

# Champagne en effervescence

GÉRARD LIGER-BELAIR

*À la surface du champagne, les bulles de dioxyde de carbone éclatent, dispersant dans l'air des molécules aromatiques. Elles forment parfois d'éphémères structures en forme de fleurs.*

**F**aîtes sauter le bouchon d'une bouteille, versez le champagne dans une flûte, et trempez vos lèvres. Une effervescence bouillonnante de bulles, qui naissent et disparaissent, projette des milliers de gouttelettes qui flattent le nez et la langue avec les arômes et le bouquet de ce vin. Une petite symphonie accompagne cette délicieuse gorgée, où un effet de fraîcheur s'associe à la chaleur réconfortante de l'alcool. Le champagne est une source d'enchantement qui est devenu incontournable, dans le monde entier, lors des fêtes et des célébrations de toutes sortes.

Un bon champagne se caractérise, notamment, par son effervescence. Ses bulles doivent s'élever en multiples chapelets qui s'étirent le long des parois du verre pour atteindre la surface, où elles forment un anneau nommé colle-rette. La finesse et la persistance des bulles sont perçues comme des signes de qualité par la plupart des consommateurs. L'effervescence du champagne constitue sa spécificité et elle a une importance commerciale considérable. Il est

**1. LA FLÛTE est le verre le plus approprié pour la dégustation du champagne. Sa forme élancée met en valeur les chapelets de bulles, contrairement à la coupe, qui raccourcit l'ascension des bulles. En outre, le col de la flûte concentre les arômes véhiculés par les bulles et libérés au moment où elles éclatent.**

capital, pour les viticulteurs champenois, de maîtriser ce phénomène. Depuis quelques années, nous étudions le comportement des bulles, de leur naissance à leur disparition. Nous avons mis en évidence une structure inédite de bulles en forme de fleurs.

## La naissance des bulles

Dans le champagne, comme dans les autres vins pétillants ou dans les bières, les bulles résultent de la désorption progressive du dioxyde de carbone, c'est-à-dire son passage progressif de l'état dissous à l'état gazeux, dès que le bouchon est retiré. La dégradation des sucres du vin par les levures, nommée prise de mousse, donne du dioxyde de carbone et de l'éthanol (l'alcool). En revanche, pour les boissons de type soda, qui ne subissent pas de fermentation, le gaz dissous est introduit artificiellement par injection de dioxyde de carbone dans le liquide. La prise de mousse se déroulant dans l'espace fermé de la bouteille, le dioxyde de carbone ne peut s'échapper. Un équilibre s'établit entre le dioxyde de carbone dissous dans le vin et celui qui est piégé dans le col de la bouteille. Or, la concentration d'un gaz dissous augmente avec la pression exercée sur le liquide. Ainsi, la concentration en dioxyde de carbone dissous dans le champagne est proportionnelle à la pression dans le goulot de la bouteille.

À l'ouverture de la bouteille, cet équilibre est rompu, car la pression au-dessus du liquide diminue brusquement. La «solubilité» du dioxyde de carbone dans le champagne diminue, de sorte qu'une partie du dioxyde de carbone dissous repasse à l'état gazeux : c'est l'origine des bulles. Un nouvel état d'équilibre doit s'instaurer : dans une bouteille de champagne, on estime à dix grammes le dioxyde de carbone en excès, soit cinq litres de gaz dans une seule bouteille ! C'est pourquoi l'effervescence de champagne dans une flûte dure plusieurs dizaines de minutes. Le dioxyde de carbone s'échappe par les bulles, mais aussi directement par diffusion à l'interface entre l'air et le vin. Nous avons

