

Analyse de l'impact de la ventilation sur la qualité de l'air et la consommation énergétique d'une salle de classe

Abdelouhab Labihi, Younes Benakcha, Amina Meslem, Paul Byrne, Florence Collet

Université de Rennes, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, France

RESUME Dans le cadre de la Chaire Rénovation Énergétique des Bâtiments de la Fondation Rennes1, un démonstrateur d'une salle de classe de 30 places a été choisi pour l'analyse d'une ventilation double flux décentralisée (DF). Une simulation thermique dynamique à l'aide de TRNSYS a permis d'évaluer l'impact de la ventilation sur la consommation de chauffage en considérant différentes situations : (1) l'état actuel sans VMC, (2) avec une VMC simple flux (SF) d'un débit réglementaire de $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{personne}^{-1}$ sur les périodes d'occupation et nul hors occupation, et (3) une double flux (DF) dont le débit est régulé comme pour la SF. L'échangeur de chaleur de la DF présente une efficacité allant de 0.8 à 0.9 en fonction du débit. Le débit volontaire a été majoré d'un débit d'infiltration estimé à partir de l'évolution du taux de CO_2 dans la salle. Il a été montré que le cas (1) reproduit les niveaux de CO_2 constatés réellement dans la salle, avec un pic qui dépasse 6000 ppm. La consommation énergétique de chauffage calculée est de 52 kWh/m²/an. La VMC SF permet de baisser la concentration de CO_2 à un niveau maximal de 1350 ppm avec une consommation de 65 kWh/m²/an. La VMC DF permet d'assurer la même qualité de l'air avec une consommation de 53 kWh/m²/an. Ainsi, la mise aux normes de la VMC avec une DF assure la qualité de l'air sans surconsommation de chauffage.

Mots-clefs Rénovation énergétique ; Ventilation ; Simulation thermique dynamique ; Qualité de l'air ; consommation énergétique.

I. INTRODUCTION

Le bâtiment représente 44 % de l'énergie consommée en France et il est responsable chaque année de 123 millions de tonnes de CO_2 selon le site du gouvernement (Ecologie.gouv, 2021). Une des actions pour limiter cet impact est d'accélérer la rénovation énergétique des bâtiments existants qui sont très énergivores. Différentes actions sont mises en place à différentes échelles. A l'échelle nationale, la loi Elan (ELAN, 2018) avec son décret Tertiaire 2019 donne un cadre réglementaire pour la rénovation des bâtiments dont la surface est supérieure ou égale à 1000 m². Les baisses de consommations visées sont de 40 % en 2030, 50 % en 2040 et 60 % en 2050 par rapport à l'année de référence de 2010. A l'échelle des territoires, les métropoles, les professionnels et le monde de la Recherche s'organisent pour décliner ces objectifs en décisions politiques, qui mobilisent les forces vives et les moyens économiques pour parvenir à la mise en conformité des bâtiments existants aux échéances fixées par l'état. Le résidentiel est aussi concerné par les projets de rénovations énergétiques qui bénéficient de programmes incitatifs et d'aides aux particuliers, à l'instar de « *Ma prime Rénov'* ».

L'efficacité énergétique visée, nécessite des ruptures technologiques. Les innovations dans les systèmes énergétiques et dans les matériaux de l'enveloppe des bâtiments sont nombreuses, mais elles se confrontent à la difficulté du transfert technologique, du retour d'expérience pour l'accélération de la mise sur le marché et de l'intégration dans les usages. Une des réponses à ce point de blocage réside dans la mise en place des Chaires, qui mettent de concert le monde de la Recherche qui produisent des innovations et les industriels qui doivent s'approprier celles-ci pour les injecter dans les réalisations. C'est ainsi que la Chaire « *Rénovation Énergétique des Bâtiments* » (REB) de la Fondation Rennes 1 a été fondée en Juin 2021. Elle rassemble le Laboratoire de Recherche LGCGM (<https://lgcgm.fr/>) de l'Université de Rennes, des acteurs professionnels du bâtiment et Rennes Métropole.

L'objectif de la Chaire REB est de tester des solutions innovantes dans des démonstrateurs, pour en éprouver l'efficacité en conditions réelles d'usage, de façon dé耦plée ou couplée.

