

Impact des variations saisonnières et de microclimat local sur le confort thermique et la qualité de l'air intérieur : Cas d'un bâtiment résidentiel à Nantes, France

Manal ACH-CHAKHAR^{1,2*}, Sihem GUERNOUTI^{1,3}, Adnane M'SAOURI EL BAT⁴,
Zaid ROMANI⁵ et Abdeslam DRAOUI²

¹Cerema, Equipe de Recherche BPE, Nantes, France.

²Materials, Systems and Energy Engineering Laboratory (MaSEEL) - UAE/U04FSTTg - Faculty of Sciences and Techniques of Tangier, Abdelmalek Essaadi University, Morocco.

³Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville (IRSTV), Nantes, France.

⁴WINK PANDO2, 46 – 48 Rue René Clair, 75018 Paris, France.

⁵Research Laboratory of Built Environment and Landscape (LaBEL), National School of Architecture, Tetouan, Morocco.

*(auteur correspondant : manal.achchakhar@etu.uae.ac.ma)

Résumé – Cette étude examine l'impact des variations saisonnières et du microclimat sur le confort thermique et la qualité de l'air intérieur (QAI) d'un logement à Nantes. Des mesures annuelles de température, d'humidité, de CO₂ et de particules fines ont été réalisées. L'indicateur Balance Point Concentration « BPC » a été adapté pour évaluer la qualité de l'air intérieur. Les résultats montrent que malgré un confort thermique satisfaisant, les niveaux élevés de CO₂ et de particules fines, surtout en hiver, compromettent la qualité de l'air et le bien-être des occupants.

Abstract - This study examines the impact of seasonal variations and the local microclimate on thermal comfort and indoor air quality (IAQ) in a dwelling in Nantes. Annual measurements of temperature, humidity, CO₂, and fine particles were conducted. The Balance Point Concentration (BPC) indicator was adapted to assess indoor air quality. The results show that despite satisfactory thermal comfort, high levels of CO₂ and fine particles, especially in winter, compromise air quality and occupant well-being.

Nomenclature

A Surface de dépôt de particules, m²
C Concentration des polluants, µg/m³
D Coefficient de diffusion des particules, m²/s
d Diamètre des particules, m
E Taux de génération interne de particule, µg/h
H Hauteur de l'entrée d'air, m
K Taux de dépôt des particules, h⁻¹
P Coefficient de pénétration des particules, (-)
Q_M Débit d'air du système de ventilation mécanique, m³/h
V Volume de la pièce, m³
v Vitesse, m/s
W Longueur d'entrée d'air, m

Symboles grecs

η_M Efficacité du filtre du système de ventilation mécanique (-)
 λ_N Taux d'échange d'air par ventilation naturelle, h⁻¹
 λ_L Taux d'échange d'air par infiltration, h⁻¹

Indices

d dépôt
i inférieur
s supérieur
v vertical

1. Introduction

La qualité de l'air intérieur et le confort thermique sont des enjeux essentiels pour la santé et le bien-être des occupants, particulièrement dans un contexte de changement climatique qui exerce une pression croissante sur la performance des bâtiments résidentiels.

En termes de performance des bâtiments, le confort thermique et la QAI sont étroitement liés, bien que présentant des caractéristiques différentes. Le confort thermique repose principalement sur la température et l'humidité relative, qui influencent directement la perception du bien-être des occupants. Une température inadéquate ou une humidité excessive peuvent engendrer un inconfort physiologique, affectant le sommeil, la concentration des polluants et la santé respiratoire des habitants.

