

Notes techniques

MESURE EN TEMPS RÉEL DU DIOXYDE DE CARBONE DANS LES ESPACES DE TRAVAIL

Le dioxyde de carbone (CO₂), naturellement présent dans l'atmosphère, est produit par l'organisme humain au cours de la respiration. Sa teneur dans un local est liée notamment à l'occupation humaine et à la gestion du renouvellement de l'air intérieur. L'évaluation de sa concentration est un indicateur du taux de confinement et de la qualité du renouvellement de l'air, mais ne constitue pas un suivi de la qualité sanitaire d'un local. En cette période pandémique, afin de suivre les recommandations gouvernementales sur l'aération des locaux et le renouvellement de l'air intérieur, la mesure du taux de CO₂ dans les lieux de travail se généralise. Le nombre de dispositifs présents sur le marché est croissant et les tarifs proposés les rendent plus accessibles. Malgré leur simplicité d'utilisation, ces outils soulèvent de nombreuses interrogations : « pourquoi, quand, comment, où, et avec quel appareil effectuer une mesure du taux de CO₂ ? » Autant de questions que cet article se propose d'éclairer.

BRUNO
GALLAND,
KARINE
GÉRARDIN
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

Contexte

Récemment mise en lumière lors de la pandémie de Covid-19 comme un des moyens de limiter les contaminations entre les personnes, la mesure du dioxyde de carbone (CO₂) dans les espaces de travail est un paramètre utilisé depuis plusieurs décennies pour déterminer les apports d'air neuf à introduire dans un local de travail, afin de garantir aux opérateurs une atmosphère de qualité (circulaire du 9 mai 1985; cf. *Pour en savoir plus*). Il est communément admis qu'une concentration en CO₂ inférieure à 1 000 parties par million en volume (ppm_v) est caractéristique d'un local suffisamment ventilé. Dans son avis du 28 avril 2021, le Haut Conseil de santé publique a recommandé, pour les établissements recevant du public (ERP)¹ une valeur seuil de 800 ppm_v, et plus précisément de ne pas dépasser un différentiel de plus de 400 ppm_v entre le taux de CO₂ intérieur et en extérieur. Rappelons que la concentration extérieure de CO₂ sera plus importante dans une zone à forte activité humaine, ou lors de pics de pollution.

Ce contexte particulier ne doit cependant pas occulter le caractère toxique du CO₂, auquel est associée en France depuis 2004 une valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP-8h) de 5 000 ppm_v. La surveillance de ce composé gazeux dans les

locaux à pollution spécifique peut s'imposer dans des secteurs d'activité comme l'industrie du froid, du nettoyage, de l'agroalimentaire... De nombreuses études internationales font référence à des effets comme des maux de tête, des irritations oculaires et dermiques, des sensations de gorge sèche, de fatigue, de somnolence et des pertes d'attention dès lors que la concentration en CO₂ dépasse 1 000 ppm_v dans un local. Cependant, ces effets intrinsèques du CO₂ à ces faibles concentrations restent difficilement quantifiables tant les études scientifiques sur le sujet diffèrent par leur protocole expérimental (fiche toxicologique de l'INRS n° 238; cf. *Pour en savoir plus*).

Quel que soit le contexte (qualification de la qualité de l'air intérieur ou qualification d'une potentielle exposition professionnelle), avant d'engager une mesure, il est indispensable de considérer plusieurs aspects pour exploiter au mieux les futurs résultats des mesures. Cet article se propose de lister les questions à se poser en amont et de préciser les éléments de réponses. Il propose également un focus particulier sur la mesure en temps réel de CO₂, en vue de mieux appréhender la ventilation des locaux de travail à pollution non spécifique.



RÉSUMÉ

Le dioxyde de carbone (CO₂) est considéré comme un indicateur du taux de renouvellement de l'air dans des locaux de travail à pollution non spécifique. Dans le contexte de la pandémie de Covid-19, la mesure du taux de CO₂ pour assurer une ventilation efficace est l'un

des éléments de suivi permettant de minimiser les risques de contagion. Avant de s'équiper en matériel de détection, il apparaît important de répondre à un certain nombre de questions : quel est l'objectif de la mesure ; quelle technologie utiliser ; quelles

doivent être les performances minimales des détecteurs ; comment les vérifier et les utiliser ; et enfin, comment exploiter les résultats ? Les réponses à ces interrogations permettront de mettre en place une stratégie de mesures efficace.

Abstract

Carbon dioxide (CO₂) is considered to be an indicator of the rate air renewal in non-specific pollution workplaces. In the context of COVID, measuring the CO₂ level to ensure effective ventilation is one of the follow-up elements to minimize the risks of

contagion. Before equipping oneself with detection equipment, it seems important to answer some or all of the following questions: what is the purpose of the measurement, what technology to use, what should be the minimum performance

of the detectors, how to check and use them and finally how to exploit the results? The answers to these questions will help to establish an efficient measurement strategy.

Pourquoi mesurer le taux de CO₂ dans les espaces de travail ?

La mesure en temps réel de polluants chimiques présents dans les atmosphères de travail peut s'avérer nécessaire, dès lors qu'elle répond à une problématique de santé et de sécurité clairement définie. Toute mesure sans finalité, en matière de prévention des risques professionnels, serait vouée à l'échec. Il serait même contre-productif de procéder à des mesures qui ne permettraient pas d'engager des actions pour remédier à une situation à risque. Ainsi, surveiller le taux de CO₂ dans un espace de travail n'a de sens que si l'analyse spatiale et temporelle conduit à des propositions d'amélioration, structurelle ou organisationnelle, telles que la mise en place ou l'optimisation d'une ventilation mécanique, ou l'édiction de règles imposant une jauge de présence associée à une ventilation naturelle. L'Encadré 1 développe et précise ce prérequis.

Avec quel(s) appareil(s) et comment mesurer le taux de CO₂ dans les espaces de travail ?

