

performants que les autres, même quand le lien n'était que parcellaire (certains avaient juste entendu la musique du jeu).

Nos résultats sur les pathologies du sommeil fournissent aussi quelques éléments étayant cette théorie. Par exemple, nous avons enseigné à des somnambules une chorégraphie des mains, qu'une patiente a partiellement répétée en dormant, signe qu'elle en rêvait. Elle l'a bien mieux réalisée le lendemain.

Le fait que les événements vécus ne soient pas rejoués à l'identique, mais passés à la moulinette cérébrale accroît également la créativité, les rêves favorisant les idées et les associations inédites. Plusieurs études ont montré que nous trouvons plus facilement la solution d'un problème en « dormant dessus ». Dans l'une d'elles, réalisée en 2004, Ullrich Wagner, de l'université de Lübeck, en Allemagne, a présenté une épreuve issue d'un test d'intelligence à des étudiants. Ceux qui dormirent ensuite furent deux fois plus nombreux à en découvrir la règle. Et nombre d'anecdotes suggèrent que la créativité et les associations d'images propres au sommeil transparaissent dans le rêve : par exemple, au XIX^e siècle, le chimiste allemand August Kekulé aurait découvert la structure cyclique du benzène en rêvant d'un serpent qui tourne à l'intérieur de la molécule et le chimiste russe Dmitri Mendeleïev, auteur du célèbre tableau périodique des éléments, a déclaré : « J'ai vu dans un rêve un tableau où tous les éléments tombaient à la bonne place. »

Se mettre à la place des autres

Enfin, le rêve aurait une fonction sociale. Qui n'a jamais été le héros nocturne du film vu avant d'aller au lit ? Quelle femme n'a pas été une fois un homme en rêve ? Point d'homosexualité refoulée ici, malgré ce qu'explique la psychanalyse : il semble plutôt s'agir d'un exercice de notre capacité à nous mettre à la place des autres, qui inclut l'empathie (le partage des émotions). Cette capacité est fondamentale pour la vie sociale. Elle se développe vers l'âge de quatre ans grâce à des neurones dits « miroirs », qui s'activent de la même façon quand nous exécutons une action et quand nous voyons un congénère la réaliser. Notre cerveau « joue » alors mentalement cette action en miroir.

Et quand nous nous plaçons dans la peau d'un autre en rêve, nous y croyons

encore plus que pendant l'éveil. Le drôle de rêve que m'a raconté Pierre, un patient incapable d'aider son épouse enceinte, car il était bloqué dans un lit d'hôpital, en est une belle illustration : privé de bras et de jambes, il ne pouvait rien faire, puis soudain il a accouché en rêve et tout allait mieux.

Nous avons alors supposé que le rêve entraîne à comprendre les autres et à partager leurs émotions *via* la réactivation des neurones miroirs. Selon nous, c'est ce qui s'est produit chez des paraplégiques de naissance que nous avons étudiés : tous marchaient en rêve, dansaient, couraient, pédalaient, jardaient ou tapaient dans un ballon. Alors qu'ils n'avaient jamais effectué ces actions, ils étaient capables de les réaliser en rêve, sans effort mental, probablement parce qu'ils les avaient vu exécuter par des personnes valides autour d'eux. Là encore, le rêve semble plus puissant que l'imagination pour simuler un phénomène de façon réaliste, puisque nous y croyons plus et que nous sommes plongés dans un mélange complet de sons, de sensations, d'images et d'émotions.

Alors, d'où viennent les rêves ? Les neurosciences cognitives, combinées à l'immense richesse de l'observation clinique en médecine du sommeil, donnent quelques réponses. Cette activité nocturne singulière semble avoir été en partie sélectionnée au fil de l'évolution pour accomplir diverses fonctions : simuler les menaces, anticiper, mémoriser, gérer les émotions négatives, consolider la mémoire, produire des idées nouvelles et faciliter la vie en société. Mais les nombreux éléments disparates qui s'assemblent au sein des rêves n'ont peut-être pas tous un rôle et certains pourraient juste traduire les contraintes pesant sur le fonctionnement mental pendant le sommeil, ainsi que certaines perceptions extérieures.

Les rêves dits « typiques » (voler, être nu en public, perdre ses dents) illustrent bien ces origines multiples. Dans ceux où l'on vole, le cerveau tenterait d'interpréter l'abolition de la sensation de pesanteur. Ceux où l'on est nu résulteraient de la perception temporaire du fait d'être réellement nu (ou en tout cas moins habillé que d'habitude) dans son lit. Quant à ceux où l'on perd ses dents, il s'agirait de souvenirs anciens qui sont réactivés, sous une forme un peu déformée. Pas étonnant, avec cette diversité d'origines et de fonctions, que les rêves soient d'une telle exubérante variété ! ■



**2 fois plus
de personnes
parviennent
à résoudre un test
d'intelligence après
avoir dormi**

■ BIBLIOGRAPHIE

T. Andrillon *et al.*, **Single-neuron activity and eye movement during human REM sleep and awake vision**, *Nature Communications*, vol. 6, pp. 1-10, 2015.

I. Arnulf, **Une fenêtre sur les rêves**, Odile Jacob, 2014.

I. Arnulf *et al.*, **Will students pass a competitive exam that they failed in their dreams ?**, *Consciousness and Cognition*, vol. 29, pp. 36-47, 2014.

T. Horikawa *et al.*, **Neural decoding of visual imagery during sleep**, *Science*, vol. 340, pp. 639-642, 2013.

Un océan dans une flûte de champagne

Gérard Liger-Belair, Clara Cilindre, Fabien Beaumont et Guillaume Polidori

Les effets de condensation observés lors du débouchage d'une bouteille de champagne et les mouvements tourbillonnaires imprimés au liquide par la remontée des bulles rappellent certains phénomènes atmosphériques ou océanographiques.

Au cours des dernières décennies, la science des bulles et des mousses s'est considérablement développée. Physiciens, chimistes et mathématiciens se sont passionnés pour ces objets fragiles aux propriétés extraordinaires. Cependant, et à notre grande surprise, les processus liés à la formation des bulles dans un vin de Champagne sont restés jusqu'à peu totalement inexplorés. Or le champagne permet aux scientifiques d'entreprendre un périple dans le monde fascinant des bulles, des gaz dissous, des changements de phase et des fluides en mouvement.

De nombreux savoirs ont été ainsi acquis, sans épuiser toutes les questions posées. Ici, nous nous limiterons à présenter quelques-uns des phénomènes qui accompagnent une dégustation de champagne, mais qui se retrouvent aussi à de tout autres échelles, en particulier celles de l'atmosphère et de l'océan.