Parmi les principaux facteurs impactant la QAI, on trouve les particules fines PM2.5 et PM10 qui représentent des menaces significatives pour la santé humaine, étant associées à des affections respiratoires et cardiovasculaires [1], en particulier lorsque leurs concentrations intérieures dépassent les seuils recommandés par des organismes tels que l'OMS [2]. Leur impact sur la QAI est amplifié par des facteurs tels que les variations climatiques saisonnières [1] et les stratégies de ventilation [3], [4], ce qui rend la gestion de la QAI complexe, car les caractéristiques des bâtiments et les conditions climatiques peuvent soit atténuer, soit exacerber l'impact de ces sources. Ainsi, L'évaluation des performances des bâtiments en matière de gestion des PM2.5 et PM10 nécessite une analyse approfondie des interactions entre ces sources internes et externe, car ces particules pénètrent dans les espaces intérieurs par les défauts d'étanchéité dans l'enveloppe des bâtiments ou en raison de systèmes de ventilation inefficaces [3]. Cela souligne l'importance de considérer des facteurs critiques tels que l'étanchéité des bâtiments, les performances des équipements de purification d'air et les conditions climatiques locales, et d'appliquer une approche tenant compte de ces éléments [5].

Pour évaluer la QAI et la performance des bâtiments en matière de gestion des polluants, diverses approches ont été explorées. Parmi elles, la méthode la plus répandue qui consiste à utiliser le ratio de concentration intérieur-extérieur (I/O) comme indicateur quantitatif reflétant l'interaction entre les sources externes de pollution, telles que les particules fines, et les caractéristiques du bâtiment [6]. Ce ratio, bien qu'utile pour identifier les principales sources de pollution et pour analyser les dynamiques d'échange entre l'intérieur et l'extérieur, est fortement dépendant des conditions extérieures, telles que les niveaux de pollution ambiante et les variations climatiques. En conséquence, sa valeur peut fluctuer considérablement, rendant difficile toute comparaison entre différents bâtiments ou scénarios [5]. D'autres études se sont concentrées sur les niveaux d'exposition ou d'inhalation des polluants, en prenant en compte les caractéristiques des bâtiments ou les méthodes opérationnelles comme la ventilation et la filtration de l'air. Ces indicateurs, bien qu'utiles pour des évaluations ciblées, manquent souvent d'une vue d'ensemble et ne considèrent pas les interactions complexes entre les différentes sources de pollution [5]. Les mesures de concentrations de polluants, par exemple, fournissent une évaluation intuitive des niveaux de QAI mais ne prennent pas en compte les facteurs dynamiques, tels que les variations saisonnières ou les changements d'occupation, qui influencent directement la performance globale du bâtiment [7].

Pour surmonter ces limites, dans cette étude, nous avons évalué le confort thermique et la QAI en analysant les données mesurées et en adoptant le concept de Balance Point Concentration (BPC). Contrairement aux autres indicateurs, la BPC permet de quantifier la concentration extérieure maximale de polluants, tels que le PM2.5 et le PM10, que le bâtiment peut tolérer/gérer tout en maintenant une QAI conforme à un seuil cible prédéfini.

2. Méthodologie

Pour évaluer la performance des bâtiments résidentiels face aux particules fines extérieures (PM2.5 et PM10), notamment dans un contexte de variations saisonnières et de microclimat local, nous avons adapté le concept de BPC, initialement développé pour évaluer la performance des salles de classe face aux particules fines extérieures (PM2.5 et PM10), afin de

l'appliquer aux bâtiments résidentiels. L'indicateur BPC représente la limite supérieure des concentrations extérieures que le bâtiment peut tolérer tout en maintenant une qualité de l'air intérieur acceptable [5].

La concentration des particules fines à l'intérieur d'un logement peut être modélisée à l'aide de l'équation de bilan de masse [5]. En supposant un état stationnaire : $\frac{d(C_{int,cible}V)}{dt} = 0$, l'équation de conservation de la masse peut être réarrangée pour exprimer le BPC selon l'équation (1) suivante : $BPC = C_{int,cible} \left[\frac{KV + (Q_M + \lambda_N V + \lambda_L V) - E}{Q_M(1 - \eta_M) + \lambda_N V + \lambda_L VP} \right]$ (1)

Deux scénarios distincts peuvent être envisagées pour étudier les variations du BPC dans les locaux : fenêtres fermées et fenêtres ouvertes. Ces scénarios influencent les mécanismes de ventilation et modifient les termes de l'équation (1).

