

# Annexe C :

## Qualité de l'air dans les salles de classe

Annexe à la documentation «Air pur – maintenant !» pour les communes et cercles scolaires, présentée par [#ProtectTheKids](#), v1.22 (09.10.2022).

Cette annexe s'adresse à la présidence des Commissions scolaires et aux autorités scolaires dans les communes et les cercles scolaires, aux décideurs en matière d'éducation et de santé, ainsi qu'aux personnes qui s'occupent de la technique du bâtiment et de la climatisation des locaux.

Auteurs :

Fredy Neeser  
Dr. sc. techn. ETH

Andrea Hadorn-Stuker  
Educatrice lic. phil. I et MSc

Conseil scientifique

Membre du comité directeur

Traduction :

Marie Launaz  
Conseillère scientifique,  
MAS en éducation

Contact :

[#ProtectTheKids](#)  
[medien@protect-the-kids.ch](mailto:medien@protect-the-kids.ch)

La présente annexe compare différentes approches visant à améliorer la qualité de l'air dans les salles de classe.

Assurer un air intérieur sain tout en économisant de l'énergie est un défi qui dépend des normes du bâtiment et de la température extérieure. Des solutions flexibles pour un air intérieur propre, qui atteignent ces deux objectifs, peuvent être réalisées en combinant de manière appropriée la ventilation/aération et la filtration ou désactivation des aérosols. Les purificateurs d'air mobiles permettent d'intervenir rapidement dans les locaux non dotés d'un système de ventilation et dans les bâtiments dont les systèmes de climatisation ne peuvent pas être rénovés à court terme.

En particulier en vue de l'hiver 2022/23, mais aussi dans une perspective à plus long terme, nous nous consacrons aux questions suivantes :

- Quels concepts permettent d'améliorer rapidement la qualité de l'air dans les écoles ou les salles de classe qui ne disposent actuellement d'aucun système de climatisation et dans les bâtiments scolaires Minergie ou équipés d'un système de climatisation obsolète ?
- Comment réaliser un concept de ventilation qui maintient un niveau de concentration de CO<sub>2</sub> acceptable et qui élimine autant que possible les aérosols dangereux pour la santé, tout en étant économique et efficace sur le plan énergétique ?
- Compte tenu de la crise énergétique prévisible pour l'hiver 2022/23 et également à plus long terme en faveur de solutions durables : Comment combiner la ventilation et la filtration HEPA pour une très bonne réduction des aérosols respiratoires avec la meilleure efficacité énergétique possible ?

### C.1. Aérer ne suffit pas

Aérer régulièrement en ouvrant les fenêtres ne garantit malheureusement pas de manière fiable et durable une qualité suffisante de l'air. L'aération par l'ouverture des fenêtres à intervalles réguliers peut certes apporter une solution à court terme, mais entraîne des pics élevés de concentration de CO<sub>2</sub> et d'aérosols. Dans des conditions défavorables telles que des températures extérieures

basses/élevées, trop de vent (courants d'air), du bruit, de la poussière fine (smog) dans les zones urbaines, etc. ce type d'aération ne garantit pas un air intérieur pur.

Pour des concentrations de CO<sub>2</sub> inférieures à 1000 ppm, les salles de classe sans système de climatisation doivent être aérées jusqu'à trois fois par heure, selon l'activité, pour une occupation d'environ 25 personnes, ce qui peut considérablement perturber l'organisation des leçons. En conséquence, les capteurs de CO<sub>2</sub> ont été rapidement mis hors service dans certains endroits. Aérer une salle de classe trois fois par heure ne peut ni être mis en pratique lorsque les températures extérieures sont basses (inférieures ou égales à 10 degrés ⇒ grande perte de chaleur et grandes variations de la température ambiante), ni en période de canicule (air extérieur plus chaud que l'air intérieur).

Lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est faible et qu'il n'y a pas de vent, l'aération par l'ouverture des fenêtres ne permet pas d'obtenir une qualité d'air suffisante, même en ouvrant les fenêtres plusieurs fois par heure ; l'air redevient aussitôt étouffant. Même dans les bâtiments scolaires Minergie, les salles de classe ont souvent un apport d'air frais insuffisant ; dans certaines écoles, il n'est même pas possible d'ouvrir les fenêtres. Un renouvellement d'air insuffisant se traduit par une augmentation rapide de la concentration de CO<sub>2</sub>.

Déléguer la responsabilité exclusivement aux enseignants n'est pas suffisant et ne permet pas d'atteindre le but recherché, car sans moyens techniques tels que la ventilation mécanique et la purification de l'air à l'aide de filtres HEPA, il est impossible d'obtenir une bonne qualité de l'air dans des salles de classe densément occupées.

Une réduction suffisante du niveau de concentration d'aérosol et de CO<sub>2</sub> dans les écoles est indispensable pour un air intérieur pur, un apprentissage réussi et la protection des élèves et des enseignants. Des mesures concrètes pour une amélioration significative de la qualité de l'air dans les locaux scolaires sont attendues depuis longtemps.

Les communes sont responsables des bâtiments de l'école obligatoire, mais les cantons ont une part de responsabilité et ne peuvent pas laisser aux seules communes le soin de décider si et comment elles souhaitent aborder et mettre en œuvre des mesures pour améliorer la qualité de l'air.

[#ProtectTheKids](#) s'engage en faveur de l'élaboration par les cantons de directives pour une meilleure qualité de l'air dans les écoles et de la promotion de solutions appropriées et efficaces, en collaboration avec les communes.

## C.2. Ventilation mécanique

S'il n'y a pas de possibilité d'aération transversale, il est possible, dans certaines circonstances, d'obtenir un échange d'air suffisant uniquement à l'aide de ventilateurs.

Dans la région des Marches en Italie, une étude de cohorte italienne (siehe [Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools](#)) a analysé le lien entre la ventilation mécanique et la transmission du SARS-CoV-2 dans plus de 10'000 salles de classe. Pour les salles de classe équipées de conduits d'aération et de ventilateurs (ventilation mécanique), l'étude a constaté une réduction du risque relatif d'infection lorsque le taux de ventilation augmente : Un débit de l'ordre de 10 à 14 litres par seconde et par personne réduisait la probabilité d'infection des élèves de 80 % par rapport aux salles de classe aérées de manière naturelle. Chaque augmentation supplémentaire du taux de ventilation de 1 litre par seconde par personne réduisait le risque relatif d'infection de 12 à 15 %.

### C.3. Air intérieur pur et efficacité énergétique : Comment atteindre les deux objectifs?

En principe, il existe plusieurs méthodes pour obtenir une bonne qualité d'air intérieur, qui peuvent et doivent être combinées, à savoir

1. Ventilation/aération (apporter de l'air frais et évacuer l'air vicié : Augmenter la concentration en O<sub>2</sub>, réduire la concentration en CO<sub>2</sub> et diluer les aérosols) ;
2. Filtrer les aérosols (les éliminer mécaniquement de l'air recyclé à l'aide de filtres HEPA installés dans les purificateurs d'air mobiles ou dans les systèmes de ventilation) ;
3. Désactiver les aérosols infectieux (les rendre inoffensifs dans l'air recyclé au moyen d'UV-C).

Cette approche est conforme à la stratégie «De l'air propre pour des bâtiments adaptés à la pandémie» [\[Riediker-2022b\]](#) du *groupe d'experts sur les bâtiments adaptés à la pandémie* (voir le livre blanc «Clean air for pandemic-proof buildings» [\[Riediker-2022c\]](#)) – en particulier avec la phase 1 («Introduire et accompagner des mesures temporaires pour un air propre») de cette stratégie.

La CDC, l'agence américaine pour la santé publique, citée dans [«Reducing SARS-CoV-2 in Shared Indoor Air»](#), préconise également la combinaison de ces méthodes.

Les trois méthodes réduisent la concentration d'aérosols dangereux pour la santé dans l'air intérieur partagé. Selon le rapport [«Mask Use and Ventilation Improvements to Reduce COVID-19 Incidence in Elementary Schools»](#) dans une étude portant sur 169 écoles primaires de l'État de Géorgie (États-Unis), l'incidence de COVID-19 était inférieure de 35 % par rapport aux 39 écoles utilisant uniquement l'aération et inférieure de 48 % par rapport aux 31 écoles combinant aération et filtration de l'air.

À l'aide d'un modèle de simulation pour une salle de classe/conférence, il a été démontré dans l'article [«Efficacy of portable air cleaners and masking for reducing indoor exposure to simulated exhaled SARS-CoV-2 aerosols – United States, 2021»](#) que la filtration avec deux purificateurs d'air mobiles HEPA réduisait de 65 % l'exposition des personnes présentes aux particules d'une personne infectée, et de 90 % en combinaison avec le port de masques. Les masques FFP2 ou FFP3 filtrent également les aérosols – avec l'avantage que les particules infectieuses sont déjà en grande partie éliminées à la source.

