



Gérard Liger-Belair
Guillaume Polidori

**Nouveau
voyage
au cœur
d'une bulle
de champagne**

Odile
Jacob

Nouveau voyage au cœur d'une bulle de champagne

© Odile Jacob, octobre 2015
15, rue Soufflot, 75005 Paris

www.odilejacob.fr

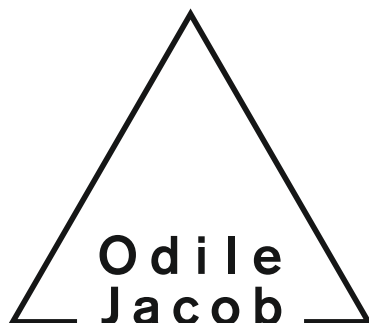
ISBN 978-2-7381-6486-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Gérard Liger-Belair
Guillaume Polidori

Nouveau voyage au cœur d'une bulle de champagne

Préface de Pierre Cheval

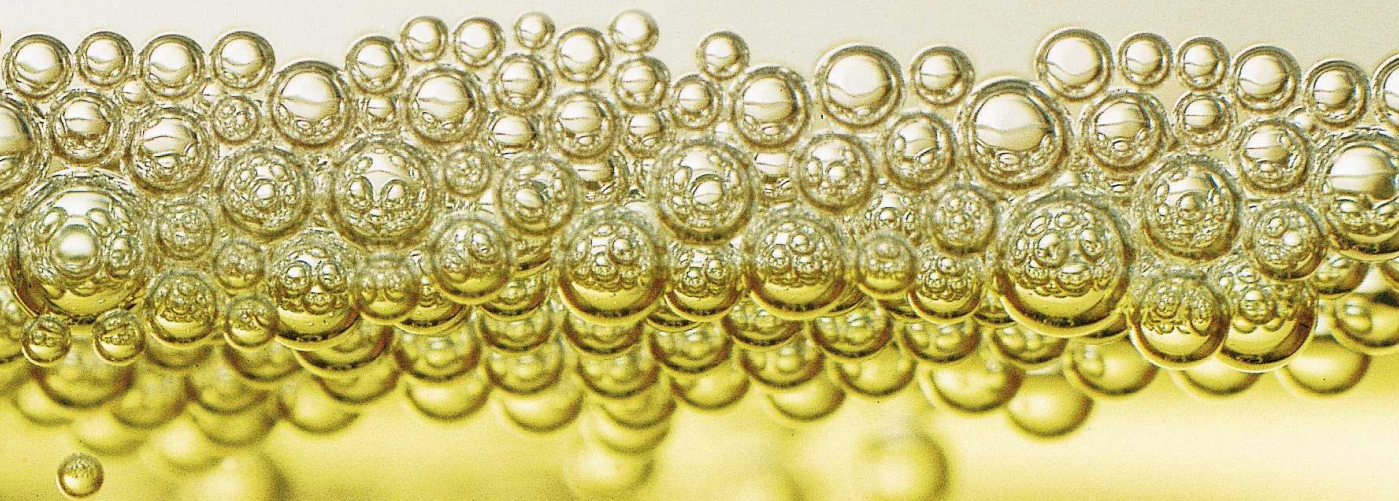


*Amusez-vous sur la Terre et sur l'onde,
Malheureux qui se fait un nom,
Richesses, honneurs, faux éclats de ce monde,
Tout n'est que bulle de savon...*

Pierre-Gilles de Gennes

Sommaire

| | |
|---|----|
| <i>Préface</i> | 9 |
| <i>Avant-propos</i> | 11 |
| <i>Introduction</i> | 13 |
| <i>Un peu d'histoire</i> | 17 |
| | |
| 1. Élaboration du champagne | 21 |
| <i>De la vendange à la bouteille</i> | 22 |
| | |
| 2. Naissance d'une bulle | 43 |
| <i>Comment les bulles se forment-elles ?</i> | 44 |
| | |
| 3. Ascension d'une bulle | 73 |
| <i>Comment les bulles montent vers la surface</i> | 74 |
| | |
| 4. Tourbillons d'arômes | 93 |
| <i>Pourquoi le champagne tourbillonne-t-il ?</i> | 94 |



5. Éclatement d'une bulle 107

*Quelle destinée pour une bulle
de champagne?* 108

6. Quel verre choisir ? 145

*Existe-t-il un verre idéal
pour le champagne?* 146

7. Autres histoires de bulles 159

Que nous racontent les bulles? 160

**8 Un océan dans une flûte
de champagne** 173

De l'infiniment petit à l'infiniment grand 174

Annexes 185

Notes 186

Bibliographie 187

Remerciements 189

Crédits photographiques 191

Préface

Comme l'indique le titre de ce nouveau et remarquable ouvrage, les physiciens Gérard Liger-Belair et Guillaume Polidori nous invitent à un merveilleux voyage au cœur du champagne et des secrets de son effervescence. Les deux chercheurs nous convient en effet dans l'intimité de leurs laboratoires et nous emmènent dans une véritable odyssée scientifique et hédonique, dont le fil conducteur est la bulle. Profondément inscrite dans l'imaginaire collectif, la bulle de champagne devient prétexte à une flânerie aussi surprenante qu'instructive qui nous entraîne, depