



Campagne Nationale Logements 2 : Taux de renouvellement d'air dans le parc de logements en France hexagonale

Assy Eliane, Ramalho Olivier, Derbez Mickael, Gauquelin Lisa, Virginie Desvignes

► To cite this version:

Assy Eliane, Ramalho Olivier, Derbez Mickael, Gauquelin Lisa, Virginie Desvignes. Campagne Nationale Logements 2 : Taux de renouvellement d'air dans le parc de logements en France hexagonale. Volet 2, OQEI - Observatoire de la qualité des environnements intérieurs. 2026, pp.137. <hal-05695304>

HAL Id: hal-05695304

<https://hal.science/hal-05695304v1>

Submitted on 16 Jul 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 (2020 – 2023)
Taux de renouvellement d'air
dans le parc de logements en France
hexagonale

RAPPORT FINAL | juin 2026

CSTB-DSAM-IDE-2025-068



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). L'OQEI est financé par les ministères en charges de l'écologie (DGPR – Direction générale de la prévention des risques), du logement (DHUP – Direction de l'habitat, de l'urbanisme et du patrimoine), de la santé (DGS – Direction générale de la santé) et de l'Ademe.

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

Assy Eliane – CSTB, DSAM/QEI-IDE

Ramalho Olivier – CSTB, DSAM/QEI-IDE

Derbez Mickael – CSTB, DSAM/QEI-AQA

Gauquelin Lisa – CSTB, DSAM/QEI-IDE

Relecteurs

Desvignes Virginie – CSTB, DSAM/QEI-IDE

Historique des versions

Version	Date	Modification
1.0	Juin 2026	Création et validation du document

Citation suggérée

Assy Eliane, Ramalho Olivier, Derbez Mickael, Gauquelin Lisa, Desvignes Virginie. 2026. Campagne nationale logements 2 : Taux de renouvellement d'air dans le parc de logements en France hexagonale. Observatoire de la Qualité des Environnements Intérieurs (OQEI). Rapport CSTB-DSAM-IDE-2025-068, version 1.0, juin 2026, 136 p. <https://doi.org/10.82199/oqei-cn12-gc6q-yd59>.

Mots clés

Enquête nationale, ventilation, renouvellement d'air, résidentiel, CNL2

National survey, ventilation, air exchange rate, residential, CNL2

Résumé

La présente étude vient compléter l'état de la ventilation dans les résidences principales de France hexagonale dans le cadre de la deuxième campagne nationale décrivant la qualité de l'air dans les logements (2020-2023). Elle apporte des informations relatives au renouvellement de l'air des logements sous la forme de 4 indicateurs calculés à partir des données de CO_2 , de la production métabolique des occupants et du volume du logement. Il s'agit du débit de renouvellement d'air nocturne (RA_n en m^3/h) et du taux de renouvellement de l'air (en vol/h) déclinés en moyenne hebdomadaire à l'échelle du logement (TRA), en TRA diurne au niveau du séjour principal et en TRA nocturne au niveau de la chambre de la personne de référence. Le renouvellement de l'air du logement prend en compte tous les apports d'air neuf possibles, à savoir la contribution du système de ventilation, l'aération par ouverture de fenêtres et les infiltrations. Ce paramètre définit la ventilation globale du logement quels que soient les moyens mis en œuvre.

Le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n est estimé à près de $18 \text{ m}^3/\text{h}$ en valeur médiane à l'échelle du parc de résidences principales. Il n'a pas évolué depuis la CNL1 (2003 – 2005). De même, le TRA estimé à $0,45 \text{ vol}/\text{h}$ en valeur médiane à l'échelle du parc, n'a pas évolué de manière significative en 15 ans. Le TRA diurne et le TRA nocturne affichent des valeurs médianes plus élevées, respectivement $0,75$ et $0,54 \text{ vol}/\text{h}$. La saison, la période de la journée, la fréquence d'ouverture de fenêtres et le taux de présence dans le logement sont autant de facteurs interdépendants qui influencent le renouvellement de l'air du logement. L'état d'ouverture de la porte entre les pièces joue également un rôle. Le type de système de ventilation n'a que peu d'influence sur le RA_n ou le TRA. La conformité du système en termes de débits d'air extrait n'est pas non plus associée au TRA. Le type de logement, sa date de construction, l'étage ou encore l'utilisation d'une hotte de cuisine raccordée ne montrent pas d'associations statistiquement significatives avec le TRA.

L'absence d'évolution du renouvellement de l'air des logements entre la CNL1 et la CNL2 est un résultat attendu, compte tenu de l'absence d'évolution d'un certain nombre de paramètres. En premier lieu, les débits d'air extraits pour les logements équipés d'un système de ventilation mécanique sont restés similaires, du fait notamment que les dispositions réglementaires relatives à la ventilation des logements n'ont pas changé avec la RT2005 et la RT2012 (mis à part une limitation de la perméabilité à l'air des logements neufs). Le nombre moyen d'occupants et donc la production métabolique moyenne dans le logement n'a pas évolué et se situe autour de 1,4 occupants sur la semaine. La fréquence d'ouverture des fenêtres la nuit n'a pas non plus évolué entre les deux campagnes. Les foyers ouvrant leurs fenêtres plus d'une demi-heure en journée sont un peu plus nombreux. Mais, cette augmentation qui se base déjà sur une proportion élevée de logements ouvrant leurs fenêtres en journée, n'a pas d'incidence sur l'évolution du TRA. Cette absence d'évolution du renouvellement de l'air des logements vient renforcer le fait que la baisse générale des concentrations de polluants mesurés dans l'air des logements est à mettre principalement au crédit des mesures d'interdiction ou de réduction de ces substances à la source, mises en place en particulier par les pouvoirs publics.

La prochaine étape des travaux sera de croiser ces indicateurs avec les concentrations de polluants mesurés dans l'air des logements, de manière à déterminer l'étendue de l'effet du renouvellement de l'air selon les substances. Des pistes d'exploitation complémentaires ou de calcul de nouveaux indicateurs sont également proposés en conclusion.

Abstract

The present study supplements the overview of ventilation in dwellings across mainland France as part of the second national survey on indoor air quality (2020–2023). It provides information on residential air exchange rate through four indicators calculated from CO₂ data, metabolic rate of occupants, and volume of dwelling. These indicators include the nocturnal air renewal flow rate (RA_n , in m³/h) and the air exchange rate (in air changes per hour, ACH), expressed as a weekly average at the dwelling scale (TRA), as well as daytime TRA in the main living room and nighttime TRA in the main bedroom.

The air exchange rate of the dwelling accounts for all possible sources of fresh air supply, including mechanical ventilation systems, window opening, and air infiltration through cracks in the building envelope. It is therefore a parameter that defines the overall ventilation of the dwelling, regardless of the means involved.

The nocturnal air renewal flow rate (RA_n) is estimated at nearly 18 m³/h in median value across the stock of main residences. It has not changed since the first national campaign (CNLI, 2003–2005). Similarly, the TRA, estimated at 0.45 ACH in median value at the housing stock scale, has not evolved significantly over the past 15 years. Daytime and nighttime TRA show higher median values—0.75 and 0.54 ACH, respectively.

Season, time of day, window-opening frequency, and occupancy rate are all interdependent factors that influence the air exchange rate. The opening state of door between rooms also plays a role. The type of ventilation system has little effect on RA_n or TRA. The compliance of the ventilation system based on the exhaust airflow rates is not associated with the TRA. Dwelling type, construction date, floor level, or the use of a vented kitchen hood are also not associated with TRA.

The lack of change of residential air exchange rate in 15 years is an expected result, given that several underlying parameters showed little variation. First, extracted airflow rates in mechanically ventilated homes have remained similar, notably because regulatory provisions on residential ventilation have not changed with RT2005 and RT2012 (except for mandatory limits on airtightness in new buildings). The average number of occupants—and therefore mean metabolic rate—remains unchanged at around 1.4 occupants during the week. The frequency of nighttime window opening has also not changed between the two campaigns. Daytime window opening for more than 30 minutes has increased slightly, but this rise—starting from an already high baseline—has no impact on the evolution of TRA.

The overall stability of residential air exchange rate reinforces the conclusion that the observed general decrease in pollutant concentrations measured indoors is mainly attributable to mandatory bans or reductions of these substances at their source.

The next step will be to compare these indicators with pollutant concentrations measured indoors, in order to determine the extent of the effect of air exchange rate that may also be pollutant dependent. Perspectives on residential air exchange rate exploitation or calculation of new indicators are also proposed.

Table des matières

Résumé.....	4
Abstract.....	6
Table des matières.....	7
Liste des figures	10
Liste des tableaux.....	12
Glossaire et abréviations.....	15
1 Introduction.....	17
1.1 Contexte.....	17
1.2 Objectifs de l'étude sur le renouvellement d'air dans les logements	19
2 La CNL2 en bref	21
3 Méthodes.....	23
3.1 Méthode de mesure du CO ₂ dans les logements.....	23
3.2 Données disponibles	26
3.2.1 Données nécessaires au calcul du TRA	26
3.2.2 Création de nouvelles variables	27
3.3 Méthode de calcul du débit de renouvellement d'air nocturne du logement (RA _n)	31
3.4 Méthode de calcul du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire du logement	34
3.4.1 Méthodologie globale.....	35
3.4.2 Production métabolique de CO ₂	37
3.4.3 Taux de présence individuelle dans le logement.....	39
3.4.4 Volume du logement pris en compte	40
3.4.5 Synthèse des différentes configurations pour le calcul du TRA	42
3.4.6 Incertitudes autour du calcul du TRA	43
3.5 Méthode de calcul du taux de renouvellement d'air moyen nocturne dans la chambre	44
3.6 Méthode de calcul du taux de renouvellement d'air moyen diurne dans le séjour	46
3.7 Méthode de calcul d'un taux de renouvellement d'air « théorique ».....	47
3.8 Récapitulatif des différents indicateurs de renouvellement d'air utilisés	48
3.9 Analyses statistiques des données	50
3.9.1 Codage, saisie, intégration en base et validation des données.....	50
3.9.2 Analyses statistiques des données	50
3.9.3 Effectif et pondération	51
3.10 Comparaison entre CNL1 et CNL2	53
3.11 Revue bibliographique	53
3.11.1 Présentation générale de la méthode de revue bibliographique	53
3.11.2 Sujet de la revue bibliographique.....	54
3.11.3 Paramètres de la revue bibliographique.....	54
3.11.4 Procédure de revue bibliographique.....	55
3.11.5 Mots clés et équations de recherche.....	56
4 Résultats de la revue bibliographique.....	57
4.1 Articles inclus dans la revue bibliographique	57

4.2	Facteurs associés au taux de renouvellement d'air recensés dans la revue bibliographique	58
5	Description du parc de logements et des systèmes de ventilation	60
5.1	Le parc de logements	60
5.2	Les systèmes spécifiques de ventilation	62
5.3	Effectif de pièces avec composants de ventilation	64
5.4	Conformité des débits d'air extrait totaux mesurés à l'échelle du logement	66
5.5	État des ouvrants pendant la semaine d'enquête	69
5.5.1	Ouverture des fenêtres pendant la semaine d'enquête	69
5.5.2	Ouverture et détalonnage de la porte de la chambre selon le système de ventilation	72
5.6	Indicateurs d'occupation sur la semaine à l'échelle du logement	74
6	Débits de renouvellement d'air nocturne RA_n	75
6.1	Concentrations de CO_2 en périodes d'occupation du logement	75
6.2	Débits de renouvellement d'air nocturne	76
6.3	Débit de renouvellement d'air nocturne et type de ventilation	77
6.4	Débit de renouvellement d'air et périodes de chauffe et de hors chauffe	81
6.5	Renouvellement d'air et date de construction des logements	82
6.6	Débit de renouvellement d'air nocturne RA_n en fonction de l'ouverture des fenêtres et des portes en chambre la nuit	85
6.6.1	Fréquence d'ouverture des fenêtres en chambre	85
6.6.2	Ouverture de la porte de la chambre la nuit	86
6.6.3	Combinaison d'ouvertures porte/fenêtre de la chambre la nuit	88
6.7	Synthèse des résultats de débit de renouvellement d'air nocturne RA_n	90
7	Taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA)	92
7.1	TRA dans le parc de logements	92
7.2	TRA et type de ventilation	93
7.3	TRA en fonction de la conformité des débits d'air extrait	95
7.4	Comparaison du TRA avec un TRA théorique	97
7.5	TRA et périodes de chauffe / hors chauffe	98
7.6	TRA et date de construction du logement	99
7.7	TRA et ouverture des fenêtres dans le logement	100
7.8	TRA et type de logement	103
7.9	TRA et étage du logement	104
7.10	TRA et utilisation de la hotte raccordée	105
7.11	TRA et taux de présence dans le logement	106
8	Taux de renouvellement d'air par pièce	108
8.1	Distribution du TRA diurne moyen au niveau du séjour	108
8.2	Distribution des TRA nocturne moyen au niveau de la chambre	110
8.3	Comparaison TRA diurne et TRA nocturne	112
8.4	TRA nocturne moyen en chambre et état de la porte	114
8.5	TRA diurne selon le type de séjour avec ou sans cuisine américaine	115
8.6	TRA nocturne et TRA diurne en fonction de l'ouverture des fenêtres	116

9	Comparaison entre les deux campagnes nationales CNL2 et CNL1.....	119
9.1	Comparaison du débit de renouvellement d'air nocturne entre CNL1 et CNL2	119
9.2	Comparaison du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire entre CNL1 et CNL2 120	
10	Discussion des résultats	122
10.1	TRA et valeurs de référence	122
10.2	Incertitudes méthodologiques	122
10.3	Facteurs associés au TRA.....	124
10.4	Evolution du TRA des logements en 15 ans.....	126
11	Conclusions et perspectives	129
12	Bibliographie	133
13	Annexe : Variables utilisées pour le calcul du taux de renouvellement d'air.....	137

Liste des figures

Figure 1. Les capteurs Class'Air et Cozy'Air déployés dans les logements	23
Figure 2. Intercomparaison de mesure du CO ₂ par 24 capteurs Cozyair et 2 capteurs Class'air étalonnés pris comme références.....	24
Figure 3. Exemples de corrélations des mesures de CO ₂ par capteur Cozyair au regard de l'appareil de référence (Class'Air) durant l'intercomparaison de 2021.....	25
Figure 4. Exemple d'application de la correction des données de CO ₂ d'un capteur Cozyair vis-à-vis de l'appareil de référence (Class'Air étalonné).....	26
Figure 5 : Exemple d'évolution de la concentration en CO ₂ dans la chambre de deux logements différents entre 01h00 et 05h30 du matin	33
Figure 6 : Proportion de volume de logement pris en compte (en jaune) et zone de présence (en strié) considérées selon que la porte de la chambre expérimentée (CHB1) est ouverte (gauche) ou fermée (droite).....	42
Figure 7 – Principales étapes de la recherche bibliographique	54
Figure 8 – Identification du sujet de la revue bibliographique (méthode PICO).....	54
Figure 9 – Identification des paramètres de la revue bibliographique (méthode STARLITE).....	55
Figure 10 – Principales étapes de la méthode PRISMA	55
Figure 11 – Résultat de la procédure de revue bibliographique.....	57
Figure 12. Répartition des logements selon le nombre de pièces principales.....	61
Figure 13. Part des différents systèmes de ventilation dans les logements	63
Figure 14. Évolution de la part de chaque dispositif de ventilation dans les logements selon la date de construction	64
Figure 15. Répartition des pièces avec composants de ventilation selon le type de système du logement.....	65
Figure 16. Débits d'air extraits totaux mesurés à l'échelle du logement par rapport aux valeurs de référence (n = 138 logements).....	67
Figure 17. Ratios des débits d'air extraits totaux mesurés à l'échelle du logement par rapport à la valeur de référence (n = 138 logements).....	68
Figure 18. Fréquence d'ouverture des fenêtres de la chambre et du séjour la nuit et le jour pendant la semaine d'enquête selon la période de chauffe.....	71
Figure 19. – Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RAn.....	76
Figure 20. Distribution pondérée du débit de renouvellement d'air nocturne RAn selon le type de ventilation	78
Figure 21. <i>Distribution pondérée du débit de renouvellement d'air nocturne RAn selon le type de ventilation uniquement en période de chauffe et ayant les fenêtres fermées en chambre la nuit</i>	80
Figure 22. Débits des renouvellements d'air nocturne RAn et en fonction de la situation de chauffe ou d'hors chauffe des logements pendant la semaine d'enquête	82
Figure 23 : Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RAn pour les 4 périodes de construction en lien avec la ventilation des logements	84
Figure 24. Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RAn selon la fréquence d'ouverture des fenêtres en chambre la nuit.....	86
Figure 25 . Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RAn en fonction de l'état de la porte de la chambre la nuit.....	87

Figure 26. Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon les combinaisons d'ouverture de la porte et la fenêtre de la chambre la nuit	89
Figure 27. Densité pondérée du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (volume/h)	93
Figure 28. <i>Distributions observées du taux de renouvellement d'air par type de ventilation</i>	94
Figure 29. Distribution du TRA en fonction de la conformité du débit total d'air extrait dans les logements équipés d'un système de ventilation mécanique (échelle logarithmique)	96
Figure 30. <i>Distribution du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) par période de chauffe/hors-chauffe</i>	99
Figure 31. Distribution du TRA en fonction de la date de construction du logement (échelle logarithmique)	100
Figure 32. Distribution pondérée du TRA selon la fréquence d'ouverture des fenêtres jour et nuit dans le logement (échelle logarithmique)	102
Figure 33. <i>Distribution du TRA par type de logement (échelle logarithmique)</i>	103
Figure 34. Distribution du TRA en fonction de l'étage du logement (échelle logarithmique)	104
Figure 35. Distributions à l'échelle de l'échantillon du TRA en fonction de l'utilisation de la hotte raccordé à l'extérieur (échelle logarithmique)	105
Figure 36. Distribution du TRA en fonction du taux de présence pendant la semaine d'enquête	107
Figure 37. Distribution du TRA diurne moyen dans le séjour	109
Figure 38. Densité de probabilité pondérée du taux de renouvellement d'air diurne moyen hebdomadaire	110
Figure 39. Distribution du TRA nocturne moyen hebdomadaire	111
Figure 40. Densité de probabilité du taux de renouvellement d'air nocturne moyen dans la chambre principale du logement	112
Figure 41. Comparaison du TRA diurne dans le séjour, du TRA moyen hebdomadaire et du TRA nocturne dans la chambre (données extrêmes exclues)	113
Figure 42. TRA nocturne en chambre selon l'état de la porte (échelle logarithmique)	115
Figure 43. Densités pondérées du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (vol/h) pour les campagnes CNL1 et CNL2, pour les logements construits avant 2005.	121

Liste des tableaux

Tableau 1. Éléments d'incertitude de mesure de CO ₂ à l'aide de capteurs Cozyair sur la base d'intercomparaisons menées en cours de campagne (2021) sur 24 capteurs et en fin de campagne (2023) sur 25 capteurs.....	25
Tableau 2. Modalités finales de la variable ouverture_ <i>fenêtres</i> _global.....	30
Tableau 3. Valeurs de BMR de Schofield	38
Tableau 4. Production métabolique individuelle par âge, sexe et niveau d'activité métabolique calculée selon la formule de Persily et De Jonge (2017)	38
Tableau 5. Conditions d'occupation et d'affectation des individus à la chambre la nuit.....	40
Tableau 6. Proportion du volume du logement à prendre en compte selon sa typologie	42
Tableau 7. Conditions pour le calcul du TRA en fonction de la position de la porte de la chambre de référence en période diurne et nocturne	42
Tableau 8 : Tableau récapitulatif des différents indicateurs de renouvellement d'air calculés et utilisés dans le rapport.....	49
Tableau 9. Comparaison des descriptions des pondérations : Échantillon Initial (571 logements) vs. Échantillon Retenu (483 logements)	52
Tableau 10. Liste des 13 articles inclus dans la revue bibliographique	57
Tableau 11. Déterminants du taux de renouvellement de l'air recensés à partir des 13 articles inclus dans la revue bibliographique (fréquence d'occurrence).....	58
Tableau 12. Facteurs déterminants du taux de renouvellement de l'air les plus cités dans les 13 articles inclus dans la revue bibliographique	59
Tableau 13. Proportion des logements par date de construction.....	60
Tableau 14. Distribution de la surface du logement (en m ²) représentée selon le nombre de pièces principales pour les logements collectifs et individuels	61
Tableau 15. Statistiques des débits d'air extraits totaux à l'échelle du logement et du des ratios du débit total mesuré sur le débit total de référence.....	67
Tableau 16. Part de mesures de débits mesurés ne respectant pas les valeurs de référence (logements équipés d'un système de ventilation mécanique hors bouches hygroréglables)	68
Tableau 17. Fréquence d'ouverture des fenêtres pendant la semaine d'enquête des logements (champ : 28 802 380 logements).....	69
Tableau 18. Ouverture de la porte de la chambre principale pendant la semaine d'enquête au regard du type de système de ventilation du logement.....	72
Tableau 19. Détailonnage des portes d'accès à la chambre principale au regard du type de système de ventilation du logement	73
Tableau 20. Indicateurs d'occupation sur la semaine à l'échelle du logement.....	74
Tableau 21. Distributions de la concentration moyenne en CO ₂ en période d'occupation, en toutes périodes et sur la base des 60 plus grandes valeurs entre 01h00 et 05h30 (en ppm).....	75
Tableau 22. Distributions représentées des deux indicateurs de débit de renouvellement d'air nocturne RA _n et RA _{nuît} (m ³ /h)	76
Tableau 23. Distribution du renouvellement d'air nocturne RA _n (m ³ /h) par type de ventilation (hors critère de conformité)	77
Tableau 24. Distribution du renouvellement d'air nocturne RA _n (m ³ /h) par type de ventilation (hors critère de conformité)	78

Tableau 25. Distribution du renouvellement d'air nocturne RA_n (m^3/h) par type de ventilation, pour les logements en période de chauffe pendant la semaine d'enquête et ayant les fenêtres fermées en chambre la nuit	79
Tableau 26. Comparaison des distributions de débit d'air extrait total minimal à l'échelle du logement et du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n	81
Tableau 27 – Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon la date de construction des logements.....	82
Tableau 28 – Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n par période de construction du logement.....	83
Tableau 29. Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon la fréquence d'ouverture de fenêtre en chambres la nuit	85
Tableau 30 – Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon l'état d'ouverture de la porte en chambre la nuit	87
Tableau 31. Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon l'état d'ouverture des portes et fenêtres de la chambre la nuit (champs : 27 720 145 logements).....	89
Tableau 32. Distribution du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) dans le parc de logements en France hexagonale continentale (en volume/h).....	92
Tableau 33. Distributions représentées du TRA en fonction de type de ventilation	93
Tableau 34. Distribution du TRA en fonction de type de ventilation dans le sous-groupe de logements enquêtés en période de chauffe.....	95
Tableau 35. Distribution du TRA en fonction de la conformité des débits d'air extrait dans les logements en ventilation mécanique.....	95
Tableau 36. Comparaison TRA moyen hebdomadaire et du TRA théorique à l'échelle du logement .	98
Tableau 37. Distribution du TRA en fonction de la période de chauffe.....	98
Tableau 38 Distribution du TRA en fonction de la période de construction du logement	99
Tableau 39. Distribution du TRA selon la fréquence d'ouverture de fenêtres dans le logement jour et nuit pendant la semaine d'enquête des logements (toutes saisons confondues).....	101
Tableau 40. Distribution du TRA selon la fréquence d'ouverture de fenêtre dans le logement jour et nuit pendant la semaine d'enquête des logements en fonction de la saison	102
Tableau 41. Distribution du TRA par type de logement.....	103
Tableau 42. Distribution du TRA en fonction de l'étage du logement	104
Tableau 43. Distributions représentées du TRA en fonction de l'utilisation de la hotte raccordé à l'extérieur	106
Tableau 44. Distribution du TRA en fonction du taux de présence dans le logement pendant la semaine	106
Tableau 45. Distribution du TRA diurne moyen au niveau du séjour (volume/h).....	109
Tableau 46. Distribution du taux de renouvellement d'air nocturne moyen au niveau de la chambre principale (volume/h).....	110
Tableau 47. Comparaison des différents indicateurs de TRA (vol/h)	113
Tableau 48. TRA nocturne moyen de la chambre principale en fonction de l'état d'ouverture de la porte	115
Tableau 49. TRA diurne moyen dans les séjours en fonction de la présence d'une cuisine ouverte dans la pièce	116
Tableau 50. Distribution du TRA nocturne selon la fréquence d'ouverture de fenêtre dans la chambre la nuit selon la période de chauffe.....	117

Tableau 51. Distribution du TRA diurne selon la fréquence d'ouverture de fenêtres dans le séjour en journée selon la période de chauffe.....	118
Tableau 52. Comparaison du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n entre les deux campagnes CNL1 et CNL2	119
Tableau 53. Comparaison du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire TRA entre les deux campagnes CNL1 et CNL2.....	120

Glossaire et abréviations

ADEME	Agence de la Transition Écologique
Aération	Action de renouveler l'air d'une pièce ou d'un ensemble de pièces sans utiliser un système spécifique dédié, par exemple en ouvrant une fenêtre.
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, association internationale de professionnels de la ventilation, du chauffage, de la climatisation et du traitement d'air
ASNR	Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection
BMR	Basal Metabolic Rate ou taux métabolique de base en MJ/jour
CHB	Chambre
CNL1	Campagne Nationale Logement 1 (septembre 2003 – décembre 2005)
CNL2	Campagne Nationale Logement 2 (novembre 2020 – février 2023)
CSV	Comma-separated-values
DGPR	Direction générale de la prévention des risques
DGS	Direction générale de la santé
DHUP	Direction de l'habitat, de l'urbanisme et du patrimoine
DJ	Degré jour
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire devenu l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR)
M	Niveau d'activité métabolique (en met)
MA	Moyenne arithmétique
MG	Moyenne géométrique
OQAI	Observatoire de la qualité de l'air intérieur
OQEI	Observatoire de la qualité des environnements intérieurs
P₁₀	10 ^{ème} centile de distribution
PP	Pièce principale
QAI	Qualité de l'Air Intérieur
RA :	Débit de renouvellement d'air exprimé en m ³ par heure. Il représente l'ensemble des débits d'air entrants que ce soit par aération, par ventilation ou par infiltration.
RA_n	Débit de renouvellement d'air nocturne calculé à partir de la moyenne des 60 plus grandes valeurs de CO ₂ entre 01h00 et 05h30 sur l'ensemble de la semaine (en m ³ /h)
RA_{nuir}	Débit de renouvellement d'air nocturne calculé à partir de la moyenne de toutes les valeurs de CO ₂ entre 01h00 et 05h30 sur l'ensemble de la semaine (en m ³ /h)
RE	réglementation environnementale

RT	réglementation thermique
SEJ	Séjour
TRA	Taux de renouvellement de l'air exprimé en volume/heure (ou vol/h) et qui représente le nombre de fois où l'air d'une ou plusieurs pièces est renouvelé par de l'air neuf provenant de l'extérieur en une heure de temps. C'est le rapport entre l'ensemble des débits d'air neuf entrant sur le volume de la ou des pièces considérées. Il intègre l'aération, la ventilation et les infiltrations d'air au travers de l'enveloppe du bâtiment.
Ventilation	Action de renouveler l'air d'une pièce ou d'un ensemble de pièces en utilisant un système spécifique dédié que ce soit un système de ventilation mécanique ou un dispositif de ventilation naturelle (par exemple ventilation par grilles hautes et basses ou ventilation par conduit).
VMC	Système de ventilation mécanique contrôlée qui peut être simple flux (par extraction en général ou plus rarement par insufflation) ou double flux (par insufflation et extraction).
Vnat	Dispositif de ventilation naturelle (par exemple ventilation par grilles hautes et basses ou ventilation par conduit).

1 Introduction

1.1 Contexte

La campagne nationale dans les logements conduite sur la période 2020-2023 (CNL2) par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur devenu l'Observatoire de la qualité des environnements intérieurs (OQEI) a permis la collecte d'un grand nombre d'informations. Les premiers résultats décrits se sont focalisés sur les niveaux de concentration de différentes familles de polluants et leur évolution par rapport à la première campagne nationale menée entre 2003 et 2005 (CNL1) (Ramalho et al., 2025). Dans ce précédent rapport, les éléments relatifs à la ventilation et au taux de renouvellement d'air n'ont pas été développés.

Par ailleurs, une étude plus spécifique à l'état de la ventilation et de l'aération dans les logements issus de la CNL2 a été menée en novembre 2025, dressant un état des lieux des systèmes de ventilation, de leur typologie, de leur fonctionnement et des pratiques d'aération. Ce rapport a permis de caractériser les équipements et dispositifs présents dans les logements et leurs performances (Assy et al., 2026). L'étude n'a toutefois pas abordé une analyse du renouvellement d'air global du logement intégrant ventilation, aération et infiltrations, et comment celui-ci a évolué depuis la CNL1. Le débit de renouvellement d'air (RA) et le taux de renouvellement d'air avaient déjà été déterminés dans le cadre de la CNL1 (Lucas et al., 2009a ; Lucas et al., 2009b ; Langer et al., 2016).

Le présent rapport vient compléter ces travaux en se focalisant sur le taux de renouvellement d'air (TRA), indicateur intégrateur du renouvellement effectif de l'air dans les logements. Le TRA permet de rendre compte conjointement des contributions des systèmes de ventilation, de l'aération par ouverture des fenêtres et des infiltrations d'air à travers l'enveloppe du bâtiment. Il constitue ainsi un indicateur clé pour appréhender le fonctionnement réel de la ventilation et ses conséquences sur la qualité de l'air intérieur.

Un renouvellement d'air suffisant permet de limiter l'accumulation de polluants dans l'air des locaux et limite la concentration des polluants à l'intérieur du logement. Destiné également à éliminer les excès d'humidité générés dans les pièces humides comme les salles de bains ou cuisines, le renouvellement d'air intervient également dans l'hygiène du logement en évitant les phénomènes de condensation et l'apparition de moisissures. Le renouvellement d'air au travers de l'ensemble de ses composantes (aération, ventilation mais également infiltrations parasites au travers de l'enveloppe) est un facteur primordial de la qualité de l'air intérieur et plus largement de la qualité de vie des occupants.

Entre les deux campagnes CNL1 et CNL2, de nombreuses dispositions sont venues affecter la ventilation et même l'aération dans les logements (pour plus de détails, voir la section 1.2 du rapport sur l'état de la qualité de l'air dans les logements, Ramalho et al., 2025). Les plus impactantes sont notamment :

- L'évolution des réglementations thermiques (RT 2005¹, RT 2012²) et le passage à une réglementation énergétique et environnementale (RE 2020³). Cela se traduit à partir de la RT 2012 par une limitation de la perméabilité à l'air des habitations neuves à moins de 0,6 m³/h.m² (maison individuelle) ou moins de 1 m³/h.m² (logement collectif) exprimée sous 4 Pa de différentiel. Par ailleurs, avec la RE 2020, une inspection obligatoire du système de ventilation à réception est maintenant requise dans les bâtiments résidentiels neufs pour vérifier son bon fonctionnement et qui intègre notamment la vérification des débits d'air et/ou pression aux bouches⁴. Les conséquences attendues sur la qualité de l'air intérieur impliquent une contribution plus importante des systèmes de ventilation et de l'aération sur le renouvellement de l'air des logements en limitant les infiltrations. La RE2020 n'a probablement pas impacté la CNL2 vu de la date d'entrée en application au 1^{er} janvier 2022 pour les logements neufs ;
- L'évolution du parc de résidences principales avec 14,5 % de logements construits après 2005 au 1er janvier 2020 d'après le recensement de l'Insee. L'évolution du taux d'équipement en systèmes de ventilation n'est par contre pas disponible depuis les données de l'Insee ;
- Les nombreuses actions de sensibilisation visant notamment à aérer plus fréquemment son logement. Ces actions peuvent avoir contribué à modifier le comportement des occupants dans leur rapport à l'aération du logement ;
- Des guides à l'attention des professionnels du bâtiment ont également été diffusés pour améliorer les conditions de mises en œuvre des équipements de ventilation en particulier (par exemple, le guide DIAGVENT⁵ ou le protocole Promevent⁶) ;
- La survenue d'un épisode pandémique en 2020 qui a modifié la vie quotidienne de la population sur plusieurs mois en termes d'occupation mais également d'aération du logement. Parmi ces changements de pratiques, il est difficile d'établir si elles ont

¹ RT 2005 : Quatrième réglementation thermique du 2 septembre 2006, décret n° 2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions (<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000242000/2021-08-18/>)

² RT 2012 : Décret n° 2010-1269 du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions (<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000022959342>)

³ RE 2020 : Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation (<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043936431>)

⁴ <https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/verification-des-systemes-de-ventilation-a561.html>

⁵ [Guide pratique DIAGVENT – Diagnostic des installations de ventilation dans les bâtiments résidentiels et tertiaires \(2005\)](#)

⁶ [Promevent – Protocole de Diagnostic des installations de ventilation mécanique résidentielles \(2016\)](#)

perduré depuis et si elles ont affecté de manière significative l'aération et la ventilation des logements.

Depuis 2020, l'ADEME, avec l'appui d'Etalab, met à disposition, sur les portails data.ademe.fr et data.gouv.fr, la base⁷ des diagnostics de performance énergétique (DPE) des logements et des bâtiments tertiaires. Ces données permettent de fournir une répartition du type de ventilation dans les logements sur la base de diagnostic de performance énergétique (11 562 718 DPE établis entre le 1^{er} juillet 2021 et le 31 décembre 2024). Le DPE n'étant obligatoire que pour une vente, une location ou à l'achèvement de toute nouvelle construction, la base de données DPE ne couvre pas l'ensemble du parc immobilier et elle n'en est pas représentative.

Par ailleurs, un Observatoire National Ventilation a été créé en 2023⁸, par le ministère en charge de la construction, suite à l'entrée en application de la RE2020 et des exigences mises en place sur la vérification des systèmes de ventilation mécanique contrôlée dans le résidentiel neuf. Il recense l'ensemble des contrôles mis en place dans le cadre de la RE2020, avec plus de 25000 contrôles réalisés à fin août 2025. Il permettra à terme de fournir des statistiques sur le type de système de ventilation mis en place et sur la conformité des points de vérification et de mesure.

Ces bases de données ne fournissent toutefois pas d'éléments concernant les débits ou les taux de renouvellement d'air des logements. Les informations relatives à ces indicateurs en France restent rares.

1.2 Objectifs de l'étude sur le renouvellement d'air dans les logements

Les objectifs de ce volet d'étude de la CNL2 relatif au renouvellement d'air des logements sont les suivants :

- disposer d'un état descriptif le plus complet possible du taux de renouvellement d'air dans les logements en France hexagonale continentale, sur la même base que celui établi pour la CNL1 en 2009 (Lucas et al., 2009b). Les caractéristiques des logements et des ménages connexes à la ventilation et à l'aération sont rappelées dans un premier temps. Le taux renouvellement d'air moyen sur la semaine a été calculé sur la base des données de CO₂ et de l'occupation du logement. Le taux de renouvellement d'air dans les logements enquêtés entre 2020 et 2023 a été comparé à celui établi pour la CNL1.
- De croiser les différents taux de renouvellement d'air calculé (TRA moyen hebdomadaire, TRA moyen chambre nuit, TRA moyen séjour jour) avec les

⁷ <https://observatoire-dpe-audit.ademe.fr/statistiques/outil>

⁸ <https://www.observatoire-national-ventilation.developpement-durable.gouv.fr/>

principaux facteurs influençant leur variation et recensé dans le cadre d'une étude bibliographique.

- De rechercher dans la littérature les facteurs susceptibles d'affecter le taux de renouvellement d'air dans les logements.

Il faut noter que le rôle de la perméabilité à l'air de l'enveloppe des logements n'est pas traité dans la présente étude, même s'il est indirectement intégré au taux de renouvellement d'air global calculé. En effet, les données collectées dans le cadre de la CNL2 ne permettent pas de caractériser avec précision la perméabilité à l'air des logements. Des données sur certaines caractéristiques sont toutefois disponibles comme le matériau constitutif des parois du logement ou de l'immeuble, les travaux portant notamment sur le changement de fenêtres ou d'isolation, l'état des menuiseries et la nature du vitrage.

2 La CNL2 en bref

Un descriptif complet du recrutement des logements et de la mise en œuvre des enquêtes est détaillé dans le rapport Campagne Nationale Logements 2 : État de la qualité de l'air dans les logements en France métropolitaine (novembre 2020 – février 2023), Partie 1 : COV, COSV, NO₂, Particules et Radon (Ramalho et al. 2025). Une brève synthèse est présentée ci-après.

L'échantillonnage des logements enquêtés a été réalisé sur la base des 14 192 participants à l'enquête EHIS au niveau de la France hexagonale en 2019 (Leduc et al. 2019), parmi lesquels 13 474 ont répondu à une question relative à l'autorisation de transmission de leurs coordonnées en vue d'obtenir plus de détails sur la campagne CNL2. Sur cette base et après consolidation, les coordonnées de 3 667 foyers désireux d'en savoir plus ont été communiquées au prestataire en charge du recrutement de la CNL2. Toutes les adresses ont été contactées. Après quelques relances, 750 accords de consentement à participer à la CNL2 ont été reçus. À la fin du terrain de l'enquête, 571 logements ont été enquêtés en deux vagues (de novembre 2020 à décembre 2021 et de janvier 2022 à février 2023) pour un taux de participation de 15,6 %. Un total de 1 516 individus a répondu aux questions de l'enquête.

Les 571 enquêtes réalisées se répartissent dans 321 communes sur les 389 communes des foyers ayant initialement donné leur consentement de participation. La répartition géographique est assez homogène malgré le faible nombre de communes représentées. Une à 32 enquêtes sont réalisées par commune.

Ces éléments permettent de voir que la représentativité temporelle d'une part n'est assurée que sur la période globale de la campagne et qu'il n'est pas conseillé de comparer différentes sous-périodes de la campagne (saisons, mois) entre elles.

D'autre part, la représentativité spatiale visée est celle de la France hexagonale continentale. Le nombre de logements enquêtés ne permet pas d'être représentatif d'un niveau sub-national, comme la région, le département ou la commune.

L'enquête CNL2 peut être résumée de la façon suivante :

- Deux visites à 7 jours d'intervalle par 2 enquêteurs terrain ;
- Instrumentation de 2 pièces du logement : chambre de la personne de référence et séjour, avec également des mesures ponctuelles aux bouches de ventilation des pièces de service et l'instrumentation de l'extérieur du logement ;
- Mise en place de dispositifs de mesure de polluants par diffusion ou en continu sur une semaine en plus de mesures ponctuelles (débits d'air) ;
- Mesure des paramètres de confort dans la chambre principale et le séjour, incluant la concentration en CO₂, la température et l'humidité relative ;
- Mesure des substances prioritaires (issues d'une hiérarchisation OQAI/CNL2) ;
- Mesure de substances pesticides (issues d'une hiérarchisation ANSES/PPV) ;

- Mesure du radon (prise en charge par l'IRSN devenu l'ASNR) et des moisissures (Université de Lille) ;
- Administration de questionnaires en face-à-face avec la personne de référence du ménage, ainsi qu'avec les individus composant le ménage (questionnaires individu) ;
- Distribution des questionnaires individuels auto-administrés (temps passé, semainier activités, semainier des symptômes, questionnaires santé de Santé publique France) ;
- Renseignement du questionnaire enquêteurs avec un descriptif des équipements et matériaux présents dans chaque pièce du logement (maximum de 20 pièces visitées pour un logement donné).

Un redressement en trois étapes, suivi d'un calage sur marge (technique de redressement croisant plusieurs variables aux marges connues dans la population d'étude), a conduit à l'élaboration d'un jeu de pondération qui permet d'exprimer l'ensemble des résultats observés (mesures et réponses aux questionnaires) à l'échelle du parc de 29,7 millions de résidences principales en France hexagonale continentale.

3 Méthodes

3.1 Méthode de mesure du CO₂ dans les logements

Le dioxyde de carbone (CO₂) a été mesuré dans le séjour et la chambre de la personne de référence de chaque logement. Pour la chambre, la mesure a été faite à l'aide du capteur Class'Air (PYRESCOM) permettant l'enregistrement des niveaux de CO₂, température et humidité relative toutes les 10 minutes (un point de mesure toutes les 10 minutes) sur la semaine d'enquête. Pour le séjour principal, le déploiement d'un capteur de qualité de l'air intérieur (Cozy'Air) a permis la mesure parmi d'autres paramètres du CO₂, de la température et de l'humidité relative toutes les 10 minutes (moyenne sur 10 minutes).



Figure 1. Les capteurs Class'Air et Cozy'Air déployés dans les logements

Pour les deux capteurs, la mesure du CO₂ est basée sur la technologie d'absorption dans l'infrarouge non dispersif (NDIR). Les deux capteurs intègrent également une mesure de pression atmosphérique et la valeur compensée en pression est retenue. Les enregistreurs Class'Air ont été systématiquement vérifiés et ajustés avant chaque vague d'enquête (2020/2021 et 2022/2023). Les capteurs Cozy'Air sont étalonnés par le fabricant et ne permettent pas de procéder à un ajustement par l'utilisateur. Seule une correction a posteriori des données est possible après vérification.

L'incertitude sur la mesure du CO₂ annoncée par le fabricant du Class'Air est de $\pm (50 \text{ ppm} + 3 \% \text{ de la valeur lue})$. Les vérifications menées sur 31 capteurs Class'Air ont permis de déterminer une incertitude élargie relative qui ne dépasse pas 18,4 % entre 400 et 2500 ppm de CO₂ (éléments détaillés dans le rapport descriptif de la CNL2 : Ramalho et al., 2025).

Pour le capteur Cozy'air, l'élément NDIR utilisé est le module MH-Z19B (gamme 0 – 5000 ppm, Winsen Ltd). L'incertitude affichée par le fabricant est de $\pm (50 \text{ ppm} + 5 \% \text{ de la valeur lue})$. Le capteur bénéficie d'une auto-calibration continue qui permet de compenser les dérives et d'anticiper les défaillances des micro-capteurs. La méthode appliquée consiste à effectuer un réajustement de la ligne de base des micro-capteurs à partir des données collectées sur une plage glissante de 7 jours.

Des tests d'intercomparaison ont également été réalisés dans un logement en conditions réelles. Le niveau de CO₂ est fluctuant et n'est pas contrôlé, dépendant essentiellement de la présence des occupants et leur production métabolique. Les instruments à comparer sont placés proches les uns des autres dans cet environnement avec comme contrainte la

nécessité d'alimenter simultanément en électricité 20 à 30 instruments. Deux tests d'intercomparaison ont été réalisés : le premier en cours de campagne fin 2021 avec 24 capteurs Cozyair et le second en fin de campagne courant 2023 avec 25 capteurs. Dans les deux cas, l'appareil de mesure de référence utilisé était un enregistreur Class'Air vérifié et étalonné juste avant l'intercomparaison. Les capteurs ont été disposés dans le séjour du logement sur une durée de 3,6 jours en 2021 et sur 8 jours en 2023.

La **Figure 2** illustre le résultat obtenu lors de la première intercomparaison menée fin 2021. La plage de concentration de CO₂ lors de cette intercomparaison a varié de 560 à 1240 ppm, avec une moyenne de 752 ppm. Le coefficient de détermination (R^2) d'adéquation de mesure des capteurs avec l'appareil de référence était en moyenne de 0,94 (0,80 à 0,98). La pente de réponse des capteurs était en moyenne de 1,00 (0,64 à 1,15) (**Figure 3**).

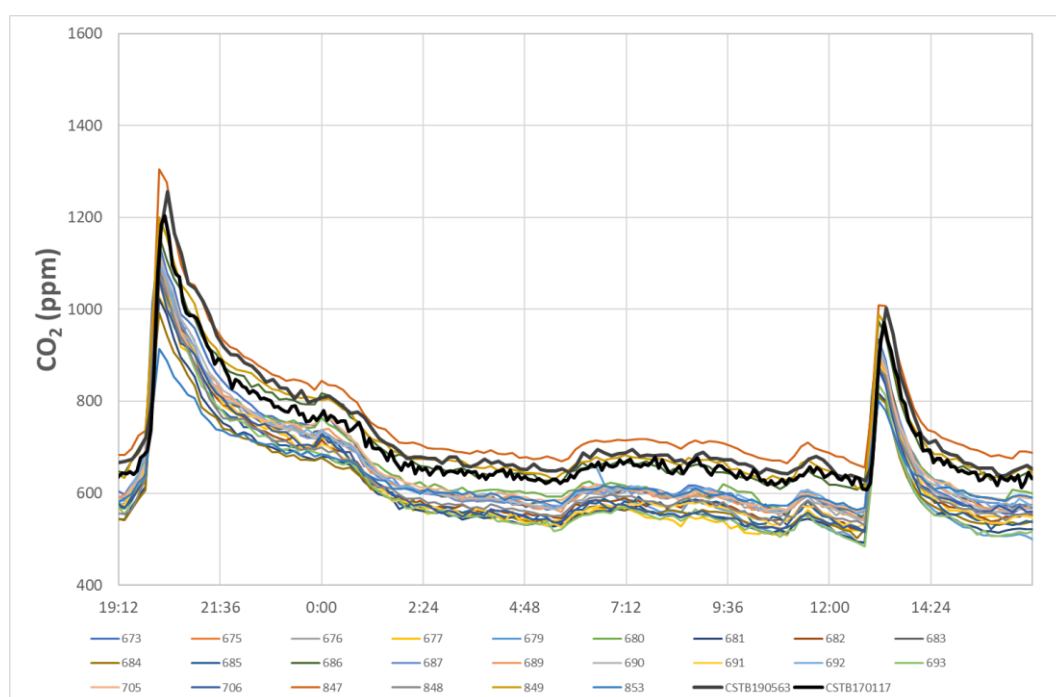


Figure 2. Intercomparaison de mesure du CO₂ par 24 capteurs Cozyair et 2 capteurs Class'air étalonnés pris comme références

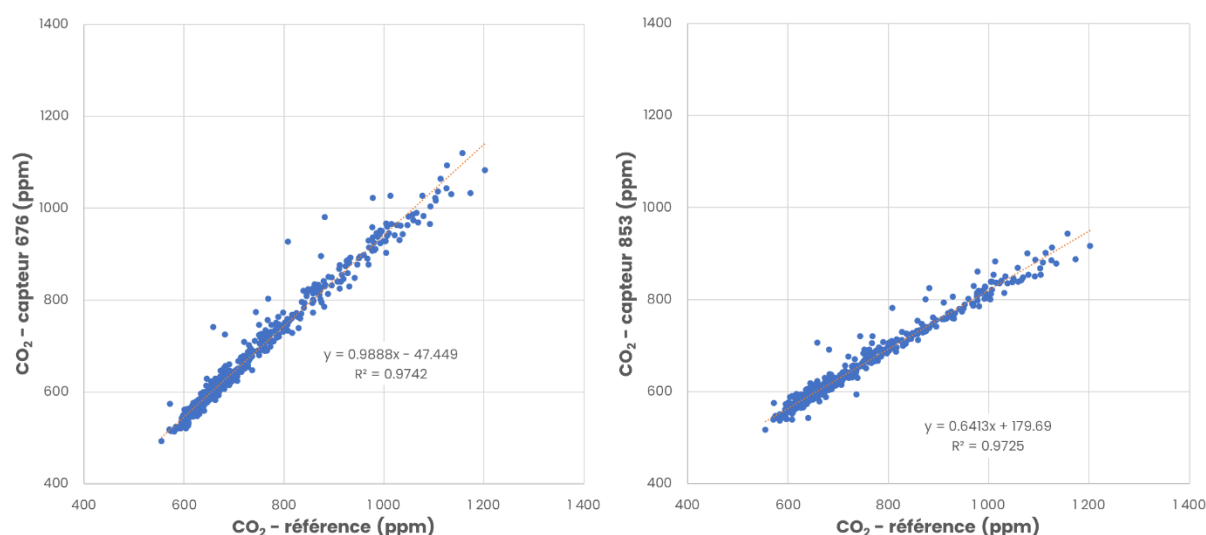


Figure 3. Exemples de corrélations des mesures de CO₂ par capteur Cozyair au regard de l'appareil de référence (Class'Air) durant l'intercomparaison de 2021

Pour l'intercomparaison réalisée en fin de campagne courant 2023, la plage de concentration de CO₂ s'étendait de 430 à 1092 ppm, avec une moyenne de 633 ppm. Le coefficient de détermination (R^2) d'adéquation de mesure des capteurs avec l'appareil de référence était en moyenne de 0,80 (0,60 à 0,90). La pente de réponse des capteurs était en moyenne de 0,93 (0,63 à 1,07).

À partir des données d'intercomparaison, des éléments d'incertitudes ont pu être établis sur la base de la concentration moyenne de CO₂ observée sur la période (**Tableau 1**). Par rapport à la valeur de référence, les capteurs Cozyair ont en général sous-estimé la concentration moyenne de CO₂ avec une erreur de justesse relative (ou écart moyen relatif) de -12 % en 2021 et -6 % en 2023. La dispersion entre les capteurs, exprimée au travers du coefficient de variation était au maximum de 8 %. Sur cette base, l'incertitude élargie ($k = 2$) relative était respectivement de 31,8 % en 2021 et de 21,4 % en 2023.

Tableau 1. Éléments d'incertitude de mesure de CO₂ à l'aide de capteurs Cozyair sur la base d'intercomparaisons menées en cours de campagne (2021) sur 24 capteurs et en fin de campagne (2023) sur 25 capteurs

Intercomparaison	Référence CO ₂ (ppm)*	MA ± ET	Erreur de justesse (%)	CV%	Incertaince élargie (ppm)**	Incertaince relative (%)
2021 (3,6 jours)	752 ± 13	660 ± 44	-12,1%	6,7%	± 210	± 31,8 %
2023 (8 jours)	633 ± 6	592 ± 48	-6,4%	8,0%	± 127	± 21,4 %

*Moyenne arithmétique et intervalle de confiance de la moyenne ; **Incertaince élargie avec $k = 2$; MA : moyenne arithmétique ; ET : écart-type ; CV : coefficient de variation.

Au vu des écarts observés, une correction des données de CO₂ des capteurs a été appliquée à partir de la droite de corrélation observée : $[CO_2]_{\text{capteur}} = A [CO_2]_{\text{référence}} + B$. La correction appliquée s'exprimait donc sous la forme $[CO_2]_{\text{corrigé}} = 1/A \times ([CO_2]_{\text{capteur}} - B)$ et était spécifique à chaque capteur. Ce facteur de correction a été appliquée rétrospectivement

après l'intercomparaison de 2021 sur toutes les mesures réalisées par les capteurs Cozyair dans les logements de novembre 2020 à fin 2021. À la suite de l'intercomparaison menée en fin de campagne, un autre facteur de correction a été déterminé pour chaque capteur et appliqué rétrospectivement sur les mesures réalisées de janvier 2022 à février 2023.

Un exemple d'application du facteur de correction est représenté à la **Figure 4**.

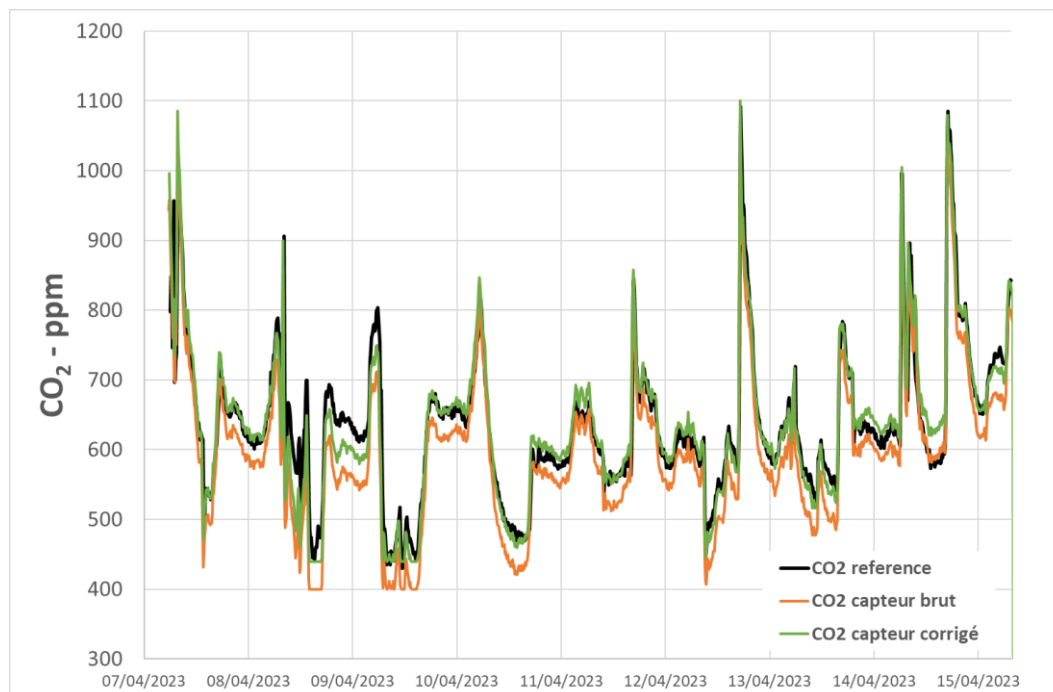


Figure 4. Exemple d'application de la correction des données de CO₂ d'un capteur Cozyair vis-à-vis de l'appareil de référence (Class'Air étalonné).

3.2 Données disponibles

3.2.1 Données nécessaires au calcul du TRA

Les données utilisées pour déterminer le taux de renouvellement d'air dans les logements en France hexagonale continentale comportent à la fois des données mesurées (concentration en CO₂ dans la chambre principale et dans le séjour) et des variables renseignées par questionnaire (nombre, âge et sexe des occupants, présence de chaque individu dans le logement sur la semaine toutes les 30 min, surface et hauteur de la chambre principale, du séjour et du logement, état d'ouverture de la porte de la chambre sur la semaine, nombre de niveaux du logement). Des informations annexes mais néanmoins importantes ont également été nécessaires pour décrire le TRA comme le type de logement (individuel/collectif), le type de système de ventilation, le nombre de pièces principales, le nombre de pièces de service la date de construction, la composition du ménage, etc.

3.2.2 Création de nouvelles variables

Dans le cadre de ce rapport, la création de certaines variables ou un regroupement de modalités s'est avérée nécessaire à la réalisation des calculs.

3.2.2.1 Âge et sexe des individus

Lorsque l'âge des individus était fourni sous forme de groupe d'âge (par exemple, 5-9 ans), un âge moyen a été attribué pour les calculs. Dans cet exemple précis, l'âge moyen attribué serait de 7 ans.

Lorsque le sexe est indéterminé, nous supposons qu'il s'agit d'un homme, afin de prendre en compte le scénario avec la plus forte production métabolique de CO₂, puisqu'un homme produit en moyenne plus de CO₂ qu'une femme. De même, pour l'âge, si celui d'un enfant de moins de 15 ans est indéterminé, nous supposons qu'il a 14 ans, et pour un adulte, nous supposons 29 ans. Ces choix visent à représenter le scénario avec la plus forte production de CO₂ possible. Ce qui a pour conséquence de surestimer le taux de renouvellement d'air dans ces situations.

3.2.2.2 Données d'occupation

Le temps passé à l'intérieur des logements est étudié selon deux niveaux d'analyse : à l'échelle de l'individu et à l'échelle du logement. À l'échelle de l'individu, chaque budget espace-temps est associé à un occupant spécifique du logement ; à l'échelle du logement, la distribution du temps passé est déterminée en tenant compte de la présence d'au moins un occupant sur une échelle temporelle définie.

Sur la base des données d'occupation, différents indicateurs ont été calculés à l'échelle de la semaine pour chacune des enquêtes. Les données manquantes ne sont pas imputées, mais elles ne sont pas comptées dans les statistiques. Les quatre indicateurs calculés sont les suivants :

- le **nombre moyen d'occupants présents dans le logement au cours de la semaine**. Il est calculé comme étant la moyenne du nombre d'occupants présents à chaque pas de temps sur la semaine ;
- le **taux moyen d'occupation sur la semaine** qui correspond à la moyenne du rapport du nombre d'occupants présents rapporté au nombre total d'occupants ayant répondu à chaque pas de temps. Un taux moyen d'occupation de 50 % peut ainsi se lire de différentes façons par exemple par la présence de seulement la moitié des occupants dans le logement sur l'ensemble de la semaine ou bien par la présence de la totalité des occupants sur la moitié de la semaine, ou toute autre combinaison de nombre d'occupants et de fréquence de présence ;
- le **taux de présence sur la semaine** correspond au cumul des périodes pour lesquels 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 ;

- La **durée journalière moyenne de présence d'au moins un occupant dans le logement**. Il correspond au nombre de pas de temps cumulé où la présence d'au moins un individu du foyer est signalé, rapporté au nombre de pas de temps renseigné et multiplié par 24 heures.

L'ensemble de ces indicateurs se base sur la seule indication de l'occupation. L'absence de déclaration d'occupation équivaut à une inoccupation de fait. Mais cette dernière est entachée d'incertitude entre la distinction d'une inoccupation réelle d'une non-réponse, et ce plus particulièrement en début et fin de semaine. De ce fait, il est nécessaire de considérer les données d'occupation comme portant sur l'occupation déclarée qui peut sous-estimer l'occupation réelle (mais pas la surestimer).

L'ensemble des résultats a été pondéré afin de garantir la représentativité au niveau du parc des résidences principales en France hexagonale.

3.2.2.3 Volume et type du logement

Il a été calculé en utilisant la surface totale du logement et la hauteur moyenne des pièces enquêtées (chambre et séjour). Pour les logements comprenant plusieurs étages, le volume de chaque étage a été estimé en divisant le volume total du logement par le nombre d'étages. Concernant le type de logement, la modalité "logement dans un immeuble à usage professionnel" a été considérée comme un appartement dans un immeuble collectif pour les besoins des calculs.

3.2.2.4 Période de chauffe

À partir des données des températures extérieures, le nombre de degrés-jours sur la semaine d'enquête a été calculé. Il s'agit d'une mesure du besoin de chauffage sur une période donnée. Il est calculé par rapport à un seuil de référence de 17 °C (SDES 2025). Cette variable est utilisée pour la détermination de la période de chauffe calendaire. Le nombre de degrés-jour est calculé en comparant chaque jour la moyenne entre la température minimale et maximale et le seuil de référence de 17 °C. Si cette valeur moyenne est supérieure ou égale à 17 °C, le nombre de degrés-jours sur la journée est nul. Sinon, il est égal à la différence entre 17 °C et la température moyenne.

La période de chauffe est définie comme suit en fonction des degrés-jours (DJ) :

- Si $DJ > 0$ au moins 2 jours de la semaine alors l'enquête est en période de chauffe ;
- Sinon l'enquête est hors période de chauffe.

Le choix du seuil de 2 jours résulte d'un compromis permettant de conserver dans l'échantillon d'étude un maximum de logements investigués en période de chauffe, tout en

vérifiant que les températures extérieures étaient faibles ($< 17^{\circ}\text{C}$) sur plusieurs jours durant l'enquête.

3.2.2.5 Variable ouverture globale des fenêtres dans tout le logement pendant la période de mesure

Afin de caractériser la durée d'ouverture des fenêtres à l'échelle globale du logement sur une journée complète, les informations relatives à l'aération diurne et nocturne ont été combinées dans une variable catégorielle synthétique intitulée *ouverture_fenêtres_global*. Cette variable vise à représenter **une fréquence d'aération globale du logement sur 24 heures**, en intégrant les pratiques déclarées en journée et la nuit.

La variable *ouverture_fenêtres_global* est construite à partir des réponses aux questions portant sur la durée quotidienne d'ouverture des fenêtres à l'échelle du logement :

- en période diurne (*OFLJOUR*) ;
- en période nocturne (*OFLNUIT*).

Ces deux variables étant renseignées sous forme de catégories ordinales de fréquence, la méthode retenue repose sur une agrégation qualitative, et non sur une sommation strictement quantitative des temps déclarés.

Le recodage repose sur les principes suivants :

- Lorsque les durées d'ouverture déclarées en journée et la nuit sont identiques et faibles, celles-ci sont considérées comme cumulatives, afin de refléter un temps total quotidien plus élevé. Par exemple, une ouverture inférieure à une demi-heure en journée et inférieure à une demi-heure la nuit conduit à une catégorie globale « Entre une demi-heure et 1 heure ».
- Lorsque les durées diffèrent entre les deux périodes, la catégorie finale est déterminée de manière à représenter le niveau d'aération global le plus pertinent, en privilégiant :
 - soit la catégorie correspondant à la somme qualitative des deux périodes ;
 - soit, lorsque l'une des périodes présente une durée sensiblement plus élevée, la catégorie la plus élevée observée, traduisant le potentiel maximal d'aération sur la journée.

Ainsi, une ouverture courte sur une période et plus longue sur l'autre conduit généralement à une catégorie globale intermédiaire ou élevée, reflétant l'existence d'une aération significative au cours des 24 heures.

Concrètement :

- une absence ou quasi-absence d'ouverture sur les deux périodes conduit à la catégorie « Rarement ou jamais » ;
- une ouverture limitée sur une seule période conduit à la catégorie « Moins d'une demi-heure » ;

- des ouvertures modérées sur l'une ou l'autre période, ou cumulées sur les deux, conduisent à la catégorie « Entre une demi-heure et 1 heure » ;
- toute situation dans laquelle l'ouverture dépasse une heure sur au moins une des deux périodes, ou résulte du cumul de durées intermédiaires, conduit à la catégorie « Plus d'une heure ».

Les situations non renseignées ou incohérentes sont regroupées dans une modalité « NSP ».

La variable *ouverture_fenêtres_global* comporte ainsi quatre modalités ordinales :

1. Rarement ou jamais
2. Moins d'une demi-heure
3. Entre une demi-heure et 1 heure
4. Plus d'une heure

Ce recodage permet de disposer d'un indicateur synthétique de l'aération par ouverture des fenêtres à l'échelle journalière, intégrant les pratiques diurnes et nocturnes, et facilitant l'analyse statistique de son lien avec les indicateurs de renouvellement d'air et de qualité de l'air intérieur.

Tableau 2. Modalités finales de la variable *ouverture_fenêtres_global*

Ouverture des fenêtres en journée (OFLJOUR)	Ouverture des fenêtres la nuit (OFLNUIT)	Catégorie finale <i>ouverture_fenêtres_global</i>
Rarement ou jamais	Rarement ou jamais	Rarement ou jamais
Rarement ou jamais	Moins d'une demi-heure	Moins d'une demi-heure
Rarement ou jamais	Entre une demi-heure et 1 heure	Entre une demi-heure et 1 heure
Rarement ou jamais	Plus d'une heure	Plus d'une heure
Moins d'une demi-heure	Rarement ou jamais	Moins d'une demi-heure
Moins d'une demi-heure	Moins d'une demi-heure	Entre une demi-heure et 1 heure
Moins d'une demi-heure	Entre une demi-heure et 1 heure	Entre une demi-heure et 1 heure
Moins d'une demi-heure	Plus d'une heure	Plus d'une heure
Entre une demi-heure et 1 heure	Rarement ou jamais	Entre une demi-heure et 1 heure
Entre une demi-heure et 1 heure	Moins d'une demi-heure	Entre une demi-heure et 1 heure
Entre une demi-heure et 1 heure	Entre une demi-heure et 1 heure	Plus d'une heure
Entre une demi-heure et 1 heure	Plus d'une heure	Plus d'une heure

Ouverture des fenêtres en journée (OFLJOUR)	Ouverture des fenêtres la nuit (OFLNUIT)	Catégorie finale <i>ouverture_fenêtres_global</i>
Plus d'une heure	Rarement ou jamais	Plus d'une heure
Plus d'une heure	Moins d'une demi-heure	Plus d'une heure
Plus d'une heure	Entre une demi-heure et 1 heure	Plus d'une heure
Plus d'une heure	Plus d'une heure	Plus d'une heure
Donnée manquante ou incohérente	Donnée manquante ou incohérente	NSP

3.3 Méthode de calcul du débit de renouvellement d'air nocturne du logement (RA_n)

Le débit de renouvellement d'air nocturne dans la chambre de la personne de référence a été utilisé comme indicateur pour aider à apprécier les conditions de renouvellement d'air de la pièce de sommeil dans le cadre de la CNL1 (Lucas et al., 2009a). Le calcul de ce débit repose sur l'équation de bilan de masse de la concentration en CO_2 en régime établi qui dépend de la production de CO_2 d'origine essentiellement métabolique dans le logement et du renouvellement de l'air (Persily, 2016 ; Langer et al., 2016). La production métabolique de CO_2 dépend de son niveau d'activité (sommeil la nuit) et de surface corporelle qui varie avec l'âge et le sexe de chaque individu. Ces notions sont abordées plus en détail au niveau de la section 3.4.2.

Pour la CNL2, cet indicateur a été adapté en tenant compte du fait que des mesures de CO_2 dans le séjour principal étaient disponibles. De ce fait, le calcul du débit de renouvellement d'air nocturne a été étendu au logement en considérant également les niveaux de CO_2 mesurés dans le séjour lorsque la porte de la chambre était ouverte (information disponible à l'échelle de la semaine dans le questionnaire) et que la chambre et le séjour se trouvaient au même niveau.

Pour autant, deux points de mesure du CO_2 au niveau des pièces principales peuvent ne pas complètement représenter la moyenne de la concentration en CO_2 dans l'ensemble du volume habitable du logement. Les apports et les flux d'airs provenant d'autres pièces peuvent ne pas être pris en compte. De ce fait, le débit de renouvellement d'air calculé ici représente un débit de renouvellement d'air nocturne équivalent, qui prend en compte un apport d'air neuf d'origine extérieure et un apport par de l'air provenant des autres zones du logement moins chargées en CO_2 (phénomène de dilution).

Le débit de renouvellement d'air nocturne du logement RA_n est déterminé sur la base du bilan de conservation de masse au niveau d'un volume homogène monozone, en fonction de la concentration intérieure et extérieure en CO_2 et de la production métabolique :

$$\frac{dC_i}{dt} = P + \lambda(C_e - C_i)$$

Avec :

C_i : concentration de CO₂ à l'intérieur (ppm) ;

C_e : concentration de CO₂ à l'extérieur (ppm) ;

P : production métabolique de CO₂ (en ppm/h) ;

λ : taux de renouvellement d'air (h⁻¹)

Sur la base de cette équation, il est possible d'exprimer le taux de renouvellement moyen de la façon suivante :

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{P}}{(\bar{C}_i - \bar{C}_e)} - \left(\frac{1}{t_F - t_I} \right) \left(\frac{C_{iF} - C_{iI}}{\bar{C}_i - \bar{C}_e} \right)$$

Avec :

$\bar{C}_i$: concentration moyenne de CO₂ à l'intérieur entre t_F et t_I (ppm) ;

$\bar{C}_e$: concentration moyenne de CO₂ à l'extérieur entre t_F et t_I (ppm), supposée constante sur la période ;

$\bar{P}$: production métabolique moyenne de CO₂ entre t_F et t_I (en ppm/h) ;

$\bar{\lambda}$: taux de renouvellement d'air moyen entre t_F et t_I (h⁻¹) ;

t_F : temps correspondant à la période finale d'intégration (h) ;

t_I : temps correspondant à la période initiale d'intégration (h) ;

C_{iF} : Concentration finale de de CO₂ à l'intérieur au temp t_F (ppm) ;

C_{iI} : Concentration initiale de de CO₂ à l'intérieur au temp t_I (ppm) ;

En régime établi ($\frac{dC_i}{dt} = 0$), ou bien en intégrant sur une durée suffisamment longue (dans le cas du TRA moyen), il est possible de négliger les deux derniers termes de l'équation (en grisé) pour ramener l'équation à une formulation simplifiée :

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{P}}{(\bar{C}_i - \bar{C}_e)}$$

La Figure 5 donne un exemple de l'évolution nocturne de la concentration en CO₂ dans la chambre de deux logements sur une nuit particulière. La période de 01h00 à 05h30 du matin correspond à une variation plus faible de la concentration en CO₂ qui peut se rapprocher des conditions d'un régime établi.

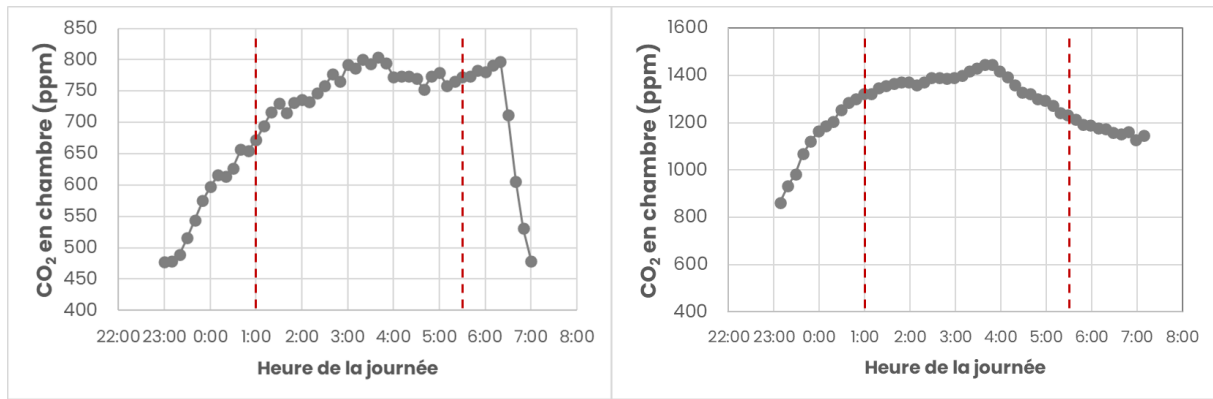


Figure 5 : Exemple d'évolution de la concentration en CO₂ dans la chambre de deux logements différents entre 01h00 et 05h30 du matin

Sur cette base, il est possible de calculer le débit de renouvellement d'air nocturne du logement RA_n (en m³/h) comme suit en exprimant la production métabolique en m³ de CO₂ par heure :

$$RA_n = \frac{Production_{vol}}{(C_{int}^n - C_{ext}) \times 10^{-6}} = \frac{\sum_{\text{individus du ménage}} production\ CO_2(\text{âge, sexe}) \times présence_{individu}}{(C_{int}^n - C_{ext}) \times 10^{-6}} \quad (3)$$

Avec

RA_n : Débit de renouvellement d'air nocturne sur la semaine (m³/h) ;

C_{int}^j : concentration de CO₂ moyenne sur les 60 plus grandes valeurs en période nocturne (entre 01h00 et 05h30) sur l'ensemble de la semaine en ppm ;

C_{ext} : concentration extérieure moyenne de CO₂ en prenant par défaut la concentration intérieure minimale sur la semaine (minimum observé entre les mesures dans le séjour ou dans la chambre ou 400 ppm si le minimum observé est supérieur à 500 ppm) en ppm ;

$Production_{vol}$: Production métabolique totale sur la période nocturne (m³ de CO₂/h) ;

$production\ CO_2(\text{âge, sexe})$: Production métabolique individuelle en activité de sommeil (m³ de CO₂/h) ;

$présence_{individu}$: taux de présence de chaque individu dans la chambre de la personne de référence (ou dans le logement si la porte de la chambre est ouverte) sur la période (variable entre 0 toujours absent à 1 toujours présent).

La concentration intérieure moyenne de CO₂ (C_{int}^j) prend en compte les mesures réalisées dans la chambre lorsque la porte de celle-ci est déclarée fermée la nuit. L'hypothèse de volume homogène monozone derrière l'application de l'équation se limite au seul volume de la chambre. Si la porte est ouverte, les mesures de CO₂ réalisées dans la chambre et dans le séjour sont considérées au vu des échanges de masse d'air rapides qui peuvent

s'établir au travers d'une porte ouverte. Dans ce cas, la chambre et les autres pièces du logement sont considérées appartenir au même volume homogène.

Le choix des 60 plus grandes valeurs de CO₂ correspond au fait de sélectionner les valeurs de fin de nuit, période où l'instauration d'un régime établi est le plus probable, même sans être forcément atteint. La prise en compte de 60 valeurs permet également de lisser la contribution de chaque nuit de la semaine. Par ailleurs, en fin de nuit, la température extérieure est souvent la plus basse. Ce qui a pour conséquence d'augmenter l'effet de tirage thermique⁹ avec une possible hausse des flux d'air entrant par infiltration et donc accessoirement du débit de renouvellement d'air.

Le taux de présence de chaque individu dans la chambre ou le logement (selon l'état d'ouverture de la porte de la chambre) est établi à partir du semainier d'occupation renseigné toutes les 30 min sur la semaine d'enquête. La présence dans le logement sur la période comprise entre 01h00 et 05h30 est assimilée à une occupation des chambres du logement. La présence dans la chambre de la personne de référence (chambre instrumentée) est déclinée selon le nombre de personnes déclarés avoir dormi de manière régulière dans la pièce, la structure du ménage et des liens des individus entre eux (voir section 3.4.3).

La présence individuelle dans la chambre (ou le logement) est calculée en comptant le nombre de pas de temps où la personne est présente dans ce volume sur la période nocturne et en le divisant par le nombre de pas de temps que compte cette période (voir équation 4).

$$pré\acute{e}sence_{individu} = \frac{\text{Nombre de pas de temps ou l'individu est présent dans la pièce pour la période}}{\text{Nombre de pas de temps de la période}} \quad (4)$$

La production métabolique représente la source majoritaire de CO₂ dans le logement directement liée à la présence des occupants et de leurs activités. L'apport de CO₂ par les processus de combustion est considéré négligeable du fait que les effluents sont en principe évacués à l'extérieur du logement. Par ailleurs, en période nocturne, il est également très probable que les processus de combustion ne soient pas actifs. Le mode de calcul de la production métabolique individuelle est détaillé dans la section 3.4.2.

3.4 Méthode de calcul du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire du logement

Le précédent indicateur (RA_n) reflète le débit de renouvellement d'air sur la seule période nocturne. Pour mieux représenter ce qui se passe sur l'ensemble de la semaine, un autre

⁹ Effet de pression de l'extérieur vers l'intérieur lié à la différence de densité des masses d'air (air froid extérieur plus dense que l'air intérieur plus chaud, en partie basse du bâtiment).

indicateur est proposé, le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA), qui vient intégrer également l'intervention des occupants sur les ouvrants durant la journée.

Le TRA a été calculé sur la base des mesures de dioxyde de carbone (CO_2) dans la chambre et dans le séjour, 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. C'est plus exactement le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire à l'échelle du logement qui est calculé.

Le TRA représente le débit total d'air neuf entrant ramené au volume du logement, exprimé en volumes par heure. C'est également le nombre de fois où le volume d'air du logement est échangé par de l'air neuf en une heure, même si en pratique cela dépend de l'efficacité du renouvellement d'air. En effet, certaines zones du logement peuvent être moins renouvelées que d'autres selon le cheminement de l'air (par exemples les coins des pièces). Cela dépend également de l'agencement des pièces entre elles au sein du logement.

Le TRA multiplié par la concentration extérieure d'un polluant et le volume du logement représente le flux de polluant entrant dans le logement qui peut également dépendre de l'efficacité de pénétration du polluant, fonction de sa réactivité chimique et de son parcours au sein de l'interface extérieur/bâtiment. C'est un terme source pour un polluant d'origine extérieure.

Le TRA multiplié par la concentration intérieure d'un polluant et le volume du logement représente le flux de polluant sortant vers l'extérieur. C'est un terme puits pour un polluant d'origine intérieure. Le renouvellement d'air représente même le plus souvent le principal puits de polluants par rapport aux dépôts et pertes sur les surfaces intérieures ou encore les réactions chimiques. Les espèces les plus réactives comme l'ozone, le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre ou encore les particules peuvent être plus affectées par des pertes par dépôt sur les surfaces ou par réactions chimiques que par le renouvellement de l'air. Il en est de même pour les composés organiques semi-volatils à faible pression de vapeur qui auront une forte affinité avec les surfaces.

À ce titre, le TRA est un paramètre clé des environnements intérieurs qui intervient dans la variation de la concentration de polluants présents dans l'air. Plus le taux de renouvellement de l'air est élevé, plus l'air intérieur s'homogénéise rapidement avec l'air extérieur avec comme conséquence de ramener la concentration intérieure d'un polluant au niveau de sa concentration extérieure. À l'inverse, un faible taux de renouvellement d'air favorisera l'accumulation des polluants émis par des sources intérieures dans l'air du logement.

3.4.1 Méthodologie globale

Le calcul du TRA moyen hebdomadaire tient compte de deux périodes différentes sur la semaine d'enquête. D'une part, une période exclusivement nocturne couvrant les périodes de 01h00 à 05h30 inclus et d'autre part, une période diurne couvrant la période complémentaire de 05h30 à 01h00 exclus. Dans ce dernier cas, les données de CO_2

mesurées dans le séjour sont prises en compte, ainsi que celles mesurées dans la chambre si la porte est déclarée ouverte.

Pour chacune des périodes, un débit de renouvellement d'air moyen (RA_{nuit} ou RA_{jour}) est calculé sur la base de la somme des productions métaboliques individuelles. Celles-ci prennent en compte l'occupation moyenne de chaque individu dans le logement durant ces périodes, leur âge et sexe ainsi que leur activité (sédentaire le jour et sommeil la nuit). Selon l'état d'ouverture de la porte de la chambre sur la semaine et le positionnement de la chambre au même niveau ou non par rapport au séjour, le volume de logement pris en compte à chaque période peut varier entre le volume de la chambre, une fraction du volume du logement ou la totalité du volume habitable du logement. Dans le cas où le logement compte plusieurs niveaux, seul le niveau de la chambre instrumentée est pris en compte. Si le volume considéré comporte à la fois la chambre de la personne de référence et le séjour principal, le calcul tient compte de la moyenne de la concentration en CO_2 entre les deux pièces, ou de la moyenne de concentration en CO_2 dans la chambre dans le cas contraire. Ces éléments sont détaillés dans les sections suivantes.

La formule du calcul du TRA moyen hebdomadaire est similaire à celle utilisée lors de la première campagne nationale (CNL1). La seule différence tient à la présence de deux enregistreurs de CO_2 dans la chambre et le séjour pour la CNL2 et au recours à des hypothèses de présence des occupants dans la chambre selon la structure du ménage pour la CNL2. En effet, contrairement à la CNL1, l'occupation de chaque individu dans le logement n'a pas été déclinée à l'échelle des pièces.

Le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire est calculé selon l'équation suivante :

$$TRA = \frac{\frac{RA_{\text{nuit}}}{V_{\text{nuit}}} \times 270 + \frac{RA_{\text{jour}}}{V_{\text{jour}}} \times 1170}{270 + 1170} \quad (2)$$

avec

270 : durée de la période nocturne en minutes sur 24 heures (1h00 à 5h30).

1170 : durée de la période diurne en minutes sur 24 heures (complément de 1h00 à 5h30).

V_{nuit} et V_{jour} : volumes considérés pour les mesures de CO_2 en m^3 (voir **Tableau 7**).

RA_{nuit} et RA_{jour} : débit de renouvellement d'air moyen sur la semaine, calculé sur la période nuit et jour respectivement (m^3/h) (voir équation 3).

Le débit de renouvellement d'air RA_j est calculé comme suit :

$$RA_j = \frac{Production_{vol}}{(C_{int}^j - C_{ext}) \times 10^{-6}} = \frac{\sum_{\text{individu du ménage}} production\ CO_2(\text{âge, sexe}) \times presence_{individu}}{(C_{int}^j - C_{ext}) \times 10^{-6}} \quad (3)$$

Avec

RA_j : Débit de renouvellement d'air moyen sur la semaine, calculé sur la période nuit et jour respectivement (m^3/h) ;

C_{int}^j : concentration moyenne de CO_2 sur les périodes nocturnes/diurnes de la semaine (j : nuit ou jour) en ppm ;

C_{ext} : concentration extérieure de CO_2 en prenant par défaut la concentration intérieure minimale sur la semaine (mesures en chambre et en séjour confondues) en ppm ;

$Production_{vol}$: Production métabolique totale sur la période diurne ou nocturne (m^3 de CO_2/h) ;

$production\ CO_2(\text{âge, sexe})$: Production métabolique individuelle en activité de sommeil (m^3 de CO_2/h) ;

$présence_{individu}$: taux de présence de chaque individu dans la chambre de la personne de référence (ou dans le logement si la porte de la chambre est ouverte) sur la période diurne ou nocturne (variable entre 0 toujours absent à 1 toujours présent).

La concentration intérieure en CO_2 n'est pas stationnaire et peut varier fortement, notamment durant la période diurne. Néanmoins, compte tenu d'une durée suffisamment longue des périodes prises en compte sur la semaine, l'équation (3) permet une estimation robuste du débit de renouvellement d'air moyen RA_j sur la semaine, et donc du TRA.

3.4.2 Production métabolique de CO_2

Le calcul de la production de CO_2 métabolique est basé sur la formule proposée par Persily et al. (Persily et de Jonge, 2017). Les auteurs relient la production de CO_2 au taux métabolique de base (BMR : *basal metabolic rate*) et au niveau d'activité métabolique (M en met) de l'individu selon la formule suivante :

$$V_{CO_2} = BMR \times M \times \frac{T}{P} \times 0,000179 \quad (4)$$

avec

V_{CO_2} : production métabolique de CO_2 en L/s ;

BMR (Basal Metabolic Rate) : taux métabolique de base en MJ/jour ;

M : niveau d'activité métabolique, 1 met = 58 W/m². Deux niveaux d'activité métabolique sont considérés : sommeil à 0,7 met et sédentaire à 1,2 met ;

T : température en Kelvin, prise comme valeur constante à 293 K ;

P : pression atmosphérique standard ; prise comme valeur constante à 101 kPa ;

Le taux métabolique de base (BMR) représente le besoin en énergie requis pour maintenir les fonctions essentielles à la vie (maintien de la température corporelle, fonctionnement des cellules, organes, cerveau, des fonctions cardiaques et respiratoire, ...). Il représente typiquement 45 % à 70 % de la dépense énergétique quotidienne. Le BMR est fonction de l'âge, du sexe et des caractéristiques morphologiques de chaque individu. Une estimation

du BMR dépendante uniquement de l'âge, du sexe et de la masse corporelle des individus est fournie par Schofield (1985) (**Tableau 3**).

Tableau 3. Valeurs de BMR de Schofield

Age	BMR (MJ/jour)	
	Hommes	Femmes
< 3	$0,249 m - 0,127$	$0,244 m - 0,130$
3-10	$0,095 m + 2,110$	$0,085 m + 2,033$
10-18	$0,074 m + 2,754$	$0,056 m + 2,898$
18-30	$0,063 m + 2,896$	$0,062 m + 2,036$
30-60	$0,048 m + 3,653$	$0,034 m + 3,538$
>= 60	$0,049 m + 2,459$	$0,038 m + 2,755$

m : masse corporelle en kg

La masse corporelle varie notamment avec le sexe et l'âge de l'individu. Pour la population française, des valeurs médianes de masse corporelle sont disponibles pour les nourrissons de moins d'un an et les mineurs de 1 à 17 ans sur la base des courbes de croissance réalisées en 2018 et figurant sur le carnet de santé (Heude et al. 2019 ; Ministère chargé de la santé¹⁰, s. d.). Pour les adultes âgés de 18 ans et plus, les valeurs de masse corporelle sont issues de l'étude INCA3 (Anses 2017).

Le niveau d'activité métabolique des individus présents dans leur logement est variable selon leurs activités physiques. Par défaut, deux niveaux d'activité métabolique sont retenus :

- Activité sédentaire pendant les périodes d'occupation diurne, correspondant à un niveau d'activité métabolique de 1,2 met ;
- Activité de sommeil pendant les périodes d'occupation nocturne, correspondant à un niveau d'activité métabolique de 0,7 met.

Ces deux activités sont les mêmes que celles utilisées pour la CNLI. Les valeurs de met associées à ces activités sont conservées par souci de comparaison.

La production métabolique de CO₂ pour différents groupes d'âge et de sexe, en fonction de leur activité (sédentaire ou sommeil) sont présentés dans le Tableau 4 :

Tableau 4. Production métabolique individuelle par âge, sexe et niveau d'activité métabolique calculée selon la formule de Persily et De Jonge (2017)

Homme			Femme		
Âge	Sommeil (l/h ; 0,7 met)	Sédentaire (l/h ; 1,2met)	Âge	Sommeil (l/h ; 0,7 met)	Sédentaire (l/h ; 1,2met)
M1	1,2	2,1	M1	1,1	1,9
M2	1,6	2,7	M2	1,4	2,4
M3	2,0	3,3	M3	1,6	2,7
M4	2,0	3,5	M4	1,8	3,1
M5	2,2	3,8	M5	2,1	3,5

¹⁰ https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/pdfcomplet-specimen-carnet_de_sante.pdf

	Homme			Femme	
Âge	Sommeil (l/h ; 0,7 met)	Sédentaire (l/h ; 1,2met)	Âge	Sommeil (l/h ; 0,7 met)	Sédentaire (l/h ; 1,2met)
M6	2,4	4,1	M6	2,1	3,7
M7	2,5	4,4	M7	2,3	4,0
M8	2,6	4,5	M8	2,4	4,1
M9	2,8	4,7	M9	2,5	4,4
M10	2,9	5,0	M10	2,6	4,5
M11	3,0	5,1	M11	2,7	4,6
1	3,1	5,2	1	2,8	4,8
2	3,9	6,6	2	3,6	6,1
3	4,6	7,8	3	4,2	7,2
4	4,8	8,2	4	4,4	7,6
5	5,1	8,8	5	4,7	8,0
6	5,4	9,2	6	5,0	8,6
7	5,7	9,7	7	5,2	8,9
8	6,0	10,3	8	5,6	9,5
9	6,4	10,9	9	5,9	10,1
10	6,9	11,8	10	6,2	10,7
11	7,1	12,2	11	6,4	11,0
12	7,5	12,8	12	6,8	11,7
13	8,0	13,6	13	7,2	12,3
14	8,5	14,6	14	7,5	12,8
15	9,0	15,5	15	7,7	13,2
16	9,4	16,1	16	7,7	13,3
17	9,7	16,6	17	7,9	13,5
18	10,0	17,1	18	7,9	13,6
18-29	10,2	17,5	18-29	8,0	13,7
30-44	9,7	16,7	30-44	7,6	13,0
45-59	9,9	16,9	45-59	7,6	13,1
60-74	8,5	14,5	60-74	7,0	12,0
75+	8,5	14,5	75+	7,0	12,0

M : âge du nourrisson en mois (M1 : 1 mois ; M2 : 2 mois...)

3.4.3 Taux de présence individuelle dans le logement

3.4.3.1 Taux de présence individuelle dans la chambre

La présence de chaque individu dans le logement est disponible au travers du renseignement d'un carnet semainier auto-administré sur la semaine d'enquête. Chaque individu renseigne ainsi toutes les 30 minutes s'il est présent ou non dans le logement.

Par ailleurs, le nombre d'occupants de 15 ans et plus et de moins de 15 ans ayant dormi de manière régulière (au moins 4 jours dans la semaine) dans la chambre ou le séjour est également disponible. Il reste toutefois à affecter les individus concernés à leur présence dans la chambre en période nocturne. L'affectation des adultes à la chambre prend en

compte la structure du ménage. Lorsque le ménage comprend plusieurs mineurs, l'enfant le plus âgé est privilégié pour envisager la plus grande production métabolique.

Les conditions d'occupation de la chambre en période nocturne sont définies au Tableau 5.

Tableau 5. Conditions d'occupation et d'affectation des individus à la chambre la nuit

Nombre d'occupants de 15 ans et plus	Nombre d'occupants de moins de 15 ans	Individu(s) présent(s) dans la chambre
NA	NA	1 individu (lien = 1) + 1 individu (lien = 2)
0	0	1 individu (lien = 1) + 1 individu (lien = 2)
0	1	1 individu < 15 ans le plus âgé
0	2	2 individus < 15 ans les plus âgés
1	0	1 individu (lien = 1)
1	1	1 individu (lien = 1) + 1 individu < 15 ans le plus âgé
1	2	1 individu (lien = 1) + 2 individus < 15 ans les plus âgés
2	0	1 individu (lien = 1) + 1 individu (lien = 2)
2	1	1 individu (lien = 1) + 1 individu (lien = 2) + 1 individu < 15 ans le plus âgé
2	2	1 individu (lien = 1) + 1 individu (lien = 2) + 2 individus < 15 ans les plus âgés

Lien = 1 : personne de référence ; Lien = 2 : conjoint de la personne de référence

Par ailleurs, des ajustements ont été apportés pour prendre en compte la présence éventuelle d'individus non directement rattachés au ménage ou non déclarés comme membres du ménage. Leur présence a été identifiée à travers le nombre de personnes – adultes ou enfants – ayant dormi dans la chambre ou le séjour pendant la période de l'enquête. Cela permet de mieux refléter les conditions réelles d'occupation et, par conséquent, la production volumique de dioxyde de carbone.

Lorsque la porte de la chambre est ouverte, la production métabolique de l'ensemble des individus présents dans le logement est prise en compte, de jour comme de nuit.

3.4.3.2 Taux de présence individuelle dans le reste du logement

L'affectation de chaque individu à une pièce du logement n'est pas connue sauf pour la période nocturne et cela est limité aux pièces instrumentées : chambre principale et séjour. De ce fait, la présence de l'ensemble des individus au sein du logement est prise en compte en journée. Il en est de même la nuit, lorsque la porte de la chambre est déclarée ouverte.

3.4.4 Volume du logement pris en compte

Le volume du logement à considérer dans le calcul du TRA dépend non seulement de l'état de la porte de la chambre le jour et la nuit, mais aussi du nombre de niveaux du logement. La nuit, lorsque la porte de la chambre est fermée, le volume pris en compte est uniquement celui de la chambre.

Lorsque la porte de la chambre est ouverte la nuit, le volume à prendre en compte s'étend au-delà de celui de la chambre en raison de la circulation de l'air entre la chambre et le reste du logement. Dans ce cas, le volume pertinent est une proportion du volume total du logement, notée α , en limitant le cas échéant au seul niveau du logement comprenant la chambre instrumentée (pour des logements sur plusieurs niveaux). Cette proportion α est déterminée en fonction des typologies de logement réalisées par le CSTB (CSTB, 1985), également utilisées pour le calcul du TRA dans la CNLI. Toutefois, la prise en compte des mesures de CO₂ réalisées dans le séjour en plus de celles de la chambre permet de mieux représenter l'ensemble du logement. De ce fait, la proportion α prise en compte est en général supérieure à celle utilisée pour la CNLI (elle correspond à la valeur α_3 de la CNLI).

En journée, lorsque la porte de la chambre est fermée, le volume de la chambre n'est pas pris en compte dans le calcul du volume du logement à considérer. Le volume de logement pertinent à prendre en compte est une proportion du volume total du logement, notée α , en limitant le cas échéant au seul niveau ou à l'étage du logement comprenant la chambre instrumentée. Cette proportion α est déterminée en fonction des typologies de logement réalisées par le CSTB (CSTB, 1985), également utilisées pour le calcul du TRA dans la CNLI (elle correspond à la valeur α_3 de la CNLI).

En journée avec la porte de la chambre ouverte, le volume pris en compte est le même que celui décrit précédemment pour une situation nocturne avec porte ouverte (α fois le volume total du logement, limité au niveau comprenant la chambre principale).

Le **Tableau 6** détaille la valeur de α considérée selon le nombre de pièces principales du niveau de la pièce instrumentée et du type de logement. La Figure 6 permet d'illustrer la proportion de volume de logement pris en compte pour un exemple de configuration de logement.

Pour les logements à plusieurs étages, le volume V est ramené au volume du niveau où se trouve la chambre (calculé comme étant égal à V divisé par le nombre de niveaux). Et le nombre de pièces principales n'est plus le nombre de pièces principales du logement mais celui du niveau où se trouve la chambre de la personne de référence. Cette hypothèse considère que le transport de CO₂ entre les niveaux du logement est faible.

