

Covid-19 : une transmission par aérosols ?



Yves Brunet est directeur de recherche à l'Inrae (UMR Ispa, Bordeaux) et travaille notamment sur la dispersion atmosphérique des bioaérosols. Il est membre de l'Académie d'agriculture de France.



Gaëlle Uzu est directrice de recherche à l'IRD (UMR IGE, Grenoble) et spécialiste de géochimie de l'atmosphère.

Ils sont tous les deux membres du groupe Atmosphère de l'Alliance pour l'environnement (Allenvi), qui fédère, programme et coordonne la recherche environnementale française (www.allenvi.fr).

La définition de mesures préventives efficaces – non pharmaceutiques – contre la Covid-19 nécessite une bonne compréhension des voies de transmission du virus SARS-CoV-2. Les infections respiratoires sont réputées être potentiellement transmissibles selon trois modalités : le *contact* (soit direct, d'un individu à l'autre, soit indirect, par l'intermédiaire d'un objet contaminé) ; les *gouttelettes*, particules liquides d'une taille telle que, une fois émises, elles suivent une trajectoire de type balistique et retombent rapidement au sol, à proximité immédiate du lieu d'émission ; les *aérosols*, particules liquides (fines gouttelettes) ou solides suffisamment petites pour rester en suspension dans l'air pendant un temps plus long, permettant leur transport sur des distances plus grandes.

Mais l'importance relative de ces trois modes de transmission s'avère très difficile à quantifier expérimentalement, pour la Covid-19 comme pour les maladies de type respiratoire en général : si le mode aérosol est reconnu comme essentiel pour rougeole, tuberculose et varicelle, il fait encore l'objet de débats pour grippe, MERS (syndrome respiratoire du Moyen-Orient) et SARS (syndrome respiratoire aigu sévère). Par ailleurs, en ce qui concerne la distinction entre gouttelettes et aérosols, les différences d'approche constatées entre épidémiologistes et médecins, d'une part, et physiciens et chimistes des aérosols, d'autre part, n'ont pas aidé la communauté scienti-

fique à converger rapidement vers une compréhension commune.

C'est ainsi que, depuis le début de la pandémie de Covid-19, la question des modes de propagation de ce virus particulièrement contagieux est largement débattue. Deux points en particulier ont fait l'objet de controverses : le rôle des aérosols, que beaucoup – dont l'OMS et les agences de santé – jugeaient négligeable devant celui des gouttelettes et du contact (voir l'encadré) ; l'impact de la pollution atmosphérique sur la pandémie, considérée par certaines équipes comme favorisant le transport du virus (voir plus loin). Ces débats, dont la scène médiatique s'est fait l'écho, ont pu retarder la reconnaissance par les agences de santé de faits scientifiquement avérés et contribuer à entretenir un certain flou dans leurs directives.

Dans ce contexte, cet article s'organise autour de quelques questions clés relatives aux modalités de transmission aérienne du virus : quelles tailles de particules (gouttelettes et aérosols) sont émises par les humains ? comment se propagent-elles

¹ Une charge virale est constituée de « virions », ou entités virales comportant au minimum une enveloppe protéique (capside) et un acide nucléique (ARN dans le cas du SARS-CoV-2). Pour qu'il y ait infection, il faut que soit inhalée une quantité suffisante d'ARN viral. À noter qu'un virion est aussi appelé « particule virale », mais pour éviter toute confusion, l'utilisation du terme de « particule » sera réservée dans cet article aux aérosols et gouttelettes.



dans l'air ? peu virale¹ ? cette et pendant cor notamment e cette infectios être infecté ? le elles contribue

« **Aérosols**
L'aérosol de Pour les phys sol est un en liquides en su Ces particules phologie et l éventuelle de leur sour ayant présidé tion en taille nanomètres et leur conc comprise ent 10 millions d verrons plus namique est caractérisé très faible q dence dans minutes à pl

² Un micromètre

³ On parle ici de mètre d'une sphère aérodynamique



La Nuit étoilée,
Vincent van Gogh (1863-1890)

dans l'air ? peuvent-elles transporter une charge virale¹ ? cette charge peut-elle être infectieuse et pendant combien de temps ? quels facteurs, notamment environnementaux, conditionnent cette infectiosité ? comment un individu peut-il être infecté ? les particules de pollution peuvent-elles contribuer à véhiculer le virus ?

« Aérosols » et « gouttelettes »

L'aérosol des atmosphériciens

Pour les physiciens de l'atmosphère, un aérosol est un ensemble de particules solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux. Ces particules sont caractérisées par leur morphologie et leur composition chimique – et éventuellement biologique – qui sont fonction de leur source d'émission et des processus ayant présidé à leur formation. Leur distribution en taille s'étend typiquement de quelques nanomètres à une centaine de micromètres² et leur concentration dans l'atmosphère est comprise entre 0,0001 et 10 mg/m³ (de 100 à 10 millions de particules/cm³). Comme nous le verrons plus loin, leur comportement aérodynamique est déterminé par leur diamètre³ et se caractérise notamment par une vitesse de chute très faible qui leur confère des temps de résidence dans l'atmosphère variant de quelques minutes à plusieurs jours.

² Un micromètre (μm) est un millième de millimètre (10^{-6} m) et un nanomètre (nm) un millionième de millimètre (10^{-9} m).

³ On parle ici de diamètre « aérodynamique », c'est-à-dire du diamètre d'une sphère de densité unitaire qui aurait un comportement aérodynamique identique à celui de la particule considérée.

