

COVID-19 : Concepts de base concernant le dioxyde de carbone (CO₂) et sa mesure dans les bâtiments

29 juin 2021 – Version 1.0

Avant-propos

Ce document, rédigé dans le contexte de la pandémie de COVID-19, s'adresse d'abord aux gestionnaires de bâtiments publics, aux propriétaires d'immeubles ainsi qu'à l'ensemble des organismes et individus souhaitant en connaître davantage sur les thèmes couverts par ce survol de la littérature scientifique et grise. Ce document fait état des connaissances actuelles sur le dioxyde de carbone (CO₂), ses effets sur la santé, ses sources, son lien avec la ventilation des bâtiments ainsi que sur les différentes approches de mesure de ce paramètre et les façons d'interpréter les résultats obtenus. La méthodologie appliquée pour réaliser cette synthèse rapide des connaissances est présentée à l'annexe 1.

Ce document vise à fournir des informations clés qui pourront éventuellement guider les organisations concernées dans le choix d'un protocole de mesure approprié et d'une approche d'interprétation cohérente des résultats obtenus. Qu'il s'agisse du choix du type d'appareil à utiliser; des résultats de mesures ponctuelles, répétées ou en continu; du contexte de mesure et de la méthodologie à utiliser, ces éléments doivent répondre à des objectifs clairs et être interprétés avec prudence. En effet, la mesure du CO₂ correctement effectuée peut être utilisée à différentes fins, soit à titre d'indicateur d'émission de produits métaboliques (bioeffluents) par les occupants ou d'indicateur de ventilation, ou encore pour produire une analyse quantitative de l'intensité de la ventilation appliquée dans un milieu intérieur donné. À cet effet, le présent document mentionne différentes approches évaluatives, des lignes directrices et des recommandations actuellement en vigueur. **Il faut toutefois noter que le présent document ne constitue ni un protocole de mesure du CO₂ en milieu intérieur ni un guide de bonnes pratiques destiné à cette fin.**

Il est par ailleurs important de souligner que le Comité COVID-19 en santé environnementale, regroupant les principaux auteurs du présent document, a pour rôle d'assurer la veille scientifique, d'analyser son contenu et de rapporter les grands constats qui en ressortent. Puis, lorsque cela est requis, ce comité rédige des avis d'experts. Il n'a en aucun cas le mandat de se substituer aux décideurs ou aux gestionnaires de bâtiments pour déterminer les options à privilégier, ou encore pour dénouer les situations problématiques susceptibles de découler de la mise en application des options retenues.

Faits saillants

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz chimiquement stable dans des conditions environnementales dites normales. Le CO₂ est un constituant omniprésent de l'air ambiant dont la concentration est en augmentation depuis le début de l'ère industrielle en raison de la combustion de carburant fossile. En milieu intérieur, il provient essentiellement de l'air expiré lors de la respiration des occupants. Alors que sa concentration dans l'air extérieur est assujettie à de faibles variations locales, la concentration de CO₂ en milieu intérieur peut varier de façon importante, selon la densité d'occupation, le volume de la pièce, le type d'activité pratiquée, la durée d'occupation, la ventilation appliquée au milieu et, dans une moindre mesure, l'utilisation d'appareils à combustion. Ce sont majoritairement les échanges d'air avec le milieu extérieur, tant par l'entremise de la ventilation naturelle que de la ventilation mécanique, qui contribuent à moduler les concentrations de ce gaz dans les milieux intérieurs occupés.

En milieu intérieur, la présence de CO₂ aux concentrations usuellement rencontrées n'occasionne généralement pas d'effets sur la santé des occupants. Par ailleurs, les premières manifestations physiologiques associées à une exposition au CO₂, comme l'augmentation de l'acidité sanguine, la dilatation des bronches et l'augmentation du débit respiratoire, sont généralement observées lorsque les concentrations ambiantes atteignent 10 000 ppm sur une période d'au moins 30 minutes. Les résultats de nombreuses études suggèrent également que l'exposition au CO₂ à des concentrations bien inférieures (avoisinant les 1 000 ppm) pourrait engendrer des effets indésirables chez certains individus (étourdissements, fatigue, maux de tête, etc.). Les associations suggérées entre la manifestation de certains symptômes et l'exposition spécifique au CO₂ à des concentrations plus basses mériteraient cependant d'être davantage documentées, notamment au regard des processus biologiques sous-jacents. D'ailleurs, dans le but d'expliquer les effets observés, plusieurs auteurs font référence au syndrome du bâtiment malsain, ou *sick building syndrome*, affection mal définie, de sources potentiellement multifactorielles, qui se manifeste par des symptômes non spécifiques.

En ce qui concerne plus spécifiquement le lien possible entre la présence de concentrations élevées de CO₂ dans un milieu donné et le risque de transmission de la COVID-19, il est généralement convenu que des facteurs environnementaux et comportementaux de même nature (ventilation inadéquate, densité d'occupation élevée, etc.) sont susceptibles de mener à une augmentation des concentrations de ce gaz et d'aérosols infectieux dans l'air intérieur. Cependant, toute association directe entre une concentration de CO₂ élevée et la présence d'un risque accru de transmission de l'agent viral doit être interprétée avec prudence, considérant que le principal mode de transmission du SRAS-CoV-2 demeure les contacts directs ou rapprochés entre individus sur une période prolongée. Il est toutefois de plus en plus reconnu qu'une ventilation déficiente des milieux intérieurs occupés peut engendrer un risque accru d'accumulation d'aérosols et, incidemment, de transmission potentielle de la COVID-19.

C'est dans ce contexte que l'évaluation des concentrations de CO₂ en milieu intérieur, sur la base de protocoles conçus à cette fin, peut constituer une intéressante approche de caractérisation de l'intensité de la ventilation appliquée dans un milieu donné. En effet, la mesure du CO₂, correctement effectuée, peut être utilisée à différentes fins, soit à titre d'indicateur relatif d'émission de produits métaboliques (bioeffluents) par les occupants, d'indicateur de l'intensité de la ventilation (c.-à-d. si un milieu est sous-ventilé ou s'il bénéficie d'une ventilation suffisante) ou encore pour produire une analyse quantitative de l'intensité de la ventilation appliquée dans un milieu intérieur donné. Quelle que soit la situation, la mesure du CO₂ peut offrir de l'information indirecte sur les volumes d'air frais (apport d'air provenant de l'extérieur) délivrés dans un milieu intérieur donné, que ce milieu soit ventilé naturellement, mécaniquement ou encore de façon hybride (naturellement et mécaniquement).

En cohérence avec l'application d'un protocole de mesure validé, divers organismes reconnus ont élaboré des critères qui constituent différents outils d'interprétation et de gestion des mesures de concentration de CO₂ et ce, tant en contexte d'occupation usuelle des bâtiments qu'en période de pandémie. Bien qu'ils n'aient généralement pas force de loi, sauf dans les milieux de travail, ces critères font office de valeur guide pour l'application d'une ventilation adéquate dans les milieux intérieurs (voire optimisée en temps de pandémie). Ces organismes proposent d'ailleurs l'application de mesures correctives lorsque lesdits critères ne sont pas respectés. En somme, le recours à une ventilation adéquate ou optimisée des milieux intérieurs s'avère une mesure de suivi ou de contrôle environnementale complémentaire jugée efficace pour réduire le risque d'exposition aux contaminants de l'air intérieur, incluant certains agents pathogènes susceptibles de s'y retrouver.

Caractéristiques générales du CO₂

Le dioxyde de carbone (CO₂), également appelé gaz carbonique ou anhydride carbonique, est un composé inorganique issu de la combinaison de deux éléments chimiques, soit le carbone et l'oxygène. Le CO₂ est un gaz incolore, inodore, insipide, ininflammable, soluble dans l'eau et chimiquement stable dans des conditions dites normales. Il provient essentiellement des organismes vivants (généré lors du processus de respiration), de la combustion et de la dégradation microbienne de la matière organique de même que la manifestation de certains processus géologiques dont les émissions volcaniques et l'altération chimique de certains minéraux. Le CO₂ est retranché de l'atmosphère, par absorption, dans les masses d'eau de surface (dont les océans) ainsi que par l'entremise du processus de photosynthèse (Gouvernement du Canada, 2015). En raison de sa structure moléculaire, le CO₂ absorbe une fraction du rayonnement solaire infrarouge qu'il réémet sous forme de rayonnement thermique. C'est ainsi que le CO₂ atmosphérique contribue au processus d'effet de serre causant le réchauffement planétaire (Ministère de l'Environnement, 2021).

Sources et concentrations dans l'air extérieur

Le CO₂ est un constituant naturel de l'air ambiant, et sa teneur volumique moyenne est actuellement d'environ 0,04 %. Quant à sa concentration dans l'air extérieur, fréquemment exprimée en partie par million – ppm (Organisation internationale de normalisation – ISO, 2012), elle est actuellement estimée à 41 ppm (Lindsey, 2020), mais elle peut varier selon les endroits et le moment de la journée ou de l'année (Allen *et al.*, 2020; ASTM International, 2018; De Gids et Wouters, 2010). En raison de l'industrialisation, de la déforestation et de l'utilisation accrue des énergies fossiles à l'échelle de la planète, les concentrations atmosphériques de CO₂ ont augmenté d'environ 80 ppm au cours du dernier siècle (ISO, 2012; Zhang *et al.*, 2017). L'augmentation annuelle moyenne des concentrations de CO₂ atmosphériques est environ 100 fois plus rapide depuis les 60 dernières années que pendant les décennies antérieures (Lindsey, 2020).

En milieu extérieur, urbain ou rural, les sources d'émissions de CO₂ sont principalement associées à différents procédés impliquant la combustion de carburants fossiles ou biosourcés – ex. : automobile, industrie, appareils de chauffage, etc. (De Gids et Wouters, 2010; Environmental Health and Safety – EHS, 2014; Prill, 2000). À titre d'exemple, il est estimé que les émissions canadiennes de CO₂ ont atteint 729 mégatonnes en 2018; les secteurs de l'exploitation pétrolière et gazière et des transports ayant contribué à plus de 50% des émissions totales (ECCC, 2020).

