



Transmission de particules respiratoires infectieuses en face-à-face : modélisation de l'effet de la distanciation, du port de masque chirurgical ou FFP2

Benoît Semin¹, Gabriel Birgand^{2,3}

1- Laboratoire Physique et mécanique des milieux hétérogènes (PMMH) – Centre national de la recherche scientifique (CNRS) – École supérieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI) – Sorbonne Université – Université Paris Cité – Paris – France

2- Centre d'appui pour la prévention des infections associées aux soins (CPIas) Pays de la Loire – Centre hospitalier universitaire (CHU) de Nantes – Nantes – France

3- Health Protection Research Unit in Healthcare Associated Infections and Antimicrobial Resistance at Imperial College London (NIHR) – Londres – Royaume Uni

✉ **Dr Gabriel Birgand** – CPIas Pays de la Loire – CHU de Nantes – 5, rue du Pr Yves-Boquien – 44093 Nantes Cedex 1 – France
E-mail : gabriel.birgand@chu-nantes.fr

Bagheri G^a, Thiedea B^a, Hejazia B^a, Schlenczeka O^a, Bodenschatzta E^{a,b,c,d}

An upper bound on one-to-one exposure to infectious human respiratory particles

PNAS 2021;118(49):e2110117118. Doi: 10.1073/pnas.2110117118.

a- Laboratory for fluid physics, pattern formation and biocomplexity – Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization – Göttingen 37077 – Germany – E-mail : gholamhossein.bagheri@ds.mpg.de – eberhard.bodenschatz@ds.mpg.de

b- Laboratory for fluid physics, pattern formation and biocomplexity – Max Planck Institute for dynamics and self-organization – Göttingen – Germany.

c- Institute for dynamics of complex systems – University of Göttingen – Göttingen – Germany

d- Laboratory of atomic and solid state physic – Cornell University – Ithaca – United States of America

e- Sibley School of mechanical and aerospace engineering – Cornell University – Ithaca – United States of America

Abstract

There is ample evidence that masking and social distancing are effective in reducing severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) transmission. However, due to the complexity of airborne disease transmission, it is difficult to quantify their effectiveness, especially in the case of one-to-one exposure. Here, we introduce the concept of an upper bound for one-to-one exposure to infectious human respiratory particles and apply it to SARS-CoV-2. To calculate exposure and infection risk, we use a comprehensive database on respiratory particle size distribution; exhalation flow physics; leakage from face masks of various types and fits measured on human subjects; consideration of ambient particle shrinkage due to evaporation; and rehydration, inhalability, and deposition in the susceptible airways. We find, for a typical SARS-CoV-2 viral load and infectious dose, that social distancing alone, even at 3.0 m between two speaking individuals, leads to an upper bound of 90% for risk of infection after a few minutes. If only the susceptible wears a face mask with infectious speaking at a distance of 1.5 m, the upper bound drops very significantly; that is, with a surgical mask, the upper bound reaches 90% after 30 min, and, with an FFP2 mask, it remains at about 20% even after 1h. When both wear a surgical mask, while the infectious is speaking, the very conservative upper bound remains below 30% after 1h, but, when both wear a well-fitting FFP2 mask, it is 0.4%. We conclude that wearing appropriate masks in the community provides excellent protection for others and oneself, and makes social distancing less important.

Résumé

Il y a de nombreuses preuves attestant que les masques et la distanciation sociale sont efficaces pour réduire la transmission du SARS-CoV-2. Cependant, à cause de la complexité de la transmission aérienne, il est difficile d'évaluer précisément leur efficacité, en particulier dans le cas d'une exposition en « face-à-face ». Nous présentons ici le principe d'une borne supérieure de l'exposition en « face-à-face » aux particules respiratoires infectieuses humaines, et l'appliquons au SARS-CoV-2. Pour calculer l'exposition et le risque d'infection, nous nous sommes appuyés sur une base de données exhaustive de la répartition des particules respiratoires selon leur taille; la physique des flux respiratoires; les fuites de masques de différentes tailles et selon différents ajustements, mesurées sur des sujets humains; la prise en compte de la diminution des particules dans l'environnement due à l'évaporation; et la réhydratation, l'inhalabilité et le dépôt dans les voies respiratoires. Nous trouvons, dans le cas de la seule distanciation sociale de 3 m entre deux individus qui se parlent, une borne supérieure de 90% pour le risque d'infection après quelques minutes, en considérant une charge virale et une dose infectieuse typique de SARS-CoV-2. Si seule la personne susceptible porte un masque, même à 1,5 m d'un individu infectieux lui parlant, la borne supérieure diminue très sensiblement; avec un masque chirurgical, la borne supérieure atteint 90% après 30 min, et, avec un masque FFP2, elle reste à environ 20% même après 1 h. Si les deux personnes portent un masque chirurgical, et que l'individu infectieux parle, la borne supérieure prudente reste inférieure à 30% après 1 h, mais si les deux portent un masque FFP2 correctement ajusté, elle est de 0,4%. Nous en concluons que le port de masques appropriés dans la communauté offre une excellente protection pour les autres et pour soi-même, et rend la distanciation sociale moins importante.

