUR**) s'élève à 769,5 et le coefficient de détermination était de 16 %. Une fois la variable supprimée du modèle complexe (**ligne 2**), l'AIC du modèle simple (=modèle sans la variable d'intérêt) est de 1018,4 et le coefficient de détermination est de 12 %.

| Variables | P-value* | AIC* | R ² ajusté* |
|---------------------------------|----------|--------|------------------------|
| FREQ_CUISSON_VAPEUR | 0,91 | 769,5 | 0,159 |
| TYPE_UU | 0,97 | 1018,4 | 0,118 |
| FREQ_BALAIS | 0,94 | 1008 | 0,133 |
| PRESENCE_BOUCHE | 0,86 | 1001,7 | 0,142 |
| CUISINE_EQUIP_HOTTE | 0,73 | 998,5 | 0,147 |
| MATER_PARPAING | 0,68 | 992,2 | 0,155 |
| AERATION_SEJOUR | 0,62 | 989,8 | 0,159 |
| FREQ_AERA_VENTIL_CUISSON | 0,46 | 986,0 | 0,166 |
| DESODO_AEROSOL | 0,40 | 984,4 | 0,169 |
| BOUGIE_ENCENS | 0,17 | 983,6 | 0,171 |
| TX_PRESENCE | 0,14 | 984,3 | 0,168 |
| FREQ_CUISSON_POELE | 0,12 | 984,9 | 0,169 |
| MATER_BRIQUES | 0,19 | 1110,5 | 0,221 |
| DUREE_PRESENCE | 0,05 | 1210,5 | 0,171 |

* **Valeur avant suppression** de la variable du modèle précédant

Annexe 6. Variation de la déviance pour chaque variable du modèle final des concentrations intérieures en PM_{2,5} pondérées à l'échelle du parc national de la France hexagonale

Exemple d'interprétation :

L'indicateur utilisé ici s'appelle la **déviance** : c'est une mesure de l'écart entre le modèle et les données réelles. **Moins il y a d'écart, mieux le modèle fonctionne.**

Le tableau montre que l'ajout de la variable **FREQ_NETTOY_SURF** (fréquence de nettoyage des surfaces avec un nettoyant chimique de surface) dans le modèle améliore sa précision. Cela signifie que cette variable permet d'expliquer les résultats observés sur les concentrations intérieures en PM_{2,5}.

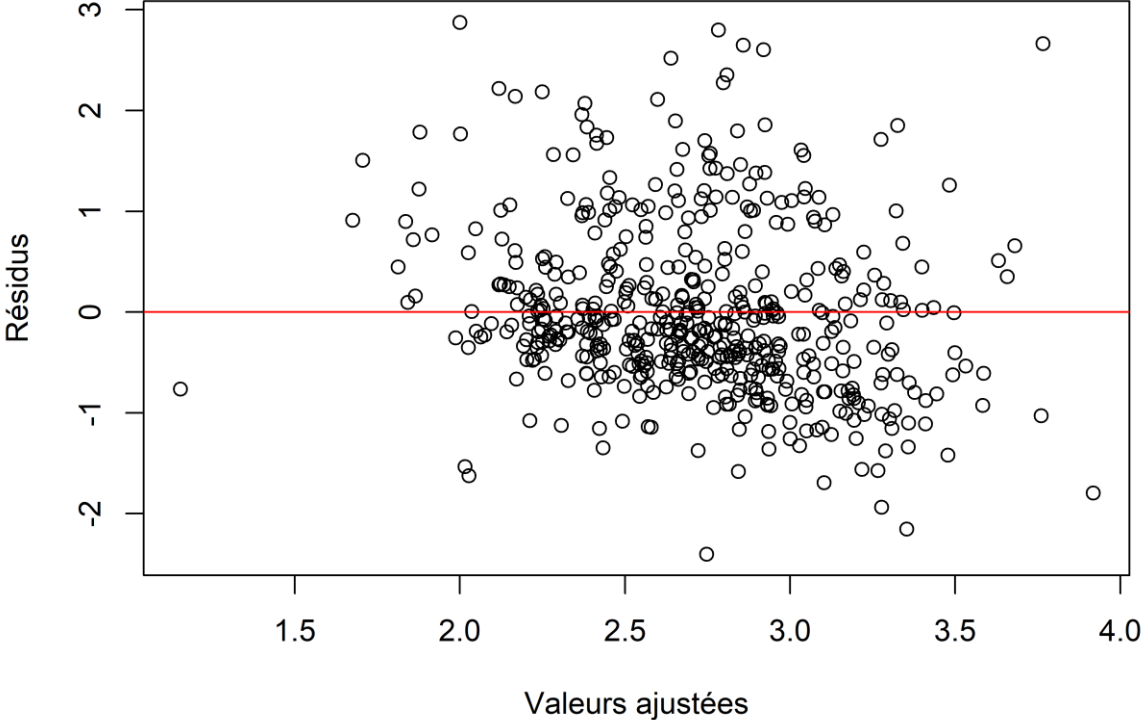
En effet, en ajoutant **FREQ_NETTOY_SURF**, l'écart diminue de **26,76 points**, ce qui est un bon signe.

Attention toutefois : pour être sûr que cette amélioration n'est pas due au hasard, il faut aussi vérifier une autre mesure appelée **p-valeur**. Si elle est faible (généralement inférieure à 0,05), alors on peut considérer que l'amélioration est réellement significative.

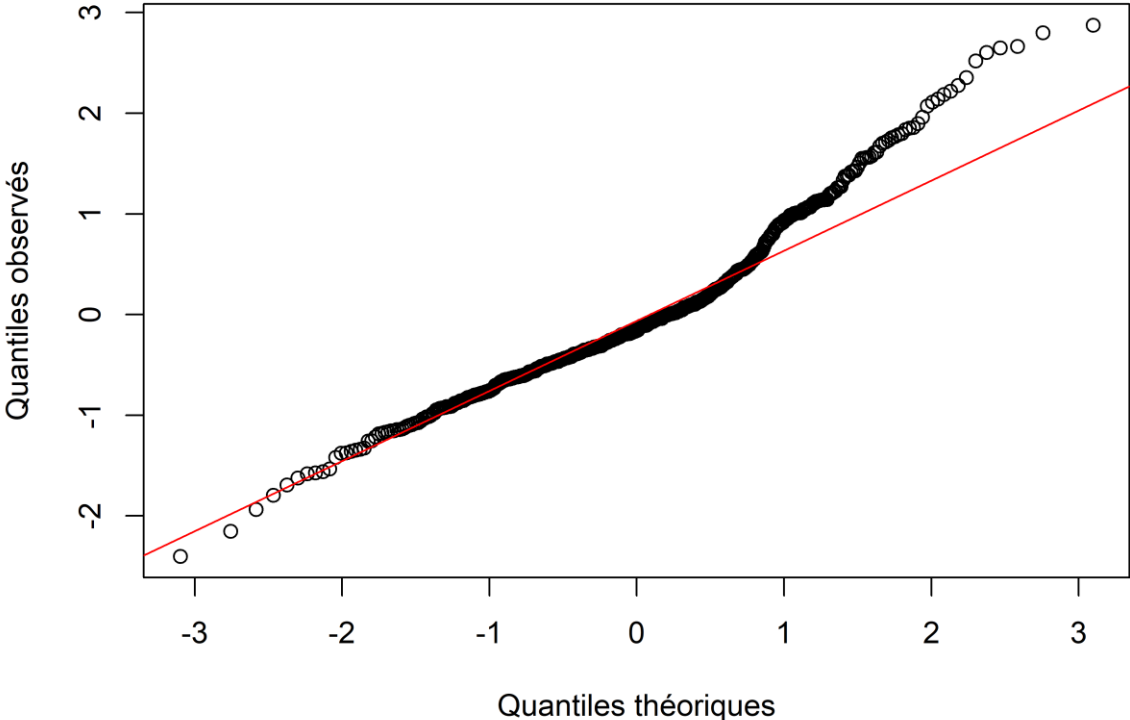
| VARIABLE | Variation de la déviance |
|------------------------------|--------------------------|
| FREQ_NETTOY_SURF | 26,76 |
| CHAUFFAGE | 25,94 |
| VENTILATION | 25,30 |
| TYPE_LOG | 20,71 |
| CONC_EXT_PM25 | 19,34 |
| FREQ_FUM_CIG | 18,44 |
| CHAUFFAGE:VENTILATION | 9,36 |

Annexe 7. Adéquation du modèle avec poids de sondage

Résidus vs valeurs ajustées

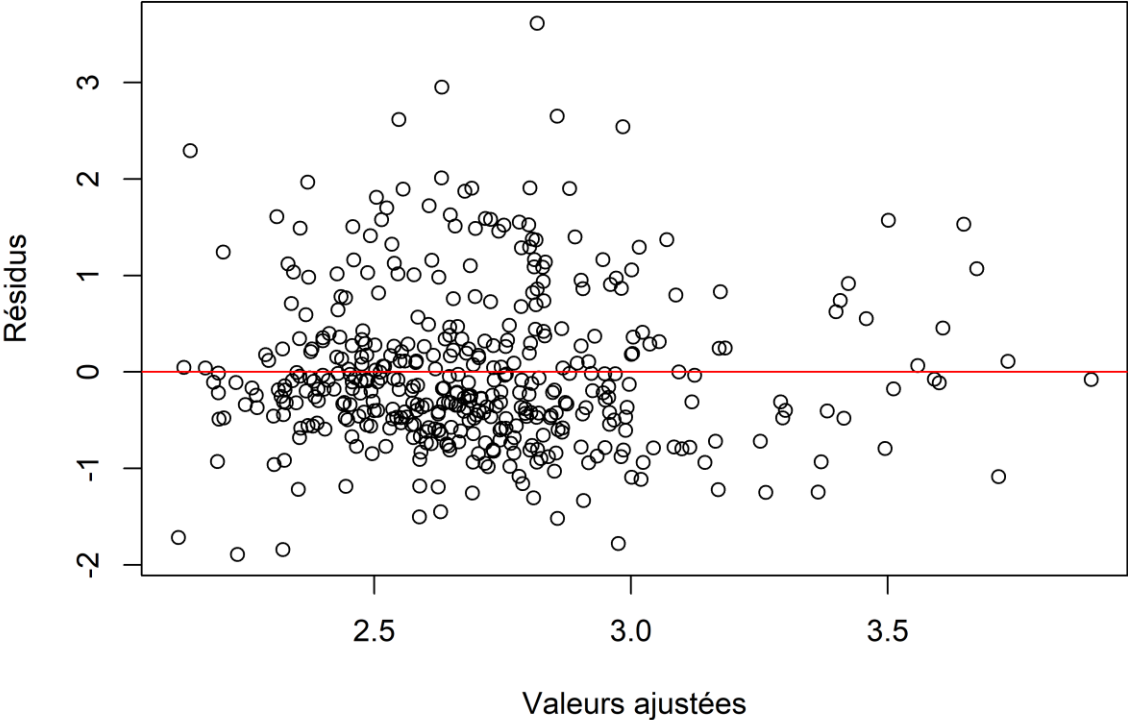


QQ-plot des résidus



Annexe 8. Adéquation du modèle non-pondéré

Résidus vs valeurs ajustées



QQ-plot des résidus

