



Protocole sanitaire : étendre rapidement l'usage des détecteurs CO₂ aux locaux d'enseignement

Fiche complémentaire à l'Avis rendu par l'Académie des sciences le 11 Juin 2021.
(Mise à jour de la Fiche au 30.11.2021)

Cette fiche détaillée est complémentaire de l'Avis rendu par l'Académie par l'Académie des sciences. Elle est destinée plus particulièrement aux autorités éducatives - nationale, régionales, départementales et locales -, aux élus, ainsi qu'au monde de l'éducation nationale : responsables d'établissements scolaires, enseignants, personnel médical. Elle peut également s'avérer utile dans l'enseignement supérieur. Si la ventilation est plus aisée avec les beaux jours, elle demeurera essentielle pour maintenir le contrôle de l'épidémie après la rentrée de septembre 2021. En outre, son importance demeurera pour d'autres maladies épidémiques (grippes...), ainsi que pour les capacités cognitives des élèves.

Depuis l'automne 2020, avec les vagues épidémiques en France et dans le monde, le développement du sujet « **Ventilation des locaux** », en particulier en ce qui concerne les locaux scolaires a conduit à un ensemble de travaux, de recommandations, de documents de mise en œuvre, et d'outils pédagogiques pour les écoles, les collèges, les lycées et les universités. La plupart d'entre eux ont été recensés ou initiés par des groupes de chercheurs universitaires. Parmi ceux-ci, le **Projet CO₂** est disponible en libre accès sur le site de ce groupe de travail.

<https://projetCO2.fr>

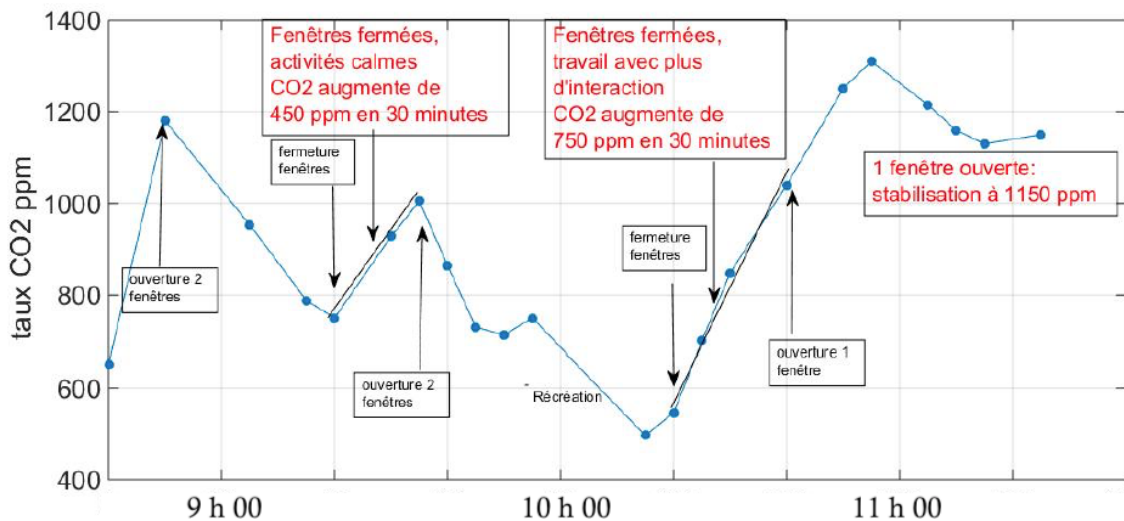
En se référant à ces travaux, la présente fiche souligne et analyse les différentes raisons qui rendent nécessaire une ventilation de qualité pour mieux contrôler l'épidémie : le rôle des aérosols dans les propagations virales ; la lien entre aérosols et concentration du gaz CO₂ dans les espaces clos ; la concentration de CO₂ comme indicateur du renouvellement de l'air inspiré par les occupants ; l'existence d'un seuil de ventilation adéquate, notamment pour le bon exercice des capacités cognitives ; la nécessité de mesures précises pour garantir la qualité de cette ventilation ; la disponibilité et la mise en œuvre de capteurs de CO₂ appropriés. Ces données peuvent ainsi éclairer les acteurs à tous niveaux, notamment le corps enseignant. Elles conduisent aussi à des propositions pédagogiques qui peuvent associer les jeunes eux-mêmes à ces indispensables mesures de contrôle.

