Développement d'algorithmes de ventilation basés sur la qualité de l'air intérieur, et évaluation dans deux chambres climatiques.

Franck Alessi*[1], Romain Joubert[1], Alain Guiavarch[2], Sylvie Traverse[2], Chi-Kien NGUYEN[2], Fiona Pelletier[3]

[1] Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, Campus Ines, 73375 Le Bourget du Lac, France
[2] Ginger Burgeap, 19 rue de la Villette, 69003 Lyon
[3] Tera environnement, 628 rue Charles de Gaulle, 38920 Crolles
***franck.alessi@cea.fr**

RESUME. A l'heure où la pandémie de COVID-19 sévit encore, la Qualité de l'Air Intérieur (QAI) n'a jamais connu un tel essor. On parle de plus en plus de capteurs de dioxyde de carbone (CO_2) dans les écoles, d'épurateurs d'air, ou encore de débits de ventilation augmentés. Bien qu'une bonne QAI passe par l'information des occupants, la gestion des sources, l'aération, et l'épuration de l'air, une gestion dynamique des Taux de Renouvellement d'Air (TRA) prend tout son sens. Cet article illustre deux cellules spécialement conçues pour représenter deux bureaux pilotés : faible émissivité des matériaux, forte étanchéité à l'air, température d'air régulée, systèmes d'injection de polluants et de modulation des débits d'air, etc. En outre, un algorithme a été développé pour tester une logique de contrôle QAI 'horaire' versus deux autres logiques de régulation : 'différentielle' et 'proportionnelle'. En se focalisant sur le CO_2, l'utilisation des logiques différentielle et proportionnelle a réduit respectivement de 18% et 16% la teneur en CO_2 par rapport à la logique horaire. Néanmoins, les débits d'air ont respectivement augmenté de 38% et 19%.

MOTS-CLÉS : Ventilation, Qualité de l'air intérieur, Algorithme

ABSTRACT. At a time where the COVID-19 pandemic is still there, Indoor Air Quality (IAQ) is one of the most predominant topics. There is more and more talk of carbon dioxide sensors (CO_2) in the schools, or air purifiers, or need of higher ventilation rates. Even if a good IAQ is required to inform occupants, or to manage sources, ventilation, and air purification, a dynamic management of Air Change Rates (ACH) fully makes sense. This article illustrates two cells specially designed to represent two controlled offices: low emissivity of materials, high airtightness, regulated air temperature, systems for injecting pollutants and modulating airflows, and so on. In addition, an algorithm is developed to test a 'hourly' IAQ control logic versus two other regulation logics: 'differential' and 'proportional'. Focusing on CO_2, the use of the differential and proportional logics has reduced the CO_2 concentration respectively by 18% and 16%, compared to the 'hourly' logic. Unfortunately, in the same time, the airflow has respectively increased by 38% and 19%.

KEYWORDS: Ventilation, Indoor air quality, Algorithm

1. INTRODUCTION

La Qualité de l'Air Intérieur (QAI) est impactée par plusieurs sources d'émission (Bareau 2009) . L'air extérieur peut être vecteur de polluants, entrer dans le bâti par les ouvrants, les infiltrations, ou encore le système de ventilation. D'autres facteurs comme les revêtements, le mobilier, la bureautique ou l'électroménager contribuent également à cette pollution intérieure. A cela s'ajoute les occupants, les animaux, les plantes, et les activités diverses (tabagisme, nettoyage, bricolage, hygiène).

Face à ces multiples sources polluantes, notre exposition est non négligeable. Nous passons environ 80% à 90% de notre temps en espaces intérieurs clos (Schriver-Mazzuolli 2009) dont 16h10 en moyenne

dans les logements (Zeghnoun et Dor 2008). En outre, un individu ingère par jour environ 1 à 2kg de nourriture et 1 à 2kg d'eau. Cela reste cependant environ 6 à 10 fois moins que l'air qu'il respire (10 à 12kg d'air (Schriver-Mazzuolli 2009)), et qui transite à travers environ 90 m² de surface pulmonaire (Déoux et Déoux 2004). La qualité de l'air est donc un enjeu majeur tant pour le confort, la santé, que pour la productivité en entreprise.

