

AVIS

Relatif à l'adaptation des mesures d'aération, de ventilation et de mesure du dioxyde de carbone (CO₂) dans les établissements recevant du public (ERP) pour maîtriser la transmission du SARS-CoV-2

28 avril 2021

Le Haut Conseil de la santé publique (HCSP) s'est autosaisi afin de synthétiser les données scientifiques et adapter ses recommandations précédentes relatives à l'aération et la ventilation pour prévenir la diffusion du virus SARS-CoV-2 dans le cadre de la réouverture progressive des établissements recevant du public (ERP) (**Annexe 1**).

Pour cela, le HCSP a sollicité le sous-groupe de travail (GT) « Hygiène/Prévention/Environnement » (**Annexe 2**) du groupe de travail permanent Covid-19 du HCSP.

Le GT a travaillé selon la méthode habituelle du HCSP, avec une recherche et une analyse de la documentation disponible (articles scientifiques récents et recommandations existantes).

Cet avis est centré sur les mesures relatives à l'aération et la ventilation des ERP. Il ne prend pas en compte l'utilisation de procédés de filtration ou de purification d'air (qui seront traités par ailleurs). Il complète les avis précédents du HCSP relatifs à la transmission du virus SARS-CoV-2 par aérosols et aux mesures barrières individuelles et collectives au sein des différents ERP en fonction de l'évolution de la pandémie depuis 14 mois [1 à 6]. En particulier, le HCSP a constamment réitéré, dans ses avis depuis avril 2020, l'importance de l'aération et la ventilation des locaux des ERP en s'appuyant sur des données scientifiques et les expériences internationales qui démontrent leur impact sur la réduction de la circulation du virus SARS-CoV-2 dans les milieux clos.

1. Le HCSP rappelle des éléments de chronologie de la gestion de la pandémie de Covid-19 et les dernières données épidémiologiques de SpF (**Annexe 3**)
2. Le HCSP rappelle les modes et circonstances de transmission du virus SARS-CoV-2

L'infection par le virus respiratoire SARS-CoV-2, est principalement transmise selon trois modes :

- Une transmission directe à courte distance, par un contact étroit, lié à l'exposition à un aérosol de gouttelettes de tailles diverses, variant de moins d'un micromètre à plus de 100 micromètres, expirées ou expectorées par une personne infectée et contenant le virus ;
- Une transmission aéroportée, à plus longue distance, par exposition à un aérosol constitué de gouttelettes les plus fines contenant le virus et qui peuvent rester en suspension dans l'air pendant un temps beaucoup plus long (typiquement en heures). Cette transmission aéroportée peut se produire sans contact direct après le départ de la source (en particulier en milieu clos) ;
- Une transmission plus rare par contact direct cutané avec une personne infectée ou avec une surface récemment contaminée. Ce dernier cas est parfois nommé « transmission par un dépôt de gouttelettes » encore appelées fomites. Le virus peut venir en contact avec le visage, soit directement soit secondairement par exemple via les mains.

Ces trois modes de transmission peuvent être associés. Les circonstances dans lesquelles la transmission aéroportée du virus SARS-CoV-2 apparaissent la plus probable sont :

- Les espaces clos où une personne infectée expose des personnes, soit en leur présence, soit très rapidement après qu'elle ait quitté l'espace clos ;
- Une exposition prolongée à des aérosols d'origine oro-pharyngée, souvent générés par le simple fait de parler ou par un effort respiratoire (par exemple, en criant, chantant, toussant, éternuant, en fumant ou vapotant, un exercice physique) qui augmente la concentration des particules virales en suspension dans l'air de l'espace ;
- Une ventilation ou un traitement de l'air inadéquat qui a favorisé une accumulation de particules virales en suspension dans l'air et/ou conduit à des flux de transmission de visage à visage.
- Une proximité sans mesures barrières en extérieurs lors de forte densité de personnes (groupes)

3. Le HCSP rappelle quelques notions sur les aérosols (Avis du HCSP du 23 juillet 2020) [2]

Les gouttelettes liquides et particules solides sous forme d'aérosols sont produites lors de l'expiration, les éternuements, le chant, la parole, l'expulsion de fumée de cigarette ou de vapotage et couvrent un large spectre de tailles qui peuvent être grossièrement divisées en deux catégories fondées sur leur persistance en suspension dans l'air :

- Les plus grosses, dont certaines sont visibles et qui sédimentent rapidement en quelques secondes ou minutes à proximité de la source émettrice. La cinétique de déshydratation des gouttelettes dépend de l'humidité relative de l'air dans le local. Une humidité de l'air élevée, en limitant la déshydratation des grosses gouttelettes, a pour effet de ralentir leur sédimentation et de limiter ainsi leur transformation en particules ou résidus secs.
- Les plus fines gouttelettes et particules ou résidus secs formés lorsque les fines gouttelettes sèchent très rapidement dans le flux d'air, qui peuvent rester en suspension dans l'air sous forme d'aérosols durant plusieurs minutes ou heures et se déplacer loin de la source émettrice par les flux d'air.
- La concentration en virus décroît donc selon la distance par rapport au sujet émetteur par un phénomène de dilution.

Lors de l'expiration, de la toux et de l'éternuement, de petites gouttelettes sont émises, susceptibles de contenir le virus SARS-CoV-2, même en l'absence de symptômes de la maladie Covid-19. La parole ou le chant génèrent jusqu'à dix fois plus de gouttelettes que lors de la respiration normale.

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 des particules virales SARS-CoV-2 est de 0,125 µm, toutes les gouttes plus grosses que cette taille sont susceptibles de contenir du virus.

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 µm présente dans l'air au repos est de 30 µm par seconde : il lui faut donc environ plus de 16 heures pour toucher le sol en partant d'une hauteur de 1,8 m.

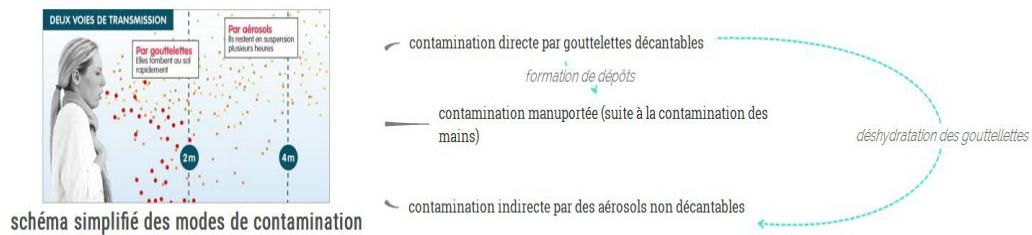


Schéma. Modes de contamination du SARS-CoV-2. HCSP, avril 2021.

Une distanciation physique d'au moins 2 mètres, et le port du masque sont des outils indispensables pour limiter fortement ce passage du sujet infecté vers les sujets sains via le vecteur des aérosols et gouttelettes.

Toutefois, cette notion reste théorique car, en fait, il existe toujours des mouvements d'air dans une pièce qui emportent les aérosols comme cela s'observe avec la fumée de cigarette par exemple. Ils peuvent ainsi être transportés sur des distances supérieures à 2 mètres à l'intérieur d'une pièce voire d'un bâtiment. La distanciation physique seule est donc insuffisante pour se protéger de la contamination par les aérosols à l'intérieur des bâtiments. Les moyens complémentaires principaux de protection sont le port généralisé 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 une contamination de proximité par gouttelettes de taille importante et moins sensibles aux mouvements d'air dont il faut se prémunir par le port généralisé du masque, en particulier dans les zones de forte densité de personnes (ex. marchés, rues commerçantes, manifestations, etc.).

4. Le HCSP rappelle pourquoi le CO₂ peut être utilisé comme traceur du renouvellement de l'air

Dans un environnement clos en présence de personnes contaminées il est difficile de mesurer la concentration en particules virales dans l'air. En revanche, le devenir des aérosols suit globalement 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 mesure de la concentration en CO₂ (ou gaz carbonique) produit par la respiration qui détermine les modalités de renouvellement de l'air et le taux d'occupation.

Plus la concentration en aérosol est importante dans un espace donné, plus le risque de contamination est élevé. Il est donc important de prendre des mesures permettant :

- De réduire les émissions des aérosols grâce au port du masque par tous en couvrant impérativement nez, bouche menton,
- D'évacuer au plus vite les aérosols.

Le CO₂ est ainsi considéré comme un 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, donnent des valeurs maximales à respecter,

Les recommandations du HCSP (**Annexe 4**) préconisent pour les commerces et autres ERP, de mettre en œuvre des actions d'aération et d'assurer le bon fonctionnement de la ventilation lorsque la concentration dépasse 800 ppm en CO₂. Cette valeur concerne une situation pour laquelle les personnes présentes portent toutes un masque.

Dans un lieu de restauration, une valeur inférieure, par exemple de 600 ppm, semble être un bon compromis entre la sécurité et ce qu'il est possible de réaliser. 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 moyenne à l'extérieur.

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 inférieure d'aérosols s'il existe une filtration de l'air intérieur dans la pièce.

Des réglementations similaires existent à l'international [7,8] notamment dans d'autres pays comme le Canada [9 à 11], les pays européens avec les recommandations de la fédération européenne REHVA [12], la Grande Bretagne [13 à 15], l'Agence fédérale allemande de l'environnement (Umwelt Bundesamt) [16] et la Suisse [17] qui ont proposé une limite de concentration en CO₂ à ne pas dépasser pour les occupants d'une pièce.

5. Le HCSP présente une analyse des stratégies de maîtrise de la diffusion des aérosols (Annexe 4)

6. Le HCSP rappelle les recommandations concernant en particulier l'importance de la ventilation dans ses avis précédents publiés depuis avril 2020 (Annexe 5)

- Avis du 24 avril 2020 relatif aux préconisations relatives à l'adaptation des mesures barrières et de distanciation sociale à mettre en œuvre en population générale, hors champs sanitaire et médico-social, pour la maîtrise de la diffusion du SARS-CoV-2 [1].
- Avis du 28 août 2020 relatif à des adaptations possibles s'agissant de la recommandation du port de masque en milieu de travail dans les lieux collectifs clos [3].
- Avis du 14 octobre 2020 relatif à l'utilisation des appareils de chauffage dans le contexte de l'épidémie de Covid-19 [4].
- Avis du 22 novembre 2020 relatif à une proposition de protocole sanitaire renforcé pour les commerces dans le contexte de l'épidémie de Covid-19 [5].
- Avis du 18 avril 2021 relatif à l'établissement d'une stratégie permettant de définir des mesures à mettre en œuvre pour la réouverture des activités dans les ERP [6].

7. Le HCSP a analysé la littérature récente (2021) relative à la transmission par aérosols et à l'impact de l'aération et de la ventilation sur la circulation du SARS-CoV-2 dans les ERP (Annexe 6) [18 à 23]

8. Le HCSP considère les éléments d'analyse suivants à partir de la revue de la littérature (Annexe 6) :

➤ Il existe diverses situations qui suggèrent une transmission aéroportée dominante du virus SARS-CoV-2 sous formes d'aérosols de fines particules virales à distance :

- L'incidence élevée d'événements de super-propagation du virus lors de concerts de chorale, dans des bateaux de croisière, des abattoirs, des établissements pénitentiaires, des chambres d'hôtels de quarantaine, ne peut pas être expliquée par la seule transmission de proximité par gouttelettes ou par dépôts sur les surfaces mais par des aérosols chargés de particules virales ;
- Le pourcentage élevé de cas de transmission (entre 33 % et 59 %) par des personnes asymptomatiques ou présymptomatiques qui ne toussent et n'éternuent pas, évoque une transmission par les particules aérosolisées (et peu de grosses particules) émises par la parole ;
- La moindre fréquence de transmission du virus SARS-CoV-2 à l'extérieur que dans les espaces clos, et la forte réduction des contaminations par la ventilation ;
- La documentation d'infections nosocomiales dans les établissements de santé où les mesures de protection visaient la transmission « gouttelettes » et non « aérosol » ;

- La détection du virus viable dans l'air, lors d'expériences de laboratoire, jusqu'à 3 heures avec une demi-vie de 1,1 h [24], et dans des échantillons d'air de chambres de patients atteints de Covid-19, en absence de procédures générant des aérosols, et dans l'habitacle de voiture d'une personne infectée. Ces constats sont indicatifs même si d'autres études n'ont pas détecté de virus viable en raison de difficultés techniques tenant à l'efficacité des méthodes de prélèvement ou à la perte de viabilité ou de la ré-aérosolisation du virus durant l'échantillonnage. La détection de l'ARN viral dans des filtres à air et dans des conduits aérauliques de bâtiments hospitaliers témoigne toutefois d'une diffusion du virus à distance sous forme d'aérosols ;
- Des expériences de laboratoire montrent la contamination d'animaux sains par des animaux infectés présents dans des cages séparées et connectées par un conduit d'air ;
- Lors de la recherche de sujets contacts, la transmission secondaire est souvent identifiée dans des espaces clos encombrés et insuffisamment ventilés, dans lesquels s'accumulent les particules virales en suspension dans l'air.

➤ **Le renouvellement de l'air des locaux, défini par le taux de renouvellement horaire de l'air (TRA), permet d'apporter de l'air neuf et de pourvoir aux besoins en oxygène des occupants (notamment pour l'apprentissage des enfants et les activités professionnelle des adultes, de diluer et d'évacuer les odeurs, les gaz indésirables, les polluants chimiques et les particules inertes ou viables qui s'accumulent, d'éliminer l'excès d'humidité et de fournir aux appareils de combustion l'oxygène nécessaire pour leur fonctionnement.**

- Il est obtenu par l'aération régulière par ouverture des fenêtres et/ou la ventilation mécanique qui est définie dans les logements par des débits minimaux horaires d'air extrait et dans les établissements recevant du public par des débits minimaux horaires d'air neuf (V/m³) par occupant selon le Règlement sanitaire départemental type (RSDT). Les difficultés d'aération et/ou de ventilation nécessitent d'étudier d'autres options techniques pour favoriser le renouvellement de l'air des locaux [25].
- La Loi du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement a posé l'obligation de surveiller périodiquement la qualité de l'air intérieur dans certains ERP accueillant des populations sensibles ou exposées sur de longues périodes. Cette surveillance doit être mise en œuvre tous les 7 ans par le propriétaire ou l'exploitant de l'établissement et comporte d'une part, l'évaluation obligatoire des moyens d'aération de l'établissement et, d'autre part, soit la réalisation de campagnes de mesures de polluants réglementés (dont le CO₂), soit la mise en œuvre d'un plan d'actions de prévention (décret n° 2015-1000 du 17 août 2015 et décret n° 2015-1926 du 30 décembre 2015).
- La mesure en continu du CO₂ émis par la respiration humaine, dépend à la fois de la densité humaine (jauge) dans les locaux et du taux de renouvellement de l'air. La référence à l'air extérieur (400 ppm en général) permet de définir un indice de confinement des locaux. L'utilisation de la mesure du CO₂ comme « traceur » des aérosols viraux peut donner des résultats en excès lorsqu'il existe
 - une faible densité humaine dans les locaux,
 - une réduction du nombre de particules virales présentes dans l'air par le port permanent du masque par les occupants,
 - et une filtration efficace de l'air recyclé dans les centrales de traitement de l'air des bâtiments.

➤ **Les dispositifs mobiles de filtration d'air ou de traitement par rayonnements ultra-violets, (non évalués dans cet avis) ont pour objet de piéger ou inactiver les particules virales afin d'améliorer la qualité de l'air intérieur mais ne sont pas prévus pour renouveler l'air des locaux avec apport d'air neuf. Leur utilisation nécessiterait de réaliser des études en configuration réaliste et avec un protocole éprouvé afin de déterminer la place complémentaire éventuelle de ces dispositifs par rapport à l'aération et/ou la ventilation mécanique pour réduire les particules virales en suspension dans l'air.**

RECOMMANDATIONS DU HCSP

Le HCSP recommande :

- **De poursuivre l'application de l'ensemble des 7 mesures barrières pour réduire les risques de transmission dans les ERP**
 - Quatre mesures barrières sont des mesures intrinsèques qui dépendent du comportement des individus (distanciation physique, port conforme d'un masque UNS1 ou à usage médical normé, hygiène des mains, et respect des gestes barrières). Trois mesures sont collectives dont la mise en œuvre relève de décisions administratives, ou de consignes réglementaires ou de la responsabilité des gérants établissements recevant du public (ERP) : nettoyage/désinfection et aération/ventilation des locaux, gestion de la densité de personnes dans un espace donné (« jauge »).
 - La réduction du risque de contamination dans une réunion de personnes repose sur la mise en œuvre de ces mesures barrières qui contribuent pour chacune d'entre elles à la réduction du risque de contamination sans qu'une seule d'entre elle soit suffisante.
 - La gestion de la densité de personnes (flux) dans un espace donné (« jauge ») permet de définir des capacités d'accueil des ERP et constitue une mesure importante de réduction des risques de contamination en agissant à la fois sur la réduction de contacts fortuits et sur la contamination par aérosols en cas de forte densité de personnes dans un lieu clos confiné. Cette gestion du flux de personnes doit s'organiser par individus ou par groupe d'individus. Elle doit être associée à la distance physique interindividuelle ou entre groupes de personnes et à l'aération/ventilation des locaux selon les activités au sein de l'ERP. Elle est sous la responsabilité du gérant de l'ERP ou son équivalent. Des écrans de séparation peuvent compléter cette stratégie.
- **De mettre en place une nouvelle politique de communication** afin de promouvoir et expliquer à la population l'importance de poursuivre l'application des mesures barrières en cette période, même si une partie de la population est vaccinée.
- **D'utiliser l'application « Tous anti-covid » permettant**
 - d'informer et de responsabiliser les individus en fonction du niveau de risque et de s'isoler/se tester en cas de contact à risque ou d'apparition de symptômes évocateurs du Covid-19 ;
 - de tracer prochainement les antécédents de Covid-19 et le schéma vaccinal suivi éventuellement.
- **De développer une stratégie environnementale de maîtrise de la qualité de l'air par l'aération et la ventilation des locaux de chaque ERP**
 - Cette approche est l'une des mesures extrinsèques majeures de la doctrine du HCSP et doit être sous la responsabilité d'une personne désignée au sein de chaque ERP.
 - Le responsable de l'ERP doit s'assurer que la ventilation est fonctionnelle et conforme aux exigences réglementaires fixées par le règlement Sanitaire Départemental Type (RSDT). Sa maintenance doit être tracée et affichée. Le responsable doit vérifier et si possible optimiser la filtration permanente intégrée à la VMC avec des filtres de niveau F9 ou MERV 12.
 - Il est nécessaire d'effectuer une aération des espaces clos des ERP en présence des personnes. Il est recommandé d'ouvrir les fenêtres au moins 5 minutes toutes les heures. Dans les établissements scolaires et universitaires en particulier, il est proposé de laisser les portes et les fenêtres ouvertes entre les cours et les enseignements (aération transversale). Seules les fenêtres doivent rester ouvertes pendant les cours ou enseignements (l'idéal est d'ouvrir deux fenêtres, si possible, pour favoriser la circulation de l'air).
 - Faire fonctionner la ventilation à débit réduit hors période d'occupation, lorsque cela est techniquement possible.

- Dans les situations où l'aération n'est actuellement pas possible ou insuffisante (ex. fenêtres bloquées), des solutions techniques doivent être mises en place (par ex. abattants ou aérateurs dans la partie supérieure des fenêtres, ventilation par insufflation, etc.). La diminution du taux d'occupation des locaux peut alors contribuer à l'obtention d'une qualité de l'air satisfaisante.
 - Il ne faut pas utiliser de ventilateur, si le flux d'air est dirigé vers les personnes et privilégier le tout air neuf.
 - Les systèmes de climatisation, dont la maintenance régulière doit être assurée conformément aux bonnes pratiques et à la réglementation en vigueur. Ils doivent éviter de générer des flux d'air vers les personnes.
 - La ventilation et l'aération des locaux seront d'autant plus importantes que le respect de certaines des autres mesures barrière n'est pas ou peu possible dans certaines conditions ou phase de retour à une vie sociale normale. **Cette maîtrise de l'aération/ventilation des ERP doit constituer un point fort sur lequel peut s'appuyer un protocole sanitaire d'autant plus lorsque certaines mesures barrières (ex. port du masque ou distance physique) ne sont pas adaptés à l'activité d'un ERP ré-ouvert (ex. restaurants, écoles maternelles ...).**
- **De mesurer le taux du renouvellement d'air**
 - Le taux de renouvellement peut être approché facilement par la mesure de la concentration en dioxyde de carbone - CO₂ (gaz carbonique) dans l'air à des points et des périodes représentatives en période d'occupation.
 - Cette mesure vise à évaluer les conditions de renouvellement de l'air à l'intérieur des locaux et les périodes où le renouvellement est insuffisant pour assurer une dilution et élimination des aérosols satisfaisantes (seuil d'alerte).
 - Une concentration en CO₂ supérieure à un seuil de 800 ppm doit conduire dans tous les cas à ne pas occuper la salle et à agir en termes d'aération/renouvellement d'air et/ou de réduction du nombre de personnes admises dans les locaux d'un ERP. Cette valeur pourrait être abaissée si certaines mesures barrières ne peuvent s'appliquer (port du masque par exemple dans le cas où l'activité ne le permet pas).
 - La mesure doit être effectuée à des endroits significatifs de la fréquentation et à des périodes de haute densité de personnes.
 - Des capteurs de CO₂ reposant sur la Technique NDIR peuvent être calibrés (étalonnés) (visiter le site www.projetco2.fr) (**Annexe 7**).
 - De mener dans les différents ERP (ex. établissements scolaires et universitaires, lieux culturels, établissements sportifs, etc.) des campagnes de mesure pour identifier les zones à risque (ex. certaines salles, couloirs, sanitaires, etc.).
 - En l'absence de moyens de mesure, le niveau de ventilation mécanique ne doit pas être inférieur à 4 volumes/heure (4 fois le volume de la pièce renouvelé par heure).

Ces recommandations transitoires, élaborées sur la base des connaissances disponibles à la date de publication de cet avis, peuvent évoluer en fonction de l'actualisation des connaissances et des données épidémiologiques sur la circulation du virus SARS-CoV-2 dans les différents ERP.