Une fois l'objectif défini, le choix de l'appareillage à déployer s'oriente en fonction de la technologie, des caractéristiques techniques, des performances métrologiques et des connaissances et compétences des personnels mettant en œuvre les détecteurs. Les progrès techniques permettent aujourd'hui de disposer d'appareils à lecture directe performants, abordables et faciles d'utilisation. De manière générale, et quel que soit le domaine investigué, il est important de choisir une technologie de mesure sélective, c'est-à-dire de choisir un capteur qui sera uniquement sensible au taux de CO₂, et non aux autres composants de l'atmosphère de travail. À ce jour, un capteur infrarouge non dispersif (NDIR pour : non dispersive infra red), dont le fonctionnement est détaillé dans l'Encadré 2, représente le meilleur choix pour mesurer le CO₂ dans les locaux de travail.

ENCADRÉ 1

LES QUESTIONS À SE POSER AVANT DE MESURER LES POLLUANTS CHIMIQUES EN TEMPS RÉEL DANS L'AIR AMBIANT*

LA MESURE N'EST PAS SYSTÉMATIQUE : POURQUOI JE MESURE ?

Il importe de définir l'objectif de la mesure en temps réel :

- sécurisation des personnels ;
- hygiène au travail...

Je mesure si je peux agir pour :

- dimensionner un système de ventilation ;
- vérifier l'efficacité d'un système de ventilation ;
- valider une organisation : définir un temps d'ouverture de fenêtre selon un taux d'occupation ;
- autoriser l'accès à une zone...

Je ne mesure pas si je n'ai aucun moyen d'agir et qu'il est impossible :

- d'ouvrir une fenêtre ;
- d'installer ou modifier un système de ventilation ;
- de réduire le nombre de personnes présentes ou d'interdire un accès...

→ la mesure n'a pas d'intérêt, sauf pour attester de la nécessité d'engager des actions correctives.

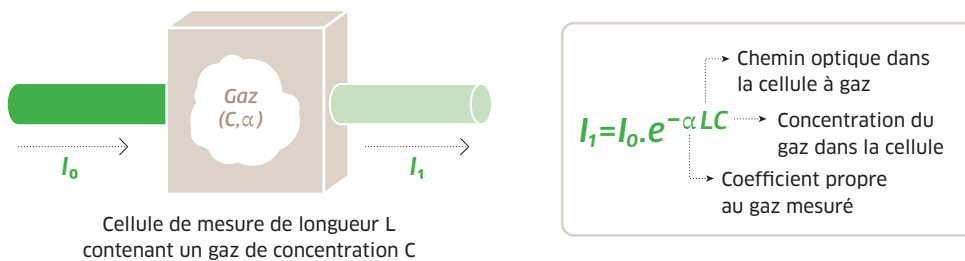
*Voir les dossiers « Métrologie » parus dans la revue Hygiène & sécurité du travail, n°s 260 et 263 : cf. Pour en savoir plus.

ENCADRÉ 2

LES CAPTEURS INFRAROUGES (IR) OU CAPTEURS IR NON DISPERSIFS (NDIR):
COMMENT FONCTIONNENT-ILS ?

Certains composés présents dans l'atmosphère absorbent le rayonnement IR	CO ₂	4,26 µm
	Alcanes (C-H)	3,30 µm
	Acétylène (C≡C)	3,10 µm
	H ₂ O	4,00 µm

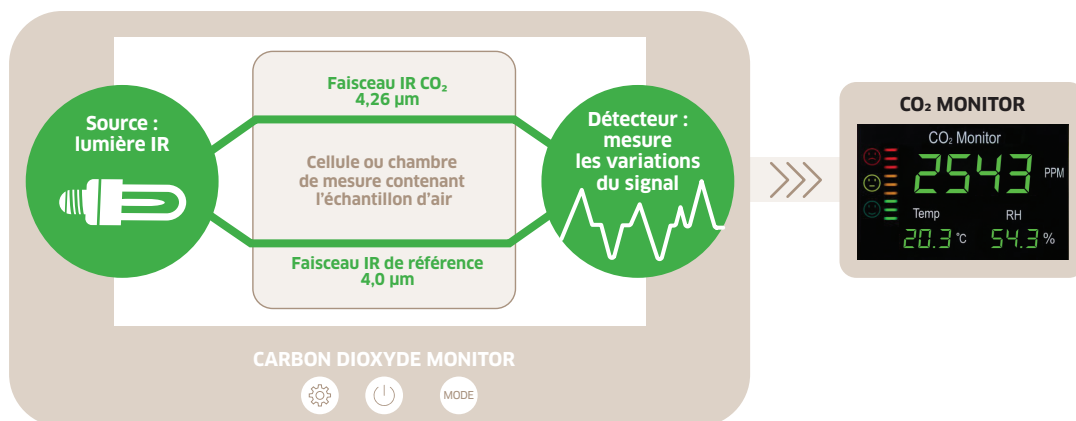
La technique de mesure IR est basée sur le principe selon lequel le CO₂ absorbe l'énergie de la lumière sur une longueur d'onde spécifique de 4,26 µm. Lorsque le rayonnement IR émis par l'appareil traverse, dans la cellule de mesure, l'échantillon de gaz contenant du CO₂, les molécules de CO₂ absorbent une partie du rayonnement et modifient le signal reçu par le capteur. Selon la loi de Beer-Lambert, la quantité de lumière absorbée par le gaz dépend directement de la concentration en CO₂ de l'échantillon d'air traversant la cellule et de la longueur du trajet optique.



Cette concentration est exprimée par rapport à un volume d'air donné et s'exprime en pourcentage volumique (%v) ou parties par million (ppm). Elle correspond au nombre de molécules de CO₂ présentes pour un nombre donné de molécules d'air ambiant.

Un détecteur IR pour la mesure du CO₂ comporte:

- un émetteur : source infrarouge à large bande (laser ou diode électroluminescente) ;
- un filtre optique pour la sélection des raies d'absorption spécifiques du CO₂ (4,26 µm) ;
- une cellule de mesure ou chambre d'absorption incluant :
 - une chambre d'échantillonnage ;
 - une chambre de référence (pour les doubles faisceaux) ;
- un détecteur sensible au rayonnement infrarouge. Le chemin optique de la lumière infrarouge est dirigé à travers la chambre d'échantillonnage vers le détecteur qui quantifie le phénomène ;
- une alimentation en énergie (batterie, pile, secteur) ;
- une électronique de commande et de traitement de l'information ;
- en option des capteurs complémentaires: humidité, température...



