



HAL
open science

Covid-19 et transmission par aérosols: état des lieux

Pierre Le Cann, France Wallet

► **To cite this version:**

Pierre Le Cann, France Wallet. Covid-19 et transmission par aérosols: état des lieux. Environnement, Risques & Santé, 2021, 20 (3), pp.290-294. 10.1684/ERS.2021.1557 . hal-03312408

HAL Id: hal-03312408

<https://hal.ehesp.fr/hal-03312408>

Submitted on 28 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Covid-19 et transmission par aérosols : état des lieux

PIERRE LE CANN¹
FRANCE WALLET²

¹ Univ Rennes, Inserm, EHESP, Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail) - UMR_S 1085
Avenue du Pr Léon Bernard
35043 Rennes
France
<pierre.lecann@ehesp.fr>

² EDF
Service des études médicales
4, rue Floréal
75017 Paris
France
<france.wallet@edf.fr>

Tirés à part :
F. Wallet

Résumé. Le SARS-CoV-2, agent de la maladie appelée Covid-19, est apparu en Chine à la fin de l'année 2019. La transmission du virus se fait principalement *via* l'air à partir de gouttelettes ou microgouttelettes émises par des personnes infectées symptomatiques (*via* la toux ou l'éternuement ou lors de procédures de soins générant des aérosols) ou non symptomatiques (*via* la respiration ou la parole).

Cet article fait le point sur les connaissances actuelles concernant les tailles de gouttelettes émises, la quantité de particules virales potentiellement émises, les paramètres influant les conditions de transport et de survie de ces particules virales, incluant les conditions atmosphériques, et l'impact sur le développement de la maladie. Il aborde également les paramètres de l'évaluation des risques et les recommandations en termes de ventilation des espaces intérieurs.

Mots clés : Covid-19 ; transmission ; ventilation ; survie cellulaire.

Abstract

Aerosol transmission and COVID-19: overview

SARS-CoV2, the agent of the disease known as COVID-19, appeared in China at the end of 2019. The virus is transmitted primarily through the air in droplets or microdroplets emitted by symptomatic (through coughing or sneezing or during aerosol-generating procedures) or asymptomatic (through breathing or speaking) infected persons.

This article reviews the current knowledge about the sizes of droplets emitted, the quantity of viral particles potentially emitted, the parameters influencing the conditions of transport and survival of these viral particles, including atmospheric conditions, and the impact on the development of the disease. It also discusses the parameters of risk assessment and recommendations for ventilation of indoor spaces.

Key words: Covid-19; transmission; ventilation; cell survival.

Le coronavirus SARS-CoV-2, agent de la maladie appelée Covid-19 (*CO*rona*V*irus *D*isease-19), est apparu en Chine à la fin de l'année 2019. Il a contaminé plus de 100 millions de personnes à travers le monde en un an [1]. Les modes de transmission du virus ont fait l'objet de nombreux travaux parfois contradictoires. La transmission se fait principalement de personne à personne par contact direct de proximité ou à distance par voie aérienne (gouttelettes ou aérosols) et par des mains contaminées portées au visage. L'objet de cet article est de faire le point sur les connaissances actuelles au sujet de la transmission aérienne du SARS-CoV-2 et

en particulier sur la persistance du virus dans l'air.

Des gouttelettes et des aérosols

Il est généralement admis que plusieurs conditions doivent être remplies pour qu'il y ait transmission naturelle par voie aérienne d'un virus d'origine respiratoire humaine [2] :

– un individu infecté doit être capable de produire des gouttelettes ou micro-

Article reçu le 6 janvier 2021,
accepté le 17 février 2021

Pour citer cet article : Le Cann P, Wallet F. Covid-19 et transmission par aérosols : état des lieux. *Environ Risque Sante* 2021 ; 20 : 290-294. doi : 10.1684/ers.2021.1557

doi : 10.1684/ers.2021.1557

gouttelettes (aérosols) contenant des virus viables ;

- le virus, présent dans les particules en suspension dans l'air (microgouttelettes et résidus secs, issus de l'évaporation des gouttelettes), doit rester viable suffisamment longtemps pour entrer en contact avec un individu sensible ;
- le virus doit être transporté jusqu'à un individu sensible ;
- à des concentrations suffisamment élevées pour être infectieux.