A. La ventilation et sa mesure.

« Comment bien aérer les pièces ». Benoît Semin, Edouard Kierlik et Jean-Michel Courty, revue *Pour la science*, n°518, Nov. 2020

Cet article court et très accessible présente le contexte scientifique de la présence du dioxyde de carbone CO₂ dans l'air. Il montre le rôle du renouvellement que peut assurer une bonne ventilation par la mesure du taux de CO₂.

<https://www.pourlascience.fr/sr/idees-physique/comment-bien-aerer-les-pieces-20353.php>



Mesure faite par une professeure des écoles, dans une classe d'école primaire parisienne, de la concentration de CO₂ (ppm) et de l'impact de la ventilation, à partir de 8 h 40 et au fil de la matinée. SOURCE : Projet CO₂

B. Dossier Projet CO₂

Le dossier complet présente le lien entre la concentration de virus SARS-Cov2-2 et l'aération des pièces préalablement fermées contenant du public, ainsi que l'utilisation du CO₂ comme traceur de l'efficacité de la ventilation et sa mesure.

<https://projetCO2.fr>

C. Simulations de la ventilation d'un local fermé.

- L'article « Ouvrir les fenêtres, essentiel à la réouverture des écoles », *New York Times*, 22.3.2021, disponible en français en téléchargement libre, contient une animation visuelle et pédagogique sur l'importance de la ventilation des locaux scolaires, telle que perçue outre-Atlantique.

<https://www.nytimes.com/fr/interactive/2021/03/22/science/reopen-schools-safety-ventilation-FR.html>

- L'application « Covid-19 Indoor Safety Guide » (*Guide pour la sécurité Covid-19 dans les locaux*), simple et disponible en français, permet : 1/ d'ajuster les paramètres d'une simulation d'occupation d'un espace fermé par un groupe de personnes ; et 2/ de déterminer la probabilité de transmission du virus par voie orale. K. Khan et al, Massachusetts Institute of Technology, 2021.

<https://indoor-covid-safety.herokuapp.com/?lang=fr>

D. Articles scientifiques originaux

Des articles récents (2021), parus dans les meilleures revues scientifiques médicales, analysent la contagiosité du SARS-CoV-2 par voie aérienne, notamment dans les pièces fermées.

- “Coronavirus is in the air – there is too much focus on surfaces. Catching the coronavirus from surfaces is rare. The World Health Organization and national public-health agencies need to clarify their advice.” *Nature*, Editorial, 590, 7, 2 février 2021.
- “Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. Greenhalgh et al., *The Lancet*, 397, 10285, p.1603-1605, May 01, 2021. Résumé complet accessible sur [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(21\)00869-2/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(21)00869-2/fulltext)
- “Indoor Air Changes and Potential Implications for SARS-CoV-2 Transmission”. J.G.Allen, A.M. Ibrahim, *Journal of the American Medical Association*. Published online April 16, 2021. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33861316/>
- “Covid-19 has redefined airborne transmission”. Tang et al., *British Medical Journal*, BMJ, 373, 913, 2021. Pdf accessible <https://www.bmj.com/content/373/bmj.n913>.

E. Détecteurs (capteurs) pour la mesure de la concentration du gaz CO₂

Pour être faite et utilisable de façon fiable, la mesure de la concentration du gaz CO₂, qui est aisée, appelle néanmoins un certain nombre de choix et de précautions, détaillés dans la référence <https://projetco2.fr/capteurs>.

- Les détecteurs utilisés, commercialement disponibles et coûtant quelques centaines d’euros, doivent reposer sur la technique d’absorption infrarouge, appelée NDIR (*Non Dispersive Infra Red*, Infra Rouge Non Dispersif), la seule à fournir des informations quantitatives fiables.
- Un étalonnage correct du détecteur utilisé est requis. Certains détecteurs commerciaux fournissent un détecteur étalonné en usine et le précisent. Pour d’autres, il faut s’assurer que le modèle permet de réaliser un étalonnage et cette opération, simple, doit être effectuée régulièrement.
- Quelques points simples doivent retenir l’attention : position du détecteur dans la pièce, temps de stabilisation de la mesure.

