

Coût énergétique de la qualité de l'air dans les bâtiments

Alexis Wagner^{1,*}, Marie Ruellan², Romain Bourdais¹, Hamid Ben Ahmed³

¹ IETR-CentraleSupélec, ² SATIE-CYU, ³ SATIE -ENS Rennes, * alexis.wagner@centralesupelec.fr

RESUME – Les bâtiments neufs ou rénovés répondent en premier à des objectifs énergétiques et de confort. Même si les réglementations imposent des taux de renouvellement d'air importants, les mesures effectuées dans les bâtiments montrent que la ventilation mécanique est souvent insuffisante. Or l'air intérieur doit être régulièrement renouvelé afin d'éviter des effets néfastes sur la santé. Le travail proposé questionne la pertinence du pilotage des ouvrants couplés à la gestion du chauffage afin d'améliorer la qualité de l'air intérieur. Une méthodologie basée sur la comparaison de différentes commandes prédictives non linéaires a été développée pour prendre à la fois la complexité du modèle et les objectifs antagonistes. Elle permet, en jouant sur les paramètres de réglage des contrôleurs de chiffrer le surcoût énergétique induit par une meilleure qualité de l'air.

Mots-clés— *Commande prédictive (MPC), Optimisation multicritère, Qualité de l'air intérieure, Consommation, Bâtiment.*

1. INTRODUCTION

En France, le secteur du bâtiment représente 40 % de la consommation d'énergie primaire et 20 % des émissions de gaz à effet de serre. Au cours des dernières décennies, plusieurs réglementations se sont succédé dans le but de réduire les impacts générés par ce secteur (RT 2012, RE 2020). Ces réglementations imposent un taux de renouvellement d'air par ventilation mécanique visant à garantir une qualité d'air intérieur. Cependant, l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) à travers une campagne d'observation de 561 logements conclut qu'au moins un tiers des logements présente un taux de renouvellement d'air insuffisant [1]. Une mauvaise qualité de l'air intérieur a plusieurs conséquences sur la santé. À court terme, elle peut engendrer des problèmes de concentration, l'irritation des yeux, des vertiges et des migraines. Sur le long terme, elle peut déclencher des maladies respiratoires.

Pour toutes ces raisons, il est conseillé d'ouvrir ses fenêtres pendant de courtes périodes afin d'améliorer le renouvellement de l'air. L'OQAI indique d'ailleurs qu'en été, 94% des ménages déclarent ouvrir leur fenêtre au moins 30 minutes par jour contre 49 % en période hivernale. Ce comportement hivernal met en avant le choix de certains ménages de préserver la température de l'air intérieur et/ou de réduire leur facture énergétique, au détriment de la qualité de l'air. Il est donc question de compromis entre ces critères de confort et économique [2]. De nombreux travaux se sont intéressés à la gestion du chauffage et certains travaux se sont intéressés au compromis entre luminosité et température intérieure, en jouant en particulier sur les systèmes

d'occultation [3]. La qualité de l'air est généralement présentée comme un indicateur pour le contrôle du système de ventilation mécanique forcée [4]. Néanmoins, de nombreux logements ne possèdent pas de tels systèmes et il peut être compliqué d'installer une VMC dans un logement existant. La question que l'on se pose dans nos travaux est de voir si la motorisation d'un ouvrant peut permettre, par son pilotage couplé à la gestion du chauffage, de limiter les concessions réalisées, en améliorant la qualité de l'air, et en limitant l'augmentation du coût énergétique.

L'ouverture d'un ouvrant modifie directement le tirage thermique, qui va avoir un impact sur l'évolution de la température dans la pièce ainsi que sur le renouvellement de l'air. Ce tirage thermique dépend de la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur, il y a donc un couplage fort entre la qualité de l'air et la température intérieure. Nous proposons dans une première partie de présenter le modèle non linéaire du tirage thermique. La stratégie de pilotage se base sur une approche prédictive, dans laquelle les critères de confort sont exprimés en termes de contraintes relâchées. La méthodologie associée et le réglage des paramètres seront détaillés dans un second temps. Une dernière partie présente les résultats obtenus par simulation sur un cas d'étude dans lequel un front de Pareto est exhibé, mettant en avant le compromis entre les objectifs de confort et celui de consommation. Une comparaison avec un cas de référence est également proposée, illustrant l'intérêt de l'approche. Quelques conclusions et perspectives seront données à la fin de cet article.

2. MODELE COUPLE THERMIQUE/CONCENTRATION DE CO₂

Le modèle thermique utilisé représente une pièce équipée d'un radiateur électrique. La pièce est modélisée par un modèle thermique basé sur l'analogie thermique/électrique. Le système est un modèle réduit d'ordre deux, suffisant pour modéliser à la fois la dynamique rapide de l'air et la dynamique lente de la structure [5] (Figure 1). Ce modèle estime l'évolution de la température de l'air T_a , de la paroi intérieure de la structure T_{is} , de la structure T_s et de la paroi extérieure de la pièce T_{os} . Le flux de chaleur u_c généré par le convecteur électrique se divise en une partie convective (η_{conv}) et une partie radiative respectant les relations :

$$u_{conv} = \eta_{conv} \cdot u_c \quad (1)$$

$$u_{rad} = (1 - \eta_{conv}) \cdot u_c \quad (2)$$

Le modèle proposé ne considère pas les apports solaires. Le renouvellement d'air, à la suite de l'ouverture de la fenêtre, Q_w peut être caractérisé par une expression qui dépend à la fois de l'ouverture effective de la fenêtre A_{op} , mais aussi de la température de l'air T_a intérieur et de l'air extérieur T_{ext} , par l'expression non linéaire, résultante de la résolution de

l'équation de Bernoulli supposant que la vitesse du vent est nulle :

$$Q_w = \frac{1}{3} C_d A_{op} \sqrt{\frac{g(T_a - T_{ext})h_w}{\frac{T_a + T_{ext}}{2}}} \quad (3)$$