En termes de pénétration dans l'appareil respiratoire en fonction de la taille des particules, on considère que les particules infectieuses de la gamme $< 5 \mu\text{m}$ (désignées aérosols) peuvent pénétrer dans les voies respiratoires profondes jusqu'aux alvéoles pulmonaires où elles peuvent être à l'origine d'infections si les micro-organismes échappent au système immunitaire. Les particules $< 10 \mu\text{m}$ peuvent pénétrer au-delà de la glotte ; tandis que les grosses gouttelettes de diamètre $> 20 \mu\text{m}$ sont décrites comme suivant « une trajectoire plus balistique » (c'est-à-dire qu'elles tombent principalement sous l'influence de la gravité), et sont trop grosses pour être inhalées. Très tôt lorsque l'épidémie s'est développée en Chine dans la ville de Wuhan, les aérosols émis par les personnes infectées ont été suspectés par le fait que les personnes asymptomatiques semblaient contagieuses. Or, on sait que les personnes asymptomatiques ne produisent pas (ou peu) de grosses gouttelettes (qui sont surtout émises par les éternuements et la toux), mais plutôt des microgouttelettes (aérosols) émises par la respiration et la parole.

La majorité des études sur la transmission par aérosols (par méthodes moléculaires) a été réalisée à l'hôpital, au vu du nombre important de personnels de santé atteints de la maladie, du nombre de malades et des procédures de soins générant des aérosols [3]. Les professionnels de santé ont été particulièrement touchés par le SARS-CoV-2. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime qu'environ 14 % des cas de Covid-19 déclarés concernent des agents de santé alors qu'ils ne représentent que 3 % de la population. Il a également été constaté que ceux qui effectuent des procédures de soins générant des aérosols ont été les plus touchés. Une étude de Tran *et al.* [4] avait déjà montré que, par rapport aux personnels soignants qui n'ont pas effectué des techniques génératrices d'aérosols, ceux qui ont effectué une intubation trachéale présentaient un risque accru de contracter le SARS-CoV lors de l'épidémie de 2003 (*odds ratio* : 6,6), par rapport à ceux qui ont pratiqué une ventilation non invasive (*odds ratio* : 3,1), une trachéotomie (*odds ratio* : 4,2), et une ventilation manuelle avant l'intubation (*odds ratio* : 2,8).

En milieu hospitalier, de l'ARN du SARS-CoV-2 a été détecté dans l'air des chambres de patients atteints de Covid-19 et à proximité dans les couloirs [5]. Les auteurs notent que les données suggèrent que les particules de l'aérosol viral sont produites par des personnes malades, même en l'absence de toux, par la parole ou la respiration.

Le taux d'émission de particules lors de la parole normale est positivement corrélé à l'intensité sonore (amplitude) de la vocalisation, allant d'environ 1 à 50 particules par seconde (0,06 à 3 particules par cm^3) pour des amplitudes faibles à élevées, quelle que soit la langue parlée [6].

Une autre étude hospitalière soulève des questions sur la remise en suspension du SARS-CoV-2 sous forme d'aérosols provenant de surfaces contaminées par des gouttelettes. Cette inquiétude se fonde sur des données de mesure associées à l'enlèvement des équipements de protection individuelle, au nettoyage des sols, et au déplacement du personnel [7]. L'étude a également révélé la présence de SARS-CoV-2 dans l'air des zones extérieures à l'entrée de l'hôpital et devant un grand magasin. Les auteurs concluent qu'il est possible que des personnes asymptomatiques dans ces zones aient contribué à ces résultats.

Au cours de l'épidémie de SARS de 2003, une augmentation de risque d'infection par le SARS-CoV-1 pour les résidents aux étages supérieurs d'un bâtiment suggérait le rôle des aérosols provenant d'un individu infecté vivant à un étage inférieur [8].

