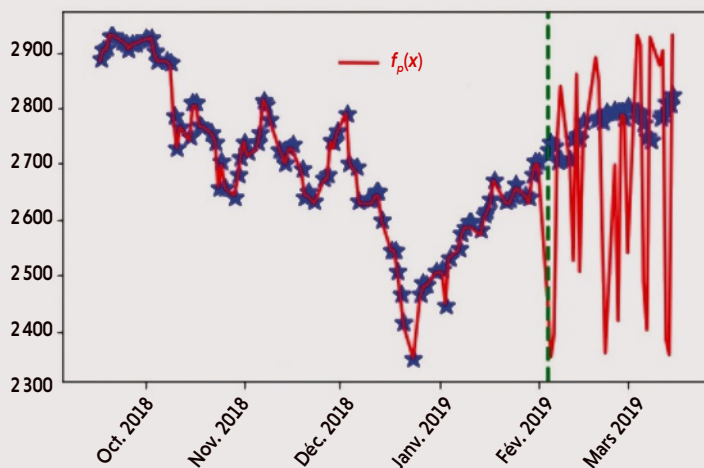


L'ILLUSION DÉÇUE DU SURAJUSTEMENT

5



Laurent Boué a pris 95 valeurs de l'indice boursier américain S&P 500. Il a calculé la valeur de p qui permet à la fonction miraculeuse de Piantadosi, $f_p(x) = \sin^2(2^{kx} \arcsin(\sqrt{p}))$, de redonner ces valeurs. Il a ensuite regardé ce que cela donnait pour les valeurs suivantes de l'indice (au-delà de la barre verticale pointillée verte).

Si la méthode d'approximation par $f_p(x)$ était une bonne façon de découvrir une loi cachée dans les

variations de cet indice boursier, les valeurs suivantes pour le p calculé auraient été proches de celles des données réelles.

Sans surprise, ce n'est pas du tout le cas. Sur le dessin, la courbe rouge est ce que donne $f_p(x)$ et les points bleus sont les valeurs réelles. La fonction $f_p(x)$ permet bien, en changeant p , de s'ajuster à tout ensemble de données, mais ce n'est en rien un moyen pour découvrir des lois cachées. C'est un exemple parfait de surajustement inutile.

comme une fonction qui, à tout point du plan (les nombres complexes sont assimilables à des points du plan), associe un autre point du plan. Cette fonction joue un rôle central en théorie des nombres et, en particulier, la position des valeurs de s qui l'annulent est liée à la répartition des nombres premiers.

Quand on considère des fonctions de ce type, qui produisent des nombres complexes à partir de nombres complexes, les fonctions jouant le rôle des fonctions dérivables se nomment les «fonctions holomorphes». Les fonctions usuelles comme x^n , $\sin(x)$, $\cos(x)$, $\log(x)$ et toutes celles que l'on obtient en les combinant sont bien sûr holomorphes.

Dans la partie du plan correspondant à une bande verticale B des points de coordonnées (x, y) avec $1/2 < x < 1$, Sergei Voronin a démontré une incroyable propriété d'universalité de $\zeta(s)$. Pour toute partie P de cette bande sans trou et compacte (c'est-à-dire de taille finie, et qui contient la limite de toutes ses suites convergentes), et pour toute fonction holomorphe f qui ne s'annule pas dans P , il existe un nombre réel r tel que $\zeta(s+r)$ prend les mêmes valeurs dans P que f , à ϵ près (ϵ , comme précédemment, est une précision que l'on fixe une fois pour toutes).

Dit autrement : quelle que soit la fonction holomorphe f définie sur une zone P sans trou de la bande B , la fonction ζ prend presque les mêmes valeurs que f quand on examine ses valeurs dans une version décalée vers le haut de P . C'est un peu comme si $\zeta(s)$, à elle seule, pouvait imiter toutes les fonctions holomorphes ! Dans π , il y a sans doute toutes les suites finies de décimales, mais dans $\zeta(s)$, on est certain qu'il y a toutes les fonctions holomorphes ! Précisons que le résultat de Sergei Voronin a été étendu à d'autres fonctions que la fonction $\zeta(s)$.

Un autre objet universel fascinant a déjà été évoqué dans cette rubrique, le graphe universel de Rado (voir *Pour la Science* de novembre 2018). Ce graphe infini contient en effet comme sous-graphes tous les graphes finis, et tous les graphes infinis ; de plus, il a la propriété que quand on en enlève une partie finie, ce qui reste est identique à ce dont on est parti.

Le monde infini des mathématiques recèle des merveilles et procure des étonnements bien au-delà, du moins c'est mon point de vue de mathématicien, de tout ce qu'on peut trouver dans le monde physique qui, en comparaison, apparaît parfois terne et ennuyeux ! ■

BIBLIOGRAPHIE

Interpolation lagrangienne, Wikipédia, 2020.