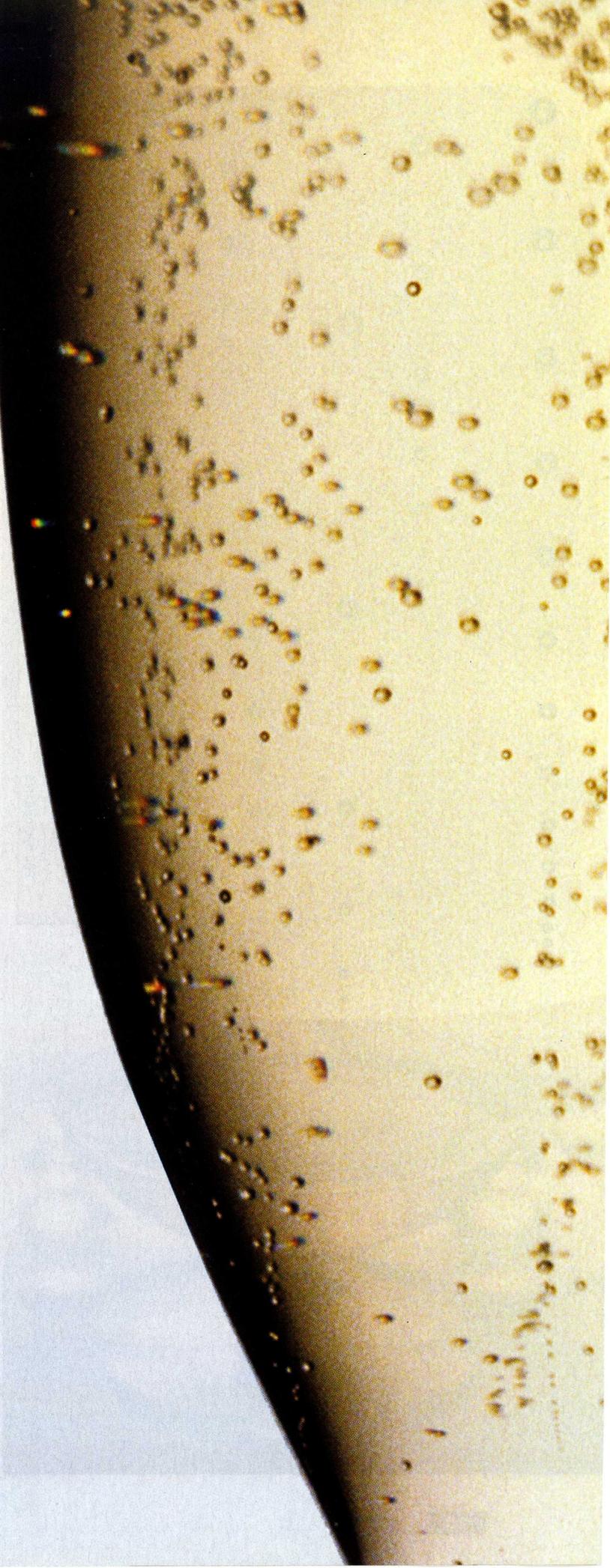
évalué l'importance relative des deux mécanismes : les bulles constituent seulement 15 à 30 pour cent du dégazage total.

