

L'ESSENTIEL

> Au moment du débouchage, toute l'énergie enfermée dans une bouteille sous pression se libère en quelques millièmes de seconde sous la forme d'un jet de gaz dont les caractéristiques sont remarquables.

> Le jet de dioxyde de carbone cristallise sous la forme d'un

nuage bleuté. Dans la première milliseconde, ce jet de gaz s'échappe avec une vitesse supersonique.

> Le phénomène a été observé par caméra ultrarapide et modélisé. Sous le bouchon s'élevant dans les airs se succèdent plusieurs ondes de choc.

LES AUTEURS



GÉRARD LIGER-BELAIR
professeur à l'université de Reims Champagne-Ardenne, Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique



ABDESSAMAD BENIDAR
maître de conférences à l'université de Rennes 1, Institut de physique de Rennes



ROBERT GEORGES
professeur à l'université de Rennes 1, Institut de physique de Rennes

Quand le champagne franchit le mur du son

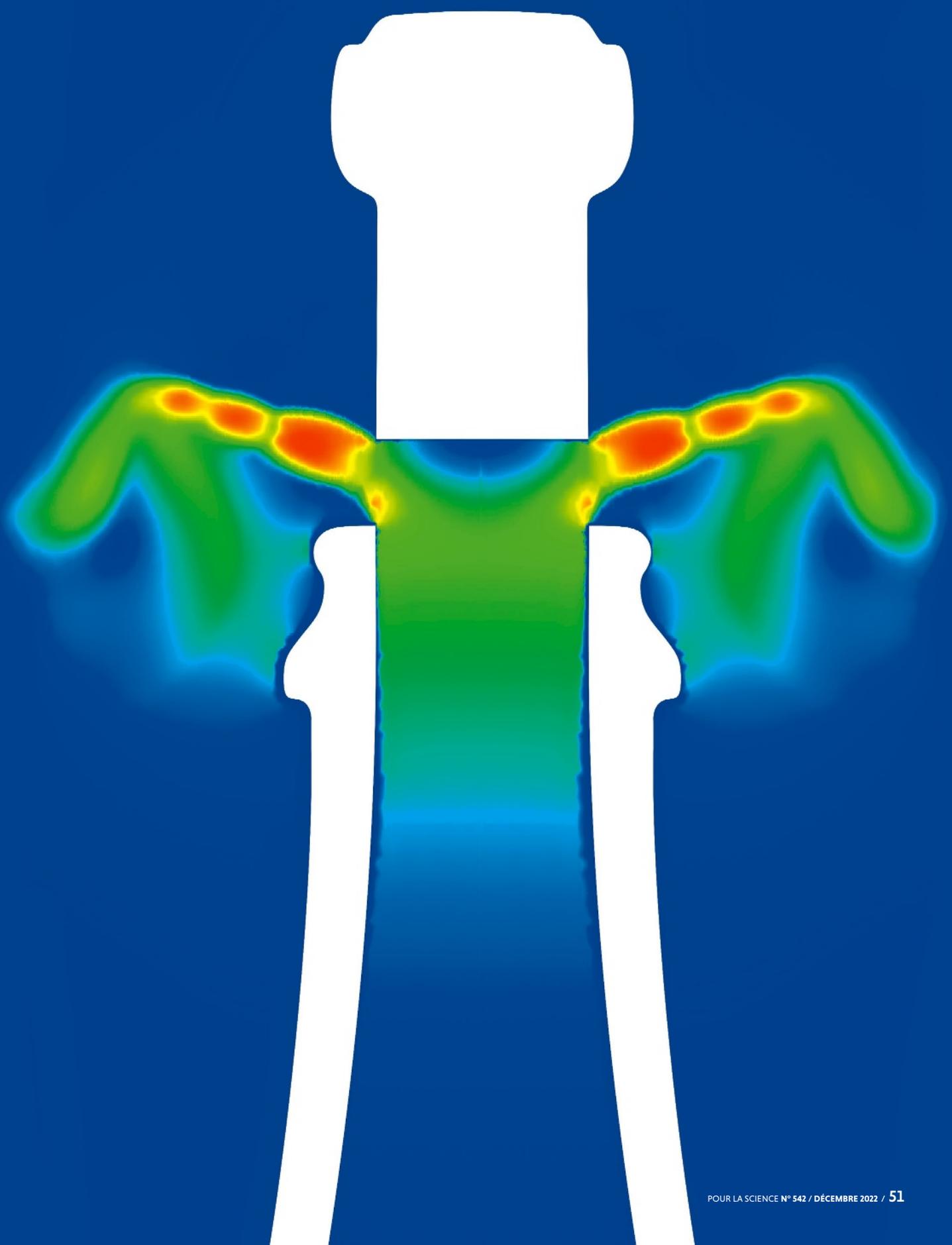
Le « pop! » d'une bouteille de champagne qu'on débouche n'a pas grand-chose en commun avec le « bang! » produit par un avion de chasse dépassant la vitesse du son. Et pourtant! Le gaz qui expulse loin le bouchon s'échappe avec une vitesse supersonique, quelle que soit la température de la bouteille. La preuve... en images.

