

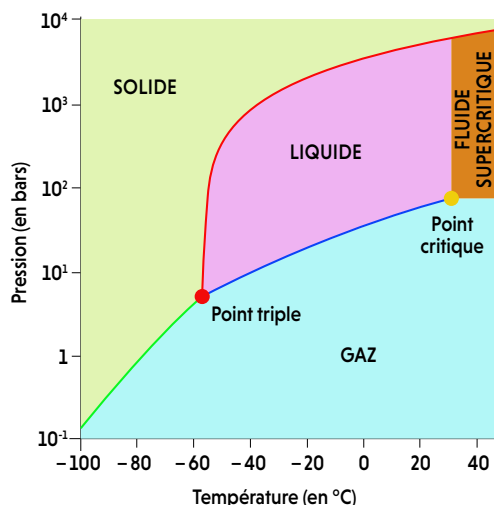
> initiale de la bouteille est élevée. En théorie, la température du gaz qui se détend hors d'une bouteille stockée à 20 °C chute à presque -90 °C ! Dans un environnement aussi glacial, que deviennent les différentes espèces gazeuses présentes ?

DES CRISTAUX DE NEIGE CARBONIQUE

En fonction de sa température et de sa pression, un corps pur est susceptible d'exister sous trois phases – gazeuse, liquide ou solide. Prenons par exemple le cas familier de l'eau. Sous une pression de 1 bar et à 20 °C, l'eau est liquide. Elle peut se transformer en glace au-dessous de 0 °C et, à 100 °C, elle commence à bouillir pour se transformer intégralement en vapeur.

Qu'en est-il du CO₂ ? Le diagramme de phase de ce corps pur montre qu'aux températures et aux pressions de quelques bars régnant dans une bouteille bouchée, le CO₂ est un gaz (voir le diagramme ci-dessus). Lorsque le bouchon saute, il se détend brutalement et sa pression rejoint celle de l'atmosphère extérieure, c'est-à-dire 1 bar. Et dans ce processus adiabatique, sa température chute de plusieurs dizaines de degrés (voir le graphique page suivante). Or le diagramme de phase montre qu'à une pression de 1 bar, le CO₂ est gazeux au-dessus de -78,5 °C, mais qu'au-dessous de cette température, il est sous sa forme solide (la glace carbonique).

Si l'on se réfère au graphique montrant la température atteinte après le débouchage en fonction de la température initiale de la bouteille, on remarque qu'une bouteille initialement à 6 °C voit la température des gaz qui s'en échappent chuter à près de -77 °C. Autrement dit, il ne fait pas encore assez froid pour que les vapeurs de CO₂ se condensent en glace carbonique.



Le diagramme de phase pression-température du dioxyde de carbone. On voit en particulier qu'à la pression atmosphérique (soit 1 bar), des cristaux de CO₂ ne peuvent apparaître que si la température est inférieure à environ -80 °C.

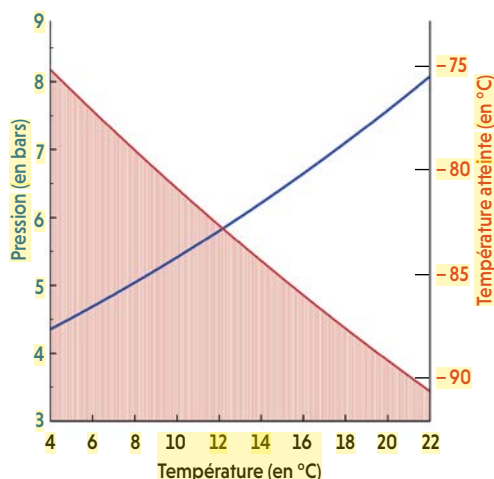
Pour les bouteilles stockées à 12 et à 20 °C, la température des gaz qui se détendent chute respectivement à -83 °C et -89 °C. Ces valeurs sont inférieures au seuil de -78,5 °C. En théorie, les vapeurs de CO₂ qui jaillissent hors du col de la bouteille sont donc susceptibles de se transformer en glace carbonique.

Cependant, même si la température du gaz carbonique chute sous le seuil de condensation, le changement de phase ne s'effectue pas aussi aisément. Les vapeurs de CO₂ ne peuvent pas se transformer en cristaux de neige carbonique *ex nihilo* : il ne fait pas encore assez froid pour cela. Pour se transformer en cristaux, le gaz carbonique a besoin de noyaux de condensation qui serviront de catalyseurs pour enclencher le processus. Et c'est à cette étape qu'un autre acteur du système entre en jeu : la vapeur d'eau – pas celle contenue dans l'air ambiant, mais celle présente dans le col de la bouteille.

En effet, le gaz présent dans le col de la bouteille encore bouchée contient de la vapeur d'eau en équilibre avec le champagne qui,

Les phénomènes de condensation à l'œuvre dans le nuage bleu du champagne sont similaires à ceux que présentent les gaz s'échappant des tuyères d'un réacteur de fusée. Les particules diffusantes y sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière visible, d'où une diffusion dite de Rayleigh de la lumière ambiante, qui fait apparaître du bleu (davantage diffusé que les autres longueurs d'onde). C'est ce même régime de diffusion qui fait apparaître bleu le ciel.