Une tradition médicale

Pour beaucoup d'épidémiologistes ainsi que pour les agences de santé et l'OMS (voir l'encadré), le seuil de 5 μm est utilisé pour distinguer les aérosols des gouttelettes : la transmission par gouttelettes serait le fait de particules d'un diamètre supérieur à 5 μm , tandis que seules les particules d'un diamètre inférieur à 5 μm permettraient une transmission aéroportée. Certes, on peut conférer à ce seuil un sens physiologique dans la mesure où l'on estime que, au-delà de 5 à 10 μm environ, les particules inhalées se déposent de plus en plus facilement dans les voies respiratoires supérieures (des narines au pharynx) alors que celles de taille moindre pénètrent aisément dans la région pulmonaire, les plus petites d'entre elles pouvant se loger dans les bronchioles [1]. Mais en ce qui concerne les mécanismes d'émission et de transport, cette valeur de 5 μm n'a aucune signification physique particulière, ni théorique ni expérimentale. Elle est arbitraire et son utilisation va dans le sens d'une minimisation, défendue de longue date, du rôle des aérosols dans la transmission aérienne des infections⁴.

Une vision réactualisée

La compréhension des voies de transmission aérienne acquise ces dernières années et en

⁴ On attribue à ce propos un rôle essentiel à Charles Chapin, chercheur en santé publique et directeur de l'Association de santé publique américaine en 1927, dont le livre fondateur *Les sources et les modes d'infection* publié en 1910 a longtemps fait autorité. Il était convaincu que la transmission aérienne était négligeable devant les autres formes.

Une lente convergence des agences de santé

Pendant les premiers mois de la pandémie, l'OMS déclarait (note du 29 mars 2020) que la transmission du SARS-CoV-2 s'effectuait essentiellement par contact et par l'intermédiaire de « grosses » gouttelettes projetées lors de toux ou d'éternuements ; la possibilité que le virus persiste dans l'air ambiant n'était envisagée qu'à l'occasion de procédures médicales particulières susceptibles de générer des aérosols (bronchoscopie, intubation, trachéotomie...). Suite à une lettre ouverte publiée le 6 juillet 2020 par 239 scientifiques de différentes nationalités [1], mettant en garde contre la transmission du virus par aérosols et invitant l'OMS à reconnaître ce risque, l'organisation reconnaissait dès le 9 juillet [2] l'existence dans la littérature scientifique d'un corpus croissant de preuves accréditant la possibilité de transmission aérienne dans des espaces peuplés faiblement ventilés.

En France, le HCSP (Haut conseil de la santé publique) a suivi une évolution comparable. Dans son avis du 17 mars 2020 [3], il affirmait que « *s'il existe, ce mode de transmission [par des aérosols] n'est pas le mode de transmission majoritaire* ». Le 8 avril 2020, il reconnaissait qu'« *on ne peut exclure une transmission par aérosol* », pouvant mener à « *une contamination des espaces clos à distance des patients émetteurs, en particulier lorsque cet espace est petit et lorsqu'il y a plusieurs patients dans le même espace* ». Le 23 juillet, enfin, suite à la lettre ouverte des scientifiques et au changement d'attitude de l'OMS, il réactualisait sa position en affirmant qu'« *une transmission aéroportée du virus SARS-CoV-2 doit être envisagée dans les espaces clos, notamment mal aérés et insuffisamment ventilés, et dans des rassemblements en extérieur* ». Il recommandait alors de poursuivre les recherches sur l'aérosolisation du SARS-CoV-2 et l'infectiosité des bioaérosols porteurs de ce virus.

¹ Cette distance de 1,80 m correspond aux « six pieds » du système d'unités encore utilisé aux États-Unis.

Les CDC américains (Centres pour le contrôle et la prévention des maladies), quant à eux, se sont montrés plus hésitants et sont même à l'origine d'une récente controverse [4]. Le 18 septembre, ils reconnaissaient pour la première fois sur leur site Internet que le virus pouvait se transmettre par l'intermédiaire de « *gouttelettes respiratoires ou petites particules, comme celles contenues dans les aérosols, produites lorsqu'une personne infectée tousse, éternue, chante, parle ou respire. Ces particules peuvent être inhalées par le nez, la bouche, les voies respiratoires, les poumons, et provoquer une infection. On pense que c'est le principal mode de propagation du virus. [...] Il devient évident que [ces aérosols] peuvent rester en suspension dans l'air, parcourir des distances supérieures à 1,80 m¹ et être inhalées par d'autres personnes.* » Trois jours plus tard, malgré le consensus scientifique sur le rôle des aérosols, ils supprimaient toute information relative à ces derniers et aux distances de propagation supérieures à 1,80 m, ne mentionnant plus que la possibilité de transmission par gouttelettes, à moins de 1,80 m de distance. Devant la controverse occasionnée, ils revenaient le 28 octobre à une version plus consensuelle en admettant que « *la Covid-19 peut parfois se transmettre de manière aéroportée* » et « *infecter des individus éloignés de plus de 1,80 m de la personne infectée, ou après que cette dernière a quitté la pièce* » [5].