Plusieurs méthodes existent pour améliorer la qualité de l'air intérieur : l'information des usagers, le contrôle des sources, l'aération, la ventilation et le traitement de l'air. La réglementation française relative à l'aération des logements (*Arrêté du 24 mars 1982*, s. d.) impose une ventilation générale et permanente. L'air doit circuler des pièces de vie vers les pièces de service. La possibilité de réduire le TRA (Taux de Renouvellement d'Air) est opérée via un dispositif mécanique automatique. Pour autant, il serait utile de faire évoluer la réglementation vers une modulation plus dynamique des débits d'air via une approche multiparamétrique.

Le RSDT (*Réglement Sanitaire Départemental Titre III* s. d.) ou encore le CT (*Code du travail*, s. d.) indiquent dans les bureaux individuels, objet du présent article, des valeurs de débits d'air de 18 et 25m^3/h/pers. Là encore, ces valeurs sont fixées même si toutefois, il est possible de faire en parallèle du recyclage de l'air, ou d'abaisser, de moduler voire d'arrêter les débits d'air suivant l'heure et l'occupation. Par exemple : dans le cas où le CO_2 reste le polluant principal, la « DCV » (*Demand Controlled Ventilation*) permet de moduler le TRA suivant le niveau en dioxyde de carbone (« ANSI/ASHRAE Standard 62.1 » 2019).

La ventilation peut contribuer à réguler la température de consigne, et réduire les teneurs en polluants pour assurer confort et santé des occupants, tout en pérennisant le bâti (Brogat et al. 2003). Toutefois, une modulation plus « complète » des débits d'air (autre que les systèmes autoréglable et hygroréglable A et B), en adéquation avec ces objectifs, est relativement peu mise en œuvre. C'est en ce sens que cet article vise à assurer une modulation dynamique des débits d'air, en temps réel et suivant un spectre plus large en polluants, pour assurer à la fois une bonne QAI, la pérennité du bâti, et l'efficacité énergétique.

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Tester expérimentalement un algorithme de modulation de la ventilation pour le contrôle de la QAI nécessite plusieurs développements et les objectifs de la présente étude ont été multiples. Assurer une modulation correcte du TRA et une bonne QAI passe par des mesures fiables, sur une durée significative (2 semaines dans notre cas). Un capteur multipolluant a été choisi en ce sens. A cela s'ajoute la nécessité de récupérer, stocker et traiter les signaux des capteurs pour envoyer des consignes adaptées aux actionneurs. Ce dernier point a nécessité la conception d'algorithmes de modulation du TRA couplés à un logiciel reliant mesures, actionneurs, scénarios, etc. Enfin, le protocole expérimental imaginé a nécessité de développer et concevoir deux nouvelles cellules expérimentales, similaires à deux bureaux individuels, à occupation variable (cf. Tableau 1 : exemple partiel de scénario d'occupation), et à forte étanchéité à l'air. Chaque cellule étant de surface et volume équivalents, avec des températures de consigne régulées, identiques, et pilotables. Ces 2 cellules de tests ont disposé, en outre, de nouveaux systèmes pilotés d'injection de polluants et de modulation des débits d'air.

3. DEVELOPPEMENTS ET METHODOLOGIE

LES CELLULES D'ESSAIS

Afin de tester les algorithmes de contrôle de QAI, comme indiqué précédemment, le CEA a conçu et développé deux nouvelles cellules d'essais en 2020 (cellules 6 et 7 _Figure 1_). Elles se situent dans un bâtiment modulable appelé FACT, sur la plateforme « RESINE » de l'INES (Savoie, France). FACT est un outil expérimental de dernière génération qui permet de récréer un ou plusieurs espaces intérieurs. Les cellules sont localisées au premier étage, côté NORD. Une se trouve au Nord-Ouest et l'autre au Nord-Est. Les cellules 6 et 7 ont des dimensions, surfaces, et volumes parfaitement identiques : environ 9 m² de surface de plancher et 24,5 m^3 de volume. Les matériaux de construction sont également similaires pour les deux cellules et faiblement émissifs (caractéristiques confirmées lors de mesures QAI avec tubes passifs). Les parois verticales et le plafond sont en tôles (aluminium laqué, avec âme laine de roche). Le jointage est assuré entre celles-ci par un mastic de classe A+. Le plancher est en contreplaqué recouvert de tôles larmées (en aluminium collé). Chaque cellule est fermée par une porte de type salle blanche, à seuil étanche.