*Avis rédigé par un groupe d'experts, membres ou non du Haut Conseil de la santé publique.
Validé le 28 avril 2021 par le Président du HCSP*

Références

[1] Haut Conseil de la santé publique. Avis du 24 avril 2020 relatif aux préconisations du Haut Conseil de la santé publique relatives à l'adaptation des mesures barrières et de distanciation sociale à mettre en œuvre en population générale, hors champs sanitaire et médico-social, pour la maîtrise de la diffusion du SARS-CoV-2.

<https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=881>

[2] Haut Conseil de la santé publique. Avis du 23 juillet 2020 relatif à l'actualisation des connaissances scientifiques sur la transmission du virus SARS-COV-2 par aérosols et des recommandations sanitaires

<https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=894>

[3] Haut Conseil de la santé publique. Avis du 28 août 2020 relatif à des adaptations possibles s'agissant de la recommandation du port de masque en milieu de travail dans les lieux collectifs clos.

<https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=919>

[4] Haut Conseil de la santé publique. Avis du 14 octobre 2020 relatif à l'utilisation des appareils de chauffage dans le contexte de l'épidémie de Covid-19.

<https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=928>

[5] Haut Conseil de la santé publique. Avis du 22 novembre 2020 relatif à une proposition de protocole sanitaire renforcé pour les commerces dans le contexte de l'épidémie de Covid-19.

<https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=946>

[6] Haut Conseil de la santé publique. Avis du 18 avril 2021 relatif à l'établissement d'une stratégie permettant de définir des mesures à mettre en œuvre pour la réouverture des activités dans les ERP. *Publication à venir*

[7] OMS. Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of Covid 19. Updated 13 April 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280>

[8] European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC). Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of Covid-19: first update. 10 November 2020.

<https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Heating-ventilation-air-conditioning-systems-in-the-context-of-COVID-19-first-update.pdf>

[9] Health Canada. Consultation: proposed residential indoor air quality guidelines for carbon dioxide [Internet]. 2020.

<https://canada.ca/en/health-canada/programs/consultation-residential-indoor-air-qualityguidelines-carbon-dioxide/document.html#a3.1>

[10] Public Health Ontario. Focus on Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems in buildings and Covid-19. March 2021.

<https://www.publichealthontario.ca/-/media/documents/ncov/ipac/2020/09/covid-19-hvac-systems-in-buildings.pdf?la=en>

[11] Institut national de santé publique de Québec. 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. 8 janvier 2021.

<https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/3097-transmission-covid-19-milieux-scolaires-soins-ventilation-covid19.pdf>

[12] Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA). REHVA COVID-19 guidance document: how to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces. Version 4.0. 2020. https://rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4_09122020.pdf

[13] Public Health England. Guidance on the ventilation of indoor spaces to stop the spread of coronavirus (Covid-19). 4 March 2021. Last updated 23 April 2021. <https://www.gov.uk/government/publications/covid-19-ventilation-of-indoor-spaces-to-stop-the-spread-of-coronavirus>

[14] UK. CIBSE Covid-19 ventilation guidance. Version 4. 23 October 2020. <https://www.cibse.org/knowledge/knowledge-items/detail?id=a0q3Y00000HsaFtQAJ>

[15] UK Scientific Advisory Group for Emergencies. EMG: role of ventilation in controlling SARS-CoV-2 transmission, 30 September 2020. <https://gov.uk/government/publications/emg-role-of-ventilation-in-controlling-sars-cov-2-transmission-30-september-2020>

[16] Swiss centre for occupational and environmental health. Guide for ventilation towards healthy classrooms. December 2020. https://scoeh.ch/wp-content/uploads/2021/01/Guide-for-ventilation_Indairpollnet.pdf

[17] DGUV. SARS-COV-2. Empfehlungen zum Lüftungsverhalten an Innenraumarbeitsplätzen. 2020. <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3932>

[18] Greenhalgh *et al.* Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. The Lancet 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/S0140-6736>

[19] Allen *et al.* Indoor Air Changes and Potential Implications for SARS-CoV-2 Transmission. *Jama*. Publié en ligne le 16 avril 2021. doi:10.1001/jama.2021.5053 <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2779062>

[20] Dyani Lewis, Why indoor spaces are still prime COVID hotspots, *Nature* 592, 22-25 (2021) doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00810-9> <https://www.nature.com/articles/d41586-021-00810-9>

[21] Lipinski *et al.* Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings. *International Journal of Thermofluids* 7-8. DOI: 10.1016/j.ijft.2020.100045 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266620272030032X>

[22] Lasser *et al.* Assessing the impact of SARS-CoV-2 prevention measures in schools by means of agent-based simulations calibrated to cluster tracing data <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2021.04.13.21255320v1>

[23] Hou *et al.* Bayesian Calibration of Using CO₂ Sensors to Assess Ventilation Conditions and Associated COVID-19 Airborne Aerosol Transmission Risk in Schools. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2021.01.29.21250791v1>

[24] van Doremalen *et al.* Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *NEJM*. 2020;382:1564-1567. DOI: 10.1056/NEJMc2004973

[25] Centre scientifique et technique du bâtiment. Gestion du risque Covid-19 Synthèse des préconisations. Janvier 2021.

<https://www.cstb.fr/assets/medias/2021/01/college-covid.pdf>

Annexe 1 – Texte d'auto-saisine (approuvée par vote du bureau du Collège du HCSP)

Le HCSP a souhaité s'autosaisir sur la lutte contre la propagation du SARS-CoV-2 par voie aérienne par la ventilation/aération des locaux dans le cadre de la crise Covid-19 ; la qualité de l'air intérieur et du renouvellement de l'air pouvant être vérifiée par une mesure du taux de dioxyde de carbone (gaz carbonique) CO₂.

Toutefois, cette recommandation de l'importance du renouvellement régulier de l'air à l'intérieur des locaux et de la vérification de la fonctionnalité de la ventilation dans les établissements recevant du public, figurait parmi d'autres recommandations sur les mesures barrières individuelles et collectives, malgré la rédaction d'une infographie et n'a pas été considérée à la hauteur des enjeux de contrôle de la diffusion en milieu clos du fait de son impact sur la transmission.

En effet, suite à l'avis déjà formulé sur cette question lors du protocole renforcé dans les commerces en novembre dernier

(<https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=946>), un suivi scientifique a été effectué par Jean-Louis Roubaty, membre de la Commission Spécialisée « Risques liés à l'environnement » (CSRE) du HCSP, sur les taux de CO₂ dans les lieux publics.

Le pilote et les experts du GT Hygiène/Prévention/Environnement du HCSP pensent qu'il est temps d'adapter les recommandations au regard des avancées de la littérature scientifique et de mettre en avant la maîtrise de l'environnement des ERP en lui consacrant un avis spécifique. Il s'agit en effet d'un axe important de prévention peu supporté dans la stratégie française, alors que beaucoup d'expériences internationales sont concluantes, supportées par la littérature scientifique.

Annexe 2 - Composition du groupe de travail

Membres qualifiés de la Commission spécialisée « *Maladies infectieuses et maladies émergentes* » :

- Christian CHIDIAC, Président de la CS MIME, Président du groupe permanent Covid-19
- Jean-François GEHANNO

Membre qualifiée de la Commission spécialisée « *Maladies chroniques* » :

- Agathe BILLETTE de VILLEMEUR

Membres qualifiés de la Commission spécialisée « *Système de santé et sécurité des patients* » :

- Serge AHO-GLELE
- Didier LEPELLETIER, vice-président de la CS-3SP, Co-président du groupe permanent Covid-19, pilote du Gt pour la réponse à cette saisine
- Christian RABAUD

Membres qualifiés de la Commission spécialisée « *Risques liés à l'environnement* »

- Jean-Marc BRIGNON
- Philippe HARTEMANN
- Yves LEVI
- Francelyne MARANO, présidente de la CSRE, co-pilote du Gt pour la réponse à cette saisine
- Jean-Louis ROUBATY, pilote du Gt pour la réponse à cette saisine
- Fabien SQUINAZI, vice-président de la CSRE, co-pilote du Gt pour la réponse à cette saisine

Experts extérieurs au HCSP

- Éric GAFFET, UMR 7198, CNRS - Université de Lorraine, co-pilote du gt pour la réponse à cette saisine
- Brigitte MOLTRECHT, DGESCO, Ministère de l'Éducation nationale

Experts auditionnés

- Jean-Michel COURTY, Sorbonne Université
- Pascal MORENTON, Université Paris-Saclay, Centrale/SupElec
- François PETRELIS, École Normale Supérieure Paris
- Benoît SEMIN, CNRS et École Nationale Supérieure de Physique et Chimie Industrielle ESPCI

Secrétariat général du HCSP

- Yannick PAVAGEAU

Annexe 3 – Éléments de chronologie de la gestion de la pandémie de Covid-19 et données épidémiologiques de SpF

- Le 30 janvier 2020, au regard de l'ampleur de l'épidémie de Covid-19, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a déclaré qu'elle constituait une Urgence de Santé Publique de Portée Internationale (USPPI).
- Le 28 février 2020, la France est passée au stade 2 (foyers isolés) de l'épidémie d'infections à SARS-CoV-2, puis le 14 mars au stade 3 (circulation active du virus dans le pays).
- Le 17 mars 2020, le confinement de la population générale a été instauré, avec une limitation des déplacements autorisés.
- Le 11 mai 2020, une levée progressive et contrôlée du confinement a été mise en œuvre. Après une seconde phase de déconfinement le 2 juin 2020, sa phase 3 a été engagée le 22 juin 2020.
- Une seconde phase de confinement a débuté le 30 octobre 2020 au cours de laquelle les établissements d'enseignement scolaire, et les commerces essentiels de première nécessité sont restés ouverts ainsi que l'activité des entreprises. La sortie de ce confinement s'est déroulée en trois temps : le 28 novembre 2020, réouverture des commerces, levée du confinement le 15 décembre, et à partir du 20 janvier 2021, décalage du couvre-feu réouverture des restaurants et salles de sport et de fitness, réintégration par les lycéens de leurs établissements en classes entière et par les étudiants des universités en présentiel. Or en janvier 2021, face à des chiffres épidémiologiques inquiétants, les mesures sanitaires ont été durcies et les établissements culturels et sportifs, les restaurants et les bars sont restés fermés.
- Parallèlement la campagne de vaccinations a débuté en janvier 2021.
- Le 31 mars 2021 : le Président de la République a annoncé la mise en place de restrictions sanitaires renforcées dans l'ensemble des départements métropolitains pour 4 semaines.
- Depuis le 03 avril 2021, 19 heures : l'ensemble du territoire métropolitain est soumis aux nouvelles restrictions sanitaires renforcées annoncées par le Président de la République.

Dans son « point » hebdomadaire actualisé du 22 avril 2021, Santé publique France (SpF) mentionne que les indicateurs épidémiologiques étaient à un niveau toujours élevé, mais avec une tendance à la diminution et une persistance de la tension hospitalière : diminution des taux d'incidence et de dépistage en comparaison des taux corrigés de la semaine précédente, augmentation du taux de positivité, légère diminution des nouvelles hospitalisations et admissions en soins critiques, stabilisation à un niveau élevé du nombre de patients en hospitalisation et en services de soins critiques, mortalité liée au Covid-19 toujours élevée. Métropole : régions Île-de-France, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Hauts-de-France toujours très touchées. Outre-mer : augmentation des taux d'incidence et de positivité en Guyane. Variants : stabilisation de la proportion de suspicions de variants préoccupants (VOC) par RT-PCR de criblage (suspicions de variant 20I/501Y.V1 majoritaires en métropole à 82,3% ; suspicions de variant 20H/501Y.V2 ou 20J/501Y.V3 stables à 4,2%. Prévention : contribution du dispositif de contact-tracing à la limitation de la propagation de l'épidémie ; vaccination : 1 3018 378 personnes ayant reçu au moins une dose (couverture vaccinale : 19,4%) ; importance de l'adoption systématique des mesures barrières et de la limitation des contacts et des déplacements. En cas de symptômes, nécessité d'un isolement immédiat et réalisation d'un test dans les plus brefs délais.