À l'exception du cas où le volume du logement pour la période nocturne (V_{nuit}) est calculé avec la porte de la chambre fermée, auquel cas seul le volume de la chambre est pris en compte, dans toutes les autres situations, un prorata du volume total du logement ou de l'étage est appliqué.

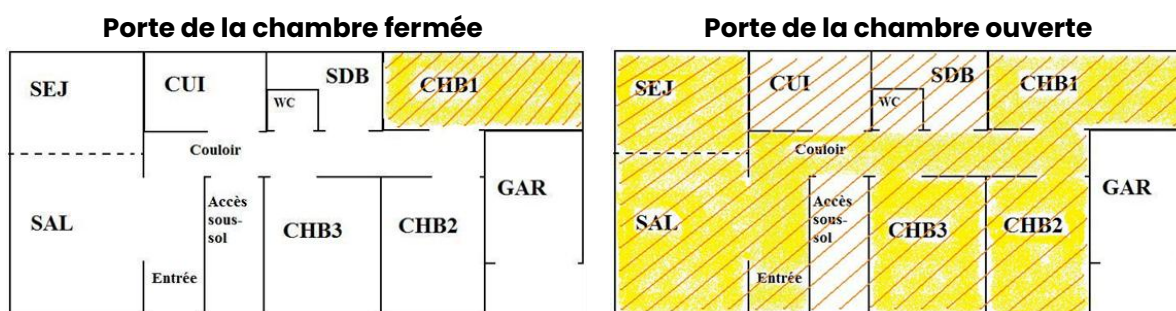


Figure 6 : Proportion de volume de logement pris en compte (en jaune) et zone de présence (en strié) considérées selon que la porte de la chambre expérimentée (CHB1) est ouverte (gauche) ou fermée (droite).

Tableau 6. Proportion du volume du logement à prendre en compte selon sa typologie

Nombre de pièce(s) principale(s) du niveau	Proportion du volume du logement α	
	Maison individuelle	Logement collectif
1	0,66	0,66
2	0,8	0,7
3	0,8	0,75
4	0,8	0,78
5	0,83	0,82
6	0,82	0,82
7	0,82	0,82
8	0,82	0,82
9	0,82	0,82
10	0,82	0,82

3.4.5 Synthèse des différentes configurations pour le calcul du TRA

À partir des différentes hypothèses formulées ci-dessus et des informations sur les caractéristiques des logements, les différents scenarios de calcul du TRA sont présentés au **Tableau 7**.

Tableau 7. Conditions pour le calcul du TRA en fonction de la position de la porte de la chambre de référence en période diurne et nocturne

Condition sur la porte de la chambre jour et nuit	Un seul niveau	CHB/SEJ au même niveau	CHB et SEJ à deux niveaux différents
Jour Ouvert	$\alpha \times$ Volume du logement	$\alpha \times$ Volume de l'étage	
	NPP du logement	NPP à l'étage	
	Production métabolique d'activité sédentaire (1,2 met) de tous les individus présents dans le ménage		
	moyenne CO ₂ (CHB et SEJ)		CO ₂ SEJ

Condition sur la porte de la chambre jour et nuit	Un seul niveau	CHB/SEJ au même niveau	CHB et SEJ à deux niveaux différents
Jour Fermé	$\alpha \times (\text{Volume du logement} - \text{Volume de la chambre})$	$\alpha \times (\text{Volume de l'étage} - \text{Volume de la chambre})$	$\alpha \times \text{Volume de l'étage}$
	NPP du logement	NPP à l'étage	
	Production métabolique d'activité sédentaire (1,2 met) de tous les individus présents dans le ménage		
	CO ₂ SEJ		
Nuit Ouvert	$\alpha \times \text{Volume du logement}$	$\alpha \times \text{Volume de l'étage}$	
	NPP du logement	NPP à l'étage	
	Production métabolique d'activité de sommeil (0,7 met) de tous les individus présents dans le ménage		
	moyenne CO ₂ (CHB et SEJ)		CO ₂ CHB
Nuit Fermé	Volume de la chambre		
	NPP du logement	NPP de l'étage	
	Production métabolique d'activité de sommeil (0,7 met) des individus dormant dans la chambre		
	CO ₂ CHB		

CHB : Chambre instrumentée ; SEJ : séjour principal ; NPP : nombre de pièces principales

3.4.6 Incertitudes autour du calcul du TRA

Le calcul du TRA se base sur de nombreuses hypothèses. L'incertitude qui l'accompagne est encore plus importante que celle associée au débit de renouvellement d'air. Les principaux facteurs qui vont jouer sur l'incertitude du TRA sont :

- Le volume du logement et la proportion α à prendre en compte dans le calcul du TRA, jusqu'à définir si le TRA calculé est représentatif du logement, d'un niveau du logement ou de la chambre seule (dans le cas de la porte fermée la nuit) ;
- L'état de la porte de la chambre ouverte ou fermée, donnée déclarative globale sur la semaine. Cette variable vient définir le volume et le nombre d'individus à prendre en compte ;
- L'adéquation du modèle utilisé, plus approprié à l'établissement d'un régime stationnaire et considérant comme volume monozone homogène le logement dans sa globalité. Le calcul du TRA au travers d'un modèle multizone serait plus approprié mais nécessiterait un grand nombre de données d'entrées au niveau de chaque pièce (mesures de CO₂, champ de température, pression et vitesses d'air) et de connaître la configuration exacte de chaque logement. Ces données sont très difficiles à renseigner dans le cadre d'une enquête de terrain et n'ont pas été collectées ;
- La représentativité de la concentration moyenne en CO₂ déterminée au travers de mesures réalisées dans seulement deux pièces du logement (chambre de la personne de référence et séjour principal) ;

- L'incertitude sur la mesure du CO₂ par deux instruments différents ;
- La présence de données manquantes en CO₂ sur chacune des périodes dans la chambre ou dans le séjour qui peut biaiser l'estimation de la concentration moyenne sur la période, mais qui reste marginale ;
- Les hypothèses prises autour de la concentration extérieure de CO₂, considérée constante sur la semaine et imputée par la valeur minimale observée à l'intérieur en l'absence de mesures à l'extérieur ;
- Le découpage des périodes diurnes et nocturnes ;
- Le taux de présence déclarée de chaque individu dans le logement et l'affectation des individus présents dans la chambre ;
- Le niveau d'activité métabolique imposé à chaque individu notamment le jour (sédentaire) et les valeurs de met correspondantes ;
- La production métabolique individuelle qui ne tient pas compte de la morphologie réelle des occupants, ni des conditions de température et de pression du logement.

Malgré ces nombreux facteurs d'incertitude, le TRA est un indicateur global qui permet d'estimer l'efficacité du renouvellement de l'air combinant à la fois la présence d'un système spécifique de ventilation en place, l'aération par ouverture de fenêtres et les infiltrations au travers de l'enveloppe du bâtiment.

Le calcul permet de fournir une estimation du TRA moyen sur la semaine, sans qu'il soit possible de connaître les fluctuations du TRA au cours de la semaine.

Par ailleurs, le calcul du TRA utilise différentes variables qui doivent toutes être disponibles pour chacun des logements. Les données manquantes ou invalides concernant les mesures de CO₂ ou de données d'occupation du logement (ne serait-ce que d'un seul individu du ménage) ne permettent pas le calcul du TRA. De ce fait, le calcul du TRA a été réalisé sur un effectif de logements plus faible (voir section 3.9.3 Effectif et pondération).

3.5 Méthode de calcul du taux de renouvellement d'air moyen nocturne dans la chambre

En complément du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire à l'échelle du logement décrit précédemment, un taux de renouvellement d'air moyen limité au seul volume de la chambre en période nocturne a été calculé. Pour ce calcul, l'état de la porte de la chambre n'est plus pris en compte. Le volume utilisé est dans tous les cas celui de la seule chambre principale.

Dans le cas du taux de renouvellement d'air moyen nocturne calculé à l'échelle de la chambre de la personne de référence, le débit de renouvellement d'air nocturne est rapporté au volume de la chambre (V_{nuit}), et non au volume du logement. La concentration intérieure en dioxyde de carbone utilisée pour le calcul correspond à la concentration moyenne mesurée dans la chambre sur l'ensemble de la période nocturne considérée (01h00–05h30).

Le calcul du débit de renouvellement d'air nocturne repose sur les mêmes principes que ceux décrits précédemment, en utilisant la production métabolique des individus uniquement présents dans la chambre durant la période nocturne et l'écart entre la concentration intérieure mesurée dans la chambre et la valeur de la concentration extérieure prise comme constante. Le taux de renouvellement d'air moyen nocturne dans la chambre est ainsi obtenu en rapportant ce débit au volume de la chambre, et s'exprime en volumes par heure.

$$TRA_{\text{ nuit CHB}} = \frac{RA_{\text{ nuit CHB}}}{V_{\text{ nuit}}}$$

$$RA_{\text{ nuit CHB}} = \frac{\text{Production}_{\text{ vol}} \text{ des individus dans la chambre}}{(C_{\text{ int}}^n - C_{\text{ ext}}) \times 10^{-6}}$$

$$RA_{\text{ nuit CHB}} = \frac{\sum_{\text{ du ménage}}^{\text{ individus }} (\text{production } CO_2 \text{ individu CHB} \times \text{présence}_{\text{ individu CHB}})}{(C_{\text{ int}}^n - C_{\text{ ext}}) \times 10^{-6}}$$

Où

$RA_{\text{ nuit CHB}}$: Débit de renouvellement d'air nocturne dans la chambre (moyenne sur l'ensemble des périodes nocturnes (01h00 – 05h30) sur la semaine (m^3/h)) ;

$C_{\text{ int}}^n$ est la concentration moyenne de CO_2 dans la chambre sur la période nocturne considérée entre 01h00 et 05h30 pour l'ensemble de la semaine ($n = \text{nuit}$) en ppm ;

$C_{\text{ ext}}$: concentration extérieure de CO_2 en prenant par défaut la concentration intérieure minimale sur la semaine (mesures en chambre et en séjour confondues) en ppm ;

$\text{Production}_{\text{ vol}} \text{ des individus dans la chambre}$: Production métabolique totale des individus présents dans la chambre (en m^3 de CO_2/h) ;

$\text{production } CO_2 \text{ individu CHB}$: Production métabolique individuelle en activité de sommeil des occupants présents la nuit dans la chambre (m^3 de CO_2/h) ;

$\text{présence}_{\text{ individu CHB}}$: taux de présence de chaque individu dans la chambre de la personne de référence sur la période nocturne (variable entre 0 toujours absent à 1 toujours présent) ;

$V_{\text{ nuit}}$ est le volume de la chambre (en m^3).

Cet indicateur permet de caractériser spécifiquement les conditions de renouvellement de l'air dans la chambre durant la période nocturne, période au cours de laquelle l'occupation est jugée plus stable et le volume considéré généralement plus restreint que pour les indicateurs calculés à l'échelle du logement.

L'absence de considération de l'état de la porte de la chambre la nuit pour ce calcul conduit à une forte hypothèse sur l'application du modèle et de l'équation de calcul du TRA en situations de porte ouverte. En effet, les échanges avec le reste du logement sont alors plus importants. Les apports de CO_2 du reste du logement peuvent être plus importants et ils ne sont pas pris en compte dans l'équation. Cela peut conduire à un biais de sous-estimation du $TRA_{\text{ nuit CHB}}$. A l'inverse, l'absence d'autres occupants dans le logement se traduit par un apport d'air de dilution qui provient des autres pièces du logement et qui ne peut pas être

considéré comme un apport d'air neuf. Dans ce cas, un biais de surestimation du $TRA_{\text{nuît CHB}}$ est à prévoir.

A noter qu'un TRA diurne dans la chambre serait difficilement calculable du fait que le niveau d'occupation de cette pièce en journée est sans doute faible et surtout pas connu.

3.6 Méthode de calcul du taux de renouvellement d'air moyen diurne dans le séjour

Dans le cas du taux de renouvellement d'air moyen diurne calculé à l'échelle de la pièce de séjour, le débit de renouvellement d'air diurne est rapporté au volume du séjour (V_{jour}), et non au volume du logement. La concentration intérieure en CO_2 utilisée pour le calcul correspond à la concentration moyenne mesurée uniquement dans le séjour sur l'ensemble de la période diurne considérée (05h30–01h00).

Le calcul du débit de renouvellement d'air diurne repose sur les mêmes principes que ceux décrits précédemment pour le TRA moyen hebdomadaire, en utilisant la production métabolique de tous les occupants présents dans le logement durant la période diurne et l'écart entre la concentration intérieure du séjour et la valeur de la concentration extérieure prise comme constante. Le taux de renouvellement d'air moyen diurne dans le séjour est ainsi obtenu en rapportant ce débit au volume du séjour, et s'exprime en volumes par heure.

$$TRA_{\text{jour SEJ}} = \frac{RA_{\text{jour SEJ}}}{V_{\text{jour}}}$$

$$RA_{\text{jour SEJ}} = \frac{\text{Production}_{\text{vol}} \text{ dans tout le logement}}{(C_{\text{int}}^j - C_{\text{ext}}) \times 10^{-6}} =$$

$$\frac{\sum_{\text{du ménage}}^{\text{individus}} (\text{production } CO_2 \text{ individu} \times \text{présence}_{\text{individu Logement}})}{(C_{\text{int}}^j - C_{\text{ext}}) \times 10^{-6}}$$

Où

$RA_{\text{jour SEJ}}$: Débit de renouvellement d'air diurne dans le séjour (moyenne sur l'ensemble des périodes diurnes (05h30 – 01h00) sur la semaine (m^3/h)) ;

C_{int}^j : la concentration moyenne de CO_2 dans le séjour sur la période diurne considérée (j = jour) en ppm ;

C_{ext} : concentration extérieure de CO_2 en prenant par défaut la concentration intérieure minimale sur la semaine (mesures en chambre et en séjour confondues) en ppm ;

$\text{Production}_{\text{vol}}$ dans tout le logement : Production métabolique totale des individus présents dans l'ensemble du logement en période diurne (05h30 – 01h00) en m^3 de CO_2/h ;

$\text{production } CO_2 \text{ individu}$: Production métabolique individuelle en activité sédentaire des occupants présents en journée dans l'ensemble du logement (m^3 de CO_2/h) ;

$\text{présence}_{\text{individu Logement}}$: taux de présence de chaque individu dans le logement sur la période diurne (variable entre 0 toujours absent à 1 toujours présent) ;

V_{jour} est le volume du séjour en m^3 .

Cet indicateur permet de caractériser spécifiquement les conditions du renouvellement de l'air dans le séjour durant les périodes d'occupation diurne.

Cet indicateur ne prend pas du tout en compte l'état des portes du séjour (ou même de la chambre) le jour. Par contre, le séjour est très souvent une pièce centrale du logement qui communique avec plusieurs autres pièces. Ce qui implique que le volume considéré comme homogène peut s'étendre bien au-delà de la seule pièce du séjour. En effet, le renouvellement de l'air du séjour ne se fait pas uniquement par de l'air neuf provenant exclusivement de l'extérieur, mais également par de l'air provenant d'autres pièces du logement. Par ailleurs, il n'est pas possible de limiter la production métabolique et donc la présence des individus au seul séjour. Ce dernier point peut conduire à une potentielle surestimation du TRA diurne dans le séjour.

À noter qu'un TRA nocturne dans le séjour ne pourrait pas être calculé du fait que l'occupation de cette pièce la nuit est sans doute très faible et qu'elle n'est pas connue.

3.7 Méthode de calcul d'un taux de renouvellement d'air « théorique »

Un taux de renouvellement d'air « théorique » ($\text{TRA}_{\text{théorique}}$) a été déterminé en considérant la seule contribution du système de ventilation mécanique sans tenir compte des pratiques d'aération, des infiltrations et de l'efficacité globale du système. Il se base exclusivement sur les mesures de débit d'air extrait. Cet indicateur est supposé refléter la capacité du système de ventilation mécanique (tel qu'il opère en réalité) à renouveler l'air du logement en supposant un balayage parfait de l'ensemble des pièces. Il ne permet pas de traduire un renouvellement effectif de l'air du logement. Il sert uniquement de point de comparaison aux autres indicateurs de TRA plus globaux (au sens où ils intègrent d'autres contributions potentielles), calculés au préalable.

Le $\text{TRA}_{\text{théorique}}$, exprimé en volumes par heure (vol/h), correspond au ratio entre le débit total minimal d'air extrait mesuré et le volume du logement. Le débit total minimal d'air extrait (QTOT_FINAL exprimé en m^3/h) a été calculé sur la base des mesures de débit d'air aux bouches d'extraction en cuisine, salles de bains et WC (Assy et al., 2026). Dans le cas où le débit d'air extrait n'a pas pu être mesuré dans l'une des pièces de service requises (au minimum une cuisine, une salle de bains et un WC), le débit total minimal et, par conséquent, le taux de renouvellement d'air théorique n'ont pas été calculés pour le logement concerné. De même, les pièces équipées de bouches d'extraction hygroréglables, pour lesquelles seule une mesure de pression est réalisée, n'ont pas été prises en compte dans ce calcul. Dans les rares cas où le débit total minimal d'air extrait était nul suite à un dysfonctionnement du système, le TRA théorique n'était pas calculé.

Le volume du logement (VOLLOG), exprimé en mètres cubes (m^3), a été déterminé à partir de la surface habitable et de la hauteur moyenne sous plafond. Lorsque le logement

présentait plusieurs niveaux habitables, le volume du logement était divisé par le nombre de niveaux pour exprimer un volume par niveau (VOLNIV).

3.8 Récapitulatif des différents indicateurs de renouvellement d'air utilisés

Un récapitulatif simplifié des différents indicateurs de renouvellement d'air calculés et pris en compte dans cette étude est présenté au **Tableau 8**. Il comporte 3 indicateurs différents de débit de renouvellement d'air et 4 indicateurs de taux de renouvellement d'air. Ils diffèrent selon les hypothèses et les bases de calcul, les contributions mises en avant, ainsi que sur l'échelle spatiale ou temporelle représentée. Par rapport aux indicateurs de débit, les indicateurs de taux de renouvellement d'air font des hypothèses supplémentaires sur le volume à prendre en compte dans le calcul. Les indicateurs QTOT et TRA théorique basés exclusivement sur les mesures de débit d'air extrait ne sont applicables que pour les logements équipés en ventilation mécanique et pour lesquels des mesures de débit ont pu être réalisées. Pour comparer les différents logements entre eux, quel que soit leur système de ventilation, les seuls indicateurs de renouvellement d'air disponibles sont ceux qui se basent sur les concentrations en CO₂ intérieures et extérieures corrigées de la production métabolique par les occupants.

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des différents indicateurs de renouvellement d'air calculés et utilisés dans le rapport

Indicateur	Unité	Description	Base de calcul	Période	Volume	Commentaires
RA_n	m ³ /h	Débit de renouvellement d'air nocturne	Moyenne des 60 valeurs les plus élevées en CO ₂ (CHB/SEJ) et production métabolique moyenne (CHB/Logement)	01h00 – 05h30	-	Débit minimal observé en régime quasi-établi. Données d'entrée variables selon l'état d'ouverture de la porte de la chambre.
RA_{nu}	m ³ /h	Débit de renouvellement d'air nocturne moyen	Concentration moyenne de CO ₂ (CHB/SEJ) et production métabolique moyenne (CHB/Logement)	01h00 – 05h30	-	Débit moyen en régime quasi établi. Données d'entrée variables selon l'état d'ouverture de la porte de la chambre.
QTOT	m ³ /h	Débit total minimal d'air extrait	Somme des mesures de débit d'air extrait en pièces de service (CUI/CUS+SDB+WC)	en permanence	-	Uniquement pour les logements équipés d'un système de ventilation mécanique
TRA	vol/h	Taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire	Concentrations moyennes de CO ₂ (CHB/SEJ) et production métabolique moyenne (CHB/Logement)	semaine d'enquête	Volume du logement limité au niveau dans lequel se trouve la chambre, voire à la chambre seule si la porte est fermée	Rôle central de l'état d'ouverture de la porte de la chambre dans les hypothèses considérées
TRA_{nu}-CHB	vol/h	Taux de renouvellement d'air nocturne dans la chambre	Concentration moyenne de CO ₂ (CHB) et production métabolique moyenne (CHB)	01h00 – 05h30	Chambre	Etat des portes et donc échanges avec les autres pièces non pris en compte.
TRA_{jour}-SEJ	vol/h	Taux de renouvellement d'air diurne dans le séjour	Concentration moyenne de CO ₂ (SEJ) et production métabolique moyenne (Logement)	05h40 – 00h50	Séjour	Etat des portes non pris en compte. Possible surestimation liée à la considération de l'ensemble des occupants du logement et pas seulement du séjour
TRA_{théorique}	vol/h	Taux de renouvellement d'air par ventilation mécanique	Débit total minimal d'air extrait (uniquement les logements équipés en ventilation mécanique)	en permanence	Volume du logement	Contribution du seul système de ventilation mécanique avec pour hypothèse que 100 % de l'air extrait correspond à 100 % d'air neuf

3.9 Analyses statistiques des données

3.9.1 Codage, saisie, intégration en base et validation des données

La collecte de données et les premières vérifications sont décrites dans le rapport de la CNL2 (Ramalho et al. 2025). La validation globale et la préparation des données de la partie questionnaire consistent à traiter les points suivants :

- La vérification des réponses possibles et des enchaînements logiques sur les données ;
- L'identification et le codage des valeurs sans objet parmi les valeurs manquantes pour les distinguer des non-réponses ;
- Le traitement des champs textes relatifs aux précisions demandés sur les modalités « autre cas » : homogénéisation, correction éventuelle en modalités existantes, ajout de nouvelles modalités le cas échéant ;
- Le traitement et la correction des variables numériques ;
- La mise en place de contrôles de cohérence entre les variables pouvant être mises en relation les unes avec les autres et les corrections associées ;
- La création de variables agrégées ;
- Le traitement des commentaires de saisie.

En parallèle, des dictionnaires de variables sont élaborés pour chaque questionnaire, indiquant pour chacune des variables, le libellé de la question, l'ordre et le chapitre/sous-chapitre associé, le type de variable, les réponses possibles (modalités ou intervalles), les enchaînements logiques liés à chaque modalité, le caractère obligatoire/facultatif ainsi que les informations liées à la création de nouvelles modalités ou nouvelles variables. Un diagramme d'enchaînement logique a également été réalisé concernant les questionnaires pour lesquels cela s'avère pertinent.

3.9.2 Analyses statistiques des données

Les analyses portent sur la description des systèmes de ventilation dans le parc de logements, ainsi sur le calcul du taux de renouvellement d'air associé à chaque logement et la conformité des débits des bouches. L'unité statistique d'intérêt dans le présent rapport est le logement : chaque équipement est donc directement associé au logement dans son ensemble.

L'analyse des données de ventilation se base sur les réponses fournies lors de l'enquête nationale. Des variables complémentaires ont été élaborées pour enrichir l'exploitation des données, notamment des variables agrégées à partir de mesures en continu.

Les concentrations des polluants en particulier le dioxyde de carbone (CO₂) sont présentées au niveau du logement. Toutefois, les mesures ont été réalisées dans des pièces spécifiques : la chambre de la personne de référence et le séjour principal. Il est important

de souligner que chaque mesure reflète prioritairement les conditions de la pièce instrumentée, et ne peut pas toujours être généralisée à l'ensemble du logement. Dans cette étude, le CO₂ mesuré dans la chambre est principalement utilisé pour estimer le renouvellement d'air la nuit, tandis que celui mesuré dans le séjour intervient plutôt dans le calcul du renouvellement d'air en journée. Ces deux estimations sont ensuite combinées pour évaluer le taux global de renouvellement d'air au niveau du logement.

Les programmes mis en place sous R ont permis, d'une part, de calculer, pour chaque indicateur calculé : le nombre d'observations, ainsi que les statistiques descriptives correspondantes (moyenne, médiane, centiles, minimum, maximum).

Des analyses bivariées sont également réalisées afin d'explorer les liens entre les indicateurs de renouvellement d'air et différentes variables d'intérêt, telles que la période de construction du logement ou la période de chauffe/hors chauffe.

Des tests d'indépendance du Chi² (entre deux variables nominales avec correction de Rao-Scott) et des tests non-paramétriques de comparaisons multiples (test de Kruskal-Wallis entre une variable nominale à plusieurs modalités et une variable continue) ont été réalisés pour vérifier la significativité des associations observées entre les variables liées à la ventilation ou l'aération et les caractéristiques du logement ou du ménage. Une correction de Bonferroni a été appliquée systématiquement pour tenir compte de la multiplicité des tests effectués et des risques de voir apparaître par chance une association là où il n'y en a pas.

Les analyses statistiques ont été réalisées avec R version 4.3.0 (R Core Team 2023a), via R Studio version 2023.3.1.446 (RStudio Team 2022), en exploitant les packages suivants : tidyverse (Wickham et al. 2019), survey (Lumley 2020), ggplot2 (Wickham 2016), stats (R Core Team 2023b). Ces packages ont été essentiels pour manipuler, analyser et visualiser les données relatives au renouvellement d'air des logements de la CNL2.

3.9.3 Effectif et pondération

Toutes les analyses sont pondérées pour assurer la représentativité au niveau du parc des résidences principales en France hexagonale. La méthode d'élaboration du poids de sondage est décrite dans le rapport de la description de la qualité de l'air intérieur des logements (Ramalho et al. 2025). La représentativité des données se situe à l'échelle du parc de résidences principales en France hexagonale. Les données collectées ne sont absolument pas représentatives d'une région, d'un département, d'une commune enquêtée, ou d'une zone climatique. L'enquête n'est pas non plus représentative d'une typologie de logements particuliers, que ce soit une typologie constructive ou une période de construction. Par exemple, le sous-groupe de logements enquêtés construits après 2012 n'est pas représentatif de l'ensemble des logements construits après cette date.

Dans le cadre de ce rapport, un échantillon de 483 logements a été retenu, parmi les 571 logements initiaux de la CNL2. Cette réduction de l'échantillon s'explique par l'absence ou la non-exploitabilité de certaines données essentielles pour le calcul du TRA (notamment :

données CO₂ manquantes ou inexploitable, taux de couverture hebdomadaire en CO₂ inférieur à 50 %, ou encore absence/déficience des données d'occupation).

Afin de garantir la représentativité de cet échantillon par rapport au parc de résidences principales en France hexagonale, un nouveau jeu de poids d'extrapolation a été spécifiquement recalculé. Ce recalcul des poids vise à assurer une représentation fidèle des caractéristiques du parc de logements français. Les poids redressés et calés de cet échantillon sont comparés dans le **Tableau 9** ci-dessous avec le jeu de poids initial correspondant aux 571 logements enquêtés.

Tableau 9. Comparaison des descriptions des pondérations : Échantillon Initial (571 logements) vs. Échantillon Retenu (483 logements)

Estimateurs	Rapport de poids INITIAL	Poids redressés et calés INITIAL	Rapport de poids VENTILATION	Poids redressés et calés VENTILATION
Moyenne	1,05	52 034	1,14	61 515
Variance	0,44	6 331 053 680	0,91	8 112 245 796
Écart type	0,66	79 568	0,95	90 068
Minimum	0,35	2 269	0,25	3 102
Maximum	2,68	727 708	3,83	978 862
5 ^{ème} centile	0,37	5 063	0,25	5 597
25 ^{ème} centile	0,51	12 112	0,37	13 525
Médiane	0,78	25 505	0,74	31 257
75 ^{ème} centile	1,52	56 127	1,76	73 939
90 ^{ème} centile	2,11	126 520	2,55	148 425
95 ^{ème} centile	2,39	172 868	3,07	209 775
97,5 ^{ème} centile	2,58	266 253	3,48	296 934
99 ^{ème} centile	2,65	404 815	3,75	417 805
Somme des poids	/	29 711 596	/	29 711 596

Suite à une dernière phase de vérification et de correction des données d'occupation, **472 logements** ont finalement été retenus comme base analytique parmi les 483. Ces 472 logements permettent de représenter 97 % du parc de résidences principales de France hexagonale, avec un poids total cumulé de 28 802 380, déduit du jeu de poids recalculé pour les 483 logements initialement pris en compte.

L'ensemble des données décrites dans ce rapport à l'échelle du logement porte sur l'échantillon retenu de 472 logements représentant 28 802 380 logements du parc en intégrant la pondération spécifique aux données de ventilation.

3.10 Comparaison entre CNL1 et CNL2

La comparaison du taux de renouvellement d'air dans le parc de logements en France a été réalisée sur deux périodes distinctes : la première campagne nationale logement CNL1 (2003-2005) et la deuxième campagne nationale logement CNL2 (2020-2023). Cette comparaison nécessite une analyse approfondie des données des deux campagnes, en mettant en évidence les similitudes et les différences dans les caractéristiques des logements et les pratiques de ventilation.

Le mode de calcul du TRA dans la CNL2 intègre les mesures de CO₂ réalisées dans le séjour en plus de celle de la chambre contrairement à la CNL1 où seules les mesures dans la chambre principale sont disponibles. Cela a également pour conséquence de prendre en compte dans le calcul une proportion plus importante du volume de logement par rapport à la CNL1 (voir section 3.4.4).

La méthodologie de comparaison est similaire à celle décrite dans le rapport descriptif de la CNL2 à la section 4.2.2 (Ramalho et al., 2025). Un jeu de poids spécifique pour la comparaison a été déterminé sur la base des variables de redressement utilisées pour la CNL1 en tenant compte de l'effectif réduit de logements avec l'ensemble des données de ventilation disponibles.

Pour la seule comparaison CNL1-CN2, l'échantillon retenu de 472 logements représente 28 309 485 résidences principales du parc hexagonal.

3.11 Revue bibliographique

3.11.1 Présentation générale de la méthode de revue bibliographique

La revue bibliographique des facteurs susceptibles d'intervenir sur le taux de renouvellement de l'air a été menée selon une méthode en 6 étapes proposée par (Bérard et al. 2014). Elle consiste à cerner le sujet de la revue, définir les paramètres, rechercher les articles, filtrer les articles trouvés et vérifier leur éligibilité des articles puis de les inclure définitivement. Il faut noter que la procédure de revue bibliographique est basée sur la méthode PRISMA « *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* ».

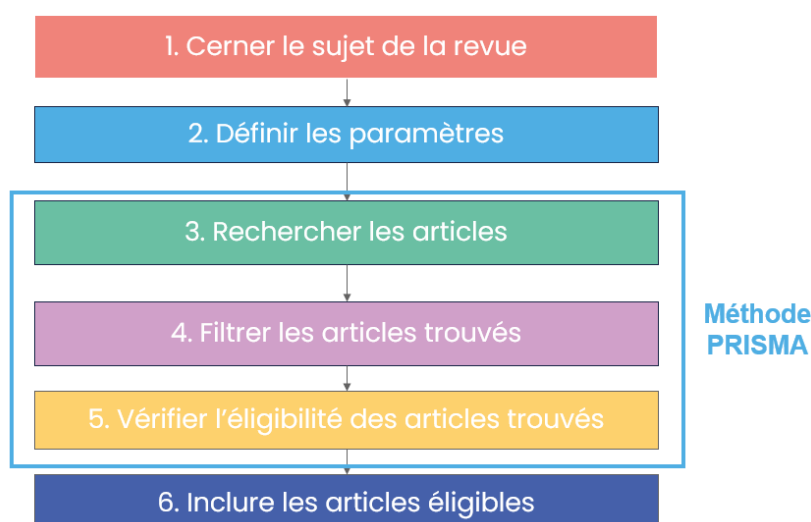


Figure 7 – Principales étapes de la recherche bibliographique

3.11.2 Sujet de la revue bibliographique

Afin de formuler précisément la question de recherche à laquelle nous souhaitons répondre et faire émerger les premiers mots-clés, la méthode PICO (« Population, Intervention, Comparators, Outcomes ») a été utilisée. Le sujet de cette recherche est de connaître les facteurs influençant le taux de renouvellement de l'air des bâtiments à usage d'habitation (maisons individuelles et logements collectifs) de la population générale, ces déterminants pouvant être liés aux caractéristiques du bâtiment et au comportement des ménages occupant ces bâtiments.

PICO	Questions	Réponses
Population	<i>Quelle est la population concernée ? Quel est son diagnostic ou son problème médical ?</i>	Lieu de résidence (maisons, appartements) de la population générale (ménage français)
Intervention	<i>Qu'est-ce qu'on évalue ?</i>	TRA
Comparateurs	<i>A quoi le compare-t-on, à un médicament de référence, à un placebo ?</i>	Caractéristiques du bâtiment ou des comportements des ménages
Résultats	<i>Qu'est-ce qu'on cherche à démontrer ?</i>	Connaître les déterminants explicatifs et prédictif du TRA

Figure 8 – Identification du sujet de la revue bibliographique (méthode PICO)

3.11.3 Paramètres de la revue bibliographique

La méthode STARLITE ("Sampling strategy, Type of studies, Approaches, Range of years, Limits, Inclusion and exclusions, Terms used et Electronic source") a permis de préciser les différents paramètres de recherche. Il a été décidé d'inclure toutes les études concernant le sujet et de se focaliser sur les articles de revue (« review ») et les articles de recherche. Trois bases de données bibliographiques ont été retenues (Sciences Direct, Scopus et Wiley) et pour chacune d'elles et dans la mesure du possible, une sélection de journaux a été opérée. Aucune restriction sur l'année de publication n'a été faite. Seuls les articles en

anglais (et en français) en rapport avec le taux de renouvellement de l'air du logement entier ou de la chambre ont été inclus.

STARLITE	Questions	Réponses
Stratégie de recherche	<i>Celle-ci peut être complète (c.-à-d. inclure toutes les études concernant le sujet), ou sélective (c.-à-d. sélectionner les limites et critères d'exclusion)</i>	Stratégie complète
Approche de recherche	<i>Le type d'études à inclure peut-être défini avec précision (p.ex. étude de cohorte), ou plus largement (p.ex. études qualitatives).</i>	Review ou articles de recherche Sélection des revues d'intérêt sur Sciences, Scopus et Wiley
Années de recherche	<i>Toutes les approches de recherche doivent être précisées, en plus de la recherche électronique (p.ex. citations, recherche manuelle)</i>	Pas de filtre sur l'année
Limites	<i>Les limites appliquées à la recherche doivent être précisées, incluant les limites logistiques (p.ex. langue de l'étude, population à l'étude comme les humains)</i>	Langue de l'article (Français ou anglais) Restriction aux analyses réalisées dans des logements entiers ou des chambres.
Critères d'inclusion et d'exclusion	<i>Les critères d'inclusion et d'exclusion sont variés; il peut s'agir notamment de la localisation géographique ou du contexte de l'étude.</i>	Les articles ayant restreint leur analyse à l'étanchéité « airtightness » ont été exclus
Termes de recherche	<i>Les stratégies de recherches peuvent préciser la syntaxe et l'utilisation des opérateurs booléens.</i>	Reprendre les requêtes par moteurs de recherche écrites plus haut.
Sources électroniques	<i>Les bases de données utilisées sont reportées, ainsi que les plateformes de recherche, afin d'aider à la reproductibilité</i>	Sciences Direct Scopus Wiley

Figure 9 – Identification des paramètres de la revue bibliographique (méthode STARLITE)

3.11.4 Procédure de revue bibliographique

La procédure de revue bibliographique (méthode PRISMA) se résume en quatre phases (Figure 10) :

- Identification des articles d'intérêt à partir de l'interrogation d'une ou plusieurs bases de données bibliographiques ;
- Sélection des articles identifiés à partir de leur résumé après suppression des éventuels doublons ;
- Lecture intégrale des articles filtrés ;
- Identification des articles éligibles pour lecture du texte intégral.

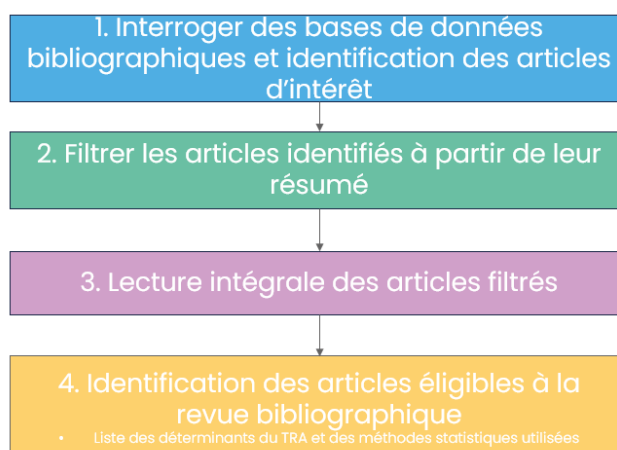


Figure 10 – Principales étapes de la méthode PRISMA

3.11.5 Mots clés et équations de recherche

Les mots-clés sélectionnés pour la revue bibliographique ont été les suivants :

- "air change rate", "air-exchange rate", "air renewal", "ACH: air changes per hour",
- "dwelling", "housing", "single-family house", "multi-family house", "apartment", "residential"
- "ventilation rates", "residential ventilation"
- "PCA", "regression"

Les équations de recherche spécifiques pour chaque base de données bibliographiques ont été les suivantes :

- **Science direct** : ("air change rate" OR "air-exchange rate" OR ACH) AND ("regression" OR "PREDICT" OR "FACTOR" OR "DETERMINANT") + **filtre sur revues** ("Building and Environment", "Energy and Buildings", "Journal of Building Engineering")
- **SCOPUS** : ("air change rate" OR "air-change rates" OR "air-exchange rate" OR ACH OR "air renewal") AND ("regression" OR "PREDICT" OR "FACTORS" OR "DETERMINANT" OR "REVIEW") + **filtre sur revues** ("Building and Environment", "Atmospheric Environment", "Indoor Air", "Science of the Total Environment", "Energy and Buildings", "Environmental Science and Technology", "Scientific Reports", "Journal of Building Engineering", "International Journal of Environmental Research and Public Health", "Journal of the Air and Waste Management Association", "Indoor and Built Environment", "Environment International", "Building Simulation", "Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology", "Environmental Pollution", "Environmental Science and Pollution Research", "Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology", "International Journal of Ventilation", "Environmental Research", "Journal of Occupational and Environmental Hygiene", "Buildings")
- **WILEY** : ("air change rate" OR "air-change rates" OR "air-exchange rate" OR ACH OR "air renewal" OR "ventilation rate") AND ("regression" OR "PREDICT" OR "FACTORS" OR "DETERMINANT") AND ("dwelling" OR "housing" OR "residential" OR "single-family" OR "appartement") + **filtre sur revues** ("Chemistry – A European Journal", "Journal of Environmental Quality", "Risk Analysis", "Environmental Toxicology and Chemistry", "Chemistry & Biodiversity", "Acta Physiologica", "Indoor Air") + **filtre sujet** (Env and occupational Health)

4 Résultats de la revue bibliographique

4.1 Articles inclus dans la revue bibliographique

Les résultats de la procédure de la revue bibliographique sont présentés sur la Figure 11. Au total, 783 articles ont été identifiés dans les 3 bases de données bibliographiques (180 pour SCIENCES DIRECT, 239 pour SCOPUS et 364 pour WILEY). Après lecture des résumés, 19 articles ont été présélectionnés et 15 ont été sélectionnés après suppression des doublons. Suite à la lecture intégrale de ces articles, 13 ont été déclarés comme « éligibles » et ont fait l'objet d'une lecture intégrale.

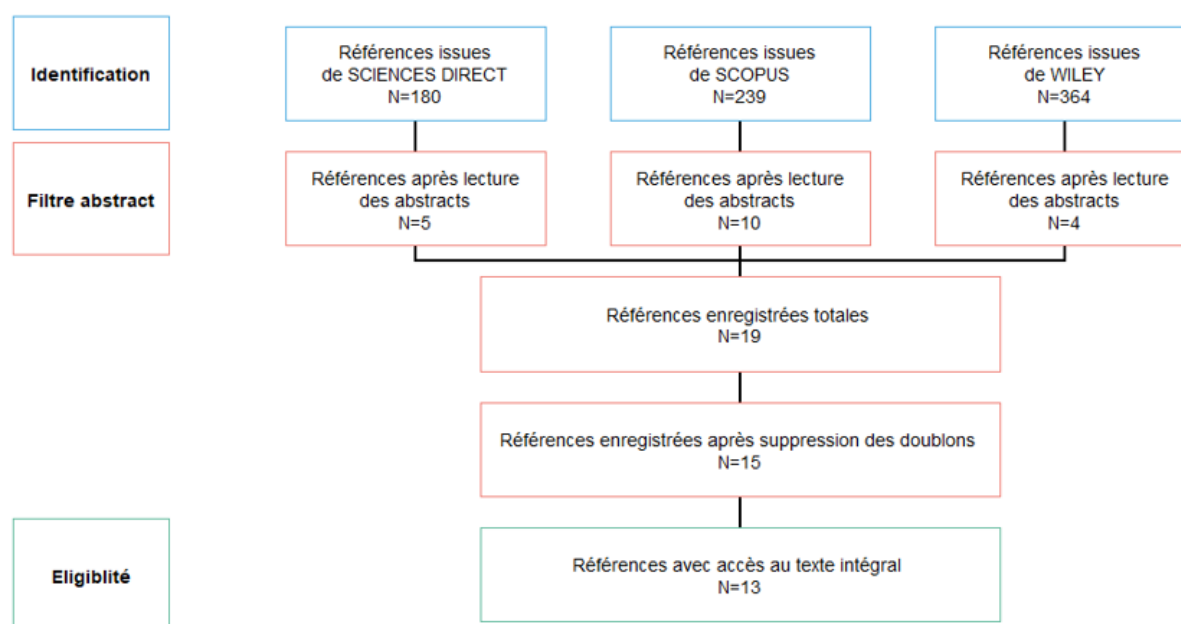


Figure 11 – Résultat de la procédure de revue bibliographique

La liste des 13 articles inclus dans la revue bibliographique est présentée dans le Tableau 10. Il faut noter parmi eux la présence l'article de revue (« review ») de Nazaroff et al. (2021).

Tableau 10. Liste des 13 articles inclus dans la revue bibliographique

Année	Premier auteur	Titre	Référence bibliographique
2023	Cardoso, Vitor E.M.	Towards an airtightness compliance tool based on machine learning models for naturally ventilated dwellings	(Cardoso et al. 2023)
2021	Nazaroff, William W.	Residential air-change rates: A critical review	(Nazaroff 2021)
2019	Hou, Ling	Air change rates in urban Chinese bedrooms	(Hou et al. 2019)
2018	Liu, Yingjun	Detailed investigation of ventilation rates and airflow patterns in a northern California residence	(Liu et al. 2018)
2018	Khemet, Bomani	A univariate and multiple linear regression analysis on a national fan (de) Pressurization testing database to predict airtightness in houses	(Khemet et Richman 2018)
2015	Vinha, Juha	Airtightness of residential buildings in Finland	(Vinha et al. 2015)

Année	Premier auteur	Titre	Référence bibliographique
2014, a	Breen, Michael S.	A review of air exchange rate models for air pollution exposure assessments	(Breen, Schultz, et al. 2014)
2014, b	Breen, Michael S.	Modeling Spatial and Temporal Variability of Residential Air Exchange Rates for the Near-Road Exposures and Effects of Urban Air Pollutants Study (NEXUS)	(Breen, Burke, et al. 2014)
2013	Isaacs ; Kristin	Identifying housing and meteorological conditions influencing residential air exchange rates in the DEARS and RIOPA studies: development of distributions for human exposure modeling	(Isaacs et al. 2013)
2011	Bekö, Gabriel	Modeling ventilation rates in bedrooms based on building characteristics and occupant behavior	(Bekö et al. 2011)
2010	Breen, Michael S.	Predicting Residential Air Exchange Rates from Questionnaires and Meteorology: Model Evaluation in Central North Carolina	(Breen et al. 2010)
2010	Bekö, Gabriel	Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children	(Bekö et al. 2010)
1998	Øie, Leif	The Ventilation Rate of 344 Oslo Residences	(Øie et al. 1998)

4.2 Facteurs associés au taux de renouvellement d'air recensés dans la revue bibliographique

Les déterminants du taux de renouvellement d'air recensés dans les 13 articles éligibles à la revue bibliographique sont présentés dans le Tableau 11 en quatre grandes catégories : conditions climatiques / caractéristiques du bâtiment et du logement / caractéristiques du ménage et habitudes de vie et usage des ménages.

Tableau 11. Déterminants du taux de renouvellement de l'air recensés à partir des 13 articles inclus dans la revue bibliographique (fréquence d'occurrence)

Conditions climatiques	Caractéristiques du bâtiment et du logement		Caractéristiques du ménage	Habitudes de vie et usages des ménages
Vitesse du vent (4/13)	Proximité du trafic automobile (3/13)	Type d'habitation : maisons individuelles / logements collectifs (3/13)	Niveau de revenu et CSP (2/13)	Aération par ouverture des fenêtres : état des fenêtres (ouvertes/fermées), nb de fenêtres ouvertes en même temps, durée d'ouverture cumulée en h/semaine (6/13)
Différence de température int/ext (8/13)	Perméabilité à l'air de l'enveloppe (4/13)	Type de fenêtres : avec châssis ou coulissantes (1/13)	Présence ou absence dans le logement (2/13)	Utilisation d'un système de chauffage (4/13)
Saisons (4/13)	Date de construction (7/13)	Type de système de ventilation (4/13)	Nombre d'occupants dans le logement et la chambre (3/13)	Utilisation d'un système de climatisation (3/13)

Conditions climatiques	Caractéristiques du bâtiment et du logement		Caractéristiques du ménage	Habitudes de vie et usages des ménages
Jour/nuit (4/13)	Matériau principal de construction (structures lourdes ou légères) (1/13)	Surface et volume du logement et de la chambre (7/13)		Utilisation d'un système à combustion avec conduit d'extraction des gaz de combustion (1/13)
-	Mode de construction (sur site ou préfabrication) (1/13)	Localisation des pièces (RDC, vide sanitaire, étage) (2/13)	-	Utilisation d'un système de ventilation équipé d'un moteur (VMC, moteurs individuels, ...) (3/13)
-	Jonctions planchers/murs (1/13)	Nombre d'étage (2/13)	-	Utilisation d'une hotte de cuisine à extraction raccordée à l'extérieur (1/13)
-	Compacité du bâtiment (2/13)	Présence d'isolation (mur, plancher bas, plancher haut) (2/13)	-	Utilisation d'un sèche-linge à extraction raccordée à l'extérieur (1/13)

Les déterminants les plus cités sont présentés dans le Tableau 12 :

- la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, la date de construction, la surface et le volume du logement et de la chambre sont cités dans plus de la moitié des articles ;
- la vitesse de l'air, la saison, le moment de la journée, la perméabilité à l'air de l'enveloppe, le type de système de ventilation, le comportement d'aération par ouverture de fenêtres et l'utilisation d'un système de chauffage sont cités entre 25% et 50% des articles.

Tableau 12. Facteurs déterminants du taux de renouvellement de l'air les plus cités dans les 13 articles inclus dans la revue bibliographique

Fréquence d'occurrence	Conditions climatiques	Caractéristiques du bâtiment et du logement	Caractéristiques du ménage	Habitudes de vie et usages des ménages
Plus de 50%	Différence de température int/ext (8/13)	Date de construction (7/13)	-	-
		Surface et volume du logement et de la chambre (7/13)		
Entre 25 et 50 %	Vitesse du vent (4/13)	Perméabilité à l'air de l'enveloppe (4/13)	-	Aération par ouverture des fenêtres : état des fenêtres (ouvertes/fermées), nb de fenêtres ouvertes en même temps, durée d'ouverture cumulée en h/semaine (6/13)
	Saisons (4/13)	Type de système de ventilation (4/13)	-	Utilisation d'un système de chauffage (4/13)
	Jour/nuit (4/13)	-	-	-

5 Description du parc de logements et des systèmes de ventilation

Cette section fournit une description succincte des caractéristiques clés du parc de logements et de leurs systèmes de ventilation, éléments déjà présentés dans le rapport sur l'état de la ventilation dans les logements, qui semblent utiles de rappeler ici (Assy et al., 2026).

5.1 Le parc de logements

Le parc de logement est représenté en fonction du type de logements et de la date de construction (Tableau 13). À l'échelle du parc (28 802 380 logements), près de 57,5 % des logements enquêtés sont des logements individuels et 42,5 % des logements collectifs.

Le **Tableau 13** présente le pourcentage des logements en fonction de la date de construction mais aussi du type de logements selon l'effectif retenu des logements pour cette étude. Près de 34 % des logements sont construits avant 1967, 29 % avant 1982 et 37 % après 1982.

Tableau 13. Proportion des logements par date de construction

Période de fin de construction	Logement collectif (%)	Logement individuel (%)	Tout logement (%)
Avant 1871	2,5	7,9	5,6
De 1871-1914	11,9	1,9	6,2
De 1915-1948	6,7	9,9	8,5
De 1949-1961	4,7	6,4	5,7
De 1962-1967	13,8	4,0	8,2
De 1968-1974	13,5	15,7	14,8
De 1975-1981	13,1	14,7	14,0
De 1982-1989	4,3	9,9	7,5
De 1990-2000	15,4	8,2	11,2
De 2001-2005	2,7	5,1	4,1
De 2006-2012	7,7	9,9	9,0
Après 2012	3,7	6,4	5,2
Total	100 %	100 %	100%

Champ : 28 802 380 logements.

La **Figure 12** représente la répartition des logements en fonction du nombre de pièces principales. Les pièces du logement considérées comme principales sont les chambres, les séjours et salons, les cuisines américaines, les studios, les bureaux (sauf s'ils disposent d'une bouche d'extraction), les salles de jeux et les autres pièces (uniquement si elles disposent d'une entrée d'air). Cette classification des pièces en pièces principales reprend celle utilisée pour la CNLI (Lucas et al., 2009a).

Une majorité de logements (près de 64 %) comptent 2 à 4 pièces principales et plus de 32 % de logements disposent de 5 pièces ou plus.

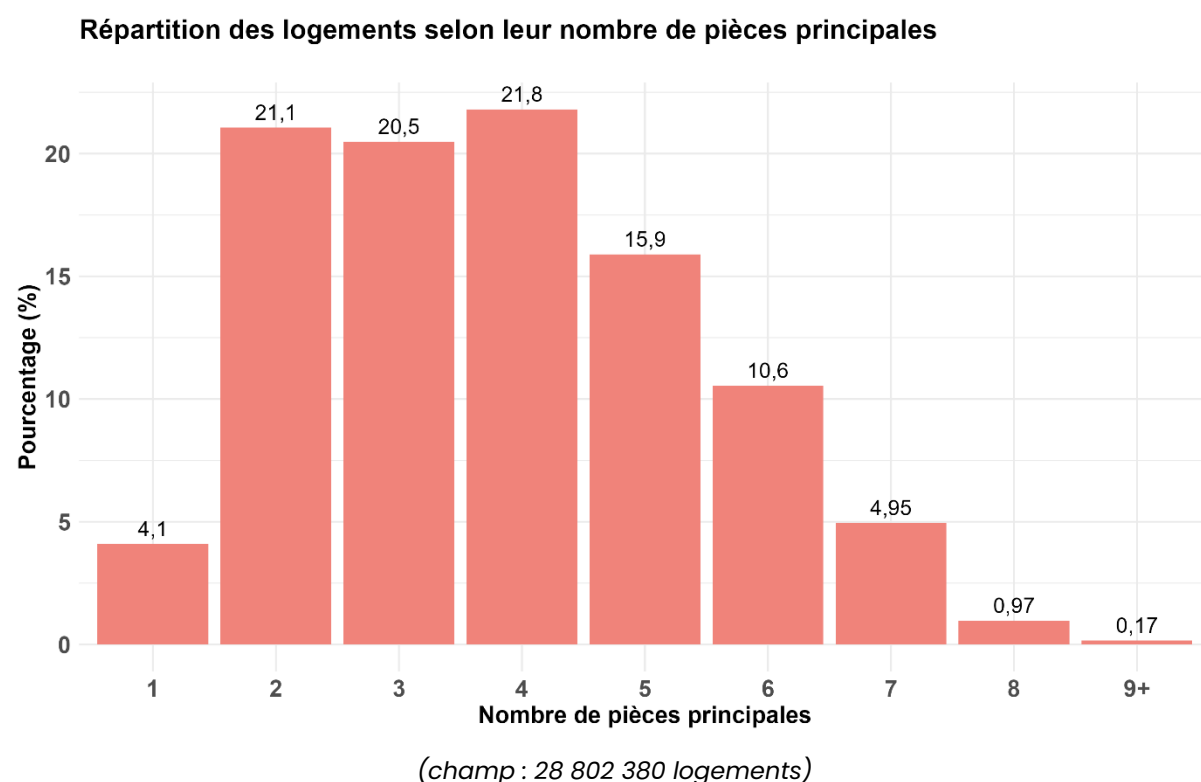


Figure 12. Répartition des logements selon le nombre de pièces principales

La répartition des logements collectifs et individuels selon leur surface est représentée au Tableau 14. La surface médiane des logements collectifs varie de 28 à 206 m² selon le nombre de pièces principales alors que celle des maisons individuelles varie de 50 à 600 m².

Tableau 14. Distribution de la surface du logement (en m2) représentée selon le nombre de pièces principales pour les logements collectifs et individuels

Type de logement	Nombre de pièces principales	Surface médiane (m ²)	Intervalle interquartile (Q1-Q3)	Min-Max observé
Logement collectif	1	28	-	20 - 42
	2	45	35 - 54	24 - 88
	3	71	65 - 80	44 - 137
	4	98	87 - 102	66 - 144
	5	105	105 - 110	89 - 150
	6+	206	125 - 206	109 - 206
Logement individuel	2	50	-	50 - 70
	3	93	61 - 110	55 - 240
	4	109	90 - 121	59 - 240

Type de logement	Nombre de pièces principales	Surface médiane (m²)	Intervalle interquartile (Q1-Q3)	Min-Max observé
	5	123	104 - 140	85 - 280
	6	150	130 - 165	93 - 300
	7	170	130 - 206	100 - 350
	8	200	190 - 250	160 - 280
	9+	600	330 - 600	245 - 600

(champ : 16 564 946 logements individuels et 12 237 434 logements collectifs) ;

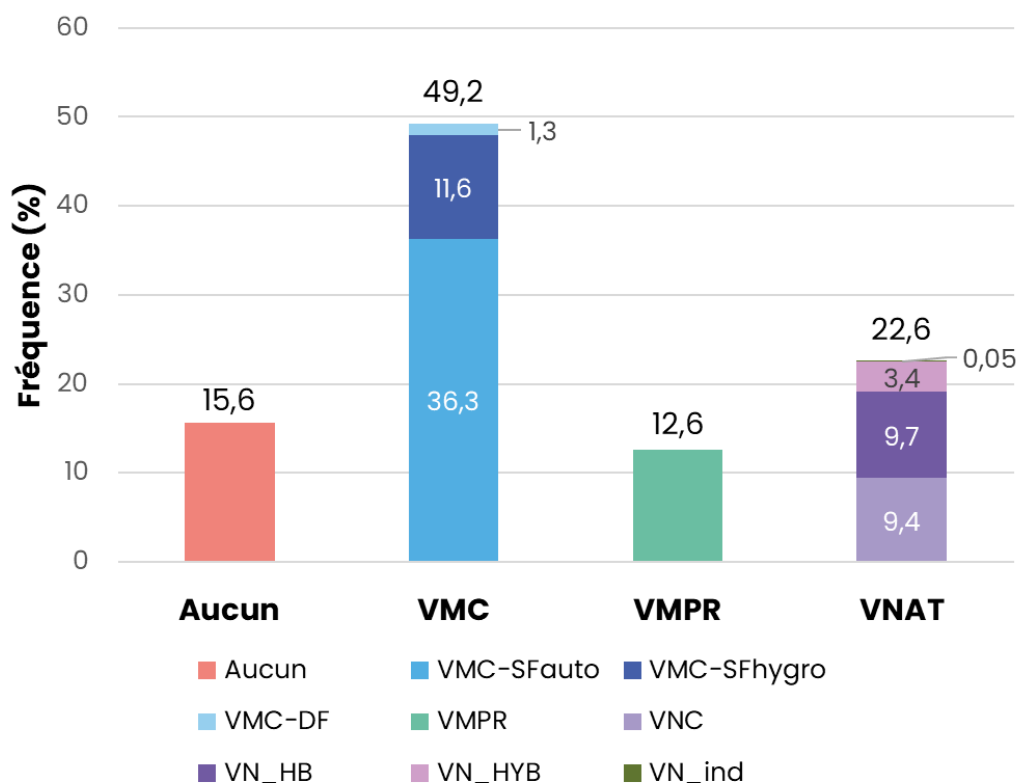
Q1 : premier quartile ; Q3 : 3ème quartile. Q1 et Q3 sont uniquement calculés pour un minimum de 5 observations.

5.2 Les systèmes spécifiques de ventilation

L'objectif de cette partie est de décrire les équipements du parc des résidences principales en France hexagonale continentale en se focalisant sur les systèmes de ventilation. Des descriptions bivariées ont été détaillées pour les différents types de systèmes de ventilation selon le type de logement et la date de fin de construction.

D'après l'effectif des logements retenus pour cette étude (472 logements représentant 28 802 380 logements du parc), le type de système spécifique de ventilation présent dans les résidences principales en France hexagonale continentale est détaillé dans la **Figure 13**.

La ventilation mécanique prédomine dans plus de 61,8 % des logements avec une part prépondérante de logements équipés d'un système centralisé (49,2 %) et le reste doté d'un système de ventilation ponctuel ou réparti (VMPR). La ventilation naturelle est présente dans 22,6 % des logements et enfin 15,6 % des logements ne disposent d'aucun système de ventilation spécifique.



(Champ : 28 802 380 logements)

Figure 13. Part des différents systèmes de ventilation dans les logements

Sur l'ensemble du parc étudié, 49,2 %, soit environ 14 millions des logements sont équipés d'une VMC. Parmi eux, 36,3% (environ 10,5 millions) disposent d'un système de ventilation simple flux par extraction autoréglable (VMC_SFauto), 11,6 % (environ 3,3 millions) sont équipés d'une ventilation simple flux par extraction hygroréglable (VMC_SFhygro) et seulement 1,3 % sont dotés d'un système de ventilation mécanique double flux (VMC_DF), représentant ainsi une part marginale du parc. Aucun système de ventilation mécanique simple flux par insufflation (VMI) n'a été observé durant l'enquête.

La Figure 14 illustre l'évolution de la part de chaque dispositif dans les logements selon la date de construction de manière plus détaillée. La ventilation mécanique (centralisée, répartie ou ponctuelle) domine dans pratiquement toutes les tranches de périodes de construction des logements, tout particulièrement après 1981. La ventilation naturelle oscille entre 10 % et 60 % de part des logements selon la période de construction avec une baisse régulière à partir de 2000. De même, l'absence de dispositif représente entre 5 % et 35 % de logements selon la période de construction, avant de devenir insignifiante pour les logements construits après 2000. Un test d'indépendance du Chi2 indique un lien significatif entre les deux variables : période de construction détaillée et type de système de ventilation.

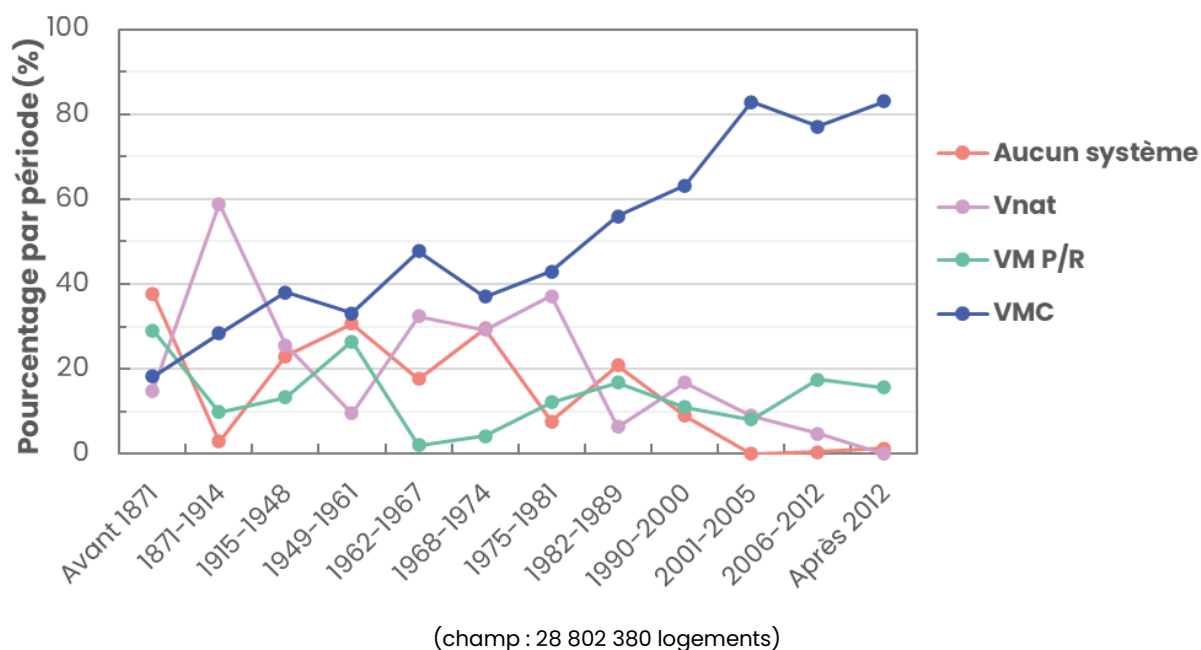


Figure 14. Évolution de la part de chaque dispositif de ventilation dans les logements selon la date de construction

5.3 Effectif de pièces avec composants de ventilation

Au total, **5 488 pièces** ont été enquêtées dans **571 logements**, dont 1 520 entrées d'air ont été recensées dans 394 logements (69 % des logements). Parmi ces 1 520 entrées d'air, 1 202 sont situées dans les pièces de vie de 359 logements (62,9 % des logements). L'exploitation se focalisera sur les seules entrées d'air présentes en pièces de vie.

Concernant les grilles d'aération, 549 ont été identifiées dans autant de pièces respectives représentant 239 logements. Les grilles d'aération sont présentes dans 187 pièces de vie, dans 293 pièces de service (dont 46 cuisines US comptées également en pièces de vie) et dans 115 autres pièces (buanderies, dressings, ateliers, cage d'escaliers, celliers, garages communicants, etc.).

Dans les logements équipés d'un système de ventilation mécanique, un total de 3 671 pièces a été inspecté au sein de 380 logements. Parmi celles-ci, 1 410 bouches de ventilation ont été recensées (représentant 375 logements), pour lesquelles 1 275 mesures de débit ou de pression ont été mises en œuvre (130 bouches d'extraction et 5 bouches d'insufflation n'ont pas fait l'objet de mesures de débit, faute de temps des enquêteurs ou de disponibilité des appareils de mesure). Cela représente 345 logements avec au moins une mesure de débit ou de pression aux bouches de ventilation.

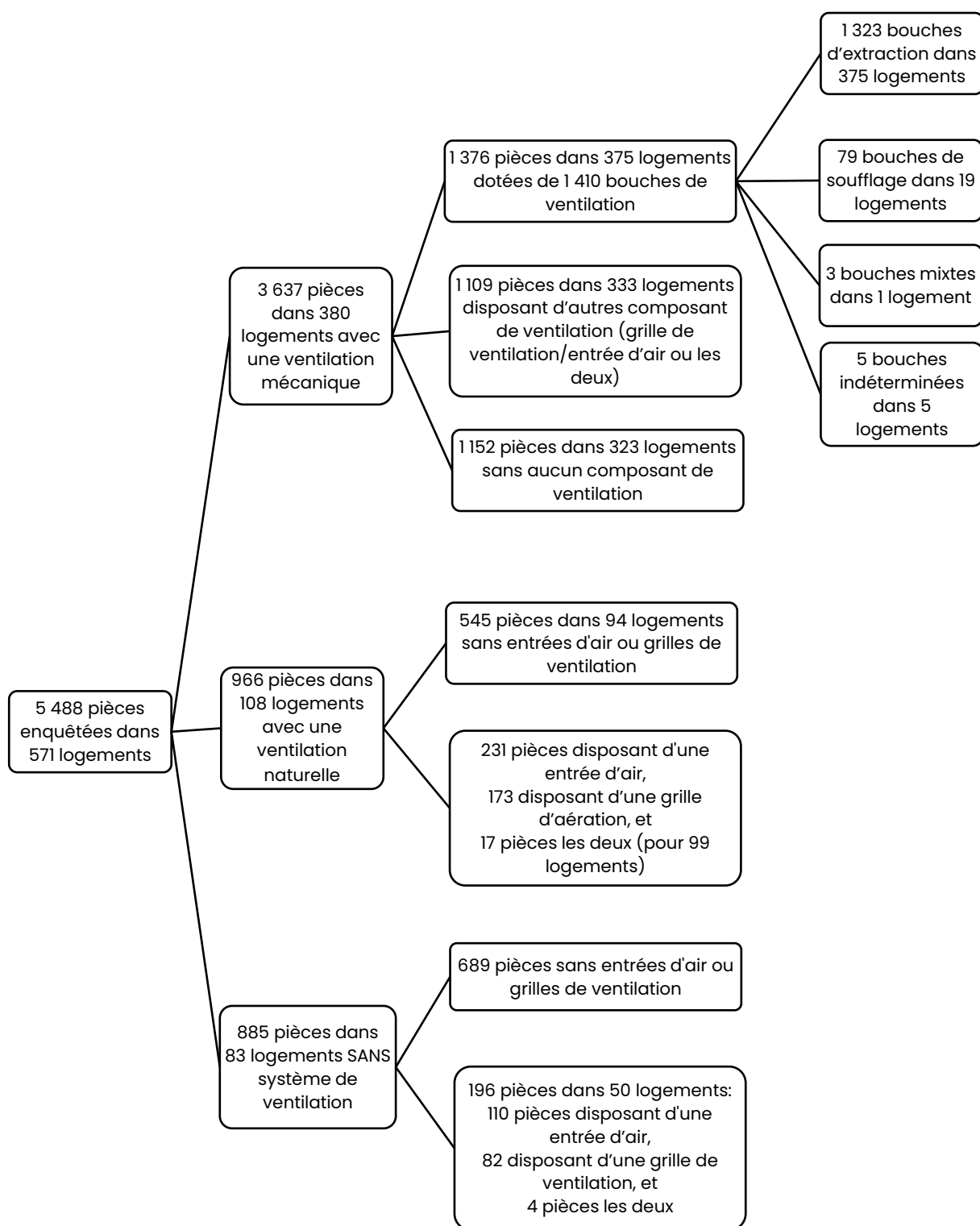


Figure 15. Répartition des pièces avec composants de ventilation selon le type de système du logement

5.4 Conformité des débits d'air extrait totaux mesurés à l'échelle du logement

Le débit total d'air extrait mesuré représente la somme des débits d'air extrait de base mesurés dans les pièces de service d'un logement (cuisine, salle de bains et WC). Dans le cas où le débit d'air extrait n'a pas été mesuré dans une des pièces de service (a minima une cuisine, et une salle de bain et/ou un WC¹¹), le débit total et le ratio ne sont pas calculés pour ce logement. Ainsi, pour chaque logement, le débit d'air extrait total comprend au moins une mesure en cuisine et au moins une mesure en salle de bains ou WC (une salle de bains pouvant comprendre un cabinet d'aisance). De ce fait, les pièces avec des bouches d'extraction hygroréglables, pour lesquelles une mesure de pression est effectuée, ne sont pas prises en compte (voir le rapport sur l'état de la ventilation, Assy et al., 2025).

Le **débit d'air extrait total mesuré** est rapporté à la valeur réglementaire (débit total minimal de référence) indiquée dans l'arrêté du 24 mars 1982 pour les logements construits après 1982 ou les logements construits avant 1969 réhabilités en VMC. Les logements construits entre 1969 et 1981 utilisent une valeur de référence (non réglementaire) basée sur des exemples de solutions publiées dans les cahiers du CSTB de 1971 (CSTB, 1971).

Le débit d'air extrait total minimal a pu être calculé pour 138 logements équipés d'un système de ventilation mécanique sans bouches d'extraction hygroréglables et comprenant au moins une mesure de débit d'air extrait en cuisine et au moins une mesure en salle de bains et/ou WC. Le **Tableau 26** décrit la distribution du débit d'air extrait total minimal mesuré à l'échelle du logement et le ratio (débit total minimal mesuré / débit total minimal de référence). Près de 9 % des 138 logements montrent un dysfonctionnement de leur système de ventilation mécanique avec un débit d'extraction total nul. Le débit d'air extrait total minimal médian est de 78 m³/h. Le maximum observé est de plus de 300 m³/h pour un logement de 2 pièces principales.

La **Figure 16** représente la distribution des débits totaux minimaux mesurés à l'échelle du logement. Une variabilité importante est marquée avec des valeurs observées sur une large plage de débits. La distribution des débits de référence attendus pour les logements conformes est principalement concentrée entre 90 et 130 m³/h, avec des fréquences maximales autour de 100 à 120 m³/h. Les distributions observées et attendues se recouvrent partiellement, mais certains logements présentent des débits mesurés inférieurs aux valeurs de référence. Cela suggère qu'une part des logements pourrait ne pas atteindre les débits totaux minimaux attendus à l'échelle du logement.

La **Figure 17** représente la distribution du ratio du débit d'air extrait total minimal (mesuré / référence) calculé à l'échelle du logement. Le ratio du débit total mesuré par rapport à la

¹¹ Les salles de bains peuvent également comporter des cuvettes WC et être déclarées autant comme une salle de bains ou un cabinet d'aisance (toilettes). La présence de mesures de débit d'air extrait dans une seule de ces pièces est jugée suffisante pour le calcul du débit total minimal d'air extrait. Par défaut, toutes les salles de bains, toilettes et cuisines sont prises en compte dans le calcul.

valeur de référence varie de 0 à 5, avec une valeur médiane de 0,83. Moins de la moitié des logements (37,7 %) présentent un débit d'air extrait total minimal conforme avec ratio ≥ 1 .

Tableau 15. Statistiques des débits d'air extraits totaux à l'échelle du logement et du des ratios du débit total mesuré sur le débit total de référence

Statistique	Débits d'air extrait total minimal au niveau du logement (m ³ /h)	Ratio (Débit total minimal mesuré / Débit total minimal de référence)
N (logements)	138	138
Moyenne	81,3	0,84
Écart-type	56,3	0,65
Minimum	0	0
% Logements Débits = 0	8,7 %	-
% Logements Ratio ≥ 1	-	37,7 %
10ème centile	6,8	0,06
25ème centile	42,0	0,42
Médiane	78,0	0,83
75ème centile	111,0	1,10
90ème centile	141,2	1,45
Maximum	314	5,05

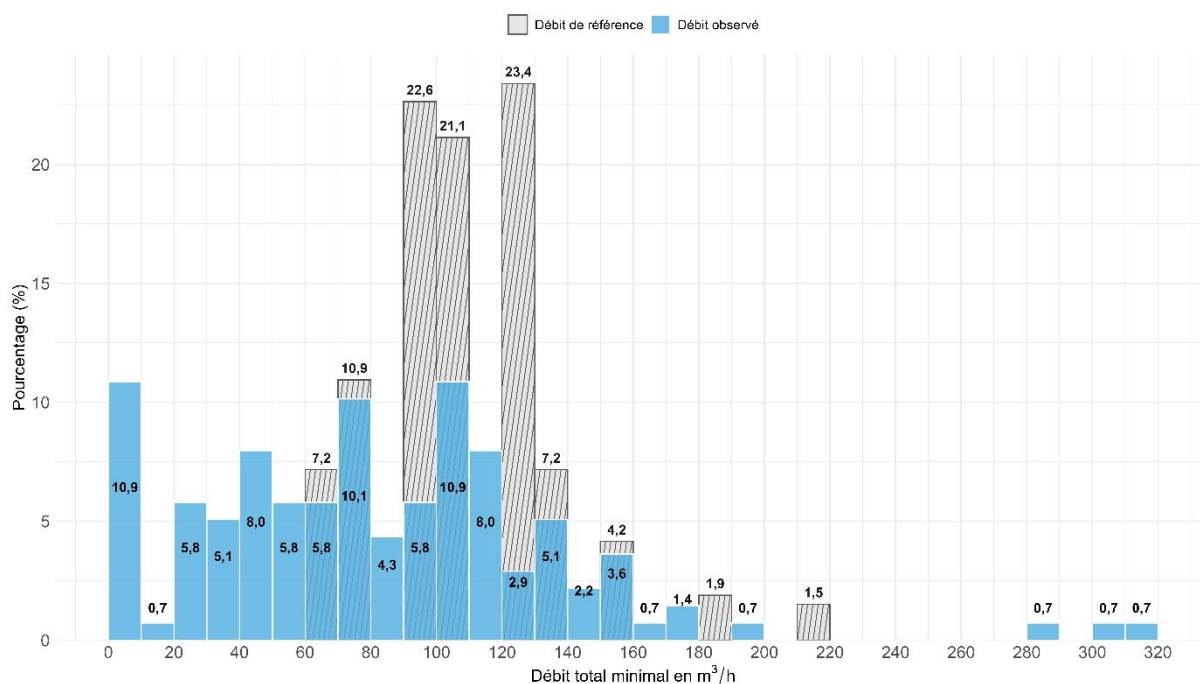


Figure 16. Débits d'air extraits totaux mesurés à l'échelle du logement par rapport aux valeurs de référence (n = 138 logements).

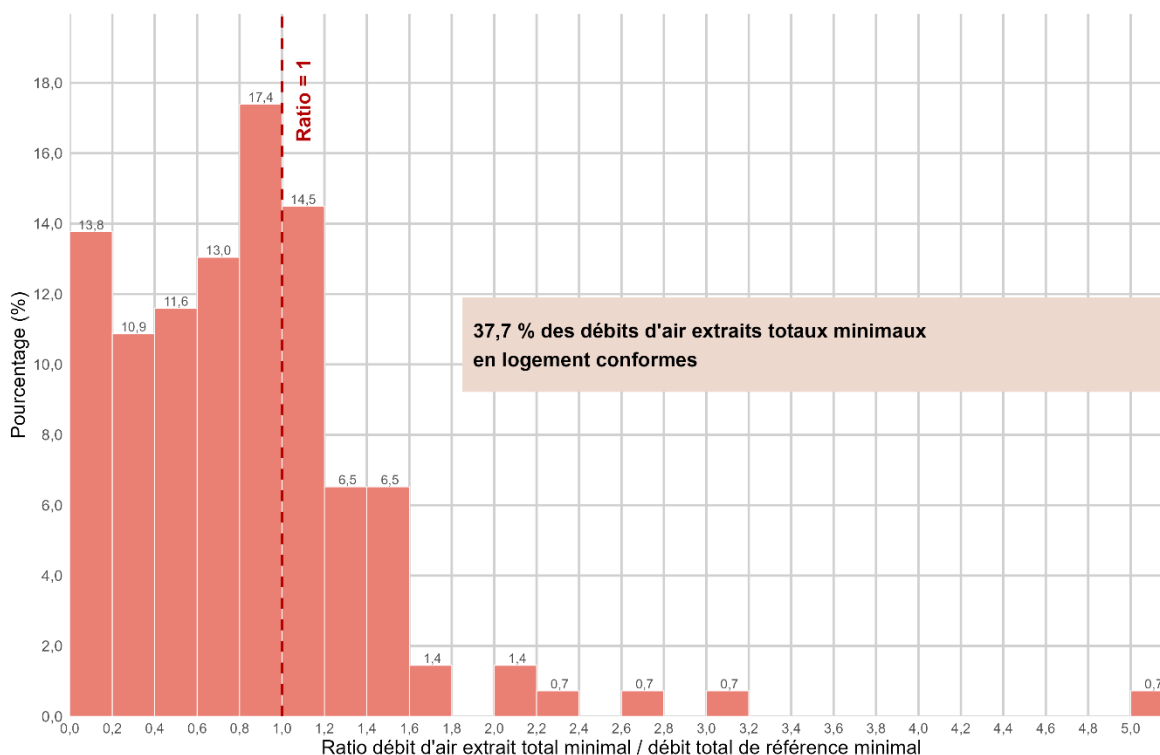


Figure 17. Ratios des débits d'air extraits totaux mesurés à l'échelle du logement par rapport à la valeur de référence (n = 138 logements).

Le **Tableau 16** présente en synthèse l'état de conformité des mesures de débit d'air aux bouches d'extraction autoréglables en cuisine (débit de base et de pointe), en salle de bains, en WC et sur l'ensemble du logement. De manière générale, plus de la moitié des logements ne sont pas conformes en termes de débit d'air extrait, en particulier au niveau des salles de bains et des WC. En cuisine, le débit d'air extrait de base s'avère conforme dans la moitié des cas. Cependant, le débit d'air extrait de pointe est loin d'atteindre les valeurs préconisées.

Tableau 16. Part de mesures de débits mesurés ne respectant pas les valeurs de référence (logements équipés d'un système de ventilation mécanique hors bouches hygroréglables)

	Cuisine Débit de base	Cuisine Débit de pointe	Salle de bain	WC	Débit total minimal
Échelle	Bouches d'extraction autoréglables				Logement
n	147	140	300	221	138
Non conforme	50,3 %	89,3 %	71,3 %	64,3 %	62,3 %
Conforme	49,7 %	10,7 %	28,7 %	35,7 %	37,7 %

Pour les bouches d'extraction hygroréglables, évaluées au travers d'une mesure de différence de pression, seules 30 % d'entre elles apparaissent conformes (Assy et al., 2026). Dans la grande majorité des cas, les pressions mesurées sont insuffisantes au regard de la plage préconisée de fonctionnement.

De nombreux autres facteurs sont nécessaires pour caractériser la conformité du système de ventilation mécanique dans son ensemble. Le protocole RE2020¹² liste les nombreux points de vérification obligatoires à respecter dans le cadre d'une inspection du système de ventilation mécanique pour le résidentiel neuf. La CNL2, n'ayant pas pour objectif de réaliser un examen minutieux du système, ne permet pas de renseigner l'ensemble des critères répertoriés et de ce fait ne peut pas juger de la conformité du système de ventilation dans son ensemble.

5.5 État des ouvrants pendant la semaine d'enquête

5.5.1 Ouverture des fenêtres pendant la semaine d'enquête

L'ouverture des fenêtres pendant la semaine en fonction de la période de chauffe impacte directement le renouvellement de l'air à l'intérieur du logement et de ce fait les niveaux de concentration des polluants mesurés, au travers du transfert entre l'extérieur et l'intérieur d'une part et de la dilution par de l'air neuf considéré propre d'autre part. La personne de référence du ménage a renseigné la fréquence d'ouverture des fenêtres dans le séjour principal, la chambre principale et dans tout le logement pendant la semaine d'enquête, de jour comme de nuit (cf. Tableau 17). Les durées d'ouvertures des fenêtres sont exprimées à la journée (période diurne ou nocturne) en moyenne sur la semaine.

Tableau 17. Fréquence d'ouverture des fenêtres pendant la semaine d'enquête des logements (champ : 28 802 380 logements)

Fréquence d'ouverture des fenêtres sur la semaine	Ouverture des fenêtres la nuit			Ouverture des fenêtres la journée		
	Séjour (%)	Chambre (%)	Logement (%)	Séjour (%)	Chambre (%)	Logement (%)
Rarement ou jamais	75,6	70,8*	69,5	5,2	4,2*	4,4
Moins de 30 min par jour	0,7	1,2	1,8	19,4	19,1	15,0
Entre 30 min et 1 heure par jour	0,8	0,3	1,6	19,2	20,4	20,7
Plus d'une heure par jour	18,1	27,2	26,7	52,5	55,9	59,4
Ne sait pas	4,8	0,5	0,4	3,7	0,4	0,5

¹²

https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/protocole_ventilation_re2020_v2.pdf

Total	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
--------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

**Comprend 0,2 % de logements pour lesquels la chambre principale ne dispose pas de fenêtres*

Les résultats montrent une nette différence entre les habitudes d'aération la nuit et celles en journée. La nuit, les fenêtres sont rarement ouvertes : plus de 3 logements sur 4 (75,6 %) n'ouvrent que rarement ou jamais celles du séjour. La fenêtre de la chambre est un peu plus souvent ouverte (près de 29 %) et le plus souvent plus d'une heure par jour. A l'échelle du logement, la fréquence d'ouverture des fenêtres la nuit se situe autour de 30 % et très souvent plus d'une heure.

La journée, en revanche, les comportements changent complètement. Une majorité de ménages ouvrent plus souvent leurs fenêtres. Plus d'un foyer sur deux ouvrent les fenêtres du séjour ou de la chambre plus d'une heure par jour. Pour seulement 5 % des cas, les fenêtres de la chambre et du séjour ne sont que rarement ouvertes sur la semaine. Les résultats à l'échelle du logement sont similaires.

Deux modes de fonctionnement distincts se dégagent : une aération généralement limitée la nuit, mais plus régulière et plus longue le jour. Ces comportements varient bien sûr avec la période de l'année.

La **Figure 18** distingue la fréquence d'ouverture de fenêtres selon la période de chauffe / hors-chauffe de l'enquête. En période de chauffe, l'ouverture des fenêtres la nuit est très rare au niveau du séjour. Au niveau de la chambre et plus globalement du logement, un peu plus de 10 % des foyers ouvrent leurs fenêtres la nuit. En journée, l'ouverture des fenêtres est beaucoup plus fréquente pour 95 % des logements dont la moitié ouvrent plus d'une heure par jour en période de chauffe.

En période hors-chauffe, la proportion de logements qui ouvrent leurs fenêtres la nuit dépasse 80 %. Le séjour reste lui un peu moins souvent aéré la nuit (70 % des logements environ). En journée, plus de 80 % des logements ouvrent leurs fenêtres plus d'une heure par jour. Ces écarts sont statistiquement significatifs, en particulier la nuit ($p < 10^{-4}$).

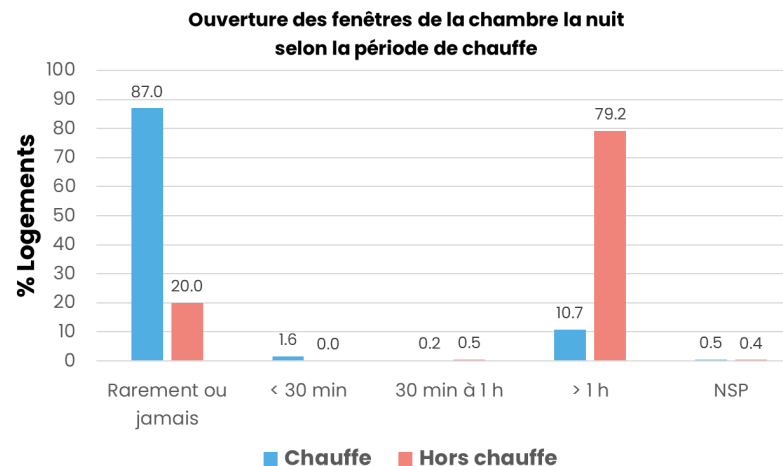
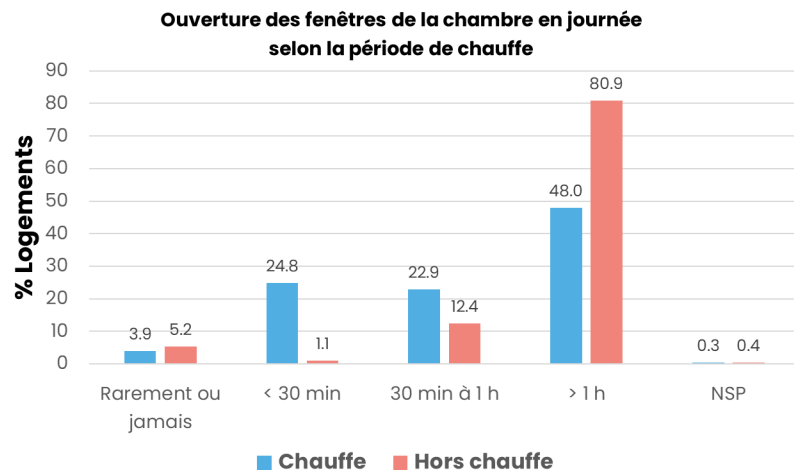
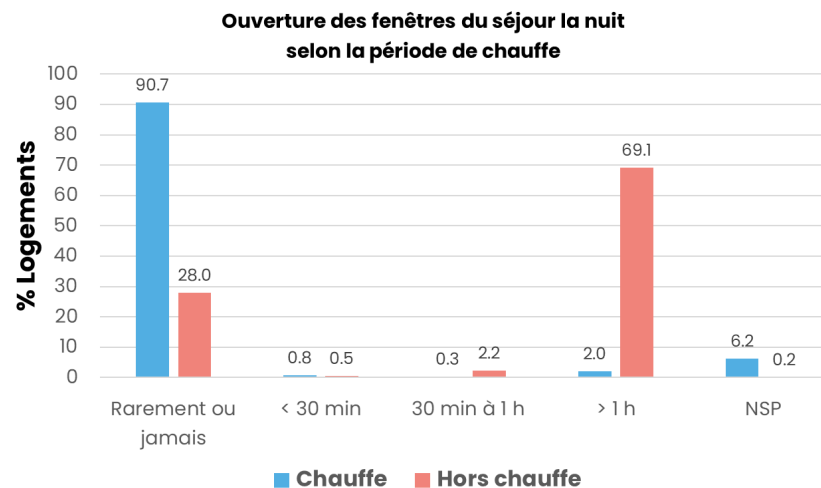
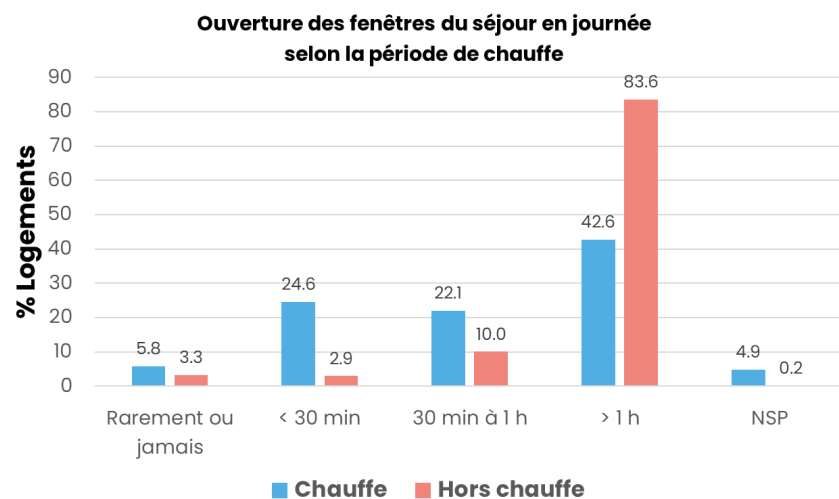


Figure 18. Fréquence d'ouverture des fenêtres de la chambre et du séjour la nuit et le jour pendant la semaine d'enquête selon la période de chauffe

5.5.2 Ouverture et détalonnage de la porte de la chambre selon le système de ventilation

L'ouverture de la porte de la chambre (en particulier celle occupée par la personne de référence du ménage) permet d'accentuer l'apport d'air provenant des autres parties du logement. L'air entrant dans la chambre par ce biais n'est pas de l'air neuf, il peut être plus chargé en CO₂ (et en autres polluants) que l'air déjà présent dans la chambre. En l'absence d'autres occupants du logement (et de sources polluantes dans le reste du logement), ce flux d'air provenant de l'intérieur peut permettre de diluer la concentration des produits métaboliques accumulés dans l'air pendant la nuit. A l'inverse en journée, l'ouverture de la porte de la chambre peut faire augmenter la concentration des polluants de l'air de la chambre du fait d'un équilibrage des substances émises dans le logement sur l'ensemble des pièces du logement.

L'ouverture de la porte de la chambre durant la nuit, tel qu'elle a été observée pendant la semaine d'enquête, est étudiée au regard du type de système de ventilation présent dans le logement (**Tableau 18**). La porte de la chambre est en règle générale ouverte ou entrebâillée pour la majorité des logements que ce soit la nuit (près de 60 % des logements) ou le jour (près de 80 %). Le type de ventilation du logement ne vient pas significativement modifier l'état d'ouverture de la porte (absence de significativité d'un test du chi-2).

Tableau 18. Ouverture de la porte de la chambre principale pendant la semaine d'enquête au regard du type de système de ventilation du logement

La nuit	Effectifs (n échantillon)		Proportion à l'échelle du parc (%)		
Type de ventilation	Porte ouverte ou entrebâillée	Porte fermée	Porte ouverte ou entrebâillée	Porte fermée	Total
Aucun dispositif de ventilation	45	22	63,5	36,5	100
Ventilation naturelle	55	32	60,8	39,2	100
Ventilation mécanique répartie ou ponctuelle	36	31	50,7	49,3	100
VMC	142	106	59,3	40,7	100
Total	278	191	59,2	40,8	100
Le jour	Effectifs (n échantillon)		Proportion à l'échelle du parc (%)		
Type de ventilation	Porte ouverte ou entrebâillée	Porte fermée	Porte ouverte ou entrebâillée	Porte fermée	Total
Aucun dispositif de ventilation	54	13	70,8	29,2	100
Ventilation naturelle	72	15	86,8	13,2	100
Ventilation mécanique répartie ou ponctuelle	51	15	82,6	17,4	100
VMC	184	64	77,2	22,8	100
Total	361	107	79,1	20,9	100

(Champ : 27 848 214 logements)

Le détalonnage des portes d'accès à la chambre principale (incluant les studios) a été inspecté lors des enquêtes menées dans les logements. Cette information permet de déterminer si le principe de balayage fréquent dans les logements équipés d'une VMC est respecté ou non. Le détalonnage de la porte de la chambre a été croisée avec le type de système de ventilation présent dans le logement.

Pour plus de la moitié des logements (56,5 %), le détalonnage des portes d'accès à la chambre principale est systématiquement inférieur à 1 cm, insuffisant pour assurer un balayage correct portes fermées. Pour les logements équipés de VMC, plus de 51 % des logements ont au moins une porte d'accès à la chambre avec un détalonnage de moins de 1 cm. Pour ces logements, porte de la chambre fermée, le principe de balayage n'est pas assuré. Cela signifie pour des logements en ventilation simple flux par extraction, que l'air neuf peut plus facilement entrer par d'autres pièces que la chambre, qui se retrouve alors isolée et moins bien renouvelée en air. Près de 23 % des logements équipés en VMC maintiennent leur porte d'accès à la chambre fermée le jour dont la moitié présente un détalonnage systématiquement inférieur à 1 cm. La nuit, près de 41 % des logements équipés en VMC maintiennent leur porte de chambre fermée avec un détalonnage inférieur à 1 cm dans la majorité des cas (55,3 %).

Seuls 6 % des logements équipés d'un dispositif de ventilation naturelle sont dans la même situation. Les conditions de balayage ne dépendent ici que du tirage thermique et de la pression exercée par le vent, conditions essentiellement dépendantes de l'extérieur du logement. Le principe de balayage n'est donc pas forcément assuré en permanence et ce indépendamment de l'état de la porte d'accès à la chambre.

Pris globalement, il n'y a pas de lien établi entre le détalonnage des portes d'accès à la chambre et le type de ventilation du logement (test d'indépendance du chi-2 entre les deux variables non significatif). Même si, une tendance se dessine avec une proportion plus faible de logements équipés en VMC présentant un détalonnage de porte de chambre inférieur à 1 cm. Et à l'inverse, une tendance à une proportion plus élevée de logements sans aucun système de ventilation présentant un faible détalonnage de la porte de la chambre est également observée.