Tous les capteurs de CO₂ IR partagent ce même principe de mesure, les solutions techniques et la performance de mesure diffèrent d'un appareil à l'autre.



**ENCADRÉ 3
LES TECHNOLOGIES, LES PRINCIPALES PERFORMANCES
ET CARACTÉRISTIQUES DES CAPTEURS NDIR**

**PLUSIEURS TECHNIQUES DE MESURE EXISTENT :
QUELLE TECHNOLOGIE CHOISIR ?**

Capteurs	Réponse	Sélective au CO ₂	Sensible à des composés interférents présents dans l'air des lieux de travail*
IR ou NDIR		✓	✗
Semi-conducteurs		✗	✓
Électrochimique		✗	✓

*Produits d'entretien, parfums d'ambiance et personnel, vapeurs d'alcool éthylique des solutions hydroalcooliques.

**TOUS LES APPAREILS NE SE VALENT PAS : LEQUEL CHOISIR ?
QUELLE CARACTÉRISTIQUE ? POUR QUELLE APPLICATION ?**

	Appareils professionnels	Appareils grand public
Application	Hygiène ou sécurité au travail en ambiance ou individuelle, locaux à pollution spécifique	Environnement intérieur où la source de CO ₂ d'intérêt est la respiration humaine
Qualité de la mesure	Exacte (incertitude de mesure connue et qualifiée)	Indicative, comparative, relative
Gamme de mesure	0 à 50 000 ppm _v (0-5 % _v)	Variable et pas toujours connue
Résolution	± 50 à 100 ppm _v	Variable et pas toujours connue et pas toujours fiable
Enregistrement des données	Possible avec fréquence d'acquisition ajustable	Pas toujours disponible
Capacité de vérification et calibrage	En deux points minimum	Non disponible, limitée (ajustage à l'air extérieur)
Autonomie	Batteries > 10 heures	Variable et pas toujours connue • Pile > 1 an • Batterie rechargeable > 2 heures • Secteur

Les détecteurs équipés d'un capteur à semi-conducteur ou d'un capteur électrochimique ne sont pas recommandés, car ces deux technologies ne permettent pas une mesure sélective du CO₂. Différentes substances, comme les vapeurs de gel hydroalcoolique, les cosmétiques ou produits d'entretien peuvent fausser la mesure en surévaluant le taux réel de CO₂.

Par ailleurs, il est nécessaire de distinguer deux types d'appareils :

- ceux à visée professionnelle, dont les performances, vérifiées et publiées par le fabricant, autorisent une mesure de la concentration en CO₂ avec une fiabilité et une exactitude compatibles avec les exigences de la métrologie d'exposition ;
- ceux à destination du grand public, dont les performances, peu documentées par le fabricant, permettent de suivre qualitativement l'évolution d'un taux de CO₂ dans un local de travail, sans pouvoir fournir une mesure absolue opposable.

L'Encadré 3 détaille les technologies et les principales performances et caractéristiques des capteurs NDIR. Des questions pratiques doivent aussi être considérées avant l'acquisition d'un détecteur :

- le détecteur sera-t-il posé sur un support horizontal ou accroché à un élément vertical ? Attention à

ne pas occulter les entrées d'air du détecteur qui permettent au CO₂ de diffuser jusqu'au capteur ;

- quel type d'alimentation électrique sera utilisé ? Secteur ou autonome (batterie ou piles) ? Une alimentation secteur nécessite de disposer de prises 2P+T 230 V et une batterie doit être rechargée ;
- les mesures doivent-elles être enregistrées ? Si oui, quelle capacité d'enregistrements minimale est requise (type de données enregistrées, nombre et fréquence d'acquisition) pour répondre à l'objectif de la mesure ?
- le détecteur doit-il communiquer avec une interface ? Si oui, selon quel protocole et vers quel périphérique ?

Les réponses à ce questionnaire permettront d'opérer le choix le plus judicieux pour répondre au mieux à l'objectif recherché. Comme énoncé précédemment, les détecteurs professionnels vont différer des détecteurs grand public au niveau des performances métrologiques. Si, de prime abord, les détecteurs grand public offrent des afficheurs de la concentration en CO₂ à la ppm_v, leur exactitude de mesure est moins bonne que celle des détecteurs professionnels. La Figure 1 représente plusieurs modèles de détecteurs mesurant le taux de CO₂ dans un local de

travail au même endroit. Une dispersion des mesures est notable entre les modèles des appareils (de 385 ppm_v à 543 ppm_v, soit une amplitude de mesure de l'ordre de 170 ppm_v) et entre les appareils grand public de même modèle également (de quelques dizaines jusqu'à 140 ppm_v).

Cette différence de performances dépend en partie des possibilités de vérification et de réglage des appareils. L'unique possibilité de vérifier l'exactitude de mesure d'un détecteur de gaz est d'exposer celui-ci à une concentration connue de gaz – autrement dit, de l'exposer à un gaz étalon. Pour ce faire, il est indispensable de disposer d'une coiffe ou masque de vérification/calibrage pour pouvoir exposer le capteur à une concentration connue de CO₂, comme illustré sur la Figure 2. Seuls les appareils professionnels sont livrés avec une telle coiffe.

Cette opération de vérification, appelée aussi « test au gaz », commune à tout type de détecteur utilisé en hygiène et sécurité au travail, consiste à exposer les détecteurs *a minima* à deux références, un gaz « zéro » et un gaz de concentration connue ou gaz étalon, par exemple 1 000 ou 5 000 ppm_v de CO₂. Si les valeurs affichées par l'appareil sont conformes, c'est-à-dire correspondent aux valeurs des concentrations des gaz tests, à l'exactitude du capteur près (déterminée par le fabricant et disponible dans la notice technique), les détecteurs sont alors qualifiés d'opérationnels. Dans le cas contraire, il convient de réaliser un calibrage (ou ajustage) de la réponse du détecteur aux valeurs des concentrations des gaz tests. À noter que le calibrage du point « zéro » pour un capteur de CO₂ nécessite le recours à un gaz ne contenant pas de CO₂ soit, typiquement, de l'azote.



← FIGURE 1 Mesures du taux de CO₂ dans un laboratoire de recherche pourvu d'un système de ventilation mécanique contrôlée. La dispersion des mesures par les différents appareils est notable.



← FIGURE 2 Vérification de la réponse d'un détecteur professionnel à l'aide d'une bouteille étalon contenant 1 000 ppm_v de CO₂. Le même dispositif permet si nécessaire de réaliser un calibrage. La coiffe ou masque de vérification est la pièce noire qui vient recouvrir complètement l'entrée de gaz du détecteur.

ENCADRÉ 4 COMMENT VÉRIFIER LES APPAREILS ?

	Appareils professionnels		Appareils grand public	
Vérification du zéro	✓	à l'azote <i>via</i> un accessoire spécifique fourni	✗	Non équipé
Vérification de la mesure	✓	Gaz étalon de concentration connue dans la gamme de mesure souhaitée <i>via</i> un accessoire spécifique fourni	✓	Relative en comparaison à un appareil professionnel vérifié, calibré
Calibrage	✓	Ajustage avec des gaz étalons de concentration connue <i>via</i> un accessoire spécifique par un opérateur formé	✗	Possibilité d'affecter (manuellement ou <i>via</i> algorithme) une valeur arbitraire en air extérieur de 400 ppm _v

COMMENT ENTREtenir, MAINTENIR LES APPAREILS EN BON ÉTAT DE FONCTIONNEMENT ?

- nettoyer avec un chiffon sec et propre si nécessaire ;
- allumer et recharger régulièrement les appareils sur batterie ;
- stocker selon les conditions indiquées par le fabricant : atmosphère propre, abri de l'humidité, gamme de température normale... Ne pas laisser les piles dans un appareil non utilisé ;
- réparation éventuelle par une personne compétente et formée ; sinon, le retour au fabricant est recommandé.



ENCADRÉ 5
COMMENT EFFECTUER LA MESURE AVEC UN APPAREIL GRAND PUBLIC ?
QUELLES RECOMMANDATIONS ?

MÉTHODOLOGIE

1. Régler la fréquence d'enregistrement : 1 point toutes les deux minutes est suffisant pour le suivi de la concentration en CO₂.
2. Mesurer en air extérieur 15 minutes minimum : constitue la valeur de référence relative à la mesure intérieure.
3. Réaliser le cycle de mesure intérieur représentatif de l'activité ou de l'occupation sur un ou deux jours.
4. Relever les conditions de mesure : nombre de détecteurs, localisation, température...
5. Relever les événements : activités, occupation, aération, dérives à l'habitude...
6. Interprétation des mesures pour la mise en place des actions (ventilation, aération, procédé, organisation...).
7. Renouveler les points 1 à 5 si un nouvel objectif est défini.

EXPLOITATION

<p>L'exploitation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • est liée à l'objectif de mesure et aux actions que l'on peut mettre en place ; • est exprimée en relatif par comparaison temporelle des niveaux de concentration ; • met en évidence des événements éventuels et indique les conditions de mesure. 	<p>Valeur de la mesure en intérieur > Valeur de la mesure en extérieur</p>
---	--

UTILISATION

Respecter un temps de chauffe de 15 minutes en air propre
Respecter les conditions de mesures du fabricant
Ne pas exposer les appareils à des conditions extrêmes (poussières, intempéries...)
Utiliser un appareil adapté dans les zones spécifiques Atex (atmosphères explosibles)
Dans une atmosphère de mesure polluée faire fonctionner l'appareil dans une zone propre avant de l'éteindre

LOCALISATION

À 1 mètre minimum des voies respiratoires d'un opérateur
Hors zone « morte » tel le recoin d'un bureau
Loin d'une entrée d'air neuf
À distance des voies de circulation ou de l'échappement d'un véhicule
À une hauteur comprise entre 1 m et 1,5 m

Le réglage de ces deux points de mesure permet de garantir une exactitude de mesure conforme aux exigences de la métrologie d'exposition professionnelle. Comme précisé dans l'Encadré 4, les détecteurs grand public n'offrent pas cette possibilité d'être vérifiés. Le seul recours, pour l'utilisateur qui constaterait une dérive de la réponse de son détecteur, est de procéder à un ajustage arbitraire à la valeur de 400 ppm_v en air extérieur. Cette action peut induire un biais conséquent, car comment assurer que lors de cet ajustage arbitraire en un point, la concentration extérieure est bien de 400 ppm_v ? De fait, l'exactitude de mesure des détecteurs grand public dans la gamme 300 ppm_v – 600 ppm_v n'est pas garantie. En fonction des modèles grand public, certains appareils utilisent un algorithme de calcul de correction automatique de la ligne de base (ABC pour : *Automatic baseline correction*) qui va consister, lors d'une mesure en continu, sur plusieurs jours, à affecter à la valeur minimale mesurée par le détecteur la valeur de 400 ppm_v. Si la concentration en CO₂ dans le local monitoré ne baisse jamais (pollution spécifique, absence de renouvellement d'air), cette caractéristique peut induire un biais supplémentaire sur la mesure des faibles concentrations de CO₂.

Cette impossibilité technique de vérification et de calibrage de la réponse des détecteurs grand public suffit à restreindre leur utilisation à l'indication de l'évolution d'un local de travail. Toute mesure absolue du taux de CO₂ dans l'atmosphère est déconseillée avec ces appareils grand public.

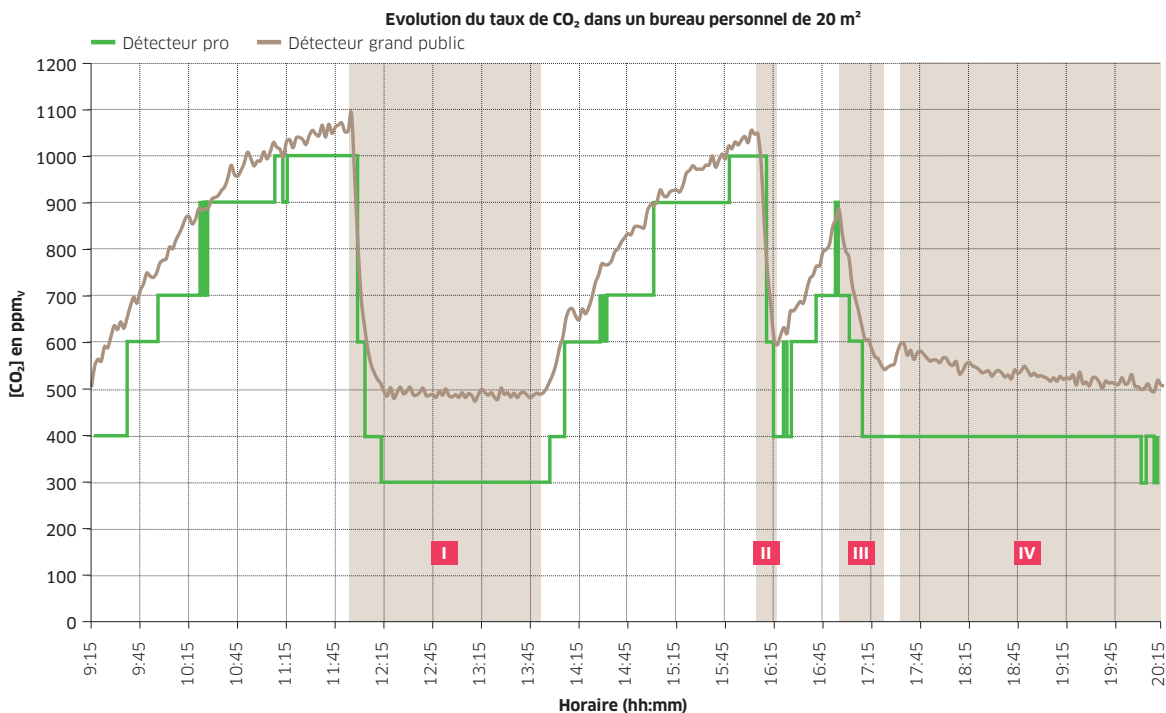
Cependant, si les règles de bonnes pratiques précisées dans l'Encadré 5 sont respectées, l'utilisation des détecteurs grand public permet d'acquérir des informations importantes en matière d'évolution de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère des lieux de travail, informations qui permettront de proposer des mesures d'amélioration.

Comment interpréter les mesures de taux de CO₂ dans les espaces de travail ?
Trois exemples de situations professionnelles

Les interprétations possibles des mesures de CO₂ en temps réel sont illustrées au travers de trois exemples de déploiements de détecteurs grand public à technologie NDIR dans des espaces de travail. Le modèle de détecteurs grand public choisi et déployé dans le cadre de ces exemples représente le meilleur compromis entre performances métrologiques et contraintes d'utilisation, conformément aux préconisations des Encadrés 3 et 5.

Exemple d'un bureau personnel

Dans ce premier exemple, deux détecteurs sont disposés dans un bureau occupé par une personne, un modèle professionnel (courbe verte) calibré selon les règles requises avec une bouteille étalon à 1 000 ppm_v de CO₂ et un modèle grand public (courbe beige) n'ayant



← FIGURE 3
Suivi de la concentration en CO₂ dans un bureau de 20 m² dépourvu de ventilation mécanique et occupé par un seul salarié. Le graphique représente les enregistrements d'un détecteur « professionnel » en vert et ceux d'un détecteur « grand public » en beige au cours d'une journée de travail. Les zones numérotées de I à III correspondent à des périodes de vacances du bureau, porte close avec une fenêtre entrouverte. La zone IV correspond à la période succédant à la fin de poste, tous les ouvrants étant clos.

subi aucun ajustage en air extérieur. Les appareils sont placés au centre de la pièce, côte à côte sur un plan de travail à une distance d'environ 1,5 m du bureau de l'opérateur, qui ne porte pas de masque. Les deux détecteurs sont synchronisés sur la même référence temporelle.

Lors des phases de travail, le niveau de CO₂ (cf. Figure 3) dans l'air augmente jusqu'à atteindre environ 1 100 ppm_v. Le bureau n'est pas équipé d'une ventilation mécanique. Le volume communique cependant avec le reste du bâtiment, les dalles de faux-plafond n'étant pas parfaitement jointives. Ceci explique que la progression du taux de CO₂ ralentit. Après deux heures trente d'activité, l'occupant ouvre la fenêtre et quitte le bureau (zone I). La porte du bureau reste fermée durant l'aération de la pièce. Cette comparaison de deux appareils met en évidence que le suivi de l'évolution de la concentration donne des réponses quasi identiques. Par contre, le détecteur grand public ne descend pas sous les 500 ppm_v de CO₂, contrairement au détecteur professionnel. La zone IV (en beige sur la Figure 3) correspond à l'arrêt des principales activités dans le bâtiment: la concentration en CO₂ dans le bureau clos baisse pour atteindre un équilibre avec l'air extérieur, phénomène qui tend à prouver que le volume du bureau n'est pas isolé du reste du bâtiment.

Cet exemple illustre la nécessité de demander à l'opérateur d'aérer naturellement son bureau toutes les deux heures pendant au moins vingt minutes, pour retrouver une concentration en CO₂ équivalente à celle de l'air extérieur.

Exemple d'une salle de classe d'un collège neuf

Un détecteur de modèle grand public est posé sur le

bureau d'un personnel enseignant dans une salle de classe d'un collège neuf, deux mois après la réception du bâtiment. La Figure 4 représente l'évolution du niveau de CO₂ dans la classe. Les occupants sont masqués (élèves et professeur). La référence de 800 ppm_v, préconisée par le Haut conseil de santé publique pour les ERP, est représentée par un trait rouge². Les différents événements rythmant la journée de classe sont indiqués sur le graphe lui-même. Le bâtiment neuf, en zone rurale, est pourvu d'un système de ventilation mécanique général. La salle, d'un volume de 145 m³, est située au premier étage du bâtiment et est équipée de fenêtres ouvrant sur la cour.

