

CVC

CONDITIONNEMENT D'AIR

CHAUFFAGE
VENTILATION

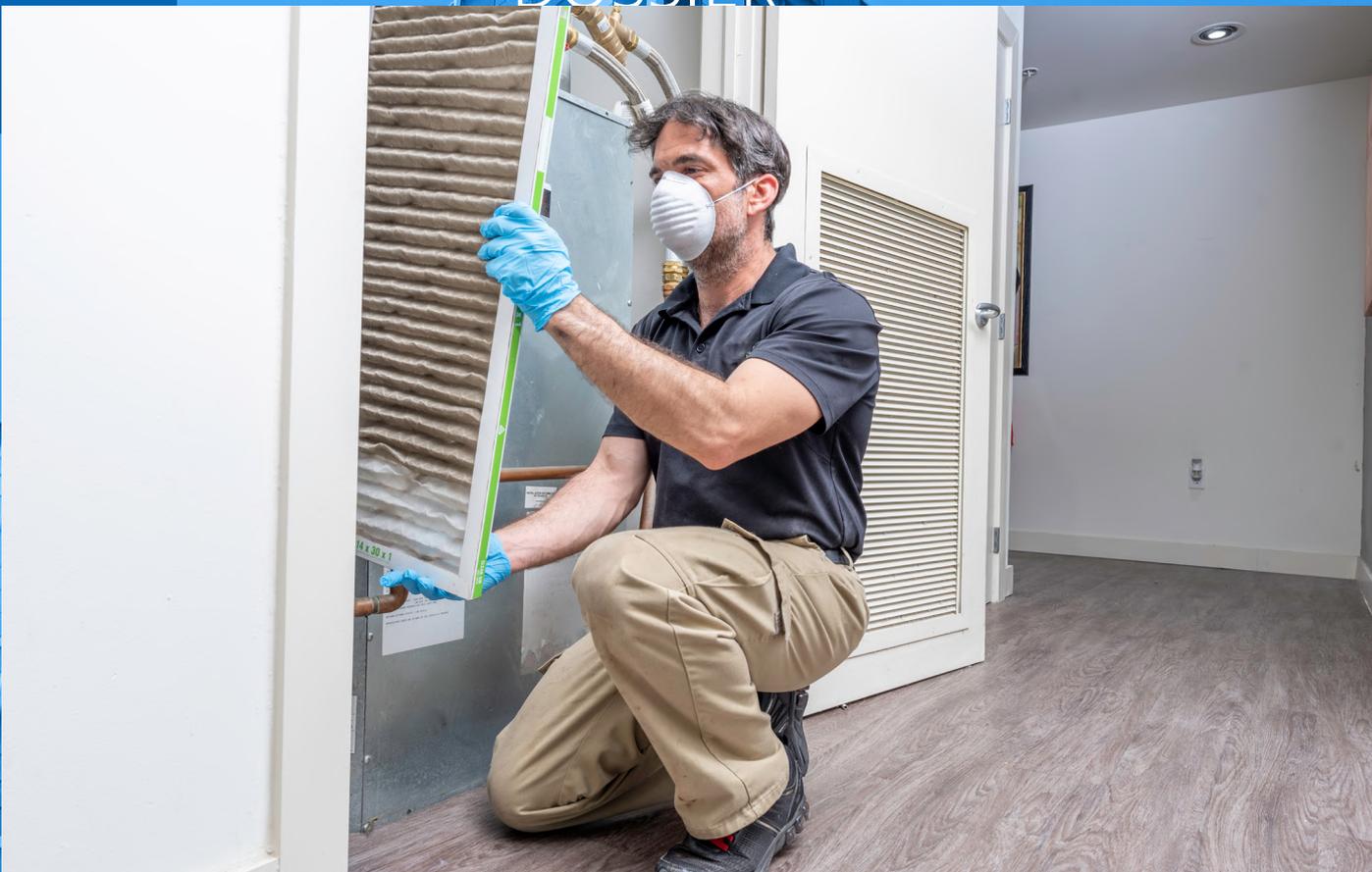
LE DOSSIER DES CLIMATICIENS
www.aicvf.org

Mars-avril 2023

Conception des installations de ventilation dans les bâtiments tertiaires post covid

EXTRAIT
DU N° 919
DE CVC





Conception des installations de ventilation des bâtiments tertiaires post covid

Dossier coordonné par Charles Arquin et Christian Feldmann

La crise pandémique de la Covid 19 est venue bousculer nos modes de vie et nos pratiques. En positionnant les préoccupations environnementales et la santé sur le devant de la scène, elle a suscité une prise de conscience des impacts de la qualité d'air intérieure (QAI). La sensibilisation des différents acteurs de l'immobilier à l'importance d'une ventilation adaptée s'est en ce sens exacerbée.

Il importe de faire progresser la prise en compte

de la QAI en tant qu'enjeu essentiel, au même titre que la réduction des consommations d'énergie et la décarbonation des usages dans le Bâtiment.

Ce dossier apporte un éclairage sur le contexte européen, la réglementation française ainsi que les objectifs de qualité sanitaire liés au renouvellement de l'air et à l'air intérieur. Il détaille également plusieurs bonnes pratiques et retours d'expérience consacrés au dimensionnement de la ventilation en bâtiment tertiaire.

Pourquoi une approche européenne unifiée de la QAI est-elle essentielle pour garantir la santé publique ?

→ Morten Schmeler retrace l'évolution de la Qualité d'Air Intérieur (QAI) dans la conscience publique et politique depuis plusieurs décennies en Europe. Il relève les lacunes des normes et des réglementations en faveur de la qualité de l'air et pointe le manque de concertation au niveau européen pour prendre en compte la santé publique. Est présentée ci-dessous une traduction résumée par Francis Allard et Christian Feldmann de l'article publié en anglais dans le numéro d'octobre 2022 du REHVA Journal.

La QAI et le marché

Au fil des ans, l'acceptation de la QAI par le marché a varié. En réponse aux chocs pétroliers de 1973 et 1979, l'industrie du bâtiment s'est concentrée sur la réduction des déperditions thermiques sans considération particulière pour la QAI. Puis, dans un second temps, les bâtiments devenant de plus en plus étanches, est apparue la nécessité d'assurer un minimum de renouvellement d'air, principalement pour assurer la protection du bâti (moisissures) sans pour autant prendre en considération l'impact de la qualité de l'air sur la santé des occupants.

Une prise de conscience interviendra au cours des années 90, avec le développement de différents travaux scientifiques et l'apparition de nombreuses innovations technologiques.

L'effort se portera sur certains types de locaux sensibles, tels que les blocs opératoires par exemple, alors que la QAI restera négligée pour les établissements scolaires, les bureaux, et les bâtiments d'habitation.

Diverses initiatives, à l'échelle internationale, interviendront au début des années 2000 avec des programmes de certification tels que WELL et RESET qui visaient principalement à l'amélioration de la QAI dans les grandes villes industrielles confrontées à la pollution. La QAI deviendra, dans les années qui suivront, un critère à part entière.

La crise pandémique de la Covid 19 va susciter une réelle prise de conscience de l'importance de la QAI et sensibiliser les différents acteurs au fait qu'une bonne ventilation est un des garants de la santé publique.

Malheureusement, la crise actuelle d'approvisionnement en énergie en Europe avec la hausse de son prix mettent en péril cette sensibilisation et risquent de réorienter prioritairement l'action publique vers l'optimisation énergétique.

Un manque de cadre normatif unifié

Dans ce contexte, il importe d'identifier et de tenter d'expliquer les lacunes, aux plans normatifs et réglementaires, qui forment obstacle à l'adoption de meilleures pratiques en matière de QAI en Europe.

Force est de constater qu'il n'existe aucun cadre clair qui pourrait favoriser la prise en compte de la Qualité de l'Air Intérieur, les approches restant très différentes entre les Etats membres de l'Union Européenne.

Seule une disposition concernant l'entretien du système de ventilation a été introduite, jusqu'à présent, dans le projet de révision de directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD).

Les exigences en matière de dispositifs de ventilation peuvent varier en fonction de la pression exercée localement par les constructeurs.

Les débits d'air neuf réglementaires peuvent varier notablement d'un pays à l'autre, certains pays, tels que l'Allemagne et les Pays-Bas demandant des débits élevés, à l'exemple des pays scandinaves.

A l'inverse en France, pour les bâtiments résidentiels, les débits minimaux sont basés sur des approches anciennes de contrôle de l'humidité et de protection contre les moisissures. Même durant la crise du Covid 19, il y a eu différentes interprétations au niveau national de la part des Etats membres. Des normes et certains règlements locaux existent cependant. On peut notamment citer :

- EN 16798-1 Performance énergétique des bâtiments - Ventilation des bâtiments - Partie 1 : Données d'entrées d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, l'ambiance thermique, l'éclairage et l'acoustique.





© ALEXANDRE LALLEMAND/Unsplash

- »»» • ISO 17772-1 Performance énergétique des bâtiments – Qualité de l’environnement intérieur – Partie 1 : Paramètres d’entrée de l’environnement intérieur pour la conception et l’évaluation de la performance énergétique des bâtiments.

Ces deux normes équivalentes fournissent une classification de la qualité des environnements intérieurs (QEI) dans les bâtiments et font aujourd’hui référence. La proposition de révision actuelle de l’EPBD fait référence à la norme EN 16798-1 dans son annexe 1. Son adoption impliquerait alors d’inclure ces informations dans le dispositif réglementaire d’évaluation de la performance énergétique des bâtiments.

Des lacunes dans la législation

Malgré ces efforts normatifs, le marché reste insuffisant du fait qu’il n’existe pas d’exigences minimales de la Qualité de l’Air Intérieur en Europe. Comme l’industrie de la QAI est encore très dispersée, avec peu de grands fabricants, elle n’a pas encore réussi à attirer suffisamment l’attention des décideurs politiques sur la QAI pour les inciter à légiférer dans ce domaine.

Vers une évolution ?

On peut s’étonner que les considérations de la QAI, qui constituent un enjeu majeur de santé publique, n’aient pas encore été prises en compte au niveau européen.

Les enjeux commerciaux, les différences de structures commerciales et industrielles du monde de la ventilation dans les différents Etats membres, le manque de motivation des parties prenantes et les dispositions réglementaires locales expliquent sans doute cette situation.

En conclusion et au-delà de ces constats, il importe, au sortir de la pandémie de la Covid 19, de faire progresser l’idée que la prise en compte de la QAI est désormais un enjeu essentiel pour l’Union européenne au même titre que la réduction des consommations d’énergie et de la décarbonation des usages dans le Bâtiment.

On peut espérer que la révision, actuellement en cours, de la Directive Performance Energétique des Bâtiments qui vise à traduire les actions proposées dans la « Vague de Rénovation » prendra davantage en considération la QAI en apportant une modification substantielle de son article 11.

Morten Schmelzer, directeur marketing technique, responsable des affaires publiques du groupe Systemair



Proposition de débits de ventilation basés sur la santé et méthode de conception pour réduire l'exposition aux maladies infectieuses respiratoires aéroportées

➤ Nous présentons ici un résumé succinct du Guideline publié par REHVA « Health-Based Target Ventilation Rates and Design Method for Reducing Exposure to Airborne Respiratory Infectious Diseases » traduit de l'Anglais et résumé par Francis Allard.

