

Dossier pédagogique



Projet CO₂

Mesurer le CO₂ pour mieux aérer

Version 1.0 (25 mars 2021)

PRÉSENTATION	3
COVID ET AÉROSOLS — LE CO2 COMME TRACEUR DU RENOUVELLEMENT DE L’AIR	4
La contamination aérienne par le coronavirus	4
En savoir plus : Les aérosols viraux.	5
Mesurer la concentration en CO2 pour juger de la qualité de l’air intérieur	6
LE CO2	7
Les concentrations : % et PPM	7
Le CO2 dans la nature	8
En savoir plus : le CO2 dans l’atmosphère	8
Le CO2 et la respiration	9
Le CO2 et les capacités cognitives	10
MESURER LA CONCENTRATION EN CO2	11
Les conseils pour bien mesurer le taux de CO2	11
Repères sur la concentration en CO2 et les seuils	12
En savoir plus : comment détecter le CO2 — principe d’un détecteur NDIR	13
AÉRATION - VENTILATION RENOUVELLEMENT DE L’AIR	14
À PROPOS	15
Qui sommes-nous	15

Présentation

Le Ministère de l'Education Nationale préconise de contrôler le taux de renouvellement d'air dans les lieux de restauration collective par exemple en utilisant des détecteurs de CO2 (dioxyde de carbone ou gaz carbonique). Le Haut Conseil à la Santé Publique et le Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche et de l'Industrie indiquent que des actions doivent être menées si la concentration en CO2 dépasse le seuil de 800 ppm (parties par million) dans les commerces ou dans les locaux à usage collectif.

Ce document a pour objectif d'expliquer ces consignes et de répondre aux questions suivantes : quelles en sont les raisons scientifiques? Que signifient les termes utilisés? Comment les mettre en pratique?

Nous proposons de plus dans un second document des activités pour les classes permettant d'impliquer les élèves dans ces procédures et d'utiliser les circonstances pour motiver des activités expérimentales.

Les sujets abordés sont regroupés en 4 thèmes.

- le coronavirus (SARS-CoV-2) – la contamination aérienne – le CO2 comme traceur du renouvellement de l'air des espaces clos
- le CO2
- la mesure du CO2 : principes et pratique
- la ventilation et son contrôle à l'aide de la mesure du CO2

Ce document est amené à évoluer et s'enrichir.

La version actuelle est la version 1.0 (première version diffusée).

Retrouvez plus d'informations, des webinaires, des conseils... sur notre site :

<http://projetco2.fr/>

Covid et aérosols — le CO2 comme traceur du renouvellement de l'air

La transmission par voie aérienne du virus SARS-CoV-2 fait partie, avec la transmission directe de proximité, des modes principaux de propagation de la Covid-19 dans les espaces clos. Les microgouttelettes émises par une personne infectée, qui sont chargées en virus, restent longtemps en suspension dans l'air sous forme d'aérosols. Moins l'air de la pièce dans laquelle se trouve ou s'est trouvée cette personne est renouvelé et plus le risque de contamination augmente pour les autres personnes.

Que sont ces microgouttelettes qui restent très longtemps suspendues dans l'air aussi appelées aérosols et comment s'en prémunir?

La contamination aérienne par le coronavirus

Lorsque nous respirons, parlons, crions ou chantons, toussons ou éternuons, nous émettons dans l'air que nous expirons un nombre plus ou moins important des petites gouttes d'eau. Lorsque nous sommes infectés par le coronavirus SARS-CoV-2, ces gouttes sont chargées de virus.

Les gouttes les plus grosses (d'un diamètre supérieur à un centième de millimètre) sont nommées gouttelettes, elles tombent très rapidement sur les surfaces et sur le sol, mais peuvent contaminer une personne à proximité directe. Les gouttes plus fines ou microgouttelettes restent, en revanche, très longtemps en suspension dans l'air, on les dénomme aérosols.

Dans une pièce, suite aux mouvements d'air, les aérosols se répandent progressivement dans tout l'espace. Leur diffusion est identique à celle des parfums ou de la fumée de cigarette, que l'on peut sentir même lorsque la personne qui les a émis est à l'autre bout de la pièce.

Plus la concentration en aérosol est importante, plus le risque de contamination est élevé, il est donc important de prendre des mesures permettant :

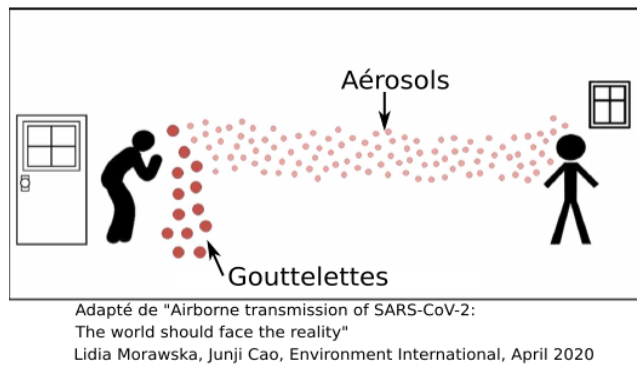
- de réduire les émissions des gouttelettes (port du masque par tous)
- d'évacuer au plus vite les aérosols (bien renouveler l'air de l'espace clos)

La solution complémentaire d'utiliser une filtration de l'air intérieur avec un filtre HEPA (à très haute efficacité vis-à-vis des particules aériennes) nécessite des études d'efficacité dans différentes configurations dans des locaux occupés. Cette solution ne sera pas décrite ici.

Il est difficile de mesurer la concentration de particules virales dans l'air. En revanche, le devenir des aérosols suit la même dispersion dans l'air que les gaz que nous expirons, et dont la concentration dans l'air est plus facile à mesurer. C'est notamment le cas pour la concentration en CO2. Moins l'aération est bonne et plus cette concentration est importante. On dira que l'on utilise le CO2 comme gaz «traceur» du renouvellement de l'air d'un local occupé.

En savoir plus : Les aérosols viraux.

Lors de l'expiration, nous émettons des petites gouttes de liquide, susceptibles de contenir le virus Sars-CoV-2, même si nous n'avons pas de symptômes de la maladie Covid-19. Nous émettons beaucoup plus de gouttes de liquide (x10) lorsque nous parlons ou que nous chantons que lorsque nous ne faisons que respirer.



Le diamètre de ces gouttes est compris entre 0,1 micromètre (μm) c'est-à-dire un dix-millième de millimètre et 1 millimètre. Comme la taille moyenne du SARS-CoV-2 est de 0,125 micromètre, toutes les gouttes plus grosses que cette taille sont susceptibles de contenir un ou plusieurs virus. Les gouttes de diamètre supérieur à environ 10 micromètres soit un centième de millimètre sont appelées «gouttelettes», alors que ceux de diamètre inférieur à environ 10 μm sont appelés «aérosols» ou encore microgouttelettes.

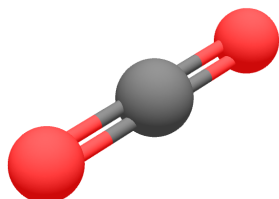
Les gouttelettes sont visibles à l'œil nu et tombent rapidement au sol. Par exemple, une gouttelette de diamètre 100 μm expirée à une hauteur de 1,8 m touche le sol au bout de 6 secondes. Si une personne respire ou parle, les gouttelettes tombent au sol à moins de 2 m de celle-ci. Cette distance est plus grande dans le cas de gouttelettes éjectées à grande vitesse lorsqu'une personne tousse ou éternue. Les gouttelettes contenant du Sars-CoV-2 peuvent induire une contamination uniquement si elles atteignent le visage, principalement le nez et la bouche d'une personne à proximité. Une distanciation physique suffisante, d'au moins 2 mètres, et le port du masque permettent de limiter fortement ce mode de contamination.