L'ouverture effective de la fenêtre A_{op} peut être déterminée en fonction de l'angle d'ouverture α de l'ouvrant, en considérant ici, une fenêtre s'ouvrant en battant de hauteur h_w et de largeur l_w :

$$A_{op} = h_w [h_w \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + l_w (1 - \cos \alpha)] \quad (4)$$

Ce renouvellement d'air impacte directement la température de l'air intérieur de masse volumique ρ_a et de capacité thermique à pression constante c_{p_a} , générant un flux de chaleur s'exprimant :

$$u_w = Q_w \cdot \rho_a \cdot c_{p_a} (T_a - T_{ext}) \quad (5)$$

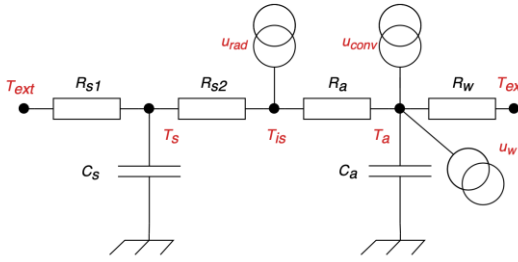


FIG. 1. Modèle thermique RC de la pièce considérée.

Le modèle thermique de la pièce peut être représenté par le modèle d'état non linéaire suivant :

$$\begin{aligned} X &= AX + Bu_c + f(\alpha, T_a, T_{ext}) \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (6)$$

Avec :

$$X = [T_a \quad T_s]^T$$

La concentration de CO_2 dans une pièce de volume V peut être définie par l'équation différentielle suivante [6] :

$$V \frac{dC_{CO_2}}{dt} = (nV + Q_w)(C_{ext} - C_{CO_2}) + q_{CO_2} \quad (7)$$

La concentration diminue à la suite du renouvellement de l'air intérieur par la ventilation mécanique pour un taux de renouvellement volumique de l'air intérieur n . De plus, comme vu dans (1), l'air pollué s'évacue, lors de l'ouverture de la fenêtre avec un débit volumique Q_w par phénomène de tirage thermique. La concentration de l'air entrant en CO_2 est égale à C_{ext} . Le CO_2 est généré par les n_{occ} occupants pour un débit de CO_2 expiré par occupant constant $q_{CO_2/occ}$, soit :

$$q_{CO_2} = q_{CO_2/occ} \cdot n_{occ} \quad (8)$$

Le modèle thermique de la pièce et la concentration en CO_2 sont deux modèles non linéaires couplés par le renouvellement de l'air par tirage thermique (figure 2).

