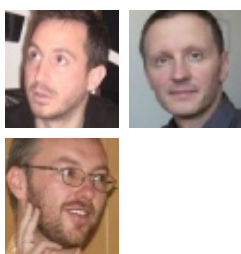


2. LES FIBRES CREUSES DE CELLULOSE adsorbées sur la paroi de la flûte [provenant du torchon d'essuyage ou de l'atmosphère] piègent des bulles d'air qui grossissent à mesure de la diffusion du dioxyde de carbone dissous (a-c). Quand la bulle, enrichie en dioxyde de carbone, atteint une taille critique, elle s'échappe (d, e). Une milliseconde sépare deux clichés successifs.

LES AUTEURS



Gérard LIGER-BELAIR est professeur de physique au Laboratoire d'œnologie de l'Université de Reims. Régis GOUGEON est maître de conférences, dans l'Équipe Eau, Molécules actives, Macromolécules, Activités (EMMA), de l'Institut universitaire de la vigne et du vin, à l'Université de Bourgogne, à Dijon. Philippe SCHMITT-KOPLIN est directeur de recherche au Centre Helmholtz, à Munich.

✓ BIBLIOGRAPHIE

G. Liger-Belair et G. Polidori, *Tempête dans un verre de champagne ! Pour la Science*, n° 362, pp. 66-70, 2007.

G. Liger-Belair et al., *Unraveling different chemical fingerprints between a champagne wine and its aerosols*, *PNAS*, vol. 106, pp. 16545-16549, 2009.

Chandrashekar et al., *The taste of carbonation*, *Science*, vol. 326, pp. 443-445, 2009.

G. Liger-Belair, *Effervescence : La science du champagne*, Odile Jacob, 2009.

Contrairement à une idée reçue, les bulles de champagne ne se forment pas sur les défauts du verre. Ce sont des particules, des fibres de cellulose provenant des torchons d'essuyage ou des microcristaux de tartre présents dans le vin, qui donnent naissance aux bulles. De minuscules bulles d'air ont été piégées dans les anfractuosités de ces particules au moment de verser le champagne. La pression à l'intérieur de ces microbulles d'air étant inférieure à la pression en dioxyde de carbone dissous, ce dernier y diffuse. La bulle gonfle à mesure de la diffusion du dioxyde de carbone, puis s'échappe de sa cavité quand elle a atteint une taille critique.

Ces microbulles d'air sont autant de mini-ascenseurs par lesquels le dioxyde de carbone dissous rejoint la surface en formant un train de bulles (voir la figure 2). Une fibre de cellulose émet plusieurs dizaines de milliers de bulles. On nomme « nucléation hétérogène » la formation de bulles de gaz carbonique à partir d'un germe de gaz préexistant dans le champagne (ou de toute autre boisson gazeuse).

Des centaines de bulles éclatent juste après le remplissage d'une flûte. Lorsqu'une bulle éclate à la surface de la coupe, elle projette un minuscule jet de champagne qui se brise en gouttelettes. La surface du liquide est alors piquetée de centaines de jets minuscules (voir la figure 3) se brisant à leur tour en plusieurs gouttelettes. Ce sont des centaines de gouttelettes, parfois des milliers, qui sont projetées chaque seconde, plusieurs centimètres au-dessus de la surface, sous la forme d'un « aérosol de champagne » qui picote le visage (voir la figure 1). Observons comment se forme cet aérosol.

Le jet de champagne se brise en plusieurs gouttelettes, car la somme des surfaces de multiples gouttelettes est inférieure à la surface du petit cylindre de liquide qui

jaillit de la surface. L'énergie de surface du système est ainsi minimisée. C'est l'instabilité de Rayleigh, également responsable d'un phénomène facile à observer : un mince filet d'eau qui s'écoule d'un robinet se scinde en gouttelettes.

Le jet de champagne parcourt une courte distance au-dessus de la coupe avant de se briser en gouttelettes. D'après les équations de la mécanique des fluides, on montre qu'il se fragmente au bout de quelques dixièmes de milliseconde. Pour des bulles millimétriques, comme celles du champagne, on compte environ cinq gouttelettes par bulle.

Piqûres mécaniques et chimiques

Le dioxyde de carbone dissous influe de deux façons sur la dégustation du champagne. Il exerce deux types de stimulations : une « piqûre » mécanique et une « piqûre » chimique, faisant intervenir des récepteurs sensoriels de la douleur et des récepteurs sensibles à l'acidité. Les gouttelettes de liquide projetées à la surface lors de l'éclatement des bulles stimulent d'abord les nocicepteurs (les récepteurs sensoriels de la douleur) situés dans le nez. Quant aux bulles de dioxyde de carbone qui éclatent dans la bouche lors de la dégustation, elles stimulent les nocicepteurs situés à la surface de la langue et du palais.

Ces picotements mécaniques sont véhiculés par le nerf trijumeau. Ce nerf se subdivise en trois branches innervant les muqueuses de la face, l'une dans la cavité buccale, une autre dans la région nasale et la troisième au niveau des yeux. C'est pourquoi lorsque nous consommons certains aliments (par exemple de la moutarde, du piment), la sensation de picotement remonte de la bouche vers le nez ou les yeux, et fait pleurer.