Les résultats montrent un accroissement de la teneur en CO₂ durant chaque heure de cours. En fonction de la durée de la ventilation naturelle de la salle, le niveau de CO₂ se situe entre 1 300 ppm_v et 1 500 ppm_v à la fin de chaque heure de cours. L'enregistrement durant la pause méridienne, au cours de laquelle la fenêtre est maintenue ouverte en absence de tout occupant, permet de conclure que le niveau de CO₂ en air extérieur mesuré par le détecteur est de l'ordre de 500 ppm_v. La période de la photographie de classe dans l'après-midi montre un taux de CO₂ qui baisse alors que la salle est close mais vidée de ses occupants. Cet effet est imputable à la ventilation mécanique du bâtiment qui insuffle en continu de l'air neuf prélevé en extérieur.

La Figure 4 révèle que la ventilation naturelle est indispensable dans cette salle mais qu'une durée d'ouverture de fenêtre de l'ordre de cinq minutes n'est pas suffisante pour retrouver un niveau de CO₂ équivalent à celui de l'air extérieur. La ventilation naturelle durant la récréation matinale pendant une



FIGURE 4 → Suivi de la concentration en CO₂ dans une salle de classe d'un collège pourvu d'un système mécanique de ventilation des locaux. Les zones en beige correspondent à des périodes d'ouverture d'un ou deux ouvrants: une porte d'accès et une fenêtre en vis-à-vis. Pour la zone jaune, l'effectif s'absente pour la prise de la photographie scolaire de rentrée, les ouvrants sont tous clos.

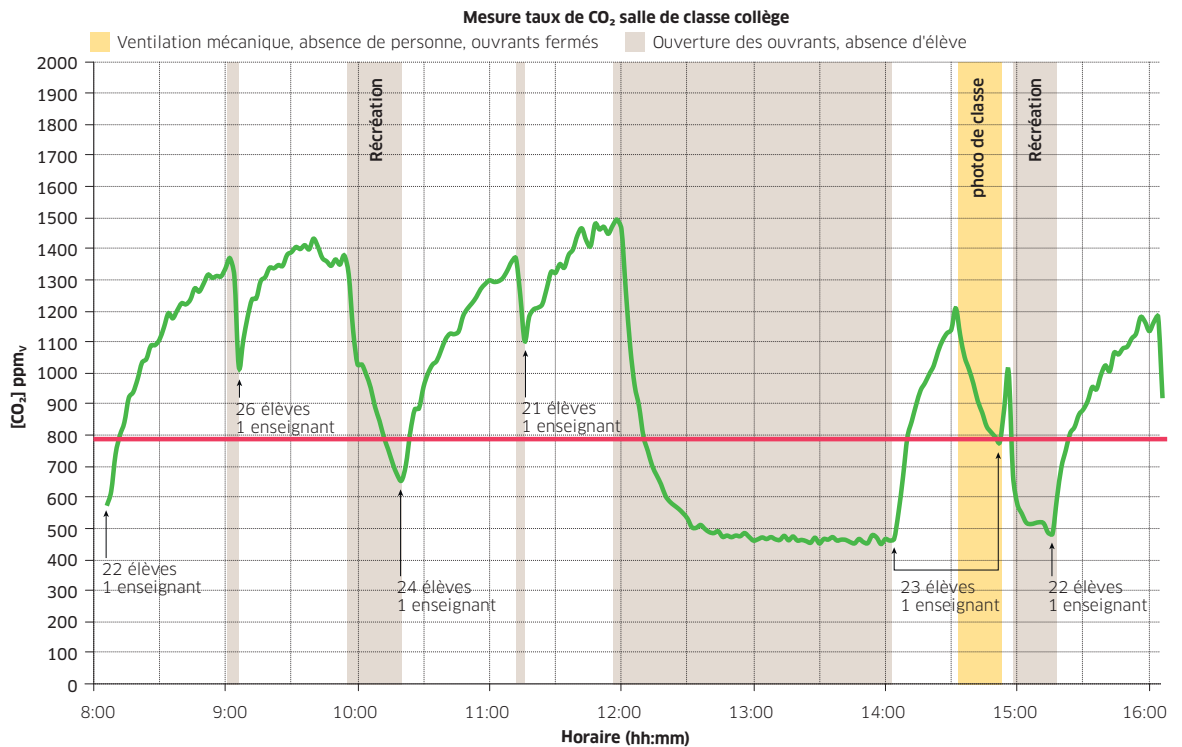
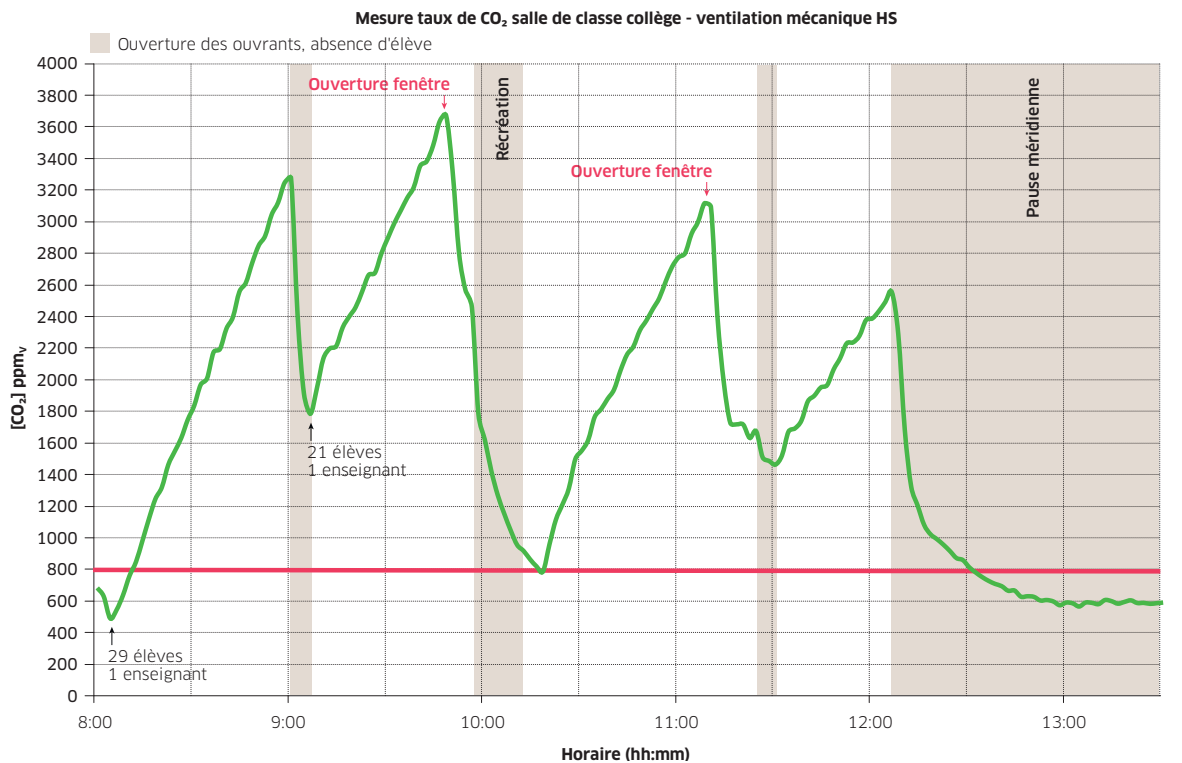