Le travail présenté ici a été réalisé dans ce cadre et est centré sur l'analyse de l'impact de la ventilation sur la qualité de l'air et sur la consommation de chauffage d'une salle de classe du département GCCD de l'IUT de Rennes, choisie comme un des démonstrateurs de la Chaire. L'objectif est de reproduire par simulation numérique l'état actuel de la salle sans VMC fonctionnelle, et de simuler sa ventilation avec d'une part, une VMC simple flux (SF) d'un débit règlementaire de $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{personne}^{-1}$ (rsd35, 2008) sur les périodes d'occupation et nul hors occupation, et avec d'autre part, une ventilation double flux (DF) avec récupération de chaleur sur l'air extrait, dont le débit est régulé comme pour la ventilation SF.

Cette étude numérique est un préalable à un suivi expérimental en usage normal de la salle de classe qui sera équipée d'un système de ventilation DF décentralisée AM800 fabriqué par AIRMASTER (AIRMASTER, 2021) et commercialisé par HELIOS. Le débit de ventilation maximal de ce système est de 725 m³/h. A ce débit, le niveau de bruit annoncé dans le catalogue est de 35 dB(A).

La ventilation double flux décentralisée (Tugce et al, 2020) permet d'améliorer la qualité de l'air à l'intérieur des locaux tout en offrant la possibilité d'une récupération de chaleur sur l'air extrait en période de chauffage. Le principal avantage du caractère décentralisé par rapport à une ventilation double flux centralisée, est de permettre une régulation du débit d'air de chaque salle qui en est équipée de manière indépendante, en fonction de son usage. De plus, les contraintes de passage des réseaux d'air en rénovation sont éliminées à l'aide de ce système. D'après le bureau d'études en charge d'une rénovation sur le campus, les coûts d'installation sont à peu près équivalents entre des installations de DF centralisée et décentralisée.

La concentration de CO_2 dans la salle sera utilisée comme indicateur (Franco and Leccese, 2020) pour analyser l'adéquation du débit de ventilation à son taux d'occupation. Il est recommandé de ne pas dépasser une concentration maximale hygiénique de 1000 ppm (Persily,1997). Les réglementations européenne et Française fixent une limite de concentration de CO_2 comprise entre 1000 et 1300 ppm (Wargocki ,2021 ; JORF, 1978). A noter qu'en période épidémique du SARS-CoV-2, le Haut Comité de Santé Public (HCSP, 2021) a recommandé de ne pas dépasser un taux de CO_2 de 800 ppm. Cette dernière situation sera également analysée pour en évaluer le coût énergétique.

La qualité de l'air dans les écoles est une question très importante en raison de la forte densité d'occupation et des débits d'air importants nécessaires pour maintenir une qualité de l'air acceptable.

Dans la littérature, plusieurs études récentes ont été consacrées au suivi de la qualité de l'air dans les établissements scolaires. On peut citer par exemple l'étude de (Gabovska, 2022) en Suède, celle de (Deng and Lau, 2019) aux États-Unis, celle de (Almeida and De Freitas, 2015) au Portugal, ou alors celle de (Stabile, 2019) en Italie. La majorité de ces études focalisaient leur intérêt sur le maintien d'un niveau de CO_2 cible à l'aide d'un débit de ventilation variable en fonction de l'usage, sans évaluation du coût énergétique associé. La quantification du coût énergétique associé à la mise aux normes d'une ventilation inexistante ou défaillante d'une salle de classe lors d'un projet de rénovation constitue l'originalité de la présente étude.

II. SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE DE LA SALLE D'ENSEIGNEMENT SOUS TRNSYS

A. Présentation générale de l'étude

La salle de cours démonstrateur d'une capacité de 30 places est située dans un bâtiment d'enseignement du département GCCD de l'IUT de Rennes. La salle a pour dimensions $L \times l \times H = 10.40 \text{ m} \times 7.10 \text{ m} \times 2.73 \text{ m}$ (Figure 1) et elle présente un seul mur déperditif (surface façade 29.16 m^2), car elle se trouve en étage courant et les autres murs donnent sur des salles similaires toutes chauffées à $19 \text{ }^\circ\text{C}$. Le mur déperditif est orienté Sud et est composé d'un voile béton de 18 cm d'épaisseur non isolé ($U_{\text{paroi}} = 3.349 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$). Ce mur comporte 6 fenêtres (surface de vitrage $13,21 \text{ m}^2$) en double vitrage avec une menuiserie en aluminium ($U_w = 2.82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$). La ventilation actuellement en place est une ventilation mécanique contrôlée (VMC) simple flux par extraction, mais la mauvaise étanchéité à l'air du bâtiment engendre des débits de fuite dans les sanitaires et les débits relevés dans la salle choisie sont négligeables. La SF n'est donc pas fonctionnelle, ce qui revient à considérer que la salle n'est pas ventilée mécaniquement. Le débit d'air d'infiltration par l'enveloppe a été estimé en se basant sur des mesures de l'évolution temporelle du taux de CO_2 dans la salle sur une journée de fonctionnement type.



FIGURE 1. Photographie de la salle de cours servant de démonstrateur

L'enveloppe de la salle a été reproduite sous le logiciel Sketchup (Figure 2) et a été importée sous le logiciel TRNSYS pour la réalisation des simulations thermiques dynamiques.

Le modèle ainsi construit a permis d'évaluer dans le cas de référence actuel (sans VMC) la consommation de chauffage sous le climat de Rennes, et l'évolution du taux de CO_2 sur une saison de chauffage avec un scénario d'occupation calqué sur l'emploi du temps de l'année 2021-2022.

Les précédents résultats sont comparés à ceux qui seraient obtenus en adjoignant une VMC SF, puis une VMC DF sans rénovation de l'enveloppe. Un dernier scénario reprend la salle avec la VMC DF en adjoignant une isolation thermique du mur déperditif de la salle conduisant à $U_{\text{paroi isolée}} = 0.242 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

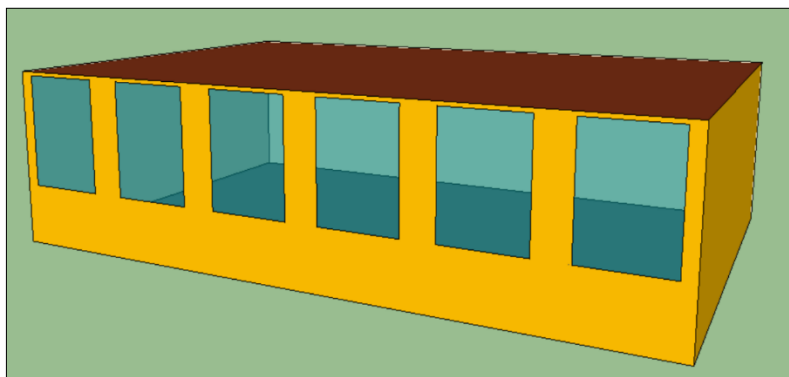


FIGURE 2. Modélisation de la salle 111 sous SketchUp

B. Simulation studio sous TRNSYS

Les différents blocs du simulation studio sous TRNSYS sont présentés en Figure 3. La géométrie de la salle de cours (Figure 2) construite à l'aide du logiciel SketchUp a été importée dans le module *Building* de TRNSYS où la composition des parois et l'orientation de la salle ont été définies. Dans ce même module, les consignes de chauffage et de ventilation mécanique ont été introduites. Les données du climat de Rennes (module *Weather*) ont été importées. Ce sont des valeurs de la vitesse du vent, de la température et du rayonnement solaire moyennées sur 30 ans.

Nous avons ajouté sous TRNSYS des calculatrices pour des calculs spécifiques utiles pour nos simulations. Tout d'abord, l'évolution de la concentration du CO_2 en fonction de l'occupation a été programmée suivant la méthode décrite dans le paragraphe C. Ensuite, le débit d'infiltration évalué en fonction de la vitesse du vent à chaque pas de temps est ajouté au débit volontaire de VMC. L'équation calculant le débit d'infiltration en fonction de la vitesse du vent a été établie suivant la méthode décrite dans le paragraphe D.