Les aérosols ou microgouttelettes sont invisibles à l'œil nu et restent en suspension dans l'air pendant de très longues durées. La vitesse de chute d'une microgouttelette de diamètre 1 micromètre (1 millième de millimètre) présente dans l'air au repos est ainsi de 30 micromètres par seconde : il lui faut plus de 16 heures pour toucher le sol en partant d'une hauteur de 1,8 m. En fait, il y a toujours des mouvements de l'air dans une pièce, et les aérosols sont emportés par ces mouvements d'air, comme de la fumée de cigarette. Ils peuvent ainsi être transportés sur des distances supérieures à 2 m à l'intérieur d'une pièce voire d'un bâtiment. La distanciation physique est insuffisante pour se protéger de la contamination par les aérosols à l'intérieur des bâtiments. Les moyens complémentaires principaux de protection sont le port collectif du masque bien ajusté et l'aération/ventilation des locaux à l'extérieur en revanche, les aérosols sont très rapidement dilués dans l'air ambiant, c'est donc surtout de la contamination de proximité par gouttelettes dont il faut se prémunir par le port collectif du masque.

Mesurer la concentration en CO2 pour juger de la qualité de l'air intérieur

Une des méthodes principales de mesure de la qualité de l'aération et/ou de la ventilation est la mesure de la concentration en CO2. Comme les aérosols, le CO2 est émis lors de la respiration. Comme les aérosols, il est dispersé et transporté par les mouvements d'air de la pièce. Le CO2 est ainsi qualifié de <<traceur>> du renouvellement de l'air de la pièce. Les recommandations officielles qui utilisent le CO2 comme traceur de la qualité du renouvellement d'air dans une pièce, émises avant la période de pandémie que nous connaissons, donnent des valeurs maximales de CO2, généralement sans préciser la configuration de son émission. L'utilisation de la mesure du CO2 comme traceur des aérosols émis par les occupants d'une salle nécessiterait de calculer le coefficient de proportionnalité entre la concentration en CO2 et la quantité d'aérosols qui dépend des conditions de l'émission : si les occupants portent un masque, un même taux de CO2 correspond à une quantité plus petite d'aérosols émis que s'ils n'en portent pas. De même, un même taux de CO2 correspondrait à une quantité plus petite d'aérosols s'il existe une filtration de l'air intérieur dans la pièce.

Le CO2



Source : Wikipédia

Le CO₂, aussi appelé dioxyde de carbone, ou encore gaz carbonique, est un gaz présent naturellement dans l'air. Dans l'atmosphère, sa concentration augmente au cours du temps en raison des activités humaines. Dans une salle, la quantité de CO₂ est liée à la respiration humaine et donc au nombre de personnes présentes et à leurs activités (indicateur du renouvellement de l'air). Ainsi, la concentration en CO₂, liée au nombre de personnes dans une salle, est le signe qu'une proportion de l'air intérieur a été expirée par quelqu'un dans la même salle, et peut contenir les aérosols émis lors de l'expiration.

De plus, une trop grande quantité de CO₂ inspiré affecte le fonctionnement du cerveau. Ainsi, indépendamment de la problématique de la contamination de la Covid, il est important de mesurer et de contrôler la concentration en CO₂ dans les lieux clos, notamment les salles d'enseignement.

Les concentrations : % et PPM

On exprime la concentration en CO₂ en utilisant les ppm, parties par million. En effet les valeurs en pourcentage sont faibles et pour ne pas devoir manipuler des petites quantités, on utilise cette unité qui est plus adaptée.

1 % = un pour cent : 1 % = 1/100 = 0,01

1 ppm = une partie par million : 1 ppm = 1/1 000 000 = 0,000 001

Quelques repères (relation ppm et %) :			
100 ppm	= 1/10 000	= 0,0001	= 0,01 %
1 000 ppm	= 1/1 000	= 0,001	= 0,1 %
10 000 ppm	= 1/100	= 0,01	= 1 %

Le CO2 dans la nature

Le CO2 est présent dans l'air ambiant, à une proportion de 0,04 %. Il provient de sources naturelles ou d'origine humaine. Les sources naturelles sont la respiration des êtres vivants, certaines putréfactions, les incendies naturels... On notera qu'il existe aussi des mécanismes naturels qui absorbent le CO2, par exemple la formation de molécules carbonées par photosynthèse, ou encore la réaction du CO2 dissous dans l'eau de mer avec les coquilles pour former des carbonates.

