

AMÉLIORER LA VENTILATION DES LOCAUX DE TRAVAIL DU TERTIAIRE, PENDANT ET APRÈS LA PANDÉMIE DE COVID-19

Dans un contexte de pandémie, l'un des moyens de lutter contre les risques de transmission d'un virus est d'accentuer le renouvellement de l'air des locaux de travail et d'éviter son recyclage. Or les dispositifs existants pour mesurer les apports d'air neuf peuvent être complexes et coûteux à mettre en œuvre. Des travaux de l'INRS ont permis de développer une méthode pour quantifier le taux de renouvellement de l'air d'un local et de déterminer si celui-ci est en adéquation avec le nombre d'occupants et leur activité. L'approche décrite dans cet article pourrait, au-delà de la prévention du risque biologique, améliorer significativement la qualité de l'air dans les locaux du secteur tertiaire.

ROMAIN
GUICHARD,
FABIEN
GÉRARDIN
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

Contexte de l'étude : la crise sanitaire liée à la pandémie de Covid-19

Depuis le début de la pandémie de Covid-19 et avec l'apparition de nouveaux variants, différents moyens de prévention ont été progressivement mis en œuvre afin de limiter la transmission des virus. Par exemple, la distanciation et le port de masques permettent une réduction de la transmission *via* les gouttelettes, et la désinfection des surfaces et l'hygiène des mains réduisent le risque de contamination indirecte par contact.

Afin de limiter les possibilités de transmission par les aérosols, il est principalement conseillé d'augmenter le renouvellement de l'air des locaux par ventilation et aération, et d'éviter si possible le recyclage de l'air [1]. En dehors d'une période de pandémie, le renouvellement de l'air permet également de maintenir une bonne qualité de l'air intérieur (QAI), en évitant l'accumulation de polluants grâce au phénomène de dilution. Cependant, au-delà de cette recommandation générale, il reste difficile en pratique de savoir si les apports d'air neuf sont effectivement suffisants dans une situation donnée. Même en fixant un objectif de taux de renouvellement d'air, les méthodes de mesure normalisées qui existent pour l'estimer sont assez coûteuses et nécessitent une bonne expertise

du sujet. La méthode décrite dans cet article permet à la fois de quantifier de façon simple le taux de renouvellement d'air d'une pièce et de déterminer si celui-ci est en adéquation avec le nombre d'occupants et leur activité. Comme on le verra plus loin, cette méthode est basée sur la mesure de concentration en dioxyde de carbone (CO₂) que l'on peut indirectement relier au risque de transmission d'agents biologiques dans l'air. Au-delà de la prévention du risque biologique, cette approche présente la possibilité, à moyen terme, d'améliorer significativement la qualité de l'air dans les locaux du secteur tertiaire.

Constat : une ventilation insuffisante des locaux du tertiaire

Les débits d'air neuf minimaux à apporter dans les locaux de travail à pollution non spécifique sont imposés par le Code du travail (Cf. *Aide-mémoire juridique de l'INRS TJ 5 [2]*) et dépendent de l'activité physique des occupants. Le débit d'air neuf minimal pour une activité de bureau est de 25 m³/h/occupant. Afin de mieux comprendre ces valeurs, il est essentiel de revenir sur les calculs qui sont à l'origine de la réglementation actuelle.

Les débits d'air neuf à apporter ont été calculés dans l'annexe I de la circulaire du 9 mai 1985 [3],



RÉSUMÉ

La pandémie de Covid-19 a amené à reconsidérer la ventilation des locaux de travail dans le secteur tertiaire, en prenant en compte le risque biologique qui était jusqu'alors peu présent. Dans ce contexte, l'article démontre d'abord l'insuffisance des apports d'air neuf minimaux réglementaires en période de pandémie, mais aussi

en temps normal. De plus, les débits d'air effectivement introduits sont généralement difficiles à vérifier en pratique. La première proposition majeure est donc d'augmenter le renouvellement d'air dans ces locaux, tout en s'assurant qu'il reste compatible avec les contraintes énergétiques;

la seconde proposition est une méthode permettant de vérifier que les objectifs de renouvellement d'air en situation de travail sont bien atteints. Ces deux propositions majeures permettront d'obtenir une meilleure qualité de l'air dans ces locaux et d'y réduire le risque biologique lié aux aérosols.

Improving ventilation in workplaces in the service industry, during and after the Covid-19 pandemic

The Covid-19 pandemic led to reconsideration of ventilation of workplaces in the service industry, taking biological risks into account, which were not extensively considered up to now. In this context, the article demonstrates first that the minimal regulatory influx of fresh air is insufficient not only during a

pandemic, but also under normal circumstances. In addition, the air-flow effectively introduced tends to be difficult to verify in practice. The first major proposal is therefore to increase the rate of air renewal in these workplaces, while ensuring that it remains compatible with energy constraints.

The second proposal is a method to verify that the objectives for air renewal in a working situation are effectively achieved. These two major proposals will provide better air quality in these workplaces, and will reduce the biological risks due to aerosols.

en considérant qu'une concentration en dioxyde de carbone (CO₂) inférieure à 1000 parties par million (ppm) était synonyme d'une bonne qualité d'air. Cette hypothèse est communément admise dans les locaux à pollution non spécifique, c'est-à-dire les locaux où la pollution de l'air est uniquement due à la présence humaine, ce qui est le cas de la majorité des locaux tertiaires. La concentration en CO₂ dans l'air extérieur, ainsi que l'émission moyenne de CO₂ d'un être humain selon son activité physique, sont connues. Il est donc possible de calculer le débit d'air neuf à apporter dans une pièce pour ne pas dépasser la limite de 1000 ppm :

$$Q_{\text{air neuf}} = \frac{Q_{\text{air expiré}} \cdot C_{\text{air expiré}}}{C_{\text{limite}} - C_{\text{extérieur}}} \quad (1)$$

Où : $Q_{\text{air neuf}}$ est le débit d'air neuf provenant de l'extérieur à apporter par occupant [m³/h] ;

$Q_{\text{air expiré}}$ est le débit d'air expiré par un occupant [m³/h] ;

$C_{\text{air expiré}}$ est la concentration en CO₂ dans l'air expiré [ppm] ;

C_{limite} est l'objectif de concentration en CO₂ à ne pas dépasser [ppm] ;

$C_{\text{extérieur}}$ est la concentration en CO₂ dans l'air extérieur [ppm].