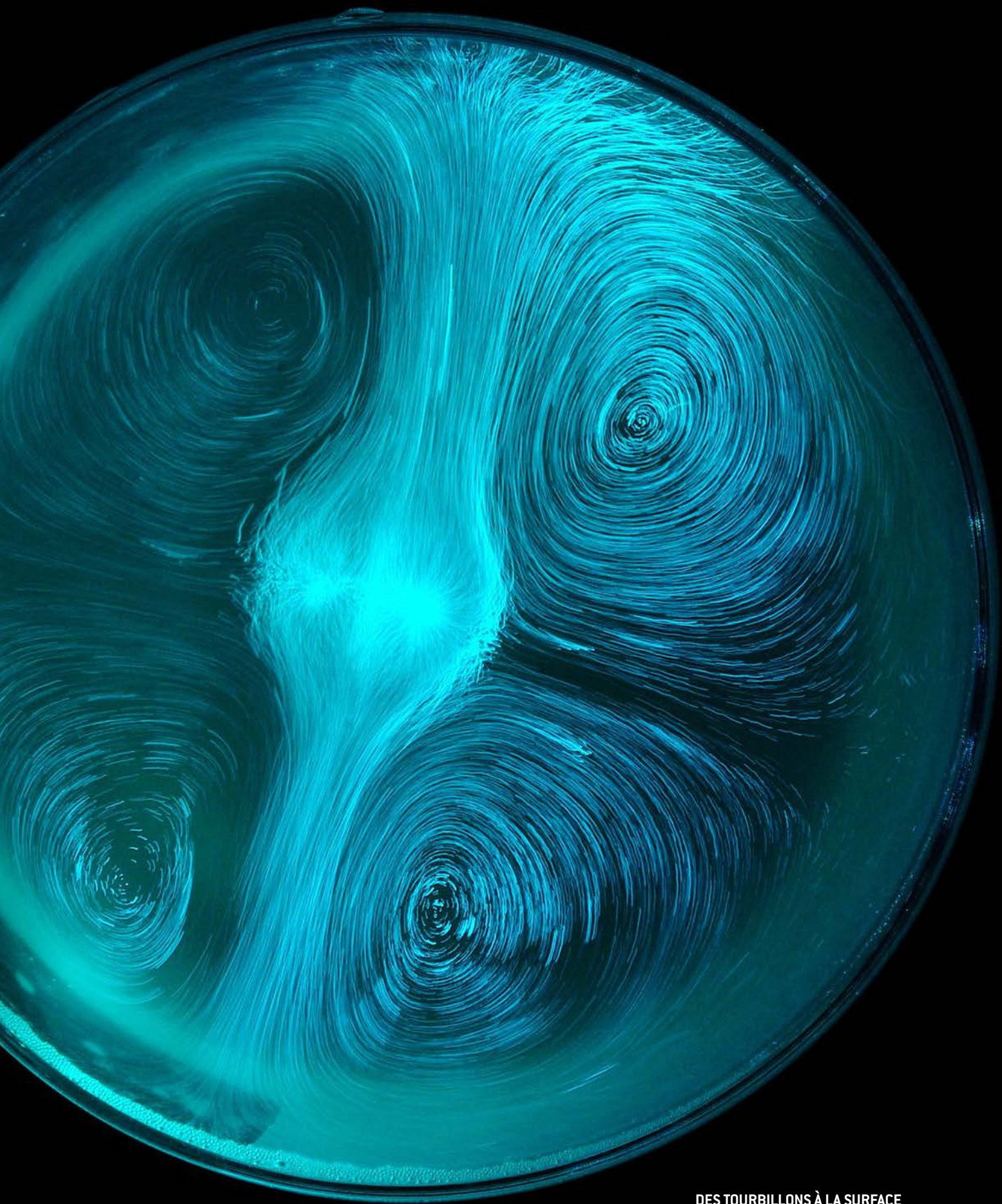
Le débouchage d'une bouteille à l'étude

Intéressons-nous par exemple à ce qui se passe lorsqu'on débouche une bouteille de champagne. Avant cette opération, l'air enfermé dans la bouteille est sous pression. En effet, à la suite d'une seconde fermentation alcoolique en bouteille close (on l'appelle la prise de mousse), les vins de Champagne et les vins effervescents élaborés selon la

L'ESSENTIEL

- Le champagne et sa dégustation font l'objet depuis quelques années d'études scientifiques détaillées.
- L'imagerie ultrarapide permet d'analyser les processus de condensation à l'œuvre lors du débouchage d'une bouteille.
- La tomographie laser révèle les mouvements tourbillonnaires du vin créés par la remontée des bulles.
- Les phénomènes observés ressemblent à ceux qui animent l'atmosphère et les océans.

Université de Reims Champagne-Ardenne



DES TOURBILLONS À LA SURFACE
d'une coupe de champagne,
visualisés par tomographie laser.

DÉBOUCHAGE D'UNE BOUTEILLE RÉFRIGÉRÉE

Cette séquence d'images prises par une caméra ultrarapide montre le premier millième de seconde de l'éjection du bouchon d'une bouteille de champagne stockée au réfrigérateur, à 6 °C. La décompression brutale du gaz contenu dans le col de la bouteille fait chuter sa température de

plusieurs dizaines de degrés, ce qui provoque la condensation de la vapeur d'eau ambiante en un brouillard de gouttelettes, dont la taille va de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Ces gouttelettes diffusent la lumière dans toutes les longueurs d'onde, d'où la teinte blanchâtre.



