

^ G S Y P I Q I R X I X G E T X Y V I H ... E dans les masques respiratoires

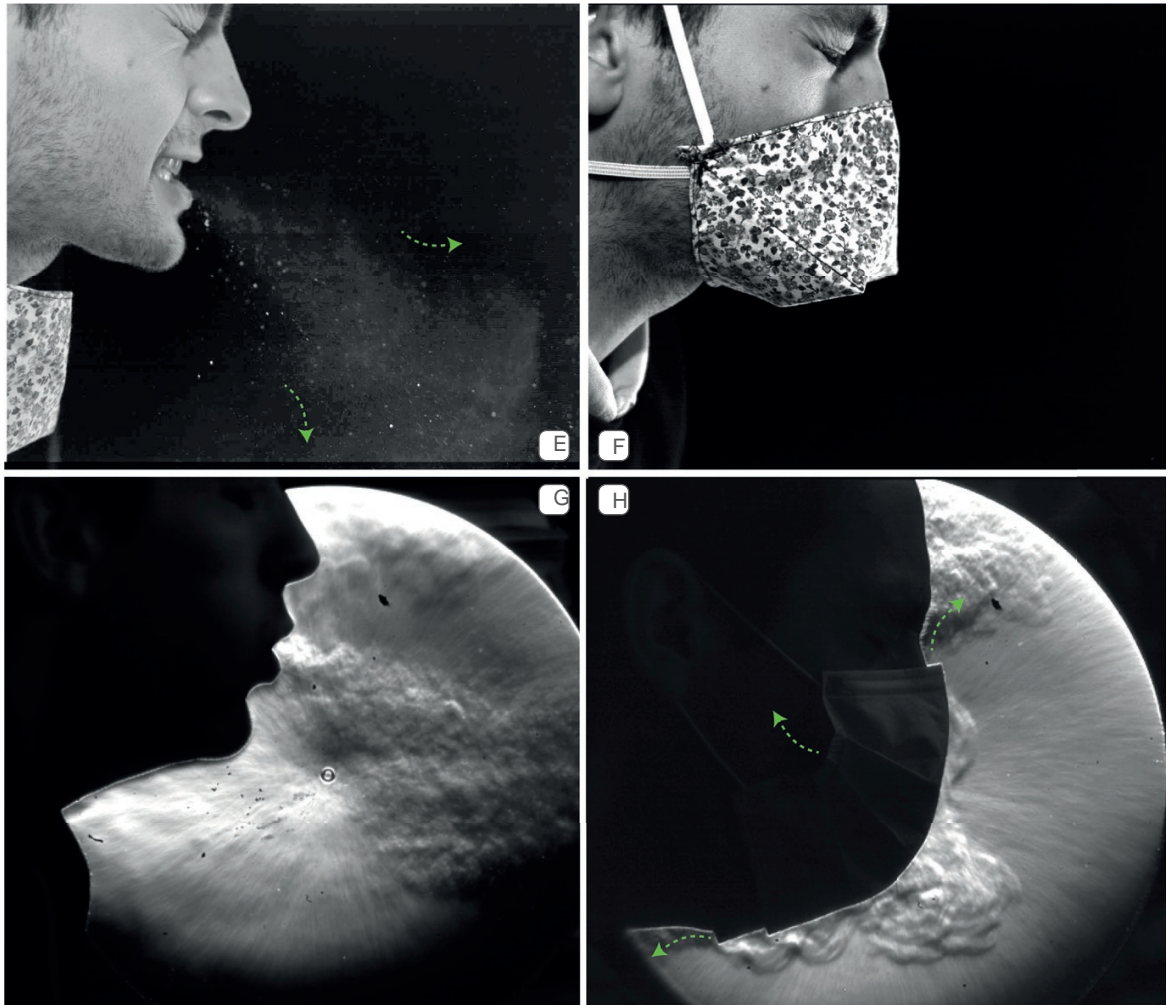
' E Q M P P I (Y T V E X (camille.duprat@ladhyx.polytechnique.fr)

Laboratoire d'hydrodynamique de l'École polytechnique (UMR 7646 CNRS)
LadHyX, École polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex

Il est désormais établi qu'un vecteur important dans les années 1930, puis un important de transmission de la Covid-19. Développement de modèles théoriques au et d'autres maladies respiratoires, se fait partir de la Seconde Guerre mondiale, la respiration de gouttelettes chargées de virus émise notamment par Irving Langmuir et Katherine Blodgett [2-3]. Aujourd'hui, virus. Lors de la respiration, ces gouttelettes sont de petite taille, généralement inférieure au micron, portées par notre souffle à une vitesse de l'ordre du mètre par seconde. Leur taille augmente lorsqu'on parle, tousse ou éternue, ce qui permet une bonne efficacité de capture nous parlons, toussons ou éternuons, pour atteindre quelques microns, voire centaines de microns, lors d'un éternuement. Ces fibres de microns, lors d'un éternuement sont généralement composées de fibres non tissées (généralement avec de fortes variations de diamètre), avec de fortes variations de diamètre, les individus; les vitesses d'écoulement sont alors plus importantes, de l'ordre de quelques mètres par seconde. Selon la taille et leur vitesse, ces gouttes vont être transportées par l'écoulement ambiant ou projetées sur des surfaces ou des individus. Elles peuvent parcourir plusieurs mètres avant de s'évaporer, de se déposer sur un objet ou de tomber sur le sol.

Outre la distanciation physique et l'aération des espaces confinés [1], un élément essentiel pour éviter la propagation de l'aérosol de gouttelettes est le port d'un masque. Un masque se doit d'être respirable, c'est-à-dire de laisser le passage de l'air sans avoir à appliquer une dépression trop importante, tout en capturant les gouttes émises par le porteur du masque lorsqu'il expire et celles présentes dans l'air ambiant lorsqu'il inspire. Ce compromis entre respirabilité et efficacité de filtration a conduit à utiliser des textiles, dès l'Empire romain. Après un premier brevet déposé en 1849 pour un filtre de laine, de nombreuses études se sont intéressées à la filtration par des milieux poreux, avec un essai de pression entre l'amont et l'aval du filtre,

4 V M R G M T I H I P E ¼

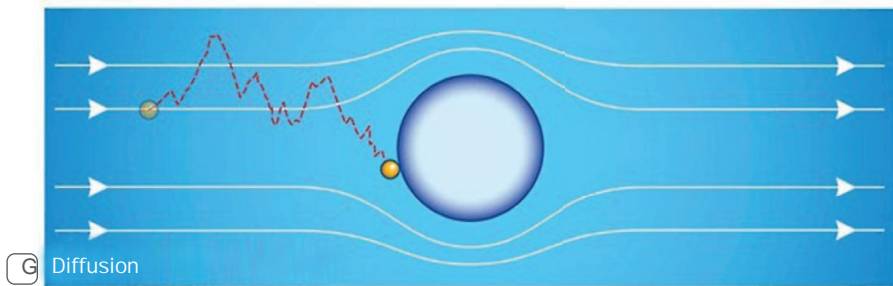
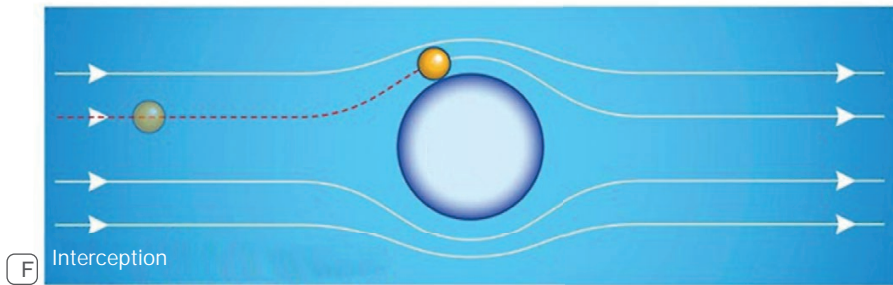
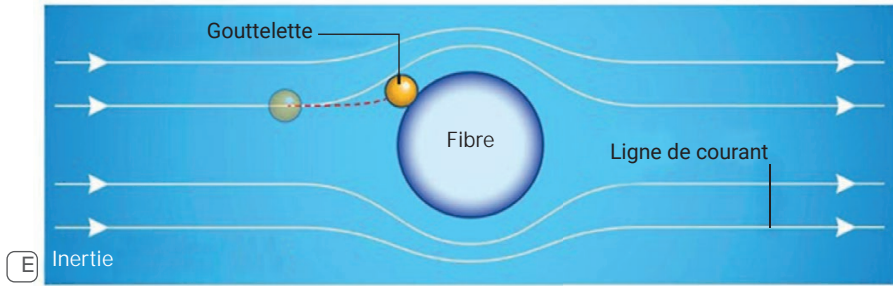


© C. Duprat, B. Decorde, C. Jossierand.

(a-b) Images prises lors d'un éternuement, sans masque (a) et avec un masque « maison » en tissu (b). Les gouttes visibles ici (points lumineux), grâce à un éclairage spécifique, ont une taille de l'ordre de la centaine de microns ; les gouttes plus petites ne peuvent pas être distinguées individuellement, mais forment un halo visible (indiqué par les flèches). Les gouttelettes (du moins celles visibles à la caméra) sont bien arrêtées par le masque.
 (c-d) Visualisation par ombroscopie des écoulements générés lors de la toux, sans masque (c) et avec un masque chirurgical jetable (d). Une partie de l'écoulement passe au travers du masque et est fortement ralentie, tandis qu'une part importante s'écoule par les fuites au niveau du nez, des oreilles et du menton (flèches).

et la pénétration (ou perméance) qui phases est caractéristique de la ltration de peuvent, de plus, être soumises à des caractérise la quantité de liquide retenue par gouttelettes liquides, et est contraire au faces extérieures comme la gravité ou des le ltre en comparant les concentrations de particules solides où la perméance forces électrostatiques (certains masques en gouttelettes en amont et en aval diminue au fur et à mesure que le ltre respiratoires sont en effet traités pour pré-ltre. L'évolution se caractérise par trois bouche [3]. Les caractéristiques des bres (diamètre, mouillabilité, exibilité) ainsi que (ii) l'interception directe de gouttes arri-phase, les gouttelettes se déposent sur la structure du ltre (densité et orientation vant sur les bres ; et (iii) la diffusion forme de perles isolées, et la perte de charge bres, nombre de couches) vont brownienne qui permet aux plus petites et la pénétration augmentent. Dans une conditionner son efficacité de ltrage et la gouttes (de taille inférieure à 0,1 micron) seconde phase, les gouttes s'accumulent et dynamique d'évolution de la perte de être déviées et de rencontrer une bre coalescent sur les bres, jusqu'à former dans (ce troisième mécanisme n'est pas discuté une troisième phase des ponts capillaires ces modèles actuels restent largement dans cet article). aux croisements des bres, puis, en n, ampériques, et ne permettent pas d'établir Im liquide couvrant entièrement les de relation directe entre la microstructure et QTEGX MRIVXMIP bres. On a alors colmatage du ltre, et cette dynamique [3]. Néanmoins, plusieurs perméance chute tandis que la perte de mécanismes de capture ont été proposés Dans le cas d'un aérosol n, dont les charge augmente fortement. L'augmentation caractérisés (g. 2) : (i) l'impact inertiel de gouttelettes sont plus petites que le dia- de la perméance lors des deux premières gouttelettes qui dévient de l'écoulement mètre des bres du textile, le mécanisme

>>>



© Bruno Vacaro

La modification de l'écoulement d'air n'est pas le seul paramètre impactant sur l'efficacité de capture. La présence de liquide sur le réseau de bres lui-même peut intervenir sur la capture des gouttes suivantes. À l'aide d'une étude sur des systèmes modèles composés de bres verticales parallèles, impactées par un aérosol monodisperse de gouttes de 4 microns, nous avons récemment mis en avant le rôle de la distribution spatiale du liquide sur cette collecte par impact inertiel. En effet, la présence de gouttes sur les bres modifie, non seulement la surface de collecte, mais aussi la forme et la taille des obstacles. Par un phénomène de croissance-coalescence, la distribution de gouttes évolue vers une distribution constante de gouttes uniformément réparties, à l'instar des gurgues de soufre obtenues lors de la condensation de rosée. En utilisant cette distribution, nous avons ainsi proposé pour la première fois une comparaison quantitative entre des données expérimentales de collecte et le modèle de Langmuir et Blodgett [4].