Ventilation de santé et de confort dans les bâtiments non résidentiels

L'importance de la ventilation pour réduire l'exposition à la COVID 19 et à d'autres maladies respiratoires infectieuses aéroportées est largement reconnue aujourd'hui. En effet, on a pu constater à maintes reprises que le SARS-CoV-2 et d'autres agents pathogènes respiratoires sont transmis par inhalation dans les environnements intérieurs où la ventilation est inadéquate. Cependant, il n'existe pas de méthode commune pour concevoir la ventilation des bâtiments et d'autres mesures d'épuration visant à protéger les usagers contre la transmission de maladies infectieuses. La méthode de conception de la ventilation fondée sur la réduction du risque d'infection proposée dans le présent document fournit des débits de ventilation cibles pour l'atténuation du risque de maladie infectieuse et vise à compléter les critères de ventilation existants dans les bâtiments non résidentiels, à l'exclusion des bâtiments de soins de santé et des bâtiments industriels. L'application des débits de ventilation proposés réduira considérablement la propagation des virus respiratoires tels que le SARS-CoV-2, le rhume, la grippe et autres, au moins au niveau de risque où une personne infectieuse ne contaminera pas plus d'une personne pendant la période infectieuse présymptomatique. Dans la méthode utilisée, le nombre de reproduction est fixé à $R = 1$ et on suppose que la probabilité d'infecter d'autres personnes est constante pendant tous les événements d'occupation. Cette méthode est applicable à la transmission aéroportée à longue portée. Ainsi, en période épidémique, la



proximité doit être systématiquement évitée en maintenant une distance physique d'au moins 1,5 m entre les occupants. Il est proposé d'appliquer les taux de ventilation cibles dans la conception des nouveaux bâtiments et des rénovations afin que le taux de ventilation le plus élevé soit utilisé pour le dimensionnement des systèmes de ventilation. Les taux de ventilation basés sur le risque sanitaire d'infection peuvent être plus élevés que ceux préconisés pour la ventilation de confort mais ils ne sont nécessaires que pendant les périodes épidémiques. En fonctionnement normal, en dehors des périodes épidémiques, un fonctionnement contrôlé à la demande est recommandé pour respec-

ter les objectifs énergétiques et de confort pour lesquels les bâtiments doivent être équipés d'appareils de mesure et de contrôle pour la régulation de la qualité de l'air intérieur.

Les normes EN 16798-1:2019 et ISO 17772-1:2017 spécifient les critères de définition des taux de ventilation basés sur la qualité de l'air perçue comme première méthode. La méthode basée sur les risques sanitaires liés aux infections respiratoires est destinée à compléter cette première méthode, de sorte que le taux de ventilation le plus élevé donné par ces deux approches doit être utilisé pour concevoir et dimensionner les installations de ventilation.

Dans les bâtiments non résidentiels, les taux de ventilation dans les pièces occupées sont calculés à partir de la qualité de l'air perçue par les visiteurs (personnes à risque) en fonction des émissions anthropiques et des matériaux de construction ou autres, présents à l'intérieur des locaux. Dans le document présenté, la méthode de détermination des débits de ventilation limitant le risque infectieux à >>>

>>> R=1 est détaillée. Elle s'appuie sur la théorie de Wells Riley et les travaux de la « task force » de REHVA. Le détail de la méthode est fourni dans l'article complet accessible sur le site de l'AICVF.

Une application des équations du débit de ventilation basées sur le risque d'infection est illustrée par des exemples de calcul pour les espaces communs dans le tableau ci-dessous. Les débits de ventilation fondés sur le risque d'infection sont calculés en l/s par personne et par surface de plancher, ainsi qu'en taux de renouvellement d'air pour certaines pièces. Les valeurs peuvent être comparées aux débits de ventilation des catégories I et II, définis et calculés sur la base des normes EN 16798-1:2019 et ISO 17772-1:2017 avec l'hypothèse de matériaux peu polluants. Les valeurs critiques d'efficacité de la ventilation sont appliquées pour les débits de ventilation fondés sur le risque d'infection. Dans le cas des débits de ventilation des catégories I et II, on suppose une distribution complète de l'air par mélange parfait ($\epsilon_v = 1,0$) parce que dans ce cas, au lieu d'une source infectieuse ponctuelle, tous les occupants émettent des polluants (bio-effluents humains et CO₂), de sorte que la source d'émission est également répartie et entièrement mélangée à l'air. Les concentrations en CO₂ sont calculées avec une concen-

tration extérieure de 400 ppm et des débits de production métaboliques de CO₂ de 18 l/h dans les salles de classe, de 20 l/h dans les bureaux, les salles de réunion et les restaurants et de 80 l/h dans les salles de sport.

Dans les salles de classe et les bureaux ouverts (open spaces), dans certains cas (mis en évidence dans le tableau ci-dessous), les taux de ventilation des catégories I et II sont plus élevés que les taux de ventilation fondés sur le risque d'infection. Dans les salles de réunion et les restaurants, les débits d'air neufs sont élevés, même si le taux d'occupation réduit indique que ces salles nécessitent des solutions de distribution d'air ciblées pour les occupants avec une plus grande efficacité de ventilation pour être réalisables en situation épidémique. Cependant, dans ces salles, en période d'infection, une distance de 1,5 m conduira à environ 50 % d'occupation (un siège sur deux vide), de sorte que les débits de ventilation indiqués dans le tableau avec une occupation normale ne sont pas pertinents.

Francis Allard, professeur émérite à La Rochelle Université et président de Tipee, président du Comité International et du Comité Enseignement de l'AICVF



Débits de ventilation fondés sur le risque d'infection pour les espaces communs et comparaison avec les valeurs obtenues à l'aide des normes en 16798-1:2019 et iso 17772-1:2017 (classes de ventilation i et ii).

	SURFACE	HAUTEUR-SOUS PLAFOND	NOMBRE DE PERSONNES	EFFICACITÉ DE VENTILATION	DÉBIT D'AIR NEUF	DÉBIT D'AIR NEUF/ UNITÉ DE SURFACE	TAUX DE RENOUVELLEMENT D'AIR	CO ₂	CLASSE DE VENTILATION II	CLASSE DE VENTILATION I
	M ²	M	N, -	ϵ_{vc} , -	L/(s PERS)	L/(S M ²)	H ⁻¹	PPM	L/(S M ²)	L/(S M ²)
Petite salle de classe	31.6	3.5	13	1.00	7.2	3.0	3.0	1097	3.6	5.1
Salle de classe	42.5	2.9	25	1.00	8.4	4.9	6.1	995	4.8	6.9
Salle de classe	56.5	2.9	25	0.93	8.6	3.8	4.7	980	3.8	5.4
OCC réduit.	56.5	2.9	20	0.93	8.1	2.9	3.6	1019	3.2	4.5
Grand espace d'enseignement	129.5	2.9	50	0.60	13.3	5.1	6.4	776	3.4	4.9
OCC réduit.	129.5	2.9	40	0.60	12.5	3.8	4.8	801	2.9	4.1
Bureau openspace	56.7	2.6	6	0.80	16.5	1.7	2.4	736	1.4	2.1
Bureau openspace	173.0	2.6	17	0.60	25.4	2.5	3.5	619	1.4	2.0
Salle de réunion	29.2	2.6	10	1.00	34.2	11.7	16.2	563	3.1	4.4
OCC réduit.	29.2	2.6	6	1.00	30.3	6.2	8.6	584	2.1	3.1
Salle de réunion	52.5	3.2	24	0.80	45.8	20.9	23.6	521	3.9	5.6
OCC réduit.	52.5	3.2	12	0.80	41.6	9.5	10.7	534	2.3	3.3
Restaurant	259.5	2.9	154	0.60	64.3	38.1	47.3	486	4.9	6.9
OCC réduit.	259.5	2.9	50	0.60	59.3	11.4	14.2	494	2.0	2.9
Gymnase	173.5	3.5	12	0.60	86.5	6.0	6.2	657		
Gymnase scolaire	217.5	6.0	25	0.50	109.1	12.5	7.5	604		

Quels objectifs de qualité sanitaire pour le renouvellement de l'air et pour l'air intérieur ?

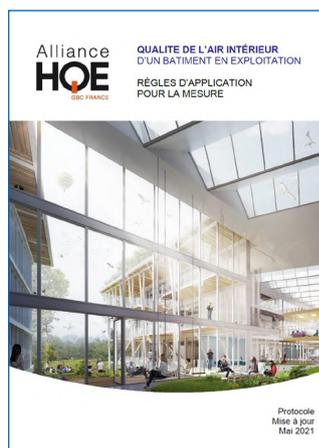
→ La crise Covid a mis en exergue la notion d'un renouvellement suffisant de l'air des locaux, par apport d'air neuf extérieur, afin de diluer et d'évacuer les particules virales infectieuses en suspension dans l'air et de prévenir ainsi la transmission aéroportée de la maladie. Elle a aussi montré l'importance de la qualité de l'air intérieur avec le respect de valeurs de référence pour les polluants provenant de l'extérieur et ceux produits à l'intérieur des locaux.

Le Haut Conseil de la Santé Publique a promu, durant cette crise, une doctrine sanitaire qui repose sur quatre mesures de prévention individuelles et trois mesures collectives, dont l'aération et la ventilation des bâtiments. Il a publié des recommandations sur le renouvellement de l'air des espaces clos dans le contexte de la crise pandémique et des valeurs d'aide à la gestion des principaux polluants de l'air intérieur. Ces recommandations apportent une aide générale à la prévention des maladies infectieuses respiratoires transmissibles et à la protection de la santé vis-à-vis des polluants de l'air intérieur.

Des particules infectieuses transportées par les flux d'air

Les premières publications de l'année 2020 sur la Covid-19 ont fait état d'événements de propagation élevée du virus SARS-CoV-2 dans des espaces clos où étaient rassemblées de nombreuses personnes. Ces contaminations à distance, et non de proximité, de la personne infectée ont été décrites dans divers environnements intérieurs : restaurants, bateaux de croisière, autobus, concerts de chorale, établissements pénitentiaires, chambres d'hôtels de quarantaine, abattoirs, etc. Ces situations montraient un pourcentage élevé de cas de transmission (entre 33 et 59 %) par des personnes asymptomatiques ou présymptomatiques qui ne toussent et n'éternuent pas. Elles ont conduit à suspecter une transmission aéroportée, sous forme d'aérosol, du virus SARS-CoV-2, d'autant que, expérimentalement, le virus viable (multiplication dans des cultures cellulaires) était détecté jusqu'à la troisième heure (demi-vie d'élimination de 1,1 h) dans une chambre d'essai^[1].

De manière plus générale, ces constats ont amené à considérer les émissions de l'appareil respiratoire pour mieux



comprendre les mécanismes de la transmission des agents infectieux respiratoires. Lorsqu'une personne respire, parle, crie, chante, fume, tousse ou éternue, elle émet dans l'air un jet humide, chaud et turbulent par le nez et/ou la bouche. Ce flux d'air comprend des gouttelettes de salive et de mucus, de taille comprise entre 100 nanomètres et plus de 100 micromètres, principalement composées d'eau, de sels, de composés organiques et de virus et de bactéries si la personne souffre d'une infection respiratoire. Plusieurs mécanismes expliquent la formation de ces gouttelettes : le cisaillement du fluide respiratoire par les forces de l'écoulement d'air, sa dés-

tabilisation lors de l'ouverture des voies aériennes, l'émission de mucus par la vibration des cordes vocales, l'émission de gouttes de salive par les mouvements de la bouche, des lèvres et de la langue^[2].

La transmission d'un agent infectieux respiratoire d'une personne infectée à une personne réceptrice dépend de trois conditions :

1. Des gouttelettes infectantes sont générées par la personne infectée
2. L'agent infectieux reste viable dans l'environnement pendant suffisamment de temps
3. La personne réceptrice est accessible à l'agent infectieux qui peut déclencher, en quantité suffisante, une infection au niveau des tissus cibles. On décrit alors quatre possibilités de transmission^[2] :

- **Une transmission de proximité**, lorsque la personne infectée et la personne réceptrice sont à une distance inférieure à 1 - 2 m, sans obstacle. Dans ce cas, les flux respiratoires sont très rapprochés et la concentration en gouttelettes est maximale. La personne réceptrice peut inhaler des gouttelettes en cours de séchage et des particules fines (résidus secs). Il s'agit du mode de >>>

>>> transmission principal du virus grippal, du virus respiratoire syncytial, responsable de la bronchiolite, ou des rhinovirus, comme pour certaines bactéries (pneumocoque, streptocoque A, méningocoque).