Contexte et objet de l'étude

La Covid-19¹ peut, dans certaines circonstances, se transmettre efficacement par voie aérienne [1,2]. Ce mode de transmission consiste en l'émission de microgouttelettes, aussi appelées aérosols ou particules respiratoires, par un individu infecté, puis le passage de ces microgouttelettes dans l'air, et ensuite leur inhalation par un individu susceptible et le dépôt dans les poumons de ce dernier. La compréhension actuelle des mécanismes de transmission,

1- *Coronavirus disease 2019*, maladie à coronavirus 2019.

incluant des paramètres liés à la source (concentrations expirées, taille et vitesse des particules), l'environnement (conditions thermodynamiques ambiantes et débit d'air) et le récepteur (vitesse de croissance de réhydratation due à la condensation dans les voies respiratoires) n'est encore que partielle. Ainsi, la transmission des maladies par voie aérienne est un problème qui implique des processus physiques complexes à travers une large gamme d'échelles spatiales et temporelles, ce qui rend difficile la prédiction des risques de contaminations en situation réelle. Les moyens de réduction du risque de transmission par

tration en particules infectieuses liée à la dilution et au dépôt des particules infectieuses;

- la fraction TIL⁴ d'aérosols qui traversent l'éventuel masque de l'individu susceptible. TIL=1 en l'absence de masque;
- l'efficacité D_{rt} ⁵ du dépôt des aérosols contenant le virus dans les voies respiratoires;
- le temps t d'interaction entre les individus;
- le débit d'inspiration de l'individu susceptible.

L'exposition efficace ou risque d'infection est une fonction de la dose de pathogène absorbé qui est définie selon l'équation suivante (Figure 1):

Figure 1 – Équation donnant la dose totale absorbée par l'individu susceptible.

μ_k est la dose d'aérosols absorbée multiple de κ qui est le nombre de copies du virus

ϕ variable d'intégration

Concentration en particules infectieuses, dans la zone d'un individu susceptible

$$\mu_k(t) = \int_{d_{0,min}(k)}^{d_{0,max}(k)} d\phi \int_0^{t_{exp}} dt$$

Fraction TOL d'aérosols qui traversent l'éventuel masque de l'individu infecté

$$\times n_{i,k}(\phi, t) f_d(\phi, \lambda_i(t), w(\phi, t), t)$$

Fraction TIL d'aérosols qui traversent l'éventuel masque de l'individu susceptible

$$\times [q_{p,ex} P_{ex}(\phi, \lambda_i(t)) + q_{L,ex} L_{ex}(\phi, \lambda_i(t))]$$

Efficacité D_{rt} du dépôt des aérosols contenant le virus dans les voies respiratoires

$$\times [q_{p,in} P_{in}(\phi, w(\phi, t), \lambda_s(t)) + q_{L,in} L_{in}(\phi, w(\phi, t), \lambda_s(t))]$$

Débit d'inspiration λ de l'individu susceptible

$$\times D_{rt}(\phi, w(\phi, t), \lambda_s(t)) \lambda_s(t)$$

voie aérienne incluent le port du masque et la distanciation, pour lesquels de nombreux points d'interrogation persistent. L'article de Bagheri et al. introduit le concept de borne supérieure du risque d'exposition/d'infection comme quantificateur pour guider les mesures de contrôle des infections à SARS-CoV-2². Les points suivants sont abordés : effet des activités respiratoires, de la durée d'exposition, du type de masque et de son adaptation au visage sur la limite supérieure du risque d'exposition/d'infection.

Méthode

Description du modèle adopté et des paramètres utilisés

La base du modèle est l'estimation de la quantité de virus absorbé par l'individu susceptible comme le produit des facteurs suivants :

- la distribution en diamètre n_i des aérosols contenant du virus émis par l'individu infecté;
- la fraction TOL³ d'aérosols qui traversent l'éventuel masque de l'individu infecté. TOL=1 en l'absence de masque;
- le facteur f_d qui est tel que $(1-f_d)$ est la réduction en concen-

Les auteurs ont simplifié l'équation de la manière suivante :

$$\mu \propto n_i \times TOL \times f_d \times TIL \times D_{rt}$$

Cette estimation sous forme de produit est déduite du mécanisme de transmission par aérosol, depuis la production des aérosols contagieux par l'individu infecté, la filtration de ces aérosols par les masques, jusqu'à l'infection de l'individu susceptible. Le risque d'infection est estimé à partir de la quantité de virus absorbé par un modèle de type Wells-Riley, où le risque d'infection varie en $(1-\exp[-n_i/D])$, où D est la dose de virus absorbé pour laquelle le risque d'infection est de 63%. Pour les faibles risques considérés ici, ce risque vaut approximativement n_i/D . Le modèle prend en compte la distribution en diamètre des aérosols, et l'évolution de ce diamètre liée à leur évaporation partielle, d'un facteur $w=4$ [3].

Estimation des paramètres du modèle et discussion de leur robustesse

La distribution en diamètre n_i des aérosols contenant du virus émis par l'individu infecté est estimée à partir de la distribution en diamètre des aérosols émis en respirant ou en parlant. Cette distribution a été mesurée par une partie

2- Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2, coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère.

3- Total outward leakage, fuite totale vers l'extérieur.

4- Total inward leakage, fuite totale vers l'intérieur.

5- Deposition in the respiratory tract, dépôt dans les voies respiratoires.

des auteurs et rapportée dans une prépublication [3]. Dans cet article, les auteurs mesurent les aérosols émis lors de différentes activités par 132 individus en bonne santé de 5 à 80 ans. La gamme de mesure est très étendue, de 50 nm à 1 mm. La distribution en aérosols contagieux est déduite de la distribution d'aérosols émis en utilisant une concentration volumique (charge virale) en virus indépendante du diamètre. La concentration volumique choisie est élevée. Elle n'atteint pas les valeurs maximales rapportées dans la littérature scientifique, où cette charge virale a été mesurée par RT-PCR⁶ sur des échantillons de salive et de mucus [4]. Il n'est cependant pas clair que cette concentration corresponde à du virus viable. Ce choix d'une charge virale élevée mais pas maximale n'est pas cohérent avec la notion de calcul de borne supérieure.