-RXIVGITXMSR HMV

Un second mécanisme concerne l'impact de gouttes de taille comparable ou supérieure au diamètre des bres (c'est le cas notamment des grosses gouttes émises lors des éternuements). Dans ce cas, les gouttes sont ralenties par frottement et par capillarité lorsque la bre les traverse ; elles se déforment, et peuvent être arrêtées [5]. Ne sont donc capturées que les gouttes arrivant sur les bres en-dessous d'une vitesse critique de capture, qui dépend du rapport du diamètre des bres à la taille des gouttes, de la viscosité de l'écoulement et de la viscosité de la goutte [6], ainsi que de la géométrie des obstacles, sauf si elles possèdent un petit nombre de Stokes (alignement, angle d'inclinaison...) et de la possibilité des bres [6]. Dans le cas d'une goutte de fluide newtonien peu visqueux, cette vitesse critique dépend du rapport entre l'inertie de la goutte et les forces capillaires, que l'on peut exprimer par un nombre sans dimension, le nombre de Weber (défini dans l'encadré 1). La vitesse critique dépend aussi de la géométrie via le rapport du diamètre de la bre à la taille de la goutte. Ainsi, à faible nombre de Weber et pour un rapport de tailles important, les effets de tension de surface sont dominants et peuvent arrêter la goutte, tandis qu'à nombre de Weber élevé et à petit rapport de tailles la goutte ne peut être suffisamment ralentie pour être capturée [5, 6].

7GLÉQEW HIW XVSMW TVMRGMTEYI Q£GERMWQIW HI GETX YVU H YR K6SYX I B XX (L H F FVS V
HERW YR QEWUYI Dans le cas où le diamètre des gouttes est comparable ou supérieure au diamètre des fibres, le mécanisme d'interception directe est différent et décrit dans la référence [5].
(Figure adaptée de J.-M. Courty et É. Kierlik, *Pour la Science*, n°511, mai 2020, pp. 64-66)

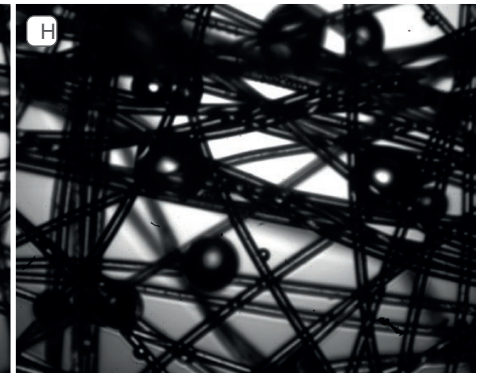
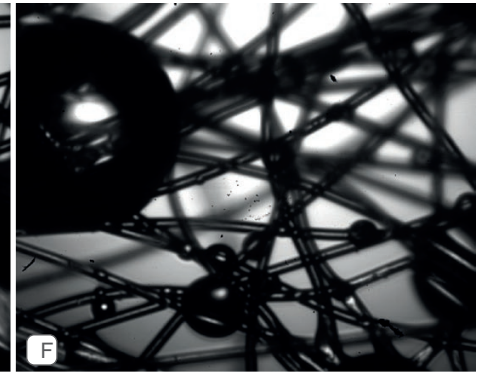
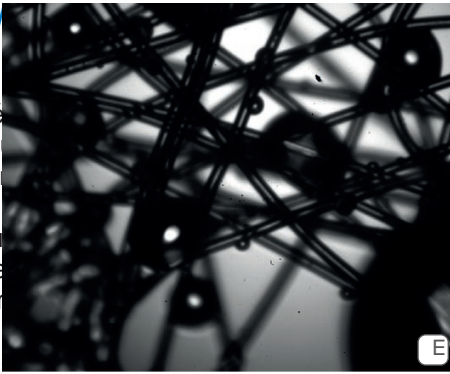
>>>

principal, en l'absence d'effets électrostatiques (qui peuvent être importants pour contourner l'obstacle) et la force des bres en-dessous d'une vitesse critique pour certains litres), est l'impact inertiel-frottement visqueux (proportionnelle à la capture, qui dépend du rapport du diamètre des gouttes contenues dans l'aérosol à la viscosité de l'écoulement et de la viscosité de la goutte). L'efficacité de capture des gouttes par l'écoulement de l'air est à la taille de la goutte). L'efficacité de capture des gouttes dépend donc du nombre de Stokes (alignement, angle d'inclinaison...) et de la géométrie des obstacles, sauf si elles possèdent un petit nombre de Stokes, les gouttes suivent les lignes de courant et ne sont pas capturées par les bres, tandis que les gouttes de fluide newtonien peu visqueux, à vitesses typiques de l'ordre du mètre par seconde pour l'écoulement d'air, et des vitesses critiques de capture qui dépendent du rapport du diamètre des bres à la taille des gouttes, de la viscosité de l'écoulement et de la viscosité de la goutte [6], ainsi que de la géométrie des obstacles, sauf si elles possèdent un petit nombre de Stokes (alignement, angle d'inclinaison...) et de la possibilité des bres [6]. Dans le cas d'une goutte de fluide newtonien peu visqueux, cette vitesse critique dépend du rapport entre l'inertie de la goutte et les forces capillaires, que l'on peut exprimer par un nombre sans dimension, le nombre de Weber (défini dans l'encadré 1). La vitesse critique dépend aussi de la géométrie via le rapport du diamètre de la bre à la taille de la goutte. Ainsi, à faible nombre de Weber et pour un rapport de tailles important, les effets de tension de surface sont dominants et peuvent arrêter la goutte, tandis qu'à nombre de Weber élevé et à petit rapport de tailles la goutte ne peut être suffisamment ralentie pour être capturée [5, 6].