- **Une transmission dans un même espace clos**, lorsque la personne infectée expose des personnes, en leur présence, à une distance supérieure à 1 – 2 m, ou juste après avoir quitté la pièce. Dans cette situation, l'exposition à l'agent infectieux va dépendre de la taille de la pièce, de l'hygrométrie, des flux d'air dans la pièce et des conditions de renouvellement d'air, qui peuvent favoriser l'accumulation de particules infectieuses (résidus secs) en suspension dans l'air, sous forme d'aérosol. Il s'agit du mode de transmission du SARS-CoV-2, du virus de la rougeole, les adenovirus ou le bacille tuberculeux.

- **Une transmission à distance dans des pièces différentes** d'un même bâtiment, les aérosols pouvant se disperser dans le bâtiment en fonction des flux d'air présents et/ou être redistribués par les systèmes de ventilation.

- **Une transmission à très grande distance**, les aérosols étant emportés par des panaches d'air issus de systèmes d'aération (ou autres flux d'air) et vont entrer dans un autre bâtiment à proximité. Ce mode de transmission a été rapporté par le virus SARS-CoV-1 dans un complexe d'appartements à Hong-Kong en 2003.

Le CO₂, un traceur des aérosols infectieux

Dans un espace clos, en présence de personnes souffrant d'infections respiratoires, il est difficile, sur les plans technique et économique, de mesurer la concentration des particules infectieuses en suspension dans l'air. La détection dans l'air du génome du microorganisme (ARN ou ADN), qui ne détermine cependant pas son infectiosité, permet d'observer la dissémination des particules microbiennes à distance.

En revanche, le devenir des aérosols d'origine respiratoire suit globalement la même dispersion dans l'air que les gaz expirés, dont la concentration dans l'air est plus facile à mesurer. La mesure de la concentration en CO₂ (dioxyde de carbone ou gaz carbonique) produit par la respiration a été proposée, comme traceur des aérosols respiratoires, pour déterminer les modalités d'élimination des particules infectieuses par le renouvellement de l'air et le taux d'occupation des locaux. Toutefois, l'utilisation de la mesure du CO₂ ne reflète pas toujours les conditions d'émission des aérosols et peut donner des résultats en excès, en particulier lorsqu'il existe une faible densité humaine dans le local, une filtration de l'air ou lorsque les occupants portent un masque de manière permanente^[3].

L'apport d'air neuf permet de diluer les aérosols infectieux et les mouvements d'air conduisent à les extraire du local. Dans une revue de 2007, Li *et al.* indiquent qu'il existe « des preuves fortes et suffisantes qui montrent le lien entre la ventilation, les mouvements d'air dans le bâtiment et la transmission des maladies infectieuses respiratoires comme la rougeole, la tuberculose, la varicelle, la grippe, la variole, le syndrome respiratoire aigu sévère (Sars). En 2020, Chun-Ru Du *et al.*

ont montré que lors d'une épidémie de tuberculose dans une université de Taiwan, l'amélioration de la ventilation avait non seulement permis de diminuer la concentration en CO₂ de 3200 ppm à 600 ppm, mais également permis d'arrêter l'épidémie dans l'université. Les auteurs estiment qu'il est nécessaire de maintenir une concentration inférieure à 1 000 ppm pour maîtriser une telle épidémie. Toujours en milieu universitaire, S. Zhu *et al.* (2020) ont montré que le taux de maladies respiratoires aiguës est environ 4 fois plus faible dans un bâtiment bien ventilé (CO₂ mesuré à environ 1 200 ppm) comparé à un bâtiment mal ventilé (soit 2 500 ppm de CO₂)^[4]. Le Haut Conseil de la Santé Publique a recommandé une valeur repère d'aide à la gestion pour une concentration de 800 ppm de CO₂ comme objectif d'un renouvellement de l'air satisfaisant des locaux occupés, par apport d'air neuf, en prenant en compte les performances cognitives des occupants et la dilution et l'élimination des polluants intérieurs, dont les agents infectieux aéroportés. Le dépassement de l'objectif de qualité de 800 ppm nécessite d'optimiser le renouvellement de l'air et de revoir ponctuellement la jauge. Au-delà d'une concentration de 1 500 ppm persistante, qui témoigne d'un confinement de l'air non acceptable au regard des performances cognitives des occupants et de l'accumulation des polluants intérieurs et des particules infectieuses en suspension dans l'air, des actions correctives immédiates sont nécessaires, comme la diminution de la jauge ou l'évacuation du local et la modification des moyens techniques de renouvellement de l'air^[4].

Des règles à respecter pour les installations de traitement d'air

Le Haut Conseil de la santé publique a formulé des recommandations pour des locaux chauffés ou rafraîchis dans lesquels peuvent être présentes, à l'instar de la crise Covid, des personnes souffrant de maladies infectieuses respiratoires transmises par aérosol^[5, 6]. Il est recommandé d'assurer le renouvellement régulier de l'air des locaux occupés avec un apport d'air neuf suffisant pour respecter l'objectif de qualité en concentration de CO₂. La jauge d'occupation sera strictement limitée à ce que permet le débit réel d'air neuf. On veillera au respect des règles de conception, de réalisation et de maintenance régulière de l'installation centralisée et des équipements périphériques. L'installation sera maintenue en fonctionnement continu, éventuellement avec une diminution des taux de ventilation lorsque le bâtiment n'est pas utilisé ou en modifiant les horaires de marche/arrêt, en débutant deux heures plus tôt avant l'ouverture du bâtiment et en arrêtant deux heures après la fermeture du bâtiment.

La fonction de recyclage d'air de l'installation sera supprimée pour éviter le transfert éventuel d'aérosols infectieux dans plusieurs locaux. Lorsqu'il n'est pas possible de désactiver complètement le recyclage, il est recommandé de faire fonctionner le système en adaptant et en modifiant la quantité d'air neuf requise et en réduisant la quantité d'air recyclé. En complément, si cela est possible, il est recommandé d'ouvrir les fenêtres au moins pendant quelques minutes plusieurs fois par jour.

Paramètres à mesurer pour la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment tertiaire à réception ou en exploitation

PARAMÈTRE	BÂTIMENT NEUF OU RÉNOVÉ À RÉCEPTION		BÂTIMENT EN EXPLOITATION	
	ORIGINE PRINCIPALE	VALEUR À RESPECTER	ORIGINE PRINCIPALE	VALEUR À RESPECTER
Dioxyde d'azote (NO ₂)	Extérieure	20 µg/m ³	Si modification de l'environnement extérieur	
Benzène	Extérieure	2 µg/m ³	Si modification de l'environnement extérieur	
Particules PM _{2,5}	Extérieure	10 µg/m ³	Si modification de l'NF X environnement extérieur	
Radon	Extérieure	100 Bq/m ³		
Formaldéhyde	Intérieure	30 µg/m ³	Intérieure	30 µg/m ³
Monoxyde de carbone (CO) si source	Intérieure	10 mg/m ³	Intérieure	10 mg/m ³
Composés organiques volatils (COV) majoritaires	Intérieure	Selon VGAI de l'Anses	Intérieure	Selon VGAI de l'Anses
Dioxyde de carbone (CO ₂)			Intérieure	800 ppm
Indice de contamination particulaire			Intérieure	≥ 0,5 µm : 35 200 000 /m ³ ≥ 1 µm : 8 320 000 /m ³
Flore bactérienne			Intérieure	< 1000 UFC/m ³
Flore mycélienne			Extérieure	< 100 UFC/m ³

Il faudra éviter les mouvements d'air dirigés vers le visage des personnes qui vont projeter les gouttelettes respiratoires émises par les personnes à distance dans la pièce et rendre inopérante la distance de sécurité entre les personnes.

Le respect des valeurs de référence des polluants de l'air intérieur

Pour réduire l'exposition aux polluants de l'air intérieur, il convient en premier lieu de limiter les émissions à la source et de renouveler régulièrement l'air des locaux. Si la mesure du CO₂ permet de vérifier l'efficacité du renouvellement de l'air de locaux occupés, elle ne permet pas de s'assurer de la qualité de l'air intérieur qui est déterminée par les concentrations des polluants transférés de l'extérieur et émis à l'intérieur.

L'alliance HQE-GBC [7] a proposé des protocoles de mesure de polluants lors de la réception d'un bâtiment neuf ou rénové et d'un bâtiment en exploitation par la réalisation d'une campagne de prélèvements de cinq jours, hors radon (60 jours).

Par ailleurs la norme NF X43-406 : 2018 [8] sur la stratégie d'enquête environnementale suite à signalement précise la démarche appliquée aux bâtiments à usage d'habitation, d'enseignement et de bureaux pour étudier la qualité de l'air intérieur. La stratégie comporte, au préalable, une démarche médicale d'identification des pathologies associées à la fréquentation des locaux concernés et une démarche technique incluant une visite *in situ*, éventuellement suivie par le mesurage de paramètres pertinents. La norme énumère les polluants physiques, chimiques ou microbiologiques pour lesquels une pollution de l'air intérieur pourrait expliquer des effets sur la santé ou des problèmes d'inconfort des occu-

pants, indique les conditions de mise en œuvre de l'enquête et la recherche des sources potentielles de pollution, enfin, la stratégie de mesurage des polluants potentiels.

Fabien Squinazi, médecin biologiste, président de la commission spécialisée « Risques liés à l'environnement », Haut Conseil de la Santé Publique.



[1] Haut Conseil de la Santé Publique. Avis du 23 juillet 2020 relatif à l'actualisation des connaissances scientifiques sur la transmission du virus SARS-CoV-2 par aérosols et des recommandations sanitaires. <https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=894>

[2] Squinazi F. et Gehin E. La transmission des virus respiratoires dans les environnements intérieurs. In : John Libbey Eurotext, editor. YearBook Santé et environnement. Paris. 2022. p.55-60

[3] Haut Conseil de la Santé Publique. Avis du 28 avril 2021 relatif à l'adaptation des mesures d'aération, de ventilation et de mesure du dioxyde de carbone (CO₂) dans les établissements recevant du public (ERP) pour maîtriser la transmission du SARS-CoV-2 <https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=1009>

[4] Haut Conseil de la Santé Publique. Avis du 21 janvier 2022 relatif à la mesure du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air intérieur des établissements recevant du public (ERP) <https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=1154>

[5] Haut Conseil de la Santé Publique. Avis du 14 octobre 2020 relatif à l'utilisation des appareils de chauffage dans le contexte de l'épidémie de Covid-19. <https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=928>

[6] Haut Conseil de la Santé Publique. Avis du 6 mai 2020 relatif à la gestion de l'épidémie de Covid-19 en cas d'exposition de la population à des vagues de chaleur. <https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=817>

[7] Alliance HQE-GBC France. Travaux sur la qualité de l'air intérieur. <https://www.hqegbc.org/hqe-en-action-alliance-hqe-gbc/qualite-de-lair-interieur/>

<https://www.hqegbc.org/hqe-en-action-alliance-hqe-gbc/qualite-de-lair-interieur/>

[8] Norme NF X43-406 : 2018. Qualité de l'air - Stratégie d'enquête environnementale suite à signalement - Bâtiment à usage d'habitation, d'enseignement et de bureaux. AFNOR Editions.

➔ RENOUELEMENT D'AIR ➔ DIMENSIONNEMENT ➔ MESURE CO₂

Comment la gestion des installations de ventilation des bâtiments peut-elle contribuer à limiter les risques pandémiques d'après COVID 19 en limitant les coûts énergétiques

➔ La crise pandémique a révélé l'importance de la qualité de l'air dans les lieux clos. Les gens ont besoin d'être rassurés, de se sentir en sécurité sur leurs lieux de travail, dans les théâtres, les musées, les EPHAD... La crise COVID a mis en évidence que les règles limitant la propagation des virus aéroportés étaient insuffisamment appliquées. Pour maintenir des activités dans ces lieux clos, rassurer les occupants ou utilisateurs, et ne plus redouter les risques sanitaires, plusieurs axes d'actions peuvent être mis en place.