Si, pour des raisons énergétiques, la ventilation contient de l'air recyclé, celui-ci doit être filtré avec des filtres HEPA ou désinfecté avec des rayons UV-C avant d'être introduit dans la salle. Nous nous concentrons ici sur les méthodes 1 et 2.

Aérer plusieurs fois par heure est devenu la norme dans certains endroits au cours de la pandémie. Mais pendant les périodes de chauffage et de canicule, l'efficacité énergétique est également un critère extrêmement important.

Les purificateur d'air HEPA (voir **Annexe B: Purificateurs d'air mobile pour les écoles et les structures d'accueil**) ou les systèmes de ventilation munis de filtres HEPA éliminent de l'air intérieur les aérosols potentiellement chargés de virus. La filtration HEPA est particulièrement importante pour maintenir une bonne qualité de l'air pendant la saison froide, lorsque l'aération est souvent réduite, et elle est indispensable pour l'air recyclé. L'air intérieur qui est renouvelé avec suffisamment de changements d'air réduisant les aérosols par unité de temps ne présente aucun risque pour la santé, même s'il présente une concentration en CO<sub>2</sub> plus élevée que l'air extérieur jusqu'à une valeur indicative d'environ 1400 ppm.

Les purificateurs d'air mobiles sont particulièrement adaptés aux locaux qui ne disposent pas de système de ventilation. Par ailleurs, ils permettent de trouver une solution transitoire économique et rapide dans les locaux dotés d'un système de climatisation qui ne pourra être équipé de filtres HEPA que lors de travaux de rénovation. Pour les nouvelles constructions et les rénovations, il est recommandé d'équiper les systèmes de ventilation de filtres HEPA de classe 13 ou 14.

## C.4. Des méthodes efficaces pour améliorer l'air intérieur

Les aérosols sont éliminés de l'air intérieur à la fois par la ventilation et par la filtration HEPA. Les débits de la ventilation ( $Q_{\text{ventilation}}$ ) et de la filtration ( $Q_{\text{filtration}}$ ), mesurés en mètres cubes par heure, contribuent donc tous deux à la réduction des aérosols.

La ventilation et la filtration entraînent normalement une *dilution des aérosols* en mélangeant l'air introduit avec le reste de l'air intérieur (c'est-à-dire, une aération diluante ou mixante : [Verdünnungslüftung oder Mischlüftung](#)). Pour déterminer la vitesse de dilution des aérosols, il est utile de considérer les débits volumiques par rapport au volume de la pièce  $V$ . On utilise pour cela des *taux de renouvellement d'air* ou *Air Change Rates*

$$ACR_{\text{ventilation}} = Q_{\text{ventilation}} / V$$

$$ACR_{\text{filtration}} = Q_{\text{filtration}} / V$$

avec l'unité "changement d'air par heure". La vitesse à laquelle les aérosols sont dilués est déterminée par le taux de renouvellement d'air réduisant les aérosols [\[Riediker-2020\]](#)

$$ACR_{\text{aerosol}} = ACR_{\text{ventilation}} + ACR_{\text{filtration}}$$

En présence d'une personne infectée qui émet des virus en continu à un taux  $R_v$  (nombre de virions par heure), une aération mixante à un taux de renouvellement d'air  $ACR_{\text{aerosol}}$  donnera une concentration d'aérosols en virions par  $m^3$  de

$$c_{\text{aerosol}} = R_v / (V \times ACR_{\text{aerosol}})$$

à l'état stationnaire, qui s'établit lorsque l'émission des virions et les renouvellements d'air sont en équilibre.

*La ventilation et la filtration sont donc avantageusement combinées pour réduire la concentration d'aérosols.* Ceci vaut indépendamment du fait que la concentration de  $CO_2$  ne peut être réduite que par la ventilation. Il vaut en particulier pour les bâtiments scolaires Minergie et, de manière générale, pour les salles de classe équipées d'un système de climatisation utilisant un pourcentage d'air recyclé pour améliorer l'efficacité énergétique. L'expérience des événements de superspreading lors de la pandémie montre la nécessité de purifier l'air recyclé par filtration HEPA avant de l'introduire dans la salle de classe [\[Riediker-2022b\]](#).

Pour des salles de classes d'une taille standard (Surface 72  $m^2$ , Volume env. 200  $m^3$ ) composée de 25 élèves un taux de renouvellement de l'air  $ACR_{\text{aerosol}}$  de 5 à 6 changements d'air par heure [\[Riediker-2022c\]](#) est recommandé afin d'éliminer et diluer efficacement les aérosols respiratoires.