(IY\ Q£GERMWQIV
FMIR HMWXMRGX

Les petites gouttes ne sont capturées qu'au-delà d'une certaine vitesse, lorsque le nombre de Stokes est suffisamment grand, tandis que les grosses gouttes seront capturées qu'en dessous d'une vitesse critique, pour un nombre de Weber petit. Si le premier mécanisme est généralement pris en compte dans les modèles de filtration d'aérosols, le second l'est rarement car les aérosols étudiés sont généralement fins. Pourtant, il pourrait être important, car les gouttes émises par un individu ont des tailles comprises entre quelques microns (respiration) et plusieurs centaines de microns (postillons, éternuements).



© C. Duprat, B. Lasseigne, C. Josserand

'SQQIRX STXMQM
P...I^{3/4}GEGMX£ HI
H...YR QEWUYI

Finalement, l'efficacité d'un filtre est donnée en partie par l'efficacité d'un nombre à capturer les gouttelettes, mais dépend aussi de la structure du réseau de fibres, de l'épaisseur du filtre, et de sa perméabilité. En effet, les filtres sont généralement composés de plusieurs couches (trois dans le cas des masques chirurgicaux ou grand public, jusqu'à dix dans d'autres situations) ; si l'on augmente le nombre de couches, on augmente l'efficacité en créant plus de possibilités de capture, au-delà d'un certain nombre de couches l'efficacité diminue car la perméabilité chute, et les gouttes contournent le masque en empruntant des chemins plus perméables (fuites près de l'épaisseur du filtre, et de sa perméabilité). Bien que prenant en compte ces différents mécanismes, les modèles développés restent largement empiriques. De plus, lorsque les gouttes impactent les fibres, elles doivent y adhérer (g. 3) ; le mouillage des fibres joue donc un rôle essentiel, bien que peu compris. Le matériau doit être assez mouillant pour que les gouttes y adhèrent, mais la force correspondante, caractérisée par un angle de contact, assez importante pour éviter qu'elles ne soient entraînées par l'écoulement. Au sein du filtre, les gouttes vont se déplacer, coalescer, et peuvent saturer le filtre, qui devient alors moins efficace, ou peuvent se détacher et être emmenées par le flux d'air. Ces effets restent aujourd'hui mal caractérisés, et il n'existe pas de relation directe entre la microstructure du filtre et ses propriétés globales de filtration ou de perméabilité. Il est donc nécessaire de mesurer les caractéristiques de chaque masque pour en évaluer l'efficacité, notamment dans le cas de masques artisanaux en tissu, ce qui nécessite de développer des méthodes simples à implémenter [8]. Dans le cas des masques lavables, une norme et un protocole d'essai ont été mis en place pour garantir le maintien des propriétés de filtration et de perméabilité après plusieurs cycles de lavage-séchage (encadré 2).

'ETXYVI HI KSYXXIP (spray) contenant plusieurs centaines de gouttes, de quelques microns à plusieurs centaines de microns. Le diamètre des fibres est de l'ordre de 10 µm.

