

Coronavirus, ventilation, CO₂

Benoît Semin

Xavier Benoit-Gonin, Thierry Darnige, Justine Laurent

Laboratoire PMMH, CNRS, ESPCI, Sorbonne Université, Université de Paris

Webinaire CO₂, 4 février 2021

Avertissement :

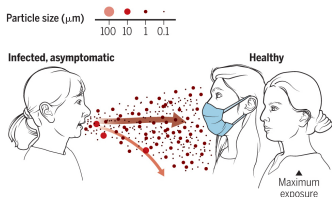
Je ne suis pas expert en médecine.

Mes positions évoluent en fonction des nouvelles données disponibles.



Air expiré et émission d'aérosols

Air expiré : 16% O₂, ~ 4% CO₂, saturé en vapeur d'eau, des aérosols et des gouttelettes ([0,1 μm, 1 mm]).



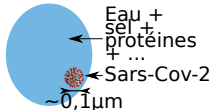
- Diamètre supérieur à ~ 10 μm : gouttelettes, tombent
- Diamètre inférieur à ~ 10 μm : aérosols, «flottent» dans l'air

"Reducing transmission of SARS-CoV-2", K. Prather, Science, 2020

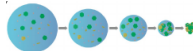
Concentration d'aérosols en parlant : 1 cm⁻³ (gamme : [0,06 – 6])

"Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments", J. Lelieveld, Int. J. Environ. Res. Public Health, 2020

Aérosol contenant du Sars-Cov-2 :



Évaporation partielle des aérosols



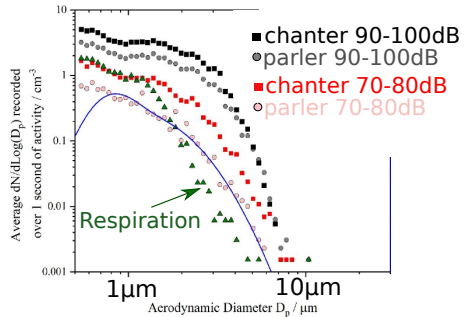
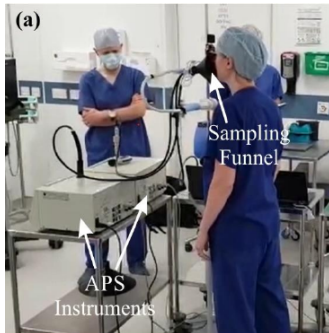
Zuo et al, ACS Nano, 2020

Parler ou chanter, c'est émettre plus d'aérosols

- Plus on parle/chante fort, plus on émet d'aérosols

"Modality of human expired aerosol size distributions", Johnson et al., 2011

"Comparing the Respirable Aerosol Concentrations and Particle Size Distributions Generated by Singing, Speaking and Breathing ", F. Gregson et al., preprint 2020



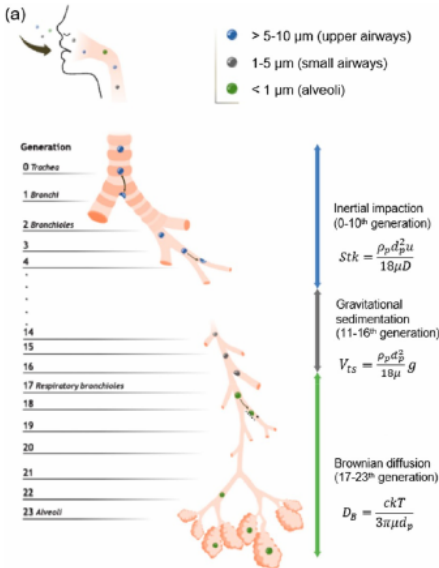
Aérosols dans l'air

Aérosols flottent dans l'air comme la fumée de cigarette (mais sont plus dilués)