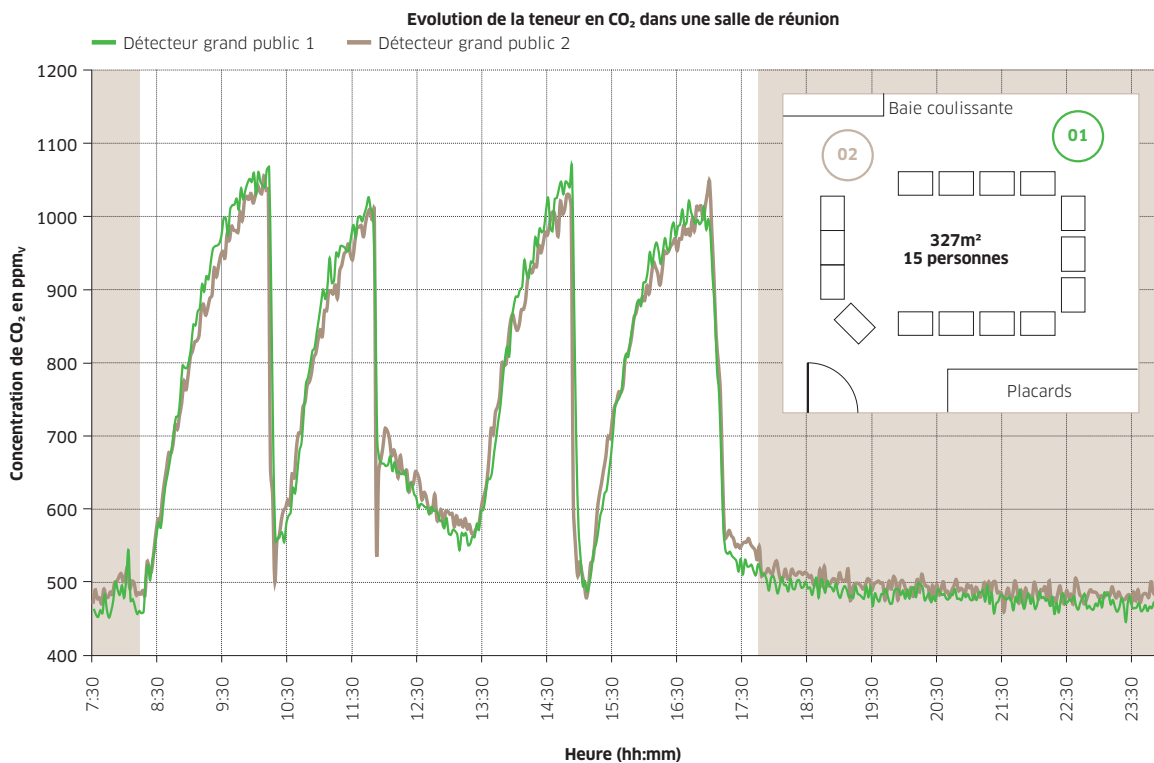
FIGURE 5 → Suivi du taux de CO₂ dans la même salle de classe deux mois plus tard, le système de ventilation mécanique étant en panne. Les zones en beige correspondent à des périodes d'absence ou de renouvellement de l'effectif, la porte et/ou la fenêtre étant ouvertes. Pour des raisons d'inconfort ressenti, la fenêtre a aussi été ouverte durant les phases de cours, ces événements étant précisés par des flèches rouges.



vingtaine de minutes permet, au mieux, de baisser la concentration en CO₂ à 650 ppm_v.

Cependant, l'effet de l'apport d'air neuf par une ventilation naturelle peut s'avérer limité dès lors que le local ne bénéficie pas d'une ventilation mécanique. La Figure 5 détaille les relevés du taux de CO₂ dans la même salle de cours, deux mois plus tard,

le système de ventilation mécanique général ayant été arrêté pour cause de défaillance. Les niveaux de CO₂ atteignent jusqu'à 3 500 ppm_v en fin d'heure de cours. Les valeurs mesurées sont plus de deux fois supérieures à celles enregistrées deux mois plus tôt. Comme précédemment, une ventilation naturelle est opérée par le personnel enseignant durant les intercour, la récréation et la pause méridienne.



← FIGURE 6
Suivi de la concentration en CO₂ dans une salle de réunion sur une journée. Les zones en beige correspondent à des périodes de mesures de CO₂ en extérieur. Deux détecteurs de même modèle ont été placés à deux endroits différents de la salle, pourvue d'un système de ventilation mécanique. Le plan d'implantation de la salle est schématisé en haut à droite.