Zeta function universality, Wikipedia, 2020.

L. Boué, **Real numbers, data science and chaos : How to fit any dataset with a single parameter**, 2019 : [arXiv:1904.12320](https://arxiv.org/abs/1904.12320), 2019.

L. Boué, **Programmes pour «Real numbers, data science and chaos: How to fit any dataset with a single parameter»**, 2019 : <https://github.com/Ranlot/single-parameter-fit>

C. Zhang et al., **A study on overfitting in deep reinforcement learning**, prépublication [arXiv:1804.06893](https://arxiv.org/abs/1804.06893), 2018.

S. T. Piantadosi, **One parameter is always enough**, *AIP Advances*, vol. 8(9), 095118, 2018 (<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5031956>).

J. Mayer et al., **Drawing an elephant with four complex parameters**, *American Journal of Physics*, vol. 78, pp. 648-649, 2010.

S. Voronin, **Theorem on the "universality" of the Riemann zeta-Function**, *Math. USSR Izv.*, vol. 9, pp. 443-445, 1975.

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

LES MASQUES DÉMASQUÉS

En pleine pandémie de Covid-19, l'intérêt pour les masques respiratoires a bondi, alors même qu'ils sont en usage depuis longtemps. Mais comment fonctionnent-ils ?

Norme FFP2, masque chirurgical ou encore masque fabriqué maison... Ces mots ont envahi notre quotidien avec la pandémie de Covid-19. En tant que physiciens, il ne nous appartient pas de donner des recommandations sur l'usage de ces protections pour minimiser les risques de contamination. En revanche, nous pouvons nous intéresser aux mécanismes physiques mis en œuvre dans leur fonctionnement. On pourrait croire que les masques agissent, pour l'essentiel, comme des tamis. Or ce n'est pas du tout le cas !

FILTRER LES AÉROSOLS

En toussant, en éternuant, en parlant ou tout simplement en respirant, nous produisons des aérosols : autrement dit, nous émettons dans l'air expiré des particules de tailles diverses. Ce sont typiquement des gouttelettes d'eau de diamètre compris entre 1 micromètre (un millième de millimètre) et 100 micromètres, qui s'évaporent rapidement et libèrent dans l'air bactéries (0,5 à 5 micromètres) et virus (0,02 à 0,3 micromètre,

0,1 micromètre pour le virus SARS-CoV-2, responsable du Covid-19).

Les particules les plus grosses tombent rapidement au sol. Les plus légères, en revanche, restent en suspension. Dans de l'air calme, la durée de sédimentation sur une hauteur de 3 mètres est en effet de 4 minutes pour des particules de 20 micromètres de diamètre, et cette durée est multipliée par 4 à chaque fois que l'on divise la taille par 2 : elle dépasse déjà 1 heure pour des particules de 5 micromètres.

En situation épidémique, on peut filtrer l'air à l'aide d'un masque pour protéger notre système respiratoire de ces aérosols chargés de pathogènes. Le premier effet filtrant auquel on songe est l'effet de tamis : comme dans une passoire, ne pourraient traverser le masque que les particules dont la taille est inférieure à celle des trous. Il y a cependant une difficulté majeure : plus les trous sont petits, mieux on filtre mais plus il est difficile de respirer à travers. Si l'on veut que le masque soit utilisable sans assistance mécanique, un filtre à trous submicrométriques, qui seraient nécessaires pour tamiser bactéries et virus, est exclu.

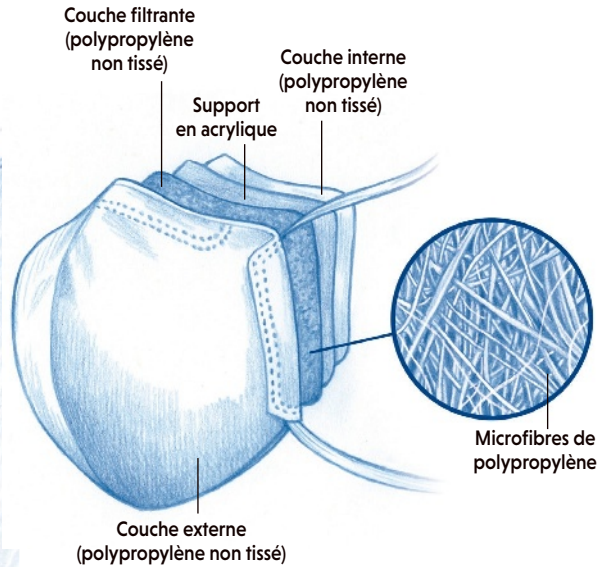
Heureusement, d'autres mécanismes sont à l'œuvre et permettent de piéger des particules de toutes tailles dans le masque. Ce dernier comporte en général une couche, un peu épaisse, composée de fibres non tissées, mais plutôt entrelacées (voir l'encadré page ci-contre). Lorsqu'une particule, entraînée par l'air qui traverse le filtre, vient percuter une fibre, elle s'y colle durablement grâce aux forces intermoléculaires dites « de Van der Waals ». Il faut donc comprendre d'où résultent les collisions particule-fibre.