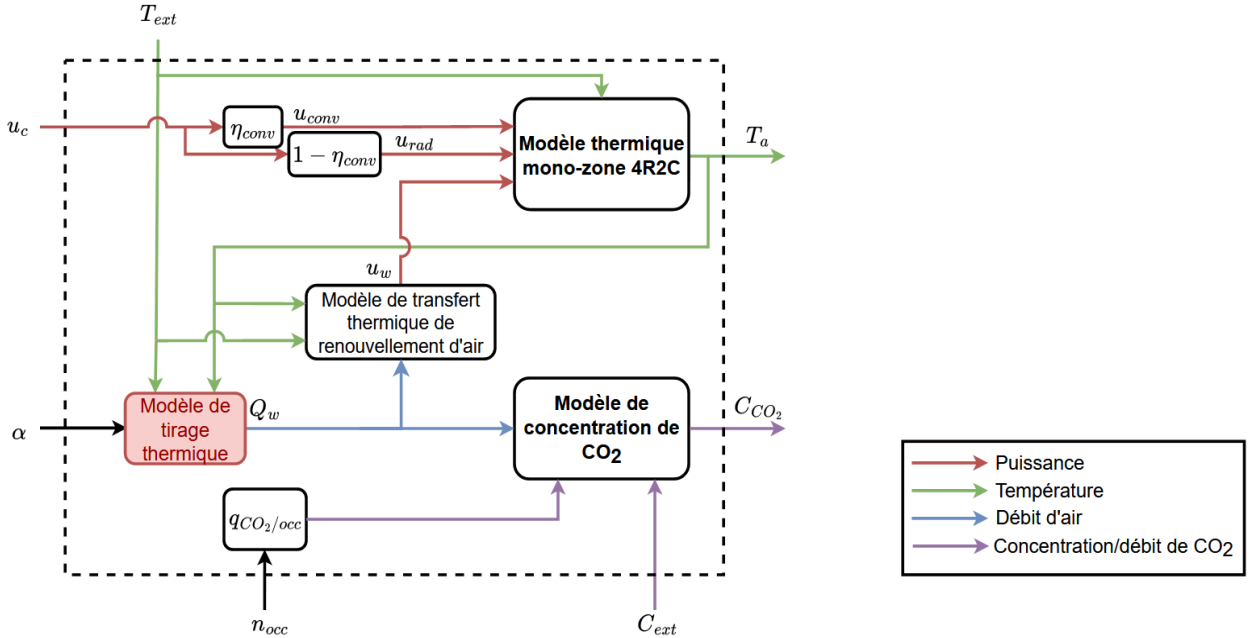


FIG. 2.. Schéma bloc du modèle couplé thermique/concentration de CO_2

3. STRATEGIES DE COMMANDE IMPLEMENTEES

Cette section a pour objectif de présenter différentes stratégies de commande du système de chauffage et de

l'ouvrant. Quatre stratégies sont définies : la gestion du chauffage et de l'ouverture de l'ouvrant par commande prédictives sont définies et détaillées dans les paragraphes

suivants. La figure 3 présente le schéma de contrôle appliqué pour les quatre stratégies présentées.

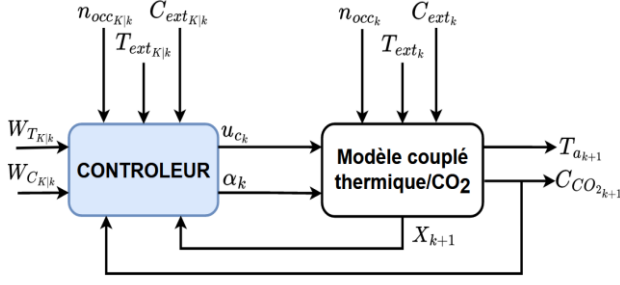


FIG. 3. Schéma de contrôle

Toutes les stratégies sont soumises aux mêmes contraintes de puissance de chauffe et d'angle d'ouverture maximales soit :

$$0 \leq u_c \leq u_{c_{max}} \quad (9)$$

$$0 \leq \alpha \leq \alpha_{max} \quad (10)$$

3.1 STRATEGIE n°1 : Commande de l'ouverture de l'ouvrant et de la puissance de chauffe par commande prédictive couplée

Pour piloter le système couplé thermique/concentration de CO₂, nous proposons, dans un premier temps, de mettre en place une commande prédictive qui a déjà montré de très bons résultats dans la gestion thermique du bâtiment, notamment pour prendre en compte l'intermittence de l'occupation [7]. Cette stratégie exploite le modèle couplé du chauffage et de la qualité de l'air. En quelques mots, à chaque instant k , le contrôleur détermine les séquences de commande de la puissance de chauffe $u_{c_{K|k}}$ et de l'angle d'ouverture $\alpha_{K|k}$ sur un horizon de prédiction de longueur K , séquences qui minimisent un critère d'optimisation, tout en prenant en compte la dynamique du système et les contraintes de fonctionnement. Comme toute commande prédictive, seul le premier élément de la séquence est appliqué au système et un nouveau calcul est effectué au pas de temps suivant, selon le principe de l'horizon glissant.

Dans notre cas, les contraintes de fonctionnement que l'on cherche à respecter sont liées au confort thermique, noté $W_{T_{K+1|k}}$ et au taux de CO₂, noté $W_{C_{K+1|k}}$, uniquement lorsque l'occupant est présent dans le logement, indication fournie par la matrice d'occupation $OCC_{K+1|k}$. Ces contraintes de qualité de service sont relâchées pour garantir la faisabilité du problème d'optimisation par l'introduction de variables d'écart, notées $\varepsilon_{T_{K+1|k}}$ et $\varepsilon_{C_{K+1|k}}$. La première variable est pénalisée fortement lorsque la température de consigne ne peut pas être atteinte. Il est plus complexe de pénaliser le non-respect de la contrainte sur la qualité de l'air. En effet, lorsque la contrainte sur la qualité de l'air ne peut pas être respectée, une pénalisation trop importante de la variable $\varepsilon_{C_{K+1|k}}$ exploite le tirage thermique, en surchauffant, pour mieux évacuer le CO₂. La conséquence directe est une surconsommation énergétique. Il est donc nécessaire de régler

cette variable de pénalisation en accord avec le critère énergétique.

Afin d'éviter des mouvements intempestifs de l'ouvrant (évitant ainsi une usure prématurée de leur motorisation), la position de celui-ci est choisie pour une durée de 30 minutes, ce qui correspond à 5 pas de temps d'échantillonnage. Ceci conduit à résoudre toutes les 30 minutes le problème d'optimisation suivant :

$$\text{MIN } J(u_{c_{K|k}}, \alpha_{K|k}, \varepsilon_{T_{K|k}}, \varepsilon_{C_{K|k}}) = 1_{N_p}^T u_{c_{K|k}} + \text{pen}_T 1_{N_p}^T \varepsilon_{T_{K|k}} + \text{pen}_C 1_{N_p}^T \varepsilon_{C_{K|k}}$$