- **Scénario 1 (fenêtres fermées) :** Dans ce cas, les infiltrations (λ_L) et le système de ventilation mécanique sont prises en compte, tandis que les émissions internes de particules sont exclues. Le BPC est exprimé alors par :

$$BPC_{f,fermées} = C_{int,cible} \frac{KV + Q_M + \lambda_L V}{\lambda_L VP} \quad (2)$$

- **Scénario 2 (fenêtres ouvertes) :** Ici, on la ventilation naturelle (λ_N) et la ventilation mécanique (Q_M), tandis que l'infiltration (λ_L) est négligeable. Le BPC est alors donné par :

$$BPC_{f,ouvertes} = C_{int,cible} \left[\frac{KV + (Q_M + \lambda_N V) - E}{Q_M(1 - \eta_M) + \lambda_N V} \right] \quad (3)$$

Pour calculer l'indicateur BPC, plusieurs paramètres interviennent, parmi lesquels deux jouent un rôle fondamental et varient en fonction des scénarios et des saisons : le taux de dépôt des particules (K) et le coefficient de pénétration (P). Ces paramètres ont été déterminés théoriquement en s'appuyant sur les travaux de Wei Xie et al. [8], qui proposent des méthodes validées expérimentalement permettant leur calcul sans recourir à des mesures expérimentales directes.

Taux de dépôt des particules (K)

Le taux de dépôt des particules K, représente la vitesse à laquelle les particules fines se déposent sur les surfaces intérieures du bâtiment. Il est calculé à l'aide du modèle compartimental suivant [8]:

$$K = \frac{v_{di}A_{di} + v_{ds}A_{ds} + v_{dv}A_{dv}}{A_{di} + A_{ds} + A_{dv}} \quad (4)$$

Le taux de dépôt global des particules fines est obtenu en tenant compte de la distribution granulométrique des particules [8]:

$$K_{particules} = \frac{\sum_i \left(K_i \cdot \frac{dV}{d \log d_{p,i}} \right)}{\sum_i \frac{dV}{d \log d_{p,i}}} \quad (5)$$

Coefficient de pénétration des particules (P)

Le coefficient de pénétration (P) décrit la capacité des particules fines à pénétrer dans le bâtiment via les ouvertures ou les fissures de l'enveloppe. Il est influencé par la sédimentation gravitationnelle (P_G) et la diffusion brownienne P_B :

$$P = P_G \cdot P_B \quad (6)$$

Le calcul du coefficient de pénétration dû à la sédimentation gravitationnelle (P_G) est donné par l'équation (7) suivante :

$$P_G = 1 - \frac{L \cdot v_g}{H - v_m} \quad (7)$$

Avec : L est la largeur de l'entrée d'air (m), H est la hauteur de l'entrée d'air (m), v_g est vitesse de sédimentation des particules (m/s), v_m est la vitesse de l'écoulement d'air dans la l'entrée d'air (m/s).

Le calcul du coefficient de pénétration dû à la diffusion brownienne P_B est donné par l'équation (8) suivante :

$$P_B = \exp\left(-\frac{1.967 \cdot D \cdot L}{v_m \cdot (0.5H)^2}\right) \quad (8)$$

Enfin, le coefficient de pénétration moyen est obtenu par intégration entre deux diamètres limites (d_1 et d_2) :

$$P = \frac{\int_{d_1}^{d_2} \left[1 - \frac{L \cdot v_g}{H - v_m}\right] \cdot \exp\left(-\frac{1.967 \cdot D \cdot L}{v_m \cdot (0.5H)^2}\right) d(d_p)}{d_2 - d_1} \quad (9)$$