Sources et concentrations dans l'air intérieur

En milieu intérieur, les occupants constituent généralement la principale source d'émission de CO₂ (Küçükhüseyin, 2021); l'air expiré par un individu en temps normal contiendrait environ 4 % de CO₂ – soit environ 40 000 ppm, tandis que l'air extérieur en contiendrait environ 0,04 % – soit 410 ppm (De Gids et Wouters, 2010; Peng et Jimenez, 2021; Prill, 2000). La concentration de CO₂ générée par la respiration humaine est donc environ 100 fois plus élevée que la concentration présente en milieu extérieur (Prill, 2000;

Zhang *et al.*, 2017), ce qui explique pourquoi les concentrations de CO₂ augmentent rapidement en présence d'individus dans un milieu intérieur fermé insuffisamment ventilé. Les volumes de CO₂ exhalé par un individu donné dépendent du type et de l'intensité de l'activité physique pratiquée, de l'âge de cet individu, de son genre, de sa masse corporelle et de son régime alimentaire, soit de l'activité métabolique de cet individu (ASTM International, 2018; De Gids et Wouters, 2010; Eykelbosh, 2021; ISO, 2012; Persily et Jonge, 2017). Il faut toutefois noter que la fumée de cigarette, les émanations gazeuses issues d'appareils de combustion, les bougies, l'encens de même que les animaux et les plantes¹ constituent autant de sources potentielles de CO₂ en milieu intérieur (Eykelbosh, 2021; ISO, 2012). Les concentrations présentes dans les milieux intérieurs insuffisamment ventilés peuvent exceptionnellement être 10 fois plus élevées qu'en milieu extérieur (c.-à-d. plus de 4 000 ppm), bien que celles-ci se situent généralement sous les 2 000 à 2 500 ppm (Zhang *et al.*, 2017). Par ailleurs, dans certaines circonstances, l'air extérieur peut constituer une source de CO₂ (et d'autres contaminants associés) pour les milieux intérieurs, notamment lors d'incendies, de feux de forêt ou de forte production de pollution engendrée par les industries ou le trafic routier (Santé Canada, 2020b). En marge de ces contextes spécifiques, l'air extérieur est généralement considéré comme une source d'air frais pour les milieux intérieurs.

Effets de la ventilation sur les concentrations de CO₂ en milieu intérieur

En raison de la présence d'échange d'air involontaire (infiltrations et exfiltrations passives à travers l'enveloppe du bâtiment) ou volontaire (ventilation naturelle, mécanique ou hybride)² avec le milieu extérieur, il peut être envisagé que la concentration de CO₂ observée dans l'air intérieur d'un bâtiment soit relativement similaire à celle de l'air extérieur, ce qui suppose l'atteinte d'un certain équilibre des concentrations gazeuses entre les deux milieux. Un tel équilibre ne sera toutefois pas atteint si l'environnement intérieur en question est affecté par une ou des sources de CO₂ (ex. : présence d'occupants ou d'émissions associées à l'utilisation d'appareils à combustion) et que ces émissions ne sont pas évacuées ou diluées à l'aide d'une ventilation suffisante. Dans de telles conditions, les concentrations de CO₂ qui en résultent seront donc tributaires de l'importance ou de l'intensité des émissions desdites sources ainsi que de l'intensité des échanges d'air volontaires et involontaires avec le milieu extérieur (ISO, 2012).

La ventilation (qui consiste à introduire de l'air frais et à extraire de l'air vicié d'un bâtiment) induite par l'ouverture des portes et des fenêtres (ventilation dite naturelle) ou par l'utilisation d'un système de ventilation mécanique est reconnue comme une mesure efficace pour diminuer les concentrations de contaminants de l'air intérieur, dont le CO₂ (Gouvernement du Canada, 2018 ; Lajoie *et al.*, 2006). À titre d'exemple, Fehlmann et Wanner (1993) rapportent que les concentrations maximales de CO₂ mesurées dans une chambre fermée (dépourvue de ventilation mécanique ou naturelle volontaire) et occupée par deux personnes perdant une nuit entière atteignaient 4 300 ppm. En répétant l'exercice tout en maintenant entrouverte la porte de la chambre (laquelle permet un certain échange d'air avec le reste du logement), la concentration maximale enregistrée n'excédait pas 1 700 ppm.

¹ Par l'entremise de la photosynthèse, les plantes produisent de l'oxygène (O₂) à partir du CO₂, mais en consomment également pour combler leurs propres besoins métaboliques. Il est généralement présumé que les plantes absorbent davantage de CO₂ qu'elles en émettent. (voir : <https://www.quebecscience.qc.ca/pose-ta-colle/les-plantes-sont-elles-nocives-pendant-la-nuit/>)

² Ventilation : Il s'agit d'un processus d'admission et d'évacuation d'air par des moyens mécaniques ou naturels.

Ventilation mécanique : La ventilation mécanique désigne tout dispositif comportant au moins un équipement motorisé d'évacuation ou d'alimentation forcée d'air.

Ventilation naturelle : Il s'agit de l'entrée d'air extérieur à travers des ouvertures spécialement aménagées, comme des fenêtres et des portes, ou à travers des ventilateurs passifs, ou par infiltration.

Ventilation hybride : Elle désigne une combinaison de dispositifs de ventilation naturelle et d'un système de ventilation mécanique.

Les résultats d'une étude portant sur l'évaluation de la qualité de l'air dans une école naturellement ventilée ont montré que les concentrations de CO₂ d'une classe occupée pouvaient varier de façon importante lorsque, d'une part, les fenêtres et la porte étaient fermées – 1 385 ppm – et, d'autre part, lorsque les fenêtres et la porte étaient ouvertes – 1 058 ppm (M. Legris, communication personnelle, 2021). C'est d'ailleurs sur la base de telles données probantes que les recommandations en matière de ventilation des milieux occupés sont formulées par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE (2019); voir également les études suivantes effectuées dans des garderies (St-Jean *et al.*, 2012), dans des écoles (Fromme *et al.*, 2008) et en milieux de soins (Zhou *et al.*, 2015).

Ainsi, la concentration de CO₂ dans une pièce d'un milieu intérieur donné demeure essentiellement tributaire de la concentration de CO₂ présente dans l'air extérieur, de l'intensité des émissions des sources de CO₂ en présence (ex. : nombre d'occupants et types d'activités pratiquées par ces derniers dans ladite pièce) et des échanges d'air entre cette pièce et les autres pièces du bâtiment ainsi qu'avec le milieu extérieur, lesquels peuvent être notamment modulés par la ventilation naturelle, mécanique ou hybride (NCCEH, 2010; Eykelbosh, 2021; Zhang *et al.*, 2017). Il faut noter que les processus susceptibles d'atténuer les concentrations de CO₂ peuvent également entraîner la diminution des concentrations d'autres contaminants gazeux ou particulaires de l'air intérieur.

Métabolisme et toxicocinétique du CO₂

Le CO₂ est un sous-produit du métabolisme de respiration cellulaire (en aérobie) généré par les différents tissus et organes constituant le corps humain (Guais *et al.*, 2011; Küçük Hüseyin, 2021; Louis *et al.*, 1999). Dans l'organisme humain, le CO₂ est régulé avec précision, si bien qu'en situation normale la pression partielle artérielle de CO₂ (PaCO₂) demeure généralement constante (Louis *et al.*, 1999). Le CO₂ produit dans les tissus et les organes se déplace vers la circulation veineuse avant d'être rejeté dans l'environnement par les poumons lors de l'expiration. En conditions normales, la pression partielle de CO₂ dans le sang capillaire pulmonaire n'excède pas 6,75 % (ou 45 mm Hg)³ et demeure supérieure à celle de l'air alvéolaire. Ce gradient de pression partielle entre le sang et l'air alvéolaire permet au CO₂ de diffuser passivement au travers de la membrane alvéolaire et d'être évacué des poumons avec l'air expiré. Plus l'activité métabolique est élevée, plus les volumes de CO₂ produits et subséquemment expirés sont considérables. Par conséquent, une personne active produira plus de gaz carbonique qu'une personne inactive ou au repos. Plus la concentration de CO₂ de l'air d'un milieu donné augmente (ex. : dans une pièce occupée maintenue en condition fermée), plus le gradient de concentration en CO₂ entre le sang et l'air alvéolaire diminue. Cette exposition accrue au gaz carbonique entraîne une augmentation concourante de la concentration sanguine de CO₂, qui, en retour, peut produire diverses réponses physiologiques dont la nature dépendra de l'ampleur et de la durée de l'exposition. Toute concentration de CO₂ du sang artériel entraînant une augmentation de la pression artérielle partielle de CO₂ au-delà de 6,75 % (ou de 45 mm Hg) constitue une hypercapnie (Guais *et al.*, 2011). Le maintien d'une concentration de CO₂ sanguine constante s'avère important en raison du fait que cette dernière contribue notamment au processus de régulation du pH sanguin pouvant impliquer une régulation rénale ainsi qu'une modulation du rythme cardiaque et respiratoire. La respiration est d'ailleurs le principal moyen de réguler le CO₂ et, par conséquent, le pH sanguin dans une plage qui est optimale (Guais *et al.*, 2011).

³ La plage dite normale de la pression artérielle en CO₂ se situe entre 35 et 45 mm Hg

Effets du CO₂ sur la santé aux concentrations potentiellement trouvées dans les milieux intérieurs

En milieu intérieur, la présence de CO₂ aux concentrations usuellement rencontrées n'a pas d'effets sur la santé des occupants (Xiaojing Zhang *et al.*, 2015). Les premières manifestations fonctionnelles associées à une exposition au dioxyde de carbone (CO₂) sont généralement observées lorsque les concentrations de CO₂ ambiantes atteignent 10 000 ppm pendant au moins 30 minutes. Une telle exposition (généralement associée à la présence d'une source significative de CO₂ dans un milieu donné) entraîne, chez des personnes en santé, une légère augmentation de la PaCO₂ et de l'acidité sanguine (non pathologique). Cette augmentation se traduit notamment par une manifestation des mécanismes physiologiques de régulation de ces paramètres sanguins comme l'augmentation du débit cardiaque et l'hyperventilation sollicitée par le système cardio-pulmonaire. L'intensité de la réponse ventilatoire est d'ailleurs considérée comme dose-dépendante et reproductible (Louis *et al.*, 1999). C'est justement pour éviter la survenue de ce type d'effet que la majorité des organismes internationaux ainsi que la CNESST ont déterminé que la valeur d'exposition moyenne pondérée pour le CO₂ sur 8 heures ne devrait pas dépasser 5 000 ppm, soit une concentration deux fois moins élevée que la valeur de 10 000 ppm, afin de protéger les populations plus vulnérables (CNESST, 2021). Pour plus de détails, voir la section [Lignes directrices générales à l'égard de la mesure du CO₂ en milieu intérieur](#).

En marge de la caractérisation des effets aigus pouvant se manifester à la suite d'une exposition à ce gaz à des concentrations relativement élevées, de nombreux auteurs ont tenté de caractériser les effets pouvant survenir lors d'expositions à de plus faibles concentrations de CO₂ sur une période prolongée (typiquement autour de 1 000 ppm de CO₂). La plupart de ces études, effectuées dans des bâtiments privés ou publics, ne permettaient généralement pas de percevoir des effets spécifiques du CO₂ sur la santé et le confort des occupants, mais plutôt l'effet combiné de différents contaminants (dont le CO₂) avec les autres déterminants de la qualité de l'air intérieur. À cet effet, les auteurs de plusieurs études épidémiologiques réalisées en milieu de travail (J. G. Allen *et al.*, 2016; Apte *et al.*, 2000; Erdmann et Apte, 2004; Lu *et al.*, 2015; Tsai *et al.*, 2012) ou en milieu scolaire (Muscatello *et al.*, 2015; D. Norbäck *et al.*, 2011; Dan Norbäck *et al.*, 2013; Simoni *et al.*, 2010) rapportent un lien entre l'altération de la qualité de l'air intérieur et certains effets potentiels sur la santé des occupants.

Les adéquations suggérées entre l'incidence de certains symptômes et l'exposition spécifique au CO₂ méritent d'être étayées, notamment au regard des processus biologiques sous-jacents (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail – Anses, 2013b). Cependant, la présence de ce gaz dans les milieux étudiés n'engendrerait probablement pas directement des effets documentés sur la santé des occupants. L'exposition à d'autres contaminants de l'air intérieur présents de façon concurrente pourrait ainsi avoir entraîné les effets observés. L'étude menée par Zhang *et al.* (2017), en conditions contrôlées, corrobore d'ailleurs cette affirmation (ANSES, 2013b). Plusieurs des études précédemment citées font référence au syndrome du bâtiment malsain⁴ ou *sick building syndrome*, une affection définie par une diversité de symptômes non spécifiques, pour expliquer les effets documentés (voir Kùçùkhüseyin, 2021). Le CO₂ est donc utilisé par la majorité des auteurs cités davantage comme un indicateur de ventilation ou un proxy général de la qualité de l'air intérieur que comme un indicateur d'effets potentiels sur la santé des occupants, pouvant survenir dans un milieu intérieur donné – voir la section [Pertinence de la mesure du CO₂ à l'intérieur des bâtiments](#).

⁴ Il est question de syndrome des bâtiments malsains (SBM) lorsque les occupants d'un immeuble éprouvent des effets indésirables pour leur santé qui sont apparemment liés au temps que ces occupants passent dans l'immeuble, mais que l'on ne peut attribuer à aucune maladie ou cause particulière.
https://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/iaq_intro.html?=&wbdisable=true#:~:text=On%20parle%20de%20syndrome%20des,aucune%20maladie%20ou%20cause%20particuli%C3%A8re.

Concentration de CO₂ d'un milieu intérieur et potentiel de transmission de la COVID-19

Comme mentionné précédemment, les concentrations de CO₂ dans l'air intérieur d'un milieu donné (provenant essentiellement des occupants présents) varient en fonction de la densité des occupants et de la durée d'occupation, du type d'activité pratiqué par ces occupants et de la ventilation appliquée dans le milieu. Il faut souligner au passage que ces mêmes facteurs ont aussi été associés à la transmission potentielle du SRAS-CoV-2 en milieu intérieur.

De façon générale et dans la majorité des contextes documentés, la transmission à courte distance (moins de 2 mètres) est reconnue comme le principal mode de transmission de la COVID-19. Les données scientifiques laissent toutefois croire que, dans des endroits à dimensions restreintes mal ventilés et occupés par une forte densité d'individus sur une période prolongée, la transmission pourrait survenir tant à courte distance (< 2 mètres) qu'à plus de 2 mètres de la personne infectée (Centers for Disease Control and Prevention – CDC, 2021; Groupe de travail sur la ventilation, 2021). Ainsi, ces mêmes facteurs environnementaux et comportementaux pourraient mener autant à une augmentation de la concentration de CO₂ dans un milieu donné qu'à un accroissement du risque de transmission de la COVID-19. Par contre, toute association entre une concentration de CO₂ relativement élevée (ex. : > 1 000 ppm) et la présence de ce risque accru de transmission du SRAS-CoV-2 doit être prise en compte avec prudence, puisque ce n'est pas la concentration de CO₂ en elle-même qui est associée au risque infectieux, mais bien les conditions de suroccupation (et de sous-ventilation) d'un milieu donné, qui mènent à la fois à l'augmentation des concentrations de CO₂ et à l'accroissement au risque de transmission du SRAS-CoV-2.

Pertinence de la mesure du CO₂ à l'intérieur des bâtiments

Il est généralement admis que les déficits de ventilation dans les milieux intérieurs occupés sont susceptibles d'engendrer des risques pour la santé des occupants. Que la ventilation soit assurée de façon naturelle ou mécanique, il s'avère important d'évaluer les besoins en cette matière (lesquels sont parfois évolutifs ou fluctuent selon le type d'utilisation et d'occupation du milieu) afin d'optimiser le renouvellement de l'air intérieur requis selon le contexte. En période de pandémie, la plupart des organismes reconnus recommandent d'optimiser la ventilation des milieux intérieurs, ce qui signifie que les taux d'échange d'air devraient idéalement excéder ce qui est prescrit par les standards usuels, soit en actionnant plus souvent les dispositifs de ventilation en haute vitesse ou en échange d'air avec l'extérieur (c.-à-d. en limitant la recirculation de l'air intérieur), ou encore en les laissant fonctionner, à bas régime, en période d'inoccupation des lieux (Groupe de travail sur la ventilation, 2021).

Les standards de ventilation actuels ne sont pas basés sur la prévention des problèmes de santé, mais plutôt sur la prévention d'inconforts reliés à l'exposition aux bioeffluents – ex. : odeurs corporelles (Lajoie *et al.*, 2006). Comme il existe des techniques de mesure du CO₂ fiables, robustes et peu coûteuses, la mesure de ce gaz en milieu intérieur peut être utile, notamment, comme indicateur pour évaluer si l'air ambiant est suffisamment confortable pour les occupants ou encore pour estimer ou déterminer quantitativement si l'usage de la ventilation répond aux exigences du milieu. Sireesha (2017) a d'ailleurs brossé un intéressant portrait des arguments justifiant la mesure du CO₂ dans les bâtiments scolaires. Il demeure toutefois notable d'appliquer des approches évaluatives robustes et cohérentes afin de générer des données représentatives de l'environnement à étudier.

Par ailleurs, en dépit de ses qualités intrinsèques de gaz traceur, le CO₂ ne peut généralement pas être considéré comme un indicateur unique de la qualité de l'air intérieur ni de l'efficacité du système de ventilation en place, le cas échéant. En effet, une évaluation étoffée de la qualité de l'air intérieur est beaucoup plus complexe, et variera, entre autres, selon les sources de contaminants dans le bâtiment (dont ceux issus des

matériaux de construction et de rénovation, des produits chimiques utilisés, dont les produits nettoyants, etc.), ses conditions d'usage et le comportement des occupants et l'état du bâtiment lui-même, sa localisation et son environnement immédiat, etc. L'évaluation de la qualité de l'air intérieur nécessite généralement le déploiement d'une approche multifactorielle et l'analyse concourante de plusieurs paramètres de nature environnementale, comportementale, structurale et mécanique (Levasseur *et al.*, 2017). En revanche, il est reconnu que la mesure de concentrations élevées de CO₂ en milieu intérieur peut notamment être associée à une ventilation déficiente ainsi qu'à divers enjeux corollaires, dont l'accumulation de poussières, d'irritants, d'allergènes, de composés organiques volatils et d'humidité excessive (NCCEH, 2010). Ainsi, le monitoring du CO₂ peut s'avérer une approche intéressante pour réaliser une vigie ou une surveillance générale des milieux intérieurs en vue d'intervenir avant que ne se manifestent des inconforts de même que des problèmes de santé et de productivité (Prill, 2000; Sireesha, 2017). Toutefois, l'interprétation de tels résultats doit être effectuée avec discernement, puisque l'évaluation des concentrations de CO₂ ne renseigne en rien sur la présence potentielle d'autres contaminants aux effets délétères (ex. : monoxyde de carbone [CO], radon [222Rn]) ou encore de problème d'humidité excessive et de contamination fongique ou microbienne, etc. Par ailleurs, il est généralement présumé que la présence accrue de CO₂ est associée à la présence d'odeurs et de certains contaminants (dont les bioeffluents) des milieux intérieurs (Küçükhüseyin, 2021).

Mesure des concentrations de CO₂ en milieu intérieur

Cette section du document ne constitue pas un protocole de mesure du CO₂ en milieu intérieur et ne vise pas à présenter de façon exhaustive l'ensemble des éléments à considérer pour effectuer des mesures de CO₂ de façon adéquate. Elle fait plutôt état des diverses approches méthodologiques décrites dans la littérature scientifique, des avenues d'interprétation des résultats obtenus ainsi que des différents aspects à prendre en considération lors de la réalisation de mesures de CO₂. Chacune des approches méthodologiques présentées ci-dessous vise certains types de milieux intérieurs, sous-tend un objectif spécifique et nécessite une interprétation adéquate des résultats obtenus.

Différents facteurs doivent être considérés lorsqu'il est envisagé de mesurer le CO₂ en milieu intérieur, notamment en ce qui a trait à la précision et à la certification de l'appareil destiné à cette fin. La précision de la plupart des instruments de mesure du CO₂ actuellement disponibles sur le marché est généralement adéquate pour procéder à des évaluations de type environnemental. La justesse et la stabilité des données obtenues par l'entremise de ces appareils doivent néanmoins être vérifiées avant ainsi qu'après chaque utilisation au moyen de procédures d'étalonnage et de calibration. Il est également important que les instruments de mesure utilisés répondent aux exigences en vigueur des organismes de certification reconnus (ex. : CSA)⁵. Par ailleurs, plusieurs types d'appareils nécessitent une période de stabilisation avant qu'une des mesures générées soit jugée fiable. Il faut aussi prendre en considération le fait que la précision de certains appareils peut être affectée par la température et l'humidité relative du milieu. La plupart d'entre eux génèrent cependant une correction automatique des facteurs environnementaux qui pourraient influencer la mesure obtenue.

D'entrée de jeu, la stratégie d'échantillonnage devrait être établie par une personne compétente (hygiéniste, technicien en ventilation, ingénieur en bâtiment, etc.), puisque le choix du ou des sites de mesure (ou d'échantillonnage) revêt une importance particulière, et ce, peu importe l'objectif de la mesure. Qu'il s'agisse d'une évaluation de la présence relative de produits métaboliques ou de l'intensité de la ventilation du milieu intérieur, il est indiqué de procéder à la mesure du CO₂ à plusieurs endroits dans une pièce ou un bâtiment à étudier afin d'identifier le site d'échantillonnage le plus représentatif du milieu. En toutes circonstances, la mesure devrait être effectuée loin des murs extérieurs (≥ 2 mètres), des sources de chaleur (ex. : sortie du système de chauffage) et des grilles d'extraction et d'insufflation d'air des systèmes de ventilation, s'il y a lieu (sauf si une mesure au niveau des registres de ventilation s'avère nécessaire ; voir la section [Mesure de CO₂](#)

⁵ <https://www.csagroup.org/testing-certification/certification/>

comme indicateur de ventilation ou pour en évaluer l'intensité (changements d'air à l'heure). Bien entendu, les mesures doivent être effectuées à distance (≥ 2 mètres) de toute source potentielle de CO₂ (y compris de toute personne incluant celle qui effectue la mesure) de même qu'à distance des portes et des fenêtres qui, par l'entremise de possibles déplacements d'air, pourraient favoriser une dilution localisée du CO₂. De plus, toute mesure de l'air ambiant devrait être effectuée à la même hauteur que la zone respirable des occupants, soit à une certaine distance du plancher et du plafond de la pièce à étudier.