F. Un cas plus spécifique, les locaux scolaires

La mesure de la qualité générale de l’air, de la ventilation et du taux de CO₂ dans les établissements scolaires a fait l’objet de plusieurs campagnes d’études officielles antérieurement à l’épidémie. Certains résultats, importants, sont accessibles dans les documents suivants :

o Guide *Ecol’air* de l’Ademe (Agence de l’environnement et de la maîtrise de l’énergie), 2018

<https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/1556-ecol-air-les-outils-pour-une-bonne-gestion-de-la-qualite-de-l-air-dans-les-ecoles-9791029710414.html>

o Bulletin de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur, juin 2018

<https://www.oqai.fr/fr/ateliers/qualite-de-l-air-et-confort-dans-les-ecoles-en-france-premiers-resultats-de-la-campagne-nationale>

Le texte, extrait de ce document (p.10) est joint ci-dessous en Annexe. Ce texte précise l'indice de confinement de l'air qui est utilisé (ICONE), ainsi que son lien avec le taux de CO₂ en ppm. Bien que le document soit antérieur à la pandémie, il éclaire sur les importants défauts de ventilation des écoles maternelles et élémentaires, pour plus d'un tiers des classes primaires. Ces défauts affectent les écoles dans la plupart des pays d'Europe. Même si les instructions officielles du protocole sanitaire ont mis l'accent sur l'importance de la ventilation, celle-ci généralement non mesurée est bien souvent insuffisante.

- Test pratiqué dans des cantines scolaires d'une grande ville française
En collaboration avec les services techniques de cette ville, le Projet CO₂ a testé une centaine de réfectoires de façon rigoureuse au début de l'année 2021. Le tableau qui suit donne les résultats, particulièrement préoccupants pour 20 % des cantines malgré un protocole général de ventilation existant dès l'année 2020. Ces travaux démontrent que seule la mesure du taux de CO₂ peut renseigner de façon suffisamment précise sur la qualité de la ventilation.

Taux de CO ₂	Nombre de cantines (en %)
Moins de 600 ppm	11
600 à 800 ppm	30
800 à 1000 ppm	30
1000 à 1500 ppm	10
Plus de 1500 ppm	19

- **Impact sur les capacités cognitives**

Plusieurs études montrent qu'une concentration élevée de CO₂ dans une pièce mal ou non-ventilée (classe ou cantine) altère momentanément les capacités cognitives.

Au Royaume-Uni, le suivi des enfants de 8 écoles primaires a montré, lorsque la concentration dépasse 1500 ppm, des effets significatifs sur la capacité de décision, la mémoire des images, la reconnaissance des mots, l'attention et la vigilance. Les effets sont plus importants lorsque les tâches demandées requièrent des compétences plus complexes, telles que la mémoire de travail spatiale ou la capacité de distinguer la nature d'un mot.

Z.S. Bako-Biro et al. "Ventilation rates in schools and pupil's performance", *Building and Environment*, **48**, 212-223 (2012)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132311002617>

Aux États-Unis, une étude semblable a été conduite sur des adultes (18-39 ans). Les indicateurs cognitifs utilisés mesurent la capacité de décision : initiative, recherche

d'information, usage de l'information, stratégie d'action. Avec ces indicateurs, les performances passent de 'très bonnes' à 'moyennes' pour une concentration de 1000 ppm, et à 'marginales' ou même 'dysfonctionnelles' pour 2500. Le taux CO₂ a été mesuré dans de nombreuses classes en Californie et au Texas, dépassant souvent 2500 ppm. Toutefois le lien pouvant exister entre 'capacité de décision' et 'apprentissage scolaire' n'est pas établi par cette étude.

U. Satish et al, "Is CO₂ an Indoor pollutant ? Direct effects of low to moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance". *Environmental Health Perspectives*, **120**, 1671-1677 (2012)

Voir résumé <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/is-co2-an-indoor-pollutant>

Les deux études concluent sur le grand intérêt d'évaluer la qualité de la ventilation par des mesures à l'aide de capteurs de CO₂ dans les locaux concernés.

