

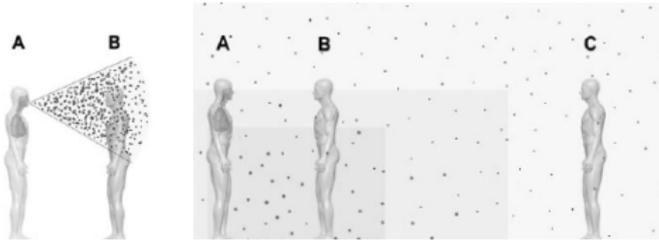
# Mesures de CO<sub>2</sub> : motivations et retour d'expérience

Benoît Semin

GP'Sup Mulhouse  
9 décembre 2021



# Transmission par aérosols



Jones, JOEM, 2015

**Aérosols** : diamètre inférieur à  
 $\sim 10 \mu\text{m} = 0,01 \text{ mm}$ , invisibles, ne tombent pas au  
contraire des gros postillons.  
Il peuvent contenir du virus sars-cov2.



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

"Assessment of Air Contamination by  
SARS-CoV-2 in Hospital Settings",  
Birgand et al, JAMA Network, 2020

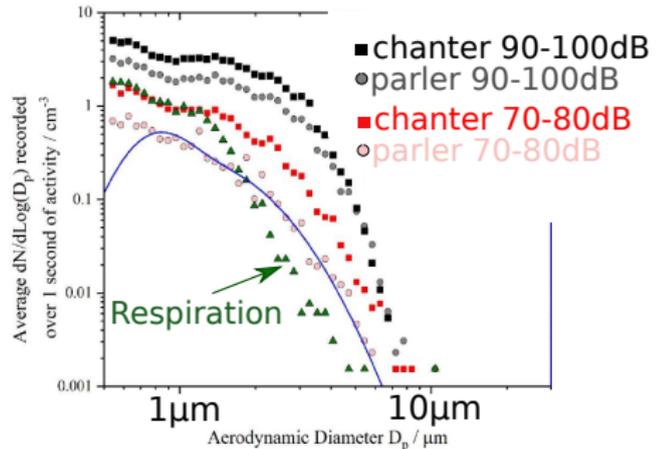
Dépôt des aérosols dans les poumons (comme pour les poudres et les particules fines)

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

- Plus on parle/chanter 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



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

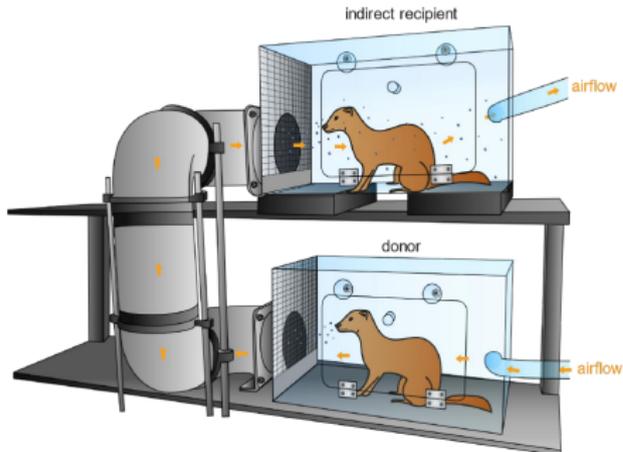
- **Transmission à distance chez le hamster doré**