Si l'évaluation des concentrations de CO₂ ne vise pas spécifiquement une pièce ou un local donné, mais davantage un bâtiment dans son ensemble ou une section de ce dernier, plusieurs sites d'échantillonnage doivent être judicieusement sélectionnés afin d'identifier ceux qui sont les plus représentatifs de l'occupation du milieu. Idéalement, l'utilisation d'au moins trois appareils de mesure, disposés à des endroits distincts, devrait permettre d'effectuer une caractérisation adéquate d'un milieu donné. En contrepartie, si la mesure vise plus précisément un local ou un secteur du bâtiment, celui-ci devrait être isolé afin d'obtenir une mesure représentative dudit site (en fermant les portes d'accès à ce dernier par exemple) sans toutefois modifier les conditions d'occupation usuelles.

Les mesures de CO₂ effectuées de façon répétée ou encore en continu (si l'appareil est muni d'un enregistreur ou d'un port externe permettant d'intégrer des séries de mesures temporelles) devraient toujours être réalisées au même endroit afin de permettre une interprétation cohérente des suivis à moyen et à long terme. Si les conditions du milieu s'avèrent changeantes (ex. : lorsque l'intensité de la ventilation naturelle varie de façon importante en fonction des conditions météorologiques présentes), une prise de mesures répétées de CO₂ peut être nécessaire en vue de définir une valeur moyenne représentative. La réalisation de mesures répétées (et idéalement en continu) devrait également être envisagée si l'occupation du milieu à étudier évolue de façon considérable (soit avant, pendant et après la période d'occupation) afin de documenter la variabilité temporelle des concentrations de CO₂ du milieu. Une telle approche permet d'obtenir une évaluation plus juste de la concentration moyenne de CO₂ d'un milieu intérieur donné ainsi qu'une caractérisation détaillée des écarts à cette moyenne, témoignant de la variabilité des concentrations de ce gaz. Il faut noter que de telles analyses devraient toujours être effectuées par des personnes compétentes.

Lorsqu'une mesure en milieu extérieur est effectuée (à titre d'élément de comparaison ou pour réaliser des calculs subséquents), celle-ci devrait être faite à proximité de la prise d'air frais des bâtiments équipés d'un système de ventilation mécanique centralisé. Pour les bâtiments qui ne disposent pas d'un tel système, la mesure de CO₂ devrait être effectuée non loin des fenêtres généralement utilisées pour aérer le local ou la section du bâtiment considérée. Dans ces deux cas de figure, il est primordial que les conditions du milieu extérieur (ex. : température, humidité relative, vitesse des vents, précipitations) soient représentatives de l'air s'introduisant dans le bâtiment et que celles-ci soient colligées pour des vérifications subséquentes. Il est aussi important de constater la présence d'éventuelles sources ponctuelles de CO₂ à proximité du site d'échantillonnage (ex. : présence d'un véhicule motorisé en marche), qui pourraient influencer sur la représentativité ou encore la qualité de la mesure. Il faut souligner que les concentrations extérieures de CO₂ peuvent varier selon l'heure de la journée, la saison, les conditions météorologiques, etc. D'ailleurs, il est important de présumer que les concentrations de CO₂ dans les milieux extérieurs peuvent également être soumises à une certaine variabilité spatiotemporelle. Les lecteurs davantage intéressés par ces aspects sont invités à consulter la norme ISO 16000-26 (2012) et la norme ASTM D6245-18 (2018).

Mesure du CO₂ comme indicateur relatif d'émissions métaboliques (bioeffluents)

Les paramètres généralement considérés pour déterminer le confort des occupants d'un milieu intérieur sont la température, l'humidité relative et la présence d'odeurs (Weisel *et al.*, 2017). Comme précisé précédemment, les occupants d'un milieu intérieur donné génèrent des contaminants gazeux en continu tels que du CO₂ et divers composés métaboliques (composés organiques volatils ou bioeffluents) dont certains sont susceptibles d'engendrer des odeurs perceptibles ainsi que des inconforts olfactifs lorsqu'ils s'y accumulent (Küçükhüseyin, 2021; Weisel *et al.*, 2017; Xiaojing Zhang *et al.*, 2015). Or, la production de CO₂ est généralement proportionnelle à ces émissions métaboliques (Xiaojing Zhang *et al.*, 2015). Par conséquent, la mesure du CO₂ peut constituer un intéressant indicateur, dit relatif, d'émissions de bioeffluents en raison de l'influence relative de la ventilation sur la mesure obtenue.

C'est d'ailleurs en raison du fait que la concentration de CO₂ d'un milieu donné est associée à la concentration de bioeffluents que des organismes comme l'ASTM (2018) et l'ASHRAE (2019) recommandent que la concentration de CO₂ dans un milieu intérieur donné n'excède pas respectivement 650 ou 700 ppm de plus que la valeur mesurée à l'extérieur – Δ CO₂; Legris et Poirier (2004). Cette valeur de référence est basée sur un taux d'occupation de 7 personnes par 100 m², avec des plafonds de 2,75 m de hauteur et des occupants ayant une intensité d'activité de 1,2 MET⁶ (Legris et Poirier, 2004). L'action de collaboration européenne (ACE) précise que l'atteinte d'une concentration de CO₂ de 1 000 ppm en milieu intérieur se traduirait par une proportion d'occupants insatisfaits de la qualité de l'air intérieur d'environ 20 %, alors que cette proportion serait d'environ 36 % lorsque la concentration de CO₂ atteint 2 000 ppm. Par conséquent, si une mesure de CO₂ est effectuée dans un tel contexte, celle-ci doit être interprétée comme un indicateur d'émissions métaboliques (de bioeffluents ou d'odeurs indésirables). En concordance avec ces aspects, les concentrations de CO₂ mesurées peuvent être interprétées simplement. À titre d'exemple :

- ▶ Résultats > Δ CO₂ = Ventilation insuffisante pour contrôler les odeurs corporelles.
- ▶ Résultats < Δ CO₂ = Ventilation suffisante pour contrôler les odeurs corporelles.

L'interprétation des résultats d'une telle mesure doit cependant être réalisée en cohérence avec le mode d'occupation du milieu. Il existe d'ailleurs des formules arithmétiques simples pour évaluer le taux de production de CO₂ par occupant et selon certains paramètres individuels, dont l'âge, le genre, la taille corporelle et l'activité métabolique. Ces informations peuvent être utilisées pour estimer le débit de CO₂ généré par chacun des occupants, d'une part, pour apprécier la production de CO₂ *per capita* et, d'autre part, pour évaluer la pertinence d'appliquer les mesures de gestion appropriées, le cas échéant (ex. : limiter le nombre d'occupants simultanément présents dans le milieu ou améliorer la ventilation des lieux). L'évaluation des concentrations de CO₂ à cette fin doit être effectuée en condition d'utilisation normale d'un milieu donné et selon les critères édictés à cet effet.

Mesure de CO₂ comme indicateur de ventilation ou pour en évaluer l'intensité (changements d'air à l'heure)

La mesure du CO₂ peut être utilisée comme un indicateur de ventilation ou encore pour procéder à une évaluation quantitative de l'intensité de la ventilation appliquée à un milieu donné, lorsque cette ventilation est effectuée selon un protocole d'investigation élaboré à cette fin. Ces deux usages potentiels de la mesure du CO₂ (décrits en détail dans les sous-sections suivantes) sous-tendent des conditions de mesures distinctes. Ainsi, la mesure du CO₂ utilisée à titre d'indicateur de ventilation devrait être effectuée en présence d'occupants, car elle correspond à la somme des processus d'apport et de retrait de CO₂; mesure qu'il est

⁶ Un MET \approx 1 kcal/kg/heure.

ensuite possible de comparer avec certains critères prédéfinis. Quant à la mesure de CO₂ utilisée à des fins d'évaluation quantitative de l'intensité de la ventilation (et plus précisément des apports d'air neuf) dans un milieu donné, elle peut être effectuée en présence d'occupants ou en l'absence de ces derniers, en utilisant respectivement le CO₂ produit par les occupants ou du CO₂ pressurisé en bouteille (à titre de gaz traceur). De façon générale, cette seconde approche consiste à effectuer une analyse de l'atténuation des concentrations de CO₂ sur une période donnée et sous un régime de ventilation donné. En fin de compte, de telles mesures peuvent ensuite être utilisées pour vérifier si le milieu étudié répond aux exigences de ventilation prescrites par les organismes compétents et, dans le cas contraire, elles peuvent être employées pour recommander l'application de mesures correctrices.

En raison de ses propriétés chimiques qui lui confèrent une réactivité relativement faible ainsi qu'une certaine stabilité (chimique) en milieu intérieur, le CO₂ constitue un intéressant traceur permettant d'évaluer l'intensité de la ventilation (naturelle, mécanique ou hybride) présente dans un environnement intérieur donné. Par ailleurs, le CO₂ pressurisé (en bouteille) n'est pas un gaz traceur idéal pour évaluer l'intensité de la ventilation en raison de la présence de sources potentielles de CO₂ en milieu intérieur (engendrant un certain bruit de fond) dont la variabilité peut engendrer des incertitudes notables dans l'évaluation des apports d'air frais. Aussi, puisqu'il s'agit d'un gaz pouvant engendrer des effets sur la santé lorsque les occupants d'un bâtiment sont exposés à de fortes concentrations de ce dernier (CNESST, 2021), l'utilisation d'autres gaz traceurs est généralement préconisée pour effectuer de telles études.

Avant de considérer l'utilisation du CO₂ à de telles fins, le milieu à étudier doit respecter certaines conditions de base décrites ci-dessous. De plus, un regroupement d'informations complémentaires décrivant l'environnement à caractériser doit être effectué, tels la présence/l'absence d'un système de ventilation fonctionnel, les habitudes d'ouverture et de fermeture des fenêtres, le nombre d'occupants (le cas échéant), la description sommaire des sites d'échantillonnage et des heures auxquelles les mesures ont été prises, etc. Ces éléments d'informations complémentaires s'avèrent généralement d'un grand intérêt pour réaliser une interprétation adéquate des données assemblées ou encore pour effectuer des analyses subséquentes.

Mesure du CO₂ comme indicateur de ventilation

L'évaluation de l'intensité de la ventilation dans un milieu intérieur donné sur la base d'un critère préalablement défini (ex : concentration de CO₂ ≤ 1 000 ppm) nécessite d'abord la prise de mesures de CO₂ sous un régime de ventilation normal (c.-à-d. en présence de la ventilation naturelle ou mécanique usuellement appliquée) ainsi que dans des conditions d'occupation usuelles (nombre d'occupants et type d'activité pratiquée conformément aux situations quotidiennes). Un certain temps de latence doit être observé une fois le milieu occupé et ventilé normalement afin d'obtenir des conditions dites à l'équilibre. Cet état d'équilibre sous-tend, entre autres choses, que les échanges d'air engendrés par la ventilation active et passive sont relativement uniformes et constants et que le taux de production de CO₂ (notamment par les occupants) a aussi atteint une certaine stabilité. L'atteinte de cet état d'équilibre implique que l'intensité des processus dynamiques d'apport et de retrait de CO₂ a atteint une valeur équivalente qui se traduit par une concentration de CO₂ relativement stable ou fluctuant à l'intérieur d'une plage de valeurs étroite dite acceptable (typiquement, une variabilité < 10 %). La période de latence à observer pour atteindre l'état d'équilibre est généralement inversement proportionnelle à l'intensité de la ventilation (évaluée en CAH) appliquée dans un milieu donné. Ainsi, plus le nombre de CAH appliqué au milieu est élevé, plus l'état d'équilibre est atteint rapidement. S'il est présumé que les taux de production de CO₂ et de ventilation appliqués au milieu s'avèrent relativement constants, le monitoring (ou suivi en continu des concentrations de CO₂) peut être utilisé pour évaluer si un état d'équilibre est atteint dans un milieu donné. De plus, les mesures de CO₂ devraient idéalement être effectuées en conditions dites homogènes et isotropes⁷, c'est-à-dire dans un milieu bénéficiant d'un mélange d'air convectif lent et constant. La prise de mesures à différents

⁷ Qui présente les mêmes propriétés, quelle que soit la direction.

endroits (dans les limites des conditions de mesure ci-dessus présentées) peut s'avérer utile pour évaluer la possible présence de stratifications lesquelles sont généralement occasionnées par des mouvements d'air froid ou chaud dans le milieu donné. Il est toutefois important de ne pas déplacer le ou les appareils une fois que l'acquisition de données est amorcée.

Une fois ces conditions atteintes, une mesure ponctuelle ou des mesures répétées/en continu peuvent être effectuées afin de documenter la variabilité de la concentration de CO₂ du milieu et ainsi définir la mesure de dispersion associée à celle-ci. Il faut souligner que toute modification du milieu (ouverture d'une fenêtre usuellement fermée, introduction ou retrait d'occupants) en cours de lecture viendra modifier l'équilibre des processus dynamiques en place et, conséquemment, la représentativité de la ou des mesures effectuées.

Une fois les mesures effectuées de façon adéquate, il est possible de les comparer aux valeurs consignées dans certaines tables (ou abaques) qui, sur la base de calculs théoriques, fournissent des informations génériques sur la correspondance entre la concentration de CO₂ d'un milieu intérieur donné et la ventilation appliquée à ce milieu. À titre d'exemple, Prill (2000) présente un tableau qui dépeint la relation entre la concentration de CO₂ mesurée en milieu intérieur et extérieur et les débits d'air frais injectés qui y sont associés (voir le tableau 1). Bien entendu, ce type d'évaluation indirecte de l'intensité de la ventilation nécessite de prendre en considération certaines prémisses parfois difficiles à rencontrer (ou à valider) et demeure assujéti à de nombreuses incertitudes. En dépit de la présence de telles incertitudes, il s'avère néanmoins important de les documenter et de les considérer lors de l'analyse subséquente des données. Lorsque les besoins en ventilation d'un milieu donné sont connus (voir à cet effet les standards 62.1 et 62.2 d'ASHRAE, ainsi que le RSST présenté à la section [Lignes directrices générales à l'égard de la mesure du CO₂ en milieu intérieur](#)) ou que ceux-ci doivent répondre à certains critères spécifiques (ex. : ventilation optimisée dans le cadre d'une pandémie), ce type d'approche peut s'avérer aussi rapide que pertinent. En revanche, il ne permet pas d'effectuer une évaluation précise de l'intensité de la ventilation appliquée au milieu en question.

Tableau 1 Apport d'air frais estimé par la concentration de CO₂ mesurée en milieu intérieur

Concentration de CO ₂ mesurée à l'intérieur (ppm)	Différence de concentration de CO ₂ entre le milieu intérieur et le milieu extérieur (ppm)**	Estimation des apports d'air frais (PCM) par personne approximativement appliqués
800	400	27 (ou moins)
1 000	600	18 (ou moins)
1 400	1 000	11 (ou moins)
2 400	2 000	5 (ou moins)

Source : Adapté de Prill (2000).

Remarque : Les valeurs de CO₂ rapportées dans ce tableau demeurent approximatives. Le calcul de ces valeurs est basé sur la présence d'un nombre constant d'occupants sédentaires dans un espace fermé sur l'application d'un taux de ventilation constant, d'un mélange complet et uniforme de l'air intérieur ainsi que sur une concentration approximative de CO₂ dans l'air extérieur de 400 ppm.

* PCM : Pied cube par minute (CFM en anglais).

** En considérant le fait que la différence maximale recommandée est de 650 à 700 ppm.

Les résultats rapportés à la troisième colonne (PCM) ont été effectués à l'aide de l'Équation 5 de la section suivante.

Mesure du CO₂ pour évaluer l'intensité de la ventilation

Que la ventilation d'un bâtiment soit effectuée de façon naturelle ou mécanique, il est possible de procéder à une évaluation quantitative des apports d'air frais (en provenance de l'extérieur) d'un local donné ou d'une pièce donnée sur une période donnée :

- ▶ En faisant usage, en l'absence d'occupants, du CO₂ pressurisé en bouteille à titre de gaz traceur. Une telle évaluation peut également être réalisée à l'aide d'autres gaz traceurs (ex. : perfluorocarbone [PFT], hexafluorure de soufre [SF₆]). – voir la revue de Batterman (2017) et la synthèse de Han (2012) pour plus de détails concernant ces approches.
- ▶ En faisant usage du CO₂ produit par les occupants lorsque ceux-ci sont présents dans le milieu à caractériser.

Bien qu'il existe plusieurs méthodes quantitatives permettant d'effectuer une évaluation de l'intensité de la ventilation des bâtiments, il est néanmoins possible de les regrouper en trois principaux types d'approches évaluatives : **I) l'analyse de type bilan massique; II) la technique de dispersion du gaz traceur et III) l'analyse de type concentration à l'équilibre (ou analyse d'équilibre)**. Ces différents types d'approches reposent tous sur des hypothèses et des prémisses (dont l'atteinte de milieux dits homogènes et isotropes) qui doivent être corroborées afin de procéder à une analyse adéquate et représentative du milieu concerné.

I) L'analyse de type bilan massique, soit la plus simple des trois approches potentielles, consiste à effectuer des mesures de CO₂ au niveau des registres de ventilation du bâtiment ou de la pièce à étudier afin de calculer la fraction d'air frais (en provenance de l'extérieur) qui est introduite dans le milieu par l'entremise du système de ventilation mécanique – voir l'équation 1; Prill (2000); ASTM-6245-18 (2018); United States Environmental Protection Agency – U.S. EPA (2014). **Ce premier type d'analyse ne peut donc être sélectionné que pour les bâtiments dotés d'un système de ventilation mécanique centralisé.** Il exige une bonne connaissance du système. Par exemple, les conduits ne doivent pas présenter de fuites importantes (Legris et Poirier, 2004). Il faut noter qu'il est possible de calculer la fraction d'air frais disponible pour chacun des occupants présents dans la pièce en vue d'évaluer si, en somme, les apports d'air frais peuvent répondre aux besoins de ces occupants. L'équation générale utile pour ces calculs se présente ainsi :

Équation 1

$$\% \text{ d'apport frais} = \frac{(C_r - C_s)}{(C_r - C_o)} \times 100$$

Où :

C_o : la concentration de CO₂ (ppm) dans l'air extérieur

C_r : la concentration de CO₂ (ppm) dans l'air de retour

C_s : la concentration de CO₂ (ppm) dans l'air d'alimentation (air frais mélangé avec de l'air recyclé)

Il faut noter que la C_s et la C_r doivent être mesurées dans un délai maximal de 15 minutes et que la C_o doit être mesurée près de la prise d'air frais extérieur. Plus l'écart de concentration entre la C_r et la C_o est grand, plus précise est l'analyse. Il est donc opportun de procéder à de telles mesures au cours de la journée, lorsque le bâtiment est pleinement occupé.

II) La technique de dispersion du gaz traceur relève quant à elle d'une approche évaluative qui implique la détente du gaz traceur dans un milieu intérieur donné pour atteindre une concentration stable et homogène dans l'ensemble du volume associé. Une fois cette condition atteinte, le taux de dissipation de ce dernier par l'entremise de la ventilation est ensuite évalué, ce qui permet de calculer le débit d'air frais introduit dans le milieu concerné (Goyer et Nguyen, 1989). **Cette technique est particulièrement utile dans les contextes**

où l'espace intérieur n'est pas doté d'un système de ventilation mécanique, ou encore pour les espaces pourvus d'une ventilation mixte ou hybride⁸.

Une des variantes d'application de cette approche générale consiste à utiliser le CO₂ produit par les occupants à titre de gaz traceur. L'IRSST (1989) propose d'ailleurs une méthode de calcul appliquée à cette approche spécifique (voir l'équation 2). S'appuyant sur l'évaluation du taux de dissipation du CO₂ généré par les occupants d'un milieu donné, cette approche nécessite notamment d'effectuer des mesures de CO₂ à au moins deux reprises, soit lorsque le local est occupé et non ventilé puis une fois que la ventilation est appliquée. Le nombre d'occupants présents dans la pièce ne doit pas fluctuer entre les mesures de même que leur niveau d'activité afin que la production de CO₂ demeure aussi constante que possible. Le débit d'air frais introduit dans le milieu intérieur durant un intervalle de temps donné est calculé à partir de la décroissance de la concentration de CO₂ au cours de cet intervalle de temps (soit les concentrations de CO₂ mesurées au début et à la fin de l'intervalle), du volume de la pièce et du nombre de personnes présentes dans cette dernière.