Annexe 4 - Extraits des avis Covid-19 du HCSP publiés depuis un an par le HCSP relatifs à l'aération et la ventilation dans le contexte de l'épidémie de Covid-19

Avis du 24 avril 2020 relatif aux préconisations du Haut Conseil de la santé publique relatives à l'adaptation des mesures barrières et de distanciation sociale à mettre en œuvre en population générale, hors champs sanitaire et médico-social, pour la maîtrise de la diffusion du SARS-CoV-2

Système de ventilation collective

En l'état des connaissances actuelles, il n'est pas possible de fournir des recommandations liées au risque de contamination par l'air extérieur (rejet d'air vicié et/ou ouverture des fenêtres).

Les recommandations portent sur le fonctionnement correct de la ventilation des pièces et locaux d'établissements recevant du public et sur une sur-ventilation (aération) par ouverture d'ouvrants des pièces à plusieurs moments de la journée.

Ainsi, le HCSP recommandait, pour le système de ventilation, de :

- Veiller à ce que les orifices d'entrée d'air et les fenêtres des pièces ne soient pas obstruées ;
- Veiller à ce que les bouches d'extraction dans les pièces de service ne soient pas obstruées ;
- Vérifier le fonctionnement du groupe moto-ventilateur d'extraction de la VMC (test de la feuille de papier).

Pour les bâtiments non pourvus de systèmes spécifiques de ventilation, il est recommandé de procéder à une aération régulière des pièces par ouverture des fenêtres avec les règles habituelles d'ouverture (10 minutes deux fois par jour).

Système de ventilation individuelle

- Le malade atteint de Covid-19 maintenu à domicile réside le plus possible dans une seule pièce du logement (chambre).
- Lorsqu'il est amené à en sortir, il porte un masque anti-projections de type chirurgical et applique les mesures barrières d'hygiène des mains et de distanciation physique. Avant de sortir de la pièce où il séjourne, et régulièrement au cours de la journée (minimum 3 fois par jour avec durée d'ouverture minimale de 15 minutes) et en particulier pendant les épisodes de forte émission de gouttelettes par le malade, le malade sur-ventile la pièce où il réside en assurant une aération ponctuelle par ouverture en grand des fenêtres pendant quelques minutes.
- La stratégie consiste à ventiler par ouverture en grand des fenêtres cette pièce de façon séparée du logement en maintenant fermée la porte de la pièce, et en assurant le plus possible son étanchéité (calfeutrage par boudin de bas de porte) vers le reste du logement.
- Dans le cas d'un logement ne disposant que d'une seule pièce (studio), il est conseillé dans la mesure du possible que les autres occupants du logement soient hébergés dans un autre logement (familial ou dans un lieu dédié, par ex. hôtel, résidence).

Climatisation collective (centralisée)

Ne sont concernées que les climatisations centralisées ne nécessitant pas de mélange entre une fraction de l'air sortant et l'air entrant. Les très rares climatisations collectives avec recyclage partiel de l'air imposent à la fois aux concepteurs, ingénieristes, architectes, comme aux sociétés de maintenance, d'adapter au risque sanitaire actuel, les procédures de maintenance mais aussi de faire évoluer les bonnes pratiques appliquées à la conception des installations.

Le HCSP attache ainsi une grande importance aux installations présentes dans les transports collectifs (avion, train, etc.), sur les navires de croisières comme sur les navires militaires et à l'adaptation des navires futurs aux risques sanitaires comme le Covid-19, le conditionnement de l'air pouvant, selon la conception des installations, contribuer à la diffusion du virus.

Ces climatisations correctement entretenues ne présentent pas de risque, l'air entrant étant toujours de l'air neuf. Un entretien conforme aux règles de l'art est à réaliser par des professionnels. Il sera porté la plus grande attention à la maintenance des filtres dans les transports collectifs (sur l'air entrant, mais aussi, si ceux-ci existent, aux filtres se situant au niveau des sorties d'air dans les zones climatisées).

Avis du HCSP du 28 août 2020 relatif à des adaptations possibles s'agissant de la recommandation du port de masque en milieu de travail dans les lieux collectifs clos**Prévention du risque et réglementation**

Les « principes généraux de prévention » (article L.230-2 du Code du Travail)

L'article L. 230-2 précise que : « L'employeur prend les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé des travailleurs de l'établissement, y compris les travailleurs temporaires. Ces mesures comprennent des actions de prévention des risques professionnels, d'information et de formation ainsi que la mise en place d'une organisation et de moyens adaptés. Il veille à l'adaptation de ces mesures pour tenir compte du changement des circonstances et tendre à l'amélioration des situations existantes. Sans préjudice des autres dispositions du présent code, lorsque dans un même lieu de travail les travailleurs de plusieurs entreprises sont présents, les employeurs doivent coopérer à la mise en œuvre des dispositions relatives à la sécurité, à l'hygiène et à la santé selon des conditions et des modalités définies par décret en Conseil d'État. »

Les obligations de l'employeur en matière d'EPI, ainsi que les règles d'organisation, de mise en œuvre et d'utilisation sont ainsi définies dans le Code du Travail. L'employeur doit rechercher tous les moyens permettant d'assurer la sécurité de ses salariés en :

- Supprimant ou réduisant les risques à la source. Se doter d'une ventilation suffisante relève de cette catégorie, comme la mise en place d'écrans en matériau transparent entre les postes de travail.
- Mettant en place des mesures de protection collective (masques, visières)
- Donnant des consignes appropriées aux salariés

Il est important de préciser que les EPI ne doivent être utilisés qu'en dernier recours quand les autres moyens employés pour réduire le risque s'avèrent insuffisants ou impossibles à mettre en œuvre.

C'est ainsi que le port d'un EPI s'imposera lorsque les risques ne pourront être évités ou suffisamment limités par des moyens techniques de protection collective ou par des mesures, des méthodes ou procédés d'organisation du travail.

Les mesures d'élimination du danger et de protection collective sont à envisager en premier lieu [40]. L'utilisation des EPI ne doit être envisagée qu'en complément. C'est à partir de l'évaluation des risques menée dans l'entreprise que doit être engagée la réflexion relative à leur utilisation.

Les employeurs (dès le 1^{er} salarié) sont tenus par la loi de prendre toutes les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé physique et mentale de ses salariés (article L. 4121-1 du Code du travail). Non seulement le risque doit être évalué, mais il importe aussi de le prévenir.

Le Document unique de prévention des risques (DUPR) et le risque lié au Covid-19

Obligatoire en milieu professionnel, il doit être mis à jour [41] pour intégrer l'évaluation du risque d'exposition des salariés au Coronavirus (SARS-CoV-2) et les mesures de prévention mises en place pour les protéger.

Réglementation relative à la ventilation

En absence de toxiques (poussières, composés chimiques) et sous réserve du respect d'autres réglementations (bruit, risque incendie, autres risques chimiques et biologiques, réglementation ATER) le débit d'air minimal est généralement prévu dans le règlement sanitaire départemental et/ou le code du travail.

Le tableau qui suit reprend les valeurs minimales :

	Type de local	Débit minimum (m ³ /h)		
		Selon le CT	Selon le RSDT	
		Par pers.	Par pers.	Par local
Bureaux	Hall recevant du public	25	18	-
	Poste d'accueil et de renseignement	30	25	-
	Salle d'attente	25	18	-
	Bureaux individuels et collectifs	25	18	-
	Salle de dessin	25	-	-
	Salle de repos	25	18	-
	Atelier d'entretien avec travail physique léger	45	-	-
	Autres ateliers	60	-	-
Réunion	Salle de réunion	30	18	-
Restauration	Salle à manger	30	22	-
	Cafétéria	30	22	-

Pour un local donné le débit d'air de ventilation fixera l'effectif maximal autorisé. Une salle de réunion, ventilée mécaniquement avec un débit d'air connu de 300 m³/h ne pourra accepter que 10 personnes.

Si le débit n'est pas connu, l'exploitant se fera assister le cas échéant par un spécialiste pour le mesurer. Il peut aussi mesurer le débit d'air.

La norme NBN EN 12599 (Ventilation des bâtiments – Procédures d'essai et méthodes de mesure pour la réception des installations de ventilation et de climatisation installée) décrit quatre méthodes de mesure de débits d'air le plus souvent avec un anémomètre :

- Au niveau des bouches d'air ;
- Sur la section droite d'un conduit ;
- Avec dispositif d'étranglement ;
- Et sur la section droite d'une chambre ou d'un dispositif.

Elle recommande la mesure en conduit si une section est accessible et appropriée.

La méthode avec des gaz traceurs peut aussi être utilisée pour calculer le débit de ventilation.

Comment faire fonctionner et utiliser les installations sanitaires et de conditionnement des bâtiments afin d'éviter la propagation virus SARS-CoV-2 sur les lieux de travail

Les dispositions qui suivent reprennent certaines suggestions issues du document publié par la Fédération européenne des entreprises de chauffage, de ventilation et de conditionnement de l'air (Rehva). D'autres documents sont publiés par l'Association des ingénieurs et techniciens en climatique, ventilation et froid (AICVH) et le Syndicat des industries thermiques, aérauliques et frigorifiques (UNICLIMA). Il faut :

- Assurer la ventilation des espaces avec de l'air extérieur. Idéalement s'approcher des 40 m³ /h par personne présenté dans le local
- Atteindre la ventilation à la vitesse nominale au moins 2 heures avant le début de la période d'occupation du bâtiment et passer à une vitesse économique 2 heures après la fin de la période d'occupation du bâtiment.
- La nuit et le week-end, ne pas désactiver la ventilation, mais laisser les systèmes fonctionner à une vitesse réduite

- Tenir également compte de la présence éventuelle de personnes en dehors des heures normales de travail et prévoir aussi une ventilation suffisante à ces moments en fonction de l'occupation.
- Assurer une aération régulière par les fenêtres (même dans les bâtiments à ventilation mécanique).
- Régler toute ventilation contrôlée au CO₂ dans les locaux aussi bas que possible (point de consigne : 400 ppm) afin d'assurer une ventilation permanente.
- Garder la ventilation des toilettes en fonctionnement 24 h/24 et 7 jours/7.
- Éviter les fenêtres ouvertes dans les toilettes pour s'assurer du bon sens du flux d'air ;
- Demander aux occupants de l'immeuble d'actionner la chasse d'eau des toilettes avec le couvercle fermé.
- Basculer les unités de traitement d'air avec recirculation à 100 % d'air neuf si ceci est possible et si ceci n'est pas possible réduire au maximum la fraction d'air recyclé.
- Inspecter l'équipement de récupération de chaleur pour s'assurer que les fuites sont sous contrôle. Il est préférable d'arrêter la roue thermique. Dans la mesure du possible, examiner s'il peut y avoir des fuites importantes (> 5 %) entre les courants de pulsion et d'extraction dans le système de récupération d'énergie. Ce problème peut être dû à des différences de pression entre les deux conduits et peut être résolu en réglant les ventilateurs. Cependant, dans une installation récente bien entretenue, la probabilité d'une telle fuite est faible. Avec un taux d'occupation plus faible et un apport d'air frais encore suffisant, le risque reste limité.
- Éteindre ou sinon faire fonctionner les ventilo-convecteurs de sorte que les ventilateurs soient maintenus en fonctionnement de façon continue.
- Ne pas modifier les points de consigne de chauffage, de refroidissement et d'humidification.
- Ne pas prévoir de nettoyage des conduits pendant cette période.
- Bien remplacer les filtres pour l'air extérieur et l'air extrait, selon le calendrier d'entretien.
- Respecter les mesures de protection habituelles, y compris une protection respiratoire, lors des travaux de remplacement et d'entretien réguliers des filtres.
- Afficher, compte tenu du débit d'air l'effectif maximal autorisé au même moment dans le local.
- Vérifier périodiquement le débit d'air recyclé par des mesures ;
- Faciliter un mouvement d'air vertical, idéalement par l'aménagement des locaux. Des cloisons transparentes ou non peuvent fractionner et canaliser la circulation de l'air verticalement. Une séparation simple des postes de travail par des cloisons dans des bureaux organisés en « open-space » est une bonne réponse.
- Tenir compte des autres équipements pouvant filtrer l'air avec ou sans rejet vers l'extérieur. Ces appareils sont souvent équipés de filtres HEPA.

Ces pratiques n'auront qu'un faible impact énergétique alors qu'elles permettront d'évacuer les particules virales du bâtiment et de les éliminer des surfaces où elles auraient pu se déposer.

De l'avis général, il convient d'introduire le plus d'air possible dans les locaux (en évitant les courants d'air balayant les occupants), le point clé étant de fournir le maximum d'air frais par personne. Si, du fait des mesures de télétravail, les effectifs en personnels se trouvent réduits, il importe de ne pas rassembler le personnel présent dans des espaces réduits, mais de conserver ou même d'augmenter la distance physique (min 2-3 m entre les personnes) tout en renforçant l'effet d'assainissement de la ventilation.

Unités d'air conditionné et ventilo-convecteurs (climatisation)

- Dans un premier temps, il faut veiller à ce que la demande de refroidissement ou de chauffage supplémentaire soit maintenue à un niveau aussi bas que possible.
- Pendant la saison de climatisation :
 - Placer autant que possible les bâtiments temporaires (par exemple, les baraques de chantier) dans l'ombre permanente ;
 - Réduire l'excès de chaleur dû à la charge thermique des toits plats en appliquant des galets (blancs) sur le toit si la capacité de charge de celui-ci le permet ;
 - Isoler l'enveloppe du bâtiment ;
 - Utiliser au maximum les stores extérieurs ou installer des grilles ou des auvents qui empêchent la lumière directe du soleil de pénétrer par les fenêtres, dans la mesure où la structure et la façade du bâtiment le permettent ;
 - Blanchir temporairement les grands vitrages ou coupoles exposés directement aux rayons du soleil, ou les enduire et les protéger, dans la mesure où cela est techniquement possible et n'entraîne pas d'autres risques importants pour la sécurité sur le lieu de travail. L'application de films réfléchissant la chaleur sur la surface extérieure de la fenêtre peut, dans une certaine mesure, empêcher la charge thermique par les fenêtres.
 - Éteindre les sources de chaleur internes autant que possible (ex. : éclairage). Prendre en compte les aspects de santé et de sécurité du travailleur lors de la prise de ces mesures (ex. : éteindre les lumières vs confort visuel).
- Pendant la saison de chauffage :
 - Permettre aux collaborateurs de travailler à l'abri des courants d'air froids et des vents froids.
 - Éviter les courants d'air forts sur les personnes. Ne pas utiliser de ventilateurs qui dirigent un courant d'air sur une personne.
 - Éteindre, dans la mesure du possible, les unités de climatisation ou les ventilo-convecteurs qui n'introduisent pas d'air frais et font seulement recirculer l'air intérieur pour le refroidissement ou le chauffage. Cependant, il est souvent impossible de couper ces systèmes en raison de charges thermiques ou frigorifiques trop élevées. Dans ce cas, faire fonctionner les unités en permanence à un régime inférieur et veillez à ce que le courant d'air ne soit pas dirigé directement sur les personnes présentes (modifiez la disposition des bureaux si nécessaire).
 - Combiner toujours ces unités avec une aération de base à l'air frais en ouvrant les fenêtres et les portes ou par une ventilation forcée avec de l'air extérieur (voir ci-dessus). Avec une aération suffisante et un faible taux d'occupation, le risque reste faible, même lorsque ces unités sont en fonctionnement.
 - Si une aération permanente n'est pas possible, les locaux doivent en tout cas être aérés périodiquement (toutes les heures pendant 15 minutes). Dans ce cas, travailler avec le taux d'occupation le plus bas possible. Faites porter à toutes les personnes présentes un masque en tissu, sauf dans les bureaux individuels qui peuvent être fermés.

Petits bureaux (ex. habitation, garage) à occupation très limitée (quelques personnes)

- En cas de ventilation mécanique, aérer au maximum avec de l'air frais.
- Si possible, aérer en permanence par les fenêtres et les portes ou par les grilles éventuelles.
- Si une ventilation permanente (mécanique ou naturelle) n'est pas possible, aérer toutes les heures pendant 15 minutes par une fenêtre ou une porte et faire porter un masque aux personnes présentes.

- Ne pas utiliser l'air conditionné qu'en cas de chaleur ou de froid excessifs. Dans ce cas, faire fonctionner l'air conditionné en permanence à un régime inférieur et évitez les forts courants d'air dirigés sur les personnes.
- Travailler avec des équipes fixes et nettoyez entre les changements d'équipe.
- Autoriser un maximum d'1 visiteur supplémentaire à la fois dans le bureau.

Avis du 14 octobre 2020 relatif à l'utilisation des appareils de chauffage.

La mesure en continu de la concentration en dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air à l'aide de capteurs, dont le coût n'est pas excessif, permet de juger de la qualité du renouvellement de l'air. Une valeur cible plus faible que la valeur guide de 1000 ppm peut être proposée afin d'améliorer le renouvellement de l'air des locaux.

Le HCSP recommandait :

- de maintenir le chauffage des espaces clos collectifs afin d'atteindre une température de confort en adéquation avec l'activité des personnels et des visiteurs ;
- d'assurer le renouvellement régulier de l'air des locaux avec un apport d'air neuf respectant les prescriptions réglementaires (Règlement sanitaire départemental type, Code du travail) qui devra, si possible, être augmenté. Il permet, par dilution, de diminuer les concentrations des aérosols potentiellement chargés en virus infectieux. Ce renouvellement de l'air est assuré par :
 - l'installation de traitement d'air qui agit également comme système de ventilation mécanique des locaux avec une extraction d'air ;
 - la ventilation naturelle par conduits ou l'aération des espaces clos par ouverture des fenêtres, en fonction des activités effectuées dans ces espaces (par exemple, fenêtre entrebâillée en permanence ou ouverte en grand à certains moments de la journée : par exemple, début de matinée, pauses, fin d'après-midi, nettoyage des locaux). Le chauffage sera réglé pour prendre en compte l'aération.

La mesure en continu de la concentration en dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air à l'aide de capteurs, dont le coût n'est pas excessif, permet de juger de la qualité du renouvellement de l'air. Une valeur cible plus faible que la valeur guide de 1000 ppm peut être proposée afin d'améliorer le renouvellement de l'air des locaux.

- de limiter strictement la jauge d'occupation à ce que permet le débit **réel** d'air neuf entrant dans le local. L'exploitant vérifiera ou fera vérifier régulièrement ce débit d'air neuf, comme l'efficacité des ouvrants.
- de veiller à respecter les règles de conception, de réalisation et la maintenance régulière des appareils de chauffage à air pulsé et des installations de traitement d'air (avec enregistrement des données) et notamment :
 - de nettoyer périodiquement les diffuseurs d'air, batteries et filtres des appareils, sur la base des instructions du fabricant, pour réduire les problèmes d'encrassement et favoriser le bon fonctionnement des équipements.
 - de ne pas vaporiser ou pulvériser des produits détergents/désinfectants sur les filtres et batteries afin de ne pas faire inhaler des résidus chimiques lors du fonctionnement de l'appareil.
 - de vérifier la facilité et la sécurité d'ouverture des fenêtres (mécanique, encombrement).
- de maintenir en fonctionnement continu les appareils de chauffage à air pulsé et les systèmes de ventilation mécanique, éventuellement avec une diminution des taux de ventilation pendant la nuit lorsque le bâtiment n'est pas utilisé ou en modifiant les horaires de marche/arrêt, en débutant deux heures plus tôt avant l'ouverture du bâtiment et en arrêtant deux heures après la fermeture du bâtiment. Il est recommandé de vérifier l'absence d'obstacles au bon fonctionnement de la diffusion de l'air dans les locaux (rideaux, objets, plantes, etc.).
- de supprimer la fonction de recyclage d'air de l'installation de traitement d'air pour éviter le transfert éventuel d'aérosols viraux dans plusieurs locaux. Lorsqu'il n'est pas possible de

désactiver complètement le recyclage en raison des spécifications de fonctionnement liées à la conception, il est recommandé de faire fonctionner le système en adaptant et en modifiant la quantité d'air neuf requise et en réduisant la quantité d'air recyclé. En complément, si cela est possible, il est recommandé d'ouvrir les fenêtres au moins pendant quelques minutes plusieurs fois par jour afin d'augmenter encore le niveau de renouvellement d'air.

- de s'assurer en saison hivernale que l'hygrométrie ne soit pas trop basse, c'est-à-dire inférieure à 40 %, afin de limiter la formation d'aérosols.

Avis du 22 novembre 2020 relatif à une proposition de protocole sanitaire renforcé pour les commerces

Le HCSP souligne le bénéfice important apporté par l'aération et le renouvellement de l'air au sein des locaux et recommande la mise en œuvre des dispositions qu'il a déjà énoncées (cf. infographie, ci-dessous), notamment la mesure du dioxyde de carbone CO₂ (gaz carbonique)

Les commerces s'engagent à assurer le renouvellement régulier de l'air :

- Soit par une ventilation naturelle (portes et/ou fenêtres ouvertes au minimum 15mn au moins deux fois par jour)
- Soit par un système d'aération mécanique assurant un tel renouvellement.

Il est recommandé de vérifier la qualité du renouvellement de l'air par des dispositifs de mesure du CO₂.

Risque de Covid-19

Qualité de l'air dans un établissement recevant du public (ERP) par la mesure du dioxyde de carbone CO₂ (gaz carbonique)

La réduction du risque de transmission du virus SARS-CoV-2 implique les points suivants :

- Une jauge de fréquentation maximale des espaces clos qui doit être définie, affichée à l'extérieur et à l'intérieur des locaux et respectée. Elle doit être à minima conforme au Règlement sanitaire départemental type (RSDT) et au code du travail pour les salariés,
- Le respect de la distanciation physique de 2m entre les personnes,
- La capacité de renouvellement de l'air des locaux par l'aération ou la ventilation mécanique,
- Les caractéristiques d'occupation/organisation/encombrement de l'espace intérieur des locaux,
- Le plus grand volume libre possible de la zone d'accueils des personnes ;
- Un temps de présence des personnes réduit au minimum.

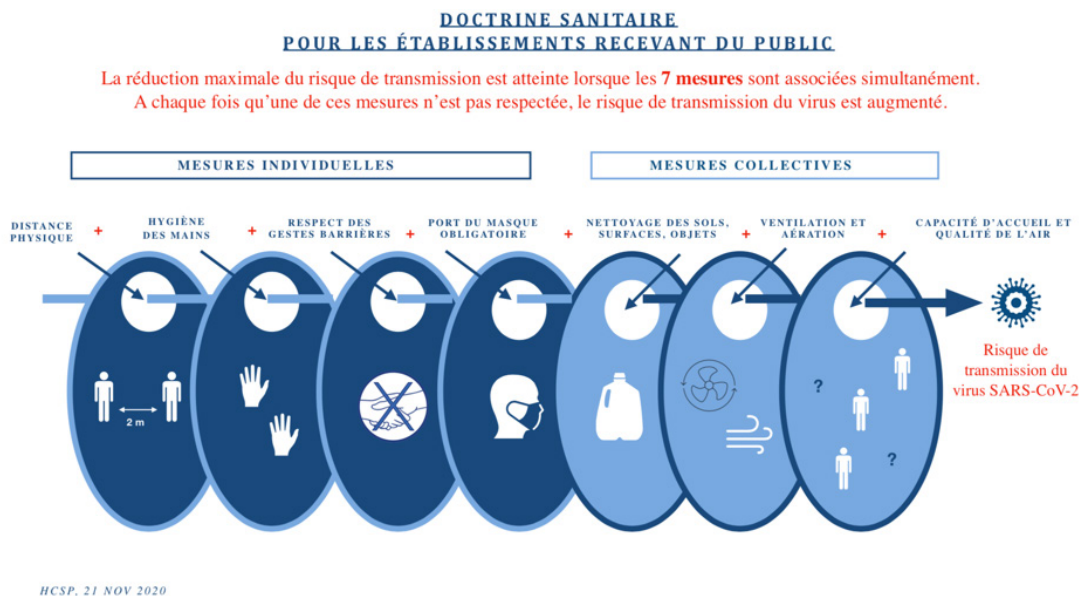
La mesure de la concentration en gaz carbonique (CO₂) dans l'air au cours de la journée représente un indicateur de mesure du renouvellement de l'air des locaux. Elle est réalisée à l'aide de capteurs portables. Elle permet d'optimiser les pratiques d'aération ou le fonctionnement de la ventilation mécanique. Cette mesure a été validée par le CSTB (<https://evaluation.cstb.fr/>).

Hors crise sanitaire, le CO₂, mesuré en plusieurs points des locaux, ne doit pas dépasser la valeur de 1000ppm qui est la valeur normale acceptable dans un lieu recevant du public. En période de risque Covid-19, cette valeur doit être maintenue à des valeurs plus basses que 1000ppm. Le HCSP recommande une valeur de 800ppm.

HCSP, 22 novembre 2020

Avis du HCSP du 18 avril 2021 relatif à l'établissement d'une stratégie permettant de définir des mesures à mettre en œuvre pour la réouverture des activités dans les ERP

Le HCSP y mentionne que la réduction du risque de contamination dans une réunion d'individus repose sur l'activation de ces mesures barrières qui contribuent pour chacune d'entre elles à la réduction du risque de contamination et ce de façon complémentaire. La maîtrise du risque peut être schématisée selon le principe de Reason dont le HCSP a proposé une version ci-dessous.



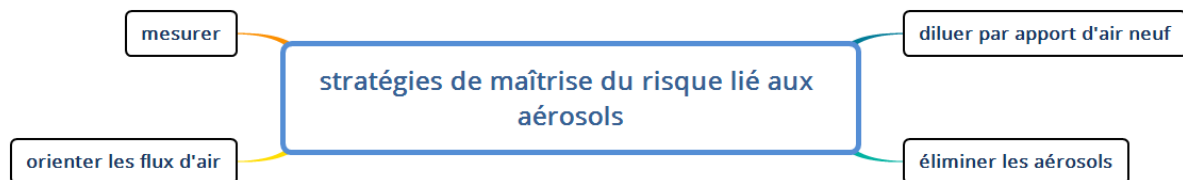
Quatre mesures barrières sont des mesures intrinsèques qui dépendent du comportement des individus (distanciation physique, port du masque, hygiène des mains, et respect des gestes barrières). Trois mesures sont des mesures collectives dont la mise en œuvre relève de décisions administratives ou de consignes réglementaires ou de la responsabilité des gérants établissements recevant du public (ERP) : nettoyage/désinfection et aération/ventilation des locaux, gestion de la densité de personnes dans un espace donné (« jauge »).

Le HCSP mentionne que l'aération et le renouvellement de l'air au sein des locaux est une des mesures extrinsèques majeures de la doctrine du HCSP. Il est nécessaire d'effectuer une aération des espaces clos en dehors de la présence des personnes. Il est aussi nécessaire de s'assurer du bon fonctionnement et de l'entretien de la ventilation mécanique (VMC). Il ne faut pas utiliser de ventilateur, si le flux d'air est dirigé vers les personnes. Les systèmes de climatisation, dont la maintenance régulière doit être assurée, doivent éviter de générer des flux d'air vers les personnes.

Le taux de renouvellement s'évalue facilement par la mesure du dioxyde de carbone CO₂ (gaz carbonique) dans l'air (indice ICONE de confinement établi par le Centre scientifique et technique du bâtiment, CSTB). Cette mesure vise à évaluer les conditions de renouvellement de l'air à l'intérieur des locaux et les périodes où le renouvellement est insuffisant pour assurer une dilution et élimination des aérosols satisfaisantes (seuil d'alerte). Une mesure de CO₂ supérieure à un seuil de 800 ppm doit conduire à agir en termes d'aération/renouvellement d'air et/ou de réduction du nombre de personnes admises dans les locaux d'un ERP (Voir infographie ci-après). La mesure doit être effectuée à des endroits significatifs de la fréquentation et à des périodes de réelles fréquentation chargée. La ventilation et l'aération des locaux seront d'autant plus importantes que le respect d'autres mesures barrière n'est pas ou peu possible dans certaines conditions ou phase de retour à une vie sociale normale. Cette maîtrise de l'aération/ventilation des ERP doit constituer un point fort sur lequel peut s'appuyer un protocole sanitaire lorsque certaines mesures barrières (ex. port du masque ou distance physique) ne sont pas adaptés à l'activité d'un ERP ré-ouvert (ex. restaurants, écoles ...).

Annexe 5 – Analyse des stratégies de maîtrise de la diffusion des aérosols

La maîtrise du risque lié aux aérosols ne peut s'affranchir du risque relevant de la contamination directe qui est dominante à courte distance et la contamination résultant de la contamination des mains. Quatre stratégies sont possibles :



1. Diluer (par apport d'air neuf) Aération/ventilation/renouvellement de l'air

Pour renouveler l'air d'une pièce, trois solutions existent :

- 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 pratiquement 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.

Les travaux¹ menés à l'Université de Berlin par Anne Hartmann fin 2020 montrent la bonne corrélation entre l'excès de concentration de CO₂ dans la pièce par rapport à l'air extérieur (en France en moyenne 410 ppm de CO₂ extérieur) et les excès de particules (qui peuvent provenir de personnes contaminées : symptomatiques et asymptomatiques).

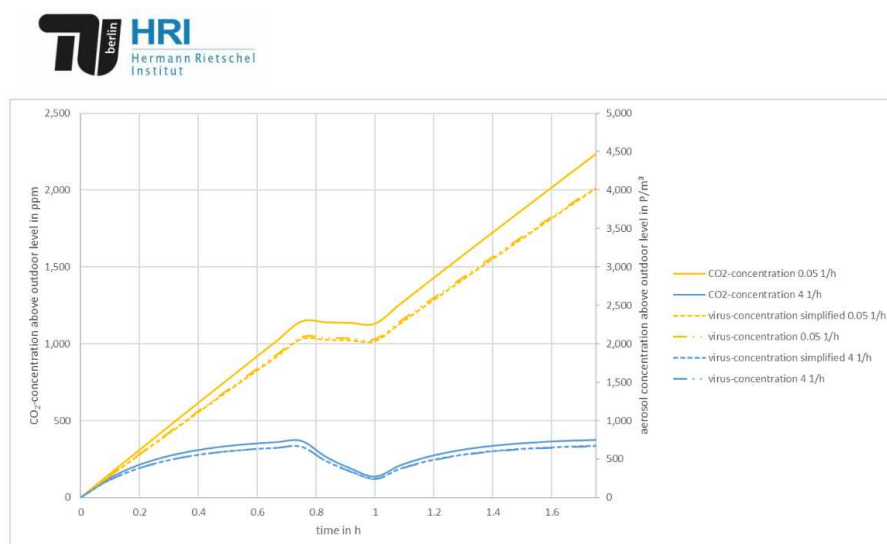
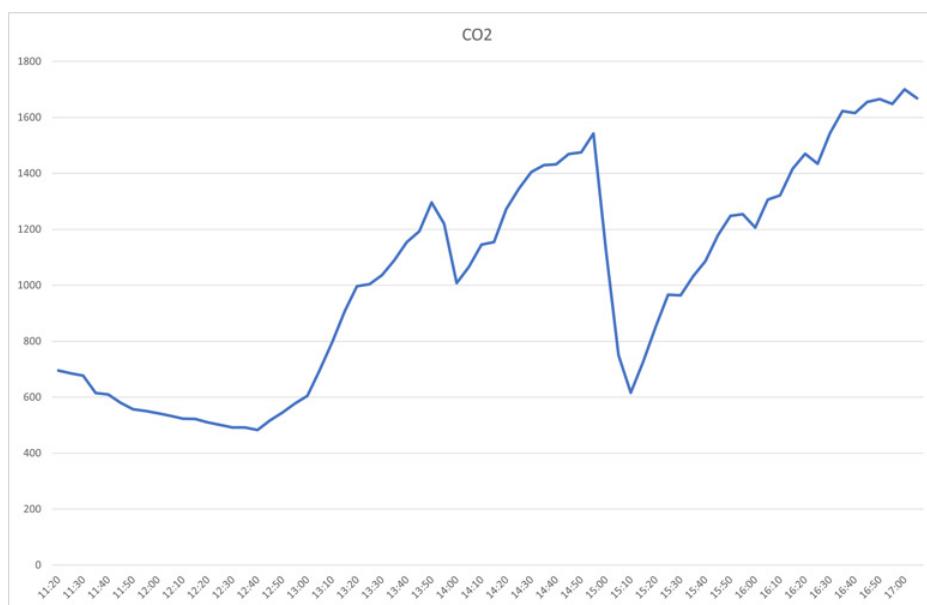


Figure 2: progression of the CO₂-concentration in a classroom during 2 lessons with a break (left axis) as well as aerosol concentration (right axis)

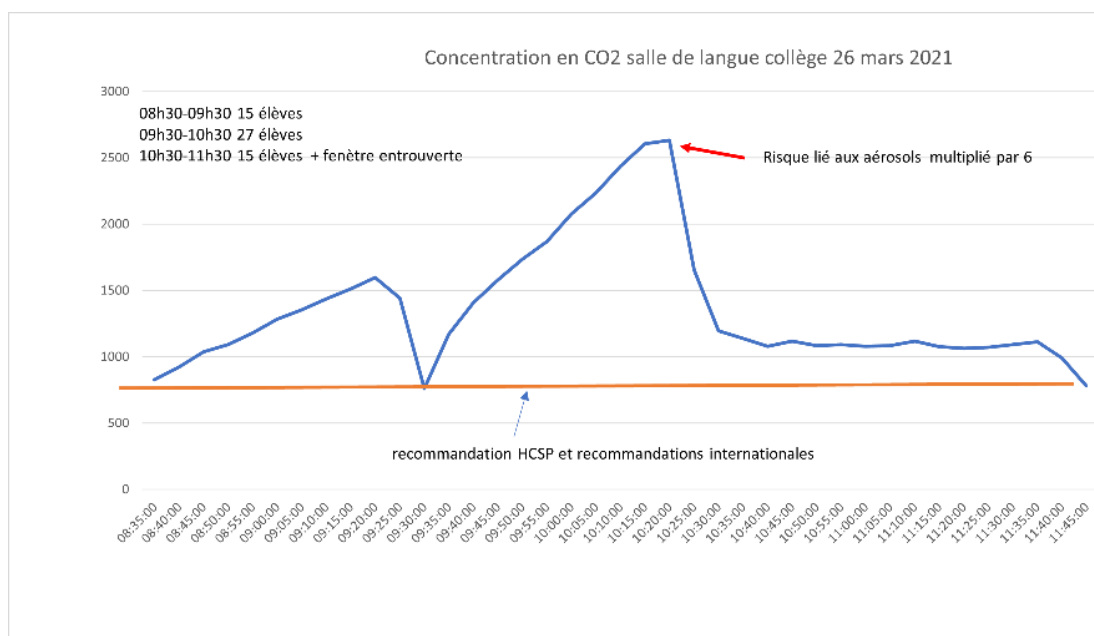
¹ Risk assessment of aerosols loaded with virus based on CO₂-concentration Anne Hartmann, Martin Kriegel. Technical University of Berlin, Hermann-Rietschel-Institute DOI: <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-10362>

Une campagne de mesure menée dans un collège des Yvelines²



Campagne de mesure menée sur une salle de classe (début des cours à 13h, jauge 15 élèves ; aération de 3 minutes à l'interclasse de 14h, 7 minutes à l'interclasse de 15 h et pas d'aération à l'interclasse de 16 h.)

En quelques minutes le niveau de CO₂ est retombé sous les 600 ppm vers 16h. Il apparaît clairement l'insuffisance d'aération relevé par un capteur de CO₂.



Dans cette salle de langue, la concentration en CO₂ a même atteint 2800 ppm. Soit 2400 ppm d'excès par rapport à l'air extérieur, et 6 fois l'excès acceptable (+ 400 ppm/air extérieur). Ceci correspond à 6 fois les rejets acceptables en CO₂, tels que proposés par le HCSP et 6 fois l'apport dans la pièce d'aérosols.

² Jean-Louis Roubaty, François Petrelis et coll (analyse. en cours)

De nombreuses équipes dans le monde se sont intéressées au débit d'air neuf (ou air filtré) qu'il faudrait introduire. Un niveau de 4 à 6 volumes d'air/volume de la pièce (4-6 ACH) est souvent retenu par les scientifiques (Professeur Detlef Lohse (Université de Twente) and Professeur Christian Kähler (Bundeswehr University Munich)).³

2. Éliminer les aérosols

Les aérosols (comme toutes les particules et poussières présentes dans l'air de la salle peuvent être éliminés par des filtres, si ceux-ci sont présents et correctement dimensionnés et entretenus sur des installations permanentes de traitement de l'air. Les installations permanentes sont le plus souvent intégrées à la VMC et à la centrale de traitement d'air.

On peut y associer certains filtres incorporés aux équipements de climatisation au niveau des échangeurs (split), si le filtre est correctement dimensionné et régulièrement nettoyés

Lorsque les VMC ne sont pas disponibles ou insuffisamment dimensionnées des unités d'épuration d'air ventilées et portables peuvent être envisagées pour aider à contrôler les concentrations de particules dans l'air.⁴

3. Orienter les flux d'air verticalement (écrans..)

La pratique s'est développée mondialement chaque fois que dans un local fermé, la distanciation physique et/ou un masque adapté, ne peuvent être utilisés⁵.

De nombreux pays utilisent les écrans pour favoriser l'évacuation vers le haut des gaz potentiellement contaminés et bloquer les mouvements d'air horizontaux. Dans sa conférence citée au paragraphe précédent « *How to prevent SARS-CoV-2 infections via droplets and aerosols* » mars 2021, le Professeur Christian J. Kähler a optimisé la disposition et la forme des écrans.

4. Mesurer la concentration en CO₂ pour juger de la qualité de l'air intérieur⁶

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 et 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.

³ 3rd zoom-meeting "COVID19 Flows: Fundamentals and Practical Recommendations" ERCOFTAC Pilot Center Henri Bénard: http://chb.ec-lyon.fr/zoom-meetings-covid-19-flows/2021/Covid19_Friday_5_March/

⁴ Ontario Agency for Health Protection and Promotion (Public Health Ontario). Frequently asked questions: use of portable air cleaners and transmission of COVID-19 [Internet]. Toronto, ON: Queen's Printer for Ontario; 2020 [cited 2021 Mar 10]. Available from: <http://www.publichealthontario.ca/-/media/documents/ncov/ipac/2021/01/faq-covid-19-portableair-cleaners.pdf?la=en>

⁵ <https://www.hse.gov.uk/coronavirus/social-distancing/unable-to-social-distance.htm>

⁶ http://projetco2.fr/documents/dossier_co2_v1.pdf

Éléments techniques complémentaires

Augmenter la ventilation de l'air extérieur (minimiser la recirculation)

De nombreuses organisations professionnelles comme l'ASHRAE, la REHVA fournissent des conseils sur le traitement de l'air et la Covid-19, y compris pour de la réhabilitation ou des travaux neufs.^{7,8}

Si la ventilation mécanique est insuffisante et si celle ne peut être techniquement augmentée, l'ouverture des fenêtres peut être une bonne alternative en complément, mais le débit d'air sera variable (quand, par exemple, il n'y a pas de vent).^{9,10}

La ventilation par des fenêtres ouvertes peut être améliorée en utilisant un ventilateur orienté vers l'extérieur vers l'air évacué et d'autres fenêtres ouvertes qui font entrer l'air extérieur.

Augmenter l'efficacité du filtre de la VMC

La filtration est une autre stratégie pour éliminer les virus et autres particules de l'air intérieur. Les filtres nécessitent entretien approprié et Dans certains cas, il est possible d'augmenter les performances de la filtration en changeant de classe de filtre.^{11,12}

Le tableau qui suit donne pour les filtres courants, employés en VMC le niveau de performance attendu pour les filtres employés sur les VMC.

Tableau de classification des filtres selon la norme ISO 16890

Classe selon norme EN779	Classe selon norme ISO 16890			
	ISO ePM1	ISO ePM2.5	ISO ePM10	ISO Grossier
G3	–	–	–	>80%
G4	–	–	–	>90%
M5	–	–	>50%	–
M6	–	>50%	>60%	–
F7	>50%	>65%	>85%	–
F8	>65%	>80%	>90%	–
F9	>80%	>90%	>95%	–

Il ressort de ce tableau qu'un filtre classé F9 aura une meilleure capacité à bloquer les aérosols qu'un filtre classé F7. Un filtre de niveau F9 bloquera plus de 80 % et probablement 90 % des aérosols associés au Covid-19.

L'efficacité d'un filtre peut être aussi évaluée par la valeur de rapport d'efficacité minimale (MERV : « Minimum Efficiency Reporting Value », allant de 1 à 16), basé sur la fraction de particules retirées de l'air qui le traverse dans des conditions standard, selon un protocole de l'Ashrae.

⁷ American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Filtration/disinfection [Internet]. Atlanta, GA: ASHRAEngineers; 2020: <https://ashrae.org/technical-resources/filtration-disinfection>

⁸ Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA). REHVA COVID-19 guidance document: how to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces [Internet]. Version 4.0. Brussels: REHVA; 2020

⁹ Dietz L, Horve PF, Coll DA, Fretz M, Elsen JA, Van Den Wymelenberg K. 2019 Novel coronavirus (COVID 19) pandemic: built environmental considerations to reduce transmission. mSystems. 2020;5(2):e00245-20.: <https://doi.org/10.1128/msystems.00245-20>

¹⁰ Morawska L, Cao J. Airborne transmission of SARS-CoV-2: the world should face the reality. Environ Int. 2020;139:105730.: <https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.envint.2020.105730>

¹¹ Dietz L, Horve PF, Coll DA, Fretz M, Elsen JA, Van Den Wymelenberg K. 2019 Novel coronavirus (COVID 19) pandemic: built environmental considerations to reduce transmission. mSystems. 2020;5(2):e00245-20.: <https://doi.org/10.1128/msystems.00245-20>

¹² Shoen LJ. Guidance for building operations during the COVID-19 pandemic. ASHRAE J. 2020;(May):72-4. <https://ashrae.org/news/ashraejournal/guidance-for-building-operations-duringthe-covid-19-pandemic>

Les directives de l'ASHRAE sur le Covid-19 suggèrent d'utiliser au minimum le MERV 13¹³ (assimilable aux filtres F9 selon la norme ISO 16890) ou plus, en fonction de leurs capacités à filtrer les particules de la taille d'un virus (<1 µm).¹⁴

Contrôler l'hygrométrie de l'air

Il n'y a pas consensus sur le lien potentiel entre l'humidité relative HR de l'air et le niveau de contamination de l'air. Par exemple, lorsque la HR augmente, les gouttelettes décanent plus vite, ce qui diminue d'autant la fraction de gouttelettes disponibles pour la conversion en aérosols.¹⁵

Divers scientifiques^{16,17} ont aussi suggéré de maintenir un niveau d'HR entre 40 et 60% avec toutefois le risque d'avoir sur des parois froides une condensation et un développement de moisissures.

Impact de certains systèmes associés (climatisation simple sans renouvellement d'air et ventilateurs)

Il est prouvé que tout flux d'air horizontal (les ventilateurs déplaçant l'air d'une personne infectée vers d'autres à proximité) peut être un facteur important de transmission. Éviter le flux d'air direct autour des zones respiratoires des personnes réduit la dispersion des gouttelettes respiratoires d'une personne à l'autre. Plutôt qu'un flux d'air au niveau de la tête, les options consisteraient à diriger l'air vers le haut ou à évacuer l'air ambiant par une fenêtre ouverte tandis que d'autres les fenêtres ouvertes aspirent l'air frais. Comme mentionné ci-dessus, la ventilation et la circulation de l'air à l'intérieur des bâtiments ont été associées à transmission de diverses maladies infectieuses, y compris la tuberculose, la grippe et sévère aiguë Syndrome respiratoire (SARS)¹⁸. Les courants d'air créés par les ventilateurs ou les systèmes de climatisation peuvent disperser des gouttelettes respiratoires dans l'air, évaluant et orientant ainsi le flux d'air pour éviter de souffler de l'air d'une personne à une autre peut réduire le risque. Les Centers for Disease Control and Prevention (CDC) soutiennent l'évitement du flux d'air contaminé d'une personne à une autre et suggèrent qu'un ventilateur peut être utilisé pour évacuer l'air ambiant tandis que d'autres fenêtres ouvertes aspirent l'air.¹⁹

¹³ <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-merv-rating-1>

¹⁴ American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Filtration/disinfection [Internet]. Atlanta, GA: ASHRAEngineers; 2020 <https://ashrae.org/technical-resources/filtration-disinfection>

¹⁵ Eykelbosh A. High-humidity environments and the risk of COVID-19 transmission. Vancouver, BC: National Collaborating Centre for Environmental Health; 2020. <https://ncceh.ca/documents/field-inquiry/high-humidity-environments-and-risk-covid-19-transmission>

¹⁶ European Centre for Disease Prevention and Control. Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19 [Internet]. Stockholm: European Centre for Disease Prevention Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Systems in Buildings and COVID-19 13 and Control; 2020 <https://ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Heating-ventilation-air-conditioning-systemsin-the-context-of-COVID-19-first-update.pdf>

¹⁷ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). ASHRAE position document on infectious aerosols [Internet]. Atlanta, GA: ASHRAE; 2020. https://ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_infectiousaerosols_2020.pdf

¹⁸ Li Y, Qian H, Hang J, Chen X, Hong L, Liang P, et al. Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. medRxiv 20067728 [Preprint]. 2020 Apr 22 [cited 2020 May 30]. <https://doi.org/10.1101/2020.04.16.20067728>

¹⁹ Centers for Disease Control and Prevention. COVID-19: improving ventilation in your home [Internet]. Atlanta, GA: Centers for Disease Control and Prevention; 2021.: www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/Improving-Ventilation-Home.html

Annexe 6 - Synthèse de la littérature scientifique récente

- **Greenhalgh et coll. Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2.** The Lancet 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/S0140-6736>

Ce commentaire remet en question une analyse de la littérature de Heneghan et coll²⁰ financée par l'OMS, qui conclue que « L'absence de particules virales de SARS-CoV-2 cultivables dans les aérosols empêche de tirer des conclusions fermes sur la transmission aérienne du Covid 19 ».

Les auteurs considèrent que cette affirmation n'est pas étayée scientifiquement et donnent 10 arguments scientifiques opposés pour conforter la transmission par aérosol du SARS CoV 2 :

- Une transmission à longue distance a été observée dans des chambres d'hôtels mobilisées pour quarantaine pour des personnes Covid-19, des environnements où les personnes infectées ne passaient jamais de temps dans la même pièce.
 - Les individus asymptomatiques représentent environ 33% à 59% de la transmission du SARS-CoV-2 et pourraient propager le virus en parlant, ce qui produit des milliers de particules d'aérosol et quelques grosses gouttelettes.
 - La transmission à l'extérieur et dans les espaces intérieurs bien ventilés est plus faible que dans les espaces clos.
 - Les infections nosocomiales sont signalées dans les établissements de santé où les mesures de protection visent les grosses gouttelettes mais pas les aérosols.
 - Le SARS-CoV-2 viable a été détecté dans l'air des chambres d'hôpital et dans la voiture d'une personne infectée
 - Le SARS-CoV-2 a été détecté dans les filtres à air des hôpitaux et les conduits des bâtiments.
 - Les animaux infectés peuvent infecter les animaux dans d'autres cages reliées uniquement par un conduit d'air.
 - Aucune preuve solide ne réfute la transmission aérienne.
 - La recherche des contacts soutient la transmission secondaire dans les espaces intérieurs encombrés et mal ventilés.
 - Seules des preuves limitées appuient d'autres moyens de transmission du SARS-CoV-2, y compris par les fomites ou de grosses gouttelettes.
- **Allen et coll. Indoor Air Changes and Potential Implications for SARS-CoV-2 Transmission** Jama. Publié en ligne le 16 avril 2021. doi:10.1001/jama.2021.5053
<https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2779062>

Les auteurs font une analyse de la littérature concernant les moyens de réduire la transmission aérienne du SARS-CoV-2 dans les espaces intérieurs à petit volume (p. ex., salles de classe, magasins de détail..). **Ils recommandent 4 à 6 changements d'air par heure en combinant divers procédés de ventilation : ouverture de fenêtres vers l'extérieur, filtration de l'air avec au moins un niveau d'efficacité minimale de 13 (MERV 13), passage de l'air à travers des purificateurs d'air portatifs avec des filtres HEPA.** Bien que la relation la dose-réponse au SARS-CoV-2 est toujours inconnue et que le débat scientifique se poursuit sur le mode dominant de transmission, ils estiment que des données probantes appuient ces recommandations :

- analyse des aérosols expirés de personnes infectées qui émettent 100 fois plus de petites particules (5 µm) que de grosses (100µm) pendant la conversation, la respiration et la toux,
- études de cas de transmission par aérosol en milieux clos.

²⁰ Heneghan C, Spencer E, Brassey J, et al. SARS-CoV-2 and the role of airborne transmission: a systematic review. *F1000Research* 2021; published online March 24. <https://doi.org/10.12688/f1000research.52091.1>

- **Dyani Lewis, Why indoor spaces are still prime COVID hotspots, Nature 592, 22-25 (2021)** doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00810-9>
<https://www.nature.com/articles/d41586-021-00810-9>

Cette revue récente de la littérature sur l'importance de la ventilation dans la prévention de la diffusion du SARS-CoV-2 met en cause les choix effectués par les autorités publiques qui ont privilégiées la désinfection au détriment de la ventilation. Il reprend les recommandations de l'OMS d'un taux de ventilation minimum de 6 à 12 changements d'air – dans lequel tout le volume d'air dans la pièce est remplacé – par heure pour empêcher la transmission aérienne d'agents pathogènes dans les établissements de soins de santé, mais un taux plus faible de changements d'air pour d'autres sites. L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) propose 0,35 changement d'air par heure pour les foyers familiaux, 2-3 pour les bureaux, 5-6 pour les écoles et 6-12 pour les hôpitaux. Cependant, ces normes minimales sont rarement respectées. Wang et coll²¹ ont essayé d'estimer quel niveau de ventilation est nécessaire pour réduire le risque d'infection dans les écoles. Ils ont mesuré le taux de ventilation dans les salles de classe de trois écoles de Montréal et ont constaté qu'une salle de classe de 20 élèves et un enseignant avec des fenêtres ouvertes échangeaient moins de la moitié de l'air par heure ; une pièce similaire avec ventilation mécanique avait deux changements d'air par heure. Cependant cela ne suffirait pas à réduire le R0 à moins de 1. De 3 et 8 changements d'air par heure seraient nécessaires pour obtenir un R0 inférieur à 1, d'où l'importance du port du masque à l'intérieur qui réduit le risque d'infection de plus de 60%.

- **Lipinski *et coll.* Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings.** International Journal of Thermofluids 7-8
DOI: 10.1016/j.ijft.2020.100045
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266620272030032X>

Cette revue évalue de façon critique les stratégies de ventilation actuelles utilisées dans les bâtiments à forte occupation du public afin de réduire ou d'éradiquer le risque de transmission d'agents pathogènes et d'adapter les mesures de ventilation aux nouvelles menaces posées par les pandémies.

- **Lasser *et coll.*, Assessing the impact of SARS-CoV-2 prevention measures in schools by means of agent-based simulations calibrated to cluster tracing data**
<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2021.04.13.21255320v1>

Les auteurs ont cherché à identifier les mesures qui contrôlent efficacement la propagation du SARS-CoV-2 dans les écoles. Ils analysent des données autrichiennes sur 616 clusters impliquant 2 822 cas d'élèves et 676 cas d'enseignants dans le but de calibrer un modèle épidémiologique en termes de taille des clusters et de risque de transmission selon l'âge et la forme clinique.

Avec ce modèle, ils ont quantifié l'impact des mesures préventives telles que la ventilation des salles de classe, la réduction de la taille des classes, le port de masques pendant les cours et les tests d'entrée à l'école effectués par des tests d'antigène SARS-CoV2. Ils ont constaté que 40 % des clusters ne concernaient que deux cas, et que seulement 3 % des clusters concernaient plus de 20 cas. Plus les élèves étaient jeunes, plus de cas asymptomatiques ont été trouvés et d'enseignants comme cas source des transmissions à l'école.

Ils considèrent différents types d'écoles qui nécessitent différentes combinaisons de mesures pour atteindre le contrôle de la propagation de l'infection :

- Dans les écoles primaires, il est nécessaire de combiner au moins deux des mesures ci-dessus.

²¹ Hou, D., Katal, A. & Wang, L. Preprint at medRxiv
<https://doi.org/10.1101/2021.01.29.21250791> (2021).

-
- Dans les écoles secondaires, où les réseaux de contacts des élèves et des enseignants deviennent de plus en plus importants et denses, une combinaison de trois mesures est nécessaire.

Une analyse de sensibilité a indiqué que la taille du cluster pourrait être multipliée par trois dans les écoles secondaires pour les variantes de virus avec une transmissibilité accrue de 50 %, et que des mesures d'atténuation mal exécutées ou appliquées pourraient augmenter la taille du cluster d'un facteur de plus de 30.

Les résultats de cette étude suggèrent que des combinaisons de mesures spécifiques à l'école, lorsqu'elles sont strictement respectées, permettent une ouverture contrôlée des écoles, même dans le cadre d'une transmission soutenue du SARS-CoV-2.

- Hou et coll. Bayesian Calibration of Using CO₂ Sensors to Assess Ventilation Conditions and Associated COVID-19 Airborne Aerosol Transmission Risk in Schools.
<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2021.01.29.21250791v1>

Le niveau intérieur de CO₂ peut être utilisé comme indice pour estimer le taux de ventilation et le risque d'infection dans l'air des salles de classe en raison de la forte densité d'occupation et des conditions de ventilation souvent mauvaises. Les auteurs ont mesuré pendant une journée les niveaux de CO₂ dans trois écoles afin d'estimer le taux de ventilation et le risque d'infection dans l'air. Des méthodes d'analyse de sensibilité et d'étalonnage bayésien ont été appliquées pour identifier les incertitudes et calibrer les paramètres clés. Le taux de ventilation extérieure avec une confiance de 95% était de $1,96 \pm 0,31$ ACH (outdoor air ventilation rate) pour la salle de classe 1 avec ventilation mécanique et fenêtre entièrement ouverte, de $0,40 \pm 0,08$ ACH pour la classe 2, et $0,79 \pm 0,06$ ACH pour la classe 3 avec seulement des fenêtres ouvertes. Un niveau moyen de CO₂ de 450 ppm équivaut à un taux de ventilation > 10 ACH dans les trois classes. Le seuil de ventilation extérieure pour empêcher la propagation d'aérosols Covid-19 en classe se situe entre 3 et 8 ACH, et le seuil de CO₂ est d'environ 500 ppm par jour d'école (8 heures) pour les trois écoles.

Annexe 7 – Conseils pour la mise en place de la mesure du CO₂

Achat.

Il est recommandé 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/>

Etalonnage.

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.

Le 28 avril 2021

Haut Conseil de la santé publique

14 avenue Duquesne

75350 Paris 07 SP

www.hcsp.fr