Tableau 19. Détalonnage des portes d'accès à la chambre principale au regard du type de système de ventilation du logement

Détalonnage de toutes les portes d'accès à la chambre	Effectif (n échantillon)	Proportion à l'échelle du parc (%) (n = 28 802 380 logements)				
		< 1 cm	[1 ; 2 cm]	< 1 ou > 2 cm*	≥ 2 cm	Total
Aucun dispositif de ventilation	67	67,8	16,0	0,9	15,2	100
Ventilation naturelle	88	55,9	37,9	3,8	2,4	100

Détalonnage de toutes les portes d'accès à la chambre	Effectif (n échantillon)	Proportion à l'échelle du parc (%) (n = 28 802 380 logements)				
Type de ventilation		< 1 cm	[1 ; 2 cm]	< 1 ou > 2 cm*	≥ 2 cm	Total
Ventilation mécanique répartie ou ponctuelle	67	62,6	25,3	0,8	11,3	100
VMC	250	51,6	34,1	4,5	9,8	100
Total	472	56,5	31,0	3,3	9,2	100

*Détalonnage inférieur à 1 cm ou supérieur à 2 cm, variable selon les portes d'accès.

L'information relative au détalonnage des portes a été collectée pour l'ensemble des pièces investiguées au sein de chaque logement enquêté. Seules les informations relatives à la chambre principale (dont studios) ont été exploitées ici.

5.6 Indicateurs d'occupation sur la semaine à l'échelle du logement

Le Tableau 20 fournit les statistiques de quatre indicateurs d'occupation calculés au niveau du logement à l'échelle du parc de résidences principales (méthodologie de calcul détaillée dans Assy et al. (2026)). Le nombre moyen d'occupants du logement sur la semaine varie de 0 à 3 pour 95 % des logements avec une médiane de 1,4 occupants sur la semaine. Le taux d'occupation du logement sur la semaine est d'au moins 51,4 % pour neuf logements sur dix. Dans plus de 95 % des cas, le logement est occupé par au moins un individu plus de la moitié du temps. Et dans la moitié des logements, le taux de présence est supérieur à 86,4 % du temps. Cela se traduit par une durée de présence d'au moins un occupant dans le logement supérieure à 20,6 heures par jour pour la moitié des logements.

Tableau 20. Indicateurs d'occupation sur la semaine à l'échelle du logement

	Parc national de résidences principales							
Indicateur d'occupation	N parc	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Moyenne
Nombre moyen d'occupants sur la semaine	29 679 093	0,72	0,87	1,39	1,85	2,82	3,09	1,50
Taux d'occupation du logement (%)	29 679 093	49,4	62,1	74,4	84,5	92,7	95,6	72,2
Taux de présence dans le logement (%)	29 679 093	62,0	76,2	85,7	93,0	96,2	98,4	82,8
Durée moyenne journalière de présence dans le logement	29 679 093	14,9	18,3	20,6	22,3	23,1	23,6	19,9

6 Débits de renouvellement d'air nocturne

RA_n

6.1 Concentrations de CO₂ en périodes d'occupation du logement

La détermination du renouvellement d'air se fait sur la base des concentrations en CO₂ mesurées dans le logement et la production métabolique associée aux occupants présents.

La concentration moyenne hebdomadaire en CO₂ dans la chambre ou le séjour a été déterminée sur les seules périodes de présence d'au moins un occupant dans le logement sur la semaine (**Tableau 21**). De manière générale, la concentration moyenne observée dans la chambre est supérieure à celle observée dans le séjour. Elle est également supérieure à celle calculée sur l'ensemble de la semaine, toutes périodes confondues.

La concentration moyenne nocturne en CO₂ dans la chambre a également été calculée sur la plage de 01h00 à 05h30. La moitié des logements montre une concentration en CO₂ nocturne supérieure à 1 010 ppm et dépassant 2 000 ppm pour près de 14 % des foyers. En se focalisant sur les seules 60 plus grandes valeurs entre 01h00 et 05h30 sur l'ensemble de la semaine, la concentration moyenne en CO₂ peut dépasser 4 000 ppm pour près de 6 % des logements, notamment en fin de nuit.

Tableau 21. Distributions de la concentration moyenne en CO₂ en période d'occupation, en toutes périodes et sur la base des 60 plus grandes valeurs entre 01h00 et 05h30 (en ppm)

Concentration en CO ₂ durant l'occupation	Effectif observé	MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
<i>Dans le séjour</i>	472	767	560	618	727	848	1 010	1 100	28 802 380
<i>Dans la chambre</i>	472	941	518	658	834	1 126	1 465	2 073	28 802 380
Concentration en CO ₂ toutes périodes	Effectif observé	MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
<i>Dans la chambre</i>	472	817	509	623	786	1 048	1 368	1 862	28 802 380
Concentration en CO ₂ moyenne (01h00 - 05h30)	Effectif observé	MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
<i>Dans la chambre</i>	472	1 070	535	705	1 010	1 593	2 297	2 967	28 802 380
Concentration en CO ₂ moyenne 60 plus grandes valeurs (01h00 - 05h30)	Effectif observé	MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
<i>Dans la chambre</i>	472	1 299	601	831	1 249	1 910	2 968	4 029	28 802 380

MG : moyenne géométrique

6.2 Débits de renouvellement d'air nocturne

Le débit de renouvellement d'air nocturne équivalent RA_n a été calculé sur la base de la concentration en CO_2 moyenne calculée sur les 60 plus grandes valeurs entre 01h00 et 05h30 (C_n). Un débit de renouvellement d'air nocturne moyen RA_{nuit} a également été calculé mais sur la base de la concentration moyenne en CO_2 entre 01h00 et 05h30 (C_{nuit}). Le Tableau 22 et la Figure 19 présentent les distributions de ces débits de renouvellement d'air.

Sans surprise, le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n est plus petit que le débit de renouvellement d'air nocturne moyens RA_{nuit} , du fait que les concentrations de CO_2 prises en compte sont plus grandes pour une production métabolique quasi-identique ($C_n > C_{nuit}$). La médiane pour le débit de renouvellement d'air moyen nocturne RA_{nuit} est de 23,6 m³/h et de 17,5 m³/h pour le débit de renouvellement d'air nocturne équivalent RA_n .

Tableau 22. Distributions représentées des deux indicateurs de débit de renouvellement d'air nocturne RA_n et RA_{nuit} (m³/h)

Indicateur	Effectif observé	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
RA_n	472	28,3	4,4	7,5	17,5	35,1	54,3	86,9	28 802 380
RA_{nuit}	472	37,3	6,3	10,8	23,6	46,2	67,8	114,3	28 802 380

MA : moyenne arithmétique



Figure 19. – Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n

Le RA_n traduit plus un débit de renouvellement d'air minimal dans le logement, essentiellement porté par les contributions relatives aux infiltrations et au système spécifique de ventilation éventuellement présent. La contribution de ce dernier s'exprime également en termes d'efficacité de renouvellement d'air au niveau de la chambre principale. Des ouvrants restés ouverts pendant la nuit peuvent également contribuer notamment au regard des valeurs les plus élevées. Les débits obtenus ont été comparés aux débits d'extraction observés sur la base des seules mesures aux bouches d'extraction pour les logements équipés d'une ventilation mécanique (voir ci-après).

Pour les logements non équipés d'une ventilation mécanique, le calcul du RA_n permet d'estimer le renouvellement d'air de ces logements durant la période nocturne et de les comparer aux logements équipés d'un système.

6.3 Débit de renouvellement d'air nocturne et type de ventilation

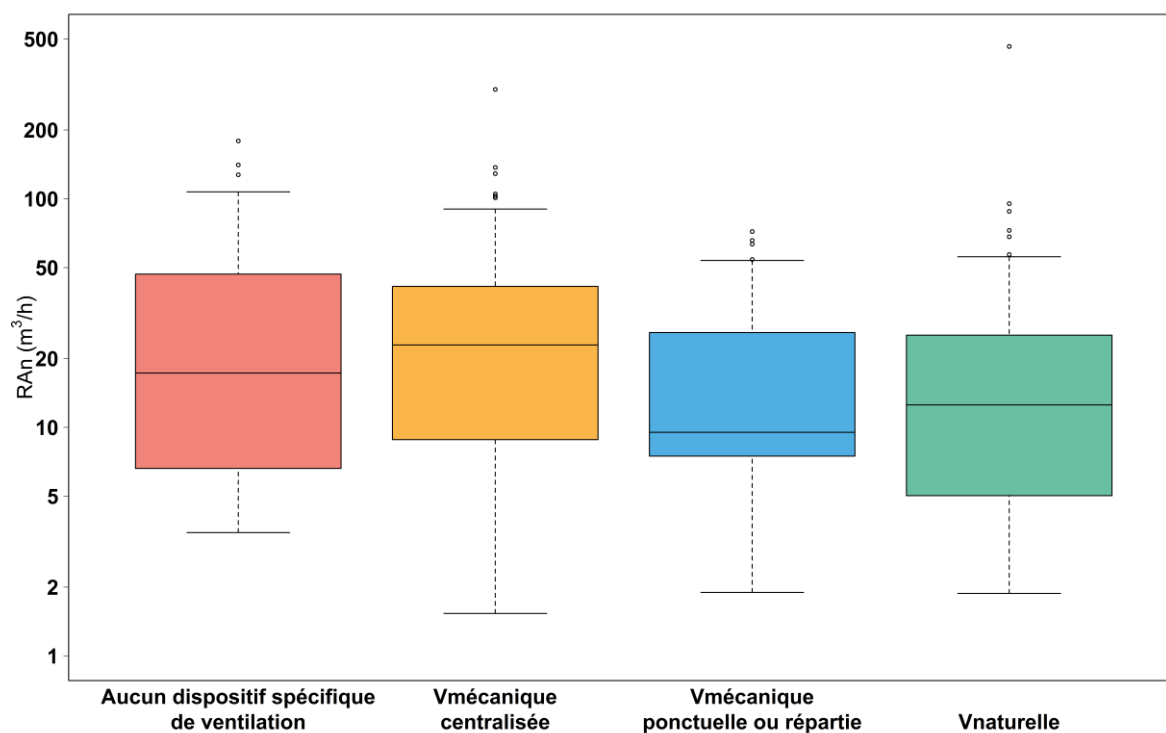
Le **Tableau 23** représente la distribution du débit de renouvellement d'air nocturne (RA_n) dans la chambre en fonction du type de ventilation, sur l'échantillon pondéré. En parallèle, la **Figure 20** illustre ces mêmes distributions. Les valeurs de RA_n ne sont pas significativement différentes selon le type de système de ventilation. La valeur médiane est la plus élevée dans les logements équipés d'une VMC, mais des valeurs de RA_n particulièrement élevées sont observées parmi les logements sans aucun système de ventilation. Les écarts entre valeur moyenne (MA) et valeur médiane (P50) indiquent une distribution asymétrique avec quelques valeurs extrêmes élevées dans chacune des catégories.

Ces comparaisons prennent également en compte les périodes hors chauffe durant lesquelles des ouvrants peuvent rester ouverts plus fréquemment la nuit.

Tableau 23. Distribution du renouvellement d'air nocturne RA_n (m^3/h) par type de ventilation (hors critère de conformité)

Type de ventilation	Effectif observé	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Ventilation mécanique centralisée (VMC)	250	30,2	5,5	8,8	22,9	41,4	59,3	86,9	14 178 585
Ventilation mécanique ponctuelle ou répartie	67	18,5	4,7	7,5	9,5	26,0	51,9	54,3	3 633 099
Ventilation naturelle	88	26,4	4,4	5,0	12,5	25,3	34,0	49,9	6 495 724
Aucun dispositif de ventilation	67	33,1	4,0	6,6	17,3	46,8	93,4	127,5	4 494 972

(Champ : 28 802 380 logements)



(Champ : 28 802 380 logements, échelle logarithmique)

Figure 20. Distribution pondérée du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon le type de ventilation

Le Tableau 24 présente la distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon les sous-groupes des différents types de ventilation. Les débits nocturnes médians varient entre 9,5 m³/h (ventilation mécanique ponctuelle ou répartie) et 35 m³/h (ventilation simple flux par extraction hygroréglable), avec une grande variabilité au sein de chaque groupe. Toutefois, cette répartition bivariée peut cacher l'influence d'autres facteurs qui contribuent plus au débit de renouvellement d'air nocturne que le type de système de ventilation.

Tableau 24. Distribution du renouvellement d'air nocturne RA_n (m³/h) par type de ventilation (hors critère de conformité)

Type de ventilation		Effectif observé	MA	P10	P25	P50	P75	P95	Effectif représenté
Ventilation mécanique	Simple flux par extraction hygroréglable	65	39,1	6,0	15,2	35,0	41,4	128,9	3 339 232
	Simple flux par extraction autoréglable	170	27,8	5,1	8,6	22,6	38,5	83,5	10 466 009
	Double flux (avec ou sans échangeur de chaleur)	15	18,0	7,5	9,9	16,6	22,0	36,3	373 344
	Ponctuelle ou répartie	67	18,5	4,7	7,5	9,5	26,0	54,3	3 633 099
Ventilation naturelle	Par grilles d'aération hautes et basses dans les pièces de service	49	42,3	4,0	8,4	15,2	27,3	463,8	2 784 808

Type de ventilation		Effectif observé	MA	P10	P25	P50	P75	P95	Effectif représenté
	Par conduit d'extraction à tirage naturel avec assistance mécanique (ventilation hybride)	1	4,4						978 862
	Par conduit d'extraction à tirage naturel sans assistance mécanique	37	18,0	6,0	9,6	13,5	26,4	34,0	2 718 851
	Ventilation naturelle indéterminée	1	25,8						13 203
Aucun dispositif spécifique de ventilation		67	33,1	4,0	6,6	17,3	46,8	127,5	4 494 972

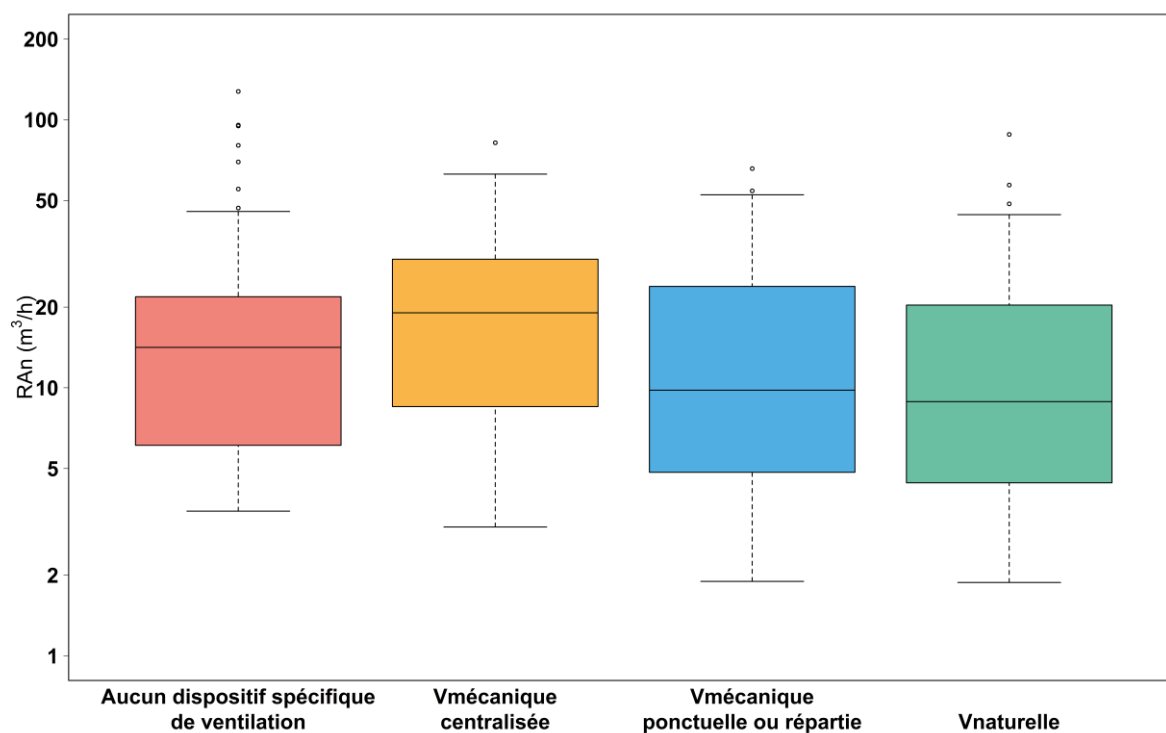
(Champ : 28 802 380 logements)

Le Tableau 25 et la Figure 21 représentent la distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n en fonction du type de système de ventilation pour les logements en période de chauffe ayant les fenêtres fermées en chambre la nuit. Les logements équipés de VMC affichent un RA_n médian de 19 m³/h, supérieur à celui observé en ventilation naturelle (9 m³/h). À l'inverse, les logements sans dispositif spécifique présentent un débit médian plus élevé (14 m³/h), mais aussi une très grande variabilité, suggérant des renouvellements d'air non maîtrisés, liés à des infiltrations ou ouvertures de fenêtres plus marquées. Ces différences ne sont toutefois pas significatives et leur interprétation est à relativiser. La variabilité importante au sein de chaque catégorie en est sans doute la cause.

Tableau 25. Distribution du renouvellement d'air nocturne RA_n (m³/h) par type de ventilation, pour les logements en période de chauffe pendant la semaine d'enquête et ayant les fenêtres fermées en chambre la nuit

Type de ventilation	Effectif observé	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Ventilation mécanique centralisée	154	21,9	5,0	8,5	19,0	30,2	50,6	58,4	8 830 410
Ventilation mécanique ponctuelle ou répartie	51	16,6	4,7	4,8	9,8	23,9	32,7	54,3	2 657 204
Ventilation naturelle	60	11,9	4,2	4,4	8,9	20,4	24,3	29,6	4 474 788
Aucun dispositif de ventilation	49	26,7	4,0	6,1	14,1	21,9	94,8	127,5	3 056 353
Total	314	19,6	4,4	6,1	13,5	24,5	39,9	58,4	19 018 755

(Champ : 19 018 755 logements)



(Champ : 19 018 755 logements, échelle logarithmique)

Figure 21. Distribution pondérée du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n , selon le type de ventilation uniquement en période de chauffe et ayant les fenêtres fermées en chambre la nuit

Pour les logements équipés en ventilation mécanique (VMC et ventilation mécanique ponctuelle ou répartie), un débit d'air extrait total minimal a été calculé sur la base des mesures de débit d'air aux bouches d'extraction en cuisine, salles de bains et WC (Assy et al., à paraître). Une comparaison de ces valeurs avec le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n a été réalisée dans les 119 logements équipés en ventilation mécanique qui disposaient de données communes (Tableau 26). Les valeurs de RA_n sont généralement très inférieures au débit d'air extrait total minimal mesurées aux bouches (débit médian respectif de 16 et 76 m³/h). Les valeurs minimales de RA_n sont un peu plus élevées sans doute du fait de l'intégration des infiltrations. Des valeurs plus faibles de RA_n par rapport au débit d'air total extrait peuvent traduire par exemple une faible efficacité du système de ventilation à renouveler l'air par apport d'un air neuf au niveau de la chambre. Des infiltrations au niveau des pièces de service peuvent notamment perturber le principe du balayage. Le système extrait alors l'air neuf essentiellement au niveau des défauts d'étanchéité au détriment des pièces de vie. Des incertitudes de part et d'autre peuvent également conduire à des écarts dans certains cas contribuant aux différences observées. Lorsque dans certains logements, le RA_n est supérieur au débit total d'air extrait, cela peut mettre en évidence des contributions majoritaires de l'aération par ouverture de fenêtres notamment.

Les deux indicateurs sont finalement assez différents dans ce qu'ils représentent. Le RA_n est censé représenter un renouvellement par apport d'air extérieur minimal durant la période

nocturne principalement centré sur la chambre. Le débit total d'air extrait traduit ce qui est évacué au niveau des pièces de service. Ils doivent de ce fait être considérés de manière complémentaire.

Tableau 26. Comparaison des distributions de débit d'air extrait total minimal à l'échelle du logement et du débit de renouvellement d'air nocturne RAn

Statistique	Débit d'air extrait total minimal au niveau du logement (m ³ /h)	Débit de renouvellement d'air nocturne RAn (m ³ /h)
N (logements)	119	119
Moyenne	79,1	24,9
Écart-type	54,4	31,9
Minimum	0	2,2
P10	4,0	5,3
P25	41	7,6
Médiane	76	16
P75	111	32
P90	144	52
Maximum	303	301

Données non pondérées

6.4 Débit de renouvellement d'air et périodes de chauffe et de hors chauffe

L'analyse de la distribution des débits de renouvellement d'air nocturne (RAn) en fonction de la période de chauffe ou de hors-chauffe (cf. **Figure 22**) révèle des différences significatives (p-valeur = 0,0002). En période hors chauffe, la proportion de débits supérieurs à 40 m³/h atteint près de 48 % contre seulement 12 % en période de chauffe. Cela s'accompagne également d'une occurrence plus faible de faibles débits de renouvellement d'air (< 20 m³/h) par rapport à la période de chauffe. Cette différence peut être attribuée à une contribution plus importante de l'aération par ouverture de fenêtres sur le renouvellement d'air nocturne en période hors chauffe.

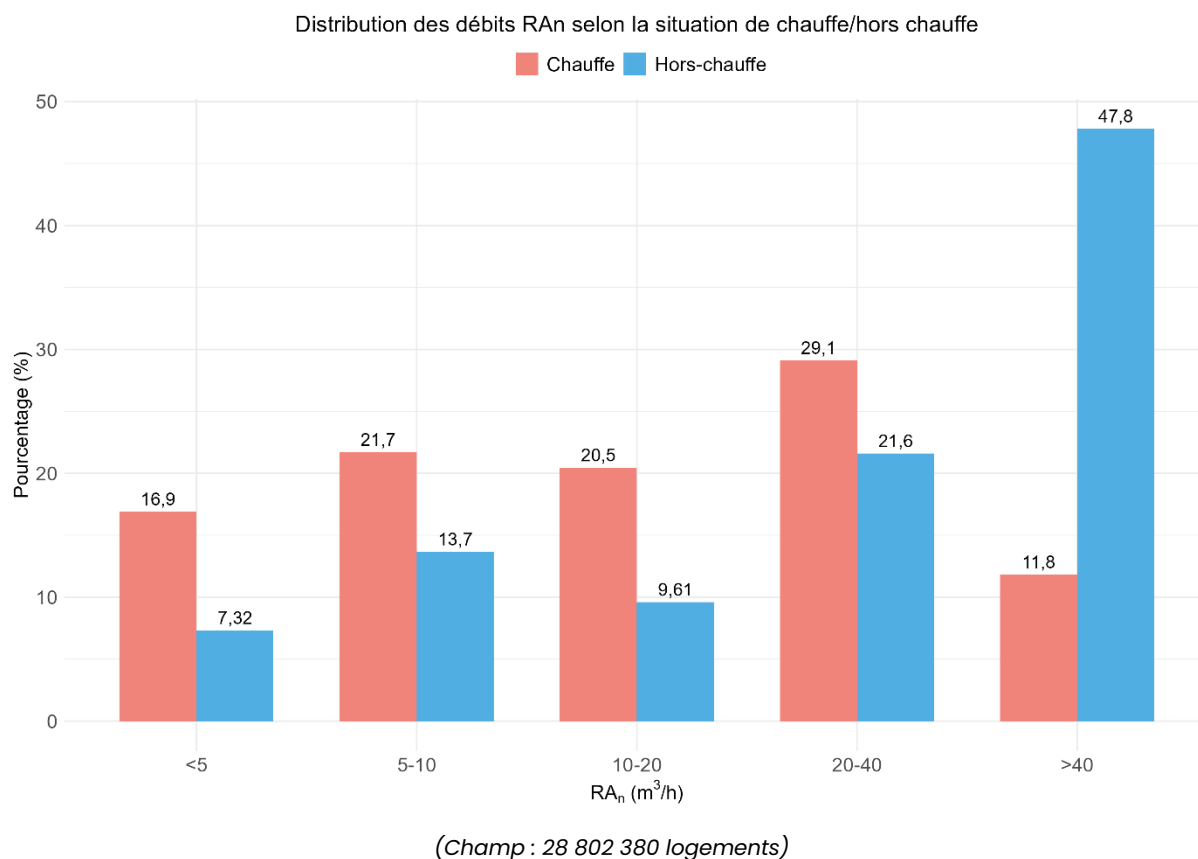


Figure 22. Débits des renouvellements d'air nocturne RAn et en fonction de la situation de chauffe ou d'hors chauffe des logements pendant la semaine d'enquête

6.5 Renouvellement d'air et date de construction des logements

Le Tableau 27 montre la distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RAn selon la date de construction du logement. Dans l'ensemble, aucun lien significatif n'apparaît entre la date de construction et le renouvellement d'air nocturne.

Tableau 27 – Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RAn selon la date de construction des logements

Période de fin de construction	Effectif observé	Moyenne pondérée	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Avant 1871	55	31,8	4,2	7,9	27,3	52,6	82,0	88,1	1 614 040
De 1871-1914	33	12,7	4,4	4,4	4,42	5,96	34,0	34,0	1 777 617
De 1915-1948	44	23,6	4,2	11,2	23,3	32,8	43,6	54,3	2 460 685

Période de fin de construction	Effectif observé	Moyenne pondérée	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
De 1949–1961	22	22,7	3,5	9,5	21,3	27,1	50,6	50,6	1 640 839
De 1962–1967	21	25,7	4,1	7,4	9,87	38,5	42,8	137,2	2 350 844
De 1968–1974	48	37,6	5,1	8,9	21,4	33,4	127,5	127,5	4 255 321
De 1975–1981	48	37,1	4,7	8,1	15,2	30,2	46,8	102,8	4 045 227
De 1982–1989	37	25,5	4,5	6,1	10,9	23,2	52,1	59,5	2 167 648
De 1990–2000	55	22,1	8,8	12,0	14,2	29,6	53,1	58,4	3 234 179
De 2001–2005	30	33,0	7,2	8,8	22,0	43,9	83,5	83,5	1 167 065
De 2006–2012	41	28,5	4,8	7,6	23,9	41,4	51,9	62,4	2 585 141
Après 2012	38	24,9	6,1	9,0	16,6	35,0	48,0	65,7	1 503 774

(Champ : 28 802 380 logements)

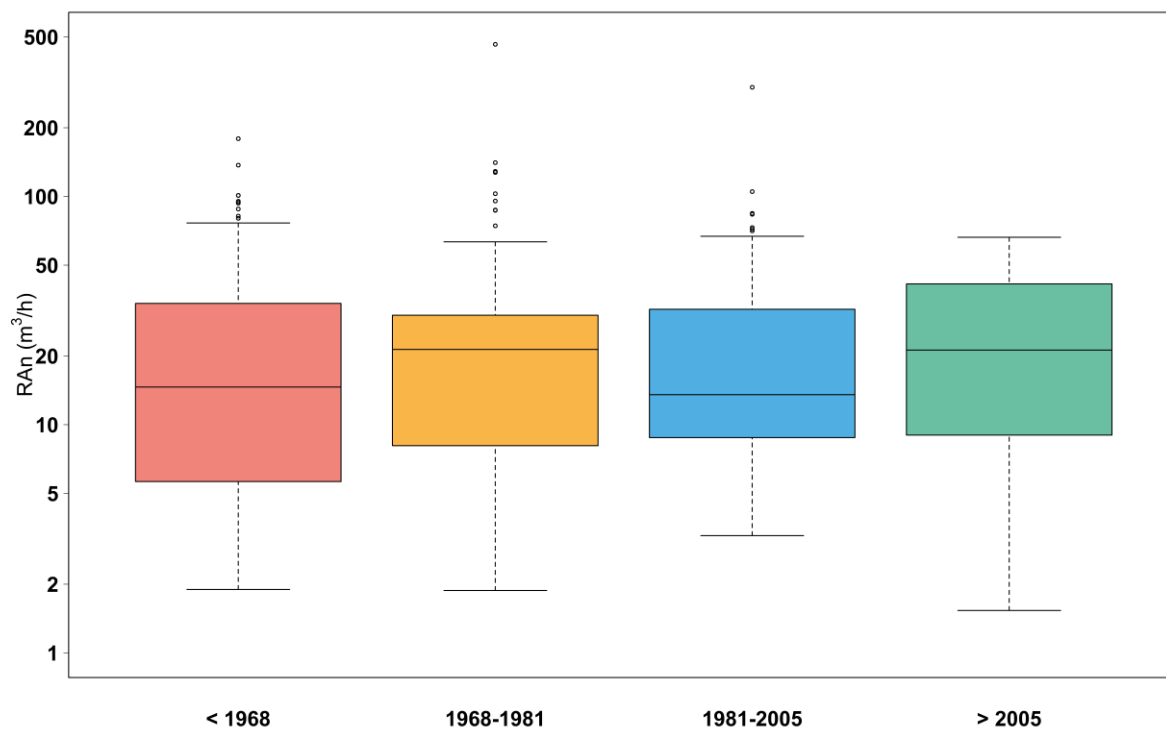
Le **Tableau 28** et la Figure 23 regroupent les périodes de construction en 4 catégories selon la réglementation sur la ventilation des logements :

- Avant 1968 : aucune obligation de système spécifique de ventilation dans le logement ;
- Entre 1968 et 1981 : obligation d’avoir un système spécifique de ventilation à partir de 1969, mais sans recommandations sur les débits d’air extraits ;
- Entre 1982 et 2005 : obligation d’avoir un système spécifique de ventilation fonctionnant en permanence avec des débits d’extraction minimaux à atteindre en cas de ventilation mécanique ;
- À partir de 2005 : pas de changement de la réglementation sur la ventilation, mais limitation de la perméabilité à l’air du bâtiment pour un meilleur contrôle des infiltrations.

Tableau 28 – Distribution du débit de renouvellement d’air nocturne RA_n par période de construction du logement

Période de fin de construction	Effectif observé	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Avant 1968	175	23,3	4,4	5,6	14,6	34,0	50,6	63,3	9 844 025
De 1968–1981	96	37,4	4,7	8,1	21,4	30,1	86,9	127,5	8 300 548
De 1982–2005	122	25,2	6,1	8,8	13,5	32,0	58,4	65,6	6 568 892
Après 2005	79	27,2	5,7	9,0	21,2	41,4	51,9	62,4	4 088 915

(Champ : 28 802 380 logements)



(Champ : 28 802 380 logements, échelle logarithmique)

Figure 23 : Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n pour les 4 périodes de construction en lien avec la ventilation des logements

Après regroupement des périodes de construction en lien avec la réglementation sur la ventilation des logements, aucun lien avec le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n n'apparaît. Plusieurs raisons peuvent expliquer l'absence de lien :

- Le débit de renouvellement d'air nocturne intègre différentes contributions celle du système de ventilation spécifique, les infiltrations (en particulier dans les logements les plus anciens non rénovés) et l'aération par ouverture de fenêtres. Cette dernière repose sur le comportement des occupants et devrait intervenir indépendamment de la date de construction du logement ;
- Le débit de renouvellement d'air nocturne traduit plus l'efficacité du renouvellement d'air au niveau de la chambre (toutes contributions confondues) que la performance du système de ventilation à l'extraction ;
- L'absence de prise en compte d'autres facteurs intervenant sur le débit de renouvellement d'air nocturne, comme la saison (période de chauffe / hors chauffe) et la conformité des débits d'air extraits pour les logements équipés en ventilation mécanique ;
- Les travaux de rénovation qui s'accompagnent d'installation de systèmes de ventilation dans les logements plus anciens. Ce qui tend à uniformiser les débits de renouvellement d'air entre les logements avec différentes dates de construction.

6.6 Débit de renouvellement d'air nocturne RA_n en fonction de l'ouverture des fenêtres et des portes en chambre la nuit

Le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n a été mis au regard de la fréquence déclarée d'ouverture des fenêtres la nuit pendant la semaine d'enquête en chambre, ainsi que de l'ouverture de la porte de la chambre.

6.6.1 Fréquence d'ouverture des fenêtres en chambre

Des analyses ont été menées afin d'évaluer si le débit de renouvellement d'air nocturne (RA_n) diffère significativement selon la fréquence déclarée d'ouverture des fenêtres dans la chambre durant la nuit (**Tableau 29** et Figure 24).

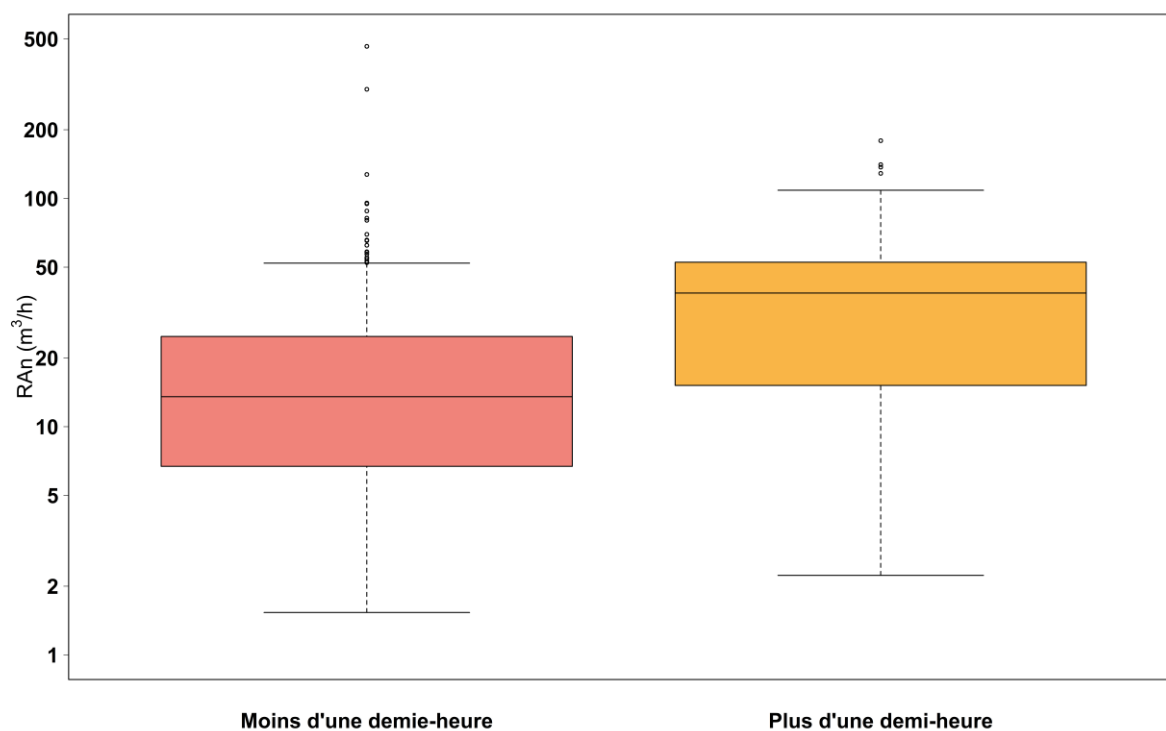
Les croisements mettent en évidence une différence statistiquement significative du débit de renouvellement d'air nocturne selon la fréquence d'ouverture des fenêtres en chambre la nuit (p -value < 10^{-4}). Les logements qui déclarent aérer plus d'une demi-heure par nuit leur chambre montrent globalement des valeurs de RA_n plus élevées (environ 39 contre 14 m³/h en valeur médiane). Les distributions sont asymétriques en particulier pour les logements ouvrant moins d'une demi-heure par jour, avec une valeur moyenne de RA_n (23 m³/h) éloignée de la valeur médiane (14 m³/h). Cela est dû aux valeurs extrêmes, en particulier quelques valeurs supérieures à 200 m³/h.

Derrière cette association significative entre le débit de renouvellement d'air nocturne et la fréquence d'ouverture des fenêtres, se cache également l'influence non négligeable de l'état d'ouverture de la porte de la chambre (voir 6.6.3).

Tableau 29. Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon la fréquence d'ouverture de fenêtre en chambres la nuit

Fréquence d'ouverture	Effectif observé	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Moins d'une ½ h	350	23,3	4,42	6,7	13,5	24,8	42,8	58,4	20 762 022
Plus d'une ½ h	116	41,8	7,29	15,2	38,5	52,6	86,9	105,0	7 912 290

(Champ : 28 674 312 logements)



(Champ : 28 674 312 logements, échelle logarithmique)

Figure 24. Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon la fréquence d'ouverture des fenêtres en chambre la nuit

6.6.2 Ouverture de la porte de la chambre la nuit

Le **Tableau 30** présente la distribution du débit de renouvellement d'air nocturne (RA_n) en fonction de l'état d'ouverture de la porte de la chambre durant la nuit. Les résultats mettent en évidence une différence marquée et statistiquement significative des débits de renouvellement d'air nocturne selon l'état d'ouverture de la porte.

Lorsque la porte de la chambre est fermée la nuit, le débit médian de renouvellement d'air est de 6,7 m³/h. À l'inverse, lorsque la porte est ouverte ou entrebâillée, le RA_n médian s'élève à 27 m³/h. Cette différence est largement significative sur le plan statistique (p-valeur < 10⁻⁴).

La distribution des RA_n montre ainsi que l'ouverture de la porte de la chambre favorise une circulation accrue de l'air, en facilitant les échanges entre la chambre et le reste du logement. Toutefois, cette augmentation des débits mesurés ne correspond pas nécessairement à un apport accru d'air neuf extérieur dans la chambre. En effet, lorsque la porte est ouverte, le RA_n peut surestimer le renouvellement d'air neuf en intégrant des flux d'air provenant des autres pièces du logement comme des apports d'air neuf. Or ces échanges avec les autres pièces ne sont pas pris en compte dans le modèle de calcul du RA_n qui suppose que la concentration en CO₂ dans la chambre n'est affectée que par la

production métabolique de la chambre elle-même et par l'apport d'air neuf à la concentration de CO₂ de l'extérieur.

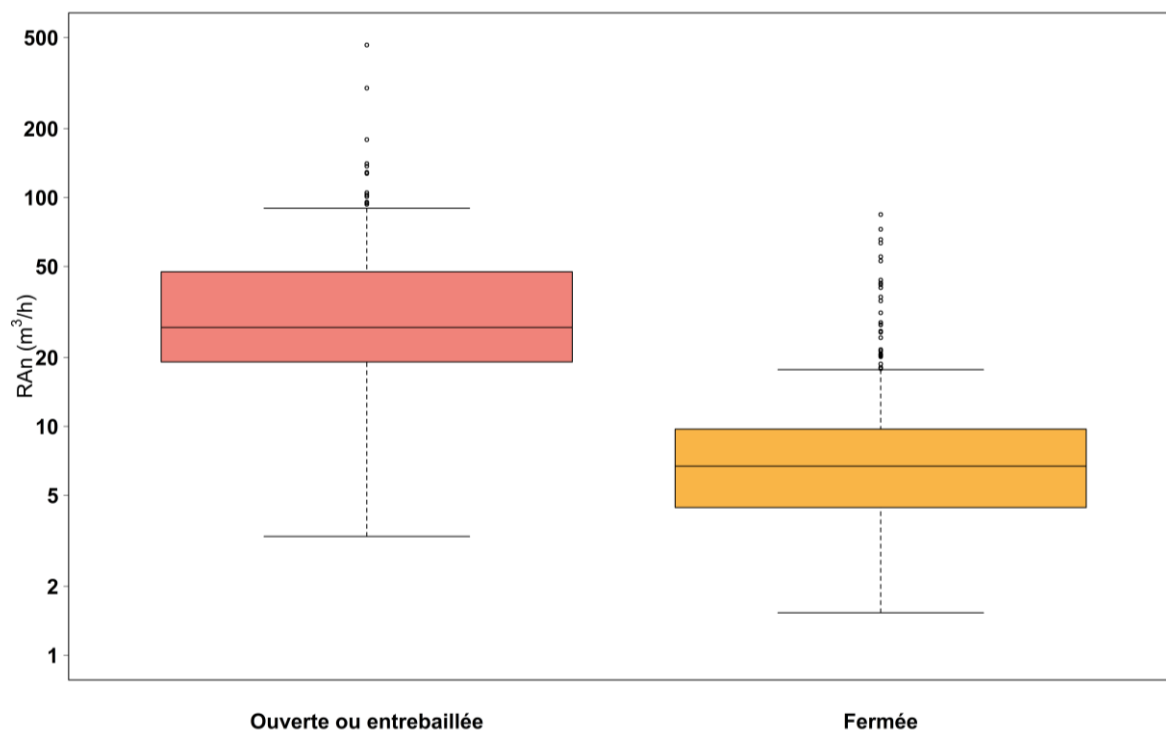
Par ailleurs, les différences observées entre les modalités doivent être interprétées avec prudence, car les logements concernés peuvent présenter des caractéristiques structurelles et fonctionnelles différentes (typologie du logement, volumes, nombre de pièces, systèmes de ventilation, comportements d'aération). Ainsi, l'effet attribué à l'ouverture de la porte de la chambre peut être en partie confondu avec des effets liés à l'hétérogénéité des logements et des pratiques d'aération globales.

Ces résultats confirment néanmoins le rôle déterminant de l'état d'ouverture de la porte de la chambre dans la dynamique du renouvellement de l'air nocturne, tout en soulignant les limites d'interprétation du RA_n calculé à partir d'un modèle simplifié.

Tableau 30 – Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon l'état d'ouverture de la porte en chambre la nuit

Fréquence d'ouverture	Effectif observé	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Porte fermée	191	8,90	3,95	4,42	6,7	9,73	15,2	20,7	11 365 799
Porte ouverte/entrebaillée	278	41,6	12,5	19,1	27,1	47,4	83,5	127,5	16 482 415

(champ : 27 848 214 logements)



(champs : 27 848 214 logements, échelle logarithmique)

Figure 25 . Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n en fonction de l'état de la porte de la chambre la nuit.

6.6.3 Combinaison d'ouvertures porte/fenêtre de la chambre la nuit

Le **Tableau 31** met en évidence l'effet combiné de l'ouverture de la porte et de la fenêtre de la chambre durant la nuit sur le débit de renouvellement d'air nocturne (RA_n). Les résultats montrent des différences très marquées et significatives sur le plan statistique (p -valeur $< 10^{-4}$).

Lorsque la porte et la fenêtre de la chambre sont toutes deux fermées, le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n est le plus souvent faible, avec une médiane de $6 \text{ m}^3/\text{h}$. Cette configuration correspond à une configuration limitant l'apport d'air neuf au sein de la chambre.

L'ouverture d'un seul des deux éléments conduit à une augmentation notable du débit de renouvellement d'air nocturne, avec toutefois des niveaux contrastés selon l'élément ouvert. Lorsque seule la porte est ouverte (fenêtre fermée), la valeur médiane de RA_n atteint $23 \text{ m}^3/\text{h}$, traduisant une augmentation importante du renouvellement d'air par mise en communication de la chambre avec le reste du logement. Il peut également s'agir d'un biais d'utilisation du modèle simplifié qui ne tient pas compte des échanges entre la chambre et le reste du logement, et qui conduit à une surestimation de la valeur du RA_n .

À l'inverse, lorsque seule la fenêtre est déclarée ouverte plus d'une demi-heure par nuit (porte fermée), l'augmentation du débit de renouvellement d'air nocturne est souvent plus modérée, avec une médiane de $8 \text{ m}^3/\text{h}$. Cela indique que l'ouverture de la fenêtre seule, en l'absence de circulation interne, peut ne pas toujours conduire à une augmentation nette du débit de renouvellement d'air nocturne. Cela va dépendre de la configuration du logement, des conditions météorologiques et de la présence de systèmes de ventilation.

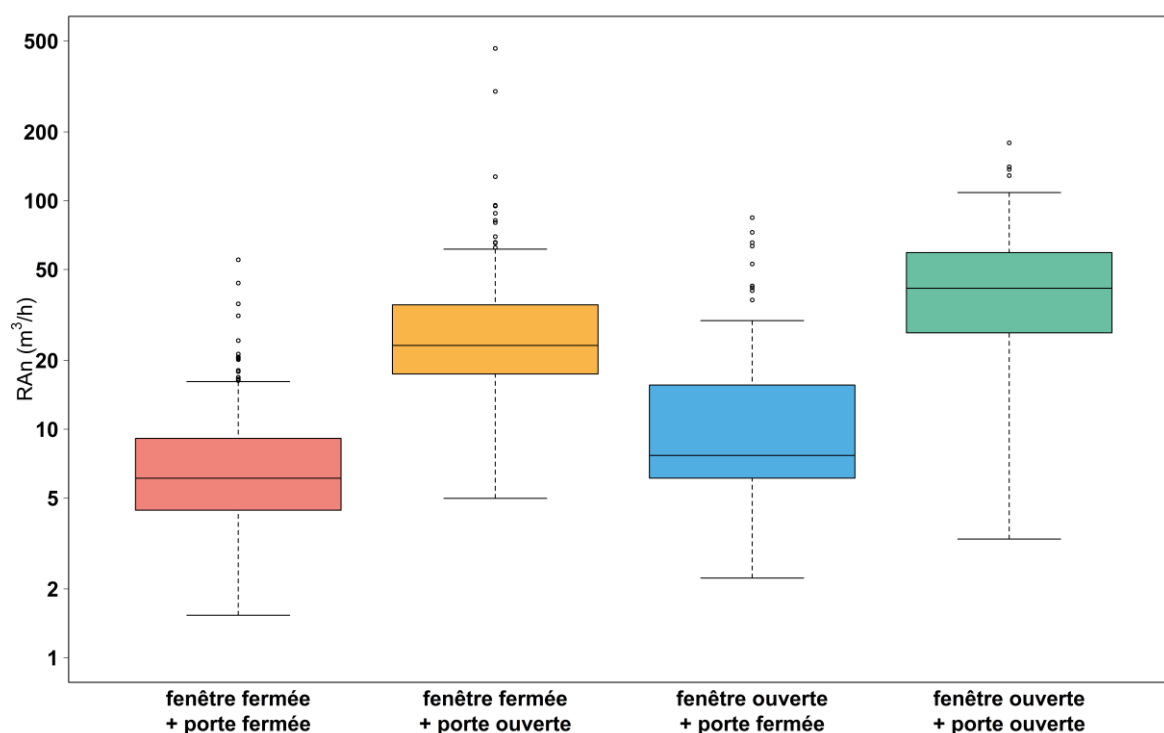
La situation la plus favorable est observée lorsque la porte et la fenêtre de la chambre sont simultanément ouvertes. Dans ce cas, le débit de renouvellement d'air nocturne est nettement plus élevé, avec une médiane de plus de $41 \text{ m}^3/\text{h}$, traduisant une ventilation fortement accrue par la combinaison des échanges avec l'extérieur et la circulation de l'air au sein du logement. Cette configuration présente également une variabilité importante des débits, comme en témoignent la valeur des quantiles extrêmes ($P10 : 13 \text{ m}^3/\text{h}$; $P95 : 129 \text{ m}^3/\text{h}$), suggérant l'influence d'autres facteurs sur le débit de renouvellement d'air nocturne. Le biais d'application du modèle simplifié aux situations de portes ouvertes peut également être en partie en cause.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que l'ouverture conjointe de la porte et de la fenêtre de la chambre la nuit est fortement associée à une augmentation significative du débit de renouvellement d'air nocturne. Ces résultats soulignent une forte dépendance du RA_n avec l'état des ouvrants, avec d'une part un surcroît d'apport d'air neuf attendu, mais également un lien étroit avec le modèle de calcul simplifié qui néglige les échanges avec les autres parties du logement, échanges qui pourraient ne plus être négligeables en situations de portes ouvertes.