$$\text{slc: } T_{air_M} \geq T_{air_{K+1|k}} + \varepsilon_{T_{K+1|k}} \geq OCC_{K+1|k} W_{T_{K+1|k}}$$

$$C_{CO2_{K|k}} - \varepsilon_{C_{K+1|k}} \leq OCC_{K+1|k} W_{C_{K+1|k}} \quad (11a)$$

$$z(i) = z(i+1) = z(i+2) = z(i+3) = z(i+4),$$

$$\forall i \in [k; K+1] \setminus i \equiv 0 \pmod{5}$$

Entre temps, seul le chauffage est optimisé, en prenant en compte l'angle d'ouverture prédéterminé. Ceci est effectué par la résolution du problème d'optimisation suivant :

$$\text{MIN } J(u_{c_{K|k}}, \varepsilon_{T_{K|k}}, \varepsilon_{C_{K|k}}) = 1_{N_p}^T u_{c_{K|k}} + \text{pen}_T 1_{N_p}^T \varepsilon_{T_{K|k}} + \text{pen}_C 1_{N_p}^T \varepsilon_{C_{K|k}}$$

$$\text{slc: } T_{air_M} \geq T_{air_{K+1|k}} + \varepsilon_{T_{K+1|k}} \geq OCC_{K+1|k} W_{T_{K+1|k}} \quad (11b)$$

$$C_{CO2_{K|k}} - \varepsilon_{C_{K+1|k}} \leq OCC_{K+1|k} W_{C_{K+1|k}}$$

La considération du critère énergétique sous contrainte de qualité de l'air sur un horizon de prédiction futur fait de cette stratégie une stratégie de commande optimale du système couplé. Elle permet ainsi d'obtenir le tracé du front de Pareto caractérisant les solutions optimales de la consommation en chauffage en fonction de la contrainte de qualité de l'air définie. Notons que dû à la non-linéarité du modèle, le problème d'optimisation résultant est non convexe et nécessite l'utilisation d'un solveur adapté.

3.1. STRATEGIE n° 2 : Commande de la puissance de chauffe par commande prédictive sans contrainte de qualité de l'air

Pour estimer le surcoût énergétique de la qualité de l'air, nous proposons de définir une stratégie où la concentration de CO₂ n'est pas contrainte. Cette stratégie minimise uniquement la consommation en chauffage garantissant le confort thermique des occupants lorsqu'ils sont présents. De manière identique à la commande précédente, la convergence à chaque itération est garantie par la variable de relaxation $\varepsilon_{T_{K+1|k}}$. Le problème d'optimisation peut donc s'écrire de la manière suivante :

$$\text{MIN } J(u_{c_{K|k}}, \varepsilon_{T_{K|k}}) = 1_{N_p}^T u_{c_{K|k}} + \text{pen}_T 1_{N_p}^T \varepsilon_{T_{K|k}} \quad (12)$$

$$\text{slc: } T_{air_M} \geq T_{air_{K+1|k}} + \varepsilon_{T_{K+1|k}} \geq OCC_{K+1|k} W_{T_{K+1|k}}$$

Pour cette stratégie, la fenêtre est constamment fermée. Ainsi, le critère énergétique permet d'estimer pour le cas d'étude explicité dans la prochaine section la consommation minimale en chauffage permettant de garantir le confort thermique des occupants. La différence de consommation en chauffage entre cette stratégie et les autres implémentées sera la conséquence

de l'ouverture de l'ouvrant. De plus, comme aucune diminution de CO₂ n'est forcée, cette stratégie sert de référence pour quantifier l'influence de l'ouverture de la fenêtre des autres stratégies sur la qualité de l'air intérieur.

3.2. STRATEGIE n° 3 : Commande de l'ouvrant et de la puissance de chauffe par commande prédictive découplée

Ce troisième contrôleur se base sur le découplage de la commande de l'ouvrant de celle du chauffage. Le découplage proposé se scinde en deux contrôleurs. Dans un premier temps, la séquence optimale de l'angle d'ouverture de la fenêtre est déterminée à partir du problème d'optimisation suivant:

$$\begin{aligned} \text{MIN } J(\alpha_{K|k}, \varepsilon_{C_{K|k}}) &= \text{pen}_c \mathbf{1}_{N_p}^T \varepsilon_{C_{K|k}} \\ \text{slc: } C_{CO_2|K|k} - \varepsilon_{C_{K+1|k}} &\leq OCC_{K+1|k} W_{C_{K+1|k}} \\ z(i) &= z(i+1) = z(i+2) = z(i+3) = z(i+4), \\ \forall i \in [k; K+1] \setminus i &\equiv 0 \pmod{5} \end{aligned} \quad (13a)$$

Aucune contrainte n'est imposée sur la température intérieure, la température de l'air intérieur permettant de quantifier le débit d'air sortant est fixée à la température de l'air à l'instant k . Cette température est fixée pour l'ensemble de l'horizon de prédiction. La puissance de chauffe est déterminée de la même manière que la commande précédente soit le problème d'optimisation suivant :

$$\begin{aligned} \text{MIN } J(u_{C_{K|k}}, \varepsilon_{T_{K|k}}) &= \mathbf{1}_{N_p}^T u_{C_{K|k}} + \text{pen}_T \mathbf{1}_{N_p}^T \varepsilon_{T_{K|k}} \\ \text{slc: } T_{air_M} &\geq T_{air_{K+1|k}} + \varepsilon_{T_{K+1|k}} \geq OCC_{K+1|k} W_{T_{K+1|k}} \end{aligned} \quad (13b)$$

La température de l'air de ce modèle de prédiction est estimée supposant la séquence de contrôle α déterminée par le premier contrôleur. La puissance thermique extraite de l'air, conséquence de l'ouverture de la fenêtre, est donc considérée comme une perturbation.

3.4 STRATEGIE n°4 : Commande de l'ouvrant manuelle et du chauffage par commande prédictive

Cette stratégie de gestion a pour objectif d'évaluer si l'occupant peut disposer d'un comportement adapté au maintien de la qualité de l'air souhaitée. Cette stratégie consiste à prévenir l'occupant lorsque la concentration de CO₂ dépasse le seuil W_C indiquant qu'il doit ouvrir la fenêtre (valeur fixée à la moitié d' α_{max}) tant que la concentration n'a pas diminué jusqu'à atteindre la valeur de 700 ppm. La puissance de chauffe est quant à elle déterminée par commande prédictive sans prédiction de l'ouverture de la fenêtre suivant le problème d'optimisation identique à la stratégie n°2 :

$$\begin{aligned} \text{MIN } J(u_{C_{K|k}}, \varepsilon_{T_{K|k}}) &= \mathbf{1}_{N_p}^T u_{C_{K|k}} + \text{pen}_T \mathbf{1}_{N_p}^T \varepsilon_{T_{K|k}} \\ \text{slc: } T_{air_M} &\geq T_{air_{K+1|k}} + \varepsilon_{T_{K+1|k}} \geq OCC_{K+1|k} W_{T_{K+1|k}} \end{aligned} \quad (14)$$

Pour éviter les inconforts thermiques trop importants lors de l'ouverture de la fenêtre par les occupants, la commande

considère l'état d'ouverture de la fenêtre à l'instant k , α_k et propage cet état sur l'ensemble de l'horizon de prédiction permettant ainsi d'estimer avec plus de précision la puissance de chauffe nécessaire pour compenser les pertes suite au tirage thermique.

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette section, les commandes précédentes sont appliquées à un scénario d'occupation probabiliste, d'une durée de 6 jours, obtenu à partir des travaux des auteurs de [8]. Le nombre maximal d'occupants est fixé à 4. Les paramètres du modèle thermique sont explicités dans le tableau 1 et sont issus des travaux de [9]. Ces paramètres correspondent à ceux d'une pièce avec une fenêtre de 2 m² et de 70 m² de surface au sol. Uniquement la moitié de la fenêtre peut être ouverte. La puissance de chauffe est déterminée de manière à maintenir, en régime permanent, un différentiel de température de 25°C entre l'air intérieur et extérieur soit :

$$u_{max} = \frac{R_a + R_w}{(R_{s1} + R_a)R_w} \times 25 = 7.35 \text{ kW}$$

Tableau 1. Paramètres du modèle thermique utilisé

| | Paramètre | Valeur | Unité |
|----------------------------|----------------|--------------------|---------------------|
| Enveloppe thermique | R_{s1} | 10000 | K.kW ⁻¹ |
| | R_{s2} | 10 | K.kW ⁻¹ |
| | R_a | 50 | K.kW ⁻¹ |
| | R_w | 1×10^{-2} | K.kW ⁻¹ |
| | C_a | 0.03 | kWh.K ⁻¹ |
| | C_w | 33.33 | kWh.K ⁻¹ |
| Chauffage | η_{conv} | 0.7 | S.U |
| | u_{cmax} | 7.35 | kW |
| Ouvrant | h_w | 1 | m |
| | l_w | 1 | m |
| | α_{max} | 40 | ° |
| Géométrie | V | 175 | m ³ |
| Qualité de l'air | n | 0.4 | vol.h ⁻¹ |
| | C_{ext} | 400 | ppm |
| | $q_{CO2/occ}$ | 154 | ppm.h ⁻¹ |

Les résultats sont obtenus par simulation sous Matlab, le modèle d'état est discrétisé pour un pas de temps de 6 minutes. Le solveur utilisé est celui de la bibliothèque CASADI adapté pour la résolution de problèmes d'optimisation non linéaires [10]. L'horizon de prédiction est de 8 heures qui correspond à un compromis acceptable entre temps de simulation et qualité de la prédiction considérant que l'absence maximale des occupants est d'environ 6 heures. De plus, les résultats présentés pour chaque stratégie correspondent à une prédiction parfaite de l'occupation. Le modèle de prédiction couplé est identique à celui de simulation. Le modèle d'état est discrétisé suivant la méthode d'Euler. La figure 3 présente les résultats sur 3 jours pour l'ensemble de ces stratégies. La température extérieure correspond à la ville de Nancy (janvier 2022) visible en jaune sur la figure 3. Les réglages des 4 stratégies de commande sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Paramètres des différentes fonctions de coûts

| N° Stratégie | pen_T | pen_C | W_T (°C) | W_C (ppm) |
|--------------|---------|---------|------------|-------------|
| 1 | 10 | 0.01 | 19 | 1000 |
| 2 | 1000 | / | 19 | / |
| 3 | 10 | 0.01 | 19 | 1000 |
| 4 | 1000 | / | 19 | 1000* |

*commande manuelle de l'ouvrant

Stratégie n° 1 – bleu : La commande couplée permet de limiter les situations d'inconfort à la fois thermique et de qualité de l'air. De plus, deux comportements de l'algorithme sont relevables. En effet, à environ 15 h, lorsque l'algorithme prédit que la concentration de CO₂ dépassera la contrainte de 1000 ppm à 22h suite au retour des occupants, le choix est réalisé d'ouvrir la fenêtre à sa position maximale. La chute de température induite ne crée pas d'inconfort car l'ouverture a lieu lorsque les occupants sont absents (15h30). La concentration de CO₂ atteint donc sa valeur minimale de 400 ppm avant sa phase d'augmentation suite au retour des occupants. Ce phénomène n'est pas systématique et semble étroitement lié à la capacité des murs de pouvoir réchauffer l'air entrant. De plus, lorsque le compromis est compliqué à respecter (ex : W_C = 800 ppm non représenté figure 3) le tirage thermique est exploité en surchauffant l'air intérieur accentuant la différence de température entre l'air intérieur et extérieur et donc le débit d'air sortant.

Stratégie n° 2 – orange : Cette stratégie, d'un point de vue énergétique, est similaire à toutes les stratégies présentées dans ces travaux en terme de gestion de la température de l'air intérieur. En effet, l'air intérieur est préchauffé au dernier moment avant le retour des occupants minimisant de ce fait la

consommation en chauffage. Concernant la concentration en CO₂, il est observable que sans ouverture de l'ouvrant elle atteint des valeurs largement supérieures aux 1000 ppm préconisés par l'OQAI justifiant ainsi l'intérêt de se servir d'un ouvrant comme moyen de réguler ce service (maximum 1568 ppm).

Stratégie n° 3 – vert : En termes de qualité de service la stratégie de commande prédictive découplée respecte toutes les contraintes imposées par le problème. Cependant, on n'observe pas d'ouverture de la fenêtre lors de l'absence du départ des occupants. Mais des événements où l'air intérieur est surchauffé pour favoriser le tirage thermique apparaissent identiquement à la stratégie n°1.

Stratégie n° 4 – rouge : La commande « manuelle » présente dans les situations où le CO₂ monte rapidement de vraies limitations. En effet, bien que le chauffage dispose de l'information de l'état d'ouverture de la fenêtre, le maintien de la température de confort se dégrade lorsque la température extérieure est très basse, conséquence du chauffage qui ne peut compenser à la fois les pertes par conduction de l'habitation et celles dues au renouvellement d'air. Cette stratégie montre donc que l'ouverture par les utilisateurs de la fenêtre pour maintenir une qualité de l'air intérieur acceptable de 1000 ppm à tout instant est impossible sans dégrader ponctuellement mais de manière significative le confort thermique des occupants (max : ~9°C). Cette stratégie justifie de l'intérêt d'une commande avancée pour le pilotage de l'ouvrant lors d'une période hivernale.

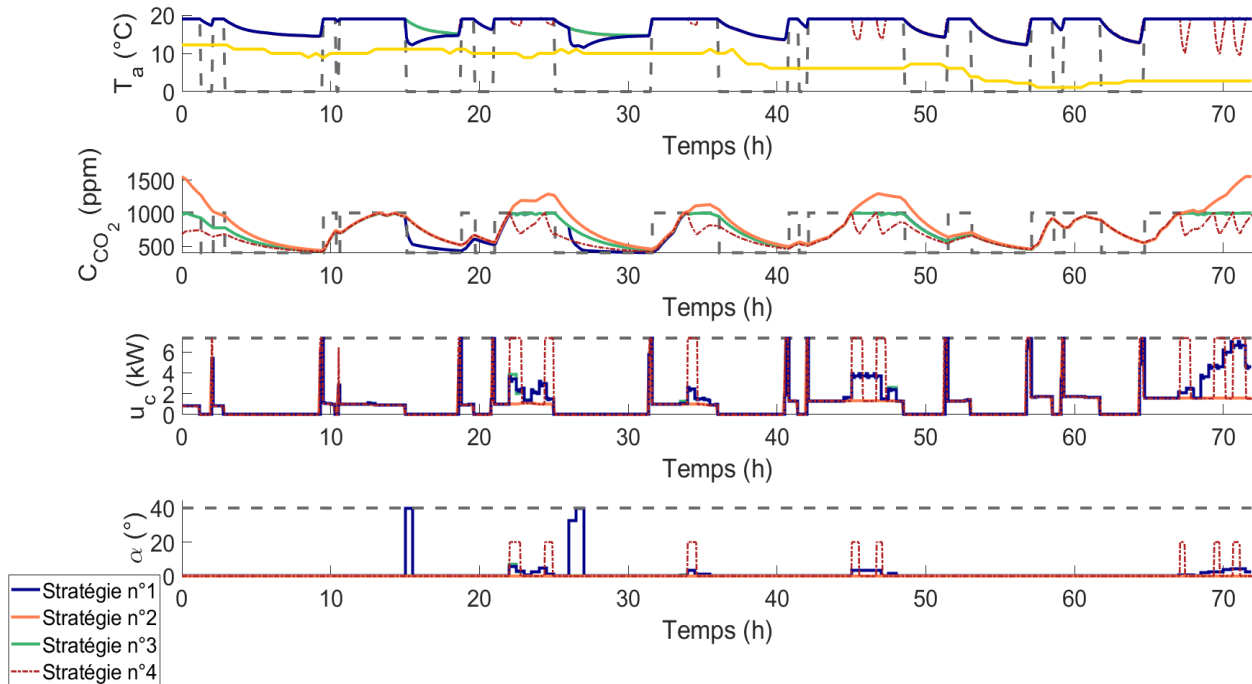


FIG. 3. Séries temporelles des températures intérieures, T_a , concentration en CO₂, C_{CO_2} , et commandes de chauffage, u_c , et angles d'ouvertures, α , sur une période de 3 jours des différentes stratégies – en jaune la température extérieure, en gris pointillé – les contraintes/consignes

Une étude de sensibilité sur la contrainte en concentration de CO₂, W_C , est réalisée pour chaque stratégie présentée précédemment évaluant le surcoût énergétique de la qualité de l'air intérieur souhaitée. Cette surconsommation est comparée à la consommation résultante de la stratégie n°2 où la concentration de CO₂ n'est pas contrainte. La température de consigne W_T est fixée à 19°C. La figure 4 présente le front de Pareto consommation en chauffage/ W_C pour les 4 stratégies et deux critères de confort définis par les équations, lorsque les occupants sont présents.

$$Crit_T = \int W_T - T_a dt \tag{15a}$$

$$Crit_C = \int T_a - W_c dt \tag{15b}$$

Pour les stratégies n°1, n°3 et n°4, plus la concentration de CO₂ est contrainte, plus la consommation en chauffage est importante, conséquence des pertes de plus en plus importantes suite à l'ouverture de l'ouvrant. De plus, la fenêtre n'a plus besoin de s'ouvrir pour les contraintes supérieures à 1500 ppm, justifié par la consommation en chauffage minimale définie par la stratégie n°2. La stratégie n°4 (gestion manuelle de l'ouvrant) présente une consommation supérieure aux stratégie n°1 et n°2. De plus, bien que le critère de confort de qualité d'air intérieure soit respecté, elle implique de longs moments où la température de l'air intérieure est très basse. Les consommations des stratégies n°1 et n°3 (commandes prédictives couplées et découplées) sont identiques pour les valeurs de contrainte en CO₂ supérieures à 1000 ppm. L'écart entre ces deux stratégies, pour une valeur de W_C de 1000 ppm reste faible (0.59 kWh). Ces stratégies permettent de garantir le confort thermique souhaité ainsi que de respecter la contrainte de qualité de l'air. La différence de consommation de ces deux stratégies, pour les valeurs d' W_C de 800 et de 900 ppm montrent que lorsque la faisabilité du problème est complexe la stratégie couplée surperforme celle découplée.

Le tableau 3 présente le coût énergétique de la qualité de l'air en pourcent par rapport à la stratégie n°2 pour les stratégies n°1 et n°3. Ces résultats questionnent quant à la faisabilité de la motorisation. En effet, une qualité d'air intérieur est acceptable pour une valeur de 1000 ppm. Cependant, le respect de cette contrainte par l'ouverture d'un ouvrant implique une surconsommation de 40 % pour une stratégie de gestion avancée. Néanmoins, une valeur de 1300 ppm semble être un bon compromis induisant une surconsommation de 4.93 %.

Tableau 3. Surcoût énergétique de la qualité de l'air en % vis-à-vis de la consommation en chauffage de la stratégie n°2.

| W_C (ppm) | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|------|
| Stratégie n°1 | 112.16 | 68.47 | 39.74 | 22.05 | 11.17 | 4.93 |
| Stratégie n°3 | 134.57 | 82.30 | 40.24 | 22.16 | 11.20 | 4.94 |