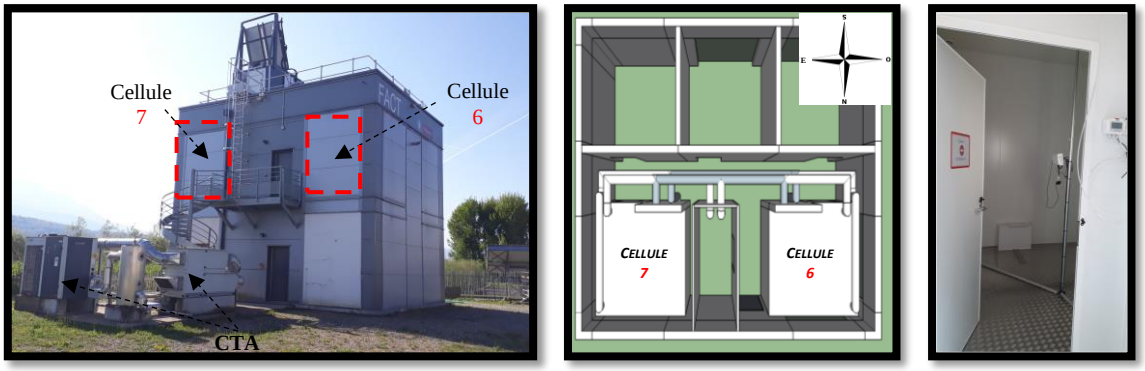

Figure 1: A gauche, le bâtiment expérimental FACT ; Au centre, une vue en coupe du dessus de FACT avec les 2 cellules ; A droite, une photo de la cellule 6.

LES SYSTEMES ET LE CAPTEUR QAI

Le système de ventilation de FACT est doté d'une Centrale de Traitement d'Air (CTA) qui apporte l'air neuf dans chaque cellule et l'extrait également.

En outre, un ventilo-convecteur fonctionnant en circuit fermé, assure dans chaque cellule un maintien de la température de consigne été comme hiver.

Un système de modulation des débits d'air a été spécialement conçu pour générer des Taux de Renouvellement d'Air (TRA) compris entre 0 et 2,5 vol/h. L'insufflation et l'extraction de chaque cellule sont pilotées par des registres contrôlables. Moins d'une minute est nécessaire pour passer d'un TRA minimum à un TRA maximum (et réciproquement). Le débit d'air injecté est égal à celui de l'air extrait dans chaque cellule, de sorte à opérer avec une différence de pression nulle avec l'environnement extérieur. La modulation du TRA est opérée sur la base de scénarios qui indiquent, au fil du temps, et pour chaque cellule, les types de polluants à injecter, leurs quantités à appliquer, etc. (cf. Tableau 1).

De plus, un système d'injection de polluants (indépendant du système de modulation du TRA) a été rajouté pour recréer des émissions de polluants selon différents scénarios temporels (soit des émissions constantes pour représenter des sources issues du mobilier ou des revêtements, soit des émissions

variables corrélées à la présence des occupants). Trois gaz ont été sélectionnés pour représenter ces différents types d'émission de polluants lors des essais : le dioxyde de carbone, le propanal, et l'isobutylène. Chacun d'eux devait être détectable par les éléments sensibles du capteur sélectionné (NEMO XT): technologie NDIR _*Non-dispersive InfraRed*_ pour le CO_2, électrochimie pour le propanal représentant les COVL (Composés Organiques Volatils Légers), et un PID _*Photoionization Detector*_ pour l'isobutylène comme « traceur » pour les COVT (Composés Organiques Volatils Totaux).