De plus en plus de données tendent à montrer une possible transmission du SARS-CoV-2 *via* des microgouttelettes émises par des personnes symptomatiques ou asymptomatiques, en plus des gouttelettes émises lors de la toux ou des éternuements. Deux études sont particulièrement citées et font consensus pour expliciter une contamination par voie aérosol. La première relate un cas groupé dans un restaurant à partir d'un cas index et des cas contacts situés sur la même table mais aussi sur les tables adjacentes suggérant une contamination par aérosol favorisée par le flux d'air de la climatisation du restaurant [9]. La deuxième a analysé une épidémie impliquant deux groupes de voyageurs qui ont pris deux bus séparés [10]. Alors qu'aucune transmission ne s'est produite parmi les 60 personnes dans le bus 1, 23 passagers sur 68 du bus 2 ont été infectés, dont certains étaient assis à une distance de 5 m du cas index. Sept autres participants qui ne voyageaient pas dans les bus ont été infectés, et tous ont déclaré avoir été en contact étroit avec le cas index en extérieur. Comme la proximité de la source n'était pas corrélée avec le risque d'infection dans le bus, mais que les sièges près des fenêtres et des portes semblaient être protecteurs, les auteurs ont émis l'hypothèse que l'environnement fermé du bus 2 et la recirculation de l'air expliquaient la transmission par voie aérienne. Il faut préciser que les passagers ne portaient pas de masque. Selon Zhang *et al.* [11], les politiques de port de masque mais non de distanciation sociale (quarantaine, maintien à domicile et confinement) ont été efficaces pour réduire les épidémies de Covid-19, ce qui suggérerait une voie de transmission aérienne du virus SARS-CoV-2 en espace clos.

Dans ce contexte, le port du masque combiné aux mesures barrières semble important à respecter pour limiter la propagation du virus.

Transport et survie

Une étude réalisée en laboratoire [12], sur la capacité de survie du SARS-CoV-2 a conclu que le virus peut rester viable sous forme d'aérosols pendant toute la durée de l'expérimentation (trois heures), avec un titre infectieux en culture cellulaire diminuant d'environ 6 fois au cours de cette période. Van Doremalen note également que les demi-vies du SARS-CoV-2 et du SARS-CoV-1 sont similaires dans les aérosols, avec des estimations médianes d'environ 1,1 à 1,2 heure, et avec des intervalles de confiance à 95 % de 0,64 à 2,64 pour le SARS-CoV-2 et de 0,78 à 2,43 pour le SARS-CoV-1. Cependant, il faut préciser que cette étude a été réalisée en conditions de laboratoire par génération expérimentale d'un aérosol de particules virales de diamètre aérodynamique inférieur à 5 µm.

De nombreux travaux (notamment un article de synthèse datant de 2006), [13] ont montré que les particules de diamètres 1-3 µm restaient en suspension presque indéfiniment dans l'air, que celles de 10 µm mettaient 17 minutes pour tomber au sol, celles de 20 µm 4 minutes, et celles de 100 µm 10 secondes.

Une étude récente s'est intéressée à l'émission et au transport de pathogènes dans l'air [14]. Les expirations, les éternuements et la toux ne se composent pas seulement de gouttelettes mucosales suivant des trajectoires d'émission semi-balistique à courte distance, mais elles sont surtout principalement constituées d'un nuage de gaz turbulent qui entraîne l'air ambiant, piège et transporte des grappes de gouttelettes de taille hétérogène. Le nuage de gaz humide local et l'atmosphère chaude au sein du nuage permettent de diminuer l'effet de l'évaporation pendant beaucoup plus longtemps que ce qui se produit pour des gouttelettes isolées. Dans ces conditions, la durée de vie d'une gouttelette pourrait être considérablement étendue, passant d'une fraction de seconde à quelques minutes. Bourouiba montre que les agents pathogènes présents dans les microgouttelettes émises par les personnes peuvent voyager jusqu'à 7 à 8 mètres, en fonction de la taille des gouttelettes, de la vitesse d'éjection, des conditions de déplacement d'air (ventilation, vent, etc.), de l'humidité, et de la température.

Dbouk et Drikakis [15] ont montré que, lorsqu'une personne tousse, la vitesse du vent dans un environnement ouvert influence de manière significative la distance parcourue par les gouttelettes contaminées transmises par l'air. En absence de vent, les gouttelettes tomberont au sol à courte distance (moins d'un mètre) de la personne qui expire ou qui tousse. Un nombre infime de particules peut se déplacer un peu plus loin. Néanmoins, leur trajectoire au-delà de 1 m sera déjà à une hauteur nettement inférieure à 50 cm en descendant vers le sol. Ainsi, ces gouttelettes peuvent ne pas constituer un risque concernant le contact facial des adultes à cette distance. À des vitesses de vent de 4 km/h à

15 km/h, les gouttelettes émises peuvent parcourir des distances jusqu'à 6 m avec une diminution en concentration et taille des gouttelettes dans la direction du vent. L'humidité relative et la température influent, entre autres, sur cette distance.

Les données sur la relation entre conditions climatiques et transmissions du virus sont contradictoires. Selon une étude réalisée à partir des données de 166 pays, Wu *et al.* [16], notent qu'une augmentation de 1 °C de la température a été associée à une réduction de 3,08 % (IC 95 % : 1,53 %-4,63 %) des nouveaux cas quotidiens de SARS-CoV-2 et à une réduction de 1,19 % (IC 95 % : 0,44 %-1,95 %) des nouveaux décès quotidiens. Une augmentation de 1 % de l'humidité relative a été associée à une réduction de 0,85 % (IC 95 % : 0,51 %-1,19 %) des nouveaux cas quotidiens et à une réduction de 0,51 % (IC 95 % : 0,34 %-0,67 %) des nouveaux décès quotidiens. D'autres études montrent également des relations [17] peu convaincantes. Récemment, Medjoubi *et al.* [18] ont noté une corrélation négative entre la température ambiante observée précédemment et les indicateurs de gravité de Covid-19, qui pourrait expliquer en partie les écarts de mortalité entre et au sein des pays.

Selon une enquête réalisée sous l'égide de l'Académie de médecine, « l'indice de diffusion (cas autochtones / population de référence) de 2,67 en Europe pour une température moyenne de 11,2 °C, s'abaisse à 0,03 en Afrique subsaharienne où la température moyenne s'élève à 34,8 °C. [Cela confirme] les observations selon lesquelles les climats chauds ont un effet réducteur sur la transmission de SARS-CoV-2 et [conforte] l'hypothèse d'une influence saisonnière du climat sur l'épidémiologie de la Covid-19 dans les pays tempérés » [19].

Notons également le rôle des UV dans la diminution de la charge infectieuse présente dans l'air.

Risque de transmission : de l'air à l'infection...

Stadnytskyi *et al.* [20] notent que, même si les plus petites gouttelettes restent effectivement en suspension dans l'air indéfiniment et ont des demi-vies influencées par le taux de ventilation, à une charge virale salivaire de 7×10^6 copies par millilitre, la probabilité qu'une gouttelette de 1 µm (avec une taille originale hydratée de 3 µm) contienne un virion est seulement de 0,01 %. Contrairement aux plus grosses gouttes, la probabilité qu'une gouttelette de 50 µm de diamètre, avant déshydratation, contienne au moins un virion est de ~37 %, démontrant le risque de transmission privilégié par contact proche, et donc l'importance des mesures de distanciation physique. Dans le même sens, une étude de modélisation sur les émissions d'aérosols viraux a estimé qu'un individu ayant une charge virale élevée n'émettait que des quantités modestes de virus en respirant

régulièrement (1 248 copies/m³) par rapport à la toux (7,44 millions de copies/m³) [21]. Il est donc probable que seuls quelques individus ayant une charge virale élevée posent un risque.

Même si Birgand [3] qualifie le SARS-CoV-2 de pathogène respiratoire à transmission « gouttelettes » mais « air » opportuniste, notamment dans les situations de hautes densités virales, la dichotomie aérosols/gouttelettes n'est pourtant que théorique et ne reflète pas la complexité de la réalité. Quelle que soit la taille des gouttelettes émises, il semble que la première phase de la maladie soit nasale, sans que les gouttelettes n'aient la nécessité d'aller loin dans l'appareil respiratoire. Le virus SARS-CoV-2 est capable de se multiplier massivement dans l'épithélium nasal. En cela, il est proche des coronavirus responsables des rhumes. Des études récentes semblent montrer que le SARS-CoV-2 se multiplie massivement dans les cellules ciliées de l'épithélium nasal (cellules FOXJ1) et, à un moindre degré, dans celles de l'épithélium des amygdales, des bronches et des bronchioles [22-24]. La structure particulière du SARS-CoV-2 lui permet de se multiplier préférentiellement dans le nez et la gorge, avec 1 000 fois plus de virus chez les patients que ce qui avait pu être observé avec le SARS-CoV-1. De plus, lors de la Covid-19, le pic nasal de réplication virale est observé au 4^e jour après le début de l'infection, contre 7 à 10 jours lors du SARS (où le virus commence par infecter les poumons).

La charge infectieuse semble également jouer un rôle dans la réponse de l'hôte infecté. En effet, la réaction immunitaire innée semble varier selon la charge infectieuse [25]. Les auteurs montrent qu'un faible ratio « *particules infectantes de SARS-CoV-2/cellules cibles* » stimule fortement et rapidement la réponse immunitaire de l'épithélium nasal. Par contre, un ratio plus élevé déclenche une inhibition de cette réponse pendant 24 à 48 heures sans pour autant la bloquer complètement. Cela pourrait expliquer, en partie, la sévérité d'un épisode de Covid-19, et le temps de latence épidémiologique avant un emballement de la maladie.

Et la ventilation dans tout cela ?

Les systèmes de ventilation naturelle ou de ventilation mécanique simple flux évacuent l'air intérieur par des conduits vers les toits. Des ouvertures au-dessus des fenêtres permettent l'arrivée d'air frais. C'est ce que l'on observe le plus fréquemment dans les logements. Ces systèmes sont adaptés pour renouveler de faibles volumes d'air. Par contre, les bâtiments collectifs de type tertiaire, avec des locaux de gros volume, sont équipés de centrales de traitement d'air. Ces installations renouvel-

lent l'air et en utilisent une partie pour la recycler après traitement (filtration, chauffage, rafraîchissement). Si la transmission de virus aérosolisés via la recirculation d'air des systèmes de ventilation/climatisation semble peu probable, elle ne peut être écartée [26]. L'Association des ingénieurs et techniciens en climatique, ventilation et froid (AICVF) recommande de limiter au maximum cette recirculation d'air car l'efficacité des filtres de ventilation générale pour retenir les virus est discutée [27]. Le rapport du Haut Conseil de la santé publique (HCSP) préconise également « *de veiller à respecter les règles de conception, de réalisation et de maintenance régulière* » [28, 29].

Dans tous les cas, même si le rôle de ces systèmes avec recirculation d'air dans la propagation du SARS-CoV-2 n'est pas avéré, et même en présence de ventilation mécanique ou de centrales de traitement d'air, il est recommandé, si cela est possible, d'ouvrir régulièrement les fenêtres pendant quelques minutes.

Jones *et al.* [30] proposent un tableau d'évaluation qualitative du risque qui prend en compte les paramètres d'occupation et de ventilation de la pièce, le risque d'émission d'aérosols, ainsi que le port du masque barrière anti-projections. La densité de particules virales n'est pas prise en compte de manière explicite mais se retrouve à la fois dans les paramètres d'émission et dans les paramètres de densité d'occupation, deux situations correspondant potentiellement à des événements super-propagateurs.

Recommandations

La qualité de l'air est un facteur important dans le développement de maladies infectieuses par le biais d'éléments permettant le transport et la survie de particules virales dans l'air, ou dans la gravité de l'infection par le biais de la fragilisation des voies respiratoires et des défenses immunitaires. La prévention des facteurs d'aggravation de la maladie, comme les facteurs de comorbidité ou la pollution atmosphérique, ne peut que protéger les personnes exposées au virus. Il est important également d'être attentif à la qualité de l'air des environnements intérieurs par une aération régulière et un usage et un entretien appropriés des systèmes de climatisation et de ventilation. ■

Remerciements et autres mentions

Financement : aucun ; **liens d'intérêts** : les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