Références

- [1] Morawska L, Milton DK, "It is time to address airborne transmission of coronavirus disease (COVID-19)", *Clin Infect Dis*, 6 juillet 2020, doi:10.1093/cid/ciaa939.
- [2] World Health Organization, "Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions", 9 juillet 2020. Sur who.int
- [3] Site du HCSP, hcsp.fr
- [4] Tanne JH, "Covid-19: CDC publishes then withdraws information on aerosol transmission", *BMJ*, 24 septembre 2020, doi:10.1136/bmj.m3739.
- [5] CDC, "How COVID-19 spreads", mise à jour le 28 octobre 2020. Sur cdc.gov

Une lente convergence des agences de santé

Pendant les premiers mois de la pandémie, l'OMS déclarait (note du 29 mars 2020) que la transmission du SARS-CoV-2 s'effectuait essentiellement par contact et par l'intermédiaire de « grosses » gouttelettes projetées lors de toux ou d'éternuements ; la possibilité que le virus persiste dans l'air ambiant n'était envisagée qu'à l'occasion de procédures médicales particulières susceptibles de générer des aérosols (bronchoscopie, intubation, trachéotomie...). Suite à une lettre ouverte publiée le 6 juillet 2020 par 239 scientifiques de différentes nationalités [1], mettant en garde contre la transmission du virus par aérosols et invitant l'OMS à reconnaître ce risque, l'organisation reconnaissait dès le 9 juillet [2] l'existence dans la littérature scientifique d'un corpus croissant de preuves accréditant la possibilité de transmission aérienne dans des espaces peuplés faiblement ventilés.

En France, le HCSP (Haut conseil de la santé publique) a suivi une évolution comparable. Dans son avis du 17 mars 2020 [3], il affirmait que « *s'il existe, ce mode de transmission [par des aérosols] n'est pas le mode de transmission majoritaire* ». Le 8 avril 2020, il reconnaissait qu'« *on ne peut exclure une transmission par aérosol* », pouvant mener à « *une contamination des espaces clos à distance des patients émetteurs, en particulier lorsque cet espace est petit et lorsqu'il y a plusieurs patients dans le même espace* ». Le 23 juillet, enfin, suite à la lettre ouverte des scientifiques et au changement d'attitude de l'OMS, il réactualisait sa position en affirmant qu'« *une transmission aéroportée du virus SARS-CoV-2 doit être envisagée dans les espaces clos, notamment mal aérés et insuffisamment ventilés, et dans des rassemblements en extérieur* ». Il recommandait alors de poursuivre les recherches sur l'aérosolisation du SARS-CoV-2 et l'infectiosité des bioaérosols porteurs de ce virus.

¹ Cette distance de 1,80 m correspond aux « six pieds » du système d'unités encore utilisé aux États-Unis.

Les CDC américains (Centres pour le contrôle et la prévention des maladies), quant à eux, se sont montrés plus hésitants et sont même à l'origine d'une récente controverse [4]. Le 18 septembre, ils reconnaissaient pour la première fois sur leur site Internet que le virus pouvait se transmettre par l'intermédiaire de « *gouttelettes respiratoires ou petites particules, comme celles contenues dans les aérosols, produites lorsqu'une personne infectée tousse, éternue, chante, parle ou respire. Ces particules peuvent être inhalées par le nez, la bouche, les voies respiratoires, les poumons, et provoquer une infection. On pense que c'est le principal mode de propagation du virus. [...] Il devient évident que [ces aérosols] peuvent rester en suspension dans l'air, parcourir des distances supérieures à 1,80 m¹ et être inhalées par d'autres personnes.* » Trois jours plus tard, malgré le consensus scientifique sur le rôle des aérosols, ils supprimaient toute information relative à ces derniers et aux distances de propagation supérieures à 1,80 m, ne mentionnant plus que la possibilité de transmission par gouttelettes, à moins de 1,80 m de distance. Devant la controverse occasionnée, ils revenaient le 28 octobre à une version plus consensuelle en admettant que « *la Covid-19 peut parfois se transmettre de manière aéroportée* » et « *infecter des individus éloignés de plus de 1,80 m de la personne infectée, ou après que cette dernière a quitté la pièce* » [5].

Références

- [1] Morawska L, Milton DK, "It is time to address airborne transmission of coronavirus disease (COVID-19)", *Clin Infect Dis*, 6 juillet 2020, doi:10.1093/cid/ciaa939.
- [2] World Health Organization, "Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions", 9 juillet 2020. Sur who.int
- [3] Site du HCSP, hcsp.fr
- [4] Tanne JH, "Covid-19: CDC publishes then withdraws information on aerosol transmission", *BMJ*, 24 septembre 2020, doi:10.1136/bmj.m3739.
- [5] CDC, "How COVID-19 spreads", mise à jour le 28 octobre 2020. Sur cdc.gov

particulier depuis le début de la pandémie de Covid-19 a conduit à réviser cette conception. Ce point a récemment fait l'objet d'un débat à l'occasion d'un colloque en ligne, rassemblant des spécialistes de différentes disciplines, organisé les 26 et 27 août 2020 par les académies nationales américaines des sciences, de l'ingénierie et de médecine [2]. Sur la base des connaissances relatives aux voies d'exposition et à la physique des aérosols, un consensus a émergé pour redéfinir les aérosols comme étant « des particules solides ou liquides en suspension stable dans l'air, de taille inférieure à 100 μm , pouvant être inhalées par le système respiratoire » ; ils « peuvent rester aéroportés pendant un temps long, [leur] concentration est la plus élevée près de la source [et] décroît avec la distance » mais ils « peuvent se déplacer à plus de 2 m [...] et s'accumuler dans une pièce ». Dans cette révision, les gouttelettes sont des « particules liquides de plus de 100 μm de diamètre [qui] se déposent rapidement au sol ou sur une surface [et] se déplacent à moins de 2 m [...] environ, sauf quand elles sont propulsées par des toux ou des éternuements par exemple » ; l'exposition à ces gouttelettes s'effectue « à courte distance via les yeux, le nez ou la bouche ».