Les préconisations de la REHVA¹, du HCSP², sont explicites et indiquent qu'une bonne gestion de la pandémie passe par une bonne gestion du renouvellement de l'air des locaux. Cependant, ventiler des locaux présente un coût énergétique. Ce coût énergétique inclut l'usage de ventilateurs assurant le transfert de l'air extérieur vers l'intérieur du bâtiment et la diffusion de cet air dans tous les locaux, selon l'équation 1 et par le traitement thermique de cet air.

Équation 1 : consommation énergétique = débit (m³/h) * facteur de consommation (W / (m³/h)) * temps de fonctionnement

Pour gérer la juste quantité d'air nécessaire et ne pas induire des surconsommations, des outils existent à chaque étape de la vie du bâtiment.

Pour la conception, les actions à mettre en œuvre :

- Dimensionnement des débits d'air selon les émissions de CO₂ liées à l'occupation.
 - Par exemple, les émissions d'une personne en salle de réunion sont de 22 l/h de CO₂, en appliquant l'équation du bilan massique et en intégrant le taux d'occupation défini de la salle de réunion, les débits sont déterminés pour atteindre la limite de 800 ppm de CO₂ défini par le HCSP (voir paragraphe sur le principe de mesure du taux de renouvellement de l'air ci-après).
- En exemple en figure 1, nous pouvons remarquer les consommations énergétiques mises en jeu pour l'atteinte

des différentes limites en CO₂ dans une salle de 30 personnes d'un volume de 140 m³. Il s'agit d'une installation de ventilation mécanique.

	Hypothèse 1	Hypothèse 2	Hypothèse 3	Hypothèse 4	Hypothèse 5
Flux de polluant (en l/h)	540	540	540	540	540
Tx renouvellement	6,86	8,23	10,29	5,36	3,21
Consommation électrique kW/an	2024,1	2428,9	3036,1	1581,3	948,8

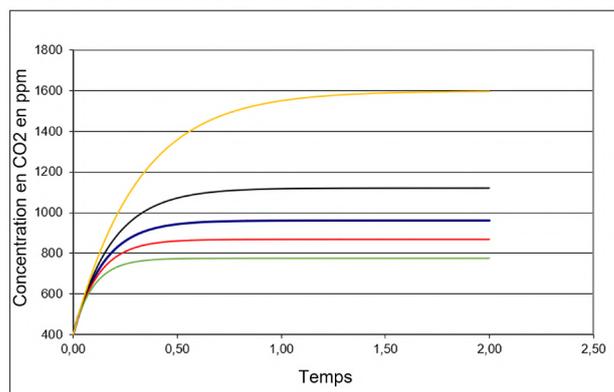


Figure 1 : Exemple de résultats pour différents débits d'air dans une salle de classe de 30 personnes d'un volume de 140 m³

- L'usage de la simulation numérique, selon son degré de précision, peut aller jusqu'à prédire la diffusion de l'air dans les locaux, définir les zones mortes et l'âge de l'air en tout point d'une salle. En effet, il ne suffit pas seulement d'injecter un débit pour que la pièce soit bien ventilée, il faut aussi s'assurer de la bonne diffusion de l'air

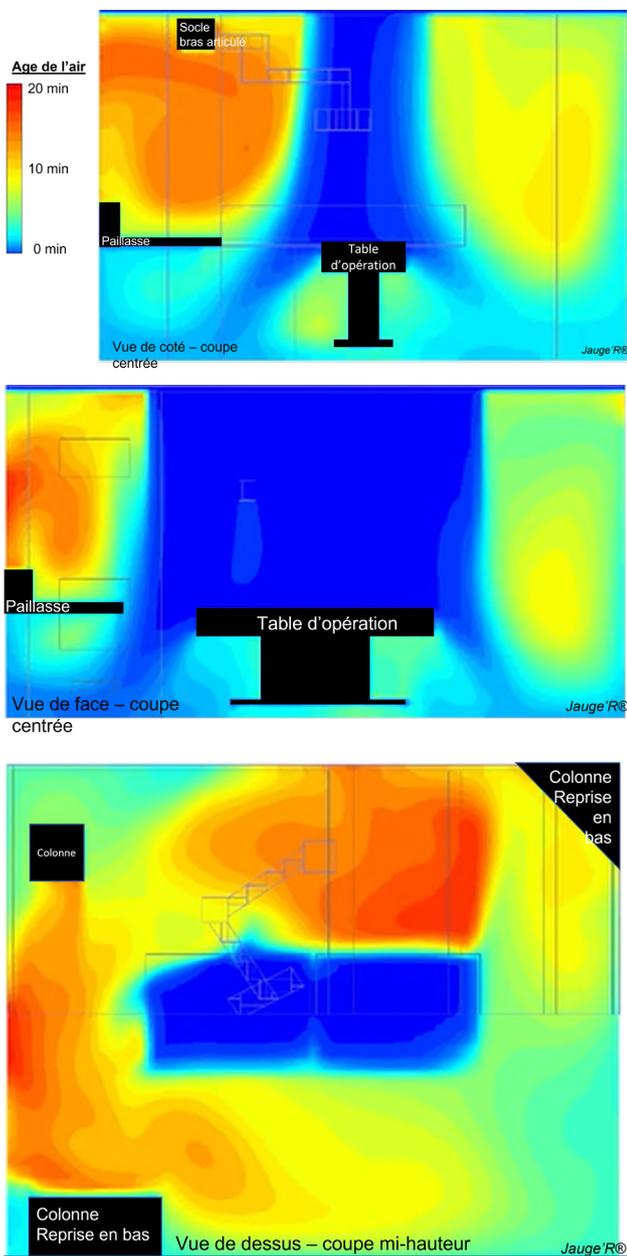


Figure 2 : Exemple de représentation de l'âge de l'air dans un bloc opératoire (source : P. Petinga & AL., Contrôle Continu particulière en salle propre, CFA ASFERA 2023)

dans toute la pièce et que l'âge de l'air soit minimale en tout point. Sur les photos ci-dessus, vous trouverez une représentation de l'âge de l'air dans un bloc opératoire. L'âge de l'air est le temps de présence de cet air dans la zone avant d'être renouvelé. En bleu l'âge de l'air est quasiment de 0 car il s'agit des zones sous plafond filtrant et donc renouvelée instantanément. Puis et selon les différents obstacles, les zones sont plus ou moins renouvelées rapidement allant du jaune au rouge. Dans les zones rouges l'air reste environ 15 à 20 minutes.

Pour l'exploitation :

- L'asservissement des débits d'air au juste besoin par la mise en place de capteurs de CO₂ permet une optimisation de la limitation du risque pandémique. L'installation doit être réalisée en collaboration avec un bureau d'études spécialisé afin de ne pas risquer d'avoir une contre-performance. Les moteurs des ventilateurs de-

ront être adaptés pour générer de faibles débits sans dévier de leur courbe de performance débit/pression pour ne pas surconsommer. Les capteurs devront être positionnés dans des zones représentatives de l'ensemble de la concentration de la pièce. Il est d'usage de les placer dans la gaine de reprise par exemple.

Si l'asservissement est réalisé au niveau local par des registres (cas des multizones), il faudra veiller à réguler le ventilateur amont d'arrivée d'air neuf afin de ne pas surconsommer. Par ailleurs, si ce ventilateur amont n'est pas régulé, il y a aussi un risque de monter en pression dans le réseau aéraulique, ce qui peut engendrer des déséquilibres, des désordres, etc.

- Pour les locaux existants dont le système de ventilation n'est pas modifiable, mise en place d'un label indiquant le nombre de personnes pouvant occuper la pièce sans dépasser les limites de 800 ppm conseillés par le HCSP ou les 1300 ppm de CO₂ définis par le RSDT³. Ce label peut être apposé après un diagnostic de la ventilation et de son efficacité par mesure des taux de renouvellement de l'air.

- Une suggestion de label qui pourrait être appelé « JAUGE'AIR » est proposé dans l'exemple ci-contre. Le diagnostic se réaliserait à l'aide d'un capteur de CO₂ permettant de déterminer les taux de renouvellement d'air selon le principe expliqué dans le paragraphe suivant et ainsi indiquerait les taux d'occupation possibles dans le local au regard de la réglementation et des préconisations.

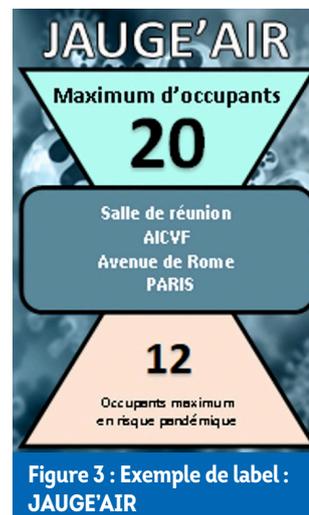


Figure 3 : Exemple de label : JAUGE'AIR

Principe de mesure du taux de renouvellement de l'air

Le taux de renouvellement d'air d'une salle qualifie la quantité d'air neuf qui entre et la quantité d'air vicié qui sort de cette salle. Un taux de renouvellement d'air de 3 vol.h⁻¹ signifie que le volume de la salle a été renouvelé 3 fois en une heure. La Figure 4 schématise l'emplacement dans lequel le capteur de CO₂, pour déterminer le taux de renouvellement de l'air, est placé ainsi que les grandeurs mises en jeu. Par conséquent :

- On considère un bâtiment simple d'un volume intérieur V (m³)
- Le débit d'air neuf entrant et sortant du bâtiment est Q (m³/h)
- L'air extrait emporte une partie de la pollution Ci du volume
- Le taux de renouvellement d'air est le rapport Q / V
- Les occupants sont sources d'émission de CO₂ à un débit q
- Le nombre d'occupants N permet de déterminer les apports totaux de CO₂ internes



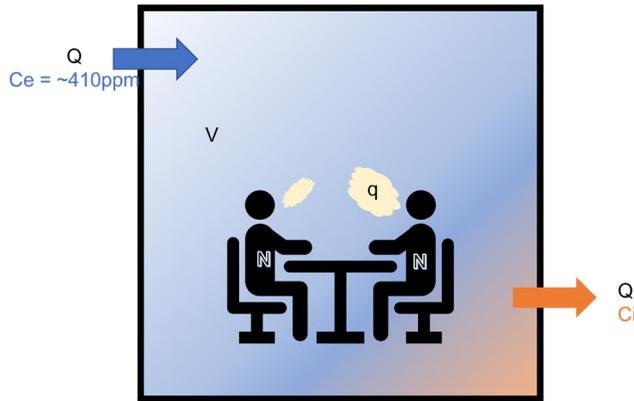


Figure 4 : Schématisation du bilan massique

>>> L'ensemble du local répond au bilan massique selon l'équation 2.

Équation 2 : $C_i(t) = C_o.e^{-Q.t/V} + (Q.C_e + q*N).(1 - e^{-q.t/v})/Q$

A partir de l'équation 2, deux méthodes permettent de déterminer le taux de renouvellement de l'air : la méthode à l'équilibre et la méthode dynamique

1. LA MÉTHODE À L'ÉQUILIBRE

Cette méthode est réalisable si le nombre d'occupants et le volume de la pièce sont constants et connus. La quantité totale d'émission q cumulée de CO₂ correspondant aux apports internes sera déterminée en fonction du nombre d'occupants N. A l'équilibre le débit d'air neuf est équivalent au débit d'émission.

2. LA MÉTHODE EN DYNAMIQUE

La mesure en dynamique consiste à relever la décroissance du taux de CO₂, lorsque la pièce est vide juste après le dé-

part des occupants. Cette méthode sera appliquée pour la mesure des taux de renouvellement de l'air pendant ou à la fin d'une journée ouvrée lorsque les occupants quittent les locaux.

En conclusion, les installations de ventilation doivent être conçues, adaptées et/ou qualifiées en prenant en compte les usages (activités, nombre d'occupants...). Cette conception doit intégrer la notion de taux de renouvellement de l'air plus précise que la notion de débit d'air. En effet, le renouvellement de l'air est la seule notion qui permet d'étudier les effets de dilution et d'évacuation des polluants intérieurs (virus, bactéries, polluants chimiques, particulaires...) d'une salle occupée. Avec les taux de renouvellement de l'air, une installation de ventilation peut être dimensionnée pour maintenir un niveau de CO₂ dans une salle au regard de l'occupation. La modélisation et la simulation de l'aéraulique de la salle étudiée pourront optimiser les flux d'air afin d'assurer une diffusion permettant l'évacuation rapide des polluants et éviter les zones mortes. L'installation de capteurs de CO₂ dans les zones à occupation variable permettra une utilisation réduite des installations de ventilation au plus juste besoin pour limiter les consommations énergétiques. Enfin, en cas d'impossibilité d'ajuster les installations de ventilation, leur qualification au regard d'un label orienté sur le nombre d'occupants maximal devra être mis en place.

Priscilla Petinga, experte qualité de l'air intérieur



- 1. REHVA : Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations
- 2. HCSP : Haut Conseil de la Santé Publique
- 3. RSDT : Règlement Sanitaire Départemental Type



L'impact de la crise sanitaire sur la réglementation et les installations de ventilation - Le point de vue du Cerema

→ Les travaux d'élaboration du 4^{ème} Plan National Santé Environnement (PNSE4) menés par les ministères en charge de la santé et de l'environnement, puis la crise sanitaire, ont renforcé l'importance de faire évoluer la réglementation de surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public, conduisant à la mise en œuvre d'un dispositif de surveillance révisé, entré en vigueur au 1^{er} janvier 2023.

Nous passons plus de 80 % de notre temps dans des environnements clos (domicile, transport, lieu de travail, lieu d'enseignement, etc.), plus encore pour les enfants en bas âge. La qualité de l'air intérieur (QAI) représente donc un enjeu majeur pour notre santé.

Or, l'air intérieur contient des polluants en concentrations généralement plus élevées que l'air extérieur, le volume de dilution dans un espace intérieur étant beaucoup plus petit que le volume de l'air à l'extérieur des bâtiments. De plus, de nombreux polluants sont émis directement à l'intérieur de nos locaux, tels les composés organiques volatils (COV). Ces polluants proviennent de diverses sources, comme les matériaux de construction, le mobilier, les équipements techniques, mais aussi nos activités (ménage, cuisine, peinture, bricolage, travaux d'arts, activités professionnelles émettrices, bougies, tabac, etc.).

L'exposition à ces polluants peut avoir des effets sanitaires divers, tels que des pathologies du système respiratoire (rhinites, bronchites), des maux de tête, de la fatigue, une irritation des yeux, des nausées, voire un effet cancérigène sur le long terme, pour les plus dangereuses. A contrario, une bonne qualité de l'air à l'intérieur d'un bâtiment a un effet positif démontré sur le bien-être des occupants, ainsi que sur la concentration et l'apprentissage des enfants et la transmission des virus aéroportés.

Ainsi, l'enjeu lié à la QAI est double : il est à la fois sanitaire, mais également économique, car la mauvaise QAI coûte à la puissance publique et aux entreprises (baisse de productivité des employés, arrêts de travail, médicament, et notamment pour l'asthme, etc.).

Un système de ventilation, s'il est bien conçu, bien installé et bien entretenu est un élément clé pour garantir un renouvellement d'air suffisant en permanence tout en maîtrisant les

dépense énergétiques. Beaucoup de bâtiments recevant du public en France sont aujourd'hui dépourvus de système de ventilation : le renouvellement de l'air ne se fait que par l'aération des locaux, par ouverture des fenêtres, ou les défauts d'étanchéité.

Étant donné l'importance d'une bonne qualité d'air pour la santé des occupants, le dispositif réglementaire révisé de surveillance de la QAI dans certains établissements recevant du public (ERP) prévoit également d'évaluer la concentration en dioxyde de carbone (CO₂) ponctuellement et annuellement, cette concentration étant liée à la qualité des moyens de renouvellement de l'air.

Le dispositif réglementaire de surveillance de la QAI date en France de 2012 et a été révisé avec une date d'application des textes au 1^{er} janvier 2023.

Pour faciliter la mise en œuvre de ce dispositif, le Cerema a élaboré :

- une plaquette à destination des élus, afin de décrire de manière synthétique ce dispositif
- un guide pratique pour accompagner les acteurs qui sont chargés de déployer cette nouvelle surveillance réglementaire.

Ce dispositif révisé peut ainsi se résumer en 4 étapes :

1. Évaluation annuelle des moyens d'aération des bâtiments. Cette évaluation s'appliquait déjà précédemment, mais elle est désormais annuelle et inclut une mesure à lecture directe de la concentration en CO₂ sur 2h. Ces nouvelles mesures s'appuient sur les retours d'expérience de la crise sanitaire et tirent parti des nouveaux capteurs de CO₂ mis sur le marché. La première évaluation annuelle doit être réalisée au plus tard au 31 décembre 2024.



>>> **2. Autodiagnostic de la QAI.** Cet autodiagnostic existait également dans la précédente version du dispositif mais il était optionnel. Il a été conservé dans sa forme, mais il est désormais à réaliser tous les 4 ans (au plus) de manière systématique. Il intègre l'identification et la réduction des sources d'émission de substances polluantes dans les locaux, l'entretien des systèmes de ventilation et des moyens d'aération de l'établissement et la diminution de l'exposition des occupants aux polluants issus, en particulier, des travaux et des activités de nettoyage des locaux. Le premier autodiagnostic devra être réalisé au plus tard le 31 décembre 2026.

3. Campagne de mesures des polluants réglementés (formaldéhyde, benzène, dioxyde de carbone). Cette campagne est réalisée à chaque étape clé de la vie du bâtiment pouvant impacter la QAI, comme des gros travaux (extension, livraison, réhabilitation lourde), des petits et moyens travaux spécifiques (concernant le système de ventilation, les huisseries ou les matériaux en contact avec l'air intérieur) ou encore des actions particulières sur les locaux (changement significatif de la disposition des pièces, ou de l'effectif d'occupation, ou encore des activités effectuées dans la salle). Ces étapes clés sont définies par la réglementation avec, pour certaines d'entre elles, l'atteinte d'un seuil afin de déclencher une campagne de mesures. Ce seuil dépend de la surface des pièces impactées par l'étape clé et de la taille de l'établissement concerné. Par exemple, dans un lycée de plus de 13 classes, les travaux sur les parois intérieures doivent concerner au moins 25 % de la surface des pièces soumises à la réglementation (salles d'enseignement et de restauration) de l'établissement pour que cela soit considéré comme une étape clé avec des mesures obligatoires. Dans une école de 4 classes, les travaux devront concerner cette fois 75 % de la surface des pièces soumises à la réglementation de l'établissement pour que cela soit considéré comme une étape clé avec des mesures obligatoires. Les polluants à mesurer dépendent également de la nature de l'étape clé. On parle alors de campagne totale (les 3 polluants sont à mesurer) ou partielle (1 ou 2 polluants) :

- pour le **formaldéhyde** et le **benzène**, deux séries de prélèvements sont réalisés, en période de chauffe et hors période de chauffe ;
- pour le **CO₂**, une mesure en période de chauffe est réalisée en continu sur 4,5 jours. L'indice Icone pour évaluer le confinement de l'air est ensuite calculé.

La campagne de mesure des polluants réglementés doit être menée par des organismes accrédités selon le référentiel LAB REF 30 établi par le Comité français d'accréditation (Cofrac), le prélèvement et l'analyse doivent être réalisés sous accréditation. Les résultats sont transmis au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) qui gère désormais la base de données nationale.

4. Plan d'actions visant à améliorer la qualité de l'air intérieur. Il constitue la clé de voûte du dispositif révisé et il est mis en place à partir des résultats de l'évaluation annuelle des moyens d'aération, de l'autodiagnostic et de la campagne de mesures réglementaires. Il doit être réalisé au plus tard dans les quatre ans suivant l'entrée en vigueur de la réglementation (au plus tard au 31 décembre 2026) et être actualisé régulièrement.

Cette actualisation devra se faire idéalement à l'occasion de la réalisation et/ou de la mise à jour de chaque étape de la réglementation, et permettra de coordonner les différents acteurs pouvant influencer sur la QAI par leur action au quotidien.

Conclusion

Cette nouvelle réglementation vise à améliorer la qualité de l'air dans les locaux recevant du public et en particulier dans les écoles. L'exigence de mettre en place un plan d'actions devrait conduire à une demande de plus en plus forte de systèmes permettant d'améliorer le renouvellement de l'air dans les bâtiments existants. En plus des systèmes de ventilation, il est probable que les dispositifs d'épuration d'air se développent dans nos bâtiments comme outre-Atlantique. Toutefois, si certains peuvent aider à l'évacuation des polluants, d'autres peuvent au contraire s'avérer inutiles voire nuisibles pour la qualité d'air. Il convient donc d'être vigilant sur les technologies utilisées et de développer les méthodes de tests et les certifications de ces produits.

Les textes de référence

- [décret n° 2022-1689 du 27 décembre 2022 modifiant le code de l'environnement en matière de surveillance de la qualité de l'air intérieur](#) ;
- [décret n° 2022-1690 du 27 décembre 2022 modifiant le décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public](#) ;
- [arrêté du 27 décembre 2022 modifiant l'arrêté du 1er juin 2016 relatif aux modalités de surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public](#) ;
- [arrêté du 27 décembre 2022 modifiant l'arrêté du 1er juin 2016 relatif aux modalités de présentation du rapport d'évaluation des moyens d'aération](#) ;
- [arrêté du 27 décembre 2022 fixant les conditions de réalisation de la mesure à lecture directe de la concentration en dioxyde de carbone dans l'air intérieur au titre de l'évaluation annuelle des moyens d'aération](#).

**Cécile Caudron responsable thématique
Qualité des Environnements Intérieurs et
Ventilation (CEREMA)**



**Valérie Leprince directrice de Projet Qualité
de l'Environnement Intérieur et Ventilation
(CEREMA)**



Bonnes pratiques et retours d'expérience pour le dimensionnement de la ventilation dans les établissements d'enseignement en rénovation

→ Dans le contexte du lancement du 4^{ème} plan national santé environnement (PNSE4), le ministère de la Transition écologique pose une ambition appuyée sur la qualité d'air, notamment dans les établissements scolaires. En effet, le bien-être, la santé et les enjeux d'apprentissage sont attendus, ces lieux étant les plus fréquentés par les enfants après le logement.

Les polluants et sources potentielles de substances polluantes émises dans l'air intérieur sont de nature physique (matériaux de construction, de décoration et ameublement), chimique (matériel utilisé pour les activités, environnement du bâtiment, appareils à combustion) ou biologique (allergènes des plantes, acariens, ou animaux).

La thématique est depuis quelques années identifiée et les mesures de suivi réglementaires rendues obligatoires depuis la loi Grenelle 2 ainsi que les plans d'action pour la qualité d'air et guide du Ministère pour des constructions plus saines sont déployés.

Cependant, les derniers reporting de surveillance (source 1) confirment que 41 % des écoles ont au moins une salle de classe très confinée en termes de concentration de CO₂. Les rapports de surveillance de ces polluants sont par ailleurs unanimes quant aux dangers pour la santé d'une exposition trop longue ou importante : bon apprentissage et réduction de l'absentéisme (Source 2).

Choisir le système de ventilation adapté...

D'un point de vue réglementaire, aucun texte n'impose la mise en œuvre d'une ventilation mécanique dans les établissements scolaires. L'Association Française de la Ventilation souligne que 15 % des établissements scolaires sont équipés d'un système de ventilation mécanique en 2017 sur un échantillon de 301 écoles recensées (source 3). L'aération peut être réalisée par tirage thermique en évacuant l'air chaud en partie haute, par ventilation traversante

via un positionnement des entrées d'air face au vent opposées aux sorties d'air ou hybride via une assistance mécanique. Ces modes de ventilation dits naturels sont souvent tributaires des personnes ouvrant les fenêtres, des conditions météorologiques et permettent un contrôle limité du débit. Ils peuvent provoquer des problématiques de condensation et humidité. S'ajoutent à cela les enjeux de qualité d'air extérieur et d'acoustique pouvant être sensibles à adresser suivant les contextes des sites. En rénovation, s'adosser à une ventilation naturelle est à considérer sur les opérations où le contexte architectural, de site et technique s'y prête.

Cela induit pour les décideurs de trouver le **bon équilibre entre qualité d'air intérieur et limitation de l'impact carbone / réduction des consommations énergétiques**, et ce d'autant plus sur les programmes de rénovation où les contraintes techniques, architecturales et économiques sont fortes.

Dimensionner les débits d'air neuf

La réalisation de **simulations de concentration de CO₂** (sur laquelle est déduit le confinement de l'air - cf. encadré) permet d'optimiser les débits de ventilation dans les volumes de salles de classe. Ces évaluations permettent également de confirmer la mise en œuvre de simple ou double flux suivant l'encombrement des systèmes, notamment dans les opérations de rénovation. Elles permettent enfin de préciser finement le dimensionnement des centrales et limiter leur encombrement et celui des réseaux.



>>> Les logiciels de modélisation permettent en effet de mieux apprécier l'impact des variations d'occupation des salles de classe dans le calcul prédictif de concentration de CO₂ et donc vis-à-vis des débits d'air neuf à proposer dans différents volumes.

On s'adosse par ce calcul prédictif à l'indice de confinement ICONÉ (Indice de CONfinement d'air dans les Ecoles) déployé dans le guide d'application du CSTB pour la surveillance du confinement de l'air dans les établissements d'enseignement (source mai 2012) permettant d'exprimer le niveau de confinement d'une pièce sur une échelle de 0 à 5.

Comment évaluer le confinement de l'air ?

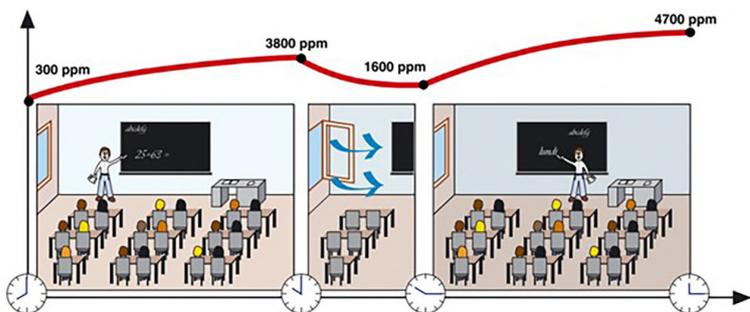
L'indice ICONÉ est basé sur la fréquence et l'intensité des concentrations de CO₂ et défini par la formule suivante :

$N = 2,5 / \log_2^2 \log(1+f_1+3*f_2)$ avec :

- f1 [0 :1] = fraction du temps d'occupation où taux de CO₂ compris entre 1000 et 1700 ppm
- f2 [0 :1] = fraction du temps d'occupation où taux de CO₂ supérieur à 1700 ppm

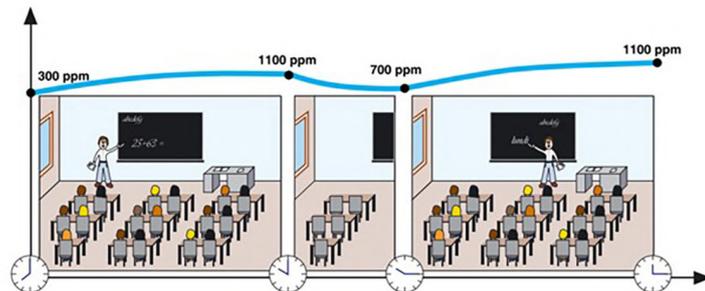
Aborder le sujet de la qualité d'air intérieur par le biais du traitement du confinement de l'air intérieur induit de prendre en considération la concentration de CO₂ dans le volume complet d'une pièce résultant de la respiration des personnes présentes induite par leur âge et leur activité. Il est souvent requis de justifier d'un indice de confinement de 0 soit un taux de CO₂ qui reste inférieur à 1000 ppm. Cela nécessite des débits de l'ordre de 30 m³/h/personne en fonction du volume de la pièce, du nombre d'élèves et de leur âge. Ce niveau peut paraître élevé et lorsqu'il n'y a pas de souhait spécifique de la maîtrise d'ouvrage, nous proposons d'atteindre plutôt le niveau 2, qui demande de ne pas dépasser 1000 ppm pendant 50 % du temps d'occupation.

Ci-dessous, il est présenté un exemple de suivi de deux salles de cours en concentration de CO₂, variable suivant l'occupation. (Extrait du Guide CETIAT « Ventilation Performante dans les Ecoles ».)



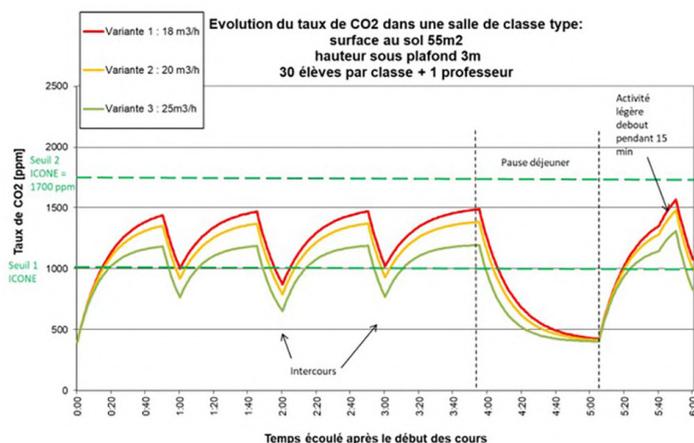
Cas " sans ventilation " : infiltrations 0.2Vol/h (intercours 4Vol/h)

Remarque : sans aération à l'intercours, on atteindrait la valeur de 6200 ppm au bout de la période considérée (4h15).



Cas " avec ventilation " : 18m³/h/pers->2.6Vol/h (en permanence)

Ci-après un exemple de simulation de concentration de ppm avec variation des temps de pause et variation de débit d'air neuf.



Cet outil permet de calculer l'évolution de la teneur en CO₂ dans la classe sur la journée selon le débit d'air neuf, la densité des élèves, les intercours, l'activité des élèves, etc. Il permet également de calculer l'indice de confinement (voir encadré).

Réguler les apports d'air neuf

En vue d'affiner la conception du poste de ventilation mécanique, **la question de la régulation des systèmes de ventilation est aussi à considérer** afin de corréler les débits minimums attendus avec les scénarios d'occupation et d'activité des différents types d'occupants. Différents systèmes s'envisagent :

- Détection d'activité avec modulation de débit ou adressage sur horloge : pour les salles de classes et l'administration
- Détection de CO₂ ou présence : adaptée aux locaux à activité variable dont la source majoritaire de pollution est l'occupant, dans des zones type restauration, motricité et amphithéâtre. La détection permet de piloter un registre « tout ou peu » qui fait passer d'un débit de base hors occupation à un débit nominal.

Travailler la qualité de diffusion

Un bon dimensionnement du débit d'air neuf est à associer à une bonne qualité de diffusion d'air. Il s'agit de s'attacher au

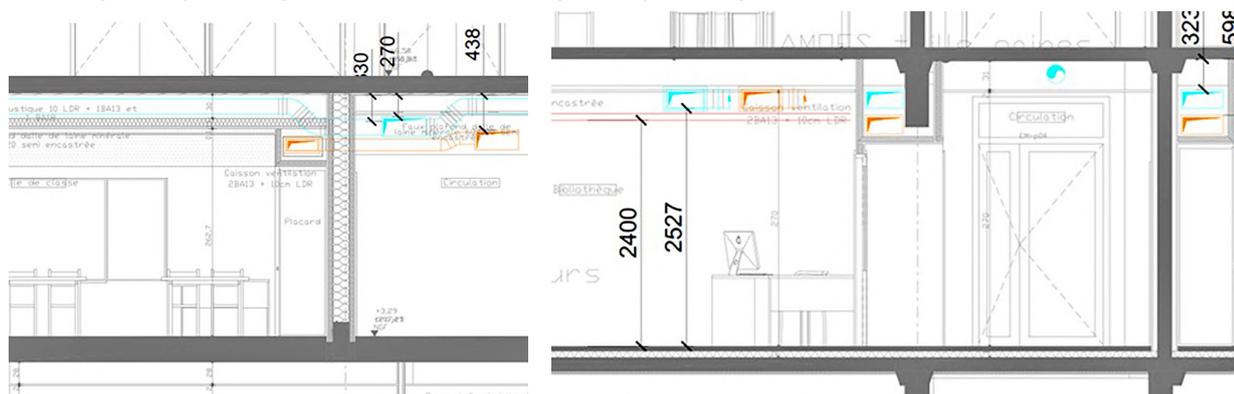
Retours d'expériences sur des projets scolaires rénovés

VENTILATION DOUBLE-FLUX DANS UN GROUPE SCOLAIRE EXISTANT : ON FAIT AVEC LA PLACE QU'ON A !

Groupe scolaire Jean Moulin à Brignais (69) – Architecte TEKNE et BET Fluides et Environnement AMOES. En chantier – livraison prévue en 2023

Contexte travaux : 25 m³/h par élève – très peu de hauteur sous plafond, carottages conséquents dans certains voiles. Simplification au maximum du réseau et de la régulation, gros travail sur l'acoustique. CTA Gold RX de Swegon (échangeur rotatif). Mise en place d'une solution de rafraîchissement adiabatique.

L'encombrement est sans doute l'un des points les plus problématiques pour la mise en œuvre d'un système de ventilation double-flux centralisé dans un bâtiment existant. Pour un groupe scolaire, cela demande du temps de conception, accepter d'abaisser les hauteurs sous plafond dans certaines zones telles que les circulations et trouver des astuces d'aménagement pour intégrer au mieux les réseaux (placard par exemple).



Exemples de coupes permettant de voir l'emprise des réseaux dans les circulations et les salles tout en gérant les croisements, les retombées de poutres et les hauteurs sous plafond à conserver.

MISE EN PLACE D'UNE VENTILATION NATURELLE DANS UNE ÉCOLE EXISTANTE – UNE SOLUTION SÉDUISANTE MAIS PAS TOUJOURS POSSIBLE

Rénovation de l'école Jules Ferry à Montmorency (95) – Architecte Méandre et BET Fluides Environnement AMOES. Projet en conception

Contexte travaux : Conception Lowtech et simplification du poste de ventilation

Sur cette opération il a été étudié la possibilité de ventiler naturellement les salles de classe par mise en place de tourelles spécifiques et de bouches d'entrée d'air à faibles pertes de charge. Cette solution s'est avérée impossible à mettre en œuvre du fait de la double contrainte acoustique/encombrement en rénovation. Le site étant fortement impacté par des sources de bruits (trafic routier et aérien), la restitution de l'isolement acoustique vis-à-vis de l'extérieur n'était pas compatible avec la mise en œuvre des larges bouches d'entrées d'air et des tourelles. Il était également nécessaire que les vitesses d'air dans les gaines et plénum soient très faibles (pour avoir très peu de pertes de charges), et pour cela, les sections devaient être très importantes créant un encombrement impossible à gérer pour ce cas.

choix de diffuseurs sélectionnés en cohérence avec les volumes à desservir afin de s'assurer l'absence de zones mortes. Les enjeux acoustiques des bruits d'équipements et de confort thermique sans créer de sensation de froid pour les élèves et enseignants sont également à anticiper. La qualité des diffuseurs est *in fine* souvent le point faible des installations.

Concevoir pour limiter les pertes de charge et les fuites des réseaux

Un autre axe de conception est de **chasser toutes les pertes de charges** du poste de ventilation.

Premièrement par le **positionnement des locaux techniques** :

- Dans une enveloppe isolée (éviter en toiture),

- Au plus près des besoins en privilégiant la mise en œuvre de plusieurs centrales de traitement d'air par usage. Les équipements sont à positionner au centre du bâtiment afin de tisser un réseau en étoile qui limite les linéaires. En rénovation, envisager des centrales de traitement d'air décentralisées pour chaque salle de classe peut permettre d'assurer la mise en œuvre de ventilation mécanique en réduisant les contraintes de tirage de réseau.