En combinant la ventilation et la filtration, les changements d'air dus à la ventilation peuvent être remplacés, jusqu'à un certain point, par des changements d'air dus à la filtration. En effet, tant que la concentration de  $CO_2$  reste dans une gamme moyenne acceptable, inférieure à environ 1400 ppm, l' $ACR_{\text{ventilation}}$  peut être réduite et l' $ACR_{\text{filtration}}$  augmentée sans affecter la concentration d'aérosols.

L'exemple suivant montre qu'en combinant ventilation et filtration avec une ventilation réduite de 33 % et une filtration appropriée, il est possible d'atteindre une concentration d'aérosols plus basse par rapport à la ventilation seule, tout en améliorant le bilan énergétique.

Comme le montre la figure 1 pour la *ventilation aspirante au plafond* (VAP) [MPIC-2022], en fonction de la température extérieure, la combinaison avec la filtration permet de réaliser des économies d'énergie thermique considérables par salle de classe. La plus grande pente des courbes dans la plage de 9 à 15 degrés Celsius est due au fait que la limite de chauffage (la température extérieure qui nécessite l'activation du chauffage) est nettement plus basse lorsque le débit volumique de ventilation est réduit de 33 %.

Par exemple, la courbe rouge (ventilation mécanique performante de 1200 m<sup>3</sup>/heure) décline plus fortement pour des températures entre 12 et 15 degrés, car en réduisant le débit de ventilation de 33 %, le chauffage ne doit être mis en marche qu'à une température extérieure de 12 degrés, ce qui signifie que la limite de chauffage se déplace de 3 degrés vers le bas.