Université de Reims Champagne-Ardenne



© Benjamin Foster-UCAIR

Université de Reims Champagne-Ardenne

NASA

méthode traditionnelle champenoise se chargent en gaz carbonique (CO_2) dissous. Conformément à la loi dite de Henry, en fin de prise de mousse, la concentration en CO_2 dissous dans le vin est proportionnelle à la pression partielle de CO_2 (la part de la pression due au CO_2) dans le col de bouteille. Or la solubilité du CO_2 dans le vin étant très sensible à la température (plus le vin est froid, plus le CO_2 y est soluble), la pression dans la bouteille sera aussi très sensible à la température.

Cinq fois la pression atmosphérique à 6 °C

Ainsi, dans une bouteille de champagne de 75 centilitres (traditionnellement tiré à 24 grammes de sucre par litre au moment de la prise de mousse), la pression augmente avec la température: d'environ 5 bars à 6 °C, elle atteint presque 8 bars à 20 °C, tandis que la concentration en CO_2 du vin diminue d'environ 11,7 à 11,5 grammes par litre. La force exercée par le gaz carbonique sous pression dans le col de la bouteille étant à l'origine de l'éjection du bouchon, la température doit de toute évidence jouer un rôle sur le débouchage.

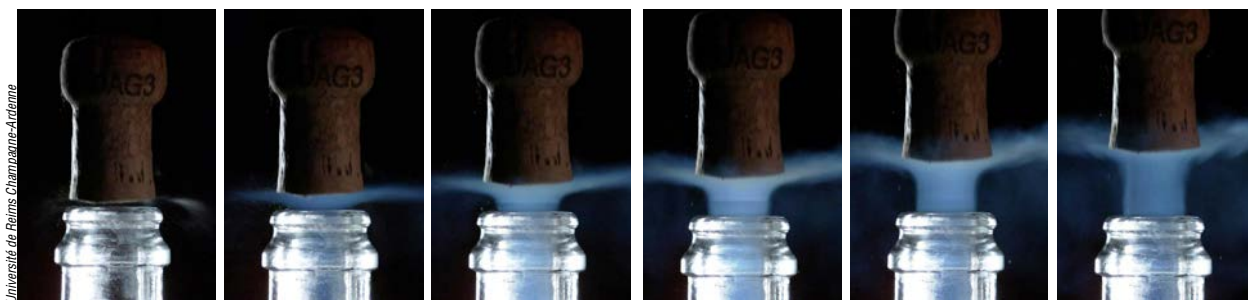
Pour étudier cet aspect du débouchage et d'autres, nous avons recouru à l'imagerie scientifique, qui a beaucoup progressé ces dernières années, notamment avec l'avènement des capteurs numériques et la miniaturisation des circuits électroniques. Il existe aujourd'hui des caméras ultrarapides susceptibles de nous dévoiler des phénomènes d'une extrême fugacité, et

LORSQU'ON DÉBOUCHE DÉLICATEMENT une bouteille de champagne, en retenant le bouchon, le nuage de condensation présente en général une petite ondulation. Il s'agit d'une instabilité dite de Kelvin-Helmholtz. Bien connu des physiciens, ce phénomène se produit à la frontière entre deux fluides, quand l'un glisse sur l'autre à une vitesse relative dépassant un certain seuil. De telles instabilités sont visibles à des échelles plus grandes, par exemple dans l'atmosphère de la Terre (*en haut*) et dans celle de Jupiter (*en bas*), où elles sont spectaculaires.