Dans la circulaire du 9 mai 1985, le calcul est réalisé avec $Q_{\text{air expiré}} = 0.36$ m³/h, $C_{\text{air expiré}} = 4,5$ % (soit 45000 ppm), $C_{\text{limite}} = 1000$ ppm et $C_{\text{extérieur}} = 300$ ppm.

Notons que le débit de CO₂ expiré, qui est le numérateur dans l'équation (1), est dans ce cas de 16,2 L/h. On obtient alors un débit d'air neuf de 23 m³/h/occupant, qui a été retenu à 25 m³/h/occupant dans la réglementation.

Cependant, la concentration en CO₂ dans l'air extérieur a progressé de plus de 20 % entre 1985 et 2021. Il est en effet difficile aujourd'hui de mesurer une concentration en CO₂ inférieure à 400 ppm (et bien davantage dans les environnements urbains), au lieu des 300 ppm pris en référence dans la circulaire, qui était déjà une valeur particulièrement basse en 1985, car la moyenne mondiale s'établissait alors à 350 ppm.

De plus, les débits respiratoires ont été largement sous-estimés. On sait aujourd'hui qu'un travailleur de bureau assis expire en moyenne 20,2 L/h de CO₂ [4,5] au lieu des 16,2 L/h retenus dans la circulaire. Une personne en activité physique modérée à intense expire entre 55,2 et 132 L/h [5] au lieu de 40.5 L/h, même si ces activités physiques plus intenses sont peu fréquentes dans les locaux tertiaires. Ces sous-estimations avaient finalement peu d'impact sur la qualité de l'air intérieur au moment de la parution de la circulaire, car les bâtiments étaient peu étanches et la consommation énergétique due au chauffage n'était pas au centre des préoccupations. Des taux d'infiltrations d'air élevés complétaient ainsi naturellement la ventilation contrôlée.

Les débits minimaux d'air neuf déterminés en 1985 sont :

- 25 m³/h/occupant pour un travail de bureau assis ;
- 45 m³/h/occupant en activité physique modérée ;
- 60 m³/h/occupant en activité physique intense.

En refaisant les mêmes calculs avec des valeurs actualisées, toujours pour un seuil de 1000 ppm, on obtiendrait :

- 34 m³/h/occupant pour un travail de bureau assis ;
- 92 m³/h/occupant en activité physique modérée ;
- 220 m³/h/occupant en activité physique intense.

Notons que l'aération par ventilation naturelle, assurée exclusivement par l'ouverture de fenêtres ou autres ouvrants donnant directement sur l'extérieur, est autorisée lorsque le volume par occupant est égal ou supérieur à 15 m³ pour les bureaux et 24 m³ pour les autres locaux [2].

Il est également intéressant de comparer les débits minimaux réglementaires d'air neuf à apporter par occupant en France par rapport aux autres pays européens. Les données du *Tableau 1* sont issues du projet *HealthVent* réalisé en 2013 et soutenu par la Direction générale de la santé et des consommateurs de la Commission européenne [6]. On note quatre groupes de pays proposant des plages de débits d'air neuf distincts entre 20 et 90 m³/h/occupant pour un travail de bureau. Avec 25 m³/h/occupant, la France impose l'un des débits les plus bas d'Europe, alors que la majorité des pays fixe des débits qui sont en accord avec les valeurs ci-dessus, entre 34 et 92 m³/h/occupant.

Ces débits sont également cohérents avec les travaux de Seppänen *et al.* [7], qui ont passé en revue la littérature relative à l'association entre les débits de ventilation et la qualité de l'air perçue dans différents environnements tertiaires. Les auteurs ont conclu, après leur analyse sur plus de trente mille sujets (dans des immeubles à usage commercial ou hébergeant des institutions), qu'un débit inférieur à 36 m³/h/occupant menait à une aggravation statistiquement significative d'un ou plusieurs problèmes de santé ou à la détérioration de la qualité de l'air perçue. Les conclusions de cette revue lient également la qualité de l'air intérieur à la concentration en CO₂, indiquant qu'une concentration inférieure à 800 ppm conduit à une réduction significative du risque de développer des symptômes liés au syndrome du bâtiment malsain¹.

Le 16 février 2021, le Conseil supérieur de la santé belge a rappelé que « la propagation du coronavirus par l'intermédiaire des aérosols joue un rôle important dans la transmission de l'infection dans les espaces clos » [8]. Il a recommandé de prévoir au moins 50 m³/h/occupant et, de préférence, 80 m³/h/occupant d'air neuf et de limiter le nombre de personnes en fonction de la capacité de ventilation, pour notamment « maintenir la concentration de CO₂ aussi faible que possible ».

PAYS	DÉBIT [m ³ /h/OCCUPANT]
Hongrie	90
Allemagne	90
Finlande	65
Portugal	60
Slovénie	53
Norvège	50
Tchéquie	50
Pays-Bas	43
Italie	40
Royaume-Uni	36
Bulgarie	36
Lituanie	36
Grèce	25
Roumanie	25
France	25
Pologne	20

← TABLEAU 1
Débits de ventilation minimaux réglementaires par occupant dans les bureaux.