Pour un type de masque et un ajustement donné, la fraction TOL est prise égale à TIL, ce qui signifie que pour un aérosol de diamètre donné, la probabilité de sortir et de traverser le masque de l'individu infecté est égale à la probabilité d'entrer par le masque de l'individu susceptible. Cette hypothèse est en accord avec des expériences sur des mannequins [5].

Le facteur f_d est pris égal à 1 dans le cas avec port de masque, car dans ce cas, il est impossible de définir un cône d'expiration (Figure 2). En effet, le masque modifie l'écoulement d'air émis, qui est nettement plus diffus que dans le cas sans masque. Prendre $f_d=1$ est une surestimation très importante. Les aérosols sont en pratique dilués par un facteur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines par l'air ambiant, ce qui réduit la dose réellement absorbée par le même facteur. Le facteur f_d est estimé par un modèle de jet dans le cas sans port de masque. Il s'agit d'un modèle bien connu et vérifié en mécanique des fluides. Le modèle de jet utilisé pose l'hypothèse que l'air est totalement immobile dans la pièce considérée [6]. Si la vitesse de l'air n'est pas nulle, f_d est nettement diminué par dilution des aérosols, et ceci d'autant plus que la vitesse de l'air est élevée. Cet effet n'est pas discuté en détail dans l'article. Une vitesse de l'air de seulement 0,1 m/s, souvent atteinte dans les milieux intérieurs ventilés, et presque toujours à l'extérieur, diminue déjà nettement la concentration en aérosol à 1,5 m [7]. En

6- RT-PCR: Reverse transcription-polymerase chain reaction, transcriptase inverse-réaction de polymérisation en chaîne.

conclusion, le facteur f_d est souvent très surestimé, ce qui est d'ailleurs mentionné par les auteurs et qui explique que les risques obtenus soient présentés comme des bornes supérieures et non des estimations.

La fraction TIL d'aérosols qui traversent l'éventuel masque porté par l'individu susceptible a été mesurée par les auteurs pour sept sujets adultes a priori non-professionnels (six hommes, une femme). Ces mesures sont détaillées dans le supplément de l'article. Le principe consiste à mesurer le taux de particules à l'intérieur du masque pendant l'inhalation, en plaçant un tuyau de prélèvement sur le masque, et à le comparer au taux de particules environnantes. La fraction TIL est la somme des aérosols qui traversent le masque, et ceux qui passent par les interstices à la jonction entre le masque et le visage. L'article compare la filtration effective de masques FFP2⁷ de type KN95 et de masques chirurgicaux classiques (Figure 3). Les masques FFP2 ont été testés avec ou sans ajustement de la barre nasale. Pour vérifier que l'essentiel des fuites du masque FFP2 se situent au niveau du nez, les auteurs ont aussi testé le cas d'un masque FFP2 fixé au nez avec du ruban adhésif. Les auteurs comparent avec succès leurs résultats avec ceux de la littérature scientifique existante pour la filtration effective des masques chirurgicaux et FFP2: la meilleure filtration des masques FFP2 est un résultat robuste. L'efficacité de dépôt d'un aérosol dans les poumons en fonction de son diamètre est une quantité connue. Les valeurs

7- FFP2: Filtering facepiece 2, appareil de protection respiratoire de classe 2 filtrant au moins 94% des particules de taille moyenne de 0,6 μm (Source: INRS).

Figure 2 – Cône d'expiration défini dans les scénarios de l'étude.

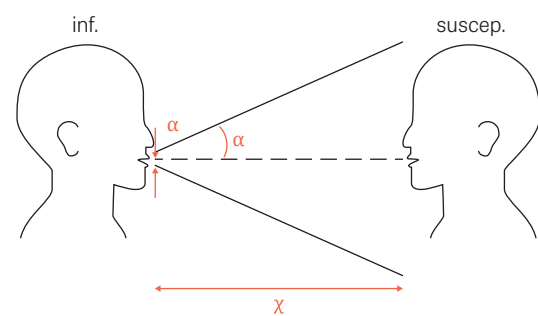
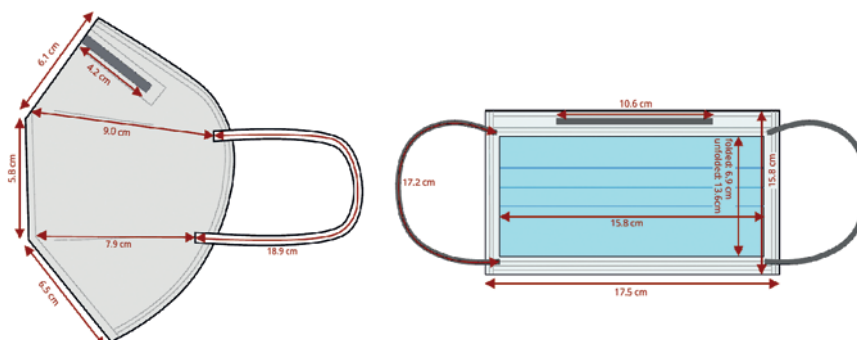


Figure 3 – Types de masques analysés dans la modélisation.



utilisées dans l'article sont tirées d'une référence en radio-protection.

Les débits d'inspiration sont pris dans la littérature pour un individu qui respire sans autre activité, ou pour un individu qui parle.

Un autre paramètre du modèle est le nombre de virus nécessaires pour déclencher une infection, qui est pris égal à 200 par analogie avec d'autres virus. D'autre part, le taux de diminution du diamètre des aérosols ($w=4$) a été mesuré pour les particules de diamètre supérieur à $3 \mu\text{m}$ par Bagheri et al. dans une autre étude [3].

Résultats

Pénétration à travers le masque

Dans le supplément, les auteurs tracent le coefficient de pénétration (P_{filter}) à travers le masque (Figure 4). Le masque est placé entre deux plaques au milieu desquelles se trouve un trou circulaire, ce qui permet de caractériser la filtration à travers le matériau qui constitue le masque. Les auteurs ont testé trois masques en tissu, sept masques chirurgicaux et quatre masques FFP2.

Les masques en tissu examinés ont la pénétration la plus élevée, avec un maximum de 85% en moyenne pour les particules de $0,3 \mu\text{m}$ et de 40% à $3 \mu\text{m}$. Les masques chirurgicaux ont donné de meilleurs résultats, avec une P_{filter} plus faible. Quatre des masques chirurgicaux examinés étaient proches du masque en tissu, tandis que les quatre autres avaient des $P_{filter} < 12\%$. Les taux de pénétration de filtre des masques FFP2 examinés étaient tous en dessous de la limite de 6% fixée par la norme EN 149:2001+A1.

Fuite totale vers l'intérieur (TIL) en fonction du type de masque

La fuite totale vers l'intérieur (TIL) dépend non seulement du coefficient de pénétration des particules d'aérosols à travers le masque P_{filter} , mais aussi des fuites dans l'espace entre le masque et le visage. Ces fuites sont le principal facteur limitant dans le cas des masques à faible P_{filter} . Pour évaluer ce taux de fuite, les auteurs ont réalisé des mesures sur sept volontaires (six hommes, une femme), en utilisant un type de masque chirurgical et un type de masque FFP2. Le port d'un masque FFP2 sans ajustement de la barre nasale (cas i), conduit à une TIL de 53% pour les plus petites particules ($0,3 \mu\text{m}$), qui diminue à 16% pour celles ayant un diamètre de $3 \mu\text{m}$ (Figure 5). En ajustant la barre nasale du masque pour que le masque épouse la forme du nez (cas ii), la TIL du masque est améliorée d'un facteur 4,3 pour les plus petites particules et d'un facteur 7,5 pour les particules de $3 \mu\text{m}$. Porter un masque chirurgical supplémentaire en plus du masque FFP2 ajusté (cas iii) semble avoir un effet globalement négatif sur la TIL par rapport au cas ii. Il y a cependant une grande variabilité entre sujets, qui empêche toute conclusion définitive. Une explication possible de la diminution de la protection pourrait être que la pression supplémentaire sur le FFP2 causée par le masque chirurgical déforme le masque FFP2 et augmente les fuites entre le masque et le visage. La configuration pour laquelle la TIL est minimale correspond au cas iv, dans lequel les fuites au niveau du nez sont éliminées grâce à l'utilisation d'un adhésif double face. Cette manière de porter le masque, peu envisageable de manière routinière, avait pour but de montrer

Figure 4 – Coefficient de pénétration des particules à travers le masque en fonction des types de masques.

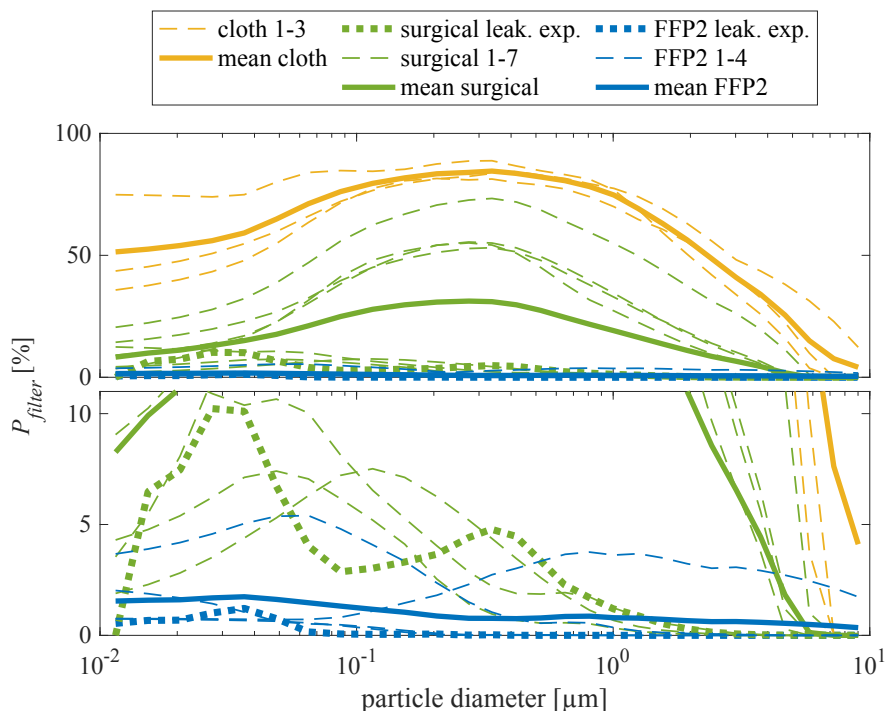


Fig. S5. Particle penetration as a function of particle size through the filter material of the tested cloth, surgical and FFP2 masks. Dashed lines show the results from measurements of filter penetration of different masks in setup 1. Dotted lines show the results from filter penetration measurements in setup 2 for the two masks that were used in the leakage experiment. The solid lines are the mean of each mask type.

la forte influence des fuites au niveau du nez. Dans d'autres études, les fuites au niveau des joues jouaient également un rôle important, ce qui peut éventuellement s'expliquer en considérant le fait que les dimensions du visage jouent un rôle important dans les positions de fuite [8]. Le masque chirurgical dont la barre nasale est bien ajustée (cas v) est associé à la plus haute TIL, la valeur maximale, supérieure à 70%, survenant pour la plus petite taille de particules. Ceci est causé à la fois par une pénétration relativement élevée du filtre (5% pour les particules autour de 0,3 µm) et surtout par les fuites dans l'espace entre le masque et le visage. La TIL du masque chirurgical est supérieure à celle du masque FFP2 non ajusté, elle est 6 fois plus élevée que celle du FFP2 ajusté pour les plus petites particules et plus de 12 fois supérieure pour les particules de diamètre >3 µm.