DÉBOUCHAGE D'UNE BOUTEILLE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

À température ambiante, la pression qui éjecte le bouchon est plus importante (environ 8 bars à 20 °C). Le nuage de condensation est dans ce cas bien plus délimité et, au lieu d'être blanchâtre, il est bleuté. Cette teinte indique un régime de diffusion lumineuse où la taille des gouttelettes

de condensation est inférieure aux longueurs d'onde de la lumière visible : dans ce cas de figure, les gouttelettes diffusent davantage la partie bleue du spectre lumineux que sa partie rouge, d'où un nuage bleuté. Le phénomène est analogue à celui responsable du bleu du ciel.



Université de Reims Champagne-Ardenne

nous avons utilisé un appareil de ce type. Nous nous sommes rapprochés de notre collègue Jacques Honvault, spécialiste de l'imagerie ultrarapide.

Décortiquer les premiers millièmes de seconde

Filmer à haute vitesse nécessite énormément de lumière. Un projecteur de cinéma de 5000 watts éclaire la scène par l'arrière. On peut ainsi filmer les tout premiers millièmes de seconde du débouchage d'une bouteille de champagne stockée au réfrigérateur, à 6 °C (voir la figure page ci-contre).

La décompression brutale du volume de gaz qui jaillit hors du col s'accompagne d'une chute de sa température de plusieurs dizaines de degrés (c'est une « détente adiabatique »). Cette chute brutale de la température provoque instantanément la condensation de la vapeur d'eau environnante en un brouillard de minuscules gouttelettes dont la taille varie de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. C'est la diffusion de la lumière du projecteur par ces gouttelettes (de façon presque isotrope dans l'espace, pour toutes les longueurs d'onde du spectre visible) qui rend ce brouillard visible et lui confère sa couleur blanchâtre.

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 refroidissement provoque la condensation de l'eau

■ LES AUTEURS

Gérard LIGER-BELAIR est professeur de physique à l'université de Reims. Il y a créé l'équipe Effervescence (étude des bulles et des mousses dans les liquides chargés en gaz dissous) au sein du Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (UMR CNRS 7331).

Clara CILINDRE est maître de conférences et membre de l'équipe Effervescence à l'université de Reims.

Fabien BEAUMONT est ingénieur d'études au sein du Groupe de recherche en sciences pour l'ingénieur de l'université de Reims.

Guillaume POLIDORI est professeur de mécanique des fluides au sein du Groupe de recherche en sciences pour l'ingénieur de l'université de Reims.

qu'ils contiennent en masses nuageuses, que la diffusion de la lumière solaire rend visibles.

Toutes les bouteilles stockées à 6 et à 12 °C ont présenté des nuages de condensation similaires dans leur structuration et leur couleur blanc-gris. Cependant, le lot de bouteilles stocké à température ambiante nous réservait une surprise. Pour ces bouteilles où la pression est plus importante, de l'ordre de 8 bars, le nuage de fumée blanchâtre disparaît (voir la figure ci-dessus). Dans le sillage du bouchon qui saute, on retrouve une structure bien plus éphémère, moins étendue et surtout... étrangement bleutée.

À la température ambiante, un panache bleu comme le ciel

Ce panache bleu azur qui accompagne le débouchage d'une bouteille sous haute pression a très certainement pour origine la petite taille des noyaux de condensation qui diffusent la lumière ambiante. En effet, conformément à la théorie de la diffusion de Rayleigh, si la taille de ces noyaux devient bien inférieure aux longueurs d'onde du spectre de la lumière ambiante (qui vont de 0,4 micromètre pour le bleu à 0,8 micromètre pour le rouge), la diffusion de la lumière se fait bien plus efficacement pour les petites longueurs d'onde du spectre, donc pour la lumière bleue. Le nuage apparaît alors bleuté et non plus blanc.



Université de Reims Champagne-Ardenne

LA VISUALISATION DE L'ÉCOULEMENT
par tomographie laser révèle les tourbillons
qui se forment dans une flûte de champagne.
Ces mouvements du liquide sont engendrés
par la remontée des bulles.