Chaque année, ce sont près de 300 millions de bouteilles de champagne qui sont débouchées dans le monde. Et ce sont presque dix fois plus de bouchons qui sautent annuellement si on tient compte de toutes les bouteilles de vin effervescent produites hors Champagne. Il nous semblait donc légitime de consacrer un travail de fond aux processus physiques qui accompagnent le « pop! » devenu mondialement iconique d'un bouchon de champagne qui saute sous l'effet de la pression qui règne dans la bouteille.

Au cours d'une seconde fermentation alcoolique en bouteille close (qu'on appelle la « prise de mousse »), les vins de Champagne et les vins effervescents élaborés selon la méthode traditionnelle champenoise se chargent en dioxyde

de carbone (CO₂) dissous. En parallèle, conformément à la loi de Henry, la pression partielle du CO₂ augmente dans la bouteille. Or, la solubilité du CO₂ étant très dépendante de la température du vin, la pression qui règne dans une bouteille de champagne close et en équilibre thermodynamique avec son environnement est également très dépendante de sa température. Elle varie de 4 bars à 0 °C, à près de 15 bars à 40 °C, (*voir la courbe page 53*). Au moment du débouchage, toute l'énergie enfermée dans une bouteille sous pression se libère alors en quelques millièmes de seconde sous la forme d'un jet de gaz dont les caractéristiques sont remarquables par bien des aspects, comme les mécanismes à l'origine de la coloration bleue prise par le gaz dans le goulot de la bouteille, que nous avons décrits précédemment (*voir Pour la Science, juin 2018*).

Le gaz se détend, en s'échappant par le petit interstice annulaire entre la bouteille et le bouchon. Il franchit des zones de haute vitesse délimitées par une séquence d'ondes de choc successives. En simulation, les cellules supersoniques (*en rouge*) sont séparées par des ondes de choc droites.





Un gaz supersonique vient percuter le bouchon, qui se déplace, lui, à environ 60 kilomètres par heure. Une onde de choc détachée se forme devant le bouchon, révélée par la caméra ultrarapide (page ci-contre, elle apparaît nettement sur les trois instantanés, séparés de 167 microsecondes).