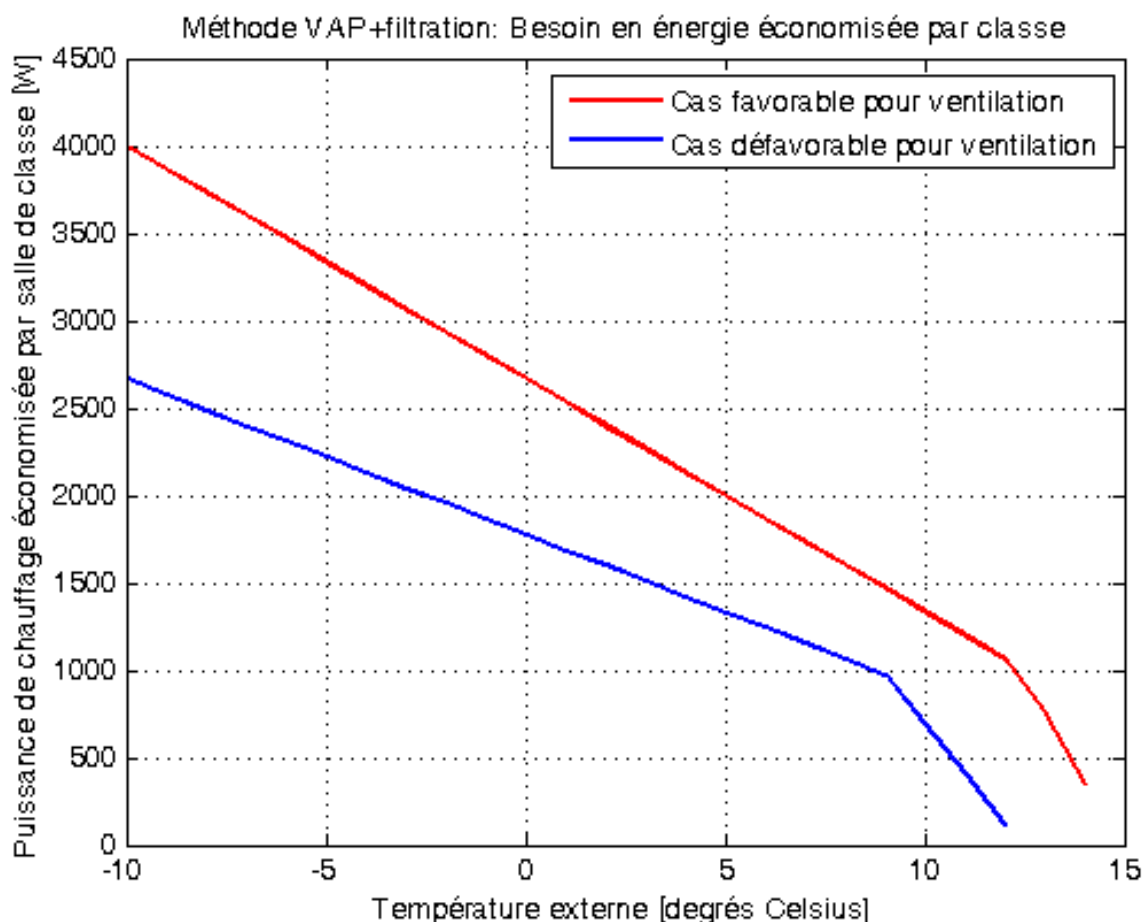


Figure 1: Puissance de chauffage économisée par salle de classe pour la ventilation aspirante au plafond (VAP) en combinaison avec la filtration (purificateurs d'air mobiles).

Pour la filtration, trois purificateurs d'air mobiles sont utilisés qui fonctionnent à 50 % de la vitesse maximale et atteignent ainsi un  $CADR_{total}$  (*total Clean Air Delivery Rate*) effectif de 800 m<sup>3</sup>/heures. La puissance totale consommée par les trois purificateurs d'air (environ 60 watts à vitesse moyenne) est négligeable par rapport à la puissance de chauffage économisée.

Le tableau 1 montre deux méthodes de ventilation différentes, la *ventilation par fenêtres basculantes* (VFB) et la *ventilation aspirante au plafond* (VAP) [MPIC-2022] tout d'abord sans filtration, puis combinées avec la filtration à l'aide de purificateurs d'air. Dans les variantes combinées, le débit de ventilation est réduit de 33 %.

Méthode	Débit (volume)		Air Change Rate (ACR)		C <sub>CO2</sub> dans l'air intérieur	Dose de virus inhalée par jour d'école		Besoin en énergie économisé / salle de classe T <sub>a</sub> = 2 °C
	m <sup>3</sup> /h		Changements d'air par heure			# Particules / Jour d'école	Watt	
	Ventilation	Filtration	CO <sub>2</sub>	Aérosol	Émission très élevée			Émission élevée (fréquent)
VFB	490	0	2.45	2.45	1338	1100	26	0 (Ref.)
	920	0	4.60	4.60	909	750	19	0 (Ref.)
VFB+ Filtration	347	800	1.73	5.73	1718	650	16	765
	633	800	3.17	7.17	1131	550	14	1720
VAP	860	0	4.30	4.30	943	800	20	0 (Ref.)
	1260	0	6.30	6.30	777	600	15	0 (Ref.)
VAP+ Filtration	593	800	2.97	6.97	1178	550	14	1600
	860	800	4.30	8.30	943	500	13	2400

Tableau 1: Aperçu des méthodes analysées pour la qualité de l'air (voir description dans le texte), avec efficacité concernant la réduction du CO<sub>2</sub> et des aérosols (dose de virus inhalée) et indication de l'énergie économisée pour la chaleur. Chaque méthode/combo a été analysée pour deux cas :

1. Cas défavorable avec moins de ventilation (ligne supérieure)
2. Cas favorable avec plus de ventilation (ligne inférieure)

Les calculs pour le tableau 1 ont été effectués de manière analogue à [\[MPIC-2022\]](#) à la fois pour la *ventilation par fenêtres basculantes* (VFB), pour la *ventilation aspirante au plafond* (VAP) et pour leur combinaison avec la filtration. La production de chaleur des personnes présentes a été prise en compte.

À noter que les [effets de ventilation par déplacement \(Quellluft-Effekte\)](#) peuvent légèrement réduire la charge polluante [\[MPIC-2022\]](#), mais ils ne sont pris en compte dans aucune méthode, car ces effets dépendent des particularités de l'espace et ne se manifestent que dans des conditions favorables.

Les personnes infectées sont porteuses d'un nombre variable de virus. De plus, certaines personnes émettent plus d'aérosols que d'autres. Il en résulte de grandes différences dans l'émission (libération) de virions. On parle donc de niveaux d'émission différents. Le virus du SARS-CoV-2 se caractérise par une très grande production de virus [\[Riediker-2022a\]](#). Avec Omicron, environ 50 % à 75 % des personnes infectées émettent des charges élevées, et 20 % à 30 % une charge très élevée. La charge virale correspond au nombre de copies d'ARN viral détectées par les tests PCR. Avec Omicron, une dose supérieure à 100 copies de virus présente un risque réaliste d'infection.