Remarque: le fait que les particules les plus petites soient celles pour lesquelles les fuites sont maximales n'implique pas qu'il s'agisse des particules les plus dangereuses. En effet, d'autres facteurs interviennent, comme la charge virale et le fait que ces particules se déposent peu dans les poumons (Figure 6).

Borne supérieure du risque d'infection dans différentes configurations

La Figure 7 donne la borne supérieure du risque d'infection pour une durée de 20 minutes pour trois configurations:

Figure 5 – Fraction TIL (fuite totale) en fonction du diamètre de l'aérosol, pour des masques chirurgicaux et FFP2, et pour plusieurs types d'ajustement dans le cas du masque FFP2.

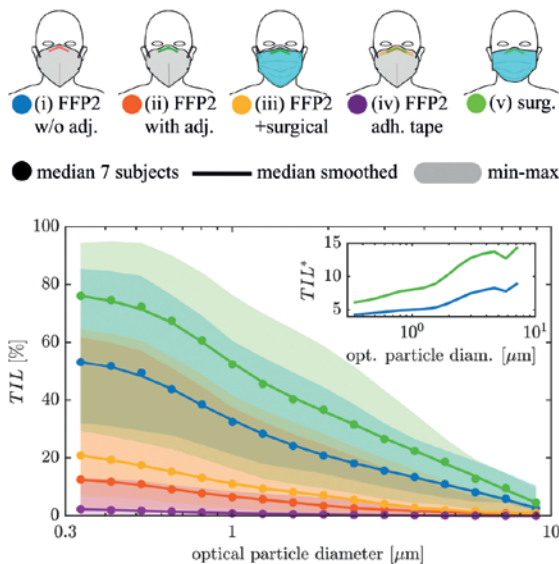


Fig. 2. Median of the total inward leakage over all subjects for different mask-wearing cases. Smoothed curves are the three-point moving average. Shaded areas show minimum and maximum as an indication of variability in total inward leakage for different subjects—the individually measured particle size-dependent TIL can be found in SI Appendix, section 2.1. The first–last bin total leakage values are (i) 53.2 to 2.7%, (ii) 12.5 to 0%, (iii) 20.9 to 1.0%, (iv) 2.3 to 0%, and (v) 76.0 to 4.5%. Inset shows the total inward leakage of the surgical mask and the FFP2 mask without adjustment

TIL : total inward leakage, fuite totale vers l'intérieur; FFP2 : Filtering face-piece 2, appareil de protection respiratoire de classe 2 filtrant au moins 94% des particules de taille moyenne de 0,6 µm (Source : INRS).

- A: l'individu infectieux et l'individu susceptible ne portent pas de masque;
- B: les deux individus portent un masque chirurgical bien ajusté (mask-SS) ou FFP2 bien ajusté (mask-FF);
- C: l'individu infectieux ne porte pas de masque, l'individu susceptible porte un masque chirurgical bien ajusté (mixed-S) ou FFP2 bien ajusté (mixed-F).

D'autre part, le cas où l'individu infectieux parle correspond aux courbes en rouge, le cas où il respire sans parler est en bleu. L'axe des abscisses est un des paramètres du modèle: le diamètre maximal des aérosols lors de leur production ($d_{0,max}$). Toutes les courbes convergent vers un plateau avant 50 µm dans les cas avec masque. Cela montre que le risque aérosol est bien estimé en prenant $d_{0,max} = 50$ µm, ce qui revient à négliger les gouttelettes de diamètre supérieur. Cette limite, plus haute que les diamètres usuellement considérés, est liée à l'évaporation partielle des microgouttelettes. Les résultats à considérer et qui seront discutés

Figure 6 – Efficacité du dépôt des particules dans le poumon en fonction de leur diamètre.

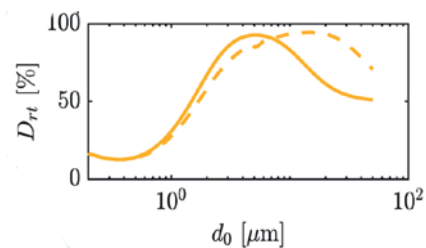


Figure 7 – Risque d'infection dans différentes configurations, en fonction du paramètre $d_{0,max}$ du modèle.