Évaluation : techniques de mesure en question

Pour répondre à des objectifs réglementaires, il est nécessaire de disposer d'une méthode permettant d'estimer le débit d'air neuf apporté ou le taux de renouvellement d'air dans un bureau ou une salle de réunion. On rappelle que le taux de renouvellement d'air [vol/h] correspond au débit d'air neuf provenant de l'extérieur [m³/h] divisé par le volume de la pièce [m³]. Généralement, le débit d'air est estimé à partir du débit extrait par une ventilation mécanique contrôlée (VMC) ou à partir du débit moyen entrant par une entrée d'air calibrée. Cependant, cette technique est trop approximative lorsqu'une seule extraction mécanique sert à plusieurs pièces et du fait que le taux de renouvellement d'air n'est pas défini par rapport à l'air extrait mais par rapport à l'air introduit. Cela est particulièrement important dans les locaux bien isolés qui peuvent être mis en dépression par une VMC en aspiration sans pour autant renouveler suffisamment leur air. Dans le cas d'une entrée d'air calibrée, le débit indiqué reste très théorique. Seule une configuration faisant intervenir une centrale de traitement de l'air (CTA) avec un soufflage d'air contrôlé permet de mesurer directement un débit d'air neuf en conduite ou au niveau des bouches de soufflage, à la fois au moment de la réception de l'installation de ventilation et lors des contrôles périodiques. L'usage de CTA dans les locaux tertiaires de type bureau ou salle de réunion n'est cependant pas systématique.

En l'absence de connaissance des débits d'air neuf introduits, il est possible de mesurer directement le taux de renouvellement d'air par une méthode de croissance ou décroissance gazeuse. La norme NF EN ISO 12569: 2017 [9] explicite la méthodologie



à suivre, mais celle-ci n'est pas aisée à mettre en œuvre. En effet, elle nécessite de générer un gaz traceur de concentration connue et à un débit calibré, ce qui implique l'utilisation de matériel et de consommables coûteux, et est assortie d'un traitement des données non trivial. Cette norme est donc réservée à des techniciens ou experts en ventilation. En outre, il existe une grande incertitude sur le taux d'infiltration d'air, c'est-à-dire la proportion d'air entrant par les fuites dues à une mauvaise étanchéité à l'air de l'enveloppe des locaux. Des tests de perméabilité à l'air à l'aide d'une porte soufflante existent, comme décrit dans la norme NF EN ISO 9972: 2015 [10], mais sont peu utilisés en pratique en raison du matériel et de l'expertise nécessaires pour les mettre en œuvre.

Une approche basée sur le suivi de la concentration en CO₂ généré par la respiration humaine est proposée ci-après.

Concentration en CO₂ et risque biologique lié aux aérosols

En l'absence d'une source de pollution spécifique, la concentration en CO₂ est un bon indicateur du confinement d'un local de travail. Les occupants d'un local produisent, en respirant, du CO₂ qui se disperse dans le volume du local. Les apports d'air neuf provenant de l'extérieur viennent ensuite diluer la concentration résultante en CO₂. Ainsi, il est communément admis que :

- lorsque la concentration intérieure en CO₂ est proche de celle extérieure, l'air du local est considéré comme neuf ;
- lorsque la concentration intérieure est inférieure à 1 000 ppm, l'air est correctement renouvelé ;

- si elle est supérieure à 1 000 ppm, le local peut être considéré comme plutôt confiné, il devient donc nécessaire de le ventiler davantage.

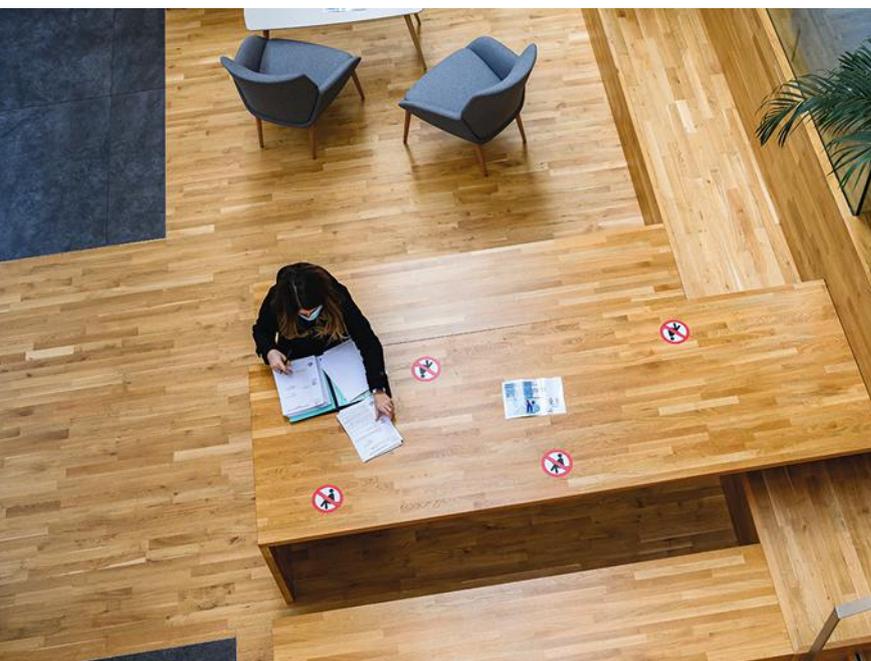
Au-delà des émissions naturelles de CO₂ (par respiration), les occupants vont également générer de l'humidité en proportion de leur activité physique, ainsi que des aérosols contenant potentiellement une charge virale ou bactérienne, lorsque l'émetteur est contaminé. La quantité d'aérosols émise est proportionnelle au volume d'air expiré pour une même personne, de même que la quantité de CO₂ émise. La concentration ambiante en CO₂ dans une pièce donne donc une indication directe sur le volume d'air qui a été expiré par les occupants sur une période donnée. Ainsi, si on parvient à réduire la concentration en CO₂ dans un local, on réduit d'autant le risque biologique lié aux aérosols (en l'absence de tout dispositif actif ou passif qui viserait à épurer uniquement le CO₂ de la pièce).

Pour cela, on peut agir sur :

- le nombre d'occupants dans la pièce ;
- la durée de présence des occupants ;
- l'activité physique des occupants ;
- le taux de renouvellement d'air de la pièce.