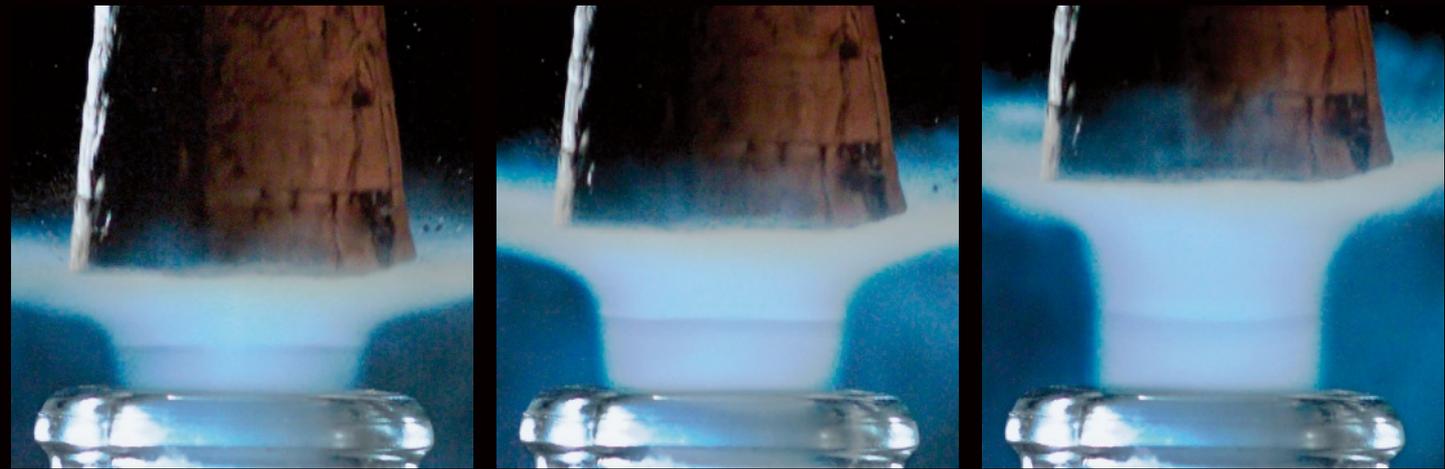
Le plus inattendu de ces effets est, sans doute, celui que nous avons récemment mis en évidence : au moment de son expulsion hors du goulot de la bouteille, le jet de gaz est toujours supersonique. Autrement dit, il présente un nombre de Mach M (du nom du physicien et philosophe autrichien Ernst Mach, ce nombre est défini comme le rapport de la vitesse du gaz sur la vitesse locale du son) égal à 1 à l'extrémité du goulot, puis supérieur à 1 au-delà. Le calcul (voir l'encadré page ci-contre, équation 4) indique que le rapport de pression critique, nécessaire pour atteindre le régime supersonique, pour le CO_2 contenu dans une bouteille ouverte dans une pression ambiante de 1 bar, vaut 1,83. Au-delà de cette valeur, l'écoulement devient sonique en sortie de bouteille puis accélère encore à des vitesses supersoniques en parvenant dans l'air ambiant. En revanche, en deçà de cette valeur, il ne parvient pas à atteindre la vitesse du son en sortie de bouteille et décélère fortement sous l'effet de la brusque augmentation de sa section de passage une fois éjecté en dehors de la bouteille. Or on constate que le rapport de la pression dans la bouteille encore bouchée sur la pression atmosphérique (de 1 bar) augmente avec la température de la bouteille, et qu'il est, dès 0 °C, systématiquement très supérieur à la valeur critique de 1,83. Le gaz est donc toujours expulsé à des vitesses supersoniques.

UNE ONDE DE CHOC DANS LE PANACHE DE CONDENSATION

Pour découvrir cette caractéristique inattendue, il était nécessaire d'examiner le détail des phénomènes à l'œuvre lors de la toute première milliseconde qui suit le débouchage d'une bouteille de champagne. Nous avons pour cela utilisé une caméra ultrarapide (Phantom Flex) capable de filmer la scène à 12000 images par seconde.

Qu'observe-t-on? Pour la bouteille à 6 °C, l'observation du panache blanchâtre qui apparaît au-dessus du goulot est bien conforme à ce qui a déjà été décrit dans la littérature scientifique. Au moment du débouchage, la détente du volume de gaz sous pression dans le col de la bouteille s'accompagne d'une chute de sa température. En se détendant, le nuage de gaz refroidit l'air ambiant et la vapeur d'eau qu'il contient. En se refroidissant, la vapeur d'eau se condense alors sous la forme d'un brouillard de minuscules gouttelettes micrométriques qui diffusent la lumière ambiante, de façon isotrope dans l'espace et pour toutes les longueurs d'onde du spectre lumineux, conférant ainsi au panache de condensation une teinte blanchâtre. Cependant, pour les bouteilles stockées à 20 et à 30 °C, le panache de condensation change de forme et de couleur. On peut même y observer l'apparition d'une curieuse ligne horizontale qui progresse dans le sillage du bouchon qui saute (voir les instantanés page ci-contre), avant de disparaître moins d'une milliseconde après l'éjection du bouchon. Afin de comprendre et d'interpréter nos observations, un peu de théorie s'impose.

Lorsque le bouchon saute, le gaz carbonique sous pression se détend brutalement hors du goulot de la bouteille, sous la forme d'un jet supersonique qui propulse le bouchon à une vitesse caractéristique de l'ordre de 50-60 kilomètres par heure. Mais le caractère adiabatique de la détente impose que la température du jet de gaz chute concomitamment de plusieurs dizaines de degrés. Le volume de gaz se détend en effet suffisamment brutalement pour qu'il n'y ait pas d'échange de chaleur avec l'air ambiant. Pour des bouteilles dont la pression dépasse 6 à 7 bars, le jet de gaz carbonique qui jaillit hors du goulot voit sa température chuter sous la celle de la solidification du CO_2 gazeux (qui est de l'ordre de - 79 °C à



LES LOIS DE LA PHYSIQUE... DU DÉBOUCHAGE

1 Équation de Barré de Saint-Venant

Elle indique la vitesse maximale atteinte selon la nature du gaz

$$c_p T_0 = c_p T + \frac{1}{2} v^2$$

c_p : capacité calorifique massique ;
 v : vitesse du gaz ; T_0 : température du gaz à l'arrêt ; T : température du gaz en écoulement
 $c_p T_0$: enthalpie (massique) du gaz dans la bouteille, c'est la part de son énergie interne qui peut éventuellement être transformée en énergie cinétique $1/2 v^2$

2 Loi de Laplace

Elle explique pourquoi le jet de CO_2 cristallise

$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Elle s'applique pour un gaz parfait en évolution adiabatique. C'est le cas du CO_2 qui s'échappe de la bouteille, qui n'a pas le temps d'échanger de la chaleur avec l'atmosphère ambiante. P_0 est la pression statique du gaz dans la bouteille encore bouchée ; P est la pression statique du gaz en écoulement ; γ est le rapport des capacités calorifiques à pression et volumes constants (1,3 pour le CO_2).

3 Relation isentropique d'un écoulement supersonique

Elle relie température et régime supersonique

$$\frac{T}{T_0} = 1 / \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)$$

Cette relation est obtenue à partir de (1) et (2). Elle permet de calculer la température d'un écoulement adiabatique d'un gaz parfait à partir de son nombre de Mach M (rapport de la vitesse du gaz à la vitesse locale du son).

4 Condition sonique

Elle indique le seuil de pression à partir duquel le gaz atteint la vitesse du son

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

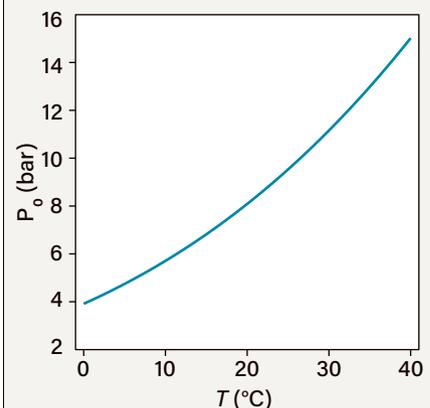
Les équations (2) et (3) conduisent au rapport de pression minimal nécessaire pour que le gaz atteigne la vitesse du son en sortie de bouteille ($M = 1$). L'extrémité de la bouteille se comporte alors comme un col sonique et l'écoulement aval passe en supersonique.

5 Relation de Rankine-Hugoniot à la traversée d'une onde de choc droite

Elle explique pourquoi on observe des ondes de choc successives

$$M_2^2 = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right) / \left(\gamma M_1^2 - \frac{\gamma-1}{2} \right)$$

Elle fournit le nombre de Mach M_2 en aval d'une onde de choc droite à partir du nombre de Mach M_1 en amont. L'écoulement redevient obligatoirement subsonique à la traversée d'une onde de choc droite ($M_2 < 1$).



