

En moyenne, ce sont près de dix bouchons de champagne qui sautent chaque seconde dans le monde. Et ce chiffre explose bien entendu aux moments festifs de l'année.

Les tout premiers millièmes de seconde qui suivent le débouchage retiennent aujourd'hui toute notre attention : c'est l'instant précis où l'énergie enfermée dans la bouteille se libère, en permettant au gaz carbonique dissous dans le liquide de s'échapper sous forme de bulles.

Il y a quelques années, en filmant le débouchage d'un lot de bouteilles de champagne stockées à température ambiante, nous avons constaté un phénomène aussi curieux qu'inattendu : dans le sillage du bouchon qui saute, apparaît un nuage bleu azur. À l'époque, nous n'avions pas pu expliquer de façon satisfaisante son origine. Ce n'est que récemment que nous avons proposé et publié, après examen par des pairs, un modèle théorique du phénomène, et c'est cette explication que nous présentons ici.

LE DÉBOUCHAGE DU CHAMPAGNE AU RALENTI

L'étude des quelques millièmes de seconde qui suivent le débouchage d'une bouteille de champagne s'inscrit dans un programme de recherche ambitieux dont l'objectif est de mieux comprendre un phénomène redouté des élaborateurs de vins effervescents : le gerbage, terme qui désigne la production excessive de bulles et de mousse à l'ouverture de la bouteille.

Quand on débouche une telle bouteille, on observe qu'elle gerbe moins de une demi-seconde après son débouchage (*voir la séquence de photographies pages précédentes*). Mais remontons le temps et observons ce qui se passe en amont de cet instant. Environ 0,4 milliseconde après le débouchage, on voit apparaître un nuage de condensation bleuté dans le col de la bouteille et dans le sillage du bouchon qui saute. Quelques millisecondes plus tard, ce nuage bleuté disparaît du sillage du bouchon, mais demeure encore très persistant dans le goulot de la bouteille, où sa couleur vire progressivement au blanc-gris.

Afin de comprendre l'origine du nuage bleu, nous avons examiné les phénomènes de condensation qui accompagnent le débouchage de bouteilles stockées à différentes températures (*voir les photographies page suivante*). Pour ce faire, nous disposons de 30 bouteilles de champagne rosé, que nous avons réparties en trois lots de 10 bouteilles. Quarante-huit heures avant de réaliser nos observations, les trois lots ont été stockés à des températures respectives de 6, 12 et 20°C.

Les phénomènes de condensation surviennent lors du débouchage d'une bouteille de champagne (ou de toute autre boisson gazeuse)

froide ont été décrits et compris par les scientifiques il y a déjà longtemps. L'explication couramment proposée est la suivante.

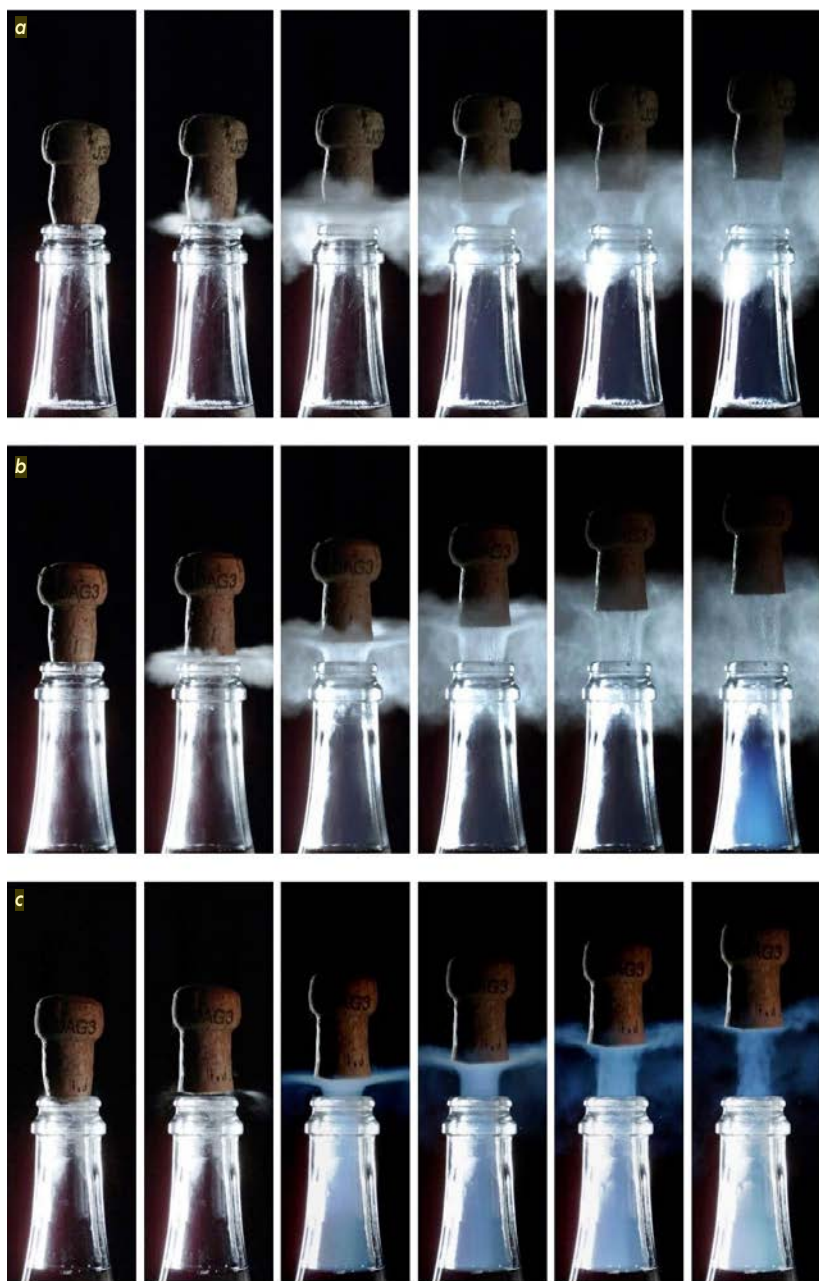
Au moment du débouchage, la décompression brutale du gaz sous pression présent dans le col de la bouteille s'accompagne d'une chute de sa température (les physiciens parlent d'une détente adiabatique). Ce nuage de gaz froid refroidit l'air ambiant. Or ce dernier contient de la vapeur d'eau. En se refroidissant, la vapeur d'eau se condense sous la forme d'un brouillard de minuscules gouttelettes dont la taille varie de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. La diffusion de la lumière ambiante par ces gouttelettes se fait de façon quasi isotrope dans l'espace et pour toutes les longueurs d'onde du spectre visible. Cela confère au panache de condensation une teinte blanchâtre.

Ce mode de diffusion de la lumière, où la taille des objets qui diffusent le rayonnement est comparable ou supérieure aux longueurs d'onde de la lumière ambiante (de 0,4 micromètre pour le bleu à 0,8 micromètre pour le rouge), est connu sous le nom de diffusion de Mie, du nom du physicien allemand Gustav Mie, mort en 1957.

Dans le goulot de la bouteille, le nuage bleu persiste mais devient blanc-gris

La description que nous venons de donner est bien conforme à ce que l'on observe quand on débouche des bouteilles stockées à 6°C ou à 12°C. D'ailleurs, à une tout autre échelle, celle de l'atmosphère, les nuages voient le jour selon le même principe : des masses d'air chargées de vapeur d'eau montent en altitude et se refroidissent progressivement, ce qui entraîne la condensation de leur eau en masses nuageuses – lesquelles sont visibles grâce à la diffusion de la lumière solaire par leurs gouttelettes d'eau, diffusion qui fait apparaître blancs ou gris les nuages.