TEV YRI GSYGLI H...YR QEWUYI GLMVYV

2SQFVI HI 7XSOIW IX RSQFVI HI

Encadré 1

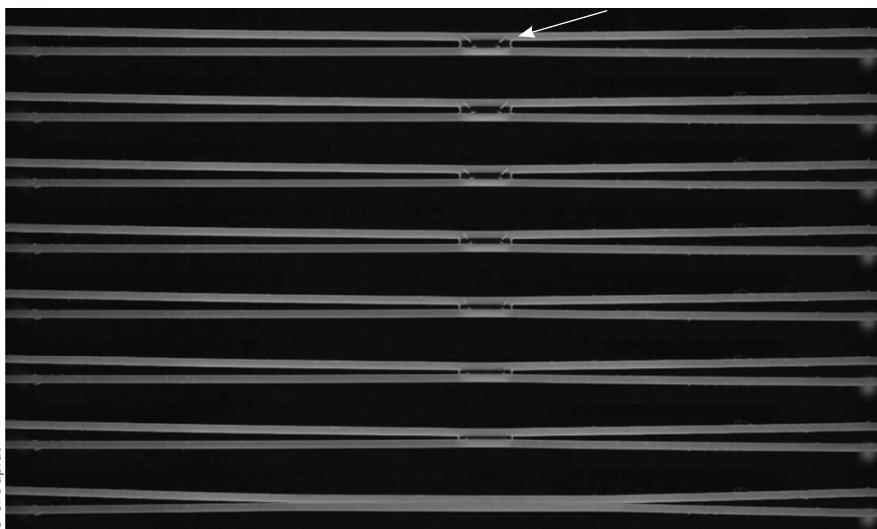
Pour une goutte de rayon r_d , d'un liquide de densité ρ et de tension de surface avec l'air γ , portée par un écoulement d'air (de viscosité dynamique μ) à la vitesse U , ou projetée à une vitesse v , arrivant sur une fibre de diamètre d , on peut définir les nombres sans dimension suivants :

- le $RSQFVI HI$ ~~Stokes~~ compare le temps que met une goutte pour être ralentie par les frottements visqueux par rapport au temps que met l'air pour contourner l'obstacle : $St = 4\rho r_d^2 U / (9\mu d)$,
- et le $RSQFVI HI$ ~~Weber~~ compare l'accélération de la goutte et les forces capillaires : $We = \rho r_d v^2 / \gamma$.

On considère des gouttes aqueuses ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 60 \text{ mN/m}$) impactant des fibres de diamètre $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$. Ainsi, des petites gouttes de rayon $r_d = 3 \text{ }\mu\text{m}$ portées à $U = 1 \text{ m/s}$ par de l'air chaud ($\mu = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) donnent un nombre de Stokes $St = 20$, et sont donc capturées. Des plus grosses gouttes de rayon $r_d = 50 \text{ }\mu\text{m}$ projetées à une vitesse $v = 5 \text{ m/s}$ ont un nombre de Weber $We = 2$, et peuvent être capturées par les fibres.

Bien que prenant en compte ces différents mécanismes, les modèles développés restent largement empiriques. De plus, lorsque les gouttes impactent les fibres, elles doivent y adhérer (g. 3) ; le mouillage des fibres joue donc un rôle essentiel, bien que peu compris. Le matériau doit être assez mouillant pour que les gouttes y adhèrent, mais la force correspondante, caractérisée par un angle de contact, assez importante pour éviter qu'elles ne soient entraînées par l'écoulement. Au sein du filtre, les gouttes vont se déplacer, coalescer, et peuvent saturer le filtre, qui devient alors moins efficace, ou peuvent se détacher et être emmenées par le flux d'air. Ces effets restent aujourd'hui mal caractérisés, et il n'existe pas de relation directe entre la microstructure du filtre et ses propriétés globales de filtration ou de perméabilité. Il est donc nécessaire de mesurer les caractéristiques de chaque masque pour en évaluer l'efficacité, notamment dans le cas de masques artisanaux en tissu, ce qui nécessite de développer des méthodes simples à implémenter [8]. Dans le cas des masques lavables, une norme et un protocole d'essai ont été mis en place pour garantir le maintien des propriétés de filtration et de perméabilité après plusieurs cycles de lavage-séchage (encadré 2).





© C. Duprat

Le rétrécissement des fibres dû aux forces capillaires, en partie à l'origine du rétrécissement observé lors du séchage des textiles.

Comme il n'existe pas de modèle liant microstructure et propriétés globales, il est nécessaire de tester chaque matériau pour chaque application spécifique, et il a fallu mettre en place un protocole pour obtenir une norme pour les masques « maison » lavables, qui offrent une alternative durable aux masques chirurgicaux jetables.