Pour finir, un système de supervision et de contrôle (le SCADA) a été développé pour relier capteurs, actionneurs, scénarios, algorithmes, cellules, etc. Cet outil permet entre autres la modulation des débits, la visualisation de l'ensemble des données en temps réel, et le contrôle des essais in-situ et à distance.

ALGORITHME QAI

Trois types de logiques de régulation ont été mises en place (cf. Figure 2):

- La logique Horaire (HOR) qui consiste à passer à un débit d'air minimal la nuit (0,3 vol/h, soit Q_min = 7 m^3/h) et nominal le jour (1 vol/h, soit Q_nom = 24,5 m^3/h). Le TRA est donc régulé suivant l'heure de la journée ;
- La logique Différentielle (DIFF) fixe un débit minimal lorsque la concentration en polluant est inférieure au seuil bas, et un débit maximal (Q_max = 61m^3/h) lorsque le seuil haut est dépassé ;
- La logique Proportionnelle (PROP) pour laquelle une relation de proportionnalité est appliquée entre les deux valeurs de concentration minimale et maximale.

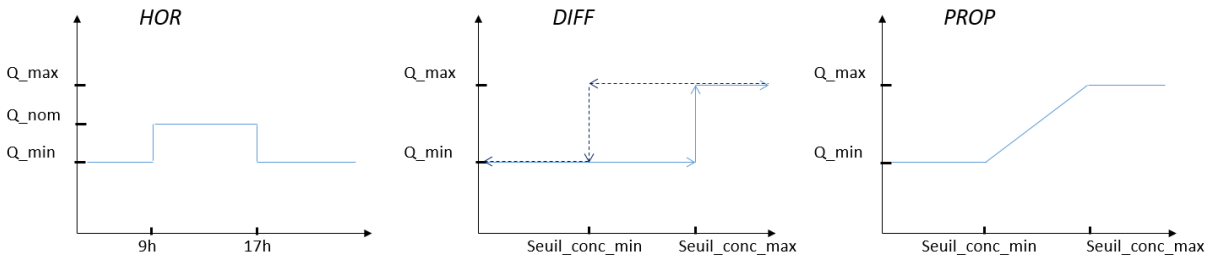

Figure 2: Illustration des 3 logiques de régulation (horaire, différentielle et proportionnelle).

Remarque : Dans la logique différentielle ou proportionnelle, le débit est contrôlé par le polluant engendrant le plus fort débit. Des exemples de seuils sont donnés dans le prochain paragraphe (cf. Tableau 1). Il est possible de tester ces différents algorithmes grâce à une plateforme de simulation telle que TRNSYS/CONTAM (Dols et al. 2015).

LE PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET LE SCENARIO

Les tests de l'algorithme ont eu lieu dans la cellule 6. La Cellule 7, sert de pièce de référence, avec un débit d'air constant. Durant les 2 semaines d'essais, les cellules 6 et 7 ont les portes fermées, et la ventilation est mise en marche. Il n'y a aucune intrusion et aucun occupant à l'intérieur. La consigne de température est identique et fixée à 27°C. Chaque capteur NEMO XT se trouve au centre de chaque pièce à mi-hauteur. Ces capteurs mesurent la température de l'air (Ta °C), l'humidité relative (HR %), le CO_2 (ppm), les COVT (ppb) et COVL (ppb), les particules PM10 et PM2,5 (µg/m^3). Des mesures additionnelles au sein de chaque cellule, entre les cellules, ou à l'extérieur de FACT sont également effectuées (paramètres météo, débits et températures d'air insufflés et extraits, ou encore puissance thermique des ventilo-convecteurs, etc.).