Aux échelles considérées, on montre que l'écoulement de l'air est dominé par les effets de viscosité et qu'il est



PROTECTION RESPIRATOIRE

Un masque censé protéger contre les particules pathogènes présentes dans l'air que l'on inspire doit comporter des couches filtrantes suffisamment épaisses. Il faut de plus qu'il s'ajuste bien au visage, afin que l'air ne puisse pas s'introduire par les côtés (ce qui se produit avec un simple masque chirurgical). En particulier, si le porteur est un homme, il faut qu'il soit rasé. Ces masques peuvent être portés quelques heures au plus, puis sont à jeter.



Un masque chirurgical (à gauche) empêche que les postillons de son porteur ne se dispersent dans l'environnement. Un masque respiratoire de protection (à droite), bien ajusté, bloque les particules présentes dans l'air inspiré.

laminaire: en arrivant à proximité d'une fibre, les lignes de courant de l'air, régulières, se séparent pour contourner la fibre, puis se rejoignent derrière. Les particules entraînées par l'air suivent, en première approximation, ces lignes de courant.

Si la distance séparant la fibre de la ligne de courant qui porte la particule est inférieure au rayon de celle-ci, la particule percute la fibre et se colle sur elle: c'est l'effet d'interception, d'autant plus important que la particule est grosse (voir l'encadré page 66).

Mais les particules ne suivent pas toujours exactement les lignes de courant. Il

en est ainsi des grosses particules, qui ont de l'inertie due à leur masse: comme une voiture trop rapide dans un virage, au lieu de contourner avec l'air une fibre, elles vont continuer « tout droit » et la percuter. C'est l'effet d'inertie.

Quant aux petites particules, elles sont sujettes au mouvement brownien, dû aux impacts incessants avec les molécules de l'air, en agitation thermique: leurs trajectoires sont erratiques et se jouent des lignes de courant. Lorsqu'une telle particule passe à proximité d'une fibre, elle peut diffuser jusqu'à elle et s'y coller. Contrairement à l'effet d'inertie, cet effet de capture par diffusion est

d'autant plus important que la particule est petite et que l'écoulement est lent.

À ces effets s'ajoutent éventuellement des captures électrostatiques lorsque la particule est électriquement chargée. Quand on fait le bilan, on s'aperçoit que l'efficacité du filtre est moindre pour les particules de tailles intermédiaires (voir le graphique de l'encadré page 66).

En pratique, la partie filtrante des masques est généralement constituée de >

Les auteurs ont notamment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> fibres en polypropylène d'un diamètre de l'ordre de 5 micromètres et formant des pores de tailles variant entre 10 et 20 micromètres, bien supérieures aux tailles des virus et des bactéries. L'efficacité du filtrage est donc assurée par l'épaisseur du filtre: plus il est épais, plus les événements de capture décrits plus haut se multiplient et moins de particules passent.

Un filtrage efficace a cependant deux conséquences: d'une part, la respiration devient plus difficile; d'autre part, si le masque n'est pas parfaitement ajusté au visage, l'air s'introduit par les interstices entre le masque et le visage. La conséquence est que le choix du «bon masque» résulte nécessairement d'un compromis entre diverses exigences: qualité du filtrage, facilité d'utilisation et confort de l'utilisateur.

MASQUES CHIRURGICAUX ET MASQUES FFP2

On distingue deux types de dispositifs. Il y a d'abord les «masques chirurgicaux». Leur objectif principal est d'éviter que les grosses particules émises par celui qui le porte, comme les postillons, se dispersent dans l'environnement. L'efficacité pour filtrer les petites particules en suspension dans l'air n'est pas recherchée: elle est, de fait, très mauvaise.