1. WHO. *Coronavirus disease (COVID-19) pandemic*. WHO, 2020. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019>
2. Tang JW. Investigating the airborne transmission pathway – different approaches with the same objectives. *Indoor Air* 2015 ; 25 : 119-24.
3. Birgand G, Peiffer-Smadja N, Fournier S, Kerneis S, Lescure F-X, Lucet J-C. Airborne contamination of Covid-19 in hospitals: a scoping review of the current evidence. *medRxiv* 2021. Online ahead of print.
4. Tran K, Cimon K, Severn M, Pessoa-Silva CL, Conly J. Aerosol generating procedures and risk of transmission of acute respiratory infections to healthcare workers: a systematic review. *PLoS One* 2012 ; 7 : e35797.
5. Santarpia JL, Rivera DN, Herrera VL, et al. Aerosol and surface contamination of SARS-CoV-2 observed in quarantine and isolation care. *Sci Rep* 2020 ; 10 : 13892.
6. HCSP. *Avis relatif au risque résiduel de transmission du SARS-CoV-2 sous forme d'aérosol, en milieu de soin, dans les autres environnements intérieurs, ainsi que dans l'environnement extérieur, avis 8 avril 2020 et SARS-CoV-2 : actualisation des connaissances sur la transmission du virus par aérosol*. HCSP, 2020.
7. Liu Y, Ning Z, Chen Y, et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature* 2020 ; 582 : 557-60.
8. Yu IT, Li Y, Wong TW, et al. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. *N Engl J Med* 2004 ; 350 : 1731-9.
9. Lu J, Gu J, Li K, et al. Covid-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerg Infect Dis* 2020 ; 26 : 1628-31.
10. Shen Y, Li C, Dong H, et al. Community outbreak investigation of SARS-CoV-2 transmission among bus riders in Eastern China. *JAMA Intern Med* 2020 ; 180 (12) : 1665-71.
11. Zhang R, Li Y, Zhang AL, Wang Y, Molina MJ. Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of Covid-19. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2020 ; 117 : 14857-63.
12. van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *N Engl J Med* 2020 ; 382 : 1564-7.
13. Tang JW, Li Y, Eames I, Chan PK, Ridgway GL. Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises. *J Hosp Infect* 2006 ; 64 : 100-14.
14. Bourouiba L. Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: potential implications for reducing transmission of Covid-19. *JAMA* 2020 ; 323 : 1837-8.
15. Dbouk T, Drikakis D. On coughing and airborne droplet transmission to humans. *Phys Fluids* 2020 ; 32 : 53310.
16. Wu Y, Jing W, Liu J, et al. Effects of temperature and humidity on the daily new cases and new deaths of Covid-19 in 166 countries. *Sci Total Environ* 2020 ; 729 : 139051.
17. Wang M, Jiang A, Gong L, et al. Temperature significant change Covid-19 transmission in 429 cities. *medRxiv* 2021. Online ahead of print.
18. Mejdoubi M, Kyndt X, Djennaoui M. ICU admissions and in-hospital deaths linked to Covid-19 in the Paris region are correlated with previously observed ambient temperature. *PLoS One* 2020 ; 15 : e0242268.
19. Académie de Médecine. *Que déduire des études évaluant l'effet du climat sur la Covid-19 ?* Académie de Médecine, 2020.
20. Stadnytskyi V, Bax CE, Bax A, Anfinrud P. The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2020 ; 117 : 11875-7.
21. Riediker M, Tsai DH. Estimation of viral aerosol emissions from simulated individuals with asymptomatic to moderate Coronavirus disease 2019. *JAMA Netw Open* 2020 ; 3 : e2013807.
22. Hou YJ, Okuda K, Edwards CE, et al. SARS-CoV-2 reverse genetics reveals a variable infection gradient in the respiratory tract. *Cell* 2020 ; 182 : 429-46 e14.
23. Rockx B, Kuiken T, Herfst S, et al. Comparative pathogenesis of Covid-19, MERS, and SARS in a nonhuman primate model. *Science* 2020 ; 368 : 1012-5.
24. Wölfel R, Corman VM, Guggemos W, et al. Virological assessment of hospitalized patients with Covid-2019. *Nature* 2020 ; 581 : 465-9.
25. Blanco-Melo D, Nilsson-Payant BE, Liu WC, et al. Imbalanced host response to SARS-CoV-2 drives development of Covid-19. *Cell* 2020 ; 181 : 1036-45 e9.
26. Ezratty V, Squinazi F. Virus influenza pandémique à l'intérieur des bâtiments : quel risque de transmission par les systèmes de ventilation ou de climatisation ? *Environ Risque Sante* 2008 ; 7 (4) : 255-63.
27. Association des Ingénieurs et Techniciens en Climatologie, Ventilation et Froid (AICVF). *Document guide REHVA Covid-19 V2 (3/4/2020)*. AICVF, 2020.
28. HCSP. *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*. HCSP, 2020.
29. HCSP. *Avis relatif à l'utilisation des appareils de chauffage dans le contexte de l'épidémie de Covid-19*. HCSP, 2020.
30. Jones NR, Qureshi ZU, Temple RJ, Larwood JJP, Greenhalgh T, Bourouiba L. Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in covid-19? *BMJ* 2020 ; 370 : m3223.