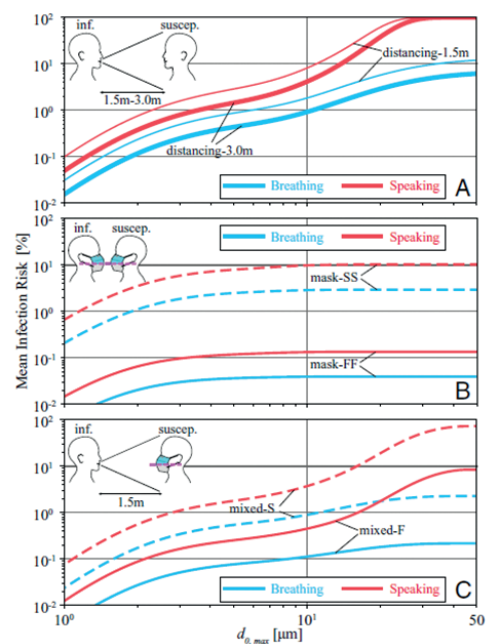


Fig. 4. Mean risk of infection as a function of (wet) exhale diameter cutoff $d_{0,max}$ when an infectious is breathing or speaking toward a breathing-only susceptible for a duration of 20 min considering (A) distancing, (B) mask, and (C) mixed scenarios. Other parameters used are $w = 4$, viral load $\rho_p = 10^{8.5}$ virus copies per mL, and $ID_{50,21} = 200$. Details of scenario-specific parameters, for example, f_d , are presented in the caption of Fig. 1.

dans la suite seront ceux pour $d_{0,max} = 50 \mu\text{m}$ (point le plus à droite des courbes). Dans le cas sans masque, l'article affirme que $d_{0,max} = 50 \mu\text{m}$ convient parce que le risque estimé est déjà élevé. Cet argument est discutable, mais il est nécessaire de poser une limite, forcément en partie arbitraire, avec les gouttelettes de grand diamètre, qui sédimentent beaucoup plus rapidement que les aérosols. Pour toutes les configurations, le risque est nettement plus grand lorsque l'individu infectieux parle. Cela est lié à la production beaucoup plus grande d'aérosols lorsqu'une personne parle, en particulier ceux de diamètre supérieur à $10 \mu\text{m}$ [3]. Dans le cas sans masque (A), la borne supérieure est égale à 100% si l'individu infectieux parle à une distance de 1,5 m de l'individu susceptible, mais seulement de 10% s'il ne fait que respirer. Cette configuration illustre la très forte probabilité d'infection lorsque l'infectieux parle. Dans le cas avec masques (B), le risque est nettement diminué par rapport au cas (A). Étant donné que f_o est pris égal à 1 en B mais inférieur à 1 en A, cette réduction du risque est le plus souvent sous-estimée. Le risque est réduit d'un facteur 75 entre le cas des masques FFP2 bien ajustés, et celui des masques chirurgicaux bien ajustés. Ce résultat suggère que le port du masque généralisé est efficace, ce qui est compatible avec les observations en vie réelle [9]. Le cas mixte (C) est intermédiaire entre les deux autres configurations. L'utilisation d'un masque FFP2 ajusté par l'individu susceptible réduit le risque d'infection d'environ un facteur 10 par rapport à un masque chirurgical ajusté, indépendamment de l'activité de l'individu infectieux. Le risque absolu est nettement plus élevé si ce dernier parle.

Risque d'infection en fonction de différents scénarios de port du masque

La Figure 8 montre la borne supérieure du risque d'infection pour une durée de 20 minutes pour différentes combi-

naisons de masques pour l'individu infectieux (i) et l'individu susceptible (s). F désigne le masque FFP2 avec ajustement de la barre nasale, f sans cet ajustement et S le masque chirurgical avec ajustement de la barre nasale. Les calculs sont effectués pour un individu infectieux qui parle, ce qui maximise le risque.

La configuration la plus sûre correspond au port du masque FFP2 ajusté pour l'individu infectieux et l'individu susceptible (cas FF), et la configuration la plus risquée au port du masque chirurgical (cas SS). Fait intéressant, le risque associé aux masques FFP2 non ajustés (cas ff) est inférieur d'un facteur 2,5 au risque associé aux masques chirurgicaux ajustés (cas SS). Un réglage correct de la barre nasale des masques FFP2 réduit encore le risque d'infection d'un facteur de 30 (cas FF vs cas ff). Le risque d'infection dans les cas asymétriques, c'est-à-dire Ff par rapport à ff, FS par rapport à Sf, et fS par rapport à Sf, est inférieur d'environ 7 à 50% lorsque le masque offrant la meilleure protection ou le mieux ajusté est porté par l'individu infectieux. Cela est lié à l'évaporation des aérosols entre leur émission par l'individu infectieux et leur inhalation par l'individu susceptible, et au fait que les masques filtrent moins bien les aérosols de plus petit diamètre.

Comme mentionné dans la partie Méthode, le calcul des bornes supérieures est très pessimiste par rapport à une configuration en vie réelle. Les valeurs absolues des risques données ici sont très supérieures aux risques réels. Cependant, les risques relatifs sont pertinents. Le fait que l'utilisation d'un masque FFP2 bien ajusté par les deux individus (cas FF) soit la meilleure combinaison, est une conclusion solide. De même, le fait qu'un masque FFP2 dont la barre nasale n'a pas été ajustée fournisse une meilleure protection que le port du masque chirurgical bien ajusté (cas SS).

Discussion

Cet article confirme que le masque FFP2 est plus protecteur contre le risque aérosol que le masque chirurgical, ce qui est d'ailleurs attendu puisqu'il a été conçu pour limiter ce risque. La protection accrue est obtenue même si la barre nasale du masque FFP2 n'est pas ajustée. Le masque FFP2 protège mieux si la barre nasale est ajustée, et si à la fois l'individu infectieux et l'individu susceptible le portent. Les écarts de risque relatif par rapport au masque chirurgical prédits par le modèle sont considérables : un facteur 75 si les masques sont bien ajustés.