Les sources d'origine humaine (on parle d'émissions anthropiques) sont notamment la combustion de carburants fossiles (pétrole, gaz, charbon) et certaines industries (production de ciment, etc.). On ajoute à cela la déforestation (notamment tropicale, etc.) car elle réduit l'absorption de CO2 lors de la photosynthèse.

Le CO2 joue un rôle important pour la Terre et la vie sur Terre : en tant que gaz à effet de serre, il affecte le climat et il joue un rôle central dans le métabolisme de la très grande majorité des êtres vivants.

En savoir plus : le CO2 dans l'atmosphère

L'air est un mélange de gaz : diazote, dioxygène, vapeur d'eau, dioxyde de carbone, etc. La proportion de vapeur d'eau dépend beaucoup des conditions météorologiques, et varie de 0,5 % à 5 % (en nombre de molécules). L'ensemble des autres gaz est appelé <<air sec>>, et sa **composition** est la suivante : 78 % de diazote; 21 % de dioxygène; 1 % de gaz divers (argon, dioxyde de carbone, ozone, etc.). L'air extérieur contient ainsi 0,04 % de dioxyde de carbone, que l'on appelle aussi gaz carbonique ou CO2.

Le CO2 modifie l'absorption des rayonnements infrarouges par l'atmosphère ce qui affecte le bilan thermique de la planète. Ce processus fait partie de ce qu'on appelle l'effet de serre. La hausse du CO2 sur la période récente est une des causes du réchauffement climatique. On estime que la concentration préindustrielle vers 1800 était de 280 ppm. Les mesures modernes montrent que sa concentration a augmenté de 315 ppm à 415 ppm entre 1958 et 2021.

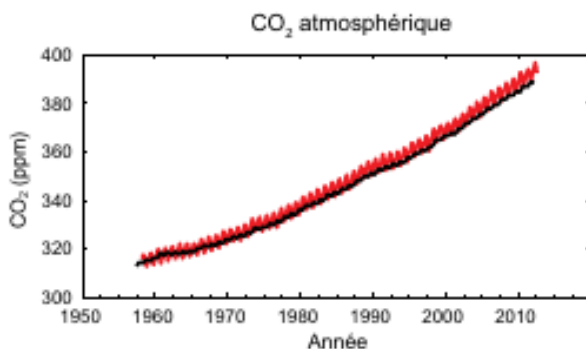


Figure extraite du rapport du Giec : <<Changements climatiques 2013. Résumé à l'intention des décideurs>>
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf

Le CO2 et la respiration

L'énergie que notre corps utilise provient de la réaction chimique entre le dioxygène de l'air et les aliments que nous consommons. L'un des sous-produits de cette réaction est le dioxyde de carbone, CO2. Un adulte expire environ l'équivalent de 18 litres de dioxyde de carbone (à pression atmosphérique) par heure. Cette quantité augmente en cas d'activité physique.

La quantité de CO2 dans une pièce indique donc quelle proportion de l'air de la pièce a déjà été respirée. Une concentration en CO2 proche de la valeur à l'extérieur indique que l'air a été peu respiré. Une concentration en CO2 élevée indique qu'une partie importante de l'air a déjà circulé dans les poumons des personnes qui sont ou étaient dans la pièce. Une augmentation de 400 ppm de la concentration en CO2 dans une pièce indique que 1 % de l'air de cette pièce est de l'air qui a déjà été respiré par l'une des personnes présentes.

Quelques chiffres.

La concentration en CO2 de l'air expiré est environ 4 %, soit 40 000 ppm. Une dilution de l'air expiré d'un facteur 50 (2 % de l'air de la pièce est de l'air expiré) ajoute ainsi une concentration de CO2 de $40\ 000/50=800$ ppm. La concentration lue sur le capteur correspond à la somme de la concentration extérieure et de cet écart, soit $400+800=1200$ ppm.

De même, une concentration totale de 800 ppm correspond à un écart de 400 ppm avec l'air extérieur, soit une dilution de $400/40\ 000=0,01=1$ %.

Lors de la respiration, du CO2 et des aérosols sont émis simultanément. En mesurant le CO2, on pourrait donc évaluer la quantité d'aérosols présents et donc le risque d'être contaminé par le SARS-CoV-2.

Le CO2 et les capacités cognitives

La concentration en CO2 affecte les capacités cognitives pour des concentrations que l'on atteint rapidement dès que l'on est plusieurs dans une petite salle non aérée ou peu ventilée.

Des études ont montré qu'au-delà d'une teneur en CO2 de 1000 ppm, nos capacités cognitives commencent à s'altérer, et cela d'autant plus que ce sont des capacités de niveau élevé (prise de décision, réflexion),... C'est pour cette raison que les valeurs maximales recommandées pour la concentration en CO2 dans les environnements intérieurs se situent usuellement entre 1000 et 1500 ppm, ces normes s'appliquent notamment aux bâtiments résidentiels et aux bureaux. (La valeur cible dans le RDS et le Code du travail est de 1000 ppm.

Cela signifie que la problématique de la mesure et du contrôle de la concentration en CO2 dépasse très largement la problématique du Covid. Indépendamment de cette épidémie, il est très important de s'atteler à la question de la concentration en CO2 dans les lieux publics et notamment les salles d'enseignement.

Les conséquences sur les capacités cognitives apparaissent pour des concentrations en CO2 assez faibles, d'environ 1000 ppm. Les effets physiologiques dangereux pour la santé apparaissent eux à des concentrations plus élevées, à partir de 10 000 ppm.

Ces effets physiologiques sont les suivants :

- 1 % - 10 000 ppm Légère accélération de la respiration.
- 2 % - 20 000 ppm Maux de tête et des signes de fatigue.
- 3 % - 30 000 ppm La respiration devient difficile, accélération du pouls et augmentation de la tension artérielle.
- 4 % - 40 000 ppm Le rythme de la respiration s'accélère jusqu'à quadrupler. Après une trentaine de minutes, un sentiment de griserie et de légère oppression.
- + de 10 % - 100 000 ppm Perte de conscience et mort rapide.

Mesurer la concentration en CO2



Les détecteurs de CO2 les plus fiables sont les détecteurs NDIR qui reposent sur une mesure optique. Il est indispensable d'effectuer les mesures avec un détecteur calibré.

Les conseils pour bien mesurer le taux de CO2

Achat.

Nous recommandons vivement l'achat de détecteurs de CO2 de type «NDIR» (Non Dispersive Infrared, aussi appelés détecteurs infrarouge).

Il est indispensable que le détecteur que l'on va utiliser soit déjà étalonné en usine (avec un certificat d'étalonnage comme le «Class'Air») ou qu'il puisse l'être par l'utilisateur (cela doit figurer de manière explicite dans la notice technique, comme par exemple le modèle «Aranet 4»). Une liste de modèles qui conviennent est disponible sur le site <http://projetco2.fr/>

Étalonnage.

Avant d'utiliser le capteur, il faut vérifier son étalonnage.

Si le capteur est fourni avec un certificat d'étalonnage d'usine, il n'y a rien à faire.

Pour les autres modèles, il faut se référer à la notice fournie par le fabricant. Cette procédure est en général très facile. Par exemple, pour le modèle Aranet 4, il faut placer le capteur à l'extérieur pendant 15 minutes, puis lancer l'étalonnage via l'application ou par les boutons situés à l'arrière. Laisser le détecteur à l'extérieur tant que dure la procédure d'étalonnage.

Remarque : valeur de la concentration en CO2 à l'extérieur. Il faut que la valeur extérieure soit à 400 ppm pour que la procédure d'étalonnage soit fiable. C'est généralement le cas, sauf dans les zones très urbanisées (grandes métropoles) et dans des conditions météorologiques spécifiques, notamment en l'absence de vent. Dans ces configurations, il est conseillé de faire l'étalonnage entre 14h et 18h, moment de la journée où l'air de l'atmosphère est mieux mélangé verticalement, ce qui réduit les effets de la pollution, et si possible en altitude (à 30 m du sol). Il est également préférable d'éviter la proximité immédiate des grands axes routiers.

Temps de réponse.

Les détecteurs ne mesurent pas la concentration en CO₂ de manière instantanée. Il faut que l'air que l'on mesure ait le temps de remplir complètement la zone du capteur dédiée à la mesure puis que l'appareil ait le temps d'effectuer la mesure proprement dite.

La durée que met le détecteur à adapter la valeur affichée à un changement de concentration de CO₂ est aussi appelée temps de réponse, ou temps de latence. Il est généralement de quelques minutes, et sa valeur est souvent indiquée dans la notice du fabricant. Le temps de rafraîchissement de l'affichage et la période d'enregistrement sont différents du temps de réponse, et peuvent être inférieurs ou supérieurs suivant les réglages. Après un déplacement du détecteur de CO₂, il faut attendre un temps supérieur au temps de réponse et au temps de rafraîchissement pour que la mesure lue soit pertinente. En pratique, on s'en aperçoit quand la valeur indiquée par le détecteur se stabilise.

Position.

Dans une salle, le détecteur de CO₂ doit être placé entre 1 m et 2 m de hauteur, ce qui correspond à la hauteur de la couche d'air que nous respirons. Pour mesurer une valeur représentative, il doit être placé loin des fenêtres, portes, entrées et sorties d'air. Il ne doit pas être mis à proximité immédiate de la bouche d'une personne. Comme la plupart des appareils électroniques, il faut éviter de le placer à proximité immédiate d'une source intense de chaleur (chauffage). Il est par exemple possible de placer le détecteur sur un mur ou sur le bureau de l'enseignant.

Repères sur la concentration en CO₂ et les seuils

La concentration en CO₂ en extérieur est 0,04 % ce qui correspond à 400 ppm.

On considère que les performances intellectuelles baissent à partir de 1000 ppm soit 0,1 % de CO₂.

La valeur de 800 ppm au-dessus de laquelle il faut augmenter l'aération en période pandémique de Covid-19 correspond à 0,08 %.

L'air expiré contient environ 4 % de CO₂ soit 40 000 ppm.

Attention : lorsque vous lisez un détecteur de CO₂, pensez à bien vérifier l'unité de mesure. Celle-ci est en général écrite sur l'écran à côté du résultat de la mesure.

En savoir plus : comment détecter le CO2 — principe d'un détecteur NDIR

La méthode de choix pour détecter le CO2 est la spectroscopie. Il s'agit d'utiliser les différences qu'ont les différents corps d'émettre ou d'absorber de la lumière.

C'est ce que l'on fait à l'œil en déduisant de la couleur plus ou moins foncée d'une grenadine la concentration en sirop. De l'eau pure laisse passer de la même manière toutes les couleurs, tandis que le colorant rouge de la grenadine ne laisse passer que le rouge et absorbe toutes les couleurs.

Il en est de même pour le CO2, mais en utilisant la lumière infrarouge. Les détecteurs NDIR sont composés d'une source lumineuse émettant un large spectre de lumière infrarouge. Un filtre sélectionne une «couleur» qui n'est pas absorbée par le CO2. La détection de l'intensité de cette lumière donne un niveau de référence qui ne dépend pas de la concentration en CO2 dans l'air. Un second filtre sélectionne une partie du spectre de la lumière qui est beaucoup absorbée par le CO2. C'est en mesurant l'intensité de ce faisceau et en la comparant avec celle du faisceau de référence que l'on peut déduire la concentration en CO2. Les «couleurs» sont choisies pour ne pas être du tout absorbé par les autres molécules présentes dans l'air. Cette méthode de détection est donc particulièrement sélective.

Aération - ventilation renouvellement de l'air

Pour éliminer les aérosols en suspension dans l'air d'une pièce, la solution la plus simple est de renouveler l'air de la pièce, autrement dit d'aérer et d'assurer la ventilation. Lorsque l'on n'est pas dans un bâtiment dont l'air est recyclé (et éventuellement filtré) on peut mesurer la qualité de l'aération et/ou de la ventilation à l'aide de la concentration en CO2.

Actuellement les recommandations du Haut Conseil de la Santé Publique sont, dans les commerces et autres lieux accueillant du public, de mettre en œuvre des actions d'aération et d'assurer le bon fonctionnement de la ventilation lorsque la concentration dépasse 800 ppm. Cette valeur considère une situation où les personnes présentes portent toutes un masque. Dans un lieu de restauration, une valeur plus basse, par exemple de 600 ppm, semble être un bon compromis entre la sécurité et ce qu'il est possible de faire. Notons que ces valeurs correspondent respectivement à une augmentation de la concentration en CO2 de 400 ppm et de 200 ppm par rapport à sa valeur à l'extérieur. Ce sont ces augmentations qu'il convient de prendre en compte en zone urbaine lors d'épisodes de pollution atmosphérique, qui font augmenter la concentration en CO2 à l'extérieur au-delà de 400 ppm.

Pour renouveler l'air d'une pièce il y a trois solutions :

- utiliser une ventilation mécanique contrôlée simple flux (VMC). D'autres systèmes de ventilation mécanique sont plus efficaces comme les VMC double flux ou les VMI (Ventilation mécanique par insufflation)
- ouvrir très régulièrement en grand toutes portes et fenêtres.
- entrouvrir portes et/ou fenêtres pour assurer un flux d'air non vicié continu (ce qui a au final le même effet qu'une VMC simple flux)

Dans ces trois situations, seules des mesures de l'évolution de la concentration en CO2 en condition d'utilisation réelle permettent de garantir que le renouvellement de l'air est suffisant.

Lorsqu'il n'y a pas de VMC ou en complément d'une VMC insuffisante, la méthode d'aération la plus efficace est d'ouvrir portes et fenêtres afin de provoquer un courant d'air dans la pièce. Les mesures de CO2 permettent de savoir jusqu'où on peut réduire ces ouvertures afin d'améliorer le confort, tout en préservant une aération suffisante.

En hiver, l'aération en continu peut refroidir la température intérieure à une température trop basse. Et en toute saison ouvrir les fenêtres fait entrer tous les bruits potentiellement gênants de l'extérieur. On préférera alors une ouverture périodique des fenêtres. Dans ce cas, il faut ouvrir en grand pour avoir le renouvellement de l'air le plus rapide possible. Là encore, les mesures de CO2 permettent de déterminer le temps entre deux ouvertures de fenêtres, ainsi que la durée d'ouverture (voir protocoles)

À propos

Qui sommes-nous

Nous sommes une équipe composée d'Universitaires et de spécialistes des mesures et de la qualité de l'air.



Jean-Michel Courty
Professeur de physique à Sorbonne Université



Florence Elias
Laboratoire de Matière et Systèmes Complexes
Professeure à l'Université de Paris.



Bertrand Maury
Laboratoire de Mathématiques
Université de Paris-Saclay



Pascal Morenton
Directeur de la fabrique, CentraleSupélec
Université de Paris-Saclay



François Pétrélis
CNRS
Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure



Franck Richecoeur
Professeur à CentraleSupélec
Directeur de la Graduate School Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes, Université de Paris-Saclay



Jean-Louis Roubaty
Haut Conseil de la Santé Publique(Commission spécialisée risques liés à l'environnement) - Professeur (honoraire) Université de Paris-IPGP
Adjunct Professor Victoria University Melbourne



Benoît Semin
CNRS
Laboratoire PMMH, ESPCI



Fabien Squinazi
Médecin biologiste
Ancien Directeur Laboratoire d'hygiène - Ville de Paris

Dossier conçu et réalisé par : Jean-Michel Courty — François Pétrélis — Benoît Semin

Avec la contribution de : Michelina Nascimbeni

Merci à tous les membres de projet CO2 pour leurs contributions et relectures.