Cependant, dans le cas d'une bouteille de champagne stockée à la température ambiante



de 20°C, pourquoi le nuage de condensation apparaît-il directement dans le goulot de la bouteille et pourquoi est-il bleu azur et non pas blanc? La clé de l'énigme se trouve dans la relation qui existe entre la température des gaz qui s'échappent du col de la bouteille et la température initiale de celle-ci.

LA PRESSION DANS UNE BOUTEILLE DÉPEND DE SA TEMPÉRATURE

À la suite d'une seconde fermentation alcoolique en bouteille close (la «prise de mousse»), les vins de Champagne et les vins effervescents élaborés selon la méthode traditionnelle se chargent en gaz carbonique

Ces clichés permettent de comparer les phénomènes de condensation qui accompagnent le débouchage de trois bouteilles stockées respectivement à 6°C (a), 12°C (b) et 20°C (c). L'intervalle de temps entre deux images successives est de 0,4 milliseconde. On constate que le nuage bleu n'apparaît que pour une température initiale assez élevée : sinon, le refroidissement dû à la détente du gaz n'est pas suffisant pour que se forment les minuscules cristaux de dioxyde de carbone qui diffusent le bleu plus efficacement que les autres longueurs d'onde de la lumière.

dissous. Or la solubilité du dioxyde de carbone (CO_2) est très sensible à la température : plus le vin est froid, plus le gaz carbonique y est soluble. Cela implique que, pour une quantité fixe de CO_2 dans une bouteille close, la pression due au CO_2 (sa «pression partielle») régnant dans le col de la bouteille sera d'autant plus faible que la température est basse, puisque la quantité de CO_2 dissous dans le liquide sera plus grande.

On peut calculer avec une grande précision la pression de gaz carbonique qui règne dans une bouteille en fonction de sa température. Pour ce faire, on fait appel à la loi des gaz parfaits, à celle de la conservation de la matière et à la loi de Henry, énoncée en 1803 et selon laquelle la concentration en gaz dissous est proportionnelle à la pression partielle de ce gaz dans le col de la bouteille, le facteur de proportionnalité étant la solubilité. On trouve ainsi que dans une bouteille de 75 centilitres, la pression de gaz carbonique est de 4,5 bars à la température de 6°C, et qu'elle passe à 7,5 bars pour une bouteille à 20°C.

La température initiale d'une bouteille de champagne doit donc de toute évidence jouer un rôle sur les phénomènes de condensation qui accompagnent son débouchage.

GROS PLAN SUR LA DÉTENTE ADIABATIQUE

De fait, la chute de la température des gaz s'échappant du col dépend directement de la chute de pression qu'ils subissent lorsque le bouchon saute.

En effet, lorsque le bouchon saute, le volume de gaz présent sous pression dans le col de la bouteille se détend brutalement. Il s'agit d'une détente adiabatique, ce qui signifie que le processus se déroule sans échange de chaleur avec l'extérieur. La température du gaz chute alors de façon concomitante pour atteindre une nouvelle température T' donnée par une relation bien connue et qui s'écrit :

$$T'/T = (P_0/P_B)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

Dans cette formule, T est la température initiale régnant dans la bouteille encore bouchée, P_0 est la pression ambiante (de l'ordre de 10^5 pascals, soit 1 bar), P_B est la pression du gaz régnant dans la bouteille bouchée (et qui dépend beaucoup de la température initiale T de la bouteille), et γ (gamma) désigne l'indice adiabatique du gaz, défini comme le rapport de ses capacités calorifiques à pression et à volume constants, et qui est égal à environ 1,3 pour le CO_2 .

On peut tracer la température T' atteinte par le gaz en fonction de la température initiale T de la bouteille (voir le graphique page 51). On voit que, de façon assez contre-intuitive, cette température du gaz détendu est d'autant plus basse que la température