Un protocole d'essai établi par la Direction générale de l'armement (DGA) [9] fixe des critères de perméabilité (respirabilité supérieure à $96 \text{ litres.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour une dépression maximale de 100 Pa) et d'efficacité de filtration des projections (90% des gouttes de $3 \mu\text{m}$), conditions remplies par divers assemblages (masque trois couches tissu coton – non tissé viscose – tissu coton, ou deux couches de non tissé polypropylène ou de tissu coton). L'intérêt de ces masques est qu'ils peuvent être lavés. Néanmoins, la DGA met en garde sur l'effet d'un cycle de lavage-séchage sur les propriétés des masques, qui peuvent alors rétrécir. Ce rétrécissement, témoin d'une déformation de la structure fibreuse, est bien connu, mais finalement peu compris. Il est lié, entre autres, aux forces capillaires qui s'exercent entre les fibres, et dépend de la structure du textile, de la matière, mais aussi du mode de séchage ; ainsi, un textile séché en centrifugeuse/sèche-linge, où les ponts capillaires sont cassés, préserve la structure du textile, tandis qu'un séchage libre sur ligne conduit à un rétrécissement plus fort et une structure plus rigide.

Cet effet peut s'appréhender en regardant un système idéalisé à deux fibres : une goutte s'évaporant entre deux fibres flexibles exerce une force capillaire qui tend à déformer les fibres et à les rapprocher (fig. E1). Cette force augmente lorsque le volume de la goutte diminue, car sa forme évolue [10]. Ainsi, dans une certaine gamme de paramètres, le liquide peut s'étaler spontanément lors du séchage lorsqu'il atteint un volume critique. Pour ce volume, la force exercée est telle que les fibres se trouvent à une distance pour laquelle le liquide préfère s'étaler entre les fibres que rester sous forme de goutte, comme on peut le voir sur la figure E1.

La note de la DGA rapporte que le rétrécissement, obtenu après séchage mécanique, conduit à une amélioration de l'efficacité de filtration (de 92,0% à 95,4%), avec, en revanche, une diminution de perméabilité à l'air (en moyenne de -25%, et jusqu'à -88% pour des textiles qui se rétractent beaucoup !). Ces variations sont la signature d'une modification des distances entre fibres, liée en partie aux effondrements entre fibres voisines comme observé sur les modèles à deux fibres, mais aussi sur des membranes fibreuses plus complexes.

>>>

'SRGPYWMSR

Les questions soulevées par les masques sont donc riches, mêlant capillarité, milieux poreux et effets aérodynamiques. Ces systèmes complexes ont été étudiés pour de nombreuses autres applications ; nous avons évoqué la filtration, où les textiles non tissés sont très répandus, mais d'autres usages sont apparus, comme la récupération d'eau douce à partir de brouillard. En parallèle de développements industriels utilisant une approche globale à base de modèles empiriques, se sont développées des études fondamentales sur des systèmes modèles. Il est maintenant essentiel de concilier les mécanismes fondamentaux, à l'échelle de la fibre et du pore, à la réponse globale du textile ; cela ne peut se faire qu'en rapprochant les chercheurs en textiles et les physiciens de la matière molle. Il est aussi essentiel de mieux caractériser la capture et le réentraînement de gouttes par des fibres enchevêtrées, ainsi que les écoulements autour et au travers de textiles flexibles comme les vêtements à brouillard ou les masques, ce que nous avons démarré, en y associant désormais des médecins ■

6 £ J £ V I R

- 1• J.-M. Courty *et al.*, *Pour la science* (2020) 88-89.
- 2• I. Langmuir et K. Blodgett, *A mathematical Army Airforces Technical Report 5418*, Air Technical Service Command, Washington D.C. (1946).
- 3• R. Mead-Hunter *et al.*, *Separation and Purification Technology* **133** (2014) 484-506.
- 4• R. Labbé et C. Duprat, *Soft matter* **15** (2019) 6946-6951.
- 5• É. Lorenceau *et al.*, *J. Colloid Interface Sci.* (2004) 192-197.
- 6• J. Comtet *et al.*, *Soft Matter* (2016) 149-156.
- 7• J.W. Tang *et al.*, *Journal of the Royal Society Interface* (2009) S727-S736.
- 8• E.P. Fischer *et al.*, *Science Advances* (2020) eabd3083
- 9• « Lettre n°4 à l'attention des industriels sollicitant DGA. Maîtrise NRBC pour les masques », Direction Générale de l'Armement (3 avril 2020).
- 10• C. Duprat et H.A. Stone (eds.), "Elastocapillarity", dans *Fluid-structure interactions in low-Reynolds-number flows*, Royal Society of Chemistry (2015).