Ces deux graphiques montrent, en fonction de la température de la bouteille bouchée, la pression partielle de CO_2 régnant dans le col de la bouteille (en bleu) et la température atteinte par le nuage de gaz carbonique après que le bouchon a sauté (en rouge).

rappelons-le, est formé d'environ 85% d'eau en volume. La teneur en vapeur d'eau dans le col d'une bouteille augmente avec sa température, selon une loi connue (la loi de Clausius-Clapeyron). Elle passe de 0,9% dans le col d'une bouteille à 6 °C, à environ 2,3% pour une bouteille à 20 °C.

Comme on l'a vu, lorsque le bouchon saute, les gaz initialement sous pression dans le col d'une bouteille se détendent et leur température chute à plusieurs dizaines de degrés sous la température de congélation de l'eau. Il fait alors si froid que la vapeur d'eau se transforme instantanément en cristaux de glace d'eau *ex nihilo* (c'est-à-dire sans que la présence de noyaux de condensation soit nécessaire), à la différence du gaz carbonique. Ce sont donc les cristaux de glace d'eau nés dans le col de la bouteille qui servent de noyaux solides pour la condensation du gaz carbonique en neige carbonique.

Des phénomènes similaires ont été mis en évidence dans le mélange gazeux qui se détend dans les tuyères des moteurs de fusées (voir la photographie page précédente). Là aussi, les gaz les plus facilement condensables (en général l'eau et le CO_2) servent de noyaux solides qui rendent possible la condensation des espèces présentant des températures de condensation bien plus basses (tels que le dioxygène et le diazote).

Le panache bleu azur qui apparaît dans le sillage du bouchon qui saute et dans le col de la bouteille serait donc la signature de la transformation des vapeurs de CO_2 en cristaux de neige carbonique. Mais pourquoi ce panache est-il bleu, alors que le nuage de condensation de la vapeur d'eau ambiante qui caractérise le débouchage des bouteilles plus froides apparaît plutôt blanc ?

Cette couleur bleue a certainement pour origine la très petite taille des cristaux de neige carbonique qui diffusent la lumière ambiante. En effet, lorsque les cristaux qui diffusent la lumière sont de taille très inférieure aux

longueurs d'onde du spectre de la lumière ambiante (centrée autour de 0,6 micromètre environ), ils diffusent bien plus efficacement les petites longueurs d'onde du spectre, et donc la lumière bleue. Le nuage de condensation apparaît alors bleuté et non pas blanc comme dans le cas de la diffusion de Mie, où la taille des objets qui diffusent la lumière est comparable à celle de la longueur d'onde incidente.

COMME LE BLEU DU CIEL

Ce mode de diffusion de la lumière par des particules plus petites que les longueurs d'onde incidentes est connu sous le nom de diffusion de Rayleigh (d'après le physicien anglais John Rayleigh, ou Lord Rayleigh, 1842-1919). C'est d'ailleurs le même phénomène qui explique pourquoi le ciel nous apparaît bleu. Les molécules qui composent l'atmosphère de notre planète sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière solaire. Le bleu est donc bien plus efficacement diffusé que les autres couleurs du spectre, et c'est pourquoi l'atmosphère terrestre nous apparaît de cette couleur (voir la photographie page précédente).

Et si le nuage de condensation du gaz carbonique ne blanchit pas hors du goulot de la bouteille, c'est parce que les cristaux de neige carbonique dont il est constitué ne peuvent pas croître suffisamment pour atteindre des tailles micrométriques, qui le feraient paraître blanc par diffusion de la lumière ambiante. En effet, l'air ambiant, à une vingtaine de degrés Celsius, agit comme un immense réservoir thermique. Très vite, la température du nuage de condensation remonte alors au-dessus des -78,5 °C fatidiques, et les cristaux de neige carbonique se subliment pour se transformer en gaz carbonique. Ainsi, au bout de quelques millisecondes, le nuage bleu s'évanouit au-dessus du goulot.

Cependant, confiné dans le goulot de la bouteille, le nuage de condensation est protégé du réservoir thermique un peu plus longtemps. Les cristaux de neige carbonique sont donc susceptibles de croître autour de leur cœur de glace d'eau. Ils atteignent alors des tailles micrométriques et le nuage de condensation présent dans le goulot change progressivement de couleur. Il vire du bleu profond au blanc-gris, comme on peut clairement le constater sur les photographies reproduites.

En d'autres termes, pour ce qui est de la diffusion de la lumière ambiante, on passe progressivement d'un régime de Rayleigh, dû à des cristaux de taille très inférieure aux longueurs d'onde de la lumière ambiante, à un régime de Mie lorsque la taille des cristaux de neige carbonique devient comparable ou supérieure à ces longueurs d'onde. Le nuage bleu visible lors du débouchage d'une bouteille de champagne à température ambiante et son changement de couleur n'ont ainsi plus de mystères... ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Liger-Belair et al., **Unveiling CO_2 heterogeneous freezing plumes during champagne cork popping**, *Scientific Reports*, vol. 7, article 10938, 2017.

G. Liger-Belair et al., **Un océan dans une flûte de champagne**, *Pour la Science*, n° 459, pp. 36-41, janvier 2016.

M. Vollmer et K.-P. Möllmann, **Vapour pressure and adiabatic cooling from champagne : Slow-motion visualization of gas thermodynamics**, *Physics Education*, vol. 45, pp. 608-615, 2012.

B. E. Wyslouzil et al., **Binary condensation in a supersonic nozzle**, *Journal of Chemical Physics*, vol. 113, pp. 7317-7329, 2000.

R. Batt, **Pop ! Goes the champagne bottle cork**, *Journal of Chemical Education*, vol. 48, p. 75, 1971.