Il existe différents types de masques FFP2 : bec de canard, masques à plis, coque. Des études ont décrit le fait que ces masques étaient associés à des effets indésirables et notamment un inconfort [10,11]. À Singapour, la distribution de masque N95 de type bec de canard à 2231 foyers a montré un faible taux d'adaptation du masque au visage estimé à 12,6% [12]. Or, l'obtention d'une étanchéité presque totale pour des masques FFP2 de type coque, bec de canard ou masque à plis parfaitement ajustés, qui est pertinente pour d'autres maladies respiratoires (ex : la tuberculose) [13], n'est pas indispensable dans le cas de la Covid-19. Les masques FFP2 étudiés dans cet article sont de type KN95

Figure 8 – Risque moyen d'infection en fonction des scénarios de port de masque pour une durée d'exposition de 20 min.

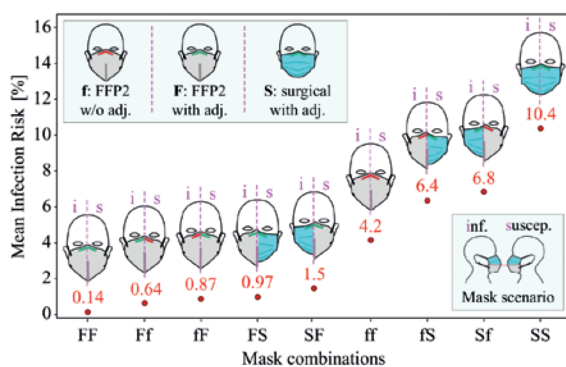


Fig. 6. Mean risk of infection in mask scenarios with different mask combinations for a duration of 20 min. The horizontal axis shows the combination of masks used by the infectious and susceptible with two characters; the first character corresponds to the type of mask worn by the infectious, and the second character corresponds to that of susceptible. Mask types and fittings are abbreviated as follows: f, FFP2 mask without adjustment (Fig. 2, case i); F, FFP2 mask with adjustment (Fig. 2, case ii); S, surgical mask with adjustment

avec des liens autour des oreilles. Ils ont été testés par des volontaires non-professionnels. L'article montre que les masques FFP2 de type KN95 dont la barre nasale est ajustée offrent une excellente protection théorique contre le risque de transmission aérosol de la Covid-19, et qu'un tel ajustement correspond donc aux bonnes pratiques d'utilisation de ce masque dans le cadre de la Covid-19. L'ajustement du masque réalisé à l'aide d'adhésif double face dans l'article est à but purement démonstratif, et n'a pas vocation à être utilisé dans la vie réelle. Il serait utile d'étudier la manière dont sont effectivement portés les masques KN95 avec des liens autour des oreilles, en prenant comme critères l'ajustement correct au visage et l'ajustement de la barre nasale. Il serait également utile d'étudier le confort des masques de type KN95, a priori meilleur que celui des masques FFP2 de type coque, bec de canard ou masque à plis.

Comme cet article présente une modélisation, et qu'il ne comporte pas d'erreur de raisonnement, ses limites sont celles des hypothèses de la modélisation. Ces hypothèses ont été discutées en détail dans la partie Méthode. L'article est basé sur des hypothèses raisonnables et justifiées pour tous les paramètres, sauf le taux de dilution qui est volontairement sous-estimé, ce qui surestime la probabilité de contamination. Il est essentiel de retenir que l'article vise à obtenir des bornes supérieures, et que les valeurs absolues du risque sont souvent très surévaluées. Certaines hypothèses sur les paramètres du modèle sont discutables. En particulier, le facteur f_d lié à la dilution des aérosols est surestimé d'un facteur de plusieurs dizaines ou centaines, suivant les caractéristiques de la ventilation. Par ailleurs, il serait pertinent de connaître la concentration de virus viable (et pas seulement d'ARN⁸ viral) en fonction des caractéristiques de la ventilation de la pièce où se trouve le patient. Ces mesures permettraient de déterminer simultanément les deux facteurs les moins bien connus qui entrent dans la modélisation, à savoir f_d et la quantité de virus viable dans les aérosols. Les taux de fuite des masques sont calculés sur des tailles de visage plutôt standard, de six hommes et une femme. La variabilité entre sujets est grande, et il n'est pas évident a priori que cet effectif soit suffisant pour que les mesures moyennes soient représentatives. Cependant, la comparaison avec succès avec d'autres études montre que les valeurs sont raisonnables. Comme tout article de modélisation, il est pertinent de confronter les résultats aux données. Il est probable que le facteur de protection en condition réelle soit moins important que le facteur 75 mentionné dans l'article, surtout en population générale, notamment à cause d'un ajustement

8- Acide ribonucléique.

sous-optimal. Un point d'attention dans l'interprétation et la conception des interventions et des études cliniques est la proportion du temps d'exposition pendant laquelle le masque est porté. Comme le rappelle l'article, le risque de contamination lorsque l'on ne porte pas de masque est très supérieur au risque avec un masque. Or, un individu alterne entre l'absence de port de masque (ex : en contexte intra-familial ou lors des phases de repas) et le port de masque (ex : en condition de travail), avec des degrés d'observance variables. Un individu exposé de manière continue, qu'il porte un masque ou non, ne verra pas d'avantage notable à porter un masque FFP2, et ceci que l'exposition continue soit faible ou forte. En effet, la plupart des contaminations ont alors lieu lors des périodes sans masque, et ces contaminations ne sont bien sûr pas modifiées en améliorant la protection pendant les périodes avec port du masque, en passant du masque chirurgical au masque FFP2. Pour avoir un intérêt fort au port du masque FFP2, il est nécessaire que l'exposition à la Covid-19 lorsque l'on porte un masque (ex : pour un professionnel de santé au contact fréquent de patients Covid-19) soit très supérieure à l'exposition lorsque nous n'en portons pas (ex : dans le cadre privé ou dans les repas entre collègues). Cette différence d'exposition d'un individu au cours du temps est une explication possible à la différence de conclusion sur l'effet du masque FFP2 dans les essais randomisés sur la grippe [14-15]. Une étude observationnelle prospective récente [16], menée dans des hôpitaux suisses d'août 2020 à mars 2021, ne trouve pas de différence statistiquement significative entre l'utilisation du masque chirurgical et celle du masque FFP2 pour les soignants exposés à peu de patients Covid-19 (<20). Au contraire, la différence est statistiquement significative dans le cas des soignants exposés à de nombreux patients Covid-19 (>20). Dans ce cas, le masque FFP2 est associé à un moindre risque de contracter la Covid-19. En résumé, l'intérêt du port de masque FFP2 dépend de l'exposition de l'individu au cours de temps avec et sans masque, qui dépend elle-même des comportements de l'individu, des mesures de protection pendant les périodes sans masque (ventilation, distanciation) et de l'épidémiologie dans laquelle il évolue.