3. Description du cas d'étude

L'étude se base sur un immeuble résidentiel situé au nord-est de Nantes. Deux logements de cet immeuble ont été instrumentés pour permettre une observation précise des conditions de confort thermique et de qualité de l'air intérieur. L'analyse s'est concentrée sur un appartement composé de deux pièces : un séjour et une chambre, avec des volumes respectifs de 120 m³ et 82 m³. Ces pièces ont été instrumentées pour mesurer la température intérieure, l'humidité relative, ainsi que les concentrations de CO₂ et de particules fines (PM2.5 et PM10) à l'intérieur et à l'extérieur. Les données mesurées et collectées tout au long de l'année 2023. Ces mesures ont été effectuées à l'aide du NemoXT, tandis que la température extérieure est mesurée à l'aide du capteur AMR wM-Bus ambient sensor (CTN external sensor). L'état d'ouverture des fenêtres/ portes intérieurs est suivi par le capteur Window opening sensor 13 AMR wM-Bus 0–10 V, 4–20 mA On/Off, ARF8041AA, qui enregistre un signal booléen (0 pour fenêtre fermée, 1 pour fenêtre ouverte). Les fenêtres sont à battants simples de 3 m² et s'ouvrent vers l'intérieur. Elles sont composées de deux ouvrants manœuvrables et équipées d'une entrée d'air de 1600 mm². Les portes intérieures mesurent 2 m × 0,8 m, elles disposent d'un détalonnage de 4 mm, favorisant la circulation de l'air. Le système de ventilation mécanique simple flux installé dans l'appartement fournit un débit constant de 25 m³/h basé sur la réglementation [9]. Cependant, la dynamique des échanges d'air intérieur/extérieur est fortement influencée par l'ouverture des fenêtres. Selon les travaux de Yaqubi et al. [10], réalisés dans le même bâtiment, un taux de renouvellement d'air minimal de 0,7 ACH est assuré lorsque les fenêtres restent fermées. Ce taux augmente considérablement lorsque les fenêtres sont ouvertes, atteignant 1,3 ACH avec une fenêtre ouverte, particulièrement entre les mois de mai et septembre, période correspondant à une ventilation naturelle accrue. Pour les scénarios d'occupation, il est supposé que la chambre soit occupée entre 22h00 et 7h00, tandis que le séjour est occupé de 7h00 à 22h00 avec un des occupants qui travaille la nuit et dort toute la journée dans le séjour.

4. Résultats et discussion

4.1. Evaluation du confort thermique

Les données mesurées (Figure 1.a et Figure 1.b) illustrent l'impact du microclimat local et des variations saisonnières sur le confort thermique intérieur, modulée par l'occupation et la ventilation des espaces. En hiver, bien que les températures extérieures avoisinent 0 °C, le chauffage, réglé sur une température de consigne de 21 °C, assure un environnement agréable : le séjour, utilisé intensivement et ventilé régulièrement (fenêtres souvent ouvertes), affiche des températures de 24–26 °C avec une humidité modérée (40–50 %), tandis que la chambre, moins ventilée, présente des températures légèrement plus basses (22–24 °C) et une humidité plus élevée (50–60 %), favorisant l'accumulation d'humidité. Au printemps, l'augmentation

progressive des températures extérieures (10–15 °C) et la hausse de l'humidité ambiante réduisent les écarts entre les espaces, conduisant à une homogénéisation des conditions intérieures avec des niveaux d'humidité convergeant autour de 50 %, bien que le séjour conserve des variations plus marquées. En été, l'influence du microclimat est particulièrement notable, avec des températures extérieures dépassant 30 °C et une humidité élevée (>80 %) qui entraînent des médianes d'humidité intérieures supérieures à 70 % malgré des températures modérées, en raison d'un renouvellement d'air fréquent, surtout dans le séjour. En automne, alors que les températures extérieures se stabilisent entre 10 °C et 15 °C et que l'humidité reste élevée (70–80 %), les conditions thermiques convergent entre la chambre et le séjour, bien que la chambre conserve des niveaux d'humidité légèrement supérieurs en raison d'une ventilation réduite.

Globalement, le logement présente un confort thermique satisfaisant, rendu possible par une gestion active du chauffage et une ventilation adaptée dans les espaces les plus utilisés. Cependant, certaines disparités subsistent, notamment au niveau de la chambre où une humidité plus élevée pourrait impacter le confort sur le long terme. De plus, bien que le séjour bénéficie d'une bonne ventilation grâce à des fenêtres fréquemment ouvertes, ce comportement peut engendrer une augmentation de la consommation énergétique, en particulier en hiver, en raison des pertes de chaleur accrues.