Tableau 31. Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon l'état d'ouverture des portes et fenêtres de la chambre la nuit (champs : 27 720 145 logements)

Combinaison	Effectif observé	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté*
fenêtre fermée + porte fermée	145	7,8	4,0	4,4	6,1	9,1	13,5	16,4	9 403 367
fenêtre ouverte + porte fermée	43	14,4	3,8	6,1	7,7	15,6	40,4	52,9	1 891 731
fenêtre fermée + porte ouverte	197	37,4	11,4	17,5	23,3	35,0	58,4	88,1	10 449 013
fenêtre ouverte + porte ouverte	78	48,9	12,5	26,4	41,4	59,3	93,5	128,9	5 976 034

*Sont exclus les combinaisons là où une des deux informations est indisponible



(champ : 27 720 145 logements, échelle logarithmique)

Figure 26. Distribution du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n selon les combinaisons d'ouverture de la porte et la fenêtre de la chambre la nuit

6.7 Synthèse des résultats de débit de renouvellement d'air nocturne RA_n

Le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n a été calculée à partir des 60 plus grandes valeurs en CO_2 mesuré dans la chambre entre 01h00 et 05h30 et de la production métabolique des occupants présents dans la pièce sur cette période. Les valeurs de RA_n (médiane de $17,5 \text{ m}^3/\text{h}$) peuvent varier selon différents facteurs.

Au regard du type de système de ventilation, les résultats montrent une forte variabilité des débits de renouvellement d'air nocturne au sein de chaque catégorie. Si certaines différences de tendance centrale sont observées entre les différents systèmes de ventilation, les tests statistiques ne mettent pas en évidence de différence significative globale. Ce qui indique que le type de système de ventilation (sans considération de conformité) ne suffit pas à expliquer à lui seul le débit de renouvellement d'air nocturne. Cela se reflète également en se focalisant sur les logements enquêtés en période de chauffe avec fenêtres fermées la nuit.

Pour les logements équipés de systèmes mécaniques, la comparaison avec les mesures de débits d'air extrait totaux minimaux montre des débits de renouvellement d'air nocturne RA_n bien souvent inférieurs. Ce qui pourrait suggérer une faible efficacité du renouvellement d'air au niveau de la chambre, du fait de possibles infiltrations parasites dans le reste du logement qui perturbent le principe de balayage. Une analyse au cas par cas serait nécessaire pour comprendre ces différences. Les incertitudes dans le calcul du RA_n peuvent également contribuer en partie à cet écart. Les deux indicateurs ne représentent pas exactement la même chose et doivent être considérés de manière complémentaire.

L'analyse saisonnière met en évidence un effet marqué de la période de chauffe. En période hors chauffe, les débits de renouvellement d'air nocturne sont significativement plus élevés que durant la période de chauffe, avec une proportion de débits supérieurs à $40 \text{ m}^3/\text{h}$ près de quatre fois plus importante. Cette différence significative suggère des comportements d'aération plus fréquents hors période de chauffe.

Le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n ne montre pas d'associations avec la date de construction du logement. L'absence d'association peut être attribuer d'une part à des travaux de rénovation avec installation d'un système de ventilation dans les logements plus anciens et d'autre part au fait que la valeur de RA_n est très dépendante de l'aération du logement décidée par les occupants.

L'ouverture des fenêtres en chambre la nuit est associée à une augmentation significative des débits RA_n , avec des distributions nettement décalées vers des valeurs plus élevées lorsque les fenêtres sont ouvertes plus d'une demi-heure par nuit. Mais, cette association traduit plus l'influence de l'ouverture de la porte de la chambre que de la fenêtre elle-même. Les débits les plus faibles sont observés lorsque porte et fenêtre de la chambre sont toutes deux fermées, traduisant une situation de forte limitation des échanges d'air. La configuration la plus favorable correspond à l'ouverture simultanée de la porte et de la fenêtre, avec des débits nocturnes élevés et une forte variabilité. Cette variabilité suggère

l'influence de facteurs complémentaires, tels que la configuration du logement, les conditions météorologiques ou la présence d'un système de ventilation.

L'état d'ouverture de la porte de la chambre a également des conséquences sur les hypothèses inhérentes au modèle simplifié utilisé pour le calcul du RA_n . En effet, le modèle simplifié en se focalisant sur la seule chambre ne tient pas compte des échanges avec le reste du logement, qui peuvent être très importants en situation de portes ouvertes. Un risque de surestimation (ou de sous-estimation dans certains cas) de la valeur du RA_n ne peut pas être complètement exclu.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que le renouvellement d'air nocturne dépend fortement des comportements d'ouverture des portes et des fenêtres, bien plus que des caractéristiques structurelles du logement prises isolément. Ils soulignent le rôle central des usages dans la dynamique de l'air intérieur, tout en rappelant les limites d'interprétation du RA_n comme indicateur direct de l'apport d'air neuf extérieur lorsque la chambre est en communication avec le reste du logement.

7 Taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA)

Le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n peut dépendre du nombre de pièces du logement, notamment dans la part liée au système de ventilation, dimensionné spécifiquement selon la taille du logement. Pour faciliter la comparaison des logements entre eux, il est nécessaire de ramener ce débit de renouvellement d'air au volume du logement ce qui revient à comparer le taux de renouvellement d'air. Par ailleurs, le RA_n se focalise sur la seule période nocturne et ne traduit pas tout ce qui s'est passé dans la semaine en journée. L'expression d'un indicateur comme le taux de renouvellement d'air agrégé sur l'ensemble de la semaine permettrait également de le mettre en regard avec l'ensemble des polluants mesurés également sur la semaine. La détermination d'un taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) répond à ces objectifs.

7.1 TRA dans le parc de logements

Le **Tableau 32** décrit la distribution du TRA dans le parc des logements en France hexagonale. La valeur médiane du TRA est de 0,45 vol/h, indiquant que plus de la moitié des logements présentent un TRA inférieur à 0,5 vol/h. Le TRA peut être très variable d'un logement à l'autre de 0,06 à 4 vol/h au niveau de l'échantillon de logements enquêtés. L'écart marqué entre le premier et le neuvième décile, respectivement 0,17 et 1,16 vol/h, illustre mieux la dispersion observée à l'échelle du parc.

Tableau 32. Distribution du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) dans le parc de logements en France hexagonale continentale (en volume/h)

Taux de renouvellement d'air (TRA)	Échantillon			Données pondérées							Effectif représenté
	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	
	472	0,06	3,97	0,63	0,17	0,30	0,45	0,78	1,16	1,61	28 802 380

(Champ : 28 802 380 logements)

La Figure 27 affiche la densité de probabilité pondérée du TRA. Elle met en évidence une distribution fortement asymétrique à droite, caractérisée par quelques valeurs élevées de TRA (jusqu'à 4 vol/h). Le maximum de densité est observé autour de 0,33 vol/h, indiquant que cette valeur correspond au taux de renouvellement d'air le plus fréquent (mode) dans le parc de logements. La distribution asymétrique des valeurs accentue l'écart entre les valeurs médiane et moyenne du TRA. Cette dernière valeur est tirée vers le haut par les quelques valeurs les plus élevées.

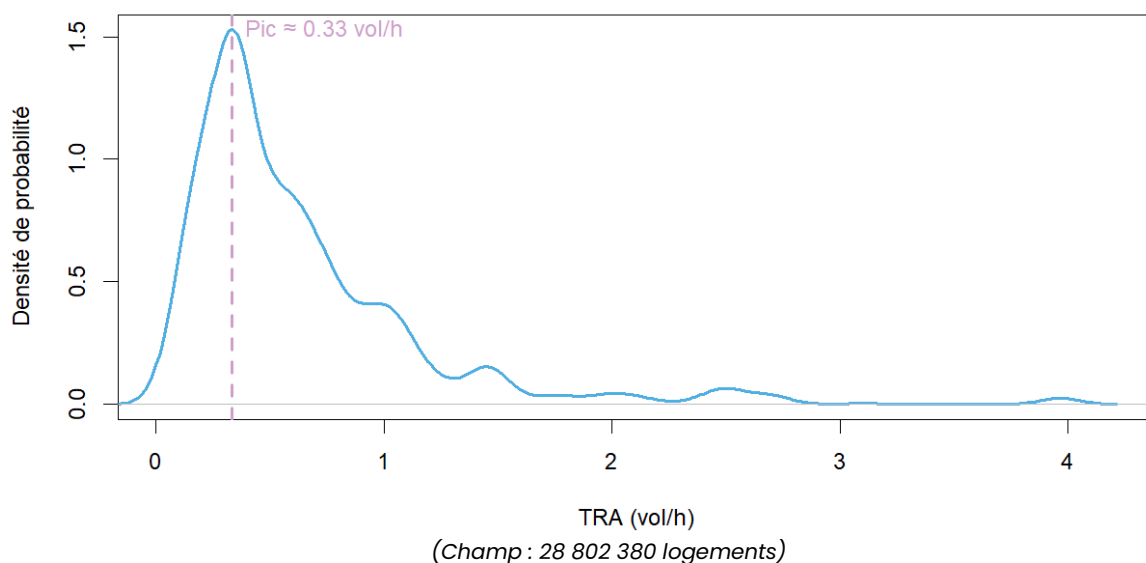


Figure 27. Densité pondérée du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (volume/h)

7.2 TRA et type de ventilation

Le **Tableau 33** présente le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) selon le type de ventilation du logement (sans tenir compte à ce stade de son état de conformité). Les logements équipés d'une ventilation mécanique centralisée (VMC) et ceux sans aucun système présentent en général des niveaux de TRA un peu plus élevés par rapport aux logements en ventilation mécanique ponctuelle ou répartie et ceux disposant d'un dispositif de ventilation naturelle (médianes respectives de 0,58, 0,52, 0,39 et 0,36 vol/h). Les écarts ne sont toutefois pas significatifs d'un point de vue statistique à l'échelle du parc.

L'absence de significativité des écarts peut traduire le fait que les contributions relatives à l'aération par ouverture de fenêtres voire les infiltrations pourraient être plus importantes pour le renouvellement de l'air du logement (globalement sur la semaine) que la contribution du système de ventilation quand il existe. De même, la conformité des systèmes de ventilation mécanique n'est pas prise en compte dans cette analyse, ce qui pourrait avoir tendance à lisser les différences. Cet aspect est abordé dans la section suivante.

Tableau 33. Distributions représentées du TRA en fonction de type de ventilation

Système de ventilation	Échantillon			Parc des logements							
	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Aucun dispositif de ventilation	67	0,06	2,71	0,77	0,17	0,35	0,52	0,75	2,46	2,46	4 494 972
Ventilation mécanique centralisée	250	0,09	2,57	0,70	0,26	0,34	0,58	0,92	1,25	1,50	14 178 585

	Échantillon			Parc des logements							
Système de ventilation	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Ventilation mécanique ponctuelle ou répartie	67	0,11	1,59	0,46	0,13	0,19	0,39	0,71	1,00	1,12	3 633 099
Ventilation naturelle	88	0,07	3,97	0,49	0,16	0,27	0,36	0,50	0,72	1,31	6 495 724

(Champ : 28 802 380 logements)

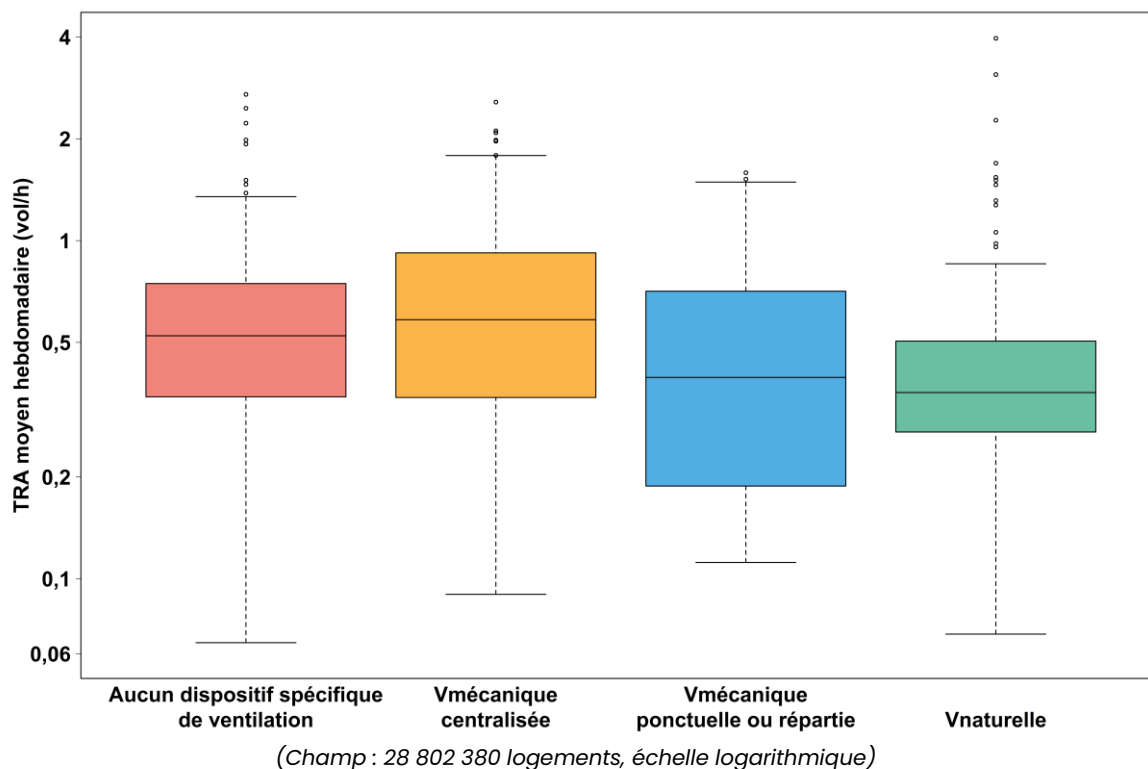


Figure 28. Distributions observées du taux de renouvellement d'air par type de ventilation

Pour limiter l'influence de l'aération par ouverture de fenêtres, cette même analyse a été réalisée en se focalisant exclusivement sur les 370 logements enquêtés en période de chauffe (**Tableau 34**). La portée de cette analyse est limitée au sous-échantillon concerné, sans pouvoir étendre les conclusions à l'échelle du parc. Le TRA moyen hebdomadaire en période de chauffe est un peu plus faible dans chacun des groupes de logements. Une différence significative ($p = 0,007$) est observée entre le groupe de logements équipés en VMC (TRA médian de 0,47 vol/h) et le groupe de logements en ventilation naturelle (TRA médian de 0,36 vol/h). La présence d'une ventilation mécanique de type VMC pourrait donc contribuer à un taux de renouvellement d'air globalement plus élevé, même si pour certains logements les contributions d'autres facteurs notamment l'ouverture des fenêtres et les infiltrations permettent d'assurer un renouvellement d'air conséquent. Les contributions de

ces différents facteurs sont donc très variables d'un logement à l'autre ce qui rend d'autant plus difficile la mise en évidence de l'effet moyen d'un de ces facteurs.

Tableau 34. Distribution du TRA en fonction de type de ventilation dans le sous-groupe de logements enquêtés en période de chauffe

Système de ventilation	Effectif	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95
Aucun dispositif de ventilation	51	0,06	2,23	0,52	0,16	0,23	0,43	0,68	0,88	1,11
Ventilation mécanique centralisée	190	0,09	1,98	0,55	0,20	0,30	0,47	0,69	0,98	1,18
Ventilation mécanique ponctuelle ou répartie	56	0,11	1,59	0,51	0,16	0,23	0,34	0,64	1,12	1,45
Ventilation naturelle	73	0,07	3,10	0,47	0,13	0,24	0,36	0,58	0,77	1,31

(Champ : 370 logements enquêtés en période de chauffe)

7.3 TRA en fonction de la conformité des débits d'air extrait

La conformité du système de ventilation mécanique a été évaluée par le biais du calcul du **ratio « débit d'air extrait total mesuré / débit d'air extrait total de référence »** qui doit être supérieur ou égal à 1 (voir section 5.4).

Ce ratio a pu être calculé pour 138 logements équipés d'un système de ventilation mécanique sans bouches d'extraction hygroréglables et comprenant au moins une mesure de débit d'air extrait en cuisine et au moins une mesure en salle de bains et/ou WC. Parmi eux, 119 logements disposaient également d'une valeur exploitable de TRA moyen hebdomadaire, ce qui a permis d'analyser la distribution de cet indicateur selon la conformité du système de ventilation.

Le Tableau 35 et la Figure 29 montrent que le TRA moyen hebdomadaire tend à être légèrement plus élevé dans les logements conformes ($R \geq 1$) que dans les logements non conformes ($R < 1$), avec des valeurs médianes respectives de 0,53 et 0,39 vol/h. Mais, la différence n'est pas statistiquement significative (test de Mann-Whitney, p-valeur = 0,14).

Tableau 35. Distribution du TRA en fonction de la conformité des débits d'air extrait dans les logements en ventilation mécanique

Ratio de conformité	Échantillon									
	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95
Logements non conformes ($R < 1$)	76	0,12	2,11	0,50	0,21	0,26	0,39	0,62	0,91	1,11
Logements conformes ($R \geq 1$)	43	0,10	2,08	0,61	0,20	0,32	0,53	0,82	1,12	1,16

Données non pondérées (119 logements)

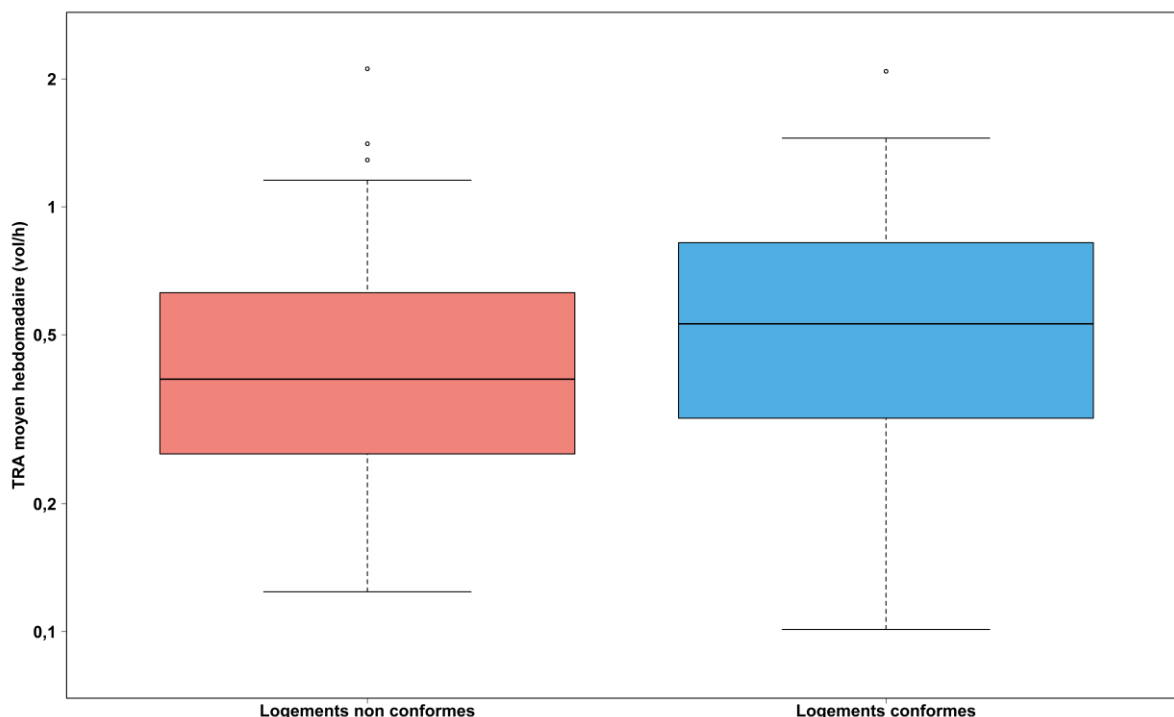


Figure 29. Distribution du TRA en fonction de la conformité du débit total d'air extrait dans les logements équipés d'un système de ventilation mécanique (échelle logarithmique)

Une analyse similaire a été conduite exclusivement sur les 85 logements enquêtés en période de chauffe et disposant de données permettant l'évaluation de la conformité. Aucune différence significative ($p = 0,96$) n'at été observée entre les logements conformes (TRA médian de 0,41 vol/h, $n = 27$) et non-conformes (médiane de 0,38 vol/h, $n = 58$).

L'absence d'écart significatif en TRA entre les logements conformes et non-conformes au regard des débits d'air extraits est liée à l'amplitude des variations qui est du même ordre entre les deux groupes. Des valeurs de TRA faibles sont relevées parmi certains logements conformes. Ce qui laisse supposer un mauvais renouvellement d'air du logement, en particulier en termes d'apport d'air neuf au niveau des pièces de vie malgré des débits d'air extraits en pièces de service suffisants. Le principe de balayage de l'air des pièces de vie aux pièces de service n'est sans doute pas respecté pour ces logements avec un faible TRA. A l'opposé, certains logements non-conformes présentent des valeurs de TRA supérieur à 1. Pour ces logements, les contributions relatives à l'ouverture des fenêtres et aux infiltrations pourraient être importantes et venir compléter voire se substituer au renouvellement d'air attribuable au système de ventilation mécanique.

La conformité des mesures de débit d'air extrait ne préjuge pas forcément d'un taux de renouvellement de l'air suffisant, mais elle tend à y contribuer pour une partie des logements.

7.4 Comparaison du TRA avec un TRA théorique

Le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire a été comparé au TRA théorique calculé à partir des seules mesures de débit d'air extrait dans le logement (voir section 3.7). Cette comparaison a été réalisée dans les 109 logements équipés en ventilation mécanique disposant de données complètes et non nulles pour les deux indicateurs (Tableau 26). Le TRA théorique a été déterminé en considérant d'une part le volume total du logement et d'autre part le volume d'un seul niveau pour les logements sur plusieurs niveaux.

Globalement, les distributions des deux indicateurs montrent des valeurs systématiquement plus élevées pour le TRA moyen hebdomadaire par rapport au TRA théorique intégrant le volume total du logement. Les valeurs médianes sont respectivement de 0,44 vol/h pour le TRA moyen hebdomadaire et de 0,29 vol/h pour le TRA théorique. Les centiles confirment cette tendance sur l'ensemble de la distribution, notamment au niveau des centiles P10 (0,21 contre 0,14 vol/h), P75 (0,69 contre 0,41 vol/h) et P90 (1,05 contre 0,60 vol/h). Le TRA moyen hebdomadaire intègre de manière globale les contributions du système de ventilation, des ouvertures de fenêtres et des infiltrations. Alors que le TRA théorique ne repose que sur les mesures de débit d'air extrait par le système de ventilation mécanique aux pièces de service, sans qu'il soit certain que le renouvellement d'air des pièces de vie soit bien assuré. La différence entre les deux indicateurs apparaît logique.

La distribution du TRA moyen hebdomadaire se rapproche de celle du TRA théorique se limitant au niveau de plancher du logement dans lequel se trouve la chambre de la personne de référence du ménage (volume divisé par le nombre de niveaux du logement). Le TRA moyen hebdomadaire prend lui-même en compte une méthodologie de calcul basée sur un seul niveau du logement. Le rapprochement des deux distributions peut de ce fait ne pas paraître surprenant.

Les écarts observés entre le TRA moyen hebdomadaire et le TRA théorique pourraient représenter les contributions moyennes relatives aux ouvertures de fenêtres et aux infiltrations à l'échelle de la semaine. Mais, pour les 10 logements qui affichent un débit d'air extrait total minimal nul, le TRA moyen hebdomadaire calculé est très variable allant de 0,17 à 0,95 vol/h, donc du même ordre que les variations observées dans les autres logements. Tous ces logements ont déclaré ouvrir leurs fenêtres durant la semaine en général plus d'une demi-heure par jour en journée. Le renouvellement d'air de ces logements serait donc essentiellement assuré par l'ouverture des fenêtres et sans doute également par une part d'infiltrations.

Malgré tout, il est très difficile d'interpréter les écarts observés en termes de contributions de différents facteurs au renouvellement de l'air. Les deux modes de calculs reposent sur des hypothèses différentes. D'un côté, le TRA moyen hebdomadaire vient estimer un renouvellement d'air au regard du niveau de concentration en CO₂ dans le logement par rapport à son occupation, prenant en compte tous les facteurs susceptibles de l'affecter. De l'autre, le TRA théorique repose sur les débits d'air extraits aux bouches en faisant l'hypothèse d'une circulation parfaite de l'air neuf des pièces de vie aux pièces de service. La comparaison ne peut qu'être indicative.

Tableau 36. Comparaison TRA moyen hebdomadaire et du TRA théorique à l'échelle du logement

Statistique	TRA moyen hebdomadaire (vol/h)	TRA théorique (vol/h) Volume total du logement	TRA théorique (vol/h) Volume par niveau du logement
N (logements)*	109	109	109
Moyenne	0,56	0,34	0,53
Écart-type	0,38	0,29	0,48
Minimum	0,10	0,003	0,005
P10	0,21	0,14	0,14
P25	0,30	0,16	0,23
Médiane	0,44	0,29	0,41
P75	0,69	0,41	0,64
P90	1,05	0,60	1,03
Maximum	2,11	2,24	2,75

Données non pondérées ; *Logements avec TRA théorique nul écartés

L'association entre le TRA moyen hebdomadaire et le TR théorique est significative dans les deux cas ($p = 0,026$ et $p < 0,0001$ en considérant respectivement le volume total ou le volume par niveau du logement).

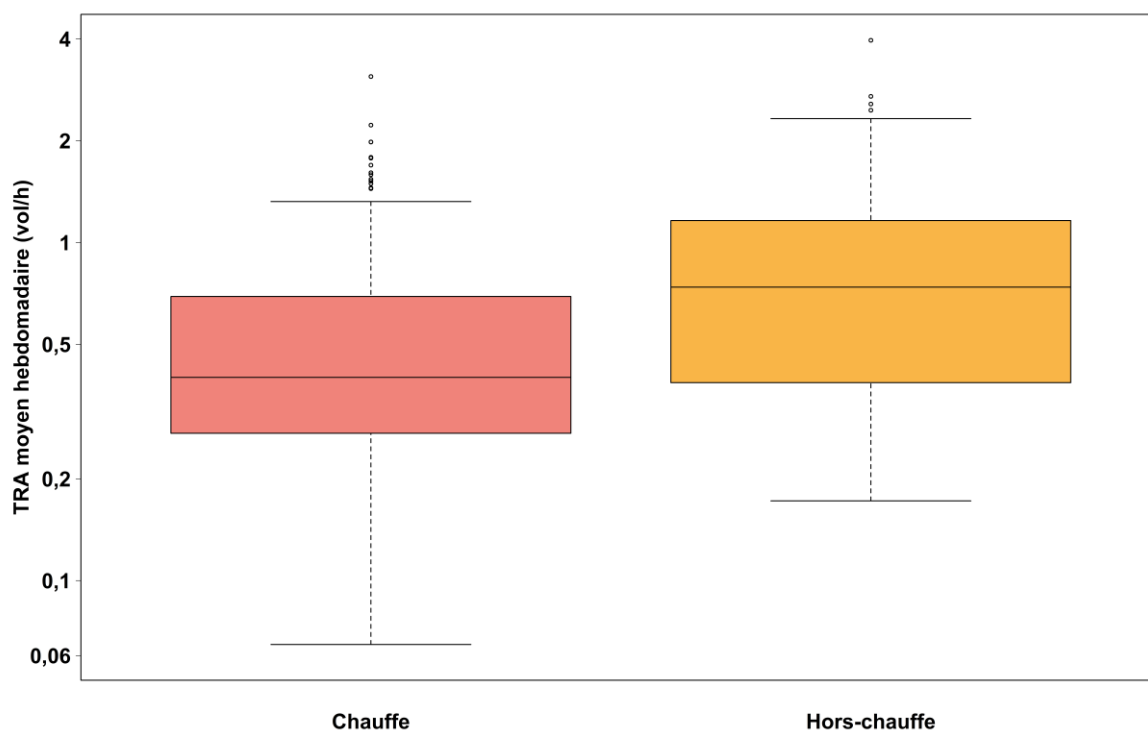
7.5 TRA et périodes de chauffe / hors chauffe

Le **Tableau 37** et la **Figure 30** distinguent le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) selon la période de chauffe / hors-chauffe de l'enquête. En période de chauffe, le TRA médian s'élève à 0,4 vol/h, alors qu'il atteint 0,7 vol/h hors période de chauffe. Cette différence statistiquement significative (p -value = 0,0007) indique une augmentation nette du TRA en dehors de la période de chauffage, possiblement liée à une aération plus fréquente par ouverture des fenêtres durant cette période.

Tableau 37. Distribution du TRA en fonction de la période de chauffe

Période de chauffe	Échantillon			Parc des logements français							
	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Chauffe	370	0,06	3,1	0,51	0,16	0,27	0,40	0,69	1,0	1,25	21 870 175
Hors -chauffe	102	0,17	3,97	1,00	0,30	0,39	0,74	1,16	2,46	2,57	6 932 205

(Champ : 28 802 380 logements)



(Champ : 28 802 380 logements, échelle logarithmique)

Figure 30. Distribution du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) par période de chauffe/hors-chauffe

7.6 TRA et date de construction du logement

Le **Tableau 38** et la Figure 31 illustrent l'évolution du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) dans les logements selon la date de construction. Le TRA varie peu selon la période de construction du logement : entre 0,41 vol/h en valeur médiane pour les logements construits entre 1968 et 1981 à 0,53 vol/h pour ceux construits avant 1968. Les écarts entre les groupes de logements ne sont pas significatifs.

Tableau 38 Distribution du TRA en fonction de la période de construction du logement

	Échantillon			Parc des logements							
Période de construction	Effectif observé	Min	Max	Moyenne pondérée	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
< 1968	175	0,06	3,1	0,71	0,21	0,33	0,53	0,82	1,46	2,46	9 844 025
1968-1981	96	0,09	3,97	0,66	0,14	0,24	0,41	0,83	1,44	1,51	8 300 548
1981-2005	122	0,07	2,11	0,51	0,22	0,32	0,44	0,69	0,91	1,25	6 568 892
>2005	79	0,12	2,08	0,58	0,20	0,29	0,52	0,71	1,03	1,03	4 088 915

(Champ : 28 802 380 logements)

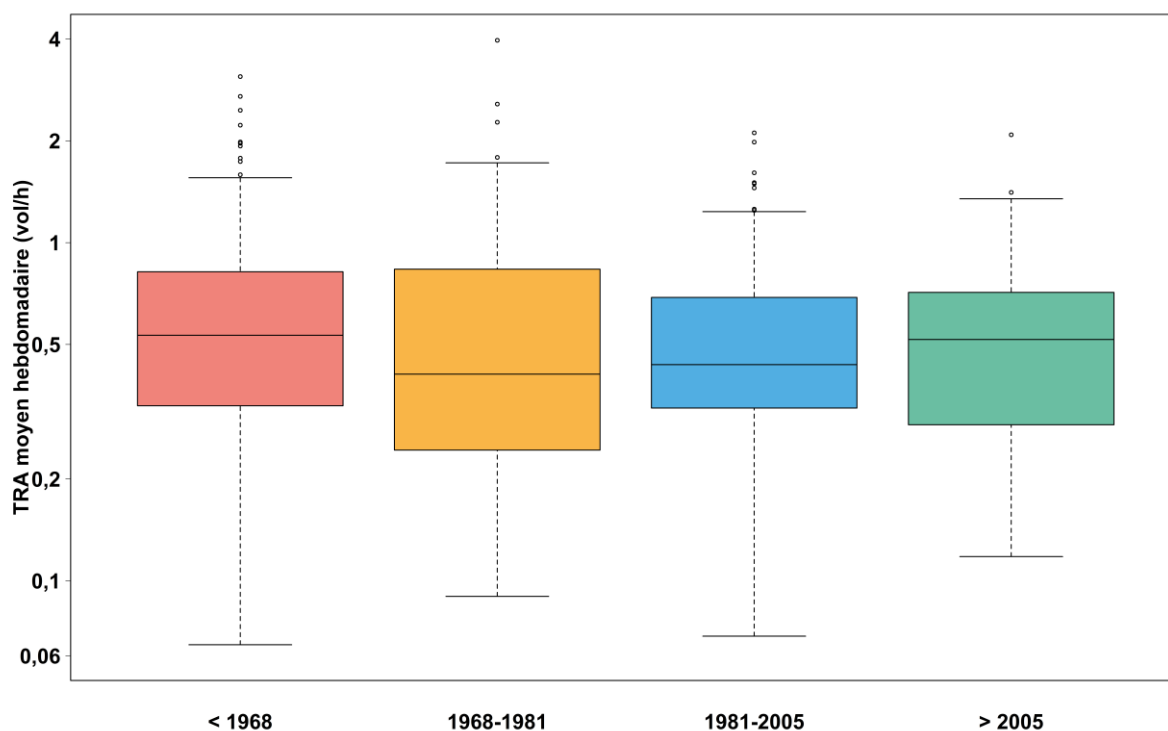


Figure 31. Distribution du TRA en fonction de la date de construction du logement (échelle logarithmique)

L'absence de différences pourrait être expliquée par une contribution plus importante de l'ouverture des fenêtres qui dépend plus des occupants que des caractéristiques du logement. Par ailleurs, les logements plus anciens peu étanches pourraient être associés à une contribution non négligeable des infiltrations d'air.

Une analyse similaire a été conduite exclusivement sur les 370 logements enquêtés en période de chauffe pour essayer de mettre plus en valeur la contribution du système de ventilation selon la date de construction du logement par rapport à celle de l'aération. L'écart le plus important est observé entre les logements construits avant 1968 (TRA médian de 0,44 vol/h) et ceux construits après 2005 (TRA médian de 0,37 vol/h), sans être toutefois significatif ($p = 0,075$). Cette analyse plus ciblée ne fait pas plus ressortir la contribution du système de ventilation au travers des périodes de construction. Les contributions des différents facteurs varient beaucoup d'un logement à l'autre ce qui ne permet pas de mettre en évidence une caractéristique particulière du logement.

7.7 TRA et ouverture des fenêtres dans le logement

Le Tableau 39 et la Figure 32 montre le croisement entre la fréquence d'ouverture des fenêtres dans le logement durant la semaine d'enquête et le TRA à l'échelle du parc. Malgré une tendance à avoir un TRA un peu plus élevé (médiane de 0,55 vol/h), les logements ouvrant leurs fenêtres plus d'une heure par jour ne diffèrent pas de manière significative

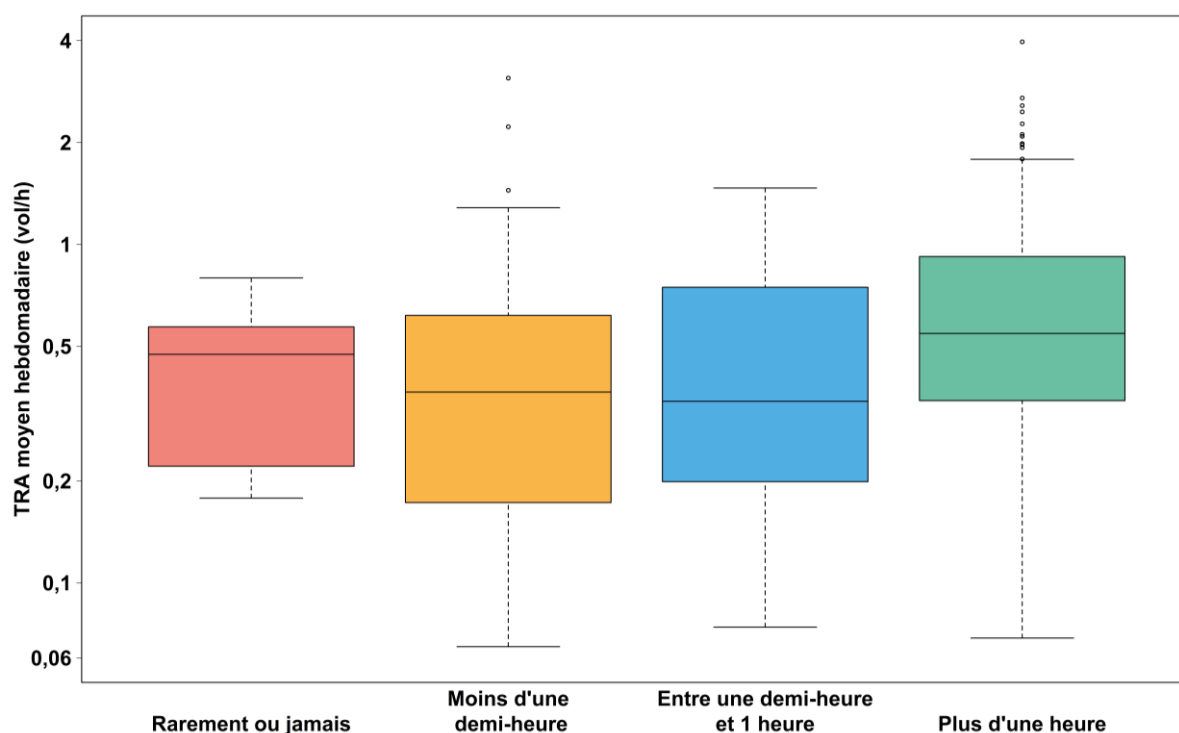
des autres logements (p-valeur = 0,084). A l'échelle des seuls logements enquêtés, l'association est significative, mais ne se répercute pas à l'échelle du parc. D'autres facteurs non pris en compte comme la saison pourraient expliquer l'absence d'associations. En observant les déclarations d'ouverture de fenêtres en période hors chauffe, 90 % des 102 logements enquêtés ouvrent les fenêtres de leurs logements plus d'une heure par jour avec très peu de cas ouvrant moins fréquemment leurs fenêtres. En période de chauffe, le TRA ne varie pas de manière significative avec la fréquence d'ouverture de fenêtres (**Tableau 40**). La variation du TRA avec la période de chauffe traduit donc de fait l'impact de l'ouverture de fenêtres.

Il est également possible que la construction de la variable globale d'aération du logement soit finalement peu pertinente en lissant des comportements contrastés entre le jour et la nuit. La pièce spécifique dans laquelle une fenêtre est ouverte peut également avoir son importance. Par ailleurs, la donnée déclarative de l'ouverture des fenêtres à l'échelle du logement est sans doute entachée de plus d'incertitudes que celles ciblant une pièce particulière du logement.

Tableau 39. Distribution du TRA selon la fréquence d'ouverture de fenêtres dans le logement jour et nuit pendant la semaine d'enquête des logements (toutes saisons confondues)

	Échantillon			Parc des logements							
Fréquence d'ouverture	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Rarement ou jamais	17	0,18	0,8	0,41	0,19	0,22	0,47	0,57	0,57	0,8	1 172 140
Moins d'une demi-heure	75	0,06	3,1	0,5	0,13	0,17	0,37	0,62	1,44	1,44	4 195 316
Entre une demi-heure et 1 heure	86	0,07	1,47	0,47	0,15	0,2	0,34	0,75	0,98	1,03	4 872 548
Plus d'une heure	287	0,07	3,97	0,72	0,25	0,35	0,55	0,92	1,41	2,08	18 337 270
NSP	7	0,32	0,69	0,49	0,32	0,37	0,47	0,54	0,67	0,67	225 105

(Champ : 28 802 380 logements) ; NSP : ne sait pas



(Champ : 28 577 274 logements, échelle logarithmique)

Figure 32. Distribution pondérée du TRA selon la fréquence d'ouverture des fenêtres jour et nuit dans le logement (échelle logarithmique)

Tableau 40. Distribution du TRA selon la fréquence d'ouverture de fenêtre dans le logement jour et nuit pendant la semaine d'enquête des logements en fonction de la saison

Période hors-chauffe	Échantillon			Parc des logements							
Fréquence d'ouverture	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Rarement ou jamais	2	0,22	0,72	0,37	0,22	0,22	0,22	0,72	0,72	0,72	95 112
Moins d'une demi-heure	3	0,24	0,43	0,35	0,24	0,24	0,35	0,43	0,43	0,43	68 544
Entre une demi-heure et 1 heure	5	0,23	1,47	0,76	0,23	0,40	0,40	1,47	1,47	1,47	180 145
Plus d'une heure	91	0,17	3,97	1,03	0,30	0,39	0,74	1,16	2,46	2,71	6 575 762
NSP	1	0,47		0,47							12 642
Période chauffe	Échantillon			Parc des logements							
Fréquence d'ouverture	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Rarement ou jamais	15	0,18	0,80	0,38	0,19	0,26	0,47	0,57	0,57	0,80	1 077 029

Moins d'une demi-heure	74	0,06	3,10	0,37	0,13	0,17	0,37	0,62	1,44	1,44	4 259 113
Entre une demi-heure et 1 heure	79	0,07	1,31	0,36	0,14	0,17	0,34	0,75	0,98	1,03	4 560 062
Plus d'une heure	196	0,07	1,98	0,46	0,20	0,32	0,44	0,71	1,05	1,15	11 761 508
NSP	6	0,32	0,69	0,47	0,32	0,37	0,54	0,54	0,67	0,67	212 463

(Champ : 28 802 380 logements) ; NSP : ne sait pas ; effectif faible (< 10) en italique

7.8 TRA et type de logement

Le Tableau 41 et la Figure 33 distinguent le TRA selon le type du logement. L'analyse du tableau met en évidence des niveaux de TRA globalement comparables entre les maisons individuelles et les logements collectifs (médianes respectives de 0,45 et 0,48 vol/h, écarts non significatifs).

Tableau 41. Distribution du TRA par type de logement

Type de logement	Échantillon			Parc des logements							
	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif
Individuel	341	0,06	3,10	0,60	0,16	0,30	0,45	0,73	1,12	1,45	16 564 946
Collectif	131	0,07	3,97	0,68	0,19	0,32	0,48	0,91	1,44	1,97	12 237 434

(Champ : 28 802 380 logements)

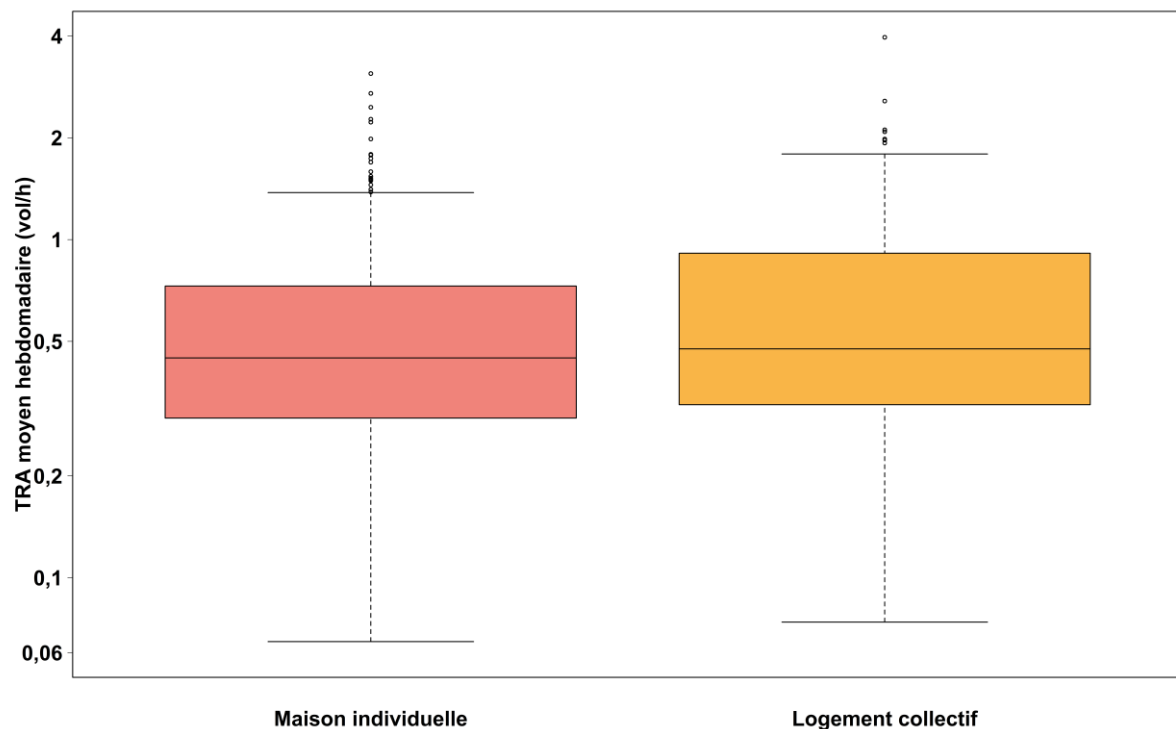


Figure 33. Distribution du TRA par type de logement (échelle logarithmique)

7.9 TRA et étage du logement

Le Tableau 42 et la Figure 34 illustrent la distribution des niveaux de TRA en fonction de l'étage du logement enquêté. Les valeurs de TRA sont globalement comparables quel que soit l'étage du logement (écarts non significatifs).

Tableau 42. Distribution du TRA en fonction de l'étage du logement

Étage du logement	Echantillon			Parc des logements							Effectif représenté
	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	
RDC	341	0,06	3,1	0,62	0,17	0,3	0,45	0,75	1,12	1,74	17 674 847
1er	46	0,11	1,46	0,57	0,2	0,34	0,36	0,89	1,27	1,44	4 783 260
2ème	22	0,07	2,08	0,68	0,16	0,32	0,44	0,69	1,51	2,08	1 834 348
3ème	15	0,1	1,31	0,63	0,1	0,13	0,58	0,94	1,31	1,31	874 716
≥4	46	0,17	3,97	0,79	0,19	0,3	0,59	0,83	1,97	2,11	3 290 238

(Champ : 28 802 380 logements)

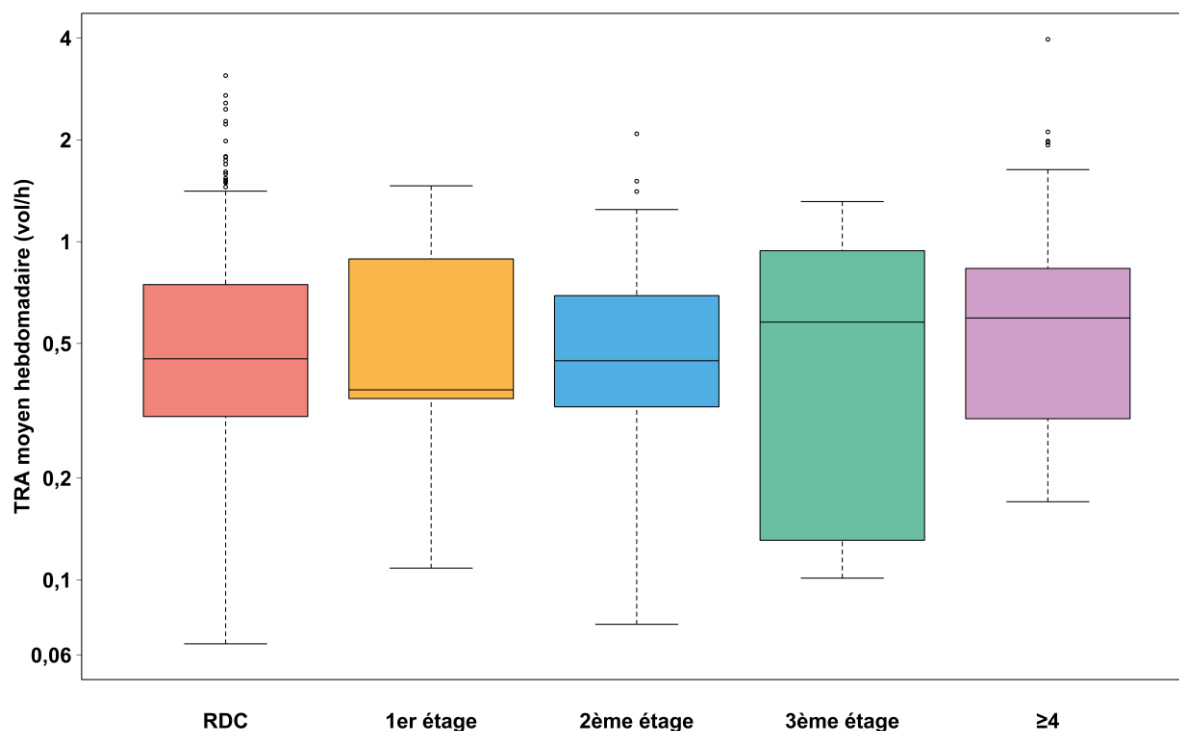


Figure 34. Distribution du TRA en fonction de l'étage du logement (échelle logarithmique)

7.10 TRA et utilisation de la hotte raccordée

Le Tableau 43 et la Figure 35 présentent la distribution du TRA en fonction de la fréquence d'utilisation de la hotte raccordée à l'extérieur pour les logements en possédant une. Les résultats sont établis à l'échelle du sous-échantillon des logements possédant une hotte raccordée à l'extérieur (données non pondérées).

L'analyse montre que les niveaux de TRA sont globalement proches entre les logements déclarant ne jamais utiliser la hotte, l'utiliser de temps en temps ou tous les jours. Les médianes et les quantiles centraux sont comparables entre ces modalités. Le test de Kruskal-Wallis ne met pas en évidence de différence statistiquement significative du TRA selon la fréquence d'utilisation de la hotte (p -valeur = 0,175), suggérant qu'à l'échelle de cet échantillon, l'utilisation déclarée de la hotte raccordée à l'extérieur n'apparaît pas comme un facteur discriminant du TRA.

Même si la hotte ne fait pas partie du système de ventilation, les débits d'air extraits en cuisine peuvent être conséquents en fonctionnement. Son rôle est celui de capter avec efficacité les émissions liées à la cuisson au plus près de la source. L'utilisation de la hotte est en général restreinte au maximum à une ou deux heures par jour au moment des repas, soit au maximum 14 heures sur une semaine (soit moins de 10 % du temps). L'impact attendu de l'utilisation de la hotte sur le TRA calculé à l'échelle de la semaine serait de ce fait faible voire négligeable.

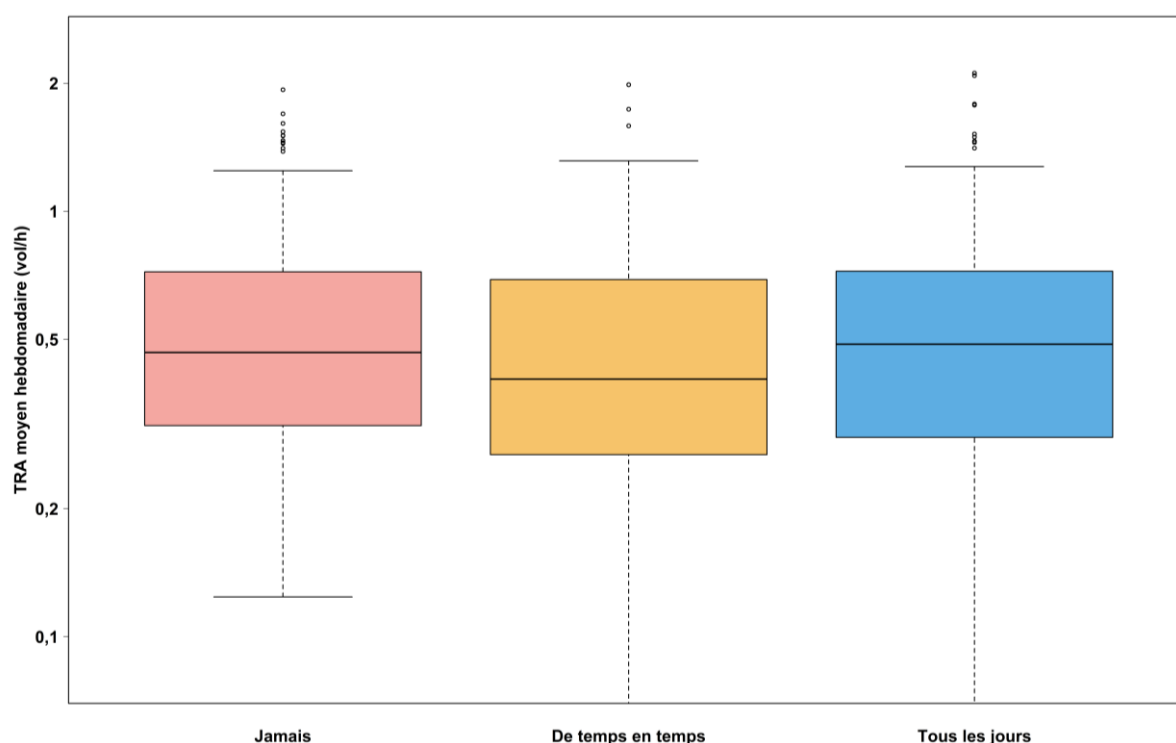


Figure 35. Distributions à l'échelle de l'échantillon du TRA en fonction de l'utilisation de la hotte raccordé à l'extérieur (échelle logarithmique)

**Tableau 43. Distributions représentées du TRA en fonction de l'utilisation de la hotte
raccordé à l'extérieur**

Utilisation de la hotte	Effectif observé	MA	Min	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Max
Jamais	122	0,59	0,12	0,21	0,31	0,47	0,72	1,18	1,47	1,93
De temps en temps	163	0,52	0,07	0,17	0,27	0,40	0,69	0,98	1,15	1,98
Tous les jours	119	0,6	0,06	0,19	0,29	0,49	0,72	1,14	1,47	2,11
NSP	68	0,76	0,1	0,18	0,33	0,54	0,75	2,04	2,53	3,97

7.11 TRA et taux de présence dans le logement

Le Tableau 44 et la Figure 36 présentent la distribution du TRA en fonction du taux de présence d'au moins un occupant dans le logement au cours de la semaine de l'enquête, à l'échelle du parc de logements des logements français.

L'analyse met en évidence une augmentation significative du TRA avec le taux de présence d'occupants dans le logement (p -valeur $< 10^{-4}$). Les logements occupés moins de 50 % de la semaine présentent les niveaux de TRA les plus faibles, avec une valeur médiane de 0,30 vol/h, tandis que les logements le plus souvent occupés (≥ 95 %) affichent un TRA médian atteignant 0,73 vol/h.

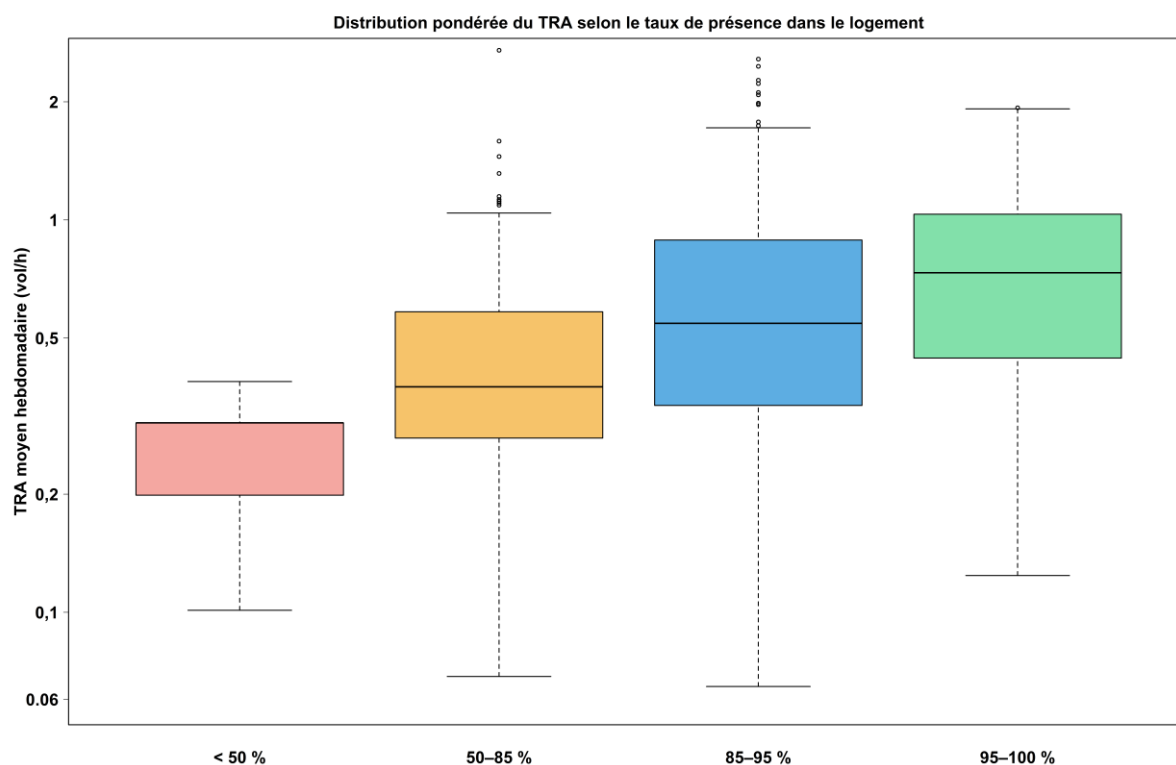
Cette association est d'une part liée au fait que le TRA est calculé à partir de deux variables dépendant de la présence des occupants : la production métabolique et la concentration en CO₂. Le calcul du TRA correspond à peu de choses près au ratio entre les deux et ne s'affranchit pas complètement de cette dépendance.

D'autre part, c'est en général pendant l'occupation du logement que les ouvrants sont ouverts dans les différentes pièces du logement. Il est donc attendu de voir une augmentation du TRA avec le taux de présence dans le logement sur la semaine. La saison comme il a été vu précédemment influence l'ouverture des fenêtres et le TRA. La saison, le taux de présence et l'ouverture de fenêtres pourraient être étroitement liés. Si le nombre moyen d'occupants sur la semaine est bien associé à la fréquence globale d'ouverture de fenêtres dans le logement, c'est une peu moins le cas avec le taux de présence. L'occupation n'est par contre pas associée à la période de chauffe.

Tableau 44. Distribution du TRA en fonction du taux de présence dans le logement pendant la semaine

	Échantillon			Parc des logements							
Taux de présence sur la semaine (%)	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
< 50 %	18	0,1	0,39	0,25	0,13	0,20	0,30	0,30	0,33	0,33	1 182 254
50 à 85 %	188	0,07	3,1	0,48	0,17	0,28	0,38	0,58	0,83	0,95	10 604 771
85 à 95 %	176	0,06	3,97	0,74	0,17	0,34	0,55	0,89	1,61	2,46	12 025 768
95 à 100 %	90	0,12	1,93	0,78	0,3	0,44	0,73	1,03	1,44	1,44	4 989 587

(Champ : 28 802 380 logements)



(Champ : 28 802 380 logements, échelle logarithmique)

Figure 36. Distribution du TRA en fonction du taux de présence pendant la semaine d'enquête

8 Taux de renouvellement d'air par pièce

Le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire est exprimé à l'échelle du logement en intégrant temporellement ce qui se passe la nuit et le jour et spatialement les mesures de CO₂ dans la chambre et le séjour, la production métabolique dans l'ensemble du logement et le volume du logement. La portée de l'intégration spatiale et donc de la représentativité de cet indicateur à l'échelle du logement dépend de l'état d'ouverture de la porte de la chambre de nuit comme de jour. Cet indicateur global se base sur différentes hypothèses discutées à la section 3.4.6. Plutôt que de retenir que cet indicateur global à l'échelle du logement, deux autres indicateurs de TRA ont été déterminés de manière complémentaire :

- Un taux de renouvellement d'air moyen limité au seul séjour principal (y compris cuisines ouvertes) durant les heures de journée (définies ici comme couvrant la période de 05h30 à 01h00 le lendemain) : le TRA diurne moyen. Il prend en compte les mesures de CO₂ dans le séjour, la production métabolique des occupants présents dans l'ensemble du logement durant le jour et le seul volume du séjour ;
- Un taux de renouvellement d'air moyen limité à la chambre principale durant les heures de nuit (définies ici comme couvrant la période de 01h00 à 05h30) : le TRA nocturne moyen. Il prend en compte les mesures de CO₂ dans la chambre principale, la production métabolique des occupants présents dans la chambre durant la nuit et le seul volume de la chambre ;

Pour ces deux indicateurs, l'état de la porte de la chambre n'intervient pas, simplifiant certaines hypothèses sur la part du volume de logement pris en compte mais rajoutant une incertitude autour de l'applicabilité du modèle de calcul (voir les sections 3.5 et 3.6)

8.1 Distribution du TRA diurne moyen au niveau du séjour

Les statistiques descriptives associées au TRA diurne moyen au niveau du séjour sont présentées au Tableau 45. La valeur médiane du TRA diurne moyen est de 0,75 vol/h, tandis que 25 % des logements dépassent 1,20 vol/h. En période hors-chauffe, le TRA diurne est significativement plus élevé par rapport aux logements enquêtés en période de chauffe (1,25 contre 0,68 vol/h en valeur médiane, $p < 0,0001$).

La Figure 37 présente la distribution du TRA diurne moyen dans le séjour sous forme d'un histogramme par classe, exprimé en pourcentage de logements. Elle montre que la majorité des logements se situe dans des classes de TRA comprises entre 0,5 et 1 vol/h. Les classes supérieures à 1 vol/h représentent également une proportion non négligeable des logements (environ 34 % au total), traduisant l'existence de situations de renouvellement d'air plus élevées en période diurne. À l'inverse, les logements présentant des niveaux de TRA inférieurs à 0,3 vol/h restent minoritaires (environ 9 %).

Tableau 45. Distribution du TRA diurne moyen au niveau du séjour (volume/h)

TRA diurne moyen dans le séjour	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Toutes périodes	472	0,13	6,60	0,93	0,31	0,46	0,75	1,20	1,62	1,95	28 802 379
Période de chauffe	370	0,13	3,32	0,77	0,28	0,43	0,68	1,01	1,38	1,67	21 870 175
Période hors-chauffe	102	0,16	6,60	1,45	0,50	0,75	1,25	1,57	2,51	3,99	6 932 204

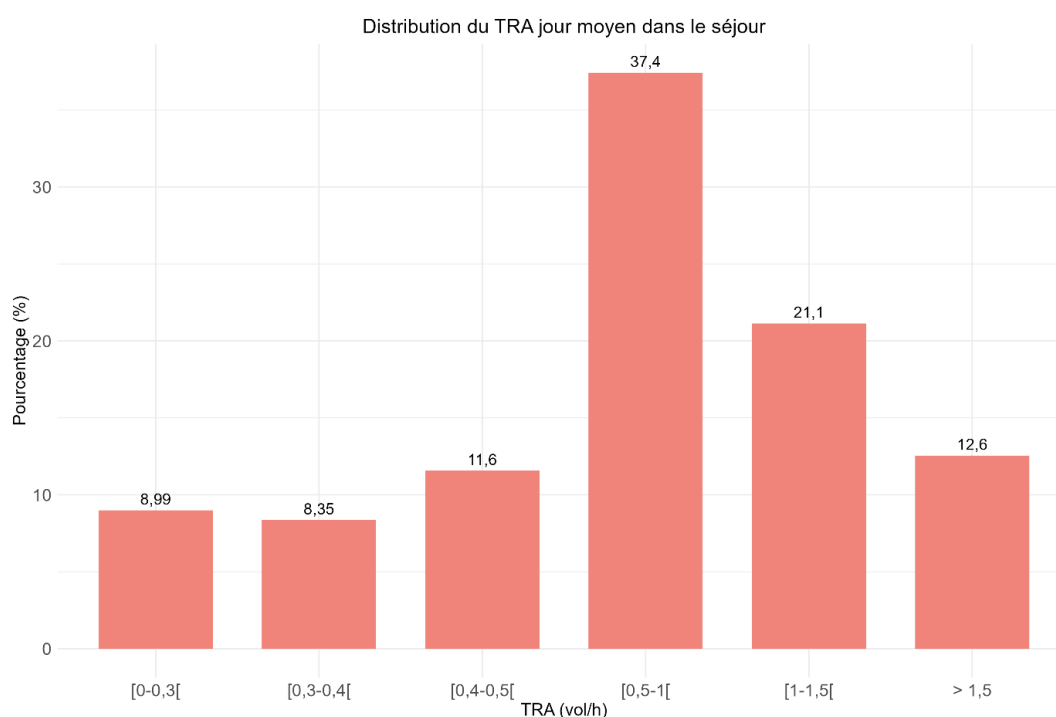


Figure 37. Distribution du TRA diurne moyen dans le séjour

La Figure 38, représentant la densité de probabilité du TRA moyen diurne hebdomadaire, met en évidence une distribution asymétrique, caractérisée par un mode autour de 0,45 vol/h et quelques valeurs élevées jusqu'à près de 7 vol/h.

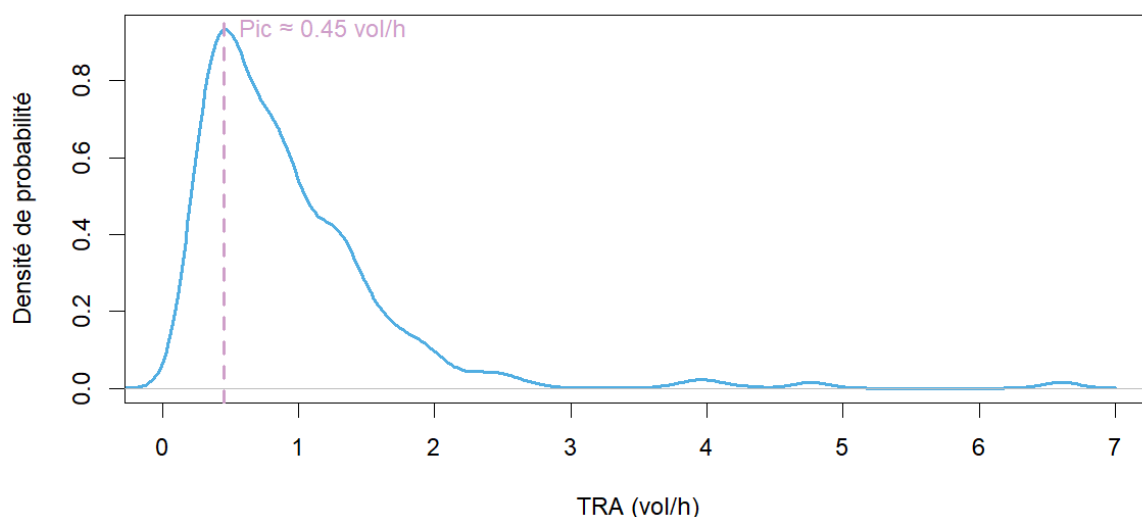


Figure 38. Densité de probabilité pondérée du taux de renouvellement d'air diurne moyen hebdomadaire

8.2 Distribution des TRA nocturne moyen au niveau de la chambre

Les statistiques descriptives du TRA nocturne moyen dans la chambre principale sont présentées au Tableau 46. La moitié des logements présentent un TRA nocturne inférieur à 0,54 vol/h, tandis que 25 % des logements dépassent 0,98 vol/h. Les valeurs extrêmes restent marginales. En période hors-chauffe, le TRA nocturne en chambre est significativement plus élevé par rapport aux logements enquêtés en période de chauffe (1,48 contre 0,44 vol/h en valeurs médianes, $p < 0,0001$).

Tableau 46. Distribution du taux de renouvellement d'air nocturne moyen au niveau de la chambre principale (volume/h)

TRA nocturne moyen dans la chambre	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Toutes périodes	472	0,10	32,0	0,99	0,19	0,29	0,54	0,98	2,11	3,65	28 802 379
Période de chauffe	370	0,10	17,6	0,68	0,19	0,28	0,44	0,72	1,18	1,77	21 870 175
Période hors-chauffe	102	0,11	32,0	2,00	0,29	0,51	1,48	2,47	4,66	6,01	6 932 204

La Figure 39 présente la distribution du taux de renouvellement d'air nocturne moyen dans la chambre sous forme d'un histogramme par classes. Elle met en évidence une répartition plus hétérogène que pour la période diurne, avec une part importante de logements présentant des niveaux de TRA nocturnes faibles. En particulier, environ 27 % des logements présentent un TRA nocturne inférieur à 0,3 vol/h, traduisant des situations de renouvellement d'air plus limité pendant la nuit. Les logements présentant des niveaux supérieurs à 1,5 vol/h représentent également une proportion non négligeable (environ 16 %).

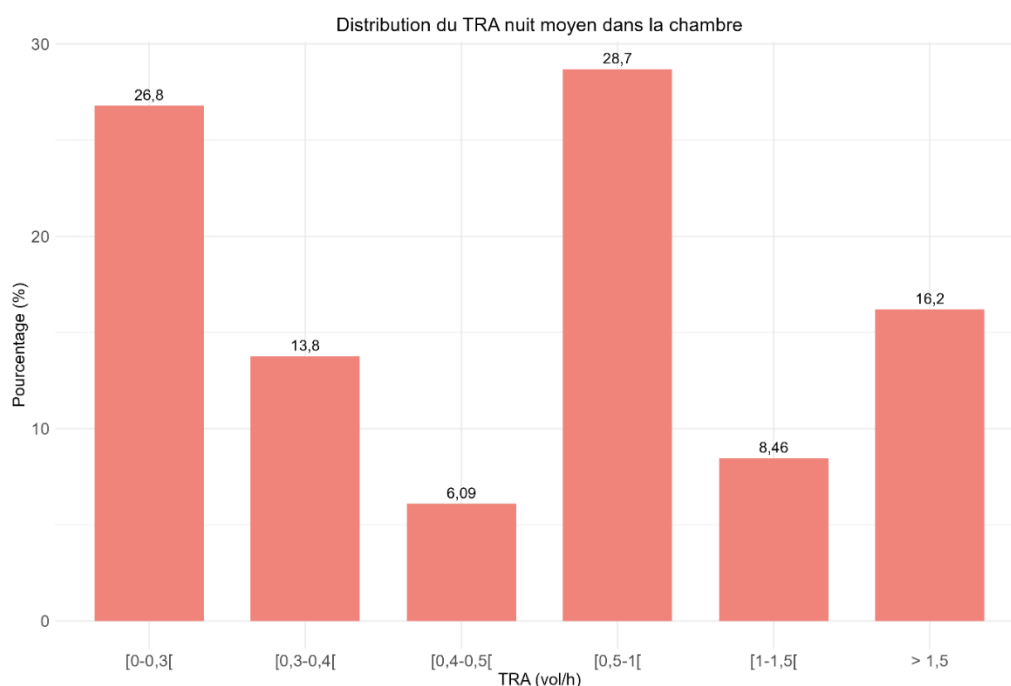


Figure 39. Distribution du TRA nocturne moyen hebdomadaire

La Figure 40 représentent la densité de probabilité du TRA nocturne moyen. Elle met en évidence une distribution fortement asymétrique, caractérisée par un pic principal autour de 0,26 vol/h, correspondant au mode de la distribution. La distribution présente par ailleurs une queue étendue vers les valeurs élevées, témoignant de situations ponctuelles de renouvellement d'air nocturne important.

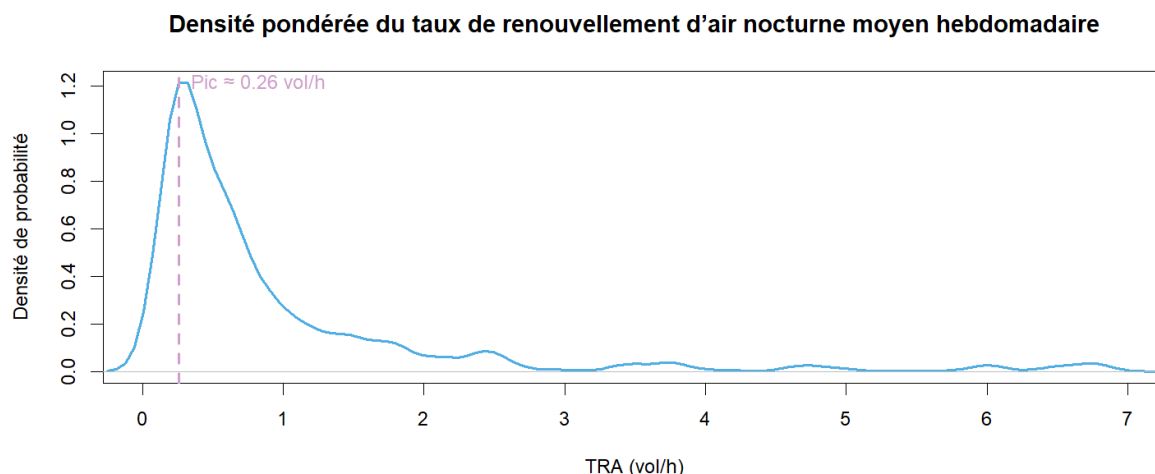


Figure 40. Densité de probabilité du taux de renouvellement d'air nocturne moyen dans la chambre principale du logement

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que le TRA nocturne dans la chambre est globalement plus faible et plus dispersé que le TRA diurne dans le séjour, avec une proportion notable de logements présentant des niveaux de renouvellement d'air limités durant la nuit. Cette hétérogénéité reflète la diversité des configurations de logement et des conditions de ventilation nocturne, ainsi que l'absence de distinction de l'état de la porte de la chambre dans le calcul de cet indicateur.

8.3 Comparaison TRA diurne et TRA nocturne

Le Tableau 47 et la Figure 41 comparent les distributions du taux de renouvellement d'air (TRA) moyen hebdomadaire, du TRA diurne dans le séjour et du TRA nocturne dans la chambre. Les trois indicateurs n'intègrent pas les mêmes périodes ni les mêmes espaces. Le TRA moyen hebdomadaire prend en compte l'ensemble du logement et l'état de la porte de la chambre. Le TRA nocturne moyen se focalise sur la chambre principale sur la période 01h00 à 05h30 et le TRA diurne moyen est déterminé à l'échelle du séjour sur la période complémentaire de 05h30 à 01h00.

Première observation, le TRA moyen hebdomadaire est globalement inférieur aux deux autres indicateurs (test de Friedman sur observations appariées significatif). Seuls 33 % des logements présentent un TRA moyen hebdomadaire compris entre le TRA nocturne et le TRA diurne. Même s'il est agrégé à l'échelle de la semaine, le TRA moyen hebdomadaire ne représente pas un niveau intermédiaire moyen entre le TRA nocturne dans la chambre et le TRA diurne dans le séjour. Plusieurs explications peuvent être envisagées :

- Le fait de ne pas tenir compte de l'état de la porte de la chambre dans le calcul pourrait conduire à une surestimation des valeurs de TRA notamment nocturne ;
- La prise en compte de l'ensemble des occupants pour la détermination de la production métabolique au niveau du séjour en journée peut également conduire à une surestimation du TRA diurne ;

- Travailler à l'échelle d'une pièce sans prendre en compte les échanges vers ou provenant d'autres pièces dans le modèle peut biaiser le calcul des TRA diurnes et nocturnes ;
- Le TRA pourrait être différent entre les pièces d'un même logement. Ce qui soulève la question de la représentativité spatiale du TRA exprimé sur l'ensemble du logement sans tenir compte de ce qui se passe dans les différentes pièces du logement, y compris autres que la chambre principale ou le séjour ;
- De même, un indicateur de TRA calculé à l'échelle d'une pièce peut dépendre de l'agencement des pièces et ne pas être représentatif du logement dans son ensemble. En général, le dimensionnement d'un système de ventilation est réalisé à l'échelle du volume habitable du logement pris dans son ensemble. Cette échelle est sans doute la plus appropriée pour une interprétation simple du TRA.

Tableau 47. Comparaison des différents indicateurs de TRA (vol/h)

	Echantillon (n = 472)		Parc de résidences principales (N= 28 802 379 logements)						
	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95
TRA moyen hebdomadaire dans le logement	0,06	3,97	0,63	0,17	0,30	0,45	0,78	1,16	1,61
TRA nocturne moyen dans la chambre	0,09	32,0	0,99	0,19	0,29	0,54	0,98	2,11	3,65
TRA diurne moyen dans le séjour	0,12	6,60	0,93	0,31	0,46	0,75	1,20	1,62	1,95

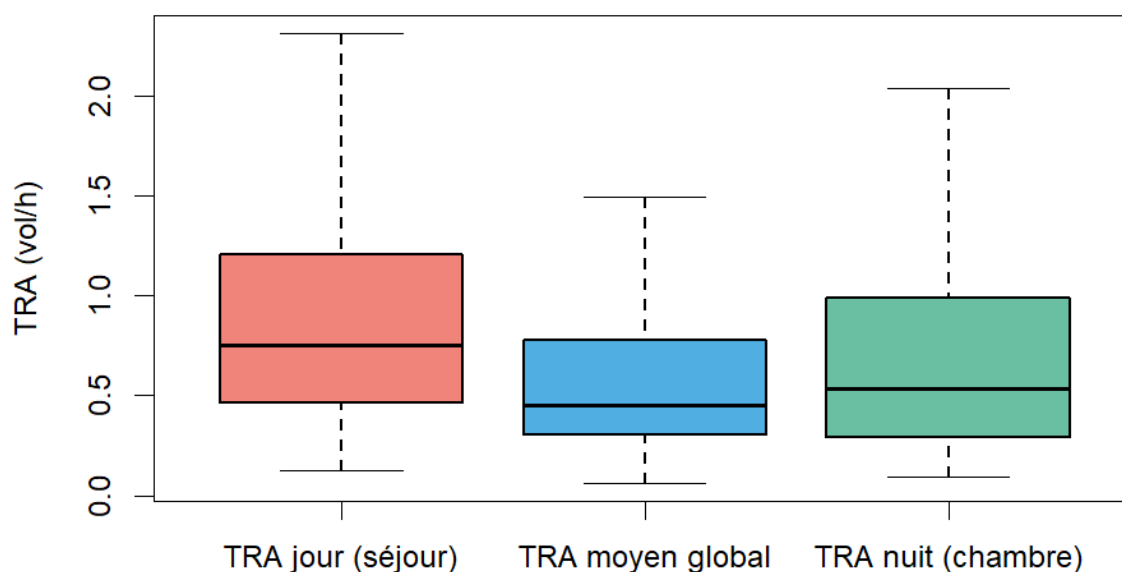


Figure 41. Comparaison du TRA diurne dans le séjour, du TRA moyen hebdomadaire et du TRA nocturne dans la chambre (données extrêmes exclues)

Le TRA nocturne présente une médiane de 0,54 vol/h, inférieure à celle du TRA diurne, estimée à 0,75 vol/h. L'écart entre ces deux indicateurs traduit deux jeux de différence au regard de la période considérée (journée / nuit) et de la pièce considérée (chambre / séjour). Il est intéressant de noter que dans les 4 studios enquêtés, où la chambre et le séjour forment une même pièce, le TRA diurne est systématiquement supérieur au TRA nocturne (de +0,06 à +0,63 vol/h pour une plage de TRA nocturne allant de 0,17 à 1,18 vol/h). La production métabolique est d'ailleurs plus importante en journée que la nuit dans ces logements.

Une comparaison appariée des taux de renouvellement d'air déterminés sur le jour ou la nuit a d'abord été réalisée à l'échelle de l'échantillon, à l'aide d'un test non paramétrique de Wilcoxon pour données appariées. Ce test met en évidence une différence statistiquement significative entre le TRA diurne et le TRA nocturne au sein d'un même logement ($p < 10^{-4}$).

Toutefois, lorsque la comparaison est réalisée en tenant compte du plan de sondage et des poids associés, l'analyse appariée pondérée ne met pas en évidence de différence moyenne significative entre les valeurs de TRA mesurées le jour et celles mesurées la nuit ($p=0,92$). Cela suggère que les différences observées entre le jour et la nuit sont marquées au sein de l'échantillon, mais qu'elles ne traduisent pas un écart systématiquement généralisable à l'ensemble du parc de logements, en raison d'une forte hétérogénéité des situations et de l'influence du plan de sondage.

Au travers des trois indicateurs de TRA, c'est la qualité du renouvellement d'air neuf dans le logement qui est recherché. Les trois indicateurs captent une partie de l'information pertinente, mais sont tous trois entachés d'hypothèses de calculs apportant de l'incertitude sur les résultats. La comparaison de ces trois indicateurs de TRA ne peut se faire qu'en faisant appel aux hypothèses prises en compte dans leur calcul. Le TRA moyen hebdomadaire semble le mieux répondre à l'objectif de représentativité du logement dans son ensemble.

8.4 TRA nocturne moyen en chambre et état de la porte

L'influence de l'état d'ouverture de la porte de la chambre sur le TRA nocturne moyen dans a été étudiée (Tableau 48 et Figure 42). Le TRA nocturne est significativement plus élevé dans les logements où la porte de la chambre reste ouverte ou entrebâillée la nuit (médiane de 0,80 vs 0,29 vol/h, $p < 10^{-4}$). Cela traduit à la fois un risque de surestimation du TRA nocturne du fait du mode de calcul qui ne tient pas compte de l'ouverture de la porte et des apports potentiellement non négligeables des autres parties du logement, mais aussi le fait que la porte ouverte peut faciliter le balayage de la chambre et ainsi augmenter le renouvellement d'air.

Tableau 48. TRA nocturne moyen de la chambre principale en fonction de l'état d'ouverture de la porte

État de la porte de la chambre la nuit	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Ouverte ou entrebâillée	278	0,10	32,0	1,43	0,30	0,43	0,80	1,56	3,45	4,95	16 482 415
Fermée	191	0,10	4,33	0,38	0,16	0,19	0,29	0,46	0,63	0,81	11 365 799
NSP	3	0,17	1,18	0,83	0,17	0,6	0,60	1,18	1,18	1,18	954 166

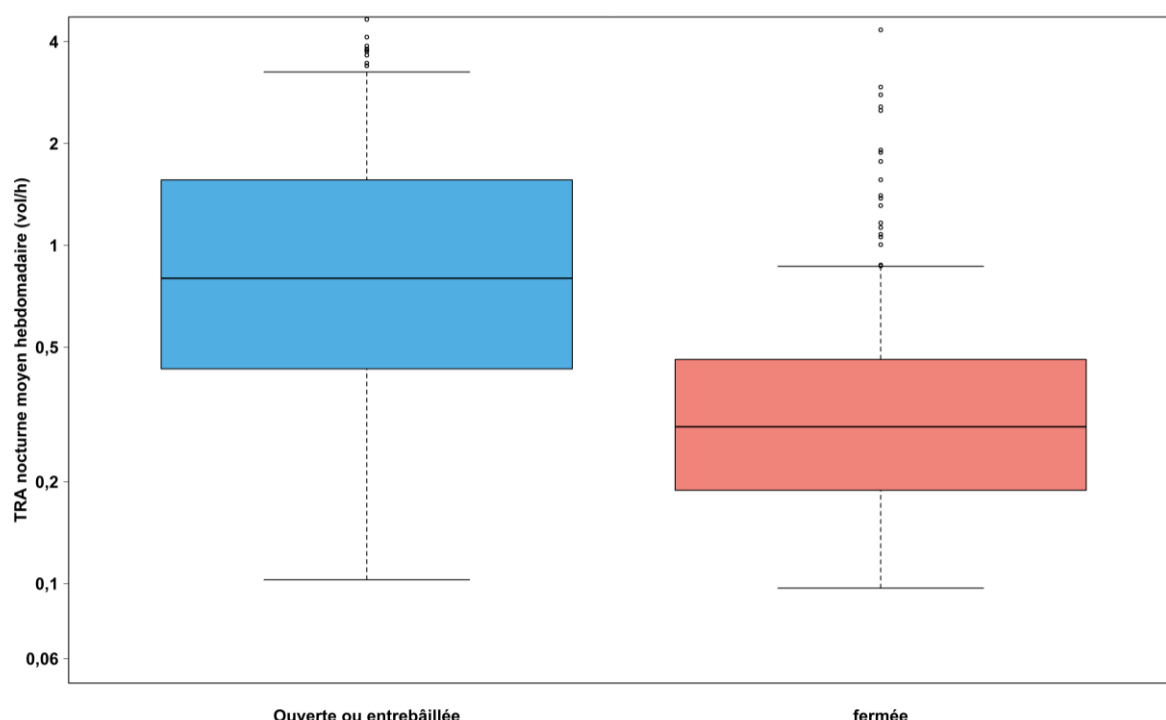


Figure 42. TRA nocturne en chambre selon l'état de la porte (échelle logarithmique)

8.5 TRA diurne selon le type de séjour avec ou sans cuisine américaine

Parmi les pièces de séjour instrumentées, certaines disposent également d'une cuisine ouverte à l'américaine. Dans ce cas, un dispositif spécifique d'extraction de l'air (mécanique ou naturelle) est présent la plupart du temps. L'influence de cette fonctionnalité supplémentaire sur le TRA diurne dans le séjour a été étudiée (Tableau 49). Les studios comportant également une cuisine ouverte ont été pris en compte parmi les séjours avec cuisine ouverte.

Tableau 49. TRA diurne moyen dans les séjours en fonction de la présence d'une cuisine ouverte dans la pièce

Type de séjour	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Séjour seul	226	0,15	6,60	1,01	0,32	0,46	0,83	1,25	1,75	2,13	13 531 343
Séjour avec cuisine ouverte	243	0,13	3,99	0,84	0,27	0,43	0,70	1,02	1,50	1,82	14 718 843

Le TRA diurne dans les séjours avec cuisine ouverte a tendance à être légèrement plus faible que celui associé à un séjour seul. La baisse est significative à l'échelle de l'échantillon ($p = 0,007$), mais pas à l'échelle du parc en tenant compte des poids de sondage.

La baisse observée pourrait être due à une fréquence plus faible d'ouverture des fenêtres de la pièce. Mais après vérification, il s'avère que les fenêtres sont ouvertes plus d'une heure par jour autant sinon plus dans un séjour avec cuisine ouverte que dans les autres séjours (55 % contre 46 % respectivement). Une autre possibilité serait liée au fait qu'un séjour avec cuisine ouverte est un peu plus grand qu'un séjour simple (surface de 30 par rapport à 28 m² respectivement, p -valeur $< 10^{-4}$). Pour de mêmes débits de renouvellement d'air, le TRA diurne serait alors un peu plus faible. C'est l'hypothèse la plus plausible à ce stade.

8.6 TRA nocturne et TRA diurne en fonction de l'ouverture des fenêtres

L'ouverture des fenêtres a été décrite non seulement à l'échelle du logement, mais également au niveau des pièces comme la chambre de la personne de référence et le séjour principal de jour comme de nuit. Le TRA nocturne a ainsi pu être croisé avec la fréquence d'ouverture des fenêtres en chambre la nuit en déclinant selon la période de chauffe / hors-chauffe (**Tableau 50**). Un croisement similaire a été réalisé entre le TRA diurne et l'ouverture des fenêtres dans le séjour en journée (**Tableau 51**).

Le TRA nocturne est significativement plus élevé dans les foyers ouvrant la fenêtre de leur chambre plus d'une heure par nuit par rapport à ceux qui ne l'ouvrent pratiquement jamais, que ce soit en période hors-chauffe (1,54 contre 0,46 vol/h en valeur médiane, $p = 0,004$) ou en période de chauffe (0,60 contre 0,42 en valeur médiane, $p < 0,0001$).

Tableau 50. Distribution du TRA nocturne selon la fréquence d'ouverture de fenêtre dans la chambre la nuit selon la période de chauffe

Période hors-chauffe	Échantillon			Parc des logements							
Fréquence d'ouverture	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Rarement ou jamais	30	0,11	32,0	2,43	0,26	0,29	0,46	1,74	6,49	6,49	1 387 332
Moins d'une demi-heure	-										
Entre une demi-heure et 1 heure	1	0,19									31 657
Plus d'une heure	69	0,11	6,01	1,91	0,30	0,67	1,54	2,47	4,13	4,95	5 487 372
NSP	2	0,74	1,31	1,03	0,74	0,74	1,31	1,31	1,31	1,31	25 844
Période chauffe	Échantillon			Parc des logements							
Fréquence d'ouverture	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Rarement ou jamais	314	0,10	6,76	0,65	0,19	0,27	0,42	0,68	1,18	1,72	19 018 755
Moins d'une demi-heure	6	0,29	0,95	0,44	0,29	0,29	0,32	0,32	0,95	0,95	355 935
Entre une demi-heure et 1 heure	3	1,00	17,6	9,37	1,00	2,78	2,78	17,6	17,6	17,6	46 595
Plus d'une heure	43	0,15	5,02	0,84	0,31	0,35	0,60	1,31	1,56	1,70	2 346 667
NSP	4	0,22	1,76	0,48	0,22	0,22	0,46	0,51	0,51	1,76	102 224

(Champ : 28 802 380 logements) ; NSP : ne sait pas ; en gris italique : effectifs très faibles (< 10)

Les fenêtres du séjour sont ouvertes plus d'une heure par jour dans la très grande majorité des logements en période hors-chauffe, ce qui se traduit par un TRA diurne en général élevé (médiane de 1,34 vol/h).

En période de chauffe, l'ouverture des fenêtres du séjour en journée ne s'accompagne pas d'une variation significative du TRA diurne. Entre le groupe de foyers qui n'ouvrent que rarement la fenêtre de leur séjour et celui où les fenêtres sont ouvertes plus d'une heure par jour, la valeur médiane du TRA diurne est pratiquement équivalente autour de 0,6 vol/h. L'absence apparente d'influence de l'ouverture des fenêtres du séjour sur le TRA diurne en période de chauffe indique une possible contribution d'autres facteurs masquant l'effet attendu. Le positionnement plutôt central du séjour dans le logement avec une communication vers les autres pièces favorise les échanges et notamment l'impact des ouvertures de fenêtres dans les autres pièces. Comparativement à une chambre, le volume du séjour est généralement plus grand. Et l'air de ce volume peut mettre plus de temps à se

renouveler. Il reste toutefois difficile à ce stade d'avancer des hypothèses sur l'absence d'influence de l'ouverture des fenêtres du séjour sur le TRA diurne en période de chauffe.