Équation 2

$$Q = \frac{(R \times V \times 10^3)}{(N \times 3\,600)}$$

Où :

Q : le débit d'air neuf par personne (L/s personne)

R : $(1/T) \times \ln(C_0/C_t)$; soit le taux de renouvellement de l'air à l'heure (heure⁻¹)

T : le temps (heure)

C₀ : la concentration de CO₂ dans le milieu intérieur au début de l'essai (condition non ventilée) moins la concentration dans l'air extérieur (ppm)

C_t : la concentration de CO₂ au temps t (condition ventilée à l'équilibre) moins la concentration dans l'air extérieur (ppm)

V : le volume de la pièce (m³)

N : le nombre de personnes présentes dans la pièce (personne)

III) L'analyse de type concentration à l'équilibre (*steady-state analysis*), qui est notamment présentée dans l'annexe C de la norme ANSI/ASHRAE 62-1999 et 2001 ainsi que dans le supplément E741 du document ASTM-6245-18, constitue une approche intéressante pour évaluer les volumes d'air frais introduits dans un bâtiment soumis à un régime de ventilation idéalement stable et continu. En résumé, cette méthode consiste à injecter du CO₂ (à titre de gaz traceur) dans l'espace inoccupé à étudier, et ce, à un débit de détente constant et prédéterminé. Le gaz est diffusé sans interruption durant toute la durée de l'essai dans le milieu intérieur de façon à ce qu'il se distribue uniformément dans l'espace. Une fois ces prémisses respectées, la concentration de gaz traceur (CO₂) est alors mesurée en continu. Le débit d'air frais introduit dans le milieu intérieur est calculé en considérant le débit d'émission de CO₂, la concentration à l'équilibre du CO₂ dans l'espace concerné de même que de la concentration de CO₂ dans l'air extérieur, en appliquant l'équation ci-dessous :

⁸ Le terme *ventilation mixte ou hybride* renvoie à la combinaison des moyens de ventilation naturelle et mécanique.

Équation 3

$$Q_{ext} = \frac{(10^6 \times G)}{(C_{int} - C_{ext})}$$

Où :

Q_{ext} : le débit d'air frais introduit dans le milieu intérieur (L/s)

G : le débit d'émission de CO_2 dans le milieu intérieur (L/s)

C_{int} : la concentration de CO_2 à l'équilibre en milieu intérieur (ppm)

C_{ext} : la concentration de CO_2 dans l'air extérieur (ppm)

Il faut noter que cette méthode peut également être appliquée en faisant usage du CO_2 généré par les occupants du milieu (au lieu d'utiliser du CO_2 pressurisé à titre de gaz traceur) en se servant de l'équation suivante :

Équation 4

$$Q_P = \frac{(10^6 \times G_P)}{(C_{int} - C_{ext})}$$

Où :

Q_P : le débit d'air frais introduit dans le milieu intérieur par personne (L/s personne)

G_P : le débit de production de CO_2 dans le milieu intérieur par personne (L/s personne)

C_{int} : la concentration de CO_2 à l'équilibre en milieu intérieur (ppm)

C_{ext} : la concentration de CO_2 dans l'air extérieur (ppm)

Il est important de noter que cette approche peut être utilisée que le bâtiment (ou la section du bâtiment) à étudier soit alimenté en air frais au moyen de la ventilation naturelle ou qu'il le soit au moyen de la ventilation mécanique. Il est toutefois nécessaire de réaliser une évaluation précise de chacune des variables prises en compte dans l'analyse quantitative (dont le taux de production de CO_2 par les occupants) pour générer des résultats représentatifs du milieu à étudier. Une intéressante analyse de sensibilité est fournie par Damiano (2004) à cet égard de même que des recommandations techniques visant à minimiser les biais d'interprétation associés à l'application de cette approche. Ce même auteur souligne qu'il est également possible de convertir l'équation 4 afin d'obtenir un débit d'air frais exprimé en une unité volumétrique (PCM) par personne en faisant usage de l'équation ci-dessous :

Équation 5

$$Q_{ext} = \frac{10\ 600}{(C_{int} - C_{ext})}$$

Q_{ext} : le débit d'air frais introduit dans le milieu intérieur (PCM) par personne

C_{int} : la concentration de CO_2 à l'équilibre en milieu intérieur (ppm)

C_{ext} : la concentration de CO_2 dans l'air extérieur (ppm)

Lignes directrices générales à l'égard de la mesure du CO₂ en milieu intérieur

Puisque l'application rigoureuse de certains protocoles de mesure du CO₂ permet d'utiliser ce gaz à titre d'indicateur d'émission de produits métaboliques par les occupants ou encore d'indicateur de ventilation des milieux intérieurs, différents organismes reconnus suggèrent des critères de gestion qui peuvent être utilisés dans différents contextes.

Organismes normatifs : ASHRAE, ASTM et ISO

Selon le *Standard 62-2019 ventilation for acceptable indoor air quality* de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE, 2019), la concentration de CO₂ en milieu intérieur ne devrait pas dépasser 700 ppm de plus que la concentration associée à l'air extérieur, cette dernière se situant généralement entre 400 et 500 ppm. Par conséquent, une mesure de CO₂ dont la concentration excéderait 1 000 à 1 200 ppm (selon les contextes) pourrait signifier que le milieu concerné n'est pas suffisamment ventilé en vue de maintenir les odeurs à des niveaux acceptables pour la majorité des occupants.

Poursuivant le même objectif, le *Standard D6245-18 guide for using indoor carbon dioxide concentrations to evaluate indoor air quality and ventilation* de ASTM International (2018) propose un seuil se rapprochant de celui proposé par l'ASHRAE, soit une concentration intérieure de CO₂ d'environ 650 ppm de plus que celle mesurée à l'extérieur.

La norme de l'International Organization for Standardization *ISO 16000-26:2012 – Air intérieur – Partie 26 : Stratégie d'échantillonnage du dioxyde de carbone (CO₂)* (2012) propose, quant à elle, un classement relatif à la qualité de l'air intérieur. Ainsi, selon cette norme, une concentration intérieure de CO₂ supérieure à 1 000 ppm correspond à un air intérieur de faible qualité; une concentration se situant entre 600 et 1 000 ppm à un air intérieur de qualité moyenne et une concentration se situant entre 400 et 600 ppm à un air intérieur de qualité élevée.

Aperçu de la situation en Europe

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail – Anses (2013a) précise que deux normes actuellement en vigueur en Europe (soit la EN 13779 et la EN 15251) reprennent les mêmes critères de classification de la qualité des milieux intérieurs que la norme ISO 16000-26:2012 précédemment citée. Dans une récente recension des écrits, la Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations – REHVA (2021) a rapporté les lignes directrices à l'égard des concentrations de CO₂ dans l'air intérieur en vigueur dans certains pays d'Europe. À titre d'exemple, en Allemagne, une concentration de CO₂ de 1 500 ppm représente une valeur laissant croire à un potentiel problème d'hygiène selon le *Standard DIN 1946-2:1994-01 Ventilation and air-conditioning*. En Finlande, la concentration maximale recommandée est de 1 200 ppm, alors que la Norvège, la Suède et le Danemark recommandent plutôt de respecter une concentration de 1 000 ppm pour différents milieux, dont les écoles.

Aperçu de la situation au Canada et au Québec

Santé Canada (2020a) a récemment complété un exercice de révision de sa *Directive d'exposition concernant la qualité de l'air des résidences pour le CO₂*. Il y propose, conformément aux lignes directrices préconisées par les autorités de plusieurs autres pays (ex. : les États-Unis, la France, la Norvège, l'Allemagne, le Portugal, la Corée et le Japon), une limite d'exposition de longue durée de 1 000 ppm (basée sur une moyenne de 24 heures). D'après ce ministère fédéral, la ligne directrice « *réduirait au minimum les risques pour la santé humaine* »; ce dernier reconnaissant la manifestation possible d'effets sanitaires (symptômes au niveau des

voies respiratoires et des muqueuses ainsi que des symptômes neurophysiologiques – altération des performances neurocognitives) chez certains individus vulnérables exposés au CO₂ et aux autres contaminants potentiellement présents en milieux intérieurs lorsque le critère de 1000 ppm est dépassé. Par ailleurs, dans son récent document de référence sur la qualité de l'air dans les établissements scolaires, le ministère de l'Éducation du Québec (2020) précise pour sa part que la concentration intérieure de CO₂ ne devrait pas dépasser 700 ppm de plus que la concentration dans l'air extérieur. Pour les nouvelles constructions, le seuil devrait se limiter à 1 000 ppm. Ces critères ne constituent toutefois pas une norme, mais ils peuvent être considérés comme des indicateurs d'émission de produits métaboliques au-delà desquels les occupants sont plus susceptibles de présenter des signes d'inconfort.

Aperçu de la situation dans les milieux de travail

Pour les milieux de travail, l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) ainsi que le gouvernement du Québec (voir le RSST) proposent une valeur limite d'exposition au CO₂ de 5 000 ppm pour une journée de travail de 8 heures (ACGIH, 2021; CCHST, 2021; Food Safety and Inspection Service-Environmental Safety and Health Group – FSIS-ESHG, 2021; OSHA, 1996, 2019; Gouvernement du Québec, 2020). Ce critère correspond à une concentration deux fois moins élevée que la valeur de 10 000 ppm à partir de laquelle se manifestent les mécanismes physiologiques de régulation des paramètres sanguins comme cela est précisé dans la section [*Effets du CO₂ sur la santé aux concentrations potentiellement trouvées en milieux intérieurs.*](#)

Positions des organismes reconnus à l'égard de la mesure du CO₂ en milieu intérieur dans le cadre de la pandémie

Dans le contexte actuel de la pandémie de COVID-19, quelques organismes ont adapté leurs positions sur les seuils d'exposition au CO₂. Par exemple, l'ASHRAE (2020) a émis une série de recommandations en vue de la réouverture des écoles et des universités, dont certaines concernent le CO₂. Dans le cas des systèmes de ventilation mécanique, par exemple, l'organisme recommande notamment, pour les systèmes munis de capteurs de CO₂, d'ajuster les points de consigne de manière à ce qu'ils soient près des concentrations de CO₂ extérieures moyennes (soit entre 400 et 500 ppm) afin d'optimiser la ventilation des lieux. Le Minnesota Department of Health – MDH (2020), le Harvard T.H. Chan School of Public Health (2020) ainsi que Public Health Ontario – PHO (2020) recommandent d'utiliser le CO₂ comme indicateur de l'efficacité de la ventilation et de mesurer les concentrations de ce gaz à l'aide d'un instrument de mesure certifié sans préciser de valeur cible à respecter. Le MDH (2020) propose de surcroît de tenter de maintenir les concentrations de CO₂ sous les 800 ppm en période de pandémie, sans toutefois préciser les raisons motivant cette recommandation.