- "Le Sars-Cov-2 contenu dans un aérosol peut conserver la morphologie, la taille et le rapport de forme attendus pendant 16 h ." "Persistence of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Aerosol Suspensions", A. Fears, CDC preprint, 2020
- Sars-Cov-2 détecté dans l'air d'hôpitaux. "Assessment of Air Contamination by SARS-CoV-2 in Hospital Settings", Birgand et al, JAMA Network, 2020

Inhalation et dépôt dans le poumon



- Aérosols se déposent efficacement dans le poumon lorsqu'ils sont inhalés.
- Aérosols de diamètre < 1 μm se déposent dans les alvéoles.
- "Airborne Transmission of COVID-19 : Aerosol Dispersion, Lung Deposition, and Virus- Receptor Interactions ", Zuo et al, ACS Nano, 2020
- "The Respiratory System in Equations", Bertrand Maury, Springer, 2013

Transmission à distance du Sars-Cov-2 : experiences avec des animaux

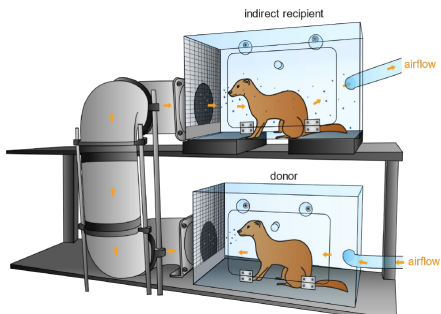
- Transmission à distance chez le hamster doré

"Pathogenesis and transmission of SARS-CoV-2 in golden hamsters", Sia et al., Nature, May 2020

- Transmission à distance chez des furets

"SARS-CoV-2 is transmitted via contact and via the air between ferrets", M. Richard et al., Nature Comm., July 2020

"SARS-CoV and SARS-CoV-2 are transmitted through the air between ferrets over more than one meter distance", Kutter et al., bioRxiv preprint, October 2020



news.yahoo.com

Évènements superpropagateurs

- Chorale de Skagit Valley, Etats-Unis, 2.5 h, 53 personnes infectées sur 61
"Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event", Miller et al., Indoor Air, 2020
- Industrie de la viande en Allemagne. "Le cas index B1 a transmis le virus à d'autres employés dans un rayon de 8 m".
"Investigation of a superspreading event preceding the largest meat processing plant-related SARS-Coronavirus 2 outbreak in Germany, T. Günther, preprint
- Choeur de la cathédrale de Berlin. Plus de 30 personnes infectées par une seule personne. Deutsche Welle, <https://www.youtube.com/watch?v=-PmD7ajep54>



Pièce où ont eu lieu les contaminations



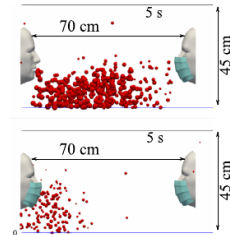
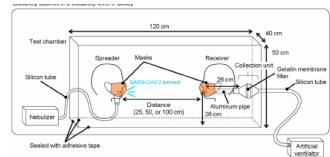
Reprise des répétition en août

71% des infectés ne contaminent aucune autre personne "Epidemiology and transmission dynamics of COVID-19 in two Indian states, R. Laxminarayan", October 2020, Science

80% des infections sont causées par 8 – 9% des infectés "Epidemiology and transmission of COVID-19 in 391 cases and 1286 of their close contacts in Shenzhen, China : a retrospective cohort study", Qi et al., Lancet Infect Dis 2020

Les masques limitent l'émission et l'inhalation d'aérosols

- Masques en tissus, norme Afnor catégorie I : 90% de filtration des particules au-delà de 3 μm
- Masques chirurgicaux, norme EN 14683. 95% ou 98% de filtration de bactéries de 3 μm
- Masque FFP2 (N95) : norme EN 149, filtration de 94% au-delà de 0,6 μm , 8% de pertes latérales. Masques avec valves limitent peu l'émission d'aérosols.
- Dans expériences avec mannequins : masques N95 > chirurgicaux > coton. Meilleure protection si émetteur et récepteur portent un masque. "Effectiveness of Face Masks in Preventing Airborne Transmission of SARS-CoV-2 ", Ueki et al, mSphere 2020
- Masques N95 pas plus efficaces contre la grippe que les masques chirurgicaux en conditions réelles. "Effectiveness of N95 respirators versus surgical masks against influenza : A systematic review and meta-analysis", Long et al, J Evid Based Med, 2021

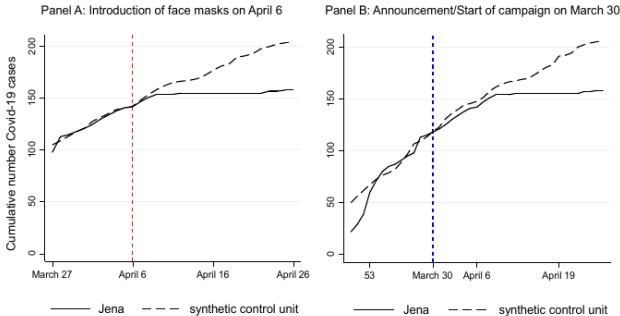


"On respiratory droplets and face masks", Dbouk and and Drikakis, Phys. Fluids, 2020.

Les masques sont efficaces en conditions réelles

"Face masks considerably reduce COVID-19 cases in Germany", T. Mitze et al, PNAS 2020

Comparaison des contaminations à Jena, où le masque est devenu obligatoire dans les lieux publics fermés, avec une "moyenne" de villes similaires.



"Strong impact of closing schools, closing bars and wearing masks during the Covid-19 pandemic : results from a simple and revealing analysis", Matzinger and Skinner, medRxiv, 2020

Ventilation et maladies respiratoires

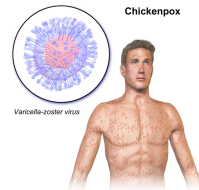
Ventilation = aération = remplacer l'air d'une pièce par de l'air extérieur
Intérêt : diluer les aérosols

"Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a **multidisciplinary** systematic review", Li et al., *Indoor air*, 2007

Auteurs : médecins et ingénieurs.
Hong-Kong, Chine, Danemark, Australie, Taïwan.

"Il y a des **preuves fortes et suffisantes** qui montrent le lien entre la **ventilation**, les mouvements d'air dans les bâtiments et la **transmission** des maladies infectieuses comme la rougeole, la tuberculose, la varicelle, la grippe, la variole, le **Sars**. Les données sont insuffisantes pour spécifier la ventilation minimale requise dans les hôpitaux, les écoles, les bureaux, les appartements et les chambres d'isolement."

"Ventilation and laboratory confirmed acute respiratory infection (ARI) rates in college residence halls in College Park, Maryland", Zhu et al, *Environment International*, 2020



Très peu de contaminations à l'extérieur

Allemagne

Institut Robert-Koch, Allemagne, 7 800 clusters jusqu'en août 2020 :

Endroit	Nombre de clusters	Nombre moyen de cas par clusters
Ehpad	709	18.8
Domicile	3 902	3.2
Travail	412	14
Hôpital	402	10.2
...	...	...
Pique-nique	1	3

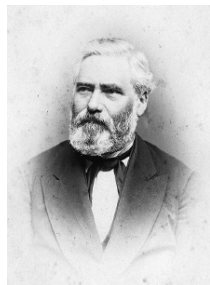
Chine

La majorité des clusters sont liés au domicile (254 sur 318 ; 79,9%), puis dans les transports (108 ; 34,0%). **Un seul cas** de transmission identifié **à l'extérieur**, et qui n'implique que 2 cas.

"Indoor transmission of SARS-CoV-2" H. Qian et al., **April 2020**, medRxiv preprint

Évaluer la ventilation en mesurant le CO₂

- Valeur **extérieure** en 2020 : **0,04% = 400 ppm**
- Émission moyenne de CO₂ au repos : $Q_{CO_2} = 18 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$
Concentration $\sim 4\% = 40\,000 \text{ ppm}$
- Si émission de CO₂ uniquement liée à la respiration :
800 ppm : 1% d'air a déjà été respiré
2 400 ppm : 5% d'air a déjà été respiré
4 400 ppm : 10% d'air a déjà été respiré
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) standard 62-2001
Bonne ventilation : <1 000 ppm
Pertinent pour la covid-19 ?
- 1 000 ppm équivalent à un apport d'air extérieur de $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{personne}^{-1}$
- Mesure de routine dans l'industrie du bâtiment
"Observation de la Qualité de l'Air Intérieur",
<https://www.oqai.fr/fr>



Max von Pettenkofer,
1818-1901

Locher, 2007

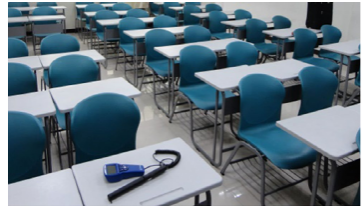
Ventiler a permis de stopper une épidémie de tuberculose

"Effect of ventilation improvement during a tuberculosis outbreak in underventilated university building", Du et al., Indoor Air, 2019. Taiwan.

Tuberculose : $R_0 = 2.4$, échelle de temps : années ("Prospects for Tuberculosis Elimination", Dye et al., Annu. Rev. Public Health 2013)

"L'amélioration de la ventilation a fait chuté le niveau maximal de CO₂ de $3\,204 \pm 50$ ppm à 591-603 ppm. Ensuite le taux d'attaque secondaire pour les nouveaux contacts dans l'université est passé à zéro (durée moyenne de suivi : 5,9 ans)."

Seuil estimé entre 600 ppm et 1 000 ppm.



Une salle de classe en sous-sol, où une valeur de 2 900 ppm a été mesurée avant amélioration de la ventilation.

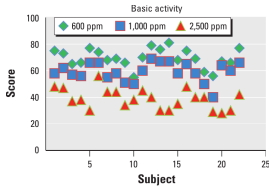
Un taux de CO₂ élevé réduit les performances intellectuelles

- Valeurs jusqu'à 5 000 ppm mesurées dans des écoles au Royaume-Uni. L'amélioration de la ventilation a amélioré les résultats des élèves aux tests.

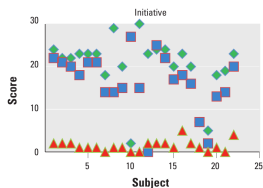
"Ventilation rates in schools and pupils' performance", Bakó-Biró et al., Building and Environment, 2012

- Expérience avec 22 participants qui effectuent des tests de performance en prise de décision sur ordinateur. 3 niveaux de CO₂, en double-aveugle.

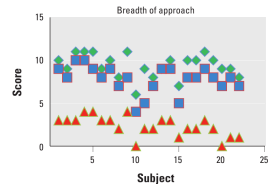
"Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance", U. Satish, Environmental Health Perspectives, 2012



Nombre d'activités



Initiative



Largeur de vue

Conclusion

- La covid-19 se transmet par voie aérosol [#COVIDisAirborne](#)
- Pour limiter le risque aérosol : masques, purificateur d'air HEPA, ventilation, activités extérieures
- La ventilation est utile contre de nombreuses maladies respiratoires.
- **Perspectives en recherche :**
- Quantifier les différents modes de transmission de la covid-19
- Déterminer directement des valeurs pertinentes de CO₂ pour la covid-19, avec et sans masque



HEPA air purifier



<https://www.washingtonpost.com/history/2020/09/14/open-air-schools-outdoor-coronavirus/>

Estimer le risque aérosol : le CO₂ comme traceur

- Mesure directe du Sars-Cov-2 dans l'air : difficile, dangereuse, chère, impossible en temps réel
- Mesure de CO₂ : mesure indirecte mais facile, sans danger, peu chère, possible en temps réel