Les études actuellement disponibles sur l'avantage du masque FFP2 comparé au masque chirurgical pour la protection contre la Covid-19 sont toutes observationnelles et portent sur des effectifs limités. Sur la base de ce constat, il serait pertinent de confronter les résultats de la modélisation décrite dans l'article à des études cliniques sur de plus larges effectifs et randomisées, qui manquent actuellement sur cette question comme cela est le cas plus généralement dans le domaine des interventions non-pharmaceutiques [17]. ■

Références

- Greenhalgh T, Jimenez JL, Prather KA, et al. Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. *The Lancet*;397(10285): 1603-1605. Doi: 10.1016/S0140-6736(21)00869-2.
- Tang JW, Marr LC, Li Y, et al. Covid-19 has redefined airborne transmission. Improving indoor ventilation and air quality will help us all to stay safe. *BMJ* 2021;373:n913. Doi: 10.1136/bmj.n913.
- Bagheri G, Schlenczek O, Turco L, et al. Exhaled particles from nanometre to millimetre and their origin in the human respiratory tract. *medRxiv [Preprint]* 2021. Doi: 10.1101/2021.10.01.21264333.
- Kissler S, Fauver JR, Mack C, et al. Viral dynamics of SARS-CoV-2 variants in vaccinated and unvaccinated individuals. *N Engl J Med* 2021;385(26):2489-2491. Doi: 10.1056/NEJMc2102507.

- 5- Koh X, Sng A, Jing Yee Chee JY, et al. Outward and inward protections of different mask designs for different respiratory activities. *Journal of aerosol science* 2022;160:105905. Doi:10.1101/2021.04.07.21255097.
- 6- Yang F, Pahlavan A, Mendez S, Abkarian M, et al. Towards improved social distancing guidelines: Space and time dependence of virus transmission from speech-driven aerosol transport between two individuals. *Phys Rev Fluids* 2022;5(12). Doi: 10.1103/PhysRevFluids.5.122501.
- 7- Poydenot F, Abdourahmane I, Caplain E, et al. Risk assessment for long and short range airborne transmission of SARS-CoV-2, indoors and outdoors, using carbon dioxide measurements [Preprint]. HAL science ouverte 2021. hal-03213146 2021.
- 8- Mueller T, Karimi S, Poterack KA, et al. Surgical mask covering of N95 filtering facepiece respirators: The risk of increased leakage. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2021;42:627-628.
- 9- Mitze T, Kosfeld R, Rode J, Wälde K. Face masks considerably reduce Covid-19 cases in Germany. *Proc Natl Acad Sci USA* 2020;117:32293-32301.
- 10- Radonovich LJ, Cheng J, Shenal BV, Hodgson M, Bender BS. Respirator tolerance in health care workers. *JAMA* 2009;301(1):36-38.
- 11- Peres D, Monteiro J, Boléo-Tomé J. Medical masks' and respirators' pattern of use, adverse effects and errors among Portuguese health care professionals during the Covid-19 pandemic: A cross-sectional study. *Am J Infect Control* [Internet] 13-10-2021. Accessible à : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196655321006477> (Consulté le 21-02-2022).
- 12- Yeung W, Ng K, Fong JMN, et al. Assessment of proficiency of N95 mask donning among the general public in Singapore. *JAMA Netw Open* 2020;3(5):e209670. Doi: 10.1001/jamanetworkopen.2020.9670.
- 13- Ciotti C, Pellissier G, Rabaud C, et al. Effectiveness of respirator masks for healthcare workers in France. *Médecine et maladies infectieuses* 2012;42:264-269. Doi: 10.1016/j.medmal.2012.05.001.
- 14- MacIntyre C, Wang Q, Sealeet H, al. A randomized clinical trial of three options for N95 respirators and medical masks in health workers. *Am J Respir Crit Care Med* 2013;187(9):960-966. Doi: 10.1164/rccm.201207-1164OC.
- 15- Radonovich LJ, Simberkoff MS, Bessesen MT, et al. N95 respirators vs medical masks for preventing influenza among health care personnel: a randomized clinical trial. *Jama* 2019;322(9):824-833. Doi: 10.1001/jama.2019.11645.
- 16- Haller S, Güsewell S, Egger T, et al. Impact of respirator versus surgical masks on SARS-CoV-2 acquisition in healthcare workers: a prospective multicentre cohort. *Antimicrob Resist Infect Control* 2022;11:27. Doi: 10.1186/s13756-022-01070-6.
- 17- Glasziou P, Michie S, Fretheim A, et al. Public health measures for Covid-19. Lack of good research is a pandemic tragedy. *BMJ* 2021;375:n2729. Doi: 10.1136/bmj.n2729.