Rudnick et Milton [11] ont mis en évidence dès 2003 que le risque de transmission d'une infection par l'air pouvait être estimé à partir du suivi de la concentration en CO₂ dans les environnements intérieurs. Dans ce contexte, différentes propositions ont été publiées dans la littérature, afin d'abaisser les objectifs de concentration en CO₂, y compris hors période de pandémie de Covid-19. Un exemple particulièrement documenté a été publié par Du *et al.* [12]. Ces chercheurs ont étudié l'effet de la ventilation sur l'épidémie de tuberculose à l'université de Taipei à Taiwan. Au sein de cette université, 27 cas initiaux de tuberculose ont contaminé 1 665 cas contacts. Les salles étaient insuffisamment ventilées et les niveaux de CO₂ dépassaient 3 200 ppm. En travaillant sur la ventilation des locaux, les concentrations en CO₂ ont ensuite été réduites à 600 ppm. Malgré une seconde vague de cas rapportés de tuberculose, aucune transmission n'a ensuite eu lieu au sein de l'université. Une analyse multifactorielle détaillée a montré que la ventilation avait contribué à 97 % de l'absence de contamination, lors de la seconde vague. L'analyse montre également que pour la tuberculose, le nombre de reproduction de base R₀, c'est-à-dire le nombre attendu de nouveaux cas directement générés par un cas existant, est inférieur à 1 (l'épidémie s'arrête d'elle-même) pour des concentrations en CO₂ strictement inférieures à 1 000 ppm. À l'inverse, le R₀ est supérieur à 1 (l'épidémie de tuberculose se propage) lorsque la concentration en CO₂ est supérieure à 1 000 ppm. La tuberculose est provoquée par une bactérie². Pour le virus Sars-CoV-2 et ses nombreux variants (agents responsables de l'épidémie de Covid-19),

Bureau flexible aménagé en période de pandémie de la Covid-19.



© Gael Kerbaol/INRS/2021

ces valeurs ne sont pas encore connues, mais il est attendu que la réduction de la concentration en CO₂ s'accompagne d'une réduction de la propagation du virus, grâce à l'amélioration de la ventilation des locaux. Cela corrobore le fait que les contaminations sont généralement plus importantes lorsque la population passe davantage de temps dans les environnements intérieurs.

On rappelle que la ventilation des locaux ne représente qu'une partie des moyens de prévention à mettre en œuvre pour réduire le risque de contamination par une maladie infectieuse aéroportée. Dans le cas des coronavirus, les distances entre les personnes, le port du masque ainsi que l'ensemble des gestes barrières doivent toujours être respectés, afin de réduire le risque lié aux autres modes de transmission. Bien que le masque puisse contribuer également à réduire la propagation des aérosols émis par la respiration ou la parole, son efficacité globale vis-à-vis des aérosols est variable selon le type de masque utilisé (FFP2 ou autre) et son ajustement au visage³. On considère ici que cet effet viendra uniquement en complément de la protection collective, c'est donc bien le cumul de l'ensemble des moyens de prévention qui va permettre de réduire au maximum le risque de transmission d'une maladie.

Prédire et suivre la concentration en CO₂

Dans un contexte de prévention des risques professionnels, il semble pertinent de prédire l'évolution de la concentration en CO₂ pour une situation de travail donnée dans le secteur tertiaire. En cas de valeur trop élevée par rapport aux objectifs, il pourra être prévu une augmentation de la ventilation mécanique, une augmentation des durées d'aération ou la réduction des temps de présence, par exemple. La concentration en CO₂ peut être calculée grâce à la formule ci-dessous, en faisant l'hypothèse d'une concentration homogène dans la pièce :

$$C_{\text{intérieur}}(t) = \left(\frac{Q_{\text{air expiré}} \cdot C_{\text{air expiré}}}{Q_{\text{air neuf}}} + C_{\text{extérieur}} \right) \cdot (1 - e^{-\tau t}) + C_{\text{initiale}} e^{-\tau t} \quad (2)$$

Où : C_{initiale} est la concentration en CO₂ initiale dans le local [ppm] ;

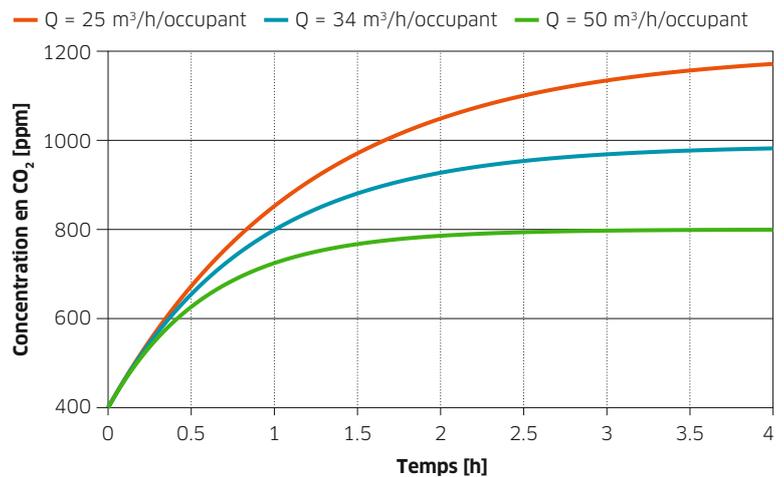
$C_{\text{intérieur}}$ est la concentration en CO₂ dans l'air intérieur [ppm] ;

t est le temps écoulé [h],

τ est le taux de renouvellement d'air [vol/h] qui est défini par :

$$\tau = \left(\frac{Q_{\text{air neuf}} \cdot N_{\text{occupants}}}{V_{\text{local}}} \right) \quad (3)$$

Où : $N_{\text{occupants}}$ est le nombre d'occupants du local, V_{local} est le volume du local [m³].



↑ **FIGURE 1**
Concentration en CO₂ dans un bureau de 26 m² avec deux occupants, pour différents débits de ventilation à partir d'un air neuf.