Tableau 51. Distribution du TRA diurne selon la fréquence d'ouverture de fenêtres dans le séjour en journée selon la période de chauffe

Période hors-chauffe	Échantillon			Parc des logements							
Fréquence d'ouverture	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
<i>Rarement ou jamais</i>	6	0,16	2,35	0,81	0,37	0,51	0,60	0,77	2,35	2,35	226 700
<i>Moins d'une demi-heure</i>	5	0,36	1,08	0,84	0,64	0,64	0,85	1,08	1,08	1,08	203 281
<i>Entre une demi-heure et 1 heure</i>	7	0,33	1,25	0,99	0,88	0,88	0,88	1,25	1,25	1,25	696 416
Plus d'une heure	83	0,24	6,60	1,56	0,49	0,72	1,34	1,82	3,79	4,76	5 793 167
<i>NSP</i>	1	0,62									12 642
Période chauffe	Échantillon			Parc des logements							
Fréquence d'ouverture	Effectif observé	Min	Max	MA	P10	P25	P50	P75	P90	P95	Effectif représenté
Rarement ou jamais	28	0,32	2,71	0,77	0,36	0,47	0,58	1,27	2,06	2,35	1 271 494
Moins d'une demi-heure	101	0,15	3,32	0,65	0,25	0,43	0,77	1,01	1,20	1,37	5 381 773
Entre une demi-heure et 1 heure	78	0,23	2,70	0,66	0,29	0,48	0,60	1,12	1,38	1,62	4 822 795
Plus d'une heure	156	0,13	2,80	0,59	0,27	0,39	0,63	0,83	1,33	1,65	9 325 160
<i>NSP</i>	7	0,22	1,62	0,99	0,35	1,02	1,02	1,62	1,62	1,62	1 068 953

(Champ : 28 802 380 logements) ; NSP : ne sait pas ; en gris italique : effectifs très faibles (< 10)

9 Comparaison entre les deux campagnes nationales CNL2 et CNL1

La comparaison entre les deux campagnes nationales CNL2 et CNL1 a été menée sur les deux indicateurs communs : le débit de renouvellement d'air nocturne (RA_n) et le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA). La comparaison a été réalisée à l'échelle du parc de résidences principales dans les deux cas (29 millions de logements pour la CNL2 et 25 millions de logements pour la CNL1). Pour la CNL1, la présence de données manquantes a conduit à exprimer les résultats sur un effectif plus faible de logements (près de 20 millions). Dans le cadre de la CNL2, un nouveau poids de sondage a été calculé pour compenser la présence de valeurs manquantes (voir section 3.9.3). Pour la comparaison entre les deux campagnes, un nouveau jeu de poids de sondage spécifique a été pris en compte sur la base des mêmes variables de redressement et de calage utilisées pour la CNL1 (voir section 3.10).

La comparaison a également été réalisée sur les logements construits sur une même période (jusqu'en 2005) entre les deux campagnes. Cette restriction permet d'écarter les logements plus récents construits selon les réglementations RT2005 et RT2012 et de se focaliser sur des caractéristiques de bâtiments plus similaires pour la comparaison.

9.1 Comparaison du débit de renouvellement d'air nocturne entre CNL1 et CNL2

Le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n ne varie pas de manière significative entre les deux campagnes (18 et 16,5 m³/h en valeur médiane respectivement pour la CNL1 et la CNL2, test de Mann-Whitney) (Tableau 52). Il en est de même en se basant sur les seuls logements construits avant 2006.

Tableau 52. Comparaison du débit de renouvellement d'air nocturne RA_n entre les deux campagnes CNL1 et CNL2

	Débit de renouvellement d'air nocturne RA_n (m ³ /h)							
	N échantillon	N parc	P05	P25	Médiane	P75	P95	MA
CNL1	447	19 311 051	5,0	10,0	18,0	32,0	88,0	27,4
CNL2*	472	28 309 284	3,8	7,5	16,5	35,5	86,9	26,5
CNL2 (≤ 2005)*	393	23 840 305	3,5	7,5	17,8	34,0	87,2	29,6

**sur la base du jeu de poids de sondage spécifique utilisant les mêmes variables de redressement et de calage que la CNL1.*

L'absence de variation du débit de renouvellement d'air nocturne rejoint celle observée sur la concentration moyenne hebdomadaire en CO₂ (voir le premier rapport sur la CNL2, Ramalho et al., 2025). Cela indiquerait également que la production métabolique nocturne dans la chambre entre les deux campagnes est similaire.

L'absence d'évolution du débit de renouvellement d'air nocturne est également cohérente avec le fait que la fréquence déclarée d'ouverture des fenêtres ou des portes de la chambre la nuit n'a globalement pas changé entre les deux campagnes (voir le rapport sur l'état de la ventilation, Assy et al., 2025). De même, le débit d'air extrait total n'a pas varié parmi les logements équipés d'un système de ventilation mécanique. Dans ces conditions, une variation du débit de renouvellement d'air nocturne n'était pas attendue.

9.2 Comparaison du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire entre CNL1 et CNL2

Les données relatives au taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) entre les deux campagnes sont présentées au Tableau 53.

Aucune évolution significative n'a été observée au regard du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) entre les deux campagnes (test de Mann-Whitney). Les distributions de valeurs apparaissent même proches l'une de l'autre (environ 0,5 vol/h en valeur médiane). La conclusion est identique en tenant uniquement compte des logements construits avant 2006.

Tableau 53. Comparaison du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire TRA entre les deux campagnes CNL1 et CNL2

	Taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire TRA (vol/h)							
	N échantillon	N parc	P05	P25	Médiane	P75	P95	MA
CNL1	450	19 452 820	0,15	0,30	0,54	0,94	1,91	0,76
CNL2*	472	28 309 284	0,13	0,32	0,53	0,82	1,78	0,67
CNL2 (≤ 2005)*	393	23 840 305	0,13	0,34	0,55	0,83	1,93	0,70

**sur la base du jeu de poids de sondage spécifique utilisant les mêmes variables de redressement et de calage que la CNL1.*

La **Figure 43** représente la densité de probabilité pondérée du TRA moyen hebdomadaire pour les campagnes CNL1 et CNL2 pour les logements construits avant 2005. Les distributions apparaissent fortement asymétriques à droite dans les deux cas. Le maximum de densité (mode) est situé autour de 0,31 vol/h pour CNL1 et de 0,36 vol/h pour CNL2, valeurs proches correspondant au taux de renouvellement d'air le plus fréquemment observé dans le parc de logements.

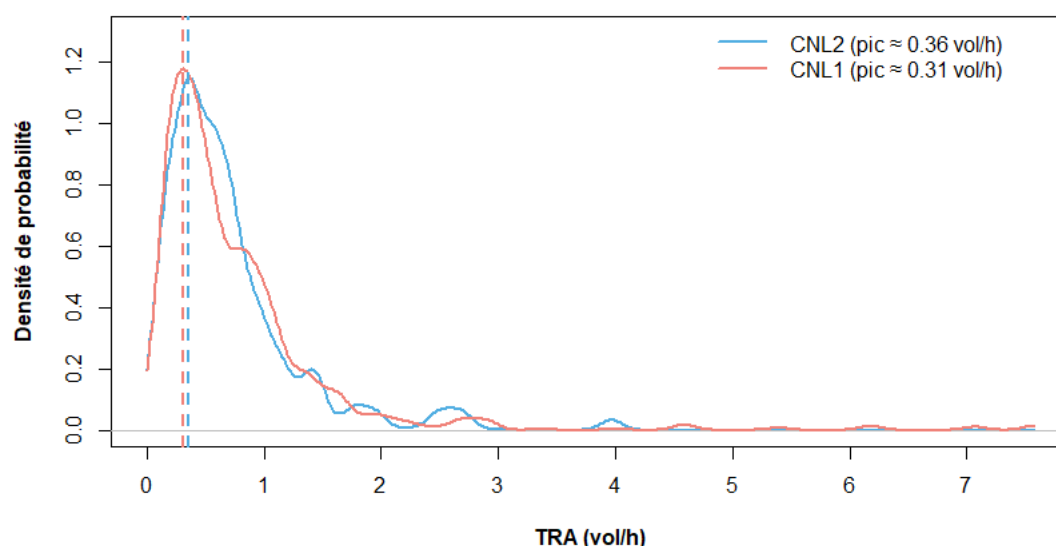


Figure 43. Densités pondérées du taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (vol/h) pour les campagnes CNL1 et CNL2, pour les logements construits avant 2005.

Comme précédemment, l'absence de variation du TRA entre les deux campagnes est à relier à la constance du CO₂ moyen hebdomadaire et également à une production métabolique moyenne hebdomadaire similaire (1,4 occupants en moyenne sur la semaine pour les deux campagnes en valeur médiane). De même, les débits d'air extraits par les systèmes de ventilation mécanique n'ont pas significativement varié.

Cependant, l'augmentation de la fréquence d'ouverture de fenêtres dans la journée entre les deux campagnes (voir Assy et al., 2025) ne semble pas marquer de changement dans l'évolution du TRA. Une autre variable à prendre en considération est le volume du logement permettant d'exprimer le taux de renouvellement d'air. Il n'a globalement pas évolué entre les deux campagnes (médiane de 233 en CNL2 contre 235 m³ en CNL1).

Ces éléments soutiennent l'absence d'évolution du TRA entre les deux campagnes. L'augmentation de la fréquence d'ouverture de fenêtres apparaît insuffisante à marquer une hausse globale du TRA. Il est probable qu'une augmentation au plus de 20 points sur une fréquence d'ouverture des fenêtres déjà élevée (73 % des logements ouvrent les fenêtres de leur séjour plus d'une heure par jour en CNL2 contre 54 % en CNL1) n'impacte pas le TRA de la même manière, par rapport à une situation où l'ouverture des fenêtres serait initialement beaucoup moins fréquente.

10 Discussion des résultats

10.1 TRA et valeurs de référence

Les analyses menées sur les données de la campagne CNL2 mettent en évidence une forte dispersion du taux de renouvellement d'air dans les logements en France, tant à l'échelle globale du logement qu'à l'échelle de la chambre la nuit et du séjour en journée. L'étendue des valeurs observées de moins de 0,1 à près de 4 vol/h pour le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire traduit une diversité de caractéristiques et de comportements des occupants variables avec la saison.

Il n'y a pas de valeurs de référence associées au taux de renouvellement d'air. La norme américaine de l'Ashrae 62-2001 dans sa version révisée en 2003 (Ashrae, 2003) fournit une indication sur un taux de renouvellement d'air requis de 0,35 vol/h pour le résidentiel. Cette indication n'est toutefois pas reprise dans les versions plus récentes des normes 62.1 et 62.2 (Ashrae, 2022a et 2022b). La proportion de logements qui respecterait ce minimum requis serait de 65 %.

La norme NF EN 16798-1 (2019), dédiée à la conception de bâtiments performants en énergie, fournit dans son annexe B informative des valeurs indicatives de TRA associées à chacune des 4 catégories de qualité d'ambiance intérieure attendues, parmi d'autres critères. La catégorie la plus élevée est préconisée pour les personnes les plus sensibles et est associée à une valeur de TRA par défaut de 0,7 vol/h. La catégorie moyenne correspond à une situation normale avec un TRA de 0,6 vol/h. La catégorie modérée est associée à une ambiance acceptable avec toutefois un risque de performance réduite des occupants et pour laquelle la valeur indicative de TRA est de 0,5 vol/h. La catégorie faible convient pour des expositions de courte durée avec un TRA indicatif de 0,4 vol/h. Au regard des données de la CNL2, déterminées sur des logements en exploitation, près de 31 % des logements montrent un TRA supérieur ou égal à 0,7 vol/h, et seraient associées à la catégorie d'ambiance intérieure la plus élevée. La proportion de logements associées à une catégorie d'ambiance intérieure normale ou élevée serait de 37,5 %. Un peu moins de la moitié des logements (44,5 %) serait associée à une catégorie d'ambiance intérieure faible avec un TRA de 0,4 vol/h ou moins.

10.2 Incertitudes méthodologiques

Les trois indicateurs de TRA calculés (TRA moyen hebdomadaire, TRA diurne dans le séjour et TRA nocturne dans la chambre) se basent sur de nombreuses hypothèses présentées aux sections 3.4.6, 3.5 et 3.6. L'applicabilité du modèle suppose la définition d'un volume monozone homogène fixant la représentativité spatiale de l'indicateur calculé. Cette définition dépend de l'état de l'ouverture des portes et en particulier de celle de la chambre la nuit. Le calcul du TRA moyen hebdomadaire se fait en modulant le volume pris en compte en fonction de l'état d'ouverture de la porte de la chambre le jour et la nuit. La

représentativité de cet indicateur couvre une fraction du volume du niveau du logement comprenant la chambre. Le TRA diurne fixe le volume à la seule pièce du séjour sans tenir compte des portes d'accès à la pièce et prend en compte la totalité des occupants et donc de la production métabolique dans le logement, avec un risque de surestimation. Le TRA nocturne est représentatif du volume de la chambre sans considérer l'état d'ouverture de la porte de la chambre avec un risque de surestimation de l'apport d'air neuf du fait de la non-prise en compte des flux d'air échangés entre les différentes zones ou pièces du logement. Deux aspects militent pour une représentativité à l'échelle du logement. D'une part, les mouvements des occupants entre les pièces du logement diffusent la production métabolique sur l'ensemble du volume habitable du logement. D'autre part, le système de ventilation est en général dimensionné à l'échelle du logement.

La représentativité temporelle est fixée par la nécessité d'agréger sur une période longue pour estimer une valeur moyenne (similaire à un état stationnaire) et permettant de négliger certains termes de l'équation. Le TRA moyen hebdomadaire représente la semaine d'enquête, soit 7 jours (168 heures). Le TRA nocturne est agrégé sur l'ensemble des périodes nocturnes comprises entre 01h00 et 05h30, soit en général 31,5 heures cumulées sur la semaine d'enquête. Le TRA diurne représente l'ensemble des périodes diurnes comprises entre 05h30 et 01h00 le lendemain, soit autour de 136,5 heures cumulées. Segmenter le calcul du TRA sur des périodes de plus en plus courtes nécessite de revoir le modèle de calcul.

Il n'y a pas de manière simple pour déterminer le taux de renouvellement d'air dans un logement. Les indicateurs de TRA calculés ici reposent sur des mesures de CO₂ dans différentes pièces du logement et sur des hypothèses sur leur représentativité, sur la concentration de CO₂ à l'extérieur du logement, sur le modèle de calcul à mettre en œuvre, sur la production métabolique, sur les périodes et sur les volumes à considérer. Ces hypothèses conduisent à des incertitudes autour des valeurs calculées de TRA.

L'incertitude sur la production métabolique repose sur la déclaration d'occupation du logement par chaque individu du ménage sur l'ensemble de la semaine et sur la production individuelle de CO₂. Cette dernière est elle-même basée sur le niveau d'activité métabolique (met) supposée de l'individu et sur des caractéristiques de population (poids moyen par tranche d'âge, taux métabolique de base) qui peuvent s'écarter des données propres à l'individu enquêté.

La concentration en CO₂ n'a pas été mesurée à l'extérieur du logement dans la CNL2. Elle est représentée par la valeur minimale observée sur la semaine dans la chambre ou le séjour. Elle est de plus supposée constante, ce qui n'est pas forcément le cas. La concentration extérieure en CO₂ peut varier dans la journée et d'un jour sur l'autre en particulier en zone urbaine. Ces variations peuvent être supérieures à l'incertitude de mesure. Takahashi et al. (2019) ont mesuré la concentration en CO₂ à différents endroits de la ville de Copenhague avec des valeurs variant de 340 à 450 ppm en général. Les concentrations au sol sont en général de 10 à 40 ppm plus élevées qu'en haut des immeubles (20 à 30 m de haut). Les auteurs soulignent l'importance de cette donnée pour la détermination des débits de ventilation nécessaires au maintien d'une valeur de référence en CO₂ dans le bâtiment. Les

variations de concentration de CO₂ à l'intérieur sont en général bien plus importantes qu'à l'extérieur. Mais négliger les fluctuations extérieures apporte une part d'incertitude dans les calculs.

La part de volume à prendre en compte dans le calcul revient à définir le système que l'on cherche à modéliser. En centrant le système sur une pièce, la représentativité de la concentration mesurée est mieux respectée. Le volume de la pièce peut être considéré comme une seule zone homogène si les portes d'accès sont fermées. En situation de porte ouverte, ce n'est pas vérifié. Il est également nécessaire de disposer de données (mesures de CO₂, occupation et productions métaboliques, flux d'échanges) sur tous les autres compartiments voisins qui échangent de la matière avec la pièce sélectionnée. Ce n'est en général pas le cas, et des hypothèses doivent être émises (par exemple la production métabolique de toute le logement prise en compte au niveau du séjour) ou sinon certains aspects sont délibérément écartés (flux d'échanges avec les autres pièces). Par ailleurs, les résultats ne sont interprétables qu'à l'échelle de cette pièce sans préjuger de ce qui peut se passer dans les autres pièces. A l'inverse, définir le système autour du logement soulève des interrogations autour de la représentativité des points de mesures et de l'impact des configurations des pièces au sein du logement. Des hypothèses d'agrégation de données disponibles à l'échelle de la pièce doivent également être avancées. Le système logement est par ailleurs plus complexe que le système pièce. Autant l'ouverture d'une fenêtre dans une pièce devrait influencer directement le TRA de la pièce en fonction du degré et de la durée d'ouverture. Autant la même situation pourrait ne pas ou très peu influencer le TRA à l'échelle du logement, ce qui va dépendre entre autres de la configuration des pièces. C'est cette deuxième option, de considérer le système logement, qui est mise en avant dans notre étude au travers du TRA moyen hebdomadaire.

La part des incertitudes sur la valeur calculée de TRA reste à déterminer. Une analyse complémentaire de sensibilité serait intéressante à mener pour déterminer l'impact des différentes hypothèses sur le calcul du TRA. De même, dans quelle mesure les incertitudes perturbent les associations avec d'autres variables ou caractéristiques du logement n'est pas connue. Et l'intensité même de ces associations peut varier selon l'échelle spatiale (ou même temporelle) à laquelle on se place (logement ou pièce). La comparaison des différents indicateurs entre eux montre des plages de valeurs dans un même ordre de grandeur. De plus, la comparaison du TRA moyen hebdomadaire avec les TRA « théoriques » déterminés à partir des seuls débits d'air extraits pour les logements équipés en ventilation mécanique montrent une certaine similitude des valeurs. Tout cela tend à indiquer que la part des incertitudes reste maîtrisée et que les valeurs calculées affichent une certaine cohérence.

10.3 Facteurs associés au TRA

Parmi les facteurs identifiés dans la littérature comme ayant une influence sur le TRA, certains ont pu être testés dans le cadre de la CNL2. Parmi eux, la saison (au travers des périodes de chauffe ou de hors-chauffe, liées aux pratiques d'ouverture de fenêtres), le taux

de présence dans le logement, l'état d'ouverture de la porte de la chambre (par rapport au TRA nocturne) et la fréquence d'ouverture des fenêtres (en déclinant selon la saison et la période de la journée) ont montré une influence sur le TRA. Par construction, le nombre d'occupants dans le logement (ou dans la chambre) et le volume (et donc la surface) du logement ou de la pièce étudiée sont également associés au TRA.

En revanche, le type de logement, sa date de construction, le type de système de ventilation, l'étage du logement ou l'utilisation d'une hotte de cuisine raccordée à l'extérieur ne sont pas associés de manière significative au TRA à l'échelle du parc. Les logements équipés d'un système de ventilation mécanique centralisé tendent à avoir un TRA un peu plus élevé par rapport à ceux équipés d'un système de ventilation naturelle, particulièrement visible pour les logements enquêtés en période de chauffe. Il n'est toutefois pas possible d'étendre cette observation à l'échelle du parc.

La contribution des différentes composantes du renouvellement de l'air (système de ventilation, ouvertures des fenêtres et infiltrations) reste difficile à établir. La période de chauffe / hors-chauffe semble être la composante qui ressort la plus associée au TRA. Elle traduit en partie l'influence de la fréquence d'aération par ouverture de fenêtres, même si l'association avec cette dernière ressort moins à l'échelle du parc de logements. Le système de ventilation ne ressort que très peu et les infiltrations restent difficiles à caractériser. La variabilité de la contribution des différents facteurs d'un logement à l'autre (aération, saison, occupation, état des ouvrants intérieurs et infiltrations) est sans doute à l'origine de la difficulté de mettre en évidence l'effet systématique d'une caractéristique intrinsèque au logement.

Parmi les logements équipés d'une VMC, les débits d'air extraits ne sont pas toujours conformes (voir Assy et al., 2025), ce qui induit un taux de renouvellement d'air attendu insuffisant au regard de la taille (et du volume) du logement. La conformité des débits d'air mesurés aux bouches d'extraction des systèmes de ventilation mécanique doit donc être prise en compte dans sa contribution au TRA. Mais, elle n'apparaît pas comme un facteur associé au TRA. Ce critère n'est donc pas suffisant pour s'assurer de l'efficacité du renouvellement d'air des pièces du logement par de l'air neuf, même s'il y contribue. En effet, certains logements conformes peuvent être associés à des valeurs de TRA très faibles traduisant sans doute un apport d'air neuf insuffisant au niveau des pièces de vie (principe de balayage non respecté, même si les débits d'air extraits sont suffisants). A l'inverse, des logements non conformes sont associés à des valeurs élevées de TRA impliquant possiblement des contributions importantes d'autres facteurs comme l'aération ou les infiltrations.

Les mesures de débit d'air aux bouches permettent également de déterminer un nouvel indicateur, le TRA « théorique », qui s'exprime de la même façon que les autres indicateurs de TRA mais qui ne tient pas compte de l'efficacité du balayage et des contributions des autres facteurs au renouvellement d'air. Il est limité aux logements équipés d'un système de ventilation mécanique et ayant fait l'objet de mesures. La comparaison avec le TRA moyen hebdomadaire montre des valeurs du même ordre de grandeur. Mais,

l'interprétation des écarts avec les autres indicateurs de TRA reste indicative, tant leur portée est différente.

La perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments n'est pas connue. Le matériau principal de construction du bâtiment, l'année de construction, le type de menuiserie et de vitrage et la présence de joints aux fenêtres pourraient aider à catégoriser les logements en groupes plus ou moins étanches ou au contraire perméables. Cela permettrait d'estimer grossièrement l'influence des infiltrations sur le TRA.

Il existe également une forte interaction entre les variables étudiées, notamment saison, période de la journée, pièce du logement considérée et ouverture des ouvrants. L'effet propre au système de ventilation mécanique est sans doute également à rechercher dans le sous-groupe de logements n'aérant que très rarement. Mais, il ne représente qu'une minorité de logements avec un effectif trop faible pour en tirer des conclusions.

Pour essayer de contrer cette dépendance entre les variables, une analyse multivariée exploratoire intégrant quatre facteurs susceptibles d'influencer le TRA moyen hebdomadaire a été menée sur l'échantillon de logements. Elle fait ressortir d'une part la période hors-chauffe (facteur principal) et l'ouverture des fenêtres plus d'une heure par jour (par rapport à rarement) comme facteurs favorisant un TRA élevé et d'autre part les logements récents (notamment construits après 2005 par rapport aux plus anciens) comme facteur défavorable. Le type de ventilation ne ressort pas en première intention. En détaillant le type de ventilation, seule la présence d'une VMC simple flux par extraction hygroréglable (par rapport à aucun système) montre une association avec un TRA plus élevé. L'occupation (nombre moyen d'occupants ou taux de présence), si elle est introduite dans l'analyse, ressort comme un important facteur favorisant le TRA, tout en faisant disparaître la contribution relative à l'aération. Ces éléments exploratoires restent à ce stade indicatifs et nécessitent avant toute interprétation d'approfondir ce volet d'analyse multivariée et de l'étendre à l'échelle du parc.

10.4 Evolution du TRA des logements en 15 ans

Malgré les incertitudes, le calcul du TRA moyen hebdomadaire a été conduit d'une manière similaire à la CNLI, permettant ainsi la comparaison des deux campagnes. Le débit de renouvellement d'air nocturne (RA_n) comme le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) n'ont pas évolué en 15 ans depuis la CNLI. Cette absence d'évolution était finalement attendue du fait de nombreux paramètres restés stables et qui interviennent dans le calcul de ces indicateurs : le nombre moyen d'occupants dans le logement et donc la production métabolique moyenne, le niveau moyen hebdomadaire de CO_2 dans la chambre, le débit total d'air extrait dans les logements équipés d'une ventilation mécanique, le volume médian des logements et de la fréquence d'ouverture des fenêtres la nuit.

La seule autre variable qui ait évolué entre les deux campagnes est la fréquence d'ouverture des fenêtres en journée aussi bien dans la chambre que dans le séjour (voir Assy et al., 2025). Mais, elle n'induit pas pour autant une variation du TRA. En fait, la fréquence

d'ouverture des fenêtres en journée était déjà élevée en CNL1 avec respectivement 54 % et 67 % des logements ouvrant plus d'une demi-heure par jour en séjour et en chambre. L'incrément observé en CNL2 jusqu'à +20 % ne conduit pas forcément à un surcroît d'augmentation du TRA.

Un autre aspect d'ordre méthodologique est lié au mode de calcul du TRA dans la CNL2 qui diffère un peu de celui de la CNL1 par l'intégration des mesures de CO₂ réalisées dans le séjour en plus de celles de la chambre, impliquant également la prise en compte dans le calcul d'une proportion plus importante du volume de logement (voir section 3.5.4). Cela peut induire des valeurs de TRA légèrement plus faibles notamment sur la période de la journée, même si l'estimation s'en avère plus juste. Un calcul rapide en s'affranchissant des mesures de CO₂ dans le séjour et en appliquant les mêmes règles de proportionnalité de volume que la CNL1 conduit à une valeur de TRA médian de 0,59 au lieu de 0,53 vol/h en utilisant le jeu de poids de sondage adapté de celui de la CNL1. Malgré tout, la différence avec la CNL1 reste non significative. Cet écart méthodologique n'a donc pas de conséquence sur l'interprétation des résultats.

Entre les deux campagnes CNL1 et CNL2, les nouvelles réglementations thermiques, RT2005 et RT2012 notamment, se sont principalement focalisées sur la performance énergétique des bâtiments en cherchant notamment à limiter la perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments neufs. La réglementation sur les systèmes de ventilation et les débits d'air extrait à atteindre pour les systèmes mécaniques n'a pas évolué entre les deux campagnes. La RE2020 introduit une inspection obligatoire du système de ventilation à réception, mais la mise en place de cette réglementation ne couvre pas les logements enquêtés. La part des logements construits après 2005 (jugés « neufs » par rapport à la CNL1) représente 14,5 % du parc de résidences principales. De ce fait, ces nouvelles dispositions n'ont pas ou très peu d'incidences sur le renouvellement d'air global des logements.

Les actions de sensibilisation visant à aérer plus fréquemment le logement pourraient avoir eu un léger impact sur la fréquence d'ouverture de fenêtres en journée, même si celles-ci ne se traduisent pas par une hausse du TRA. En termes d'occupation, le nombre moyen d'occupants sur la semaine n'a pas évolué, même s'il était attendu une légère augmentation du fait des pratiques de télétravail qui ont pu perdurer après l'épisode pandémique. Celles-ci pourraient plus affecter la durée de présence dans le logement que le nombre moyen d'occupants sur la semaine.

La stabilité du taux de renouvellement d'air dans les logements en 15 ans nous indique également que la baisse globale des concentrations de polluants entre les deux campagnes (Ramalho et al., 2025) est principalement liée aux actions mises en place pour réduire les émissions de polluants à la source et non à un effet de l'aération ou de la ventilation. Ces actions découlent des dispositions réglementaires ou incitatives d'interdiction ou de réduction de la présence de certains polluants dans les matériaux ou produits utilisés quotidiennement, tout comme dans l'air ambiant, et sans doute également du comportement des occupants à limiter l'usage de produits connus pour émettre des polluants comme la fumée de tabac.

Même si globalement, la baisse générale des concentrations de polluants entre les deux campagnes n'est pas à mettre au crédit d'un surcroît d'usage de l'aération ou de la ventilation, ces dernières interviennent forcément dans les concentrations observées à l'intérieur des logements que ce soit durant la CNL1 ou la CNL2. L'effet du TRA sur la concentration des polluants mesurée dans la CNL1 a bien été établi (Lucas et al., 2009b, 2010). Pour la CNL2, l'étude de l'influence du TRA, et de manière plus générale de l'aération et de la ventilation sur la concentration de polluants constitue une prochaine action du programme de travail de l'OQEI.

Par ailleurs, une dépendance du TRA en fonction de la saison (période de chauffe / hors-chauffe) a été identifiée. Il pourrait être intéressant de comparer les logements enquêtés sur une même saison entre la CNL1 et la CNL2. Cela permettrait de voir si selon la saison, une évolution du TRA est observée, et si celle-ci pourrait être associée à une baisse des concentrations de polluants dans les logements. Cependant, une telle comparaison stratifiée selon la saison ne pourrait se faire qu'à l'échelle de l'échantillon de logements enquêtés et ne pourrait pas être représentative du parc de résidences principales.

11 Conclusions et perspectives

L'étude sur la détermination des débits et taux de renouvellement d'air dans les logements dans le cadre de la CNL2 (2020 – 2023) vient compléter un premier état descriptif de la ventilation (Assy et al., 2025). Le renouvellement de l'air du logement prend en compte de manière globale les contributions liées à la présence d'un système spécifique de ventilation, à l'aération par ouverture de fenêtres et aux infiltrations. Quatre indicateurs de renouvellement d'air ont été calculés sur la base des mesures de CO₂ réalisées dans la chambre et le séjour, de la production métabolique des occupants présents dans le logement au moment de la semaine d'enquête, de la période de la journée, du nombre de niveaux du logement et du volume du logement (y compris volume de la chambre et du séjour) :

- **Le débit de renouvellement d'air nocturne (RA_n)** calculé à partir des 60 plus grandes valeurs en CO₂ mesuré dans la chambre entre 01h00 et 05h30 et de la production métabolique des occupants présents dans la pièce sur cette période. Il est exprimé en m³ d'air neuf par heure ;
- **Le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA)** calculé à partir des débits de renouvellement d'air moyens en journée et durant la nuit et ramené au volume du logement. Il est exprimé en volume renouvelé par heure (vol/h ou h⁻¹) ;
- **Le taux de renouvellement d'air diurne au niveau du séjour (TRA diurne)** prenant en compte la production métabolique des occupants dans le logement, la concentration en CO₂ mesurée dans le séjour et son volume. Il est exprimé en volume renouvelé par heure (vol/h ou h⁻¹) ;
- **Le taux de renouvellement d'air nocturne au niveau de la chambre (TRA nocturne)** prenant en compte la production métabolique des occupants dans la chambre, la concentration en CO₂ mesurée dans la chambre et son volume. Il est exprimé en volume renouvelé par heure (vol/h ou h⁻¹) ;

L'effectif de logements retenu pour établir cet état est de 472 logements sur les 571 enquêtés, correspondant aux logements disposant de l'intégralité des données de ventilation renseignées (y compris les données individuelles et d'occupation du logement). Un nouveau jeu de poids a été déterminé pour permettre d'extrapoler les résultats des 472 logements à l'échelle du parc.

Le débit de renouvellement d'air nocturne médian RA_n est de 17,5 m³/h au niveau du parc de logements. Il traduit plus un débit de renouvellement d'air minimal dans le logement, essentiellement porté par les contributions relatives aux infiltrations et au système spécifique de ventilation éventuellement présent. Les différences observées selon le type de système (hors considération de conformité) ne sont toutefois pas significatives. **La saison, notamment au travers d'une fréquence d'ouverture de fenêtres plus importante la nuit dans la chambre et l'ouverture de la porte de la chambre sont les facteurs qui influencent de manière significative le RA_n.** Celui-ci varie ainsi en valeur médiane de 13,5 en période de chauffe à près de 36 m³/h en période hors-chauffe, et de 6 m³/h en situation de portes et

fenêtres de la chambre fermées la nuit à plus de 41 m³/h lorsque portes et fenêtres sont ouvertes.

Le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA) dans les logements est de 0,45 vol/h en valeur médiane à l'échelle du parc de résidences principales. L'étendue des valeurs observées de moins de 0,1 à près de 4 vol/h pour le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire traduit une diversité de caractéristiques de logements, de facteurs environnementaux et de comportement des occupants. La saison, l'ouverture des fenêtres en période hors-chauffe et le taux de présence d'au moins un occupant dans le logement sont les trois principaux facteurs (tous plus ou moins interdépendants) associés au TRA. Les caractéristiques des logements (type, étage, date de construction), le type de système de ventilation ou l'utilisation d'une hotte de cuisine raccordée ne sont pas associés de manière significative au TRA.

Le TRA diurne moyen au niveau du séjour est de 0,75 vol/h en valeur médiane dans le parc de logements. Il varie de 0,7 en période de chauffe à près de 1,3 vol/h en période hors-chauffe. L'influence de l'ouverture des fenêtres du séjour dans la journée se fait plutôt sentir en période hors-chauffe et pratiquement pas en période de chauffe.

Le TRA nocturne moyen au niveau de la chambre est de 0,5 vol/h en valeur médiane dans le parc de logements, variant de 0,4 en période de chauffe à 1,5 en période hors-chauffe. L'ouverture fréquente des fenêtres de la chambre la nuit est associée de manière significative à une augmentation du TRA en période hors-chauffe (de 0,5 à 1,5 vol/h) comme en période de chauffe (de 0,4 à 0,6 vol/h en valeur médiane).

La contribution des différentes composantes du renouvellement de l'air (système de ventilation, ouvertures des fenêtres et infiltrations) reste difficile à établir. Le type de système de ventilation ne ressort pratiquement pas et les infiltrations restent difficiles à caractériser.

La conformité du système de ventilation mécanique, au regard des débits d'air extraits, n'a pas montré d'association significative avec le TRA pour les logements ventilés mécaniquement. La variabilité du TRA dans les deux sous-groupes de logements, conformes et non-conformes, est très importante suggérant que la contribution du système de ventilation est très variable d'un logement à l'autre. La comparaison du TRA moyen hebdomadaire avec un TRA théorique basé sur les seuls débits d'air extraits montre une corrélation significative. Mais, l'interprétation des écarts ne permet pas de traduire de manière simple la part de contribution des différents facteurs (aération, infiltrations, mais également efficacité du balayage).

En comparaison avec la CNLI, le débit de renouvellement d'air nocturne RA_n n'a pratiquement pas évolué (18 m³/h en CNLI), tout comme le taux de renouvellement d'air moyen hebdomadaire (TRA de 0,54 vol/h en CNLI). La stabilité du RA_n comme du TRA entre les deux campagnes est liée à l'absence d'évolution de différents paramètres : le nombre moyen d'occupants dans le logement et donc la production métabolique moyenne, la concentration moyenne hebdomadaire du CO₂ dans la chambre, le débit total d'air extrait dans les logements équipés d'une ventilation mécanique, le volume du logement ou encore la fréquence d'ouverture de fenêtres la nuit. Même si la fréquence d'ouverture des fenêtres

augmente dans la journée au niveau de la chambre ou du séjour entre la CNL1 et la CNL2, influencée sans doute par les nombreuses actions de sensibilisation, elle n'est pas suffisante pour marquer une augmentation significative du TRA. Les réglementations thermiques mises en place depuis la CNL1 comme la RT2005 et la RT2012 n'ont pas modifié les aspects relatifs à la ventilation ou l'aération des locaux, sauf à limiter la perméabilité de l'enveloppe des bâtiments. **L'absence d'évolution de ces indicateurs RA_n et TRA était donc quelque part attendue. Cela implique que la baisse générale des polluants observée dans la CNL2 par rapport à la CNL1 est imputable d'abord aux actions mises en place pour réduire les émissions de polluants à la source et non à un effet de l'aération ou de la ventilation.** Le renouvellement de l'air reste un paramètre majeur qui affecte la concentration des polluants dans l'air des logements aussi bien dans la CNL1 que dans la CNL2. L'étendue de cet effet reste à déterminer.

Ces travaux permettent d'envisager plusieurs pistes possibles d'exploitations complémentaires :

- Approfondir l'influence des incertitudes et des différentes hypothèses méthodologiques sur le calcul du taux de renouvellement d'air et sur les associations avec les différents facteurs susceptibles de le faire varier, au travers par exemple d'une analyse de sensibilité ;
- Etudier l'influence du taux de renouvellement d'air sur la concentration des polluants dans l'air des logements ;
- Approfondir le rôle de la conformité du système de ventilation mécanique dans la recherche des différentes contributions au taux de renouvellement de l'air du logement ;
- Rechercher l'effet propre au système de ventilation dans une analyse multivariée permettant de limiter l'interdépendance des variables (notamment saison, occupation et ouverture de fenêtres) ;
- Catégoriser les logements enquêtés en termes de perméabilité à l'air de leur enveloppe à partir des données disponibles (date de construction, matériaux principal de construction du bâtiment, type de menuiserie et de vitrage, présence de joints aux fenêtres). Cette catégorisation servirait ensuite à estimer l'influence des infiltrations sur le taux de renouvellement de l'air du logement ;
- Stratifier la comparaison du taux de renouvellement de l'air des logements entre CNL1 et CNL2 selon la période de chauffe / hors-chauffe, comparaison forcément limitée à l'échantillon de logements enquêtés ;
- Approfondir la relation entre le TRA moyen hebdomadaire et le TRA de référence théorique basé sur les débits d'air extraits à l'échelle des logements équipés en ventilation mécanique ;
- Tenter d'appréhender l'effet du tirage thermique en croisant le TRA avec la température extérieure ou l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur ;

- Développer d'autres indicateurs de TRA notamment dynamiques sur la base des mesures continues en CO₂ dans la chambre et le séjour. Ces indicateurs pourraient alors être comparés à des concentrations de polluants agrégées sur des pas de temps fins (polluants particuliers comme PM_{2,5} par exemple, voire COV totaux). La méthodologie de comparaison entre logements serait toutefois plus complexe du fait de mesures répétées (par exemple à l'échelle journalière 7 paires de valeurs de TRA et de concentrations de polluants attendues pour chaque logement).

12 Bibliographie

- Anses. 2017. *Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3)*. Avis de l'Anses Rapport d'expertise collective. <https://www.anses.fr/sites/default/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>.
- Ashrae. 2003. Ventilation for acceptable indoor air quality. ANSI/ASHRAE Addendum n to ANSI/ASHRAE Standard 62-2001. 13 p.
- Ashrae. 2022a. Ventilation and acceptable indoor air quality. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022. 90 p.
- Ashrae. 2022b. Ventilation and acceptable indoor air quality in residential buildings. ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2022. 54 p.
- Assy E., Ramalho O., Lafaurie E., et al. 2026. Etat de la ventilation dans le parc de logements en France hexagonale. Campagne nationale logements 2. Observatoire de la qualité des environnements intérieurs (OQEI). Rapport CSTB-SC-QEI-2024-039-REV2. Juin 2026. 147 p. <https://doi.org/10.82199/oqei-cn12-bd5h-r089>.
- Assy E, Ramalho O, Desvignes V. 2026. Campagne Nationale Logements 2 : Description du budget espace-temps et estimation de l'exposition au formaldéhyde dans son logement. Rapport final SC-QEI-2025-068, 43 p.
- Bekö, Gabriel, Toste Lund, Fredrik Nors, Jørn Toftum, et Geo Clausen. 2010. « Ventilation Rates in the Bedrooms of 500 Danish Children ». *Building and Environment* 45 (10): 2289-95. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.014>.
- Bekö, Gabriel, Jørn Toftum, et Geo Clausen. 2011. « Modeling ventilation rates in bedrooms based on building characteristics and occupant behavior ». *Building and Environment* 46 (11): 2230-37. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.002>.
- Bérard, Cécile, Cynthia Tanguay, Jean-François Bussièrès, et B Pharm. 2014. *Revue de la littérature reproductible Bérard C, Tanguay C, Bussièrès JF*.
- Breen, Michael S., Miyuki Breen, Ronald W. Williams, et Bradley D. Schultz. 2010. « Predicting Residential Air Exchange Rates from Questionnaires and Meteorology: Model Evaluation in Central North Carolina ». *Environmental Science and Technology* 44 (24): 9349-56. <https://doi.org/10.1021/es101800k>.
- Breen, Michael S., Janet M. Burke, Stuart A. Batterman, et al. 2014. « Modeling Spatial and Temporal Variability of Residential Air Exchange Rates for the Near-Road Exposures and Effects of Urban Air Pollutants Study (NEXUS) ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11 (11): 11481-504. <https://doi.org/10.3390/ijerph11111481>.

- Breen, Michael S., Bradley D. Schultz, Michael D. Sohn, et al. 2014. « A Review of Air Exchange Rate Models for Air Pollution Exposure Assessments ». *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 24 (6): 555-63. <https://doi.org/10.1038/jes.2013.30>.
- Cardoso, Vitor E. M., M. Lurdes Simões, Nuno M. M. Ramos, et al. 2023. « Towards an airtightness compliance tool based on machine learning models for naturally ventilated dwellings ». *Energy and Buildings* 285 (avril): 112922. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112922>.
- CSTB. 1971. Exemples de solutions pour faciliter l'application du règlement de construction des bâtiments d'habitation. Cahiers du CSTB n°1071, livraison 124, novembre 1971.
- Takahashi H., Bivolarova M.P., Keli A., et al. 2019. Non-uniformity in outdoor CO₂ concentration in city of Copenhagen, Clima 2019, E3S Web of Conferences, 111, 02007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911102007>.
- Heude, Barbara, Pauline Scherdel, Andreas Werner, et al. 2019. « A Big-Data Approach to Producing Descriptive Anthropometric References: A Feasibility and Validation Study of Paediatric Growth Charts ». *The Lancet Digital Health* 1 (8): e413-23. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(19\)30149-9](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(19)30149-9).
- Hou, Jing, Yuexia Sun, Qingyan Chen, et al. 2019. « Air Change Rates in Urban Chinese Bedrooms ». *Indoor Air* 29 (5): 828-39. <https://doi.org/10.1111/ina.12582>.
- Isaacs, Kristin, Janet Burke, Luther Smith, et Ronald Williams. 2013. « Identifying Housing and Meteorological Conditions Influencing Residential Air Exchange Rates in the DEARS and RIOPA Studies: Development of Distributions for Human Exposure Modeling ». *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 23 (3): 248-58. <https://doi.org/10.1038/jes.2012.131>.
- Khemet, Bomani, et Russell Richman. 2018. « A univariate and multiple linear regression analysis on a national fan (de)Pressurization testing database to predict airtightness in houses ». *Building and Environment* 146 (décembre): 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.030>.
- Langer, S., Ramalho, O., Derbez, M., et al. (2016). Indoor environmental quality in French dwellings and building characteristics. *Atmospheric Environment*, 128, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.060>.
- Leduc, Aude, Thomas Deroyon, Thierry Rochereau, et Auriane Renaud. 2019. *Premiers résultats de l'enquête santé européenne (EHIS) 2019*.
- Lucas J.P., Ramalho O., Kirchner S. et al. 2009a. Etat de la ventilation dans le parc de logements français. Rapport OQAI DESE-SB-2009-037. 84 p.
- Lucas J.P., Ramalho O., Kirchner S. et al. 2009b. Ventilation et pollution de l'air intérieur dans les logements. Rapport OQAI. Convention DGS 30/11/2007. 95 p.

- Lucas J.P., Ramalho O., Kirchner S. et al. 2010. Ventilation et pollution de l'air intérieur dans les logements. Rapport OQAI. Action 2009 – rapport ESE-Santé/2010-068-OQAI. 161 p.
- Liu, Y., P. K. Misztal, J. Xiong, et al. 2018. « Detailed Investigation of Ventilation Rates and Airflow Patterns in a Northern California Residence ». *Indoor Air* 28 (4): 572-84. <https://doi.org/10.1111/ina.12462>.
- Lumley, T. 2020. *Survey: analysis of complex survey samples. R package*. Released.
- Ministère chargé de la santé. s. d. *Carnet de santé*.
- Nazaroff, William W. 2021. « Residential Air-change Rates: A Critical Review ». *Indoor Air* 31 (2): 282-313. <https://doi.org/10.1111/ina.12785>.
- Øie, Leif, Hans Stymne, Carl-Axel Boman, et Vidar Hellstrand. 1998. « The Ventilation Rate of 344 Oslo Residences ». *Indoor Air* 8 (3): 190-96. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1998.t01-1-00006.x>.
- Persily A. 2016. "Field measurement of ventilation rates". *Indoor Air* 26: 97-111. <https://doi.org/10.1111/ina.12193>
- Persily, A., et L. de Jonge. 2017. « Carbon Dioxide Generation Rates for Building Occupants ». *Indoor Air* 27 (5): 868-79. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>.
- R Core Team. 2023a. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Version 4.3.0. R Foundation for Statistical Computing, released. <https://www.R-project.org/>.
- R Core Team. 2023b. *stats: The R Stats Package*. Version 4.3.0. Released.
- Ramalho, O., Dassonville C., Sivanantham S., et al. 2025. « Campagne Nationale Logements 2: Etat de la qualité de l'air dans les logements en France métropolitaine. OQEI. Rapport final SC-QEI-2024-020 ». OQAI, 266.
- RStudio Team. 2022. *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Boston, Released.
- SDES. 2025. « Indice de rigueur – Degrés-jours unifiés aux niveaux national, régional et départemental ». Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement et les transports. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indice-de-rigueur-degres-jours-unifies-aux-niveaux-national-regional-et-departemental>.
- Vinha, Juha, Elina Manelius, Minna Korpi, et al. 2015. « Airtightness of residential buildings in Finland ». *Building and Environment* 93 (novembre): 128-40. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.011>.
- Wickham, Hadley. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Version 3.4.2. Released. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>.

Wickham, Hadley, Mara Averick, Jennifer Bryan, Winston Chang, Lucy D'Agostino McGowan, et Romain François. 2019. *Welcome to the tidyverse*. "Journal of Open Source Software". Version 2.0.0. Released. <https://cran.r-project.org/web/packages/tidyverse/index.html>.

13 Annexe : Variables utilisées pour le calcul du taux de renouvellement d'air

- Mesure en continu du CO₂ dans la chambre de la personne de référence au pas de temps de 10 min ;
- Mesure en continu du CO₂ dans le séjour principal au pas de temps de 10 min ;
- Nombre de pièces, principales et de service dans le logement ;
- Hauteur et surface de la chambre de la personne de référence ;
- Hauteur et surface du séjour principal ;
- Surface totale du logement ;
- Nombre de niveaux du logement ;
- Etat d'ouverture de la porte de la chambre en journée et durant la nuit ;
- Proportion α du volume des pièces de vie par rapport au volume total du logement, fonction de leur typologie (variable entre 0,66 et 0,82) ;
- Nombre d'occupants dans le logement ;
- Âge et sexe de chaque individu ;
- Présence de chaque individu dans le logement toutes les 30 min sur la semaine ;
- Nombre de personnes en moyenne ayant dormi de manière régulière dans le séjour principal : adultes et adolescents de 15 ans et plus d'une part et enfants de moins de 15 ans d'autre part ;
- Nombre de personnes en moyenne ayant dormi de manière régulière dans la chambre principale : adultes et adolescents de 15 ans et plus d'une part et enfants de moins de 15 ans d'autre part ;
- Niveau d'activité métabolique des occupants : sommeil la nuit (0,7 met) ou sédentaire en journée (1,2 met).