- Proche d'une paroi extérieure afin de limiter la présence de conduites froides dans l'enveloppe thermique et en traitant avec soin la traversée de la barrière d'étanchéité

Deuxièmement, en **dimensionnant correctement les sections des réseaux** en limitant la vitesse d'air à 1 m/s >>>

>>> dans les réseaux secondaires et 3 m/s dans les réseaux primaires.

Enfin, **limiter les coudes à 90°** et préférer les piquages à 45°, privilégier les gaines circulaires, mettre en œuvre des accessoires à joints tout en limitant le nombre, prévoir suffisamment de trappes de visite, etc.

En chantier, avoir recours à la préfabrication en usine pour les jonctions, utiliser de l'adhésif d'étanchéité au niveau des vis de fixation, soigner l'étanchéité des têtes et pieds de colonnes afin d'assurer une **bonne étanchéité des réseaux en vue de limiter les fuites impactant sur les consommations électriques et le contrôle de la qualité de l'air**.

Il convient de plus de **sélectionner des filtres adaptés à chaque opération** (les filtres F7 - permettant de traiter les particules > 2.5 µm : le pollen et les champignons notamment - sont utiles dans certains cas si la maintenance de ces filtres est connue et acceptée pour les services de maintenance. S'il n'y a pas d'enjeu spécifique, les filtres G4 sont à privilégier car ils engagent des coûts de maintenance bien inférieurs, d'en prendre soin durant le chantier, et en exploitation de les remplacer régulièrement afin de limiter les consommations énergétiques et maintenir une bonne qualité d'air intérieure.

Assurer une maintenance aisée

Le positionnement et le dimensionnement des locaux techniques doivent prendre en compte l'ensemble des opérations d'entretien et de maintenance des centrales de traitement d'air. Assurer le bon nettoyage des moteurs, remplacement des courroies et maintenance des systèmes de filtrage est un gage de maintien des performances énergétiques et débits d'air neuf souhaités (et donc de qualité d'air intérieur).

Déconstruire les usages sur le préchauffage de l'air

Reste également à déconstruire un usage sur le poste

de ventilation : **supprimer les batteries de préchauffage post-échangeur**, qui permettent de souffler dans les pièces un air à une température donnée (proche de la température de consigne souhaitée), plutôt que la température de sortie d'échangeur. C'est une conception qui répond à la crainte d'un inconfort thermique lié à une température de soufflage trop fraîche. Elle est souvent liée à des retours d'expérience malheureux résidant *in fine* dans une mauvaise sélection de bouches de soufflage, un balayage de l'air non maîtrisé ou un réglage non réalisé en fin de travaux et non à la température ambiante.

NB. Proposer la mise en œuvre de batterie chaude sur le soufflage d'air neuf est adapté en conception passive car on peut chauffer le bâtiment sans surdimensionner les débits soufflés au-delà du débit de renouvellement hygiénique du bâtiment. L'idée dans ce contexte est de se passer de la distribution terminale et des émetteurs (type radiateurs). Le gain « carbone matériaux » est alors important avec ce fonctionnement en chauffage par l'air.

En dehors de ce contexte de construction passive, la régulation du préchauffage de l'air n'étant pas possible, ou bien trop imprécise, elle occasionne des surchauffes dans les salles de classe, des surconsommations de chaleur tout en augmentant les pertes de charge et consommations d'auxiliaires.

Source 1 - Rapport annuel 2018 de l'Observatoire national de la sécurité et de l'accessibilité des établissements d'enseignement

Source 2 - Shendell et al; *Associations Between Classroom CO2 Concentrations and Student Attendance in Washington and Idaho, Indoor Air, 2004*.

Source 3 - Interview Pascal Housset de l'Association Française de la Ventilation <https://www.larpf.fr/actualite/14591/vmc-a-l-ecole%E2%80%89-l-association-francaise-de-la-ventilation-interpelle-les-candidats-a-la-presidentielle>

**Oriane Dugrosprez, cheffe de projets
Performance Environnementale - AMOES**



**Vincent Coste, responsable
technique - AMOES**



La ventilation mécanique contrôlée par insufflation dans les crèches

→ La ventilation mécanique contrôlée par insufflation est un procédé de ventilation qui consiste à introduire de l'air extérieur filtré, éventuellement préchauffé, dans un local. L'évacuation de l'air est assurée par des sorties d'air passives (qui peuvent être identiques aux entrées d'air utilisées dans les installations par extraction) ou même par de simples conduits verticaux à tirage naturel.

Depuis les années 1980, la ventilation mécanique contrôlée par insufflation a d'abord été utilisée dans la rénovation de logements existants, puis dans le neuf. De nouveaux champs d'utilisation, dans le petit tertiaire notamment, s'ouvrent maintenant à cette technologie. L'application à une crèche est analysée dans cet article.

Application de la ventilation mécanique par insufflation à une crèche

Ce procédé a été mis en œuvre dans une crèche collective située en proche banlieue parisienne et a fait l'objet d'un suivi instrumenté de plusieurs mois.

Deux salles d'activité « grands enfants » ont été équipées de ce procédé de ventilation.

L'une de ces deux salles a fait l'objet d'une instrumentation per-

mettant la mesure de la concentration en CO₂, COVT et particules solides PM 2,5.

L'amenée d'air dans les locaux est assurée par un caisson d'insufflation qui prélève l'air à l'extérieur du bâtiment et comprend, dans un ensemble caréné, un groupe moto ventilateur, un compartiment de filtration, un compartiment de préchauffage.

Le débit soufflé dans les locaux desservis est régulé par un algorithme adaptant la vitesse de rotation du ventilateur en fonction des valeurs de consigne définies pour la concentration en CO₂.

Le caisson est installé dans un local contigu. Un réseau de conduits assure l'acheminement de l'air entre le caisson et les bouches de soufflage disposées dans les salles.

Quatre bouches d'extraction assurent l'évacuation de l'air. Un exemple d'implantation d'un système de ventilation mécanique par insufflation dans une crèche est illustré par le schéma donné en figure 2 >>>

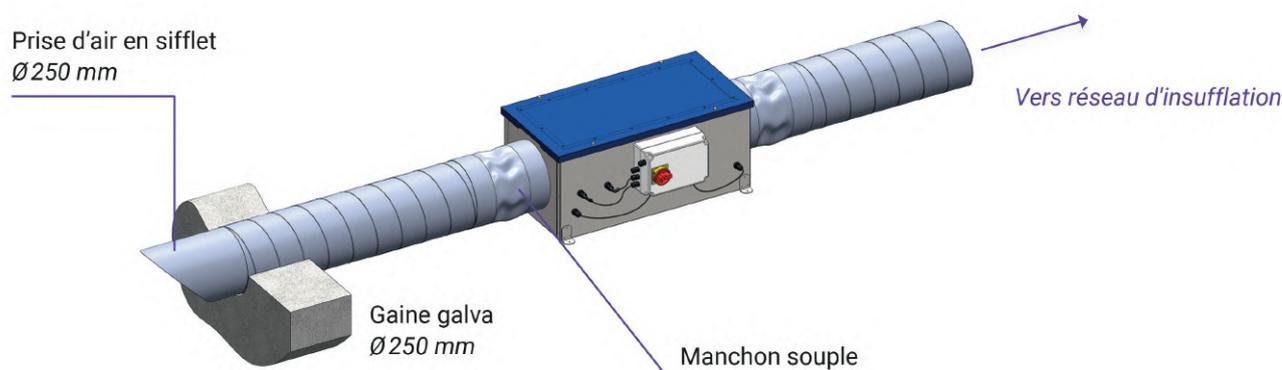


Fig. 1 - Caisson d'insufflation et ses conduits d'amenée et de distribution d'air (Crédit Ventilairsec)

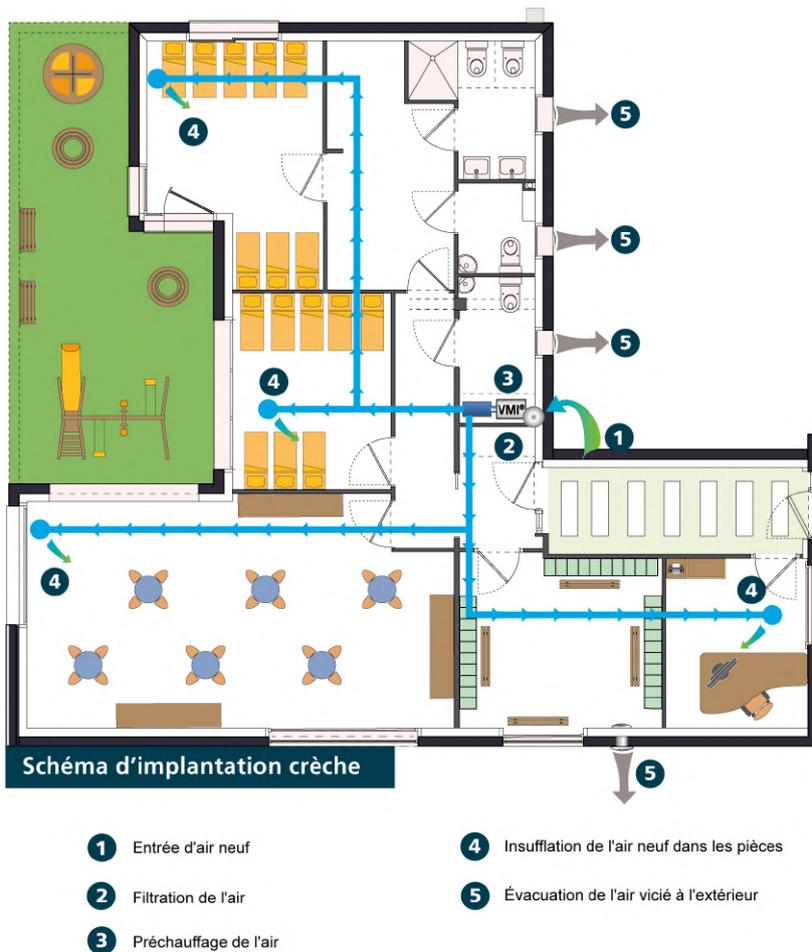


Fig. 2 - L'air neuf prélevé à l'extérieur du bâtiment et après son passage dans le caisson d'insufflation est acheminé par le réseau de distribution dans les différents locaux de la crèche.

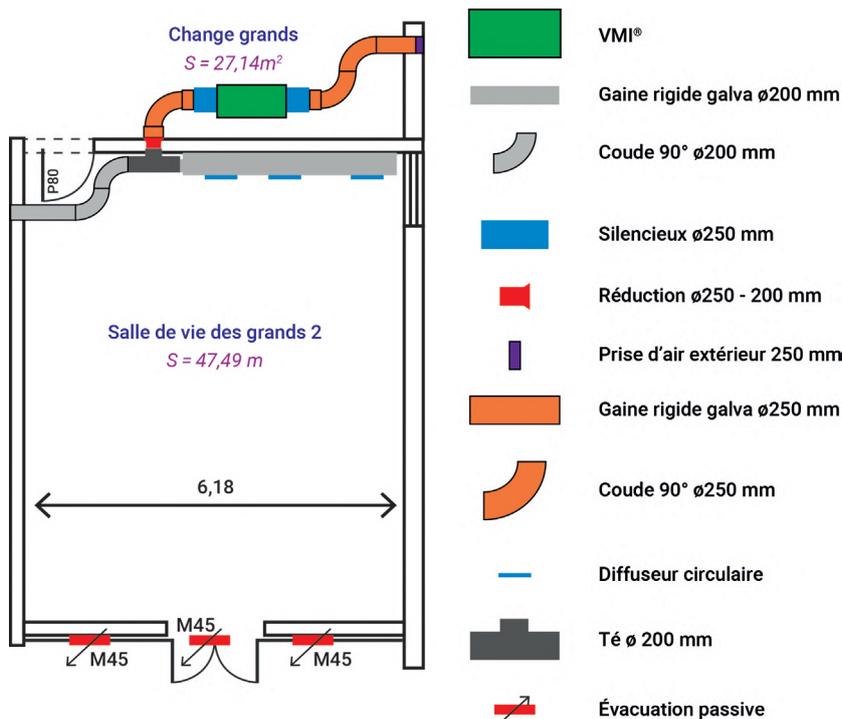


Fig 3- Plan de la salle étudiée et schéma de l'installation

Expérimentation in situ du procédé

Le local étudié, une des salles d'activités de la crèche, d'une surface de 48 m², possède une façade entièrement vitrée. Il communique directement avec l'extérieur par une porte à double battant. La façade vitrée comporte en partie haute deux fenestrons d'une surface de 0,30 m² chacun. Trois bouches d'extraction passives sont situées dans le dormant de chacun des fenestrons et dans celui de la porte.