Ainsi, cette révision donne un sens beaucoup plus large aux aérosols, qui regroupent toutes les particules susceptibles d'être inhalées et qui, malgré une taille pouvant atteindre plusieurs dizaines de micromètres, sont véhiculées par les mouvements de l'air. Le terme de « gouttelette » est restreint aux grosses particules, à trajectoire balistique et ne pouvant assurer qu'une transmission de proximité, par contact avec les muqueuses externes, sans véritable inhalation. Cette remise en question de l'approche traditionnelle n'a été suivie d'effet que récemment par l'OMS et les agences de santé, dont les préconisations reposaient jusqu'à une date récente sur le principe que la plupart des infections respiratoires étaient transmises par de grosses gouttelettes (voir l'encadré).

Le rôle des aérosols : de solides indices

S'il est souvent difficile de déterminer sans ambiguïté la modalité de transmission d'une infection par le SARS-CoV-2, on dispose maintenant d'un solide faisceau d'indices accréditant l'existence de contaminations par aérosols.



Trois Chanteurs, Adam de Coster (c.1586-1643)

Lors de la répétition d'une chorale aux États-Unis, à l'occasion de laquelle 53 des 61 participants ont été infectés, la voie aérienne est apparue comme le facteur principal de propagation du virus, toutes les précautions ayant été prises pour éviter la transmission par gouttelettes et par contact [3]. Ces deux dernières voies ont été écartées en remontant l'arbre des causes, et les conditions de la répétition – forte vocalisation, concentration des participants, longue durée, aération insuffisante – sont de nature à avoir favorisé ce niveau élevé de contamination. Une transmission par aérosols apparaît aussi comme très probable dans d'autres cas de contamination observés dans des environnements clos et fortement occupés, tels un restaurant [4], un centre commercial [5], un marché de fruits de mer [6], un centre d'appels téléphoniques [7], un navire de croisière [8], un bus [9] et d'autres encore.

Par ailleurs, contrairement à d'autres virus respiratoires génétiquement similaires, on sait que le SARS-CoV-2 peut être transmis par des individus asymptomatiques qui, de façon générale, ne toussent ni n'éternuent de façon significative : la contamination par aérosols est donc

vraisemblable dans de tels cas [10]. Elle peut également rendre compte d'événements de « super-contamination » causés par des « super-émetteurs » [11], individus atypiques produisant beaucoup plus d'aérosols qu'un individu « normal » et dont on pense qu'ils peuvent être responsables de l'infection d'un nombre élevé de personnes, comme il semble que cela ait pu se produire dans certains des cas mentionnés ci-dessus [3].

Plusieurs études sur des modèles animaux ont en outre permis d'observer des contaminations inter-individus sans contact, dans des conditions expérimentales telles que seule une transmission du SARS-CoV-2 par aérosols était possible (par exemple [12] sur des hamsters dorés placés dans des cages séparées ; voir aussi [13] pour d'autres modèles).

Enfin, plusieurs études épidémiologiques menées dans des régions fortement impactées semblent montrer que les politiques de port de masque s'avèrent plus efficaces que celles de distanciation sociale pour limiter les flambées de Covid-19, ce qui plaide en faveur d'une transmission par aérosols plutôt que par contact ou gouttelettes [14].

Les mécanismes de transmission par aérosols

Il est commode de distinguer trois phases dans toute transmission aérienne : l'émission, le transport et le dépôt. Mais pour qu'il y ait contamination, il faut aussi que les particules considérées (aérosols ou gouttelettes) portent une quantité suffisante de virions, que ceux-ci restent infectieux et que l'hôte soit réceptif.

Émission

Qu'elle soit modérée (expiration normale, parole), violente (toux, éternuement) ou intermédiaire (cri, chant, rire, expiration pendant l'effort...), toute activité respiratoire génère un grand nombre de particules de différentes tailles, essentiellement par atomisation⁵ du mucus présent dans les voies respiratoires [10]. Grâce à l'amélioration des techniques de mesure, ces tailles ont pu être déterminées de plus

en plus précisément, notamment dans la gamme submicronique [15] qui n'était pas couverte par les anciennes études [16]. On a ainsi pu montrer que les activités respiratoires humaines produisent un continuum de particules dans une large gamme de diamètres allant environ de 0,1 à 1 000 μm [17-19]. Cependant, une part majeure de ces particules se trouve sous forme d'aérosols dans la gamme 0,5-10 μm [19].

Les tailles et les quantités de particules émises varient avec les lieux et les modes de production. Si l'on sait depuis longtemps que la toux et les éternuements produisent de grosses gouttelettes [16], l'évolution des techniques de visualisation et de simulation numérique a permis de montrer que ces événements génèrent également un grand nombre de fines particules. L'ensemble forme un nuage qui, compte tenu des vitesses d'expulsion⁶, peut atteindre d'emblée des distances de sept à huit mètres [22]. De manière générale, la cavité buccale produit de grosses gouttelettes (y compris au-dessus de 100 μm , même pendant la simple vocalisation), tandis que de nombreux aérosols fins proviennent du larynx et des bronchioles, ne serait-ce que pendant une simple respiration [10,17-19,23]. Une expiration par le nez semble produire un peu moins d'aérosols que par la bouche [19] ; le chant et la parole s'avèrent plus productifs que l'expiration [19] et la toux [11], et ce d'autant plus que la voix est forte [11,23]. Les débits mesurés pendant la vocalisation vont jusqu'à cinquante particules par seconde pour un individu « normal » – générant des concentrations d'environ trois particules par centimètre cube d'air exhalé – et plus de dix fois plus pour un « super-émetteur » [11].