Les scénarios définis permettent de confronter plusieurs logiques de régulation entre les cellules 6 et 7 sur 2 semaines d'essais. Les cellules 6 et 7 ont un planning d'injection de gaz identiques entre elles, et les semaines 1 et 2 sont également identiques du point de vue l'injection des polluants. La Cellule 6 fonctionne avec une régulation de type différentielle la première semaine, et de type proportionnelle la seconde semaine. La cellule 7 ou « *cellule de référence* » est à débit d'air constant sur les 2 semaines (logique horaire) : avec un TRA de 0,3vol/h la nuit (de 17h00 à 09h00) et de 1 vol/h le jour. La cellule 6 a également un débit d'air identique à la cellule 7 la nuit, mais en journée, celui-ci fluctue suivant la logique de régulation appliquée (différentielle ou proportionnelle). Des seuils de déclenchement hauts et bas pour chaque type de polluant sont également définis par simulations et corrigés par des tests expérimentaux. Un scénario détaille heure par heure les polluants injectés, les logiques de régulation à appliquer par cellule, …, ainsi que les seuils de concentration pour les 3 polluants (cf. Tableau 1).

				CO2	ISOBUTYLENE	PROPANAL	REGULATION		Q_NOMINAL	Q_MIN	Q_MAX	Seuil_CO2_MIN	Seuil_CO2_MAX	Seuil_COVT_MIN	Seuil_COVT_MAX	Seuil_COVL_MIN	Seuil_COVL_MAX
Jour départ	Heure départ	Jour fin	Heure fin	mg/h	µg/h	µg/h	Cellule 6	Cellule 7	m^3/h	m^3/h	m^3/h	ppm	ppm	ppb	ppb	ppb	ppb
lundi	00h00	lundi	09h00	0	0	0	HOR	HOR	24,5	7	61	850	1250	200	240	40	80
lundi	09h00	lundi	11h00	0	10000	0	DIFF	HOR	24,5	7	61	850	1250	200	240	40	80
lundi	12h00	lundi	14h00	40000	0	0	DIFF	HOR	24,5	7	61	850	1250	200	240	40	80
lundi	15h00	lundi	17h00	0	0	50000	DIFF	HOR	24,5	7	61	850	1250	200	240	40	80

Tableau 1 : Exemple d'une partie du scénario appliqué. On visualise les dates et heures d'injection pour le lundi, les débits d'injection des polluants (en mg/h ou µg/h), le type de régulation pour la cellule 6 ou 7 (HOR, DIFF), les débits d'air, et les seuils de concentration.

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

RESULTATS GLOBAUX POUR LA CELLULE 6

La Figure 3 montre l'ensemble des résultats de mesure pour la cellule 6 (cellule dont le débit d'air est modulé en fonction de la concentration des différents polluants injectés) et pour l'ensemble de la période de mesure (du 26 avril au 8 mai 2021 inclus). On voit apparaître trois périodes distinctes : une première période de 5 jours (du 26 avril au 30 avril inclus) pendant laquelle la logique différentielle a été testée, une période de trois jours correspondant à une réinitialisation des conditions expérimentales (débit d'air maintenu constant à 1 vol/h, et pas d'injection de polluants), et une troisième période couvrant 5 jours (du 4 mai au 8 mai 2021 inclus) et pendant laquelle la logique proportionnelle a été testée. La Figure 3 fait apparaître les débits d'air en m^3/h, la concentration en CO_2 en ppm, ainsi que la concentration en COVT et COVL en ppb.

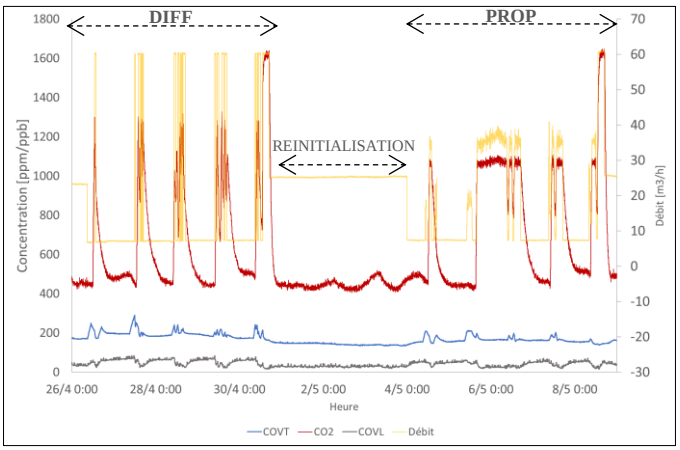

Figure 3: Evolution du débit d'air et de la concentration en polluants pendant l'ensemble de la période d'essai (du 26 avril au 8 mai 2021 inclus).

On peut constater à partir de la Figure 3 que l'ensemble du système intégré dans la plateforme expérimentale fonctionne correctement (capteur multipolluant, boucle de contrôle commande avec algorithme de modulation du débit d'air, organes de régulation du système de ventilation et d'injection de polluants). Le débit d'air varie de 7 m^3/h à 61 m^3/h en fonction de la concentration en polluants pendant les heures de la journée (de 9h00 à 17h00), et est maintenu à une valeur constante pendant les autres heures (0,3 vol/h). La concentration en CO_2 ne dépasse pas le seuil haut (1250 ppm), sauf le 5ème jour de chacune des deux périodes (avec modulation des débits d'air DIFF et PROP) où le débit d'injection est multiplié par 3 pour simuler trois personnes pendant 4 heures (13h00 - 17h00). La concentration en COVT et la concentration en COVL ne dépassent pas les seuils hauts fixés dans les scénarios.

COMPARAISON ENTRE LES DEUX CELLULES 6 ET 7

La Figure 4 permet de comparer sur une journée, le comportement de la cellule 6 (débit régulé suivant la concentration en polluants) et celui de la cellule 7 _référence_ (débit contrôlée par simple horloge).

Les graphiques de la Figure 4 font apparaître le débit d'air ainsi que le taux de CO_2. Ces courbes montrent comment il est possible de contrôler la concentration en polluant en fonction des consignes définies dans les scénarios, et comment ce contrôle permet de diminuer la concentration de ce polluant.

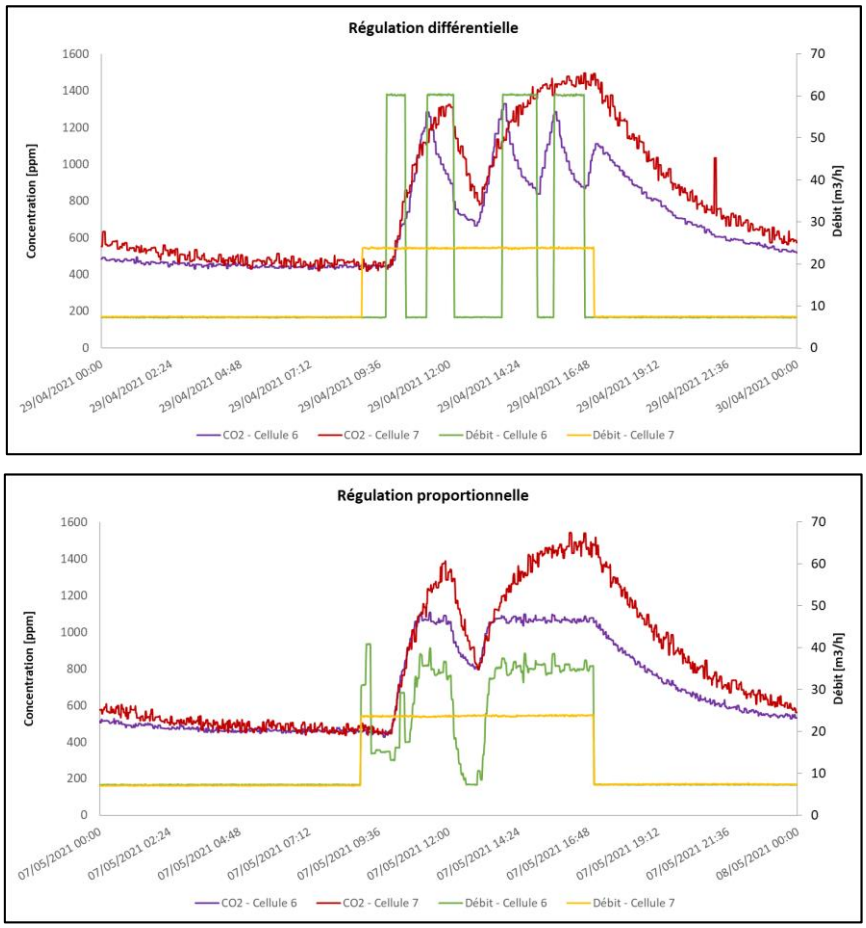

Figure 4: Concentration en CO_2 et débit d'air pour la journée du 29 avril (en haut : logique Différentielle) et la journée du 7 mai (En bas : logique Proportionnelle).

Le Tableau 2 ci-dessous donne la moyenne des résultats (débit d'air et CO_2) pour chacune de ces deux journées (résultats moyens calculés de 9h00 à 17h00). On constate que pour la journée du 29 avril, la concentration moyenne en CO_2 passe de 1081 ppm avec une régulation par horloge à 884 ppm avec une régulation différentielle. Inversement, le débit passe de 23,8 m^3/h avec régulation par horloge à 32,8 m^3/h avec régulation différentielle. On retrouve des valeurs légèrement différentes pour la journée du 7 mai (régulation proportionnelle), avec notamment une concentration moyenne en CO_2 de 926 ppm et un débit moyen d'air de 28,4 m^3/h. En outre, une analyse du temps de dépassement de seuil montre pour la journée du 7 mai, qu'un seuil limite de 1100 ppm est dépassé seulement 3 % du temps d'occupation avec la régulation proportionnelle contre 59% du temps avec une régulation par horloge.

		Cellule 6 DIFF / PROP	Cellule 7 HOR (Réf.)	Ecart relatif *DIFF/PROP Vs. HOR* (%)
Journée du 29 avril (régulation **différentielle** pour la cellule 6)	CO_2 [ppm]	884	1081	-18,2%
	Débit d'air [m^3/h]	32,8	23,8	+37,8%
Journée du 7 mai (régulation **proportionnelle** pour la cellule 6)	CO_2 [ppm]	926	1100	-15,8%
	Débit d'air [m^3/h]	28,4	23,8	+19,3%

Tableau 2 : Valeurs moyennes de concentration en CO_2 et de débit d'air, et écart relatif en (%) entre la logique différentielle ou proportionnelle (cellule 6) par rapport à la logique horaire (cellule 7, réf.).

La Figure 5 ci-dessous, qui expose les résultats pour la journée du 8 mai (régulation proportionnelle) permet par ailleurs d'illustrer qu'il s'agit d'une régulation multi-entrée, (puisque pour rappel, le débit d'air est régulé en fonction de la concentration de plusieurs polluants). A partir de 8h00, le débit réagit en fonction de la concentration en COVL, puis en fonction du CO_2 à partir de 10h00. Les COVT qui ne dépassent pas les 180 ppb n'ont pas d'influence puisque dans cet exemple le seuil bas de déclenchement de la régulation proportionnelle (200ppb) n'est pas atteint pour ce polluant (cf. seuils au Tableau 1).

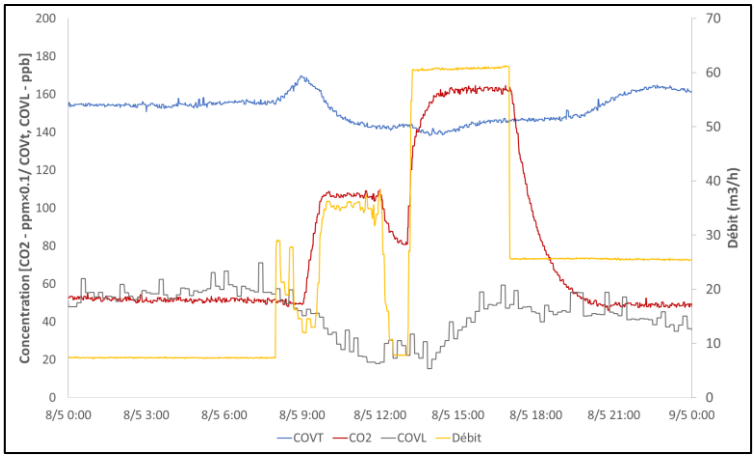

Figure 5: Evolution de la concentration en polluants et du débit d'air dans la cellule 6 (8 mai).

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les développements effectués dans le cadre de ce projet de recherche ont permis de concevoir, tester et analyser la performance d'un système de régulation des débits d'air en fonction de plusieurs polluants. Les deux nouvelles cellules développées et les systèmes associés (modulation des débits d'air, injection de polluants…) ont été implémentés dans le bâtiment modulable FACT du CEA. Plusieurs essais ont permis de comprendre, caractériser et valider le fonctionnement du système global. Par ailleurs, un test

final de 2 semaines a également permis d'analyser l'efficacité de l'algorithme de contrôle commande développé dans le cadre de ce projet. Les résultats ont montré la capacité à moduler les débits d'air via des mesures de concentration en polluants. Un focus sur le dioxyde de carbone montre une meilleure gestion de la concentration en CO_2 avec des logiques *différentielle* et *proportionnelle* comparativement à une régulation plus standard (*horaire*). En contrepartie, cela a nécessité des débits d'air plus élevés.

L'algorithme permet de contrôler une sortie (débit de renouvellement d'air) en fonction de plusieurs entrées (concentration en polluants), et le cadre méthodologique permet également de pouvoir rajouter des entrées supplémentaires : concentration d'autres polluants (intérieurs et/ou extérieurs), ou encore des paramètres thermiques (température extérieure par exemple).

Des études complémentaires sont en cours de finalisation pour intégrer l'algorithme dans un modèle thermo-aéraulique, afin d'estimer l'influence de la modulation du débit d'air sur le comportement thermique d'un local (en plus de la QAI). Un des objectifs est d'analyser les compromis possibles entre amélioration de qualité de l'air et maîtrise de la consommation d'énergie, avec notamment l'étude de l'optimisation du problème multi-objectif par emploi d'un algorithme génétique.

6. REMERCIEMENTS

Le projet de recherche VIP (Ventilation Intelligente et Performante), dont sont issus les résultats de cette étude, a pu être réalisé grâce au soutien financier de la région Auvergne Rhône-Alpes, et a été labellisé par le pôle de compétitivité AXELERA.

7. BIBLIOGRAPHIE

« ANSI/ASHRAE Standard 62.1 ». 2019, 2019.

Arrêté du 24 mars 1982. s. d. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000862344/.

Bareau, H. 2009. « Informez vous et agissez pour respirer un air de qualité. » ADEME.

Brogat, Brigitte, Philippe Lanchon, José Fontan, et Jean-Robert Millet. 2003. *La ventilation des bâtiments. Réhabilitation dans l'habitat collectif.* CSTB. Bâtiment et santé. CSTB, le futur en construction.

Code du travail. s. d. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000018532328/.

Déoux, Suzanne, et Pierre Déoux. 2004. *Le guide de l'habitat sain. Habitat qualité santé. Pour bâtir une « santé durable »*. 2. Medieco éditions.

Dols, W. Stuart, Liangzhu (Leon) Wang, Steven J. Emmerich, et Brian J. Polidoro. « Development and Application of an Updated Whole-Building Coupled Thermal, Airflow and Contaminant Transport Simulation Program (TRNSYS/CONTAM) ». *Journal of Building Performance Simulation* 8, nº 5 (3 septembre 2015): 326-37.

Règlement Sanitaire Départemental Titre III. s. d. Consulté le 10 février 2022. http://www.lot.gouv.fr/IMG/pdf/04_RSDtitreIII46.pdf.

Schriver-Mazzuolli, Louise. 2009. *La pollution de l'air intérieur. Sources. effets sanitaires. Ventilation.* Dunod. Paris: L'usine Nouvelle - Dunod.

Zeghnoun, Abdelkrim, et F. Dor. 2008. « Estimation du temps passé à l'intérieur du logement de la population Française. »