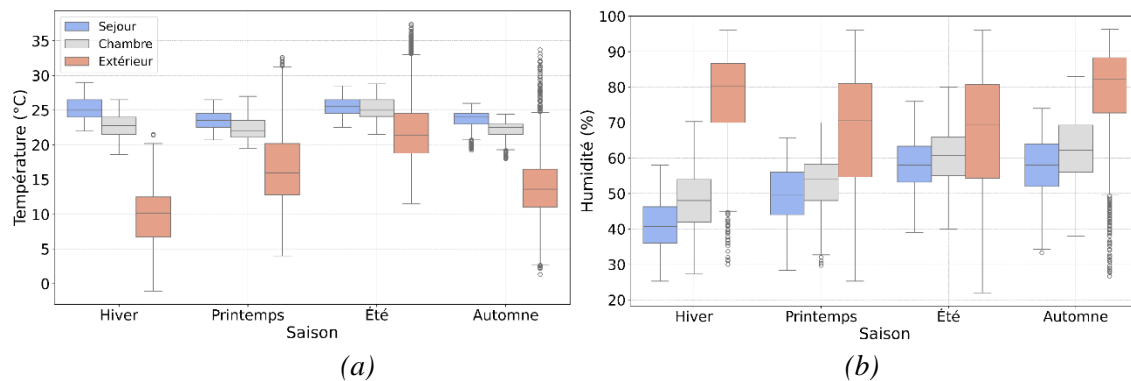


Figure 1 : (a) Comparaison des températures intérieures entre la chambre et le séjour par saison, (b) Comparaison de l'humidité relative entre la chambre et le séjour par saison.

4.2. Evaluation de la qualité de l'air intérieur

4.2.1. Analyse des niveaux de CO₂

La Figure 2 montre que les niveaux de CO₂ varient significativement entre la chambre et le séjour ainsi qu'en fonction des saisons. La chambre, occupée de manière prolongée avec une ventilation naturelle souvent insuffisante (D'après les mesures d'ouverture et de fermeture des fenêtres, que nous n'avons pas pu inclure dans ce papier pour des raisons de brièveté, les fenêtres de la chambre restent généralement fermées, notamment durant la nuit et en hiver), affiche des concentrations plus élevées que le séjour. En hiver, les deux espaces dépassent largement la médiane de 1000 ppm recommandée par l'OMS [2], avec des pics pouvant dépasser 1500 ppm dans la chambre, en raison de la fermeture des fenêtres pour conserver la chaleur. Au printemps, les concentrations restent élevées malgré une légère baisse, tandis qu'en été, elles sont souvent proches ou inférieures à 1000 ppm dans le séjour grâce à une meilleure ventilation naturelle liée à une ouverture fréquente des fenêtres. L'automne présente une tendance similaire au printemps, bien que des valeurs maximales pouvant atteindre 2000 ppm soient parfois observées. Ainsi, malgré le confort thermique, ces niveaux élevés de CO₂ posent un risque majeur pour la santé en cas d'exposition prolongée.

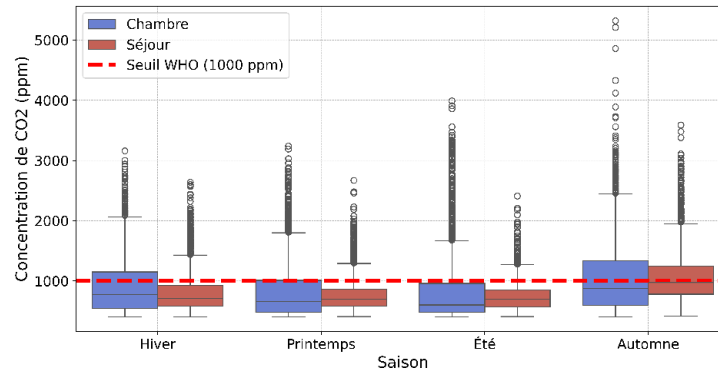


Figure 2 : Comparaison des concentrations saisonnières de CO₂ entre la chambre et le séjour par rapport au seuil recommandé par l'OMS (1000 ppm) [2].