G. Textes officiels sur l'aération et la Covid-19

- a. Avis du Haut Conseil de la Santé publique, *relatif à l'adaptation des mesures d'aération, de ventilation et de mesure de dioxyde de carbone (CO₂) dans les établissements recevant du public (ERP) pour maîtriser la transmission du SARS-CoV-2* (28 avril 2021)
- b. Protocole sanitaire du Ministère de l'éducation nationale, de la jeunesse et des sports, *Repères pour l'aération et la ventilation des espaces scolaires*, 29 avril 2021

« La mesure de la concentration en CO₂ à l'aide de capteurs permet d'évaluer facilement le niveau de renouvellement de l'air. Il est recommandé d'équiper chaque école de capteurs (mobiles ou fixes) afin de déterminer la fréquence des rations nécessaires pour chaque local pour contrôler le bon fonctionnement de la ventilation mécanique...

Le renouvellement de l'air nécessaire pour limiter la transmission du SARS-CoV-2 par aérosols dépend du nombre d'occupants, de la durée d'occupation, du taux d'aération et du volume de la pièce. La mesure des concentrations en CO₂ et la comparaison avec la valeur seuil de 800 parties par million (ppm) permet d'adapter la durée et la fréquence d'aération aux spécificités des locaux, à leur utilisation ainsi qu'aux conditions climatiques locales. »

H. Activités pédagogiques, liées à la ventilation et à sa mesure.

- L'utilisation de détecteurs de CO₂ en milieu scolaire est encouragée dans le protocole du Ministère de l'éducation nationale, de la Jeunesse et des Sports (document F.b, avril 2021). Concernant les aspects pédagogiques, cette note affirme :
"Une sensibilisation à l'importance de l'aération, aussi bien par les personnels que par les élèves, peut être facilitée par l'utilisation de ces capteurs dans le cadre d'une approche pédagogique, par exemple par l'enseignement des mécanismes de propagation des virus, de la qualité de l'air intérieur, de la respiration, ou de la technologie des capteurs."
- Un ensemble d'activités pédagogiques, guidées et détaillées, est donc ici proposé
Les références précises donnant accès à chacune de ces activités figurent ici en Note de bas de page.
- Le groupe Projet CO₂, en collaboration avec la Fondation *La main à la pâte*, a rédigé ou collecté des documents pédagogiques destinés à des niveaux allant du cycle 2 (CP, CE1, CE2) jusqu'au collège, au lycée et à l'enseignement supérieur. Ces documents, détaillés

- ci-dessous, décrivent des activités portant sur la mesure de CO₂ avec pour objectif une vérification de la qualité de l'air et de l'efficacité de la ventilation mise en œuvre.
- En complément, la mesure de CO₂ peut également être utilisée pour d'autres thématiques : respiration et photosynthèse chez les plantes, combustion, dosage chimique.
 - Enfin, la fabrication de détecteurs à partir de capteurs et de micro-contrôleurs de type « Arduino » peut s'effectuer dans le cadre d'un enseignement de technologie.

Ces activités s'intègrent facilement dans les programmes scolaires de diverses disciplines : physique, sciences de la vie et de la Terre, chimie, mathématiques, informatique, technologie, ainsi qu'éducation morale et civique.

Des propositions détaillées (<https://projetco2.fr/documents-pedagogiques>)

- École et Collège : cycles 2, 3, 4 (<https://projetco2.fr/documents-pedagogiques>)
 - a. Séquence pédagogique, cycles 2,3,4.
 - b. *Utilisation de détecteurs de CO₂ dans les classes ?* par U.Delabre, Maison pour la science en Grand Aquitaine, Université de Bordeaux
 - c. *Photosynthèse et mesure du CO₂*, (Fiche pédagogique cycles 3 et 4).
 - d. *Évolution spatiale du CO₂*, Fiche pédagogique.
 - e. *Combustion et mesure du CO₂*, Fiche pédagogique.
- Lycée et Enseignement supérieur (<https://projetco2.fr/documents-pedagogiques>)
 - a. *Analyser les mesures* (Lycée)
 - b. *Dynamique des aérosols* (Lycée et enseignement supérieur)
 - c. *Détermination de la concentration de CO₂ par dosage*, avec éléments historiques (Lycée et enseignement supérieur).
 - d. *Estimations du taux de production de CO₂ par la respiration* (Lycée et enseignement supérieur).
- Soutiens pédagogiques par la Fondation *La main à la pâte*
 - e. *Mesurer le CO₂ pour bien aérer sa classe*. Une vidéo *Billes de sciences #46* de J.-M. Courty. <https://www.fondation-lamap.org/fr/page/66813/billes-de-sciences-46>
 - f. Cette vidéo est accompagnée de liens vers [une activité pédagogique pour le Cycle 3](#), détaillée et testée en classe.

ANNEXE

La ventilation des locaux scolaires et l'indice de confinement de l'air.

Extrait d'un document publié par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur, institution missionnée par les pouvoirs publics (Juin 2018).

<https://www.oqai.fr/fr/ateliers/qualite-de-l-air-et-confort-dans-les-ecoles-en-france-premiers-resultats-de-la-campagne-nationale>

Aération – Ventilation

Dans les trois-quarts des écoles, il n'y a pas de système spécifique de ventilation, qu'il soit mécanique ou naturel par grilles hautes et basses ; l'aération se fait par ouverture des fenêtres.

Le confinement de l'air à l'intérieur d'une salle de classe dépend du renouvellement de l'air de la pièce et de son taux d'occupation.

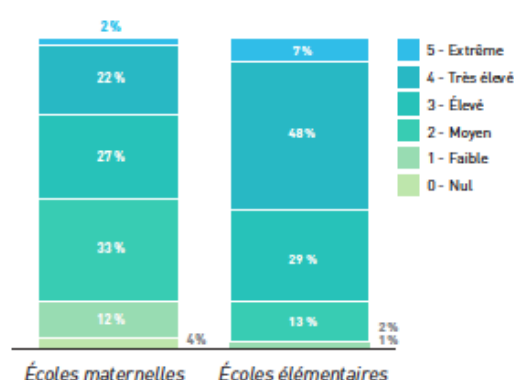
Le renouvellement d'air résulte du système de ventilation, de l'ouverture des fenêtres et des fuites d'air parasites. Un bon indicateur du confinement de l'air intérieur est la mesure du dioxyde de carbone (CO₂). Ce dernier est émis par la respiration des personnes présentes (production métabolique). Ainsi, plus la concentration en CO₂ est élevée dans une pièce, plus l'air y est confiné et moins bonne est sa qualité. **L'indice de confinement de l'air ICONE** est calculé à partir des valeurs de CO₂ mesurées en période d'occupation d'une pièce. Il permet d'évaluer le confinement de l'air de cette pièce à l'aide d'une note allant de 0 (aucun confinement) à 5 (confinement extrême).

ICONE Confinement de l'air intérieur	Fréquence des concentrations en CO ₂
0 = nul	100 % valeurs CO ₂ < 1 000 ppm
1 = faible	~ 1/3 valeurs > 1 000 ppm mais < 1 700 ppm
2 = moyen	~ 2/3 valeurs > 1 000 ppm mais < 1 700 ppm
3 = élevé	~ 2/3 valeurs > 1 000 ppm dont 1/3 > 1 700 ppm
4 = très élevé	~ 2/3 valeurs > 1 700 ppm
5 = extrême	100 % des valeurs > 1 700 ppm

Correspondances entre l'indice ICONE, les concentrations en CO₂ et le niveau de confinement

5 % des écoles ont au moins une salle de classe présentant un confinement extrême, à savoir un indice ICONE de 5, valeur pour laquelle des investigations complémentaires doivent être menées selon la réglementation en vigueur. 36 % des écoles ont au moins une salle de classe présentant un confinement très élevé. Les proportions selon le type d'écoles sont présentées sur la *Figure 13*.

Figure 13. Confinement de l'air
Répartition de l'indice ICONE selon le type d'écoles



Valeur de l'indice ICONE la plus élevée par établissement