La piqure est d'autant plus forte que le champagne est effervescent (donc riche en dioxyde de carbone dissous). Ainsi, les vieux champagnes, appauvris en gaz car le bouchon poreux en a laissé s'échapper, sont perçus comme moins vifs que les champagnes jeunes.

Des picotements dus au dioxyde de carbone

En 2009, Charles Zuker et ses collègues, de l'Université Columbia à New York, ont montré qu'au contact de la langue, le dioxyde de carbone dissous dans le champagne exerce une piqure dite chimique. Chez la souris, des cellules de papilles gustatives portant des récepteurs sensibles à l'acidité (des chimiorécepteurs) sont activées en présence de dioxyde de carbone. Ils ont identifié le gène impliqué : *Car4*. Il code une enzyme, l'anhydrase carbonique 4, située dans la membrane des cellules sensibles à l'acidité.

Cette enzyme catalyse la réaction d'hydratation du dioxyde de carbone dissous en acide carbonique H_2CO_3 , lequel se dissocie en protons H^+ et en ions bicarbonates HCO_3^- . Dans la salive (dont le pH est dans les conditions habituelles proche de 7, c'est-à-dire neutre), l'apport de dioxyde de carbone déplace l'équilibre de dissociation de H_2CO_3 en faveur des ions H^+ . Ces derniers, libérés dans le milieu extracellulaire, activent ensuite les chimiorécepteurs PKD2L1 des cellules sensi-

bles à l'acidité, d'où le picotement chimique caractéristique.

Les expériences ont été menées sur la souris, mais les résultats obtenus sont-ils transposables à l'homme ? Pour vérifier les conclusions de Ch. Zuker et de son équipe, il faudrait organiser une dégustation de champagne dans une enceinte sous pression (autour de quatre ou cinq bars) pour empêcher l'effervescence, et par la même occasion la piqure mécanique. Dans ces conditions, le dioxyde de carbone dissous devrait activer les récepteurs sensibles à l'acidité – via la formation des ions H^+ –, et provoquer la piqure chimique attendue. Sans doute faudra-t-il trouver une autre façon de valider l'hypothèse...

Une anecdote vient conforter les conclusions de l'équipe de Ch. Zuker. En 1988, un médecin nommé Stephan Kelleher vient de gravir un sommet. Afin de se prémunir contre le mal des montagnes dont il souffre, il a pris un médicament à base d'acétazolamide. Or les enzymes des cellules sensibles à l'acidité sont inactivées par cette molécule. Pour célébrer leur ascension, S. Kelleher et ses compagnons décident de déboucher une bouteille de champagne. À sa grande surprise, le médecin rapporte que dans sa bouche le breuvage fut d'une grande platitude. En 1988, il ne s'expliquait pas le phénomène. On le comprend mieux aujourd'hui à la lumière des travaux de l'équipe américaine. Les enzymes des cel-

lules sensibles à l'acidité, neutralisées par l'acétazolamide, ne lui permettaient plus de ressentir la piqure chimique du dioxyde de carbone dissous.

Outre les picotements mécaniques et chimiques, l'éclatement des bulles semble jouer un rôle majeur dans la libération des arômes du champagne. Des centaines de composés organiques sont présents dans le champagne. Or beaucoup d'entre eux sont amphiphiles, c'est-à-dire que leurs molécules ont une double affinité : une partie de la molécule amphiphile est hydrophobe, tandis que l'autre est hydrophile. C'est notamment le cas de quelques alcools, de certains aldéhydes ainsi que des acides organiques.

Les bulles, exhausteurs d'arômes

Les molécules amphiphiles tendent à se placer aux interfaces gaz-liquide. Leur partie hydrophile est orientée vers le liquide et leur partie hydrophobe vers le gaz. Les bulles participent à l'ascension des molécules amphiphiles – seule une partie d'entre elles ont des propriétés aromatiques – qui s'y adsorbent. On estime que la surface cumulée de toutes les bulles produites dans une flûte avoisine deux mètres carrés.

Pour cette raison, les mini-ascenseurs qui véhiculent le dioxyde de carbone devraient aussi transporter les molécules aromatiques. Ces dernières devraient se

3. LA SÉQUENCE DE PHOTOGRAPHIES illustre la formation d'un jet de champagne [3] suite à l'éclatement d'une bulle en surface [1] et qui se scinde en plusieurs gouttelettes [4]. Environ une milliseconde sépare deux clichés successifs. La séquence schématisée détaille les étapes de la formation de l'aérosol. La partie émergée de la bulle est séparée de l'atmosphère par un mince film de liquide (a). Ce film finit par se rompre sous l'effet de la poussée de la bulle ; l'ouverture s'élargit à la vitesse de dix mètres par seconde (b à f). D'après la loi de Laplace reliant courbure

d'une interface et pression, il se crée un gradient de pression autour de la cavité. Une surpression (signe +) apparaît dans le liquide au bord du film et une dépression (signe -) sous la partie renflée (e). Le liquide se déplaçant des fortes pressions vers les basses pressions (f), un jet de liquide se forme (g), puis se scinde en gouttelettes (h).