Grandeurs mesurées et dispositif de mesures

La qualité de l'air intérieur est évaluée par la mesure des grandeurs caractéristiques suivantes :

- Température (°C)
- Humidité relative (%)
- Concentration en CO₂ (ppmv)
- Concentration en COV Totaux (g/m³)
- Concentration en particules fines PM 10, PM 2,5, PM 1 (g/m³)

La concentration en CO₂, en COV Totaux et en PM est mesurée et enregistrée par les capteurs. Ces derniers disposent d'une interface permettant l'enregistrement des données mesurées.

Le dispositif de mesure est constitué des éléments suivants :

- Température : capteur E4000NG Nanosense (précision +/- 0.3 °C)
- Humidité relative : E4000NG Nanosense (précision +/- 2 %)
- CO₂ : capteur E4000NG Nanosense - technologie NDIR (précision +/- 50 ppm)
- COVT : capteur E4000NG (technologie de sorption sur oxyde métallique semi-conducteur SnO₂ (dioxyde d'étain), précision +/- 15 %)
- Particules fines : capteur P4000NG (procédé par diffraction laser), précision +/- 15 %

Démarche méthodologique

Il n'était pas possible, au risque de se voir opposer le refus de la direction de l'établissement ou le manque de coopération du personnel, d'imposer des contraintes méthodologiques trop fortes pour mener cette campagne de mesure.

La démarche finalement retenue, permettant une évaluation réaliste des performances du système tout en perturbant le

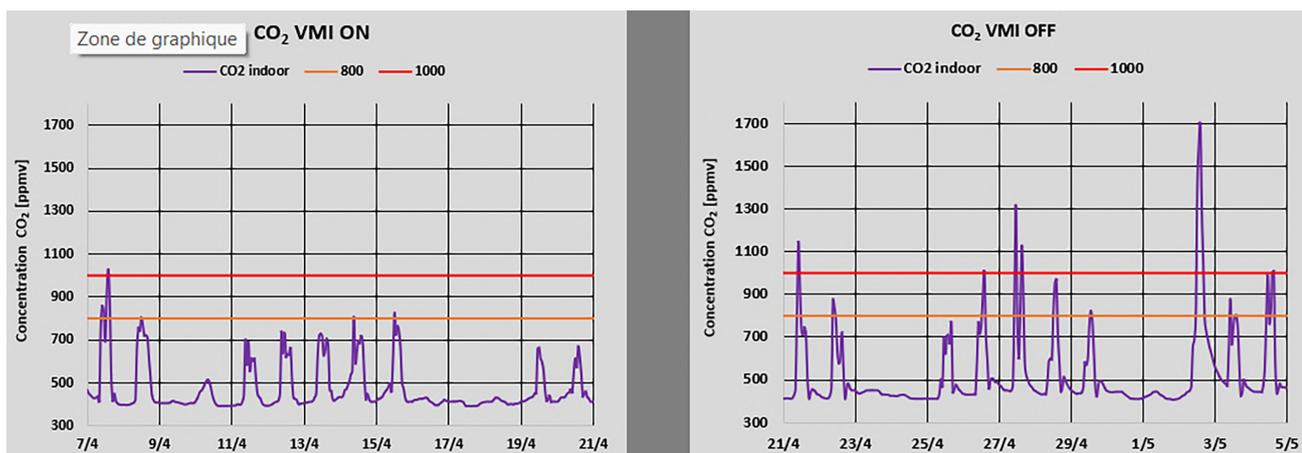


Fig. 4 - Evolution de la concentration en CO₂ - La courbe de gauche correspond au cas où la ventilation par insufflation est en fonctionnement, celle de droite à celui où le renouvellement d'air est assuré par l'ouverture des portes et des fenestrons.

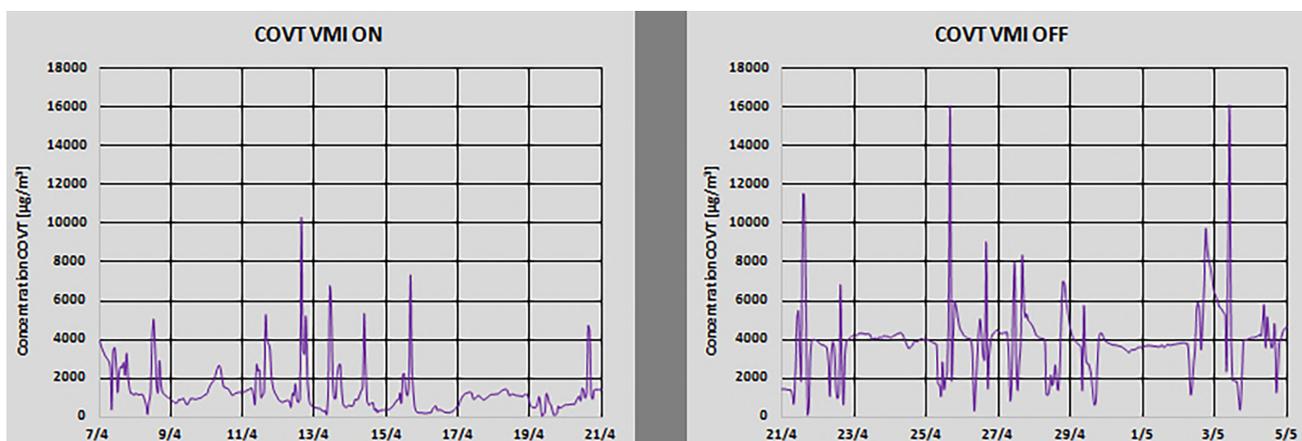


Fig.5 - Evolution de la concentration en COVT. A gauche avec la ventilation par insufflation en fonctionnement, à droite la ventilation par insufflation à l'arrêt.

moins possible les pratiques courantes de l'établissement, est la suivante :

- La période de mesures comprend deux semaines de fonctionnement avec la ventilation par insufflation suivies de deux semaines de fonctionnement de renouvellement d'air par simple ouverture des portes et des fenestrons.
- Les manœuvres d'ouverture et de fermeture de la porte extérieure, qui correspondent, pour partie, aux entrées et sorties des enfants, et des fenestrons sont laissées au libre choix du personnel. Celui-ci est tenu informé du statut de fonctionnement de la ventilation (jours « avec » et jours « sans » de fonctionnement de la ventilation par insufflation) mais sans qu'aucune consigne particulière concernant l'ouverture des fenêtres ne lui soit imposé.
- Les données analysées correspondent aux périodes d'occupation de ce local durant deux semaines calendaires consécutives, week-end exclus (la crèche étant fermée), du lundi au vendredi et de 8h à 19h.

Résultats

On compare dans ce qui suit, les concentrations en polluants mesurées dans la salle au cours des périodes :

- de fonctionnement de la ventilation par insufflation
- de renouvellement d'air par simple ouverture des portes et des fenestrons

Évolution de la concentration en CO₂

On note que, lors du fonctionnement de la ventilation par insufflation, la concentration en CO₂ ne dépasse pas 1100 ppm (figure 4). Celle-ci atteint 1700 ppm lors de la phase de fonctionnement par simple ouverture des portes et fenestrons.

Évolution de la concentration en composés organiques volatils totaux (COVT)

On note de fortes amplitudes de la concentration dans les deux modes de fonctionnement (figure 5). Cependant, la concentration moyenne calculée pour les deux modes de fonctionnement est la suivante :

- lors du fonctionnement de la ventilation par insufflation : 1845,29 g/m³ +/-291
- lors du fonctionnement de la ventilation par ouverture des portes et fenestrons : 3638 g/m³ +/-503

Évolution de la concentration en particules fines (PM 2,5)

On retiendra que, lors de la séquence de fonctionne-



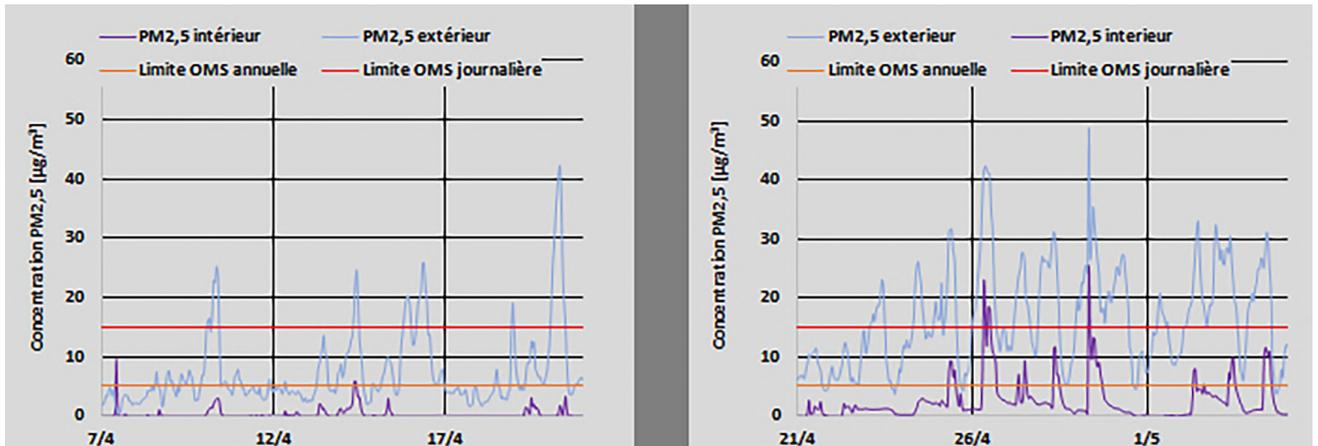


Fig.6 - Evolutions comparées de la concentration en particules fines (PM 2,5) entre l'air extérieur et l'air intérieur, avec la ventilation par insufflation (à gauche) et par simple ouverture des portes et des fenestrons (à droite).

ment de la ventilation par insufflation, la concentration dans l'air intérieur du local ne dépasse pas 2 g/m^3 alors que le renouvellement d'air est supérieur (figure 6). On note l'effet d'amortissement très net de la concentration intérieure en réponse au pic de concentration extérieure, lié à la présence d'un filtre dans le caisson d'insufflation.

La dynamique observée lorsque le renouvellement d'air n'est assuré que par la simple ouverture des portes et fenestrons est très différente. Dans ce dernier cas la concentration interne dépasse fréquemment les seuils définis par l'OMS.

Conclusions

L'introduction contrôlée par insufflation d'air neuf dans le local étudié permet de maintenir les concentrations de trois polluants caractéristiques à des niveaux très inférieurs aux valeurs seuils prescrites par l'OMS et, en France, par le Haut Conseil à la Santé Publique.

Un tel dispositif permet, en plus de l'adaptation du débit, une filtration efficace de l'air extérieur introduit dans les locaux. Il autorise en outre, lorsque la configuration des lieux s'y prête, d'implanter la prise d'air dans la zone où l'air extérieur est le moins pollué localement (dans une cour ou un jardin intérieur par exemple, plutôt que sur la façade donnant sur la rue).

Christian Feldmann, consultant, REHVA Fellow



Louis Stephan, responsable R & D, VMI-Ventilairsec



Arnaud Berchouchi, ingénieur ventilation VMI-Ventilairsec