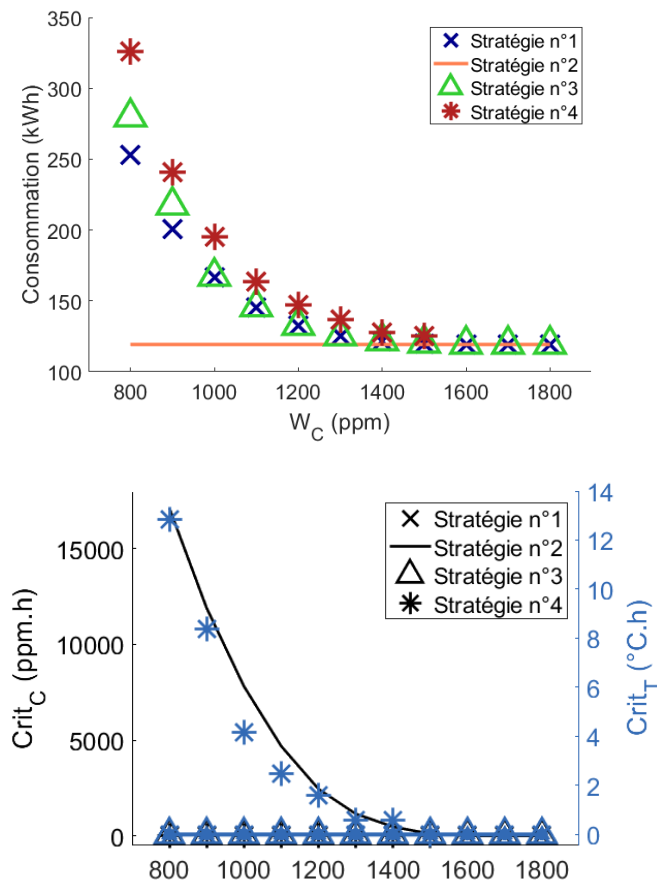


FIG.4. Impact des exigences en CO₂ sur la consommation. Les stratégies n°1 et n°3 respectent les contraintes de température et de concentration de CO₂, caractérisant ainsi leur front de Pareto respectif.

5. CONCLUSION

Ce travail propose 4 stratégies de gestion d'un ouvrant et du chauffage permettant d'évaluer l'intérêt de motoriser un ouvrant pour le respect de la qualité de l'air en période hivernale. L'application de ces stratégies à un modèle thermique de logement d'ordre réduit permet de mettre en lumière plusieurs aspects :

- Le confort thermique est fortement dégradé si la gestion de l'ouvrant est manuelle (stratégie n°4), tout en étant plus énergivore.
- L'ouverture de la fenêtre est nécessaire pour le maintien d'une qualité de l'air de 1000 ppm (stratégie n°2)
- La gestion avancée en simultanée de l'ouvrant et du chauffage peut limiter les dégradations de confort pour les occupants (stratégie n°1 et n°3)

De plus, une sensibilité sur la contrainte de CO₂ et la définition de critère de confort permet d'évaluer le coût énergétique des quatre stratégies. Ce résultat montre la complexité de respecter la concentration en CO₂ de 1000 ppm préconisées par l'OQAI. Mais montre que le coût n'est pas linéaire et

qu'une concentration légèrement supérieure constituerait un compromis intéressant.

6. LIMITATIONS

La durée de simulation est sûrement trop courte pour évaluer avec précision le coût énergétique de la qualité de l'air. L'étude d'une période de chauffe complète permettrait de consolider les résultats en appliquant la méthodologie proposée. De plus, il serait intéressant d'observer les différents résultats pour un modèle thermique multizone réalisé avec un software adapté comme EnergyPlus [11] considérant à la fois les apports solaires et la puissance dissipée. En effet, si on s'intéresse uniquement à la pièce où la fenêtre s'ouvre, son chauffage doit compenser à lui seul les plusieurs kW du transfert thermique par renouvellement d'air générant un inconfort thermique localisé dans cette pièce. Il serait aussi intéressant d'observer le potentiel de la motorisation de l'ouvrant en été où son rôle permettrait de réduire la température de l'air intérieur (free-cooling) tout en limitant la concentration de CO₂ de l'habitat.

7. REFERENCES

- [1] J.-P. Lucas, « État de la ventilation dans le parc de logements français », Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, juin 2009.
- [2] W. Perera, C. F. Pfeiffer, et N.-O. Skeie, « Control of temperature and energy consumption in building - a review », *Energy Env.*, vol. 5, p. 471-484, janv. 2014.
- [3] K. Le, R. Bourdais, et H. Guéguen, « From hybrid model predictive control to logical control for shading system: A support vector machine approach », *Energy Build.*, vol. 84, p. 352-359, déc. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.084.
- [4] S. J. Emmerich et A. K. Persily, « State-of-the-Art Review of CO₂ Demand Controlled Ventilation Technology and Application », *NIST*, juill. 2001.
- [5] J. H. Kämpf et D. Robinson, « A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows », *Energy Build.*, vol. 39, n° 4, p. 445-453, avr. 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.09.002.
- [6] « Indoor Air Quality, Volume 3 - 1st Edition ». <https://www.elsevier.com/books/indoor-air-quality/maroni/978-0-444-81642-9>.
- [7] D.-P. Morosan, R. Bourdais, et H. Guéguen, « Apports de la commande prédictive pour la régulation thermique des bâtiments », *J. Eur. Systèmes Autom. JESA*, vol. 44, n° 4-5, p. 479, 2010, doi: 10.3166/jesa.44.479-492.
- [8] I. Richardson, M. Thomson, et D. Infield, « A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations », *Energy Build.*, vol. 40, n° 8, p. 1560-1566, janv. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.02.006.
- [9] A. Lefort, « A smart grid ready building energy management system based on a hierarchical model predictive control. », These de doctorat, Supélec, 2014.
- [10] J. A. E. Andersson, J. Gillis, G. Horn, J. B. Rawlings, et M. Diehl, « CasADi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control », *Math. Program. Comput.*, vol. 11, n° 1, p. 1-36, mars 2019, doi: 10.1007/s12532-018-0139-4.
- [11] D. Crawley, C. Pedersen, L. Lawrie, et F. Winkelmann, « EnergyPlus: Energy Simulation Program », *Ashrae J.*, vol. 42, p. 49-56, avr. 2000.