Dès son émission, une particule fluide est soumise à évaporation, qui entraîne une forte diminution de sa taille (de l'ordre de 50 à 70 % en fonction de la température et de l'humidité de l'air [24]), et ceci en un temps court (d'une fraction de seconde pour les aérosols fins à quelques secondes pour les grosses gouttelettes [19,21]). Cette perte d'eau tend ainsi à diminuer la quantité de gouttelettes au profit d'aérosols

⁵ Production de gouttelettes par le passage à vitesse élevée d'un jet gazeux sur une surface liquide.

⁶ De 2 à 50 m/s pour la toux, de 50 à 100 m/s pour les éternuements – à comparer avec moins de 1 m/s pour l'expiration et environ 5 m/s pour la vocalisation [20,21].

en suspension (on parle alors de « résidus » ou « noyaux » de gouttelette) [25].

Charge virale

Grâce à la microscopie électronique, la taille du SARS-CoV-2 a été évaluée entre 60 nm et 140 nm, avec une moyenne de 100 nm, soit 0,1 μm [26]. Mais le virus n'est pas émis « nu » : il est entraîné dans des particules de mucus de différentes tailles générées lors du processus d'atomisation [10]. C'est dans les voies respiratoires inférieures, où sont produits les aérosols les plus fins, qu'on le retrouve le plus souvent [27], bien qu'il soit également présent dans le nez, la gorge et la bouche des personnes infectées. Il a été montré que la simple expiration émet des virions [17,28], que des aérosols de moins de 5 μm en suspension dans l'air peuvent contenir de l'ARN viral [29-32], et que les coronavirus peuvent maintenir pendant un temps appréciable (plusieurs heures en laboratoire) leur infectiosité lorsqu'ils sont transportés dans des particules d'une telle taille [33-35]. Le SARS-CoV-2 paraît en outre plus stable, sous forme aéroportée, que d'autres coronavirus et peut être retrouvé sous forme viable, dans des conditions de laboratoire, de trois à seize heures après émission [35,36].

La charge virale susceptible d'être contaminante peut être largement contenue dans des

particules fines, leur grand nombre compensant leur faible volume individuel : pour le virus de la grippe par exemple (on manque encore d'études pour la Covid-19), une grande [10] voire très grande [37] majorité de l'ARN viral émis se retrouve dans des aérosols de moins de 4 à 5 μm de diamètre. L'émission virale a pu être évaluée dans certains cas : par exemple, à partir des concentrations virales mesurées dans des frottis de voies respiratoires et du nombre de gouttelettes émises, on a pu montrer qu'une minute de forte vocalisation génère un millier de particules porteuses de virions de SARS-CoV-2, sous l'hypothèse qu'elles ont en moyenne un diamètre de 4 μm [23].

Transport

Une fois émise, le devenir d'une particule, notamment sa trajectoire et le temps pendant lequel elle reste en l'air avant de se déposer, est régi par des processus physiques. La gravité joue évidemment un rôle important en accélérant les particules vers le sol, et ce d'autant plus qu'elles sont lourdes : en air calme, une gouttelette de 100 μm met environ 5 s à tomber d'une hauteur de 1,5 m, alors que des aérosols de 10 μm et 1 μm mettent respectivement près de 10 min et plus d'une heure (loi de Stokes). Les mouvements de l'air contribuent fortement à ralentir cet effet de sédimentation en maintenant les particules en suspension pendant des



La Jeune Femme au masque,
Herman Richir (1866-1942)

temps plus longs. Compte tenu de la masse des particules impliquées, le bilan des différents processus en jeu fait que celles qui sont aptes à rester le plus longtemps en suspension sont les particules de l'ordre de $1\ \mu\text{m}$ de diamètre (voir par exemple [38]), dans la gamme où est produite, comme on l'a vu, une majorité d'aérosols.

Ce maintien en suspension, qui peut éventuellement durer plusieurs heures voire plusieurs jours, est susceptible de charger en particules l'air à l'intérieur des bâtiments, comme cela a été observé à plusieurs reprises [30,31], à des concentrations dépendant fortement de l'intensité des sources et de la présence ou non d'un système d'aération [39] ; une aération permettant un bon renouvellement de l'air est un moyen efficace pour diminuer ces concentrations. En air extérieur, la dispersion rapide des particules dans un grand volume d'air entraîne un effet de dilution qui limite fortement la concentration atmosphérique à hauteur de respiration.



Jeune Homme à la fenêtre,
Gustave Caillebotte (1848-1894)

Dépôt

Les particules en suspension finissent par se déposer sur les surfaces environnantes ou par être inhalées. On estime que la dose moyenne provoquant une infection chez 50 % des individus est de l'ordre de plusieurs centaines de virions [40]. Les cavités nasales et, dans une moindre mesure, la zone oropharyngée exerçant un rôle de filtre, les particules au-delà de $10\text{-}20\ \mu\text{m}$ – dites « inhalables » – ont de fortes chances d'être retenues dans les voies respiratoires supérieures [1]. Les plus fines – dites « respirables » – peuvent atteindre les voies inférieures, leur localisation précise dépendant de nombreux facteurs liés à leurs caractéristiques, à celles de l'air inspiré, à l'état des voies respiratoires et aux modalités de respiration [10].

Des récepteurs permettant l'entrée du SARS-CoV-2 dans les cellules ont été retrouvés dans tout le système respiratoire, avec une quantité diminuant depuis le nez jusqu'aux bronchioles [41]. Cela suggère deux modalités d'infection non exclusives : par des particules dites « grossières » (diamètre supérieur à $10\ \mu\text{m}$), avec infection initiale des tissus nasaux suivie d'une aspiration de l'inoculum viral jusqu'au poumon [41] ; par de fines particules pénétrant jusqu'aux bronchioles, ce cas ayant été associé, pour les infections respiratoires en général, à des maladies sévères et une mortalité élevée si la charge virale est suffisante [17].

Le rôle des facteurs environnementaux

Plusieurs facteurs physiques peuvent agir sur les déplacements des aérosols et la longévité du matériel biologique transporté : circulation de l'air, rayonnement, température, humidité, présence de polluants atmosphériques pour citer les facteurs les plus communs.

Des études de laboratoire ont été menées pour caractériser ces effets. Les rayonnements ultraviolets (UV) désactivent efficacement le SARS-CoV-2 : à la lumière du soleil une demi-vie⁷ de moins de 6 min a été mesurée [42], nettement plus courte que la valeur de 1,1 h obtenue dans des conditions de laboratoire [34]. La persis-

⁷ La demi-vie d'une suspension de virus est le temps au bout duquel la moitié de l'échantillon est désactivée.

tance du virus sous forme infectieuse semble donc limitée de jour en extérieur. En l'absence de rayonnement UV, on observe un taux de décroissance de son infectiosité d'environ 2 % par minute [43], mais qui varie avec la température et l'humidité. Si le virus semble pouvoir rester infectieux dans une large gamme de température (de 4 °C à 70 °C par exemple [44]), une augmentation de celle-ci tend néanmoins à réduire son infectiosité [43-45] : par exemple, une durée de 11 min à 10 °C s'est avérée nécessaire pour entraîner une perte d'infectiosité de 90 %, contre 5 min à 40 °C. Une tendance similaire se manifeste pour l'humidité, du moins pour les virus à enveloppe lipidique comme les coronavirus, qui semblent se dégrader plus vite en air plutôt humide [45].

Ces expérimentations ont conduit à rechercher des corrélations à plus grande échelle (villes, régions, pays) entre facteurs climatiques et intensité de la pandémie. Par exemple, une étude réalisée sur seize villes japonaises a montré des tendances allant dans le même sens que ces études de laboratoire [46]. Mais le nombre de facteurs en jeu peut conduire à des résultats inverses : on a constaté sur dix-neuf villes chinoises – comme en d'autres lieux – que le nombre de malades était au contraire corrélé positivement à une augmentation de la température et de l'humidité de l'air [47].

De telles analyses corrélatives sont à considérer avec la plus grande précaution. Ainsi, plusieurs études ont montré l'existence de corrélations entre l'intensité de la pandémie et la pollution de l'air, notamment aux particules fines inférieures à 2,5 µm (dites PM_{2,5}), par exemple en Italie [48], en Angleterre [49], aux Pays-Bas [50] et aux États-Unis [51]. Elles ont mis en évidence qu'une augmentation de 1 µg/m³ de la concentration en PM_{2,5} s'accompagnerait d'une augmentation de 12 % [49] ou de 9,4 % [50] des cas de Covid-19, ou encore de 11 % des décès par Covid-19 [51]. Mais de nombreux facteurs de confusion (densité, structure et mobilité des populations, pratiques sociales...) ainsi que des périodes d'observation aussi courtes limitent la pertinence de telles analyses, qui ne proposent en outre aucune explication causale. Il est cependant bien établi que l'exposition de long terme aux polluants, dans les régions où la

pollution est forte, est un facteur de fragilisation (action oxydative et pro-inflammatoire du système respiratoire, baisse des défenses immunitaires, etc.) qui pourrait faciliter l'infection par le SARS-CoV-2 [51-53].

Sur ce sujet, une étude italienne [48] dont un rapport préliminaire avait été rendu public dès le mois de mars 2020 a eu un large écho médiatique en avançant l'hypothèse que le virus pouvait s'attacher aux particules fines de pollution (de taille inférieure à 10 µm, dites PM₁₀) et être transporté par elles. D'après ses auteurs, la pollution créerait ainsi une « autoroute pour la diffusion virale » qui pourrait expliquer les forts taux de Covid-19 observés en Italie du Nord, région particulièrement polluée. De nombreux scientifiques, notamment en Italie [54] et en France [55], se sont insurgés contre cette interprétation qui selon eux entre en contradiction avec les connaissances en physique des aérosols : « *Ce mécanisme hypothétique est largement rejeté car les probabilités pour qu'une particule de pollution et une particule contenant du virus coagulent pour ne faire qu'une seule particule sont très faibles. Les calculs montrent que la probabilité de coagulation de particules fines est pratiquement négligeable à échéance de plusieurs heures lorsqu'on est en dessous d'une concentration de plusieurs dizaines de milliers de particules par centimètre-cube* » [55], concentration sans commune mesure avec celles qui ont été mentionnées plus haut. Cette voie de propagation ne paraît donc pas vraisemblable.

En conclusion

Beaucoup de résultats récents vont dans le sens d'une possibilité de contamination par aérosols – selon leur définition réactualisée – beaucoup plus grande que ce que l'on pensait, représentant vraisemblablement une voie importante, sinon majeure, de propagation de la Covid-19. Comme le remarque la revue *Nature* en juillet 2020, la reconnaissance d'un risque de transmission aéroportée de la Covid-19 « *n'est pas populaire auprès de certains experts car elle va à l'encontre de décennies de réflexion sur les infections respiratoires* » [56]. La dichotomie entre aérosols et gouttelettes apparaît d'ailleurs quelque peu artificielle, les deux voies étant indissociables dans un continuum de processus générant les infections respiratoires.

Les connaissances acquises récemment ont conduit les agences et les autorités à étendre leurs préconisations initiales (lavage des mains, désinfection des surfaces, distanciation sociale) à l'usage généralisé des masques, en milieu clos comme en milieu extérieur densément peuplé. Malgré son efficacité imparfaite pour lutter contre la diffusion du virus, le port d'un masque couvrant bouche et nez s'avère en effet être un facteur considérable de limitation de la pandémie [57]. On ajoutera à cela le rôle clé de l'aération des lieux clos, entraînant un renouvellement d'air qui permet par son action de dilution d'abaisser les concentrations aériennes de virus [39].

Il reste encore beaucoup de recherches à mener sur les différentes voies de transmission (contact, gouttelettes, aérosols – en distinguant éventuellement aérosols inhalables et respirables [58] – selon les définitions données plus haut) et leur importance relative. La modélisation, permettant de rassembler un ensemble de connaissances acquises (modalités d'émission, tailles des particules, charge virale, viabilité, probabilité de dépôt, efficacité des masques, doses infectieuses...) dans un cadre formel, sera pour cela un outil de choix. Sur une telle base, on a ainsi pu estimer, dans différentes configurations de milieux clos et en considérant diverses mesures limitantes, aussi bien les parts respectives des voies de transmission [59] que les risques d'infection [40] (avec dans ce dernier cas un logiciel de simulation en ligne [60]). De telles démarches sont prometteuses, même si les mécanismes sur lesquels elles reposent, encore fragmentaires, demandent à être approfondis. //

Yves Brunet et Gaëlle Uzu

Références

- [1] Tellier R, "Review of aerosol transmission of influenza A virus", *Emerg Infect Dis*, 2006, 12:1657-62.
- [2] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, "Airborne transmission of SARS-CoV-2: Proceedings of a Workshop in Brief", The National Academies Press, octobre 2020, doi:10.17226/25958.
- [3] Miller SL et al., "Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event", *Indoor Air*, 2020, doi:10.1111/ina.12751.
- [4] Lu J et al., "COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China", *Emerg Infect Dis*, 2020, 26:1628-31.
- [5] Cai J et al., "Indirect virus transmission in cluster of COVID-19 Cases, Wenzhou, China, 2020", *Emerg Infect Dis*, 2020, 26:1343-5.
- [6] Zhang X et al., "Infection risk assessment of COVID-19 through aerosol transmission: a case study of South China seafood market", *Environ Sci Technol*, 2020, doi:10.1021/acs.est.0c02895.
- [7] Park SY et al., "Coronavirus Disease Outbreak in Call Center, South Korea", *Emerg Infect Dis*, 2020, 26:1666-70.
- [8] Azimi P et al., "Mechanistic transmission modeling of COVID-19 on the Diamond Princess cruise ship demonstrates the importance of aerosol transmission", *medRxiv*, 15 juillet 2020, doi:10.1101/2020.07.13.20153049 (preprint).
- [9] Shen Y et al., "Community outbreak investigation of SARS-CoV-2 transmission among bus riders in Eastern China", *JAMA*, 2020, 180:1665-71.
- [10] Dhand R, Li J, "Coughs and sneezes: their role in transmission of respiratory viral infections, including SARS-CoV-2", *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 202:651-9.
- [11] Asadi S et al., "Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness", *Sci Rep*, 2019, 9:2348.
- [12] Sia SF et al., "Pathogenesis and transmission of SARS-CoV-2 in golden hamsters", *Nature*, 2020, 583:834-8.
- [13] Tang S et al., "Aerosol transmission of SARS-CoV-2? Evidence, prevention and control", *Environ Int*, 2020, 144:106039.
- [14] Zhang R et al., "Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19", *PNAS*, 2020, 117:14857-63.
- [15] Morawska L, "Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection?", *Indoor Air*, 2006, 16:335-47.
- [16] Jennison MW, "Atomizing of mouth and nose secretions into the air as revealed by high-speed photography", *Aerobiology*, 1942, 17:106-28.
- [17] Gralton J et al., "The role of particle size in aerosolised pathogen transmission: a review", *J Infect*, 2011, 62:1-13.
- [18] Johnson GR et al., "Modality of human expired aerosol size distributions", *J Aerosol Sci*, 2011, 42:839-51.
- [19] Morawska L et al., "Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities", *Aerosol Sci*, 2009, 40:256-69.
- [20] Wilson NM et al., "Airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 to healthcare workers: a narrative review", *Anaesthesia*, 2020, 75:1086-95.
- [21] Xie X et al., "How far droplets can move in indoor environments—revisiting the Wells evaporation falling curve", *Indoor Air*, 2007, 17:211-25.
- [22] Bahl P et al., "Airborne or droplet precautions for health workers treating COVID-19?", *J Infect Dis*, 2020, doi:10.1093/infdis/jiaa189.
- [23] Stadnytskyi V et al., "The airborne lifetime of small speech

- droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission", *PNAS*, 2020, 117:11875-7.
- [24] Nicas M et al., "Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens", *J Occup Environ Hyg*, 2013, 2:143-54.
- [25] Bourouiba L, "Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: potential implications for reducing transmission of COVID-19", *JAMA*, 2020, 323:1837-38.
- [26] Bar-on YM et al., "SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers", *eLife*, 2020, 9:e57309, sur elifesciences.org
- [27] Wang W et al., "Detection of SARS-CoV-2 in different types of clinical specimens", *JAMA*, 2020, 323:1843-4.
- [28] Yan J et al., "Infectious virus in exhaled breath of symptomatic seasonal influenza cases from a college community", *PNAS*, 2020, 115:1081-6.
- [29] Chia PY, "Detection of air and surface contamination by SARS-CoV-2 in hospital rooms of infected patients", *Nature Comm*, 2020, 11:2800.
- [30] Guo ZD et al., "Aerosol and surface distribution of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 in hospital wards, Wuhan, China, 2020", *Emerg Inf Dis*, 2020, 26:1586-91.
- [31] Liu Y et al., "Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals", *Nature*, 2020, 582:557-60.
- [32] Santarpia JL et al., "Aerosol and surface contamination of SARS-CoV-2 observed in quarantine and isolation care", *Sci Reports*, 2020, 10:12732.
- [33] Lin K, Marr LC, "Humidity-dependent decay of viruses, but not bacteria, in aerosols and droplets follows disinfection kinetics", *Env Sci Technol*, 2020, 54:1024-32.
- [34] Pyankov OV et al., "Survival of aerosolized coronavirus in the ambient air", *J Aerosol Sci*, 2018, 115:158-63.
- [35] van Doremalen N, "Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1", *New Eng J Med*, 2020, doi:10.1056/NEJMc2004973.
- [36] Fears AC et al., "Persistence of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 in aerosol suspensions", *Emerg Infect Dis*, 2020, 26:2168-71.
- [37] Milton DK et al., "Influenza virus aerosols in human exhaled breath: particle size, culturability, and effect of surgical masks", *PLoS Pathog*, 2013, 9:e1003205.
- [38] Brunet Y et al., "Short-scale transport of bioaerosols", in Delort AM, Amato P (eds.), *Microbiology of Aerosols*, Wiley Blackwell, 2018, 137-154.
- [39] Somsen GA et al., "Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission", *The Lancet*, 2020, 8:658-9.
- [40] Lelieveld J et al., "Model calculations of aerosol transmission and infection risk of COVID-19 in indoor environments", *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17:8114.
- [41] Hou YJ et al., "SARS-CoV-2 reverse genetics reveals a variable infection gradient in the respiratory tract", *Cell*, 2020, 182:429-46.
- [42] Schuit M et al., "Airborne SARS-CoV-2 is rapidly inactivated by simulated sunlight", *J Infect Dis*, 2020, 222:564-71.
- [43] Dabisch P et al., "The influence of temperature, humidity, and simulated sunlight on the infectivity of SARS-CoV-2 in aerosols", *Aerosol Sci Technol*, 2020, doi:10.1080/02786826.2020.1829536.
- [44] Chin AWH et al., "Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions", *The Lancet Microb*, 2020, 1:e10.
- [45] Gomes da Silva P et al., "Airborne spread of infectious SARS-CoV-2: Moving forward using lessons from SARS-CoV and MERS-CoV", *Sci Total Environ*, 2020, 10.1016/j.scitotenv.2020.142802.
- [46] Rashed EA et al., "Influence of absolute humidity, temperature and population density on COVID-19 spread and decay durations: multi-prefecture study in Japan", *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17:5354.
- [47] Yao M et al., "On airborne transmission and control of SARS-CoV-2", *Sci Total Environ*, 2020, 731:139178.
- [48] Setti L et al., "Potential role of particulate matter in the spreading of COVID-19 in Northern Italy: first observational study based on initial epidemic diffusion", *BMJ Open*, 2020, 10:e039338.
- [49] Travaglio M et al., "Links between air pollution and COVID-19 in England", 2020, *Environ Pollut*, 268:115859.
- [50] Cole MA et al., "Air pollution exposure and COVID-19 in Dutch municipalities", *Environ Resour Eco*, 2020, 76:581-610.
- [51] Wu X et al., "Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis", *Sci Adv*, 2020, 6:eabd4049.
- [52] Conticini E et al., "Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy?", *Environ Pollut*, 2020, 261:114465.
- [53] Daellenbach KR, "Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe", *Nature*, 2020, 587:414-9.
- [54] Società Italiana di Aerosol, « Informativa sulla relazione tra inquinamento atmosferico e diffusione del COVID-19 », 20 mars 2020. Sur isprambiente.gov.it
- [55] Groupe thématique Atmosphère, « À propos du lien entre la pollution atmosphérique et la propagation du SARS-CoV-2 », Allenvi, 15 mai 2020. Sur allenvi.fr
- [56] Lewis D, "Coronavirus in the air", *Nature*, 2020, 583:510-3.
- [57] Liang M et al., "Efficacy of face mask in preventing respiratory virus transmission: A systematic review and meta-analysis", *Trav Med Inf Dis*, 2020, 36:101751.
- [58] Zhang XS, Duchaine C, "SARS-CoV-2 and health care worker protection in low-risk settings: a review of modes of transmission and a novel airborne model involving inhalable particles", *Clin Microbiol Rev*, 2021, 34:e00184-20.
- [59] Jones RM, "Relative contributions of transmission routes for COVID-19 among healthcare personnel providing patient care", *J Occup Environ Hyg*, 2020, 17:408-15.
- [60] "Why is the risk of coronavirus transmission so high indoors?", *Zeit Online*, 26 novembre 2020. Sur zeit.de