La quantité de CO₂ expirée varie selon l'âge des occupants en plus de leur activité physique. Pour des occupants de moins de 18 ans ou de plus de 70 ans, on peut retenir respectivement 14,4 et 17,3 L/h d'après Persily et Jonge [13]. En cas d'occupants d'âges variés, il est recommandé en première approximation d'utiliser la moyenne d'âge des occupants ou encore l'âge le plus représenté dans le local. Les équations (2) et (3) se simplifient grandement lorsque la concentration initiale est égale à la concentration extérieure, de sorte que :

$$C_{\text{intérieur}}(t) = C_{\text{extérieur}} + \left(\frac{Q_{\text{air expiré}} \cdot C_{\text{air expiré}} \cdot N_{\text{occupants}}}{\tau \cdot V_{\text{local}}} \right) \cdot (1 - e^{-\tau t}) \quad (4)$$

Ces formules ont été appliquées pour un bureau de 26 m² avec une hauteur sous plafond de 2,30 m, sur une durée de quatre heures et une concentration extérieure de 400 ppm. Deux occupants sont présents dans ce bureau et différents débits de ventilation ont été évalués. L'évolution de la concentration en CO₂ est représentée sur la Figure 1. On remarque que le débit minimal réglementaire (25 m³/h/occupant) amène à un dépassement des indicateurs de confinement au bout d'environ une heure quarante. Il n'est suffisant que s'il est complété par une aération complète du bureau toutes les heures et demie, c'est-à-dire un retour à la valeur de concentration extérieure en CO₂. Le débit actualisé (34 m³/h/occupant) conduit à une concentration qui n'atteint pas le seuil de 1000 ppm au bout de quatre heures, et ne nécessite donc pas d'aération complémentaire. Comme on l'a vu, cette valeur est acceptable hors situation de pandémie. Enfin, un abaissement de l'objectif de concentration en CO₂ à 800 ppm, comme recommandé par le Haut Conseil de la santé publique (HSCP) [13] dans les établissements recevant du public, par la Fédération européenne de chauffage – ventilation – climatisation (REHVA) [14], ainsi que par l'Académie



ENCADRÉ 1

PROTOCOLE D'ESTIMATION DU RENOUELEMENT D'AIR (LOCAL À POLLUTION NON SPÉCIFIQUE)

- 1 – Déterminer le volume du local. Noter la valeur V_{local} .
- 2 – Placer le détecteur de CO_2 à l'extérieur et attendre que la valeur n'évolue plus ; il suffit normalement de quelques minutes. Noter la valeur $C_{\text{extérieur}}$.
- 3 – Placer le détecteur de CO_2 à l'intérieur (à distance des murs, plafonds, portes, fenêtres, bouches de ventilation et occupants), attendre quelques minutes. Noter la valeur C_{initiale} , qui doit être idéalement proche de $C_{\text{extérieur}}$ afin de limiter les incertitudes de la méthode.
- 4 – Démarrer la situation de travail habituelle jusqu'à atteindre une concentration de 800 ppm. Noter le nombre d'occupants $N_{\text{occupants}}$ présents dans le local et la durée t_{final} au bout de laquelle

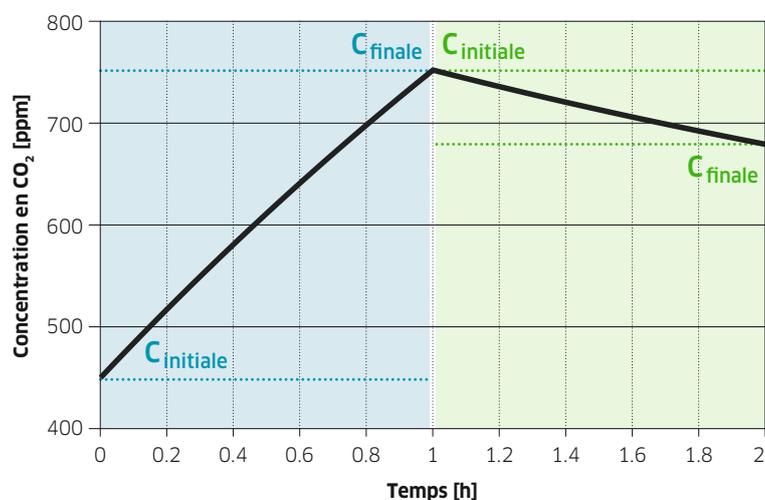
- cette concentration a été atteinte. Si la concentration de 800 ppm n'est pas atteinte au bout d'une heure, noter la valeur de concentration atteinte au bout d'une heure C_{finale} .
- 5 – Résoudre les équations (2) et (3) avec $t = t_{\text{final}}$ et $C_{\text{intérieur}}(t) = C_{\text{finale}}$ pour obtenir le taux de renouvellement d'air réel dans le local considéré.

Il est possible de poursuivre ce premier protocole afin de conforter la valeur obtenue, avec trois nouvelles étapes :

- 6 – Noter la valeur affichée par le détecteur de CO_2 suite au premier essai, qui devient la nouvelle C_{initiale} (Cf. Figure 2).
- 7 – En l'absence d'occupant, attendre la décroissance jusqu'à $C_{\text{extérieur}}$.

- Noter la durée t_{final} qui a été nécessaire pour l'atteindre. Si cette concentration n'est pas atteinte au bout d'une heure, noter la valeur de concentration atteinte au bout d'une heure C_{finale} . En pratique, cette étape nécessite d'avoir un visuel sur le détecteur depuis l'extérieur, ou d'utiliser un détecteur connecté, ou encore d'enregistrer les données mesurées.
- 8 – Résoudre les équations (2) et (3) avec $t = t_{\text{final}}$, $C_{\text{intérieur}}(t) = C_{\text{finale}}$ et $N_{\text{occupants}} = 0$ pour obtenir le taux de renouvellement d'air réel dans le local considéré*.