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

- **Transmission à distance chez des furets**

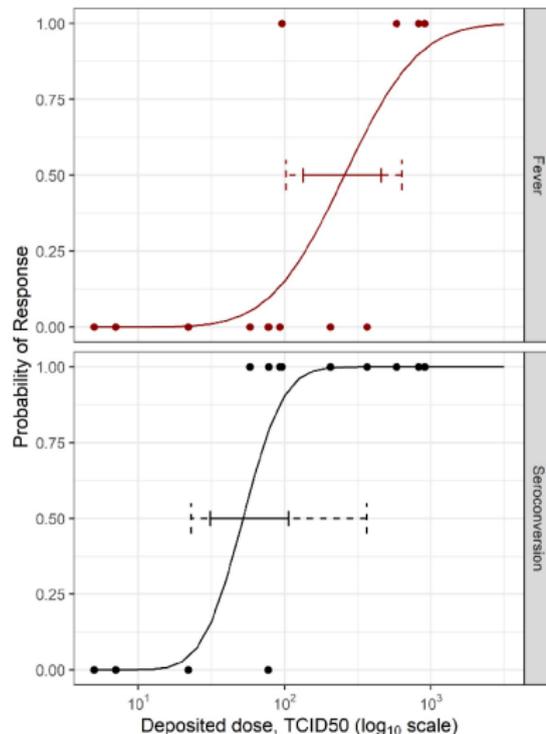
"SARS-CoV-2 is transmitted via contact and via the air between ferrets", M. Richard et al., Nature Comm., July 2020

"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

Expérience : faire respirer à des macaques des aérosols contenant une dose connue de virus



"Dabisch PA, Biryukov J, Beck K, Boydston JA, Sanjak JS, Herzog A, et al. (2021) Seroconversion and fever are dose-dependent in a nonhuman primate model of inhalational COVID- 19. PLoS Pathog"  
Une seule étude pour l'instant, mais de qualité

# 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

Le plus important pour limiter la transmission : limiter les clusters !

# Très peu de contaminations à l'extérieur

## 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

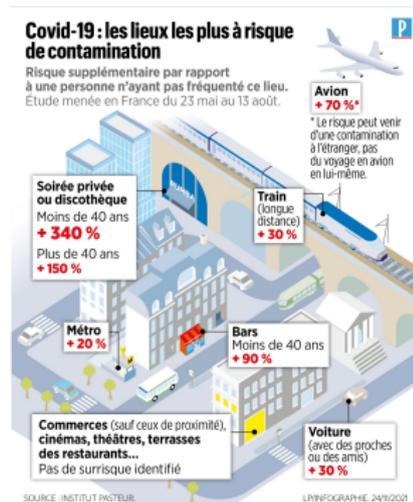
## Allemagne

Institut Robert-Koch, Allemagne, 7 800 clusters jusqu'en août 2020, dont 1 à l'extérieur

## France

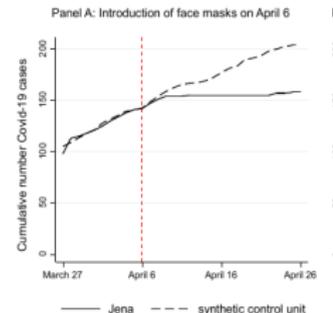
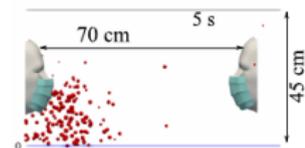
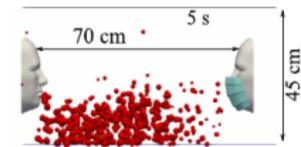
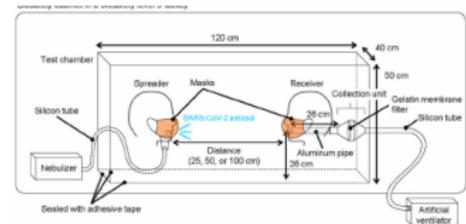
Pas de surrisque associé à la fréquentation des terrasses

Étude Comcor, "Impact of SARS-CoV-2 Delta variant on incubation, transmission settings and vaccine effectiveness : Results from a nationwide case-control study in France", Grant et al., Lancet, 2021



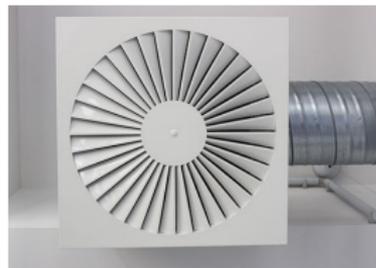
# Les masques limitent l'émission et l'inhalation d'aérosols

- Dans expériences avec mannequins : filtration 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
- Protection partielle, des aérosols passent sur les côtés. Dbouk and Drikakis, Phys. Fluids, 2020. Un masque bien ajusté offre une meilleure protection. Wang et al., Science, 2021
- "Face masks considerably reduce COVID-19 cases in Germany", T. Mitze et al, PNAS 2020  
Comparaison des contaminations à Iéna, où le masque est devenu obligatoire dans les lieux publics fermés, avec une "moyenne" de villes similaires.