Selon le Chartered Institution of Building Services Engineers – CIBSE (2020), des concentrations de CO₂ supérieures à 1 500 ppm correspondent à une ventilation insuffisante des lieux. En période de pandémie, l'organisme recommande d'augmenter l'apport d'air extérieur provenant du système de ventilation afin de maintenir les concentrations de CO₂ en dessous des 800 ppm. La REHVA (2020) propose également d'effectuer des mesures de CO₂ et de diffuser le résultat de ces mesures à l'aide d'un panneau de signalisation de type « feux de circulation » afin d'informer les occupants et les gestionnaires du bâtiment de l'état de la ventilation du milieu. L'organisme européen propose également de modifier les plages de concentration généralement retenues pour des plages plus strictes en période de pandémie. Ainsi, les feux vert, jaune et rouge (correspondant habituellement à des seuils inférieurs à 1 000 ppm, de 1 000 à 2 000 ppm et supérieurs à 2 000 ppm) pourraient être modifiés pour que le feu jaune corresponde à une limite de 800 ppm et pour que le feu rouge corresponde à une concentration de 1 000 ppm. Enfin, dans une recension des écrits effectuée dans plusieurs pays européens par le European Centre for Disease Prevention and Control – ECDC (2020), les principales mesures recommandées en période de pandémie, en lien avec le CO₂ en milieu intérieur, sont généralement d'utiliser des instruments de mesure du CO₂ couplés à des interfaces

visuelles de type « feux de circulation »; de ne pas excéder le seuil d'exposition de 1 000 ppm ou encore de régler les systèmes de ventilation munis de capteurs de CO₂ à une valeur inférieure à 400 ppm de manière à ce que les systèmes de ventilation en question fonctionnent en continu.

Conclusion

Il est reconnu qu'une ventilation insuffisante des bâtiments peut notamment engendrer des inconforts chez les occupants, voire des risques pour leur santé, au regard de l'exposition à divers contaminants de l'air intérieur. À cet égard, l'évaluation des concentrations en CO₂ en milieu intérieur, sur la base de protocoles spécifiquement conçus à cet effet, peut constituer une intéressante approche de caractérisation de l'intensité de la ventilation appliquée à un milieu donné. Il existe d'ailleurs diverses méthodes d'évaluation des concentrations de CO₂ qui, lorsqu'elles sont appliquées avec rigueur, peuvent fournir des résultats d'intérêt pour orienter la gestion de la ventilation des milieux intérieurs. De façon générale, les résultats de mesures de CO₂ adéquatement effectuées par des personnes formées à cet égard peuvent être utilisés tant à titre d'indicateur d'émission de produits métaboliques (bioeffluents) qu'à titre d'indicateur de ventilation, ou encore pour effectuer une analyse quantitative détaillée de l'intensité de la ventilation appliquée dans un milieu intérieur donné. Des critères ont d'ailleurs été respectivement édictés par divers organismes compétents afin d'interpréter de tels résultats avec une relative précision et de préconiser l'application de mesures correctrices, le cas échéant.

Par ailleurs, les concentrations de CO₂ dans l'air intérieur d'un milieu donné varient principalement en fonction de la densité et de la durée d'occupation, du type d'activité pratiqué par les occupants et de la ventilation appliquée à ce milieu. Ces mêmes facteurs, de nature comportementale et environnementale, sont d'ailleurs également associés à un risque accru de transmission du SRAS-CoV-2 dans les milieux intérieurs occupés. En effet, il est reconnu que dans des circonstances propices à une accumulation de particules virales (ex. : rassemblement d'individus dans un endroit aux dimensions restreintes), une ventilation inadéquate des milieux intérieurs occupés peut engendrer un risque accru de transmission de la COVID-19. Cependant, toute adéquation directe entre l'observation de concentrations de CO₂ relativement élevées dans un bâtiment donné ou dans une section de celui-ci et un potentiel de risque accru de transmission du SRAS-CoV-2 (qui se transmet principalement par contacts rapprochés), doit être effectuée avec prudence. En effet, il faut considérer que ce n'est pas la concentration de CO₂ en elle-même, qui est associée au risque de transmission du virus, mais bien les conditions de suroccupation, de sous-ventilation aux déplacements d'air, ainsi que le non-respect des mesures de contrôle usuelles qui mènent à un risque accru de transmission du SRAS-CoV-2. Ainsi, qu'elle soit modulée sur la base de mesures de CO₂ ou non ou qu'elle soit appliquée en période de pandémie ou non, la ventilation adéquate ou optimisée des milieux intérieurs s'avère une mesure de contrôle environnementale complémentaire aux autres mesures, tels la distanciation physique, le port du masque médical et la minimisation des contacts, jugées efficaces pour réduire le risque d'exposition aux contaminants de l'air intérieur, incluant les particules virales, susceptibles de s'y trouver.

Références

- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J. et Spengler, J. D. (2016). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805-812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Allen, J., Spengler, J., Jones, E. et Cedeno-Laurent, J. (2020). *5 Step guide to checking ventilation rates in classrooms*. Harvard T.H. Chan School of Public Health. <https://schools.forhealth.org/ventilation-guide/>
- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. (2013a). *Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012sa0093Ra.pdf>
- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. (2013b). Dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air intérieur. <https://www.anses.fr/fr/content/dioxyde-de-carbone-co2-dans-l%E2%80%99air-int%C3%A9rieur>
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2021). *Threshold limit values (TLVs) and biological exposure indices (BEIs)*. https://www.techstreet.com/standards/2021-threshold-limit-values-tlvs-and-biological-exposure-indices-beis?_bt=424700454188&_bk=+tlvs%20+and%20+beis&_bm=b&_bn=g&_bg=102911010630&gclid=EAIaIQobChMI0Oed85fC8AIVoQaICR1FqAayEAAYASAAEgL0IfD_BwE&product_id=2198547
- American National Standards Institute/American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2019). *Standard 62.1-2019– Ventilation for acceptable indoor air quality*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2020). *Reopening of schools and universities*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/reopening-of-schools-and-universities>
- Apte, M. G., Fisk, W. J. et Daisey, J. M. (2000). Associations between indoor CO₂ concentrations and sick building syndrome symptoms in U.S. office buildings: an analysis of the 1994-1996 BASE study data. *Indoor Air*, 10(4), 246-257. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2000.010004246.x>
- ASTM International. (2018). *D6245-18 – Standard guide for using indoor carbon dioxide concentrations to evaluate indoor air quality and ventilation*. <https://doi.org/10.1520/D6245-18>
- Batterman, S. (2017). Review and extension of CO₂-based methods to determine ventilation rates with application to school classrooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2), 145. <https://doi.org/10.3390/ijerph14020145>
- Centers for Disease Control and Prevention. (2021). *COVID-19 overview and infection prevention and control priorities in non-US healthcare settings*. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/non-us-settings/overview/index.html>
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. (2021). Dioxyde de carbone. https://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/carbon_dioxide.html?_undefined&wbdisable=true
- Chartered Institution of Building Services Engineers. (2020). *CIBSE COVID-19 ventilation guidance (Version 4)*. <https://www.cibse.org/coronavirus-covid-19/emerging-from-lockdown>
- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2021). Dioxyde de carbone. https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=315

- Damiano, L. A. (2004). *Greater use of CO₂ is not necessarily better ventilation*. Innovations in Comfort, Efficiency, and Safety Solutions. <https://www.automatedbuildings.com/news/oct04/articles/ebtron/ebtron.htm>
- De Gids, W. F. et Wouters, P. (2010). Le CO₂ comme indicateur de la qualité de l'air intérieur : principes généraux. *Ventilation Information Paper* (33).
- Environnement et Changements climatiques Canada. (2020). *Émissions de gaz à effet de serre – Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement*. Environnement et changement climatique Canada. <https://www.canada.ca/content/dam/ecccc/documents/pdf/cesindicators/ghg-emissions/2020/emissions-gaz-effet-serre-fr.pdf>
- Environmental Health and Safety. (2014). *Indoor air quality standard procedures*. https://reports.aashe.org/media/secure/70/7/652/5913/indoor_air_quality_standard_procedures_-_2014_rev.pdf
- Erdmann, C. A. et Apte, M. G. (2004). Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building base dataset. *Indoor Air*, 14 (Suppl. 8), 127-134. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00298.x>
- European Centre for Disease Prevention and Control. (2020). *Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19: first update*. <https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Heating-ventilation-air-conditioning-systems-in-the-context-of-COVID-19-first-update.pdf>
- Eykelbosh, A. (2021). Can CO₂ sensors be used to assess COVID-19 transmission risk? National Collaborating Centre for Environmental Health. <https://ncceh.ca/content/blog/can-co2-sensors-be-used-assess-covid-19-transmission-risk>
- Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. (2020). *REHVA COVID-19 guidance version 4.0 – How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces*. https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4_23112020.pdf
- Fehlmann, J. et Wanner, H. U. (1993). Indoor climate and indoor air quality in residential buildings. *Indoor Air*, 3(1), 41-50. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1993.t01-3-00007.x>
- Food Safety and Inspection Service-Environmental Safety and Health Group. (2021). *Health Hazard Information Sheet – Carbon dioxide*. FSIS Environmental Safety and Health Group. https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2020-08/Carbon-Dioxide.pdf
- Fromme, H., Heitmann, D., Dietrich, S., Schierl, R., Körner, W., Kiranoglu, M., Zapf, A. et Twardella, D. (2008). [Air quality in schools - classroom levels of carbon dioxide (CO₂), volatile organic compounds (VOC), aldehydes, endotoxins and cat allergen]. *Gesundheitswesen (Bundesverband Der Ärzte Des Öffentlichen Gesundheitsdienstes (Germany))*, 70(2), 88-97. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1046775>
- Gouvernement du Canada. (2015). Dioxyde de carbone (CO₂). <https://www.ec.gc.ca/toxiques-toxics/Default.asp?lang=Fr&n=98E80CC6-1&xml=DF76322C-49E3-4335-811F-D0E1DA54938A>
- Gouvernement du Canada. (2018). La ventilation et le milieu intérieur. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/ventilation-milieu-interieur.html>
- Gouvernement du Québec. Règlement sur la santé et la sécurité du travail. (2020). <http://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013>