*Accéder à un outil de calcul dédié : www.carsat-lr.fr/home/entreprise/ameliorer-vos-conditions-de-travail/notre-assistance-technique.html



↑ FIGURE 2
Suivi de la concentration en CO_2 dans un bureau pour la détermination du taux de renouvellement d'air.

des sciences [15] dans le cadre de la pandémie de Covid-19, conduirait à un débit de $50 \text{ m}^3/\text{h}/\text{occupant}$. Ce débit est tout à fait cohérent avec les débits minimaux réglementaires, déjà adoptés par près de la moitié des pays européens en temps normal (Cf. Tableau 1). C'est aussi le débit minimum requis en période de pandémie par le Conseil supérieur de la santé belge dans son avis du 16 février 2021 [8], lui aussi basé sur un objectif de concentration à 800 ppm, apportant ainsi un facteur de dilution de l'air expiré supérieur à 100. Une simulation de l'évolution de la concentration en CO_2 permet déjà d'exclure des situations à risque ou d'adapter les moyens de prévention, afin de réduire au maximum les risques de transmission

d'une maladie infectieuse par les aérosols. Ensuite, il est important de vérifier que les paramètres indiqués et que les actions prévues correspondent bien à la réalité. Pour cela, on peut s'assurer que l'évolution de la concentration mesurée est similaire à celle prévue, à l'aide d'un détecteur portable de CO_2 calibré et positionné à une distance supérieure à un mètre des murs, du sol, du plafond, des portes et fenêtres, des bouches de ventilation et des occupants. La technologie infrarouge doit être préférée aux semi-conducteurs, avec une précision idéale de $\pm 50 \text{ ppm}$ sur la plage de 400 ppm à 1 000 ppm. La plupart des détecteurs commerciaux proposent un système d'alerte en cas de dépassement d'une valeur définie par l'utilisateur, qui peut se révéler utile en pratique (notification, signal lumineux et/ou sonore, affichage, etc.).

Le suivi de la concentration en CO_2 reste rare en entreprise, et souvent réservé au pilotage de CTA ou à l'ouverture automatique de *skydomes*⁴. La majorité des locaux du tertiaire sont par ailleurs ventilés *via* une simple VMC et ne sont pas équipés d'automates. L'usage de détecteurs de CO_2 en temps réel représente un intérêt majeur pour la prévention. En effet, les consignes d'aération et ventilation, en cas de pandémie par exemple, pourraient devenir beaucoup plus limpides et efficaces, telles que : « Assurez-vous de ne pas dépasser une concentration en CO_2 de 800 ppm au lieu des 1 000 ppm habituels », comme c'est déjà le cas en santé publique, dans les écoles et dans les restaurants d'entreprise [13 - 16]. La valeur guide à retenir est à établir par les experts *ad hoc* et

dépend de la nature de la pandémie concernée. Cela impliquerait d'office de réduire les sources de CO₂ (nombre d'occupants dans le bureau, la salle de réunion ou l'*open-space*), d'augmenter le renouvellement de l'air, de réduire les temps de présence continus, tout cela en adéquation avec l'activité physique des occupants (travail de bureau assis, travail dans une salle de sport, etc.). De même, le temps d'ouverture des fenêtres, qui est aujourd'hui préconisé de manière arbitraire (au moins quinze minutes toutes les trois heures), pourrait être bien plus adapté à la saison et à la situation. De très nombreux paramètres, tels que la forme, la taille et le nombre de fenêtres, l'écart de températures intérieure - extérieure, les conditions de vent, etc., peuvent impacter la durée nécessaire au renouvellement de l'air par les ouvrants. Cinq minutes peuvent suffire dans certains cas, alors que des durées allant jusqu'à trente minutes seront nécessaires dans d'autres cas. La fréquence d'ouverture des fenêtres la plus pertinente est également très variable selon la situation considérée. Avec un objectif de concentration en CO₂, les temps d'aération seraient adaptés à chaque situation. Le suivi de la concentration en CO₂ dans l'air intérieur *via* un détecteur permet de vérifier que cette dernière suit bien l'évolution prévue. Une alternative serait de déterminer directement le débit d'air neuf (ou le taux de renouvellement) de la pièce de façon ponctuelle, pour vérifier que le renouvellement de l'air y est suffisant.

Estimer simplement un taux de renouvellement d'air dans un local à pollution non spécifique

L'unique matériel particulier nécessaire pour effectuer cette mesure est un détecteur de CO₂ calibré, ayant une précision de +/- 50 ppm ou mieux sur la plage allant de 400 ppm à 1000 ppm. Dans le cas d'une grande pièce (d'une surface supérieure à 50 m²), plusieurs détecteurs peuvent être mis en œuvre. La moyenne des valeurs mesurées est alors utilisée. Le protocole, en cinq étapes (et pouvant être complété par trois étapes supplémentaires, le cas échéant), est détaillé dans l'*Encadré 1*.

La *Figure 2* montre un exemple de la concentration en CO₂ que l'on peut mesurer dans un local (bureau) d'un volume de 58 m³ (un seul détecteur). La première phase de croissance, de 0 à 1 heure, correspond à l'étape n° 4 du protocole décrit. Une seule personne a permis de générer la concentration en CO₂. La concentration de 800 ppm n'étant pas atteinte au bout d'une heure, les essais sont stoppés. Cette phase a permis de relever la concentration initiale (450 ppm) et la concentration finale (750 ppm) atteinte après une heure. La seconde phase de décroissance entre 1 et 2 heures correspond à l'étape n° 7 du protocole. La concentration extérieure n'étant pas atteinte, les essais sont également stoppés au bout d'une heure. On peut noter

la concentration initiale de cet essai (750 ppm) et la concentration finale correspondante (680 ppm). Le taux de renouvellement déterminé est de 0,28 vol/h, soit un débit d'air neuf de 16 m³/h. Notons que ce taux de renouvellement inclut à la fois les apports de la ventilation mécanique et des infiltrations d'air. La réglementation autorise ce fonctionnement car le volume du bureau est supérieur à 15 m³ par occupant. Le bureau peut donc être ventilé naturellement par les ouvrants [2]. Ses occupants devront néanmoins veiller à réaliser une aération systématique au bout d'environ une heure de présence. Si on souhaite prévoir pendant combien de temps il est nécessaire d'aérer, on peut estimer le taux de renouvellement d'air avec une fenêtre ouverte en répétant les étapes n° 6 à 8 du protocole ci-dessus. Dans les essais menés pour ce même bureau, un taux de renouvellement d'air de 5,2 vol/h a été obtenu, fenêtre ouverte, ce qui implique une aération de l'ordre de trente minutes pour revenir à la concentration initiale. L'aération nécessaire étant trop fréquente et trop longue pour respecter le confort thermique des occupants, il est ici recommandé d'augmenter les apports d'air neuf de façon permanente, par ventilation mécanique.

Solutions en cas de difficultés liées au conditionnement de l'air

Dans certaines situations, des apports d'air neuf élevés pourraient générer des difficultés pour maintenir le confort thermique des occupants ou pour maintenir une demande énergétique due au conditionnement de l'air acceptable. Plusieurs solutions permettent d'anticiper ces difficultés :

- l'augmentation des débits d'air neuf peut s'accompagner d'une augmentation de la surface des entrées d'air ou du nombre d'entrées d'air. Ainsi, pour un débit d'air supérieur, les vitesses d'air dans le local peuvent rester inférieures à 0,2 m/s, maintenant ainsi le confort thermique des occupants ;
- les systèmes de récupération de chaleur tels que des échangeurs thermiques peuvent contribuer à réduire la consommation énergétique due au conditionnement de l'air. C'est le principe des VMC appelées « double flux » : l'air extrait du local réchauffe partiellement l'air introduit par échange de chaleur, sans que ceux-ci ne soient mélangés ;
- en période de pandémie et en cas d'impossibilité technique à augmenter les apports d'air neuf au-delà du minimum réglementaire, des épurateurs d'air intérieur peuvent contribuer à réduire la concentration ambiante en aérosols, en complément des apports d'air neuf. Ces dispositifs n'auront aucun impact sur la concentration en CO₂. En l'état actuel des connaissances, seuls les dispositifs à filtration munis de filtres installés de manière étanche permettent d'arrêter efficacement les aérosols susceptibles de véhiculer



DÉBIT D'AIR ÉPURÉ (CADR) [m³/h]	TAUX DE RENOUVELLEMENT ÉQUIVALENT [vol/h]	RÉDUCTION DE LA CONCENTRATION EN AÉROSOLS ATTENDUE
0	0	0 %
58	1	78 %
116	2	88 %
174	3	92 %
232	4	94 %
290	5	95 %
348	6	96 %
406	7	96 %

↑ TABLEAU 2 Contribution de l'épuration à la réduction théorique de la concentration en aérosols dans un bureau de 58 m³ ventilé avec un débit d'air neuf de 16 m³/h, et pour différents débits d'air épuré.

DÉBIT D'AIR ÉPURÉ (CADR) [m³/h]	TAUX DE RENOUVELLEMENT ÉQUIVALENT [vol/h]	RÉDUCTION DE LA CONCENTRATION EN AÉROSOLS ATTENDUE
0	0	0 %
58	1	47 %
116	2	64 %
174	3	73 %
232	4	78 %
290	5	81 %
348	6	84 %
406	7	86 %

↑ TABLEAU 3 Contribution de l'épuration à la réduction théorique de la concentration en aérosols dans un bureau de 58 m³ ventilé avec un débit d'air neuf de 68 m³/h, et pour différents débits d'air épuré.

le virus, à condition d'un entretien régulier suivant les préconisations du fournisseur. Il est également nécessaire de s'assurer que ces purificateurs d'air intérieur sont adaptés au volume des locaux dans lesquels ils sont disposés, qu'ils n'entraînent pas des vitesses trop élevées pour limiter la dispersion des gouttelettes et qu'ils n'apportent pas de

Le *Tableau 2* montre la réduction relative de la concentration en aérosols pour une émission et un fonctionnement continu à différents débits d'air épuré CADR (*Clean Air Delivery Rate*) obtenus par filtration HEPA⁵. On fait l'hypothèse que l'écoulement d'air implique un mélange parfait des aérosols dans la pièce. La réduction est exprimée en relatif par rapport à la concentration d'aérosols en l'absence d'épurateur (CADR = 0 m³/h), c'est-à-dire avec les seuls apports d'air neuf dus à la ventilation de ce local. Le local considéré est le même que celui de la *Figure 2*. On remarque ici que la réduction théorique de la concentration en aérosols est assez importante, même pour un débit d'air épuré faible ; en revanche, celle-ci n'évolue plus pour des débits élevés. Si on s'intéresse au cas d'un local mieux ventilé (*Cf. Tableau 3*), l'épurateur d'air a un impact moins important sur la concentration en aérosols. Il est ici nécessaire de mettre en œuvre des débits plus élevés que dans l'exemple précédent pour constater une réduction significative de la concentration en aérosols.

POUR EN SAVOIR +

- Simulateur de l'évolution de la concentration en dioxyde de carbone dans un local fermé. Accessible sur : www.carsat-lr.fr/home/entreprise/ameliorer-vos-conditions-de-travail/notre-assistance-technique.html.

nuisance sonore. L'usage d'un épurateur nécessite donc différentes précautions qui seront précisées par des études à venir, notamment sur leur emplacement idéal au sein d'une pièce et sur les technologies d'épuration à privilégier. Pour plus d'informations concernant l'utilisation des purificateurs d'air intérieur en période de pandémie, consulter le communiqué de presse sur les dispositifs dits « anti-Covid-19 » [17].

Conclusions

Un état de l'art sur la ventilation des locaux de travail du tertiaire, et son lien avec le risque biologique et la concentration en CO₂, a été réalisé. Différentes propositions permettant d'améliorer la qualité de

l'air et de réduire les risques de transmission d'une maladie virale ou bactérienne *via* les aérosols en découlent :

- revoir la réglementation dans le sens d'une augmentation des débits d'air neuf minimaux dans les locaux à pollution non spécifique, afin de se mettre en conformité avec les connaissances actuelles ;
- équiper les entreprises de détecteurs de CO₂ à affichage direct ou connectés, pour leur permettre d'améliorer leur démarche d'évaluation des risques. Idéalement, la ventilation peut être ensuite automatiquement pilotée *via* ce détecteur pour optimiser la protection collective des occupants. Cette utilisation en installation fixe s'accompagne de contrôles et entretiens réguliers du détecteur ;
- donner des objectifs de concentration en CO₂ de 1 000 ppm en temps normal et une concentration moindre en période de pandémie. La valeur guide est à établir par les experts *ad hoc* selon la nature de la pandémie concernée. Pour la pandémie de Covid-19, la valeur de 800 ppm est proposée [13-16] ;
- démocratiser l'estimation du taux de renouvellement d'air par le suivi d'un protocole simple réservé aux locaux à pollution non spécifique, afin de vérifier que les apports d'air neuf sont conformes à ceux attendus et en accord avec la réglementation en vigueur ;
- mettre à disposition des épurateurs d'air basés sur de la filtration, en complément des apports d'air neuf, pour réduire le risque de transmission lié aux aérosols en période de pandémie. ●

1. Voir : Brochure INRS ED 6370. Accessible sur : www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206370.

2. La tuberculose est provoquée par *Mycobacterium tuberculosis* (également appelée bacille de Koch), dont le principal (mais pas le seul) organe cible est le poumon. Elle se transmet par l'air projeté ou par des expectorations des personnes atteintes. Son traitement requiert notamment la prise d'antibiotiques spécifiques, sur une durée de plusieurs mois. En savoir plus : www.inrs.fr/publications/bdd/eficatt/fiche.html?refINRS=EFICATT_Tuberculose.

3. Voir : www.inrs.fr/risques/biologiques/faq-masque-protection-respiratoire.html.

4. Un skydome est un hublot de toit servant de puits de lumière. La majorité des skydomes peuvent s'ouvrir de sorte à participer à l'aération naturelle des locaux ou à leur désenfumage en cas d'incendie.

5. Un filtre HEPA est un filtre à air de haute efficacité ; de l'anglais High efficiency particulate air : [filtre à] particules aériennes à haute efficacité.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier P. Velut (Carsat Languedoc-Roussillon), D. Bémer, F. Bonthoux, B. Courtois, B. Galland, A. Jenft et L. Robert (INRS) pour leurs apports et/ou leur relecture attentive de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

[1] FICHE PRATIQUE DE SÉCURITÉ – *Ventilation, chauffage et climatisation : quelles précautions prendre contre la Covid-19*. INRS, 2021, ED 149. Accessible sur : www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20149.

[2] AIDE-MÉMOIRE JURIDIQUE – *Aération et assainissement*. INRS, 2019, TJ 5. Accessible sur : www.inrs.fr/media.html?refINRS=TJ%205

[3] CIRCULAIRE DU 09 MAI 1985 relative au commentaire technique des décrets nos 84-1093 et 84-1094 du 07 décembre 1984 concernant l'aération et l'assainissement des lieux de travail. Accessible sur : https://sstie.ineris.fr/consultation_document/21593.

[4] DE GIDS W.F., WOUTERS P. – *Le CO₂ comme indicateur de la qualité de l'air intérieur. Principes généraux*. Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC) / Agence internationale de l'énergie, juillet 2010, n° VIP 33. Accessible sur : www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/VIP/VIP33_CO2%20General.fr.pdf.

[5] BUONANNO G., STABILE L., MORAWSKA L. – Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. *Environment International*, 2020, 141. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105794>.

[6] CARRER P. ET AL. – On the development of health-based ventilation guidelines: Principles and framework. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15. Doi : [10.3390/ijerph15071360](https://doi.org/10.3390/ijerph15071360).

[7] SEPPÄNEN O.A., FISK W.J., MENDELL M.J. – Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air*, 1999, 9(4), pp. 226-252. Doi : [10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x).

[8] AVIS DU CONSEIL SUPERIEUR DE LA SANTÉ DE BELGIQUE SUR LA GESTION DE L'AIR, 16 février 2021. Voir : www.health.belgium.be/fr/la-ventilation-des-espaces-de-vie-une-des-cles-de-voute-de-la-lutte-contre-le-coronavirus.

[9] NORME NF EN 12569 – *Performance thermique des bâtiments et des matériaux. Détermination du débit d'air spécifique dans les bâtiments – Méthode de dilution de gaz traceurs*. Afnor, 2017. Accessible sur : www.boutique-afnor.org (site payant).

[10] NORME NF EN ISO 9972 – *Performance thermique des bâtiments. Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments – Méthode de pressurisation par ventilateur*. Afnor, 2015. Accessible sur : www.boutique-afnor.org (site payant).

[11] RUDNICK S.N., MILTON D.K. – Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 2003, 13(3), pp. 237-245. DOI : <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x>.

[12] DU R.C. ET AL. – Effect of ventilation improvement during a tuberculosis outbreak in underventilated university buildings. *Indoor Air*, 2019, 30, pp. 422-432. Doi : <https://doi.org/10.1111/ina.12639>.

[13] PERSILY A., LONGE L. – Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 2017, 27, pp. 868-879. DOI : <https://doi.org/10.1111/ina.12383>.

[14] AVIS DU HAUT CONSEIL DE LA SANTÉ PUBLIQUE DU 28 AVRIL 2021 – *Covid-19 : aération, ventilation et mesure du CO₂ dans les ERP*. Accessible sur : www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1009.

[15] GUIDE REHVA DU 3 AOÛT 2020 – *How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces*. Accessible sur : www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V3_03082020.pdf.

[16] AVIS RENDU PAR L'ACADÉMIE DES SCIENCES LE 11 JUIN 2021 – *Protocole sanitaire : étendre rapidement l'usage des détecteurs CO₂ aux locaux d'enseignement*. Accessible sur : www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/protocole-sanitaire-etendre-rapidement-l-usage-des-detecteurs-co2-aux-locaux-d-enseignement.html.

[17] FICHE DU MINISTÈRE DU TRAVAIL, DE L'EMPLOI ET DE L'INSERTION ET DE L'ASSURANCE MALADIE DU 23 MARS 2021 – *Covid-19 : organisation et fonctionnement des restaurants d'entreprise*. Accessible sur : www.ameli.fr/meurthe-et-moselle/entreprise/covid-19/protocole-sanitaire-entreprise-un-guide-pour-aider-employeurs-et-salaries.

[18] INRS – Communiqué de presse du 19 novembre 2020 : *L'INRS met en garde contre certains dispositifs dits « anti-covid-19 »*. Accessible sur : www.inrs.fr/header/presse/cp-dispositifs-anti-covid.html.