# Ventilation : une protection collective

- **Ventiler** : aérer, **renouveler l'air** de (Larousse)
- Ventilation mécanique contrôlée (VMC) ou ventilation naturelle (ouverture fenêtre, porte, trous d'aération)
- Ventiler dilue les aérosols



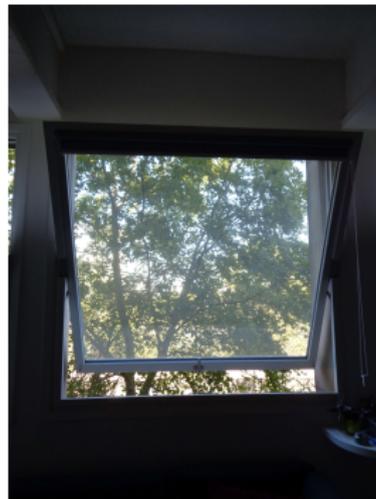
# Ouverture des fenêtres : ventilation non-contrôlée

Le flux d'air entrant par une fenêtre dépend :

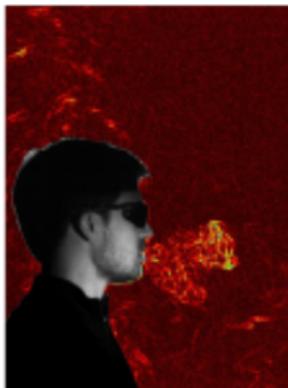
- de la forme de la fenêtre
- du vent
- de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur
- de l'ouverture des portes (courant d'air)

Variation de plus d'un facteur 10 !

Ouverture des fenêtres : ventilation souvent insuffisante ou excessive (froid en hiver)



# Pourquoi mesurer le taux de CO<sub>2</sub> ?



Bhagat, JFM, 2020

- La mesure des aérosols est difficile
- En expirant, nous émettons aussi du CO<sub>2</sub>
- Idée : mesurer le CO<sub>2</sub> plutôt que les aérosols
- mesure de CO<sub>2</sub> = mesure de la qualité de la ventilation
- Avantage : la mesure de CO<sub>2</sub> est une mesure connue et validée  
"Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur", <https://www.oqai.fr/fr>

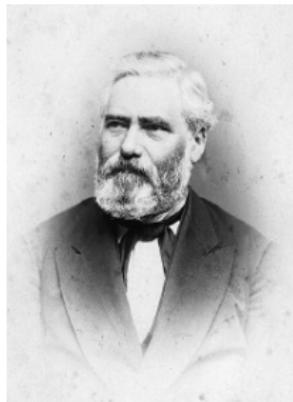
# Évaluer la ventilation en mesurant le CO<sub>2</sub>

- Valeur **extérieure** en 2020 :  $c_0 = 0,04\% = 400 \text{ ppm}$
- Émission moyenne de CO<sub>2</sub> au repos :  $Q_{CO_2} = 18 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$   
Concentration  $\sim 4\% = 40\,000 \text{ ppm}$
- Si émission de CO<sub>2</sub> uniquement liée à la respiration :  
800 ppm : 1% d'air a déjà été respiré  
2 400 ppm : 5% d'air a déjà été respiré
- En régime permanent, pièce parfaitement mélangée :

$$c = c_0 + \frac{nQ_{CO_2}}{V \times a} = c_0 + \frac{Q_{CO_2}}{Q_p}$$

$c$  : concentration en CO<sub>2</sub>,  $V$  volume de la pièce,  
 $n$  : nombre de personnes,  $a$  : taux de renouvellement de  
l'air ("ACH"),  $Q_p$  : apport d'air frais par personne

- 800 ppm équivalent à un apport d'air extérieur de  
 $Q_p = 45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{personne}^{-1}$



Max von Pettenkofer,  
1818-1901  
Locher, 2007

# Capteurs de CO2 au laboratoire PMMH

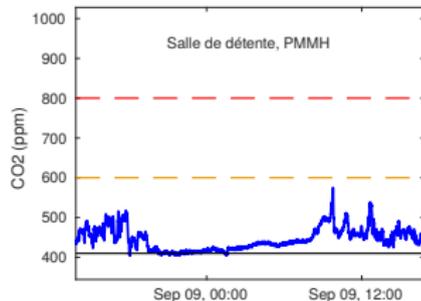
## Laboratoire PMMH :

- mécanique des fluides, mécaniques des solides, biophysique
- 2/3 expérimentateurs, 1/3 théoriciens et numériques
- fort collectif : réunions hebdomadaires, projets communs, ...