- Goyer, N. et Nguyen, V. H. (1989). *Stratégie d'étude de la qualité de l'air dans les édifices à bureaux*. Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec.
- Groupe de travail sur la ventilation. (2021). *Document d'appui destiné au Comité consultatif sur la transmission de la COVID-19 en milieux scolaires et en milieux de soins et sur le rôle de la ventilation*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/3097-transmission-covid-19-milieux-scolaires-soins-ventilation-covid19>
- Guais, A., Brand, G., Jacquot, L., Karrer, M., Dukan, S., Grévilot, G., Molina, T. J., ... Schwartz, L. (2011). Toxicity of carbon dioxide: a review. *Chemical Research in Toxicology*, 24(12), 2061-2070. <https://doi.org/10.1021/tx200220r>
- Han, H. (2012). Ventilation effectiveness measurements using tracer gas technique. *Fluid Dynamics, Computational Modeling and Applications*, 41-66.
- Jones, E., Young, A., Clevenger, K., Salimifard, P., Wu, E., Luna, M. L., ... Allen, J. G. (2020). *Risk reduction strategies for reopening schools*. Harvard T.H. Chan School of Public Health.
- Küçüküseyin, Ö. (2021). *CO₂ monitoring and indoor air quality*. *REHVA Journal*, 54-59. <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/co2-monitoring-and-indoor-air-quality>
- Lajoie, P., Leclerc, J.-M. et Schnebelen. (2006). *La ventilation des bâtiments d'habitation : impacts sur la santé respiratoire des occupants*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/490>
- Legris, M. et Poirier, F. (2004). Le dioxyde carbone (CO₂) : indicateurs de la QEI. *Travail et santé*, 20(1).
- Levasseur, M.-E., Poulin, P., Campagna, C. et Leclerc, J.-M. (2017). Integrated management of residential indoor air quality: a call for stakeholders in a changing climate. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12).1455. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121455>
- Lindsey, R. (2020). *Climate change: atmospheric carbon dioxide*. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- Louis, F., Guez, M. et Le Bacle, C. (1999). Intoxication par inhalation de dioxyde de carbone. *Documents pour le médecin du travail*, (79), 179-194.
- Lu, C.-Y., Lin, J.-M., Chen, Y.-Y. et Chen, Y.-C. (2015). Building-related symptoms among office employees associated with indoor carbon dioxide and total volatile organic compounds. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 5833-5845. <https://doi.org/10.3390/ijerph120605833>
- Ministère de l'Éducation du Québec. (2020). *Document de référence sur la qualité de l'air dans les établissements scolaires*. Gouvernement du Québec. http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/education/reseau/qualite_air_reference_s.pdf
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2021). Les gaz à effet de serre. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/questce-ges.htm>
- Minnesota Department of Health. (2020). *Ventilation guidance for schools: COVID-19*. Minnesota Department of Health. <https://www.health.state.mn.us/diseases/coronavirus/schools/vent.html>

- Muscatiello, N., McCarthy, A., Kielb, C., Hsu, W.-H., Hwang, S.-A. et Lin, S. (2015). Classroom conditions and CO₂ concentrations and teacher health symptom reporting in 10 New York State schools. *Indoor Air*, 25(2), 157-167. <https://doi.org/10.1111/ina.12136>
- National Collaborating Centre for Environmental Health. (2010). *Carbon dioxide in indoor air*. <https://ncceh.ca/documents/practice-scenario/carbon-dioxide-indoor-air>
- Norbäck, D., Nordström, K. et Zhao, Z. (2013). Carbon dioxide (CO₂) demand-controlled ventilation in university computer classrooms and possible effects on headache, fatigue and perceived indoor environment: an intervention study. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 86(2), 199-209. <https://doi.org/10.1007/s00420-012-0756-6>
- Norbäck, D., Wieslander, G., Zhang, X. et Zhao, Z. (2011). Respiratory symptoms, perceived air quality and physiological signs in elementary school pupils in relation to displacement and mixing ventilation system: an intervention study. *Indoor Air*, 21(5), 427-437. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00717.x>
- Organisation internationale de normalisation. (2012). *ISO 16000-26 : 2012 Air intérieur — Partie 26 : Stratégie d'échantillonnage du dioxyde de carbone (CO₂)*. <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/05/21/52140.html>
- Occupational Safety and Health Administration. (1996). OSHA Hazard Information Bulletins – Potential carbon dioxide (CO₂) asphyxiation hazard when filling stationary low pressure: CO₂ supply systems. <https://www.osha.gov/publications/hib19960605>
- Occupational Safety and Health Administration. (2019). Permissible exposure limits - Annotated tables. <https://www.osha.gov/annotated-pels>
- Peng, Z. et Jimenez, J. L. (2021). Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *Environmental Science & Technology Letters*, 8(5), 392–397. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00183>
- Persily, A. et Jonge, L. de. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5), 868-879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>
- Prill, R. (2000). *Why measure carbon dioxide inside buildings?* Washington State University.
- Public Health Ontario. (2021). *COVID-19: heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems in buildings*. Toronto, Ontario : Queen's Printer for Ontario. <https://www.publichealthontario.ca/-/media/documents/ncov/ipac/2020/09/covid-19-hvac-systems-in-buildings.pdf?la=en>
- Santé Canada. (2020a). *Lignes directrices sur la qualité de l'air intérieur résidentiel – Dioxyde de carbone*. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/programs/consultation-residential-indoor-air-quality-guidelines-carbon-dioxide/consultation-lignes-directrices-qualite-air-interieur-residentiel-dioxyde-carbone.pdf>
- Santé Canada. (2020b). *Protégez votre milieu intérieur des polluants de l'air extérieur*. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/infographie-protégez-milieu-interieur-polluants-exterieur.html>
- Simoni, M., Annesi-Maesano, I., Sigsgaard, T., Norback, D., Wieslander, G., Nystad, W., Canciani, M., ... Viegi, G. (2010). School air quality related to dry cough, rhinitis, and nasal patency in children. *European Respiratory Journal*, 35, 742-749. <https://doi.org/10.1183/09031936.00016309>
- Sireesha, N. L. (2017). Correlation amongst indoor air quality, ventilation and carbon dioxide. *Journal of Scientific Research*, 9(2), 179-192. <https://doi.org/10.3329/jsr.v9i2.31107>

- St-Jean, M., St-Amand, A., Gilbert, N. L., Soto, J. C., Guay, M., Davis, K. et Gyorkos, T. W. (2012). Indoor air quality in Montréal area day-care centres, Canada. *Environmental Research*, 118, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.07.001>
- Tsai, D.-H., Lin, J.-S. et Chan, C.-C. (2012). Office workers' sick building syndrome and indoor carbon dioxide concentrations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9(5), 345-351. <https://doi.org/10.1080/15459624.2012.675291>
- United States Environmental Protection Agency. (2014). *Appendix A of the building air quality guide: common indoor air quality measurements - A general guide*. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/appendix-building-air-quality-guide-common-indoor-air-quality-measurements>
- Weisel, C. P., Fiedler, N., Weschler, C. J., Ohman-Strickland, P., Mohan, K. R., McNeil, K. et Space, D. (2017). Human symptom responses to bioeffluents, short-chain carbonyls/acids and long-chain carbonyls in a simulated aircraft cabin environment. *Indoor air*, 27(6), 1154-1167. <https://doi.org/10.1111/ina.12392>
- Xiaojing Zhang, X. Z., Pawel Wargocki, P. W. et Zhiwei Lian, P. W. (2015). Effects of carbon dioxide with and without bioeffluents on humans. *AIVC*. <https://www.aivc.org/resource/effects-carbon-dioxide-and-without-bioeffluents-humans>
- Zhang, X., Wargocki, P., Lian, Z. et Thyregod, C. (2017). Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. *Indoor Air*, 27(1), 47-64. <https://doi.org/10.1111/ina.12284>
- Zhou, Q., Lyu, Z., Qian, H., Song, J. et Möbs, V. C. (2015). Field-measurement of CO₂ level in general hospital wards in Nanjing. *Procedia Engineering*, 121, 52-58. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1018>

Annexe - Méthodologie : synthèse rapide des connaissances

1. Mise en garde méthodologique institutionnelle

OUI NON

Si non, pourquoi ? _____

2. Formulation explicite des questions de recherche couvertes ou des objectifs de la synthèse

OUI NON

Si non, pourquoi ? _____

3. Stratégie de recherche documentaire (plus d'une réponse est possible)

- a. Utilisation de la veille signalétique institutionnelle quotidienne COVID-19
- b. Utilisation d'une veille signalétique institutionnelle ciblée COVID-19 (par ex., CHSLD)
- c. Utilisation de la veille signalétique institutionnelle sur la littérature grise

Préciser le type de la veille signalétique (par ex., COVID-19 générale ou prévention/promotion) pour a et b et la période d'examen couverte pour les trois.

Veille signalétique en santé environnementale effectuée jusqu'au 1 mars 2021.

- d. Établissement d'une stratégie de recherche documentaire spécifique (rétrospective)

Préciser les mots-clés utilisés, les bases de données interrogées (minimalement deux), les sources de littérature grise ainsi que les limites retenues (par ex., langues, date de début et de fin de la période de repérage).

- e. Autre

Préciser

Recherche de la littérature grise pour les positions des organismes reconnus

4. Recours à des critères d'inclusion

OUI NON

Si oui, préciser les critères utilisés.

5. Traitement des articles en prépublication

Mention de leur inclusion ou exclusion Repérage facilité dans le document

Les articles en prépublication ont été traités, mais ne sont pas identifiés comme tels dans le document.

6. Extraction des données

Inclusion de tableaux de preuves OUI NON

7. Appréciation de la qualité ou du niveau de preuve des articles ou des autres documents inclus

NON (À noter que cette appréciation n'est pas essentielle pour ce type de réponse rapide)

OUI

Si oui, préciser la méthode ou l'approche utilisée.

8. Révision par les pairs (liste des noms des personnes et de leur provenance à la page de crédits pour b, c et d) (plus d'une réponse est possible)

- a. par les membres du Comité d'experts concerné
- b. par des membres des autres cellules ou comités thématiques COVID-19 de l'INSPQ
- c. par des réviseurs autres de l'INSPQ n'ayant pas participé aux travaux
- d. par des réviseurs externes à l'Institut n'ayant pas participé aux travaux
- e. aucune révision par les pairs

COVID-19 : Concepts de base concernant le dioxyde de carbone (CO₂) et sa mesure dans les bâtiments

AUTEURS

Patrick Poulin, conseiller scientifique
Jean-Marc Leclerc, conseiller scientifique
Caroline Huot, médecin spécialiste
Stéphanie Potvin, conseillère scientifique
Comité COVID-19 en santé environnementale
Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

COLLABORATEURS

Stéphane Perron, médecin-conseil
Comité COVID-19 en santé environnementale
Direction de la santé environnementale et de la toxicologie
Ali Bahloul, chercheur en prévention des risques chimiques, biologiques, mécaniques et physiques
Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

RÉVISEURS

Claire Labrie, hygiéniste en santé au travail
Membre du Groupe de travail SAT COVID-19
Direction des risques biologiques et de la santé au travail
Boualem Ouazia, agent de recherche
Conseil national de recherches Canada
Michel Legris, hygiéniste du travail
Rita Finley, Bureau du conseiller scientifique en chef
Sophia Lavergne, Bureau du conseiller scientifique en chef
Agence de la santé publique du Canada

MISE EN PAGE

Katia Raby, agente administrative
Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

Les reproductions à des fins d'étude privée ou de recherche sont autorisées en vertu de l'article 29 de la Loi sur le droit d'auteur. Toute autre utilisation doit faire l'objet d'une autorisation du gouvernement du Québec qui détient les droits exclusifs de propriété intellectuelle sur ce document. Cette autorisation peut être obtenue en formulant une demande au guichet central du Service de la gestion des droits d'auteur des Publications du Québec à l'aide d'un formulaire en ligne accessible à l'adresse suivante : <http://www.droitauteur.gouv.qc.ca/autorisation.php>, ou en écrivant un courriel à : droit.auteur@cspq.gouv.qc.ca.

Les données contenues dans le document peuvent être citées, à condition d'en mentionner la source.

© Gouvernement du Québec (2021)

N° de publication : 3146

**Institut national
de santé publique**

Québec 