Le même phénomène explique pourquoi le ciel nous apparaît bleu. Les molécules de l'atmosphère terrestre sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière solaire. Le bleu est donc plus efficacement diffusé que les autres couleurs du spectre, ce qui confère à l'atmosphère sa teinte bleue.

Un modèle thermodynamique est en cours d'élaboration pour rendre compte de la différence de taille caractéristique des noyaux de condensation qui se forment au débouchage en fonction de la température initiale des bouteilles.

En filmant le processus à 12 000 images par seconde, on distingue même une onde de choc, parallèle au goulot de la bouteille, qui progresse dans le sillage bleuté du bouchon qui jaillit (voir les photographies ci-dessous). On remarque aussi que, une fois libéré du col de la bouteille dans lequel il était comprimé, le bouchon reprend très vite sa forme en « jupe » si caractéristique : les parois cellulaires du liège confèrent au bouchon une extraordinaire résilience.

Débouchage en douceur : une instabilité de Kelvin-Helmholtz

Il est d'usage d'ouvrir une bouteille de champagne sans laisser le bouchon sauter librement, mais en le retenant délicatement. Le gaz carbonique sous pression s'échappe alors avec un chuintement très caractéristique. La décompression est moins brutale, ce qui permet toujours à la vapeur d'eau de se condenser, mais sous la forme d'une fumerolle dont les

caractéristiques aérodynamiques diffèrent nettement de celles du panache qui accompagne un débouchage brutal. Le brouillard de minuscules gouttelettes s'échappe parallèlement au goulot de la bouteille sous la forme d'une couche fluide plus dense que l'air ambiant.

Lorsque le processus est filmé à haute vitesse, il dévoile un phénomène bien connu des océanographes et des physiciens de l'atmosphère (voir la figure page 38, en bas). On reconnaît une instabilité, dite de Kelvin-Helmholtz, qui apparaît à la frontière entre deux fluides glissant l'un sur l'autre. Des ondulations se créent puis déferlent, un peu comme des vagues à la surface de l'océan.

En météorologie, ces instabilités apparaissent parfois à la frontière entre les couches nuageuses et le ciel clair. En océanographie, on les retrouve lors de variations brutales de la densité de l'eau, par exemple à l'embouchure d'un fleuve, lorsque les eaux douces et peu denses se mélangent à l'eau de mer salée, plus dense. On les retrouve même en astrophysique. Par exemple, la structure en bandes de l'atmosphère de Jupiter, où soufflent des vents contraires atteignant plusieurs centaines de kilomètres par heure, est le siège de spectaculaires instabilités de Kelvin-Helmholtz.

Laissons à présent le débouchage et la condensation qui s'ensuit pour contempler au sein du vin le ballet des bulles. En plus de leur rôle esthétique évident en dégustation, les bulles qui remontent dans le verre créent des tourbillons au cœur du liquide (voir les figures page 37 et ci-dessus). Ce processus, hélas invisible à l'œil nu, peut être mis en évidence par un procédé

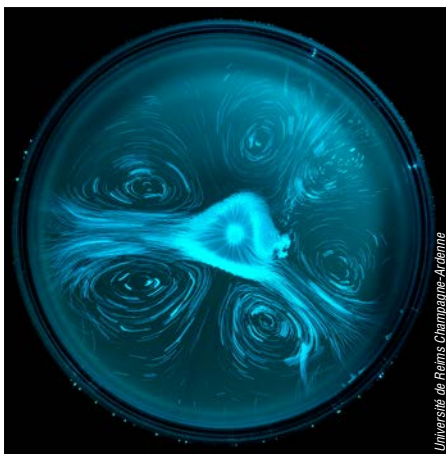
UNE ONDE DE CHOC DANS LE NUAGE DE CONDENSATION

Lorsqu'on filme à une cadence plus rapide (12 000 images par seconde) le débouchage d'une bouteille de champagne conservée à température ambiante, des détails supplémentaires apparaissent. En particulier, on distingue

une onde de choc, parallèle au goulot (*flèche*), qui progresse de bas en haut dans le sillage du bouchon. Par ailleurs, les images mettent en évidence le retour très rapide du bouchon à sa forme d'équilibre.