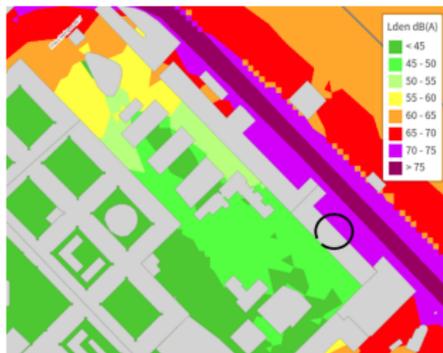
## Actions menées :

- achat et mise en place de capteurs de CO2 en août 2020 dans les pièces communes  
Diode rouge : 600 ppm dans la salle de détente, 800 ppm ailleurs
- Séminaires de sensibilisation : septembre 2020, septembre 2021, nombreux rappels



# Freins à l'aération : exemple de la salle de réunion

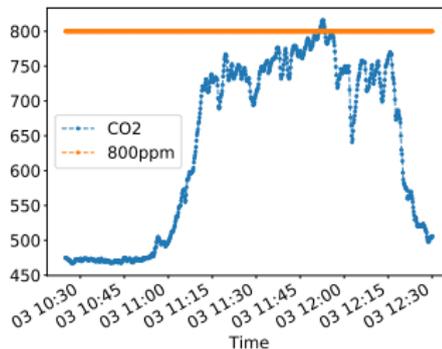
Débit VMC insuffisant



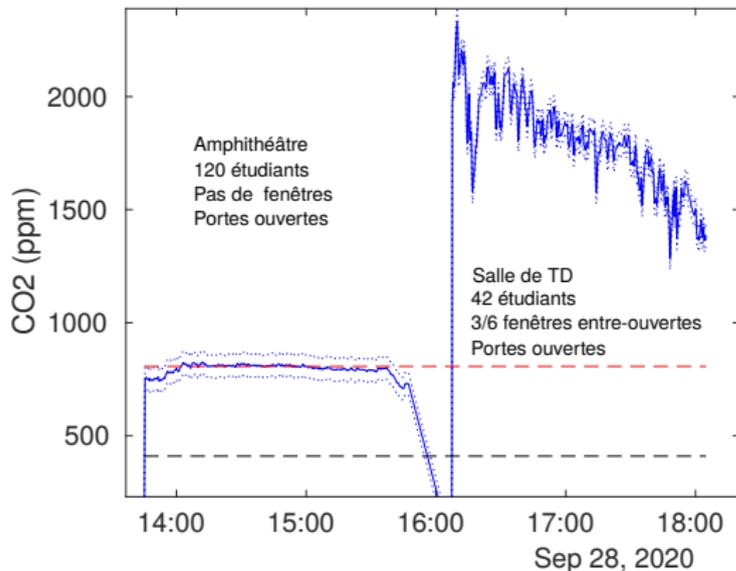
<https://carto.bruitparif.fr/>

Freins à l'aération :

- bruit
- froid
- inattention

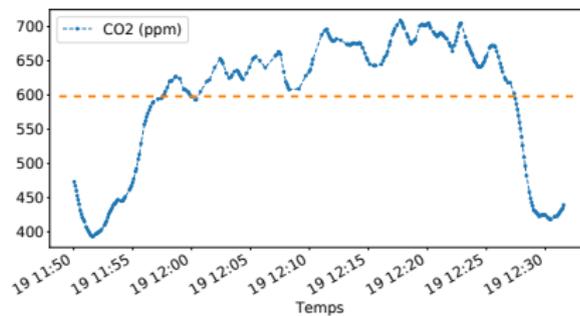
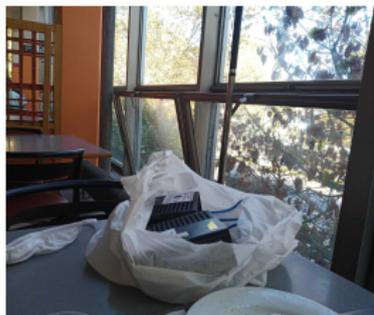