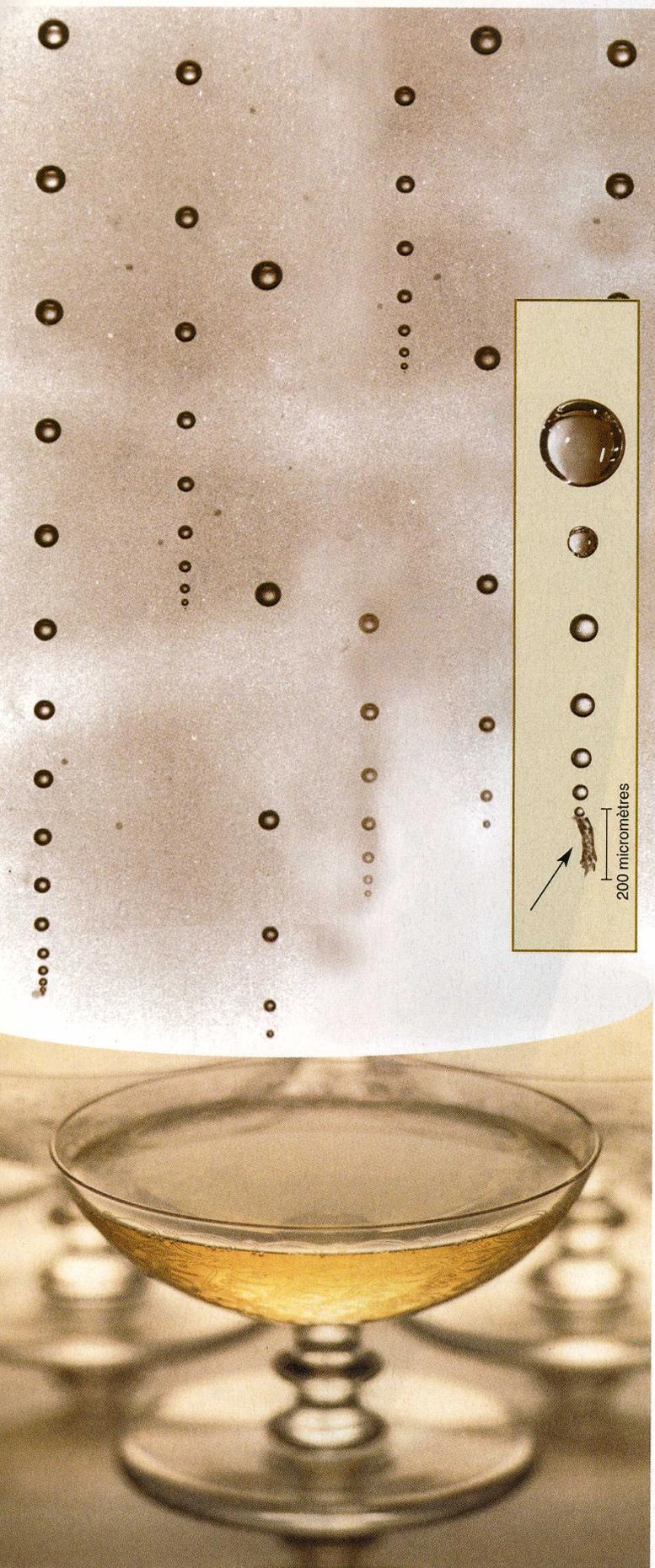
La naissance des bulles au sein d'un liquide (nommée nucléation homogène) ou sur les parois (nucléation hétérogène) nécessite un apport d'énergie pour vaincre les forces qui assurent la cohésion des molécules du liquide, c'est-à-dire les forces d'attraction dipolaire de type van der Waals. La formation des bulles est, par conséquent, limitée par une barrière énergétique. Dans le cas de la nucléation homogène, on peut imaginer que les fluctuations locales de densité créent des régions de très faible densité où apparaît une microbulle. Quand son rayon est supérieur à un rayon critique, qui ne dépend que des propriétés physico-chimiques du champagne, la microbulle croît spontanément : le dioxyde de carbone dissous à proximité de la bulle passe à l'état gazeux et vient grossir la microbulle. Pour des rayons inférieurs, la pression à l'intérieur de la bulle est très élevée, car elle est inversement proportionnelle à son rayon. Cette surpression interdit alors au dioxyde de carbone dissous de diffuser dans la microbulle : celle-ci se résorbe et disparaît. À l'ouverture de la bouteille, le rayon critique d'une bulle de champagne est d'environ 0,2 micromètre. Pour vaincre la barrière énergétique, il faudrait des concentrations en dioxyde de carbone dissous notablement supérieures à celles mesurées dans le champagne. Par conséquent, les bulles ne naissent pas spontanément au cœur du champagne.

Dès lors, quelle est la cause du pétilllement ? Il naît de la présence d'impuretés sur le verre : dans une flûte parfaitement propre et lisse, le champagne ne mousserait pas. Dans le champagne, ainsi que dans les vins pétillants, les bières et les sodas, la formation de bulles requiert la préexistence de minuscules bulles gazeuses, dont le rayon est supérieur au rayon critique. Ces minuscules poches de gaz sont piégées sur les parois du verre, au moment où le champagne est versé. Ces bulles ont des rayons de courbure supérieurs au rayon critique et grandissent spontanément.

Pour étudier en détail les sites de production de bulles (ou «pouponnières de bulles»), nous avons observé, à l'aide d'une caméra à très grande vitesse, couplée à un microscope, la base de centaines de chapelets de bulles. Contrairement à une idée reçue, ces sites de nucléation, où sont piégées les poches de gaz, ne correspondent pas aux irrégularités de la surface du verre, dont les échelles sont très inférieures au rayon de courbure critique. Les pouponnières de bulles se constituent sur des impuretés fixées sur la paroi du verre, des dépôts de calcaire, de tartre, de bouchon, et surtout des fibres de cellulose creuses, abandonnées par le torchon d'essuyage ou qui étaient en suspension dans l'air. Des poches de gaz sont emprisonnées à l'intérieur de ces fibres creuses. Parfois, une de ces particules de cellulose se détache de la paroi, introduisant la pouponnière de bulles au sein même du champagne. Peu à peu, cette particule, entraînée par les bulles qui grossissent, remonte vers la surface.

Pendant la formation des bulles, les molécules de dioxyde de carbone diffusent et la bulle grossit, mais elle reste d'abord fixée à son site de nucléation sous l'action des forces capillaires. Malgré la diffusion, le liquide environnant ne s'appauvrit pas en dioxyde de carbone, parce que des mouvements de convection le long des parois du verre, provoqués par les bulles qui remontent et par les différences thermiques (le





liquide est plus froid que l'air ambiant), renouvellent le liquide. Nous avons montré que le diamètre de ces bulles croît linéairement avec le temps. La bulle se détache quand la poussée d'Archimède devient supérieure aux forces capillaires. Nous avons établi que le rayon d'une bulle qui se détache de son site de nucléation est d'une dizaine de micromètres. Cette bulle laisse, dans la fibre, une poche de gaz qui sert d'amorce à une nouvelle bulle. Le processus se poursuit jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de dioxyde de carbone dissous.

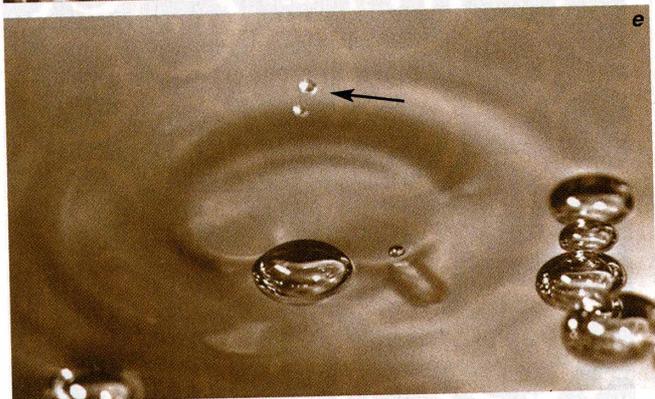
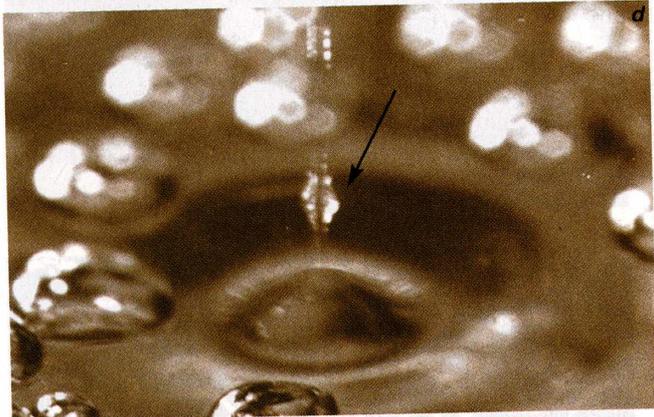
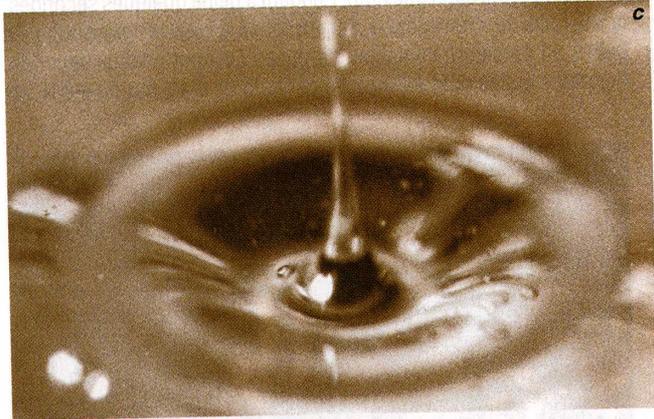
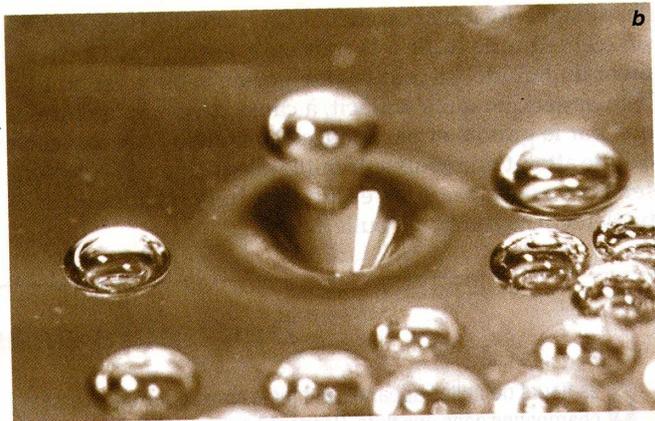
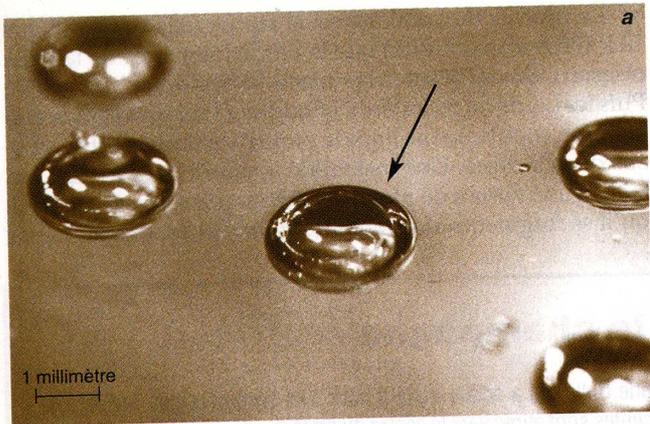
Chaque site de nucléation libère des bulles à intervalles de temps réguliers ; il est caractérisé par sa fréquence d'émission, qui décroît à mesure que la concentration en dioxyde de carbone diminue. Nous avons utilisé un stroboscope pour mesurer les fréquences d'émission de bulles de plusieurs sites. Lorsque la fréquence de l'éclair du stroboscope est égale à celle de la formation des bulles, les trains de bulles semblent immobiles. Entre deux éclairs lumineux, chaque bulle dans la colonne prend la place de celle qui la précède : l'œil ne distingue plus le mouvement. La fréquence d'émission des bulles dépend de la quantité de gaz dissous, mais aussi de la géométrie du site. Ainsi, on peut observer au sein d'une même flûte des trains où les bulles sont très rapprochées et d'autres où elles le sont moins : la fréquence varie de 1 à 30 bulles par seconde (voir la figure 2). Dans la bière, où la quantité de gaz est à peu près trois fois inférieure à celle contenue dans le champagne, les pouponnières de bulles ne produisent qu'une dizaine de bulles par seconde au maximum.

### L'ascension des bulles

Lorsqu'une bulle s'échappe de son site de nucléation, elle grossit tout en se frayant un chemin vers la surface. Son diamètre croît linéairement aussi, car son environnement en dioxyde de carbone est sans cesse renouvelé pendant l'ascension. La poussée d'Archimède augmente à mesure que la taille croît, de sorte que les bulles accélèrent de façon continue et s'éloignent les unes des autres au cours de leur ascension. Les phénomènes sont compliqués par le fait que le champagne, comme la bière et les vins pétillants, ne sont pas des liquides purs. Le champagne est une solution aqueuse diluée d'alcool, sursaturée en dioxyde de carbone et contenant des macromolécules complexes. En outre, elle renferme aussi des molécules dites tensioactives (essentiellement des protéines et des glycoprotéines). De par leur structure moléculaire, ces molécules présentent une double affinité : une région hydrophile et une autre hydrophobe. Par conséquent, elles se placent de préférence aux interfaces, la partie hydrophile au contact du liquide et la partie hydrophobe au contact du gaz.

Les molécules tensioactives se concentrent aux interfaces gaz-liquide qui délimitent les bulles. Cette couche de

**2. LA BRÈVE EXISTENCE d'une bulle de champagne commence sur une minuscule fibre de cellulose accrochée à la paroi de la flûte (flèche dans le cartouche). Au moment où le champagne est versé, une poche de gaz reste piégée dans la fibre creuse de cellulose. Le dioxyde de carbone dissous dans le champagne diffuse et pénètre dans cette poche, qui grossit. Quand la bulle est assez grosse, elle se détache de son site de nucléation et chemine vers la surface. Chaque site de nucléation émet des bulles à un rythme différent, qui dépend de la concentration en dioxyde de carbone dans le champagne, mais aussi de la forme des fibres. À mesure qu'elles s'élèvent, les bulles grossissent (de 300 à 400 micromètres par seconde) et accélèrent. Une bulle atteint la surface à une vitesse supérieure à dix centimètres par seconde.**



molécules tensioactives rigidifie la surface des bulles et modifie l'écoulement du liquide qu'elles traversent. Leur coefficient de traînée (c'est-à-dire le coefficient de frottement du liquide sur la bulle) est plus élevé dans le champagne que pour une bulle de même taille qui s'élèverait dans une solution pure. Dans le cas d'une bulle de rayon constant qui monte dans une solution contenant des molécules tensioactives, le coefficient de traînée augmente, de sorte que la bulle ralentit jusqu'à atteindre une vitesse minimale, lorsque la bulle est totalement entourée de macromolécules tensioactives.

Nous avons mesuré les coefficients de traînée de bulles de champagne et de bière lors de leur trajet vers la surface. Ils se déduisent des rayons des bulles et de leur vitesse d'ascension. Nous avons comparé les valeurs ainsi obtenues avec celles de bulles rigides et de bulles souples (sans tensioactifs). Nous en avons conclu que les bulles de champagne se comportent comme des sphères souples faiblement chargées en molécules tensioactives. À mesure qu'une bulle grossit, sa surface augmente, offrant toujours davantage de place pour l'adsorption de nouvelles molécules tensioactives. Ainsi, les bulles qui grossissent subissent deux effets opposés : quand la vitesse de dilatation de la bulle est supérieure à la vitesse d'accumulation des molécules tensioactives, alors la surface «contaminée» diminue par rapport à la surface «propre» (la bulle se «nettoie», en quelque sorte). Dans le cas contraire, la surface de la bulle est inexorablement enrichie par de nouvelles molécules de surfactants, qui la rigidifie.

Dans le champagne, ainsi que dans les vins pétillants et dans les sodas, les bulles croissent trop rapidement (à environ 350 micromètres par seconde) et les molécules de surfactants sont trop peu nombreuses pour que les bulles se rigidifient. Ainsi, l'accroissement de surface de la bulle l'emporte sur l'adsorption des molécules tensioactives pendant l'ascension. En revanche, les bulles de bière présentent une interface rigide lors de leur ascension. La bière contient en effet des quantités beaucoup plus élevées de macromolécules tensioactives (de l'ordre de plusieurs centaines de milligrammes par litre) que le champagne (seulement quelques milligrammes par litre). En outre, comme la concentration en gaz est moindre dans la bière, le taux de croissance des bulles de bière est inférieur à celui des bulles de champagne.

Dans les quelques secondes qui suivent leur naissance et leur décollage, les bulles parcourent quelques centimètres pour atteindre un diamètre final d'environ un millimètre quand elles parviennent à la surface. En surface, une bulle est soumise à deux forces antagonistes : la poussée d'Archimède, qui tend à la faire émerger, et les forces capillaires, qui tendent à la maintenir immergée. Dans le cas du

**3. LA DISPARITION D'UNE BULLE** commence quand elle perce la surface (a). La partie émergée de la bulle s'amincit et se rompt. Cette rupture, très brève, laisse un cratère qui correspond à la partie immergée de la bulle (b). La couronne de liquide qui entoure ce cratère s'effondre vers le centre créant un jet de liquide vertical au-dessus de la surface (c). Ce jet instable se brise en fines gouttelettes, de formes variées (d), qui finissent par devenir sphériques (e). La couronne s'étale progressivement, jusqu'à disparaître.

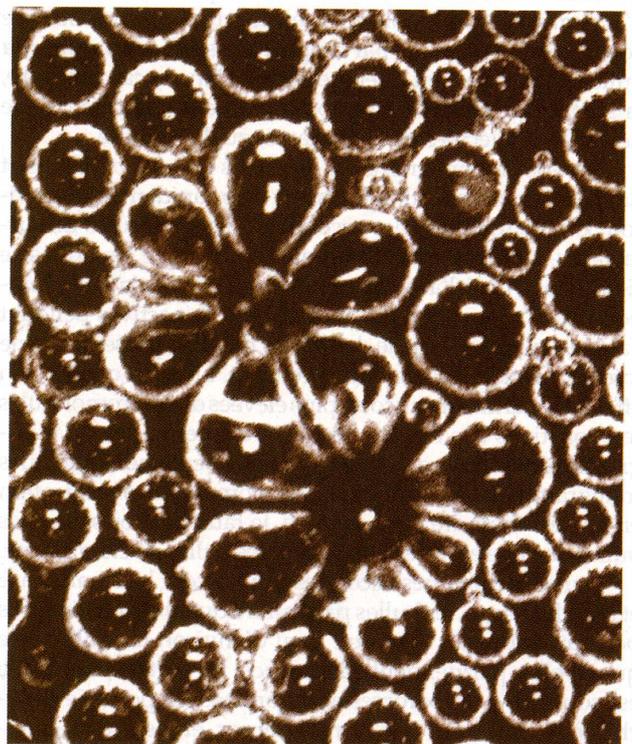
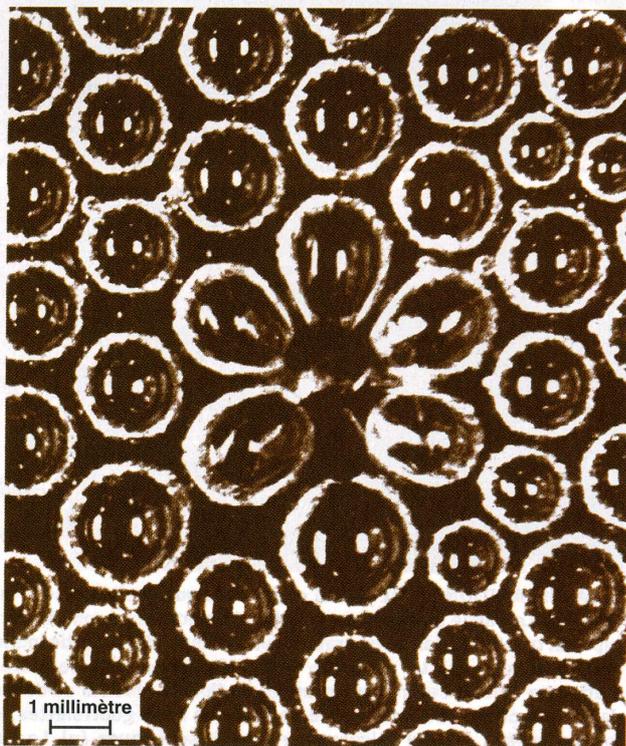
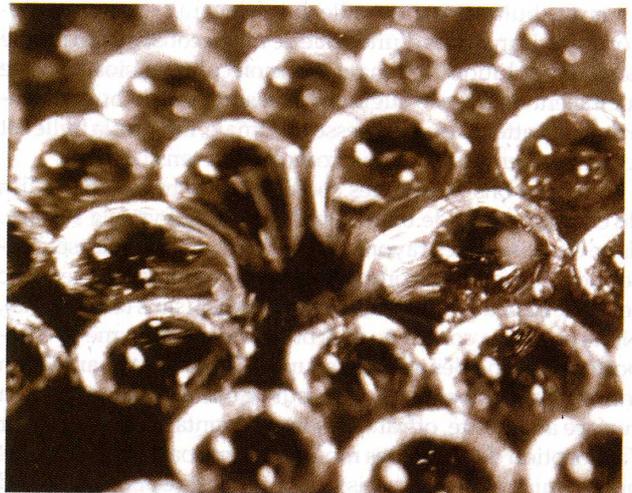
champagne, les forces capillaires l'emportent. Ainsi, comme un iceberg, une bulle à la surface n'émerge pas entièrement du liquide. La calotte émergée de la bulle est un film hémisphérique qui s'amincit, à cause du drainage provoqué par la gravité et par la succion capillaire. Quand cette calotte atteint une épaisseur minimale critique, elle devient sensible aux vibrations et aux gradients thermiques et finalement se rompt : la bulle éclate.

La rupture de la calotte est si rapide (elle ne prend que 10 à 100 microsecondes) que la partie immergée de la bulle reste un moment béante à la surface du liquide (voir la figure 3). Puis les bords de ce cratère s'effondrent l'un vers l'autre et la collision expulse un jet liquide projeté verticalement au-dessus de la surface. Une instabilité apparaît dans ce filet qui jaillit à une vitesse de plusieurs mètres par seconde, de sorte qu'il se fragmente alors en fines gouttelettes. Ces dernières

## Des fleurs dans le champagne

**D**es fleurs de bulles apparaissent juste après que l'on a versé du champagne dans une flûte. Pendant à peine quelques secondes, la surface du champagne est tapissée d'une monocouche de bulles où plusieurs centaines de bulles éclatent chaque seconde. Certaines bulles sont déformées par la force d'aspiration créée par

une bulle qui a éclaté juste à côté. Les sommets des bulles adjacentes sont étirés vers le centre du cratère vide. La surface des bulles se déforme de 15 pour cent environ. Cet étirement ne dure que quelques centaines de microsecondes et donne naissance à des structures en fleurs aussi éphémères qu'inattendues.



subissent les effets combinés de l'inertie et de tension de surface, qui leur confèrent des formes variées. Puis ces effets s'amortissent et elles reprennent une forme quasi sphérique.

### L'éclatement des bulles

La durée de vie moyenne d'une bulle est un critère important dont dépendent l'existence et la stabilité de la collerette. Des bulles trop éphémères n'ont pas le temps de migrer sur les bords du verre pour former la collerette. Des bulles dont la durée de vie est trop longue risquent de former une épaisse couche de bulles qui donnerait au champagne l'aspect compact de la mousse de bière. En observant à l'œil nu le comportement des bulles en surface, on constate que leur durée de vie s'allonge avec la durée de résidence du champagne dans le verre. Les éclatements se font plus rares. En effet, en raison des mouvements de convection dans le liquide et du ballet incessant des bulles, les macromolécules tensioactives du champagne migrent vers la surface, s'y adsorbent et la rigidifient. Le drainage et l'amincissement qui précèdent la rupture du film des bulles sont ralentis. Les bulles se stabilisent peu à peu. D'après nos mesures, la durée de vie d'une bulle en surface varie de quelques dixièmes de seconde, juste après que le champagne est versé, à plusieurs secondes.

D'autres phénomènes interviennent lors de l'éclatement des bulles, quand elles ne sont pas isolées. Quand on verse le champagne, une importante mousse se forme, s'épaissit, puis retombe, ne formant qu'une monocouche de bulles à la surface du champagne. Nous avons étudié les conséquences de l'éclatement d'une bulle sur ses voisines dans cette couche dont la durée de vie ne dépasse pas quelques secondes. Pendant ce bref instant, des centaines de bulles éclatent. En utilisant des techniques macro-photographiques et des éclairs lumineux très brefs, nous avons observé des

structures éphémères en forme de fleurs, où les bulles très déformées en direction du centre de la structure seraient les pétales (voir l'encadré page 30). Paradoxalement les bulles voisines sont aspirées et non pas soufflées par une bulle qui éclate. Elles se déforment notablement avant de reprendre une forme classique.

Au-delà des considérations esthétiques, des jets de gouttelettes sont projetés à quelques centimètres au-dessus de la surface, et entrent en contact avec les organes sensoriels. Les nocicepteurs (les récepteurs de stimulations potentiellement nocives et de la douleur) localisés dans le nez sont stimulés pendant la dégustation, ainsi que les récepteurs du toucher dans la bouche lorsque les bulles éclatent sur la langue.

### Libération de l'arôme et de la saveur

Outre cette stimulation mécanique, les bulles qui s'effondrent à la surface joueraient un rôle essentiel dans la libération des arômes du champagne. L'éclatement incessant des bulles provoque la mise en suspension dans l'atmosphère d'un nuage de fines gouttelettes issues de l'interface air-champagne. Cette interface est riche en molécules tensioactives, apportées par les bulles qui les ont piégées lors de leur ascension. Certaines d'entre elles sont des molécules aromatiques. Ainsi, les petites gouttelettes en suspension dans l'air contiennent des molécules aromatiques. Suivant leur taille, elles retombent ou s'évaporent, libérant les arômes. Nous projetons d'étudier bientôt la libération des arômes dans l'atmosphère pour chacune des molécules aromatiques du champagne.

L'effervescence dans le champagne est un outil précieux pour explorer la physico-chimie de l'ascension, de l'expansion et de l'effondrement des bulles. Regarderez-vous encore une flûte de champagne comme vous le faisiez avant de lire cet article?

Gérard LIGER-BELAIR est maître de conférences au Laboratoire d'œnologie de l'Université de Reims Champagne-Ardenne.

G. LIGER-BELAIR et al., *Flower-shaped structures around bubbles collapsing in a bubble monolayer*, in *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Série IV, vol. 2, pp. 775-780, 2001.

G. LIGER-BELAIR, *Une première approche des processus physico-chimiques liés à l'effervescence des vins de champagne*, in *Ann. Phys. Fr.*, vol. 27, n°4, 2002.

G. LIGER-BELAIR et al., *Kinetics of gas discharging in a glass of champagne: the role of nucleation sites*, in *Langmuir*, vol. 18, pp. 1294-1301, 2002.

## V<sup>èmes</sup> Journées de l'Innovation

Travail coopératif,  
Espaces collaboratifs

Foix - Ariège

Les 22, 23 et 24

Janvier 2003

Organisées par  
Le CERFI  
IUFM Midi-Pyrénées



Colloque International Francophone

Journées ouvertes  
à tous les acteurs  
du monde de la formation,  
chercheurs, enseignants,  
responsables d'entreprises,  
éditeurs spécialisés,  
responsables d'institutions

Conférences  
Tables rondes  
Exposants  
Communications  
Concours  
Ateliers de pratiques  
Rallye coopératif

Journées de l'Innovation  
2003

Avec la participation de :  
SEDRAP, France telecom,  
Milan, Apple, MAIF,  
Rectorat-académie de Toulouse,  
Direction de la Technologie,  
Conseil Régional Midi-Pyrénées  
Conseil Général de l'Ariège,  
CNES, Hachette, IBM, MultiD  
Texas Instrument, Promothéan,  
Médiariège, BEZY.

Inscriptions et programme sur le site des journées  
<http://www2.toulouse.iufm.fr/cerfi/ji2003/>

Tel : 33 (0) 5 62 25 20 74  
Fax : 33 (0) 5 62 25 21 35