4.2.2. Analyse de l'indicateur BPC pour les particules fines PM2.5 et PM10

Nous avons appliqué l'indicateur BPC aux particules fines PM2.5 et PM10, en prenant en compte les quatre saisons et deux scénarios : fenêtres ouvertes et fenêtres fermées. Pour ce faire, nous avons d'abord calculé le taux de pénétration des particules (P) (eq.9), puis le taux de dépôt des particules (K) (eq.5).

Taux de pénétration pour les particules PM2.5 et PM10

La Figure 3.a présente le taux de pénétration (P) des particules PM2.5 et PM10, identique pour la chambre et le séjour en raison de la similitude des ouvertures et fissures de l'enveloppe. Pour les PM2.5, P atteint 0.99 avec la fenêtre ouverte, indiquant une quasi-totalité de pénétration, et reste élevé (0.91) même lorsque la fenêtre est fermée, du fait de la ventilation mécanique et des défauts d'étanchéité. Pour les PM10, P est plus faible : 0.80 avec une fenêtre ouverte et 0.71 lorsqu'elle est fermée, la taille plus importante limitant leur passage. Ces résultats concordent avec ceux d'études similaires [5].

Taux de dépôt des particules PM2.5 et PM10

La Figure 3.b présente les variations saisonnières du taux de dépôt (K) pour les particules PM2.5 et PM10, montrant que K varie selon la saison et diffère entre les deux types de particules. Pour les PM2.5, K passe de 0.36 h⁻¹ en hiver à 0.52 h⁻¹ en été, avec des valeurs intermédiaires de 0.40 h⁻¹ au printemps et 0.48 h⁻¹ en automne. Pour les PM10, K est plus élevé : 0.80 h⁻¹ en hiver et 1.3 h⁻¹ en été, avec 1.1 h⁻¹ au printemps et 1.0 h⁻¹ en automne. Ces variations s'expliquent par une ventilation naturelle plus importante en été qui favorise le dépôt sur les surfaces, tandis qu'en hiver, la ventilation réduite limite le dépôt. Notons que K est similaire dans la chambre et le séjour, car le dépôt dépend davantage de la nature et de la disposition des surfaces que du volume de la pièce. Enfin, les taux de dépôt plus élevés pour les PM10 s'expliquent par leur taille, qui facilite leur dépôt par effet de gravité et interaction avec les surfaces, conformément aux études [5].

Balance Point Concentration pour PM2.5 et PM10

L'indicateur BPC a été appliqué aux deux pièces (séjour et chambre) pour évaluer la capacité du logement à maintenir une concentration intérieure de particules en dessous d'un seuil cible (15 µg/m³ pour les PM2.5 et 45 µg/m³ pour les PM10, valeurs recommandées par l'OMS [2]). La Figure 4 présente les concentrations intérieures et extérieures pour chaque pièce ainsi que les seuils BPC correspondants. Les résultats montrent que, notamment au printemps et en hiver, ces concentrations dépassent souvent les seuils en raison d'infiltrations accrues provoquées par des gradients de pression favorisant l'entrée des polluants. En été, les concentrations intérieures

restent sous contrôle, car les niveaux extérieurs sont plus faibles, la ventilation naturelle fréquente permet un bon renouvellement de l'air, et l'absence de forts gradients limite les infiltrations. De plus, les dépassements pour les PM10 sont moins fréquents que pour les PM2.5, ces particules se déposant plus rapidement sur les surfaces. Concernant la répartition par pièce, la chambre affiche des concentrations globalement plus stables (bien qu'elles dépassent parfois les seuils sur de longues périodes en raison d'une ventilation insuffisante, comme indiqué en section 4.2.1 sur le CO₂), tandis que le séjour, utilisé de manière intensive, présente des dépassements plus marqués dus à une ventilation naturelle fréquente. Ces résultats suggèrent qu'en conditions modérées, une bonne étanchéité et un renouvellement d'air adéquat assurent une qualité de l'air acceptable, mais cette performance se détériore sous des conditions extérieures extrêmes ou avec des systèmes de ventilation inadaptés.