Univ. de Reims Champagne-Ardenne



LES TOURBILLONS QUI AGITENT LA SURFACE d'un verre de champagne [voir aussi l'illustration page 37] évoquent par leur aspect les systèmes tourbillonnaires des courants océaniques, reconstitués ici à l'aide de données satellitaires. Plus spécifiquement, à la surface du champagne, les tourbillons s'organisent en un nombre pair de cellules régulièrement disposées autour de l'axe central.

bien connu des physiciens : la tomographie laser. Cette technique consiste à éclairer le fluide avec un plan de lumière laser ; des particules ajoutées au fluide diffusent cette lumière et permettent ainsi de visualiser les mouvements du fluide dans ce plan.

Des tourbillons comme dans les océans

Ces mouvements tourbillonnaires ont une importance considérable dans le champagne. Ils renouvellent en permanence la surface libre du liquide en composés volatils odoriférants, accélérant ainsi l'évaporation des arômes du vin. Ils sont donc responsables d'une perception plus efficace des arômes que le vin recèle.

Notons d'ailleurs que l'olfaction d'un vin tranquille (incapable de tourbillonner par lui-même) s'effectue toujours après l'avoir agité. En imprimant un mouvement de rotation à son verre, le dégustateur met le vin en rotation, permettant ainsi aux arômes de s'échapper plus rapidement. Dans le cas du champagne, cette agitation est inutile. L'effervescence joue ce rôle à merveille en faisant tourbillonner le champagne dans un verre au repos !

Prenons encore un peu de recul et embarquons à bord d'un satellite de la Nasa. Entre juin 2005 et décembre 2007,

dans le cadre du programme ECCO (*Estimating the Circulation and Climate of the Ocean*), la Nasa a synthétisé l'ensemble des données satellitaires portant sur la circulation océanique de surface. Le but ultime est de modéliser, à l'échelle planétaire, les mouvements des masses d'eau afin de les prendre en compte dans les modèles destinés à mieux cerner les futurs changements climatiques. Au-delà de l'avancée scientifique majeure que constitue ce programme pour la compréhension du fonctionnement de notre planète, le résultat visuel est éblouissant. Les images qui matérialisent les courants à la surface des océans sont d'une grande beauté graphique (voir la figure ci-dessus).

À l'échelle des océans, on retrouve des systèmes tourbillonnaires qui rappellent ceux qui agitent la surface du champagne. À la toute petite échelle d'une flûte de champagne, le fluide est mis en mouvement par la remontée des bulles et s'organise spontanément en de multiples cellules convectives, tout comme le font les courants océaniques à la surface du globe. Le microcosme de la flûte de champagne rejoint ainsi le macrocosme de la surface océanique ! L'infiniment petit de la flûte de champagne est une leçon sur l'infiniment grand qui nous entoure et dans lequel l'homme se retrouve plongé... ■

■ BIBLIOGRAPHIE

G. Liger-Belair et G. Polidori, **Nouveau voyage au cœur d'une bulle de champagne**, Odile Jacob, 2015.

G. Liger-Belair et al., **Champagne - La vie secrète des bulles**, Le Cherche midi, 2015.

F. Beaumont et al., **Numerical modelling of bubble-driven flow patterns in champagne glasses**, *Int. J. of Num. Meth. for Heat and Fluid Flow*, vol. 24, pp. 563-578, 2014.

G. Liger-Belair et al., **Champagne cork popping revisited through high-speed infrared imaging : The role of temperature**, *Journal of Food Engineering*, vol. 116, pp. 78-85, 2013.

Détecter la lumière de toutes les étoiles disparues

Plusieurs générations d'étoiles, aujourd'hui éteintes,
ont empli l'Univers d'un rayonnement ambiant
que les astronomes commencent tout juste à détecter.

Alberto Domínguez, Joel Primack et Trudy Bell