Suite à une sensation de manque d'air, l'enseignant ouvre la fenêtre avant la fin de l'heure de cours: cette action induit rapidement une baisse du taux de CO₂ mais ne permet pas d'abaisser la concentration en dessous de 1 400 ppm_v. En l'absence de fonctionnement du système de ventilation mécanique général du bâtiment, la qualité de l'air de la salle de cours s'est détériorée et les niveaux de CO₂ alors mesurés soulèvent désormais un questionnement sur l'exposition des occupants et des effets potentiels sur leur santé. La remise en état du système de ventilation mécanique doit alors être une priorité.

Enfin, il faut garder à l'esprit que toute opération de ventilation naturelle va avoir un impact sur le confort thermique ressenti par les occupants, qu'il s'agisse d'une baisse de la température moyenne de la salle ou de la présence d'un courant d'air plus ou moins important. Toute consigne de durée de la ventilation naturelle sera donc acceptée différemment par les occupants en fonction de l'inconfort ressenti.

Exemple d'une salle de réunion collective

Dans ce dernier exemple, deux appareils grand public de même modèle sont placés dans une salle de réunion collective, à deux endroits distincts. Cette salle est pourvue d'une ventilation mécanique contrôlée permettant un apport d'air neuf de l'extérieur. Les deux zones en beige correspondent à des mesures en extérieur: selon ces données enregistrées, le taux de CO₂ moyen relevé par les deux appareils en extérieur est de l'ordre de 500 ppm_v.

La concentration en CO₂ augmente dès le début de la réunion jusqu'à environ 1 000 ppm_v et baisse lors

des phases de ventilation naturelle, par ouverture de la baie coulissante et de la porte principale d'accès (schéma d'implantation: cf. Figure 6). Les courbes des deux capteurs sont comparables, bien qu'ils soient placés à des endroits différents, l'un dans le courant d'air généré lors de l'ouverture des ouvrants et le second dans l'angle opposé. Ces mesures permettent de confirmer que la présence d'un système de ventilation mécanique avec plusieurs bouches d'apport d'air neuf, réparties dans la salle, conduit à homogénéiser l'atmosphère et évite des zones « mortes » où les polluants pourraient s'accumuler.

Ces courbes confirment également la nécessité d'aérer naturellement la salle durant une quinzaine de minutes lors des pauses de chaque demi-journée. Cette aération naturelle couplée à la vacance de la salle garantit un retour de la concentration de CO₂ à un niveau comparable à celui de l'air extérieur. Durant la pause méridienne, la salle reste close durant environ une heure et demie et l'apport d'air neuf continu par le système de ventilation concourt à faire redescendre le taux de CO₂, mais pas au niveau de l'air extérieur. Une période de ventilation naturelle de quelques minutes avant la reprise de la réunion aurait pu permettre une baisse supplémentaire.

Enfin, les données recueillies confirment l'adéquation entre le nombre de personnes autorisées dans la salle et les performances du système de ventilation à la condition de procéder à une ventilation naturelle toutes les deux heures. L'augmentation de la jauge de quinze personnes entraînerait de fait une augmentation de l'amplitude des pics de CO₂: des périodes de ventilation naturelle plus fréquentes et/ou plus





© Gaël Kerbaol / INRS / 2021

longues seraient alors nécessaires pour conserver la qualité de l'air dans la salle de réunion.

Dans cet exemple, la jauge associée à une consigne de ventilation naturelle de quinze minutes toutes les deux heures garantit une atmosphère dans laquelle le niveau de CO₂ est maîtrisé.

Synthèse

Le choix d'un détecteur pour la mesure en temps réel des taux de CO₂ dans les espaces de travail est le fruit d'une analyse des objectifs et des performances des appareils disponibles ou à acquérir. Le

respect des préconisations de mise en œuvre décrites dans cet article permet à l'utilisateur d'exploiter au mieux les résultats des mesures. Les exemples présentés illustrent que la problématique du taux de CO₂ dans les locaux de travail est complexe et ne peut se résoudre au respect d'un seuil de concentration recommandé, d'autant plus si à ce seuil n'est pas rattachée une incertitude de mesure. ●

1. *Avis du HCSP sur la mesure du CO₂ dans les ERP.* Cf. Pour en savoir plus.
2. *Le HCSP a proposé une concentration seuil en CO₂ de 600 ppm_v pour les lieux de restauration dans lesquels les personnes ne portent pas de masque.*

POUR EN SAVOIR +

- *Avis du HCSP sur la mesure du CO₂ dans les établissements recevant du public (ERP).* Accessible sur : www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1009.
- *Circulaire du 9 mai 1985 relative au commentaire technique des décrets nos 84-1093 et 84-1094 du 7 décembre 1984 concernant l'aération et l'assainissement des lieux de travail.* Accessible sur : https://sstie.ineris.fr/consultation_document/21593.
- *Dioxyde de carbone.* INRS, Fiche toxicologique n° 238, 2005. Accessible sur : www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox.html.
- *Détecteurs portables de gaz et de vapeurs – Guide de bonnes pratiques pour le choix, l'utilisation et la vérification.* INRS, ED 6088, 2011. Accessible sur : www.inrs.fr.
- GUICHARD R., GÉRARDIN F. – Améliorer la ventilation des locaux de travail du tertiaire

- pendant et après la pandémie de Covid-19. *Hygiène & sécurité du travail*, 2021, 264, NT 92, pp. 53-61. Accessible sur : www.inrs.fr/publications/hst/notes-techniques.html.
- GALLAND B., GÉRARDIN K., MONTA N. ET AL. – Manipulation de carboglace : mesure de l'exposition individuelle au CO₂ à l'aide de détecteurs à lecture directe. *Hygiène & sécurité du travail*, 2020, 261, EC 29, pp. 92-98. Accessible sur : www.inrs.fr/publications/hst/etude-de-cas.html.
 - **Dossiers parus dans *Hygiène & sécurité du travail* :**
 - « La métrologie au service de la prévention des risques professionnels ». 2020, 260, DO 30, pp. 22-56 ;
 - « La mesure des expositions aux agents chimiques : techniques et outils ». 2021, 263, DO 33, pp. 18-43. Accessibles sur : www.inrs.fr/publications/hst/dossier.html.