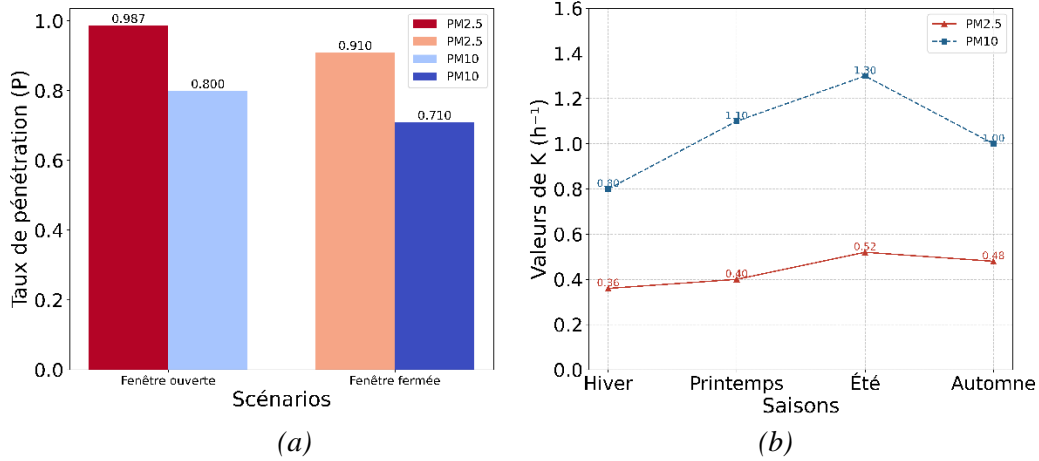


Figure 3 : (a) Taux de pénétration de particules P pour PM2.5 et PM10 selon les scénarios de ventilation, (b) Taux de dépôt de particules K pour PM2.5 et PM10 selon les saisons.

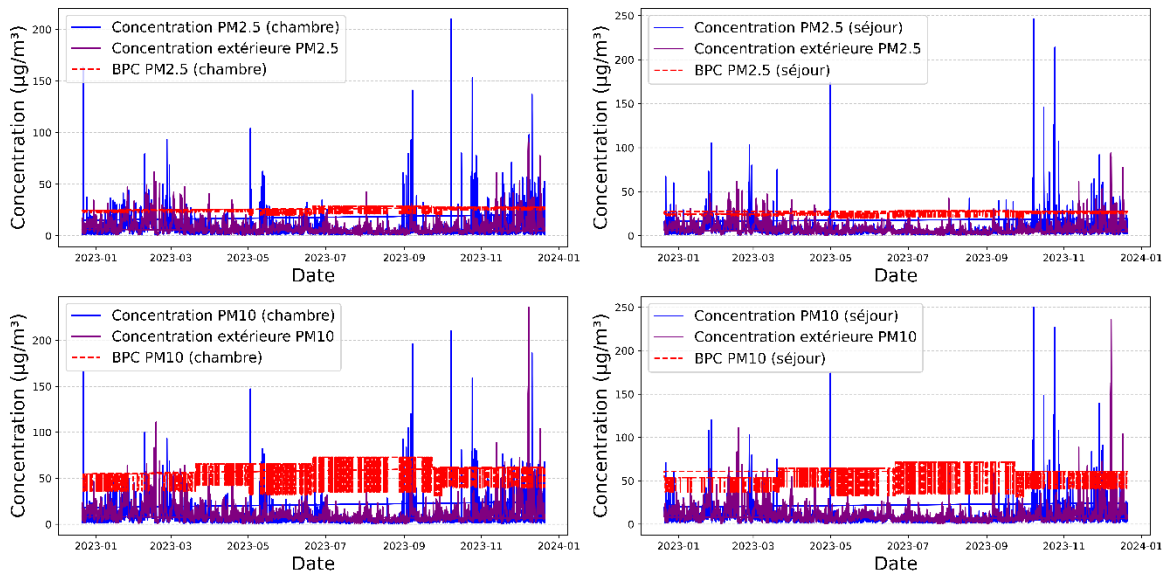


Figure 4 : Évolution des concentrations intérieures et extérieures de PM2.5 et PM10 dans le séjour et la chambre, avec les seuils de Balance Point Concentration (BPC).

5. Conclusion

Cette étude met en évidence l'impact des variations saisonnières et du microclimat local sur le confort thermique, la QAI dans un bâtiment résidentiel à Nantes. À travers une analyse expérimentale des températures, de l'humidité, du CO₂ et des concentrations de particules fines

(PM10, PM2.5) sur une année complète, nous avons montré que les interactions entre ces paramètres varient en fonction des saisons et des stratégies de ventilation. Afin d'évaluer la capacité du bâtiment à maintenir une QAI acceptable malgré ces fluctuations, nous avons adapté l'indicateur BPC au contexte résidentiel. Les résultats ont montré que, bien que le bâtiment présente globalement un bon confort thermique, avec des températures et une humidité relative acceptables pour la majorité des données mesurées, cela ne suffit pas à garantir un environnement intérieur sain. L'analyse du CO₂ a révélé des concentrations élevées, particulièrement dans la chambre, dépassant fréquemment le seuil de 1000 ppm cela pourrait être expliqué par une ventilation naturelle insuffisante et des comportements des occupants. L'une des limites de l'étude réside dans l'incapacité des capteurs à mesurer le pourcentage réel d'ouverture des fenêtres, ce qui ne permet pas l'évaluation précise du renouvellement d'air. Il est probable que certaines fenêtres signalées comme ouvertes n'aient été que légèrement entrouvertes, réduisant ainsi l'évacuation du CO₂. Les résultats obtenus dans cette étude se situent globalement dans la bande des hypothèses posées. Toutefois, certaines limites ont été identifiées, notamment le manque de tests d'infiltration permettant d'évaluer l'étanchéité du bâtiment et une enquête auprès des occupants. Dans cette perspective, des travaux futurs pourraient être menés pour affiner l'évaluation de la performance du bâtiment en intégrant une approche multicritère prenant simultanément en compte le confort thermique, la QAI et l'efficacité énergétique.

Références

- [1] N. R. Martins and G. C. Da Graca, "Impact of PM2. 5 in indoor urban environments: A review," *Sustain Cities Soc*, vol. 42, pp. 259–275, 2018.
- [2] W. H. Organization and W. H. Organization, "WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2. 5 and PM10)," *Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*, p. 267, 2021.
- [3] E. R. Jones et al., "The effects of ventilation and filtration on indoor PM2. 5 in office buildings in four countries," *Build Environ*, vol. 200, p. 107975, 2021.
- [4] D. Shin et al., "The Effectiveness of a Mechanical Ventilation System for Indoor PM2. 5 in Residential Houses," *Toxics*, vol. 11, no. 11, p. 912, 2023.
- [5] S. Kim, K. Kang, D. Park, H. Na, and T. Kim, "Balance point concentration: An indicator for classroom performance against outdoor PM2. 5," *Build Environ*, vol. 266, p. 112021, 2024.
- [6] C. Chen and B. Zhao, "Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor," *Atmos Environ*, vol. 45, no. 2, pp. 275–288, 2011.
- [7] L. Stabile, M. Dell'Isola, A. Russi, A. Massimo, and G. Buonanno, "The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools," *Science of the Total Environment*, vol. 595, pp. 894–902, 2017.
- [8] W. Xie, Y. Fan, X. Zhang, G. Tian, and P. Si, "A mathematical model for predicting indoor PM2. 5 concentration under different ventilation methods in residential buildings," *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 41, no. 6, pp. 694–708, 2020.
- [9] J. O, "Arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements," 1983.
- [10] O. Yaqubi, "Contribution to the development of a methodology to build indoor overheating vulnerability maps at the city scale integrating climate change data and urban heat island," *Nantes Université*, 2022.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet CREATIV (convention de financement N°2062C0002, ADEME « appel à Projet Bâtiments 2020 »).