La pression qui règne dans une bouteille de 75 cl augmente avec la température.



la pression ambiante de 1 bar). Le jet de CO_2 supersonique cristallise alors sous forme de paillettes de neige carbonique. Ces minuscules cristaux de neige carbonique diffusent la lumière ambiante, et le jet de CO_2 est alors rendu visible par imagerie haute vitesse. Sa couleur passe du bleu azur pour une bouteille à 20 °C (sous 7,5 bars), au blanc gris pour une bouteille à 30 °C (sous 10,2 bars). C'est la taille des cristaux de neige carbonique et leur nombre par unité de volume qui sont responsables de la couleur du jet. Lorsque la taille des cristaux qui diffusent la lumière demeure très inférieure aux longueurs d'onde du spectre de la lumière visible (qui varient de 0,4 micromètre pour le bleu à 0,8 micromètre pour le rouge), les petites longueurs d'onde du spectre sont bien plus efficacement diffusées. Le jet nous apparaît donc bleu.

La petite ligne horizontale qui progresse dans le sillage du bouchon qui saute correspond, quant à elle, à l'irruption d'une onde de choc droite (voir les instantanés page 53). Elle se manifeste 400 à 500 microsecondes après le débouchage, puis progresse dans le sillage du bouchon avant de s'évanouir moins d'une milliseconde après l'expulsion du bouchon. Ce phénomène est bien connu des ingénieurs de l'industrie spatiale et aéronautique. On retrouve en effet des ondes de choc droites et obliques dans le panache d'échappement supersonique soufflé par les tuyères des réacteurs d'un avion de chasse. Les ondes de choc droites en sortie de tuyère sont connues sous le nom de «disques de Mach». Ces disques peuvent apparaître dans le panache d'échappement d'un réacteur lorsque le rapport entre la pression des gaz soufflés par la tuyère et la pression de l'air ambiant dépasse la valeur critique de l'ordre de 2 (1,83, pour le dioxyde de carbone s'échappant de la bouteille). Cette condition sur les pressions est bien respectée

Les mêmes disques de Mach apparaissant au débouchage sont produits, régulièrement espacés, dans le jet de gaz soufflé par les tuyères des réacteurs d'un F-15E, attestant que le gaz éjecté dépasse la vitesse du son.

au moment où le bouchon de champagne saute. Cependant, puisque l'espace de tête sous pression (de quelques centimètres cubes) de la bouteille débouchée se vide très rapidement dans l'air ambiant, le rapport entre la pression du gaz soufflé et la pression ambiante chute très rapidement et passe sous la valeur seuil. C'est la raison pour laquelle le disque de Mach disparaît aussi vite. Le jet de gaz devient très rapidement subsonique. Néanmoins, pendant la toute première milliseconde qui suit l'expulsion du bouchon, le goulot d'une bouteille de champagne se comporte un peu comme la tuyère d'un réacteur de fusée. Qui l'eût cru!

LE PHÉNOMÈNE MODÉLISÉ

Nous avons également abordé le phénomène du débouchage sous l'angle de la modélisation afin de simuler la dynamique du jet de gaz expulsé hors du goulot par la résolution numérique des équations de Navier-Stokes qui résultent de la conservation de l'énergie, de la masse et de la quantité de mouvement. Ces équations régissent les mouvements du gaz en interaction avec son environnement direct (l'air ambiant, le goulot de la bouteille et le



bouchon). La présence du bouchon rend d'ailleurs le phénomène très complexe, car il joue le rôle d'un obstacle en mouvement pour le jet de gaz expulsé hors du goulot de la bouteille.

En plus de l'onde de choc droite révélée par l'imagerie haute vitesse, les simulations numériques révèlent l'existence de plusieurs phases qui se succèdent au fur et à mesure que le bouchon s'élève dans les airs. Au cours de la toute première phase (en deçà de 600 microsecondes après que le bouchon s'est séparé de la bouteille), la pression du petit volume de gaz coïncé entre le goulot et le bouchon est toujours de plusieurs bars, très proche de celle qui règne dans la bouteille. Ce gaz haute pression se détend latéralement en s'échappant par le petit interstice annulaire entre la bouteille et le bouchon. Conformément aux lois de la physique des fluides compressibles, il atteint la vitesse du son (Mach 1) à l'endroit où la section de passage est la plus étroite, puis accélère à des vitesses supersoniques dans l'air ambiant dès que la section de passage augmente. Phénomène caractéristique des régimes supersoniques, le gaz ainsi expulsé dans l'air ambiant se surdétend sous son inertie, bien en deçà de la pression atmosphérique. Le gaz qui s'écoule à une vitesse supersonique ne peut ressentir la pression atmosphérique du milieu dans lequel il évolue, car les ondes de compression qui se propagent des hautes vers les basses pressions, donc de l'atmosphère ambiante vers le jet, voyagent à la vitesse du son et sont incapables de « remonter » au travers de l'écoulement supersonique (imaginez un saumon qui tenterait de remonter un courant beaucoup trop fort pour lui). Le gaz qui sort de la bouteille à des vitesses supersoniques atteint ainsi une pression inférieure à celle de l'air ambiant (nos simulations donnent par exemple une pression de jet de 0,69 bar à 917 microsecondes). Cette surdétente ne peut cependant se poursuivre indéfiniment. Elle est suivie d'un très brutal retour à l'équilibre des pressions sur une distance extrêmement courte, qui peut être perçue comme une zone de discontinuité à travers laquelle nombre de paramètres du gaz (Mach, pression, température, etc.) enregistrent un véritable saut, appelé « onde de choc ». Le gaz supersonique subit ainsi une compression, un échauffement et une forte décélération.

Les péripéties de notre jet de gaz ne s'arrêtent pas là, car l'onde de choc élève sa pression au-delà de la pression atmosphérique, il s'ensuit une nouvelle accélération à des vitesses supersoniques, qui conduit à une nouvelle surdétente. Le gaz est une nouvelle fois rappelé à l'ordre par la formation d'une nouvelle onde de choc, et ainsi de suite... jusqu'à ce que l'équilibre des pressions soit atteint. Cette succession de zones de haute vitesse, délimitée par des ondes de choc successives, est clairement visible sur nos simulations, où les cellules supersoniques de

couleur rouge sont séparées par des ondes de choc droites (voir l'image page 51).

Nos simulations mettent aussi en évidence l'existence d'une deuxième phase de l'écoulement, quand le bouchon a pris un peu de hauteur (typiquement une hauteur équivalente à un diamètre de goulot) et que le gaz ne peut plus s'accumuler en dessous. La vitesse du gaz qui s'échappe de la bouteille peut dorénavant s'orienter suivant l'axe de la bouteille et c'est



Le gaz expulsé à une vitesse supersonique se surdétend en deçà de la pression atmosphérique



le goulot qui joue désormais le rôle de colsonique: le gaz atteint la vitesse du son au niveau du goulot et la dépasse au-delà. C'est donc un gaz supersonique qui vient percuter le bouchon qui, lui, se déplace à une vitesse comparativement très lente. Une onde de choc détachée, également appelée « arc de choc », se forme devant le bouchon. C'est ce qui est également observé à l'avant des corps de rentrée atmosphérique de haute vitesse (sonde spatiale, missile). Le gaz redevient brusquement subsonique en traversant cette onde de choc détachée avant de s'échapper latéralement en contournant le bouchon. C'est cette onde de choc détachée qui a été révélée par notre caméra ultrarapide. Sa position par rapport au goulot de la bouteille dépend à la fois de la pression dans la bouteille et de la distance à laquelle se trouve le bouchon, elle évolue donc au cours du temps. L'onde de choc disparaît dès que la pression dans la bouteille n'est plus suffisante pour garantir un régime supersonique en sortie de goulot, c'est-à-dire dès que le rapport de pression entre l'intérieur de la bouteille et celle de l'atmosphère ambiante devient inférieur à 1,83.

De façon très inattendue, le débouchage d'une bouteille de champagne permet de revisiter la physique des changements de phase et des jets supersoniques. À l'avenir, nous envisageons de tester l'influence de plusieurs paramètres sur le développement de ces ondes de choc tels que la pression qui règne dans la bouteille, le volume de son espace de tête ou bien le diamètre du goulot, par exemple. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Benidar et al., **Computational Fluid Dynamic simulation of the supersonic CO₂ flow during champagne cork popping**, *Physics of Fluids*, 2022.

G. Liger-Belair et al., **Under-expanded supersonic CO₂ freezing jets during champagne cork popping**, *Science Advances*, 2019.

G. Liger-Belair et al., **Le fugace nuage bleu du champagne**, *Pour la Science*, n° 488, juin 2018.