Séminaire, 27 personnes



Amphithéâtre : 800 ppm

Salle de TD : jusqu'à 2 380 ppm (5× moins bien ventilé)



Concentration en CO<sub>2</sub> atteint 700 ppm près des fenêtres

# Intérêt de la mesure de CO<sub>2</sub> hors contexte covid-19

- De nombreuses maladies se transmettent par aérosols :

"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."

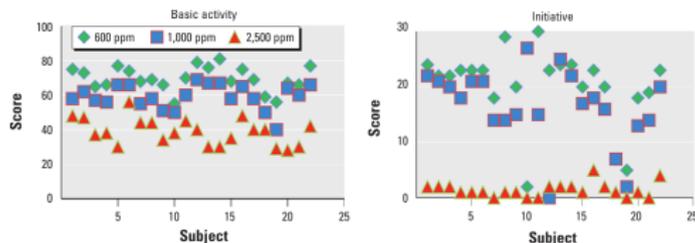
"Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review", Li et al., Indoor air, 2007

- Des taux de CO<sub>2</sub> élevés diminuent les capacités intellectuelles

"Clever classrooms", P. Barrett, 2015

Expérience avec 22 participants qui effectuent des tests de performance en prise de décision sur ordinateur. 3 niveaux de CO<sub>2</sub>, en double-aveugle.

"Is CO<sub>2</sub> an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO<sub>2</sub> Concentrations on Human Decision-Making Performance", U. Satish, Environmental Health Perspectives, 2012



- La ventilation est **un** des outils principaux de lutte contre la covid-19 (avec le vaccin, les masques, l'isolement des malades). Utile quelque soit le variant
- La plupart des bâtiments en Europe sont insuffisamment ventilés
- La ventilation est particulièrement utile dans les endroits où les masques ne sont pas portés :
  - Lieux de restauration : Crous, cafétéria de labo
  - Moments festifs : pots de thèse, soirées étudiantes
  - Salles de sport
- La mesure du CO<sub>2</sub> permet d'évaluer la qualité de la ventilation
- Si la ventilation dépend de l'ouverture des fenêtres, ils permettent d'optimiser cette ouverture
- Nécessité d'informer de manière répétée et de mettre à disposition des capteurs pour une mise en oeuvre pratique
- VMC performantes : enjeu de long terme.



[https://www.youtube.com/watch?v=9I\\_5k4l7Nck](https://www.youtube.com/watch?v=9I_5k4l7Nck)

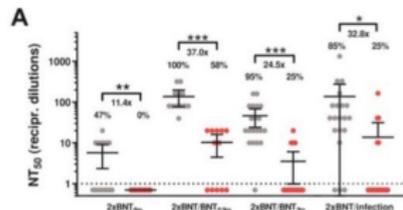


# Perspectives : omicron

- Données encore très parcellaires. Les informations ci-dessous peuvent être modifiées dans les prochains jours
- Proportion de variant omicron **augmente exponentiellement** au Danemark, au Royaume-Uni, en Afrique du Sud
- **Échappement immunitaire partiel** au vaccin et à l'infection : très probable
- Efficacité des vaccins contre les formes graves : pas de données
- Moindre gravité intrinsèque individuelle que delta : possible
- Vague omicron en janvier/février dans les hôpitaux français : possible



<https://twitter.com/chrischirp/status/1467944178713862146>



2x Pfizer : neutralisation 0%, 3x : 25%  
[https://twitter.com/c\\_drosten/status/1468479630281785348?cxt=HHwWiIC-rbCci-EoAAAA](https://twitter.com/c_drosten/status/1468479630281785348?cxt=HHwWiIC-rbCci-EoAAAA)