L'occupation de la salle utilise un calendrier (module *Occupation*) calqué sur l'occupation réelle de la salle durant l'année universitaire 2021-2022. On lui associe un autre module (module *Ouverture*

de portes/fenêtres) permettant de majorer le débit d'infiltration d'une valeur constante égale à 450 m³/h aux intercourts d'une durée de 10 minutes.

Les gains internes en humidité et chaleur dus au métabolisme des occupants sont également introduits sous le module *Gain_Internes*.

Pour le scénario considérant une VMC DF, nous introduisons dans le module *VMC_Double flux*, la loi de l'efficacité de l'échangeur récupérateur de chaleur en fonction du débit d'air (équation 1), obtenue par lissage de la courbe fournie par le constructeur (AIRMASTER, 2021). Cette loi permet de calculer à chaque pas de temps la température de soufflage de l'air neuf dans la salle.

$$\varepsilon = \frac{T_{souff} - T_{ext}}{T_{int} - T_{ext}} = -8.10^{-5}Q_v + 0.877 \tag{1}$$

Le module *Occultation* gère l'ouverture et la fermeture des rideaux des fenêtres : fermeture des rideaux si la température intérieure de la salle est supérieure à 26 °C ou si le rayonnement solaire incident est supérieur à 400 W/m².

Enfin, le dernier bloc (*Résultats de la simulation*) sert à afficher les résultats de la consommation énergétique de chauffage et de l'évolution du taux de CO₂ dans la salle.

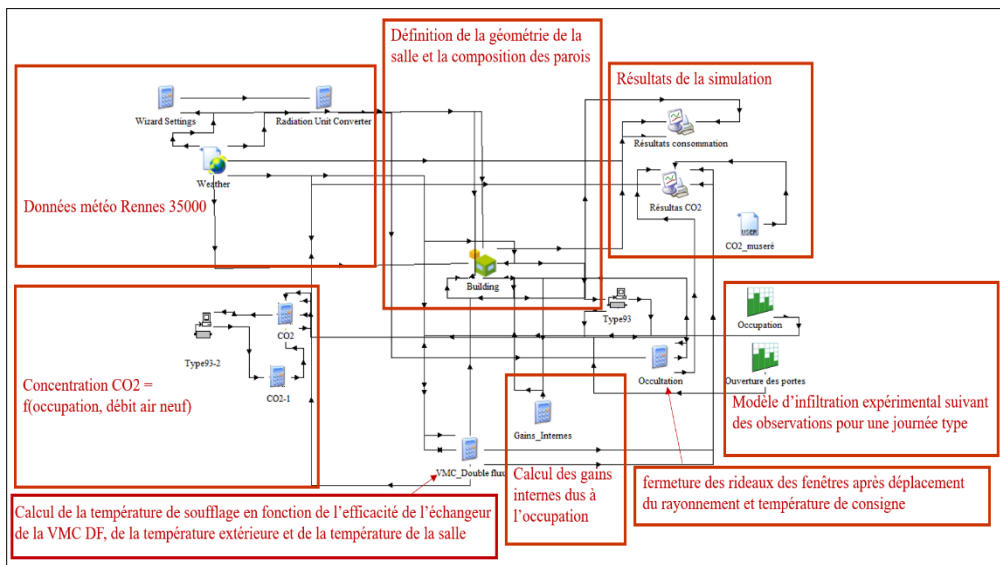


FIGURE 3. Simulation studio sous TRNSYS

C. Programmation de la loi d'évolution du taux de CO₂ sous TRNSYS

L'évolution temporelle du taux de CO₂ peut être évaluée par l'équation suivante (Bonato et al, 2020):

$$[CO_2]_t = [CO_2]_{t-1}e^{-\lambda\Delta t} + \left([CO_2]_{ext} - \frac{p.N}{\lambda.V} \cdot 6 \cdot 10^4\right) (1 - e^{-\lambda\Delta t}) \tag{2}$$

avec :

[CO₂]_t [ppm]: concentration de CO₂ dans la pièce à l'instant t

[CO₂]_{t-1} [ppm]: concentration de CO₂ dans la pièce à l'instant t-Δt

$[CO_2]_{ext}$ [ppm]: concentration de CO_2 à l'extérieur de la pièce

$V[m^3]$: volume de la pièce

$N[personne]$: nombre de personnes dans la pièce

$p[l.min^{-1}.personne^{-1}]$: Débit de respiration d'un individu =0.31

$\lambda [h^{-1}]$: débit de renouvellement d'air incluant la ventilation et l'infiltration

$\Delta t [h]$: pas de temps

L'équation (2) a été introduite sous TRNSYS pour évaluer l'évolution temporelle de la concentration du CO_2 dans les différents scénarii considérés.

D. Construction de la fonction du débit d'infiltration

L'évolution temporelle du taux de CO_2 à l'aide d'un capteur NDIR de la marque ARANET durant la journée du 12/10/2021 est visible en Figure 4. Les concentrations maximales enregistrées sont extrêmement élevées et atteignent 6000 ppm en présence de 31 personnes (30 étudiants et un professeur). Cet enregistrement nous a permis de construire, en utilisant la formule du taux de CO_2 (paragraphe C.), la fonction de variation du débit d'infiltration. L'infiltration par l'enveloppe (fenêtres et portes fermées) durant le cours est fonction de la vitesse du vent. Aux intercourrs, la précédente infiltration est majorée d'une valeur constante sur une durée estimée à 10 minutes (ouverture portes/fenêtres).

La loi de variation de l'infiltration est estimée à l'aide d'un calcul itératif sous Matlab. Durant les périodes de cours (fenêtres et portes fermées), elle est trouvée égale à $0.5 \times surface_d'infiltration \times Vitesse_du_vent$ où 0.5 indique que la moitié de la surface d'infiltration permet l'entrée de l'air frais et l'autre moitié permet la sortie de l'air vicié. Cette infiltration est due aux défauts d'étanchéité de l'enveloppe (y compris les bouches d'entrée d'air installées en menuiseries des fenêtres de la VMC SF non fonctionnelle de la salle de cours). Aux trois intercourrs, la concentration de CO_2 subit une baisse rapide visible en Figure 4 due à l'infiltration supplémentaire estimées à $450 m^3.h^{-1}$ à l'ouverture des portes et des fenêtres. Le débit d'infiltration par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe varie entre 7 et $50 m^3.h^{-1}$ en fonction de la vitesse du vent.

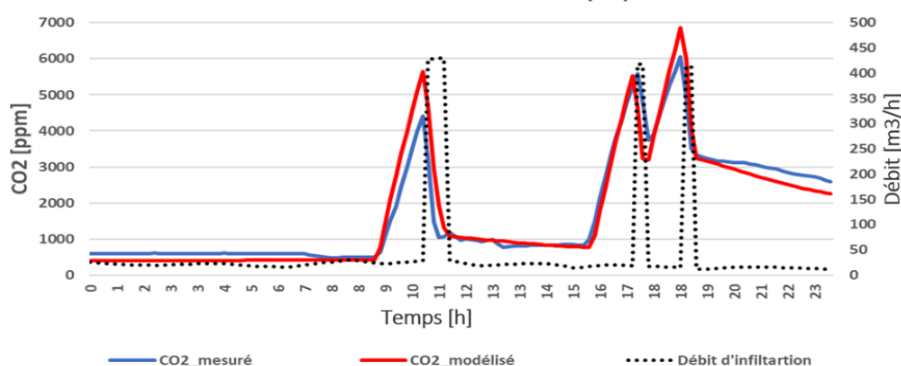


FIGURE 4. Taux de CO_2 mesuré dans la salle durant la journée du 12/10/2021 - Calage du modèle d'infiltration d'air

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Les cinq scénarii simulés et les consommations de chauffage correspondantes sont résumés dans le Tableau 1. Le premier scénario correspondant à la situation actuelle de référence sans VMC, et en tenant compte de l'infiltration telle que définie précédemment, la consommation annuelle calculée est égale à $52 \text{ kWh.m}^2.\text{an}^{-1}$. La figure 5 présente l'évolution annuelle de la concentration de CO_2 dans la salle obtenue par simulation pour ce scénario. Le taux de CO_2 maximal peut dépasser les 6000 ppm comme observé in-situ en conditions normales d'usages de la salle de cours.

Pour le second scénario, nous avons introduit une VMC SF assurant un débit d'air règlementaire de $18 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{personne}^{-1}$ en périodes d'occupation, et un débit nul hors occupation. Le débit volontaire s'ajoute au débit d'infiltration. Dans ce cas, la consommation annuelle de chauffage est trouvée égale à $65 \text{ kWh.m}^2.\text{an}^{-1}$ (25 % d'augmentation) et la concentration de CO_2 (Figure 6) ne dépasse pas 1350 ppm ce qui est acceptable. Rappelons que la valeur règlementaire maximale en France est de 1300 ppm (JORF, 1978).

Nous avons ensuite simulé une VMC DF avec récupération de chaleur sur l'air extrait en appliquant le même débit règlementaire et le même schéma de régulation du débit que pour la VMC SF. Cela diminue la consommation annuelle à $53 \text{ kWh.m}^2.\text{an}^{-1}$, une consommation quasiment égale à celle trouvée pour le scénario de référence sans VMC. Toujours en VMC DF, en majorant le débit de ventilation à $35 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{personne}^{-1}$ dans l'objectif de respecter les recommandations du Haut Comité de Santé Publique (HCSP, 2021) en termes de concentration de CO_2 (Figure 7), la consommation de chauffage atteint $58 \text{ kWh.m}^2.\text{an}^{-1}$, soit une augmentation de l'ordre de 9 %, ce qui n'est guère important au regard des enjeux de santé publique. Enfin, en conservant la VMC DF au débit règlementaire de $18 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{personne}^{-1}$, et en ajoutant l'isolation de la façade (15 cm de polystyrène), la consommation annuelle est réduite à $32 \text{ kWh.m}^2.\text{an}^{-1}$.

TABLEAU 1. Consommation énergétique simulation TRNSYS

Scénario	Consommation chauffage $\text{kWh.m}^2.\text{an}^{-1}$	Concentration maximale de CO_2 ppm
Sans VMC + Infiltration (cas actuel)	52	8000
VMC SF ($Q_v = 18 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{pers}^{-1}$) + infiltration	65	1350
VMC DF ($Q_v = 18 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{pers}^{-1}$) + infiltration	53	1350
VMC DF ($Q_v = 35 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{pers}^{-1}$) + infiltration	58	900

VMC DF ($Q_v=18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{pers}^{-1}$) + infiltration + isolation de la façade	32	1350
--	----	------

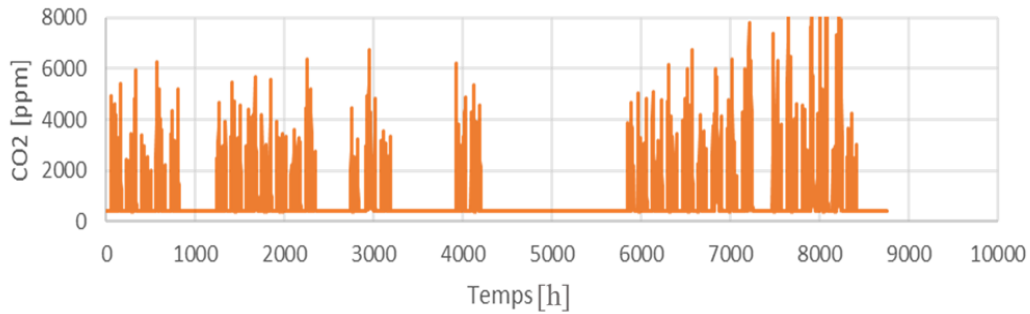


FIGURE 5. Evolution annuelle du taux de CO_2 dans la salle en l'absence de VMC

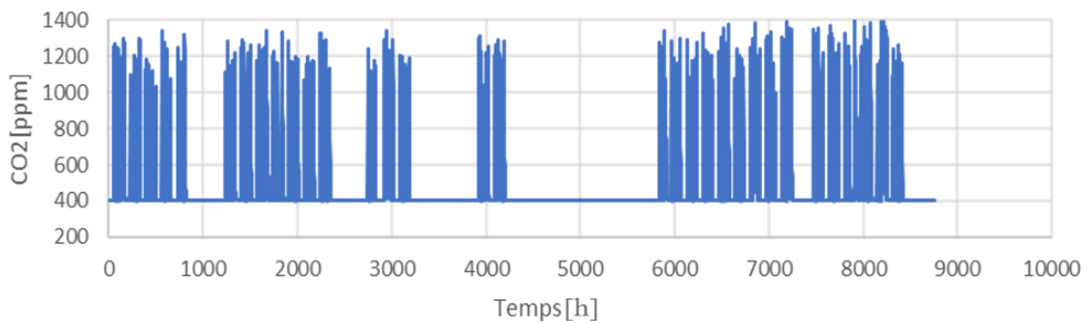


FIGURE 6. Evolution annuelle du taux de CO_2 dans la salle en présence de la VMC pour un débit réglementaire de $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{personne}^{-1}$

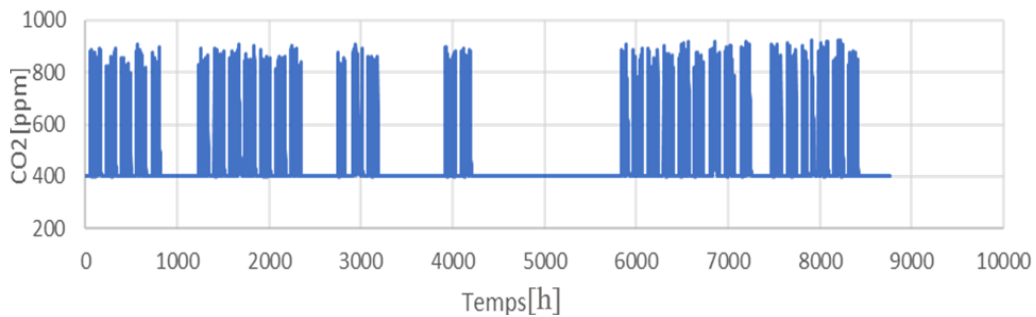


FIGURE 7. Evolution annuelle du taux de CO_2 dans la salle en présence de la VMC pour un débit réglementaire de $35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{personne}^{-1}$

IV. CONCLUSION

Des simulations thermiques dynamiques d'une salle de cours du département GCCD de l'IUT de Rennes ont été réalisées afin d'évaluer l'impact du type de VMC sur la consommation de chauffage et sur la qualité de l'air intérieur en utilisant la concentration de CO_2 comme indicateur. Le scénario de référence simulé sans VMC est représentatif de l'état actuel de la salle dont la VMC SF est non

fonctionnelle (taux de CO_2 dépassant les 6000 ppm et consommation de chauffage de $53 kWh.m^2.an^{-1}$). Nous avons montré que la mise aux normes de la ventilation en adoptant une VMC SF avec un débit d'air neuf de $18 m^3.h^{-1}.personne^{-1}$ en périodes d'occupation permet de respecter la réglementation en termes de taux de CO_2 dans la salle moyennant une surconsommation de chauffage de 25 % (taux de CO_2 maximal de 1350 ppm et consommation de chauffage de $65 kWh.m^2.an^{-1}$) par rapport au cas de référence. L'installation d'une VMC DF avec récupération de chaleur sur l'air extrait en assurant toujours un débit d'air neuf de $18 m^3.h^{-1}.personne^{-1}$ en périodes d'occupation permet de réduire la consommation de chauffage à sa valeur initiale sans VMC ($53 kWh.m^2.an^{-1}$). Ainsi, la mise aux normes de la VMC avec une DF assure la qualité de l'air sans surconsommation de chauffage. Afin d'atteindre une concentration maximale de 800 ppm préconisée par le HCSP en périodes épidémiques, un débit d'air neuf supérieur à $35 m^3.h^{-1}.personne^{-1}$ serait nécessaire. La surconsommation demeure néanmoins faible, à savoir de 9 % seulement si la VMC est de type DF.

Enfin, en limitant le débit d'air neuf à $18 m^3.h^{-1}.personne^{-1}$ en VMC DF et en la couplant à une isolation de la façade avec 15 cm de polystyrène, la consommation de chauffage se trouve réduite à $32 kWh.m^2.an^{-1}$.

La VMC DF décentralisée est en cours d'installation dans la salle démonstrateur. Son débit d'air sera régulé pour maintenir un taux de CO_2 réglementaire et s'adapter ainsi au strict besoin des usagers. La VMC et la salle seront instrumentées de divers capteurs (T, HR, CO_2 , contacteurs aux fenêtres et portes) pour une validation fine du modèle développé. Le modèle servira ensuite pour de nouvelles études paramétriques, y compris en couplage avec d'autres systèmes.

REMERCIEMENTS

Ces travaux sont réalisés dans le cadre de la Chaire Rénovation Énergétique des Bâtiments de la Fondation Rennes 1 (<https://fondation.univ-rennes.fr/chaire-renovation-energetique-des-batiments-fondation-rennes-1-0>). Les auteurs remercient la Fondation ainsi que tous les partenaires de la Chaire : Groupe Legendre, NGE Bâtiment, Rennes Métropole, Egis, Delta Dore, CETIH-Systovi, Sensing Vision. Dans le cadre de ces travaux, deux étudiants ont été accueillis en stage : Augustin LE VELLY et Théo FESENBECK

REFERENCES

AIRMASTER, (2021). CATALOGUE PRODUIT, 2020-2021 - Version 5.5, AIRMASTER, Ventilation in Balance, p. 128

Bonato, P., D'Antoni, M., Fdrizzi, R. (2020). Modelling and simulation-based analysis of a façade-integrated. Journal of Building Engineering, 29.

Ecologie.gouv, (2021). <https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments>

Fabien, C., Sebastian, Herkel., Tejas, Kuber., Jens, P. (2015). Energy performance of façade integrated decentralised ventilation systems. Energy and Buildings, 107.

- Franco, A., Leccese, F. (2020). Measurement of CO_2 concentration for occupancy estimation in educational buildings with energy efficiency purposes. *Journal of Building Engineering*, 32.
- HCSP, (2021). Haut Conseil de la Santé Publique, Covid-19 : aération, ventilation et mesure du CO_2 dans les ERP. [https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine? clefr=1009](https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1009), 2021
- JORF (1978). Circulaire du 9 août 1978 modifiée relative à la révision du règlement sanitaire d' départemental (RSDT). <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/>
- Loi ELAN, (2018). <https://www.gouvernement.fr/action/elan-une-loi-pour-l-evolution-du-logement-de-l-amenagement-et-du-numerique>
- Pedersen, T.H., Petersen, S. (2018). Investigating the performance of scenario-based model predictive control of space heating in residential buildings. *Journal of Building Performance Simulation*, 11, 485–498.
- Persily, A.K. (1997). Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide. *Build. Eng*, 103, 193–204.
- rsd35, (2008). Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales, Règlement Sanitaire Départemental de l'Ille et Vilaine. https://www.bretagne.ars.sante.fr/sites/default/files/2016-12/rsd35_0.pdf, 2008.
- Tugce, P., Aycz, T., Mehmet A, E., Tahsin, B. (2021). Experimental investigation of a decentralized heat recovery. *Journal of Building Engineering*, 35.
- Wargocki, P. (2021). What we know and should know about ventilation. *REHVA J*, 5–13.
- Almeida, R M. S. F., De Freitas, V. D. P. (2015). IEQ assessment of classrooms with an optimized demand-controlled ventilation system, 6th International Building Physics Conference. *Energy Procedia*, (78).
- Deng, S., Lau, J. (2019). Seasonal variations of indoor air quality and thermal conditions and their correlations in 220 classrooms in the Midwestern United States. *Building and Environment*, (157).
- Stabile, L., G. Buonanno, G., Frattolillo, A., M. Dell'Isola, (2019). The effect of the ventilation retrofit in a school on CO_2 , airborne particles and energy consumptions. *Building and Environment*, (156).
- Cabovská, B., Bekö, G., Teli, D., L. Ekberg, L., Dalenbäck, J., Wargocki, P., Psomas, T., Langer, S. (2022). Ventilation strategies and indoor air quality in Swedish primary school classrooms. *Building and Environment*, (226).