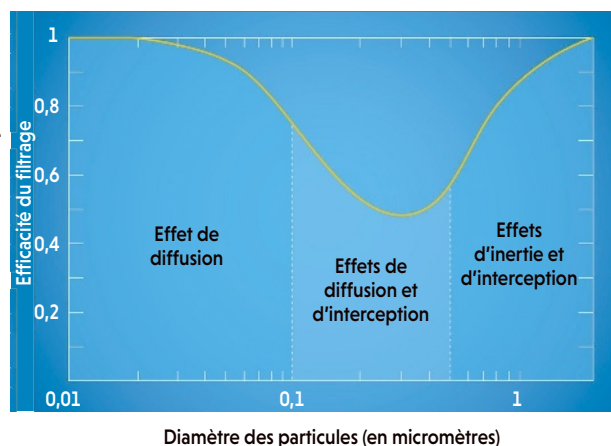
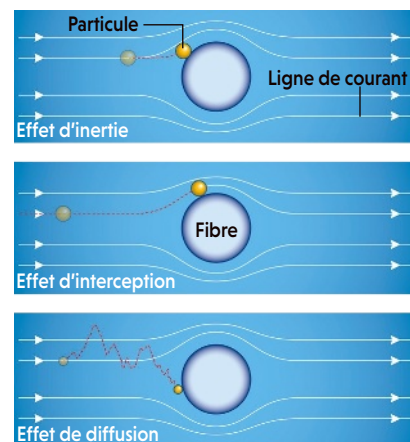
On réalise des tests standardisés en mesurant quel est le pourcentage de particules de 0,06 micromètre (la taille d'un virus) qui passent à travers le masque lorsqu'on fixe le débit d'air à 85 litres par minute, caractéristique d'une respiration très précipitée. Avec des masques chirurgicaux, on obtient des taux très variables, compris entre 4% et 90%, en raison du passage de l'air par les bords du masque. Un tel masque est peu satisfaisant en cas de contacts prolongés avec des malades, mais utile sinon, car il bloque les postillons dans les deux sens et permet d'éviter de se toucher le visage avec les mains.

Une seconde classe de masques est constituée des «respirateurs de protection». Ce sont eux dont on entend le plus parler aujourd'hui: ils sont notés FFP (pour *filtering facepiece*, «pièce faciale filtrante»), avec un numéro qui indique le degré de filtrage. Ces masques respirateurs sont conçus pour filtrer l'air et réduire le nombre de particules et de germes que le porteur inhale.

Le masque FFP2 doit par exemple filtrer au moins 94% (pour un FFP3, 99%) d'un aérosol contenant des particules de

MÉCANISMES DE FILTRATION

Trois principaux mécanismes sont à l'œuvre dans les couches filtrantes des masques. Dans l'effet d'inertie, la particule considérée suit une ligne de courant de l'air mais, par sa masse, quitte cette ligne en continuant tout droit et vient se coller à la fibre. Dans l'effet d'interception, la particule suit une ligne de courant et entre au contact d'une fibre si son rayon est plus grand que la distance entre la fibre et la ligne de courant. Dans l'effet de diffusion, la particule suit une trajectoire erratique, due au mouvement brownien, qui l'amène jusqu'à une fibre; cet effet ne concerne que les particules suffisamment petites. Ces différents effets ont pour conséquence que l'efficacité de la filtration est maximale pour des particules de petite ou grosse taille, et moins bonne pour les particules de taille intermédiaire.



diamètre médian égal à 0,06 micromètre et avoir des fuites totales de l'extérieur vers l'intérieur (filtrage et étanchéité des joints faciaux compris) inférieures à 8% (pour un FFP3, 2%) de l'air inspiré. Cela requiert que les respirateurs doivent être parfaitement ajustés sur le visage, en général avec deux élastiques autour de la tête et un clip au niveau du nez.

FILTRAGE EFFICACE, RESPIRATION DIFFICILE

Comme les masques sont ajustés et épais afin de filtrer l'air, ils offrent une résistance au passage de l'air, que l'on mesure en évaluant la surpression qu'il faut pour assurer l'écoulement: elle est de l'ordre de 2 millibars pour un masque FFP2 avec une respiration précipitée. Cela semble peu, mais c'est du même ordre de grandeur que les variations de pression mises en jeu dans nos poumons. Aussi, le port prolongé du masque en situation de stress peut entraîner des maux de tête. C'est pourquoi certains sont équipés de soupapes respiratoires qui facilitent l'expiration. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Liu et al., **A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation**, *Sustainable Cities and Society*, vol. 32, pp. 375-396, 2017.

H. P. Lee et D. Y. Wang, **Objective assessment of increase in breathing resistance of N95 respirators on human subjects**, *The Annals of Occupational Hygiene*, vol. 55(8), pp. 917-921, 2011.

J. Vendel et al., **Lessons learnt over 30 years of air filtration in the nuclear industry**, *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 170, 012026, 2009.

DURÉE LIBRE

43 %
de réduction *

**MERCI DE JOINDRE
IMPÉRATIVEMENT UN RIB**

Partie réservée au service abonnement Ne rien inscrire