La dose de virus inhalée a été mesurée à l'aide du simulateur de scénarios d'intérieur [\[SCOEH-2021\]](#), développé par le *Centre suisse de santé au travail et de l'environnement* (SCOEH), pour une journée d'école à 5 périodes de 45 minutes, durant lesquelles la ventilation/filtration reste activée durant les pauses. Veuillez consulter les paramètres ci-dessous pour un émetteur de virus et des personnes exposées.

Comme le montre le tableau 1, la combinaison de purificateurs d'air mobiles et d'une ventilation mécanique permet de mettre en place des solutions flexibles, rapides et durables qui, tout en maintenant des niveaux de CO<sub>2</sub> acceptables, réduisent davantage les aérosols que les solutions basées uniquement sur la ventilation, tout en présentant un meilleur bilan énergétique.

Des directives en matière de qualité de l'air pour les aérosols et le CO<sub>2</sub> doivent être intégrées dans les ordonnances cantonales sur l'école obligatoire dans le but d'améliorer durablement la qualité de l'air dans les classes grâce à la filtration HEPA et aux installations de ventilation mécanique, notamment lors de la construction de bâtiments scolaires ou de la rénovation de salles de classe.

### Méthodes

- VFB : Ventilation par fenêtres basculantes [MPIC-2022]
- VAP : Ventilation aspirante au plafond [MPIC-2022]
- Filtration : Avec des purificateurs d'air mobiles

### Paramètres utilisés

- Salle de classe 200 m<sup>3</sup>, enseignant/e et 24 élèves (≥ 10 ans).
- Filtres : 3 purificateurs d'air mobiles, qui atteignent à 50 % de la vitesse maximale un CADR<sub>total</sub> (Clean Air Delivery Rate) effectif de 800 m<sup>3</sup>/heure, avec une consommation totale d'environ 60 watts.
- Émetteurs de virus (Paramètre pour le simulateur de scénarios d'intérieur [SCOEH-2021])
  - Émission : 'élevée' ainsi que 'très élevée'
  - Pas de masque
  - Activités : calme (90 %), léger (10 %)
  - Volume : calme (50 %), normal (40 %), fort (10 %)
- Personnes exposées (Paramètre pour le simulateur de scénarios ... [SCOEH-2021])
  - Absence de masques

### Sources

[MPIC-2022] Helleis F, Klimach T, Pöschl U, *Vergleich verschiedener Lüftungsmethoden gegen die Aerosolübertragung von COVID-19 und für erhöhte Luftqualität in Klassenräumen: Fensterlüften, Abluftventilatoren, Raumlufttechnik und Luftreiniger*. 11.02.2022, Max-Planck-Institut für Chemie, <https://zenodo.org/record/6049289#YsnPL3YzY2w>.

[Riediker-2020] Cruz M, Riediker M et al., *Guide for ventilation towards healthy classrooms*. Dec. 2020, [https://scoeh.ch/wp-content/uploads/2021/01/Guide-for-ventilation\\_Indairpollnet.pdf](https://scoeh.ch/wp-content/uploads/2021/01/Guide-for-ventilation_Indairpollnet.pdf).

[Riediker-2022a] Riediker M et al., *Higher viral load and infectivity increase risk of aerosol transmission for Delta and Omicron variants of SARS-CoV-2*. 06.01.2022, <https://doi.org/10.4414/smw.2022.w30133>.

[Riediker-2022b] Riediker M et al., *De l'air propre pour des bâtiments adaptés à la pandémie*. Une stratégie présentée par le groupe d'experts sur les «bâtiments adaptés aux pandémies» sous la forme d'un livre blanc. 21.06.2022, <https://scoeh.ch/fr/de-lair-propre-pour-des-batiments-adaptes-a-la-pandemie/>.

[Riediker-2022c] Riediker M et al., *Clean air for pandemic-proof buildings*. A strategy presented by the expert group on «Pandemic-proof buildings». June 2022, [https://scoeh.ch/wp-content/uploads/2022/06/2022-06-21b\\_Clean\\_air\\_for\\_pandemic-proof\\_buildings.pdf](https://scoeh.ch/wp-content/uploads/2022/06/2022-06-21b_Clean_air_for_pandemic-proof_buildings.pdf).

[SCOEH-2021] Riediker M, *Viren-Tool zur Berechnung der Virendosis und des CO<sub>2</sub> in Räumen*, v2.2.3, Aug. 2021. Schweizerische Zentrum für Arbeits- und Umweltgesundheit, <https://scoeh.ch/de/tools/>.

[Umwelt-BA-2008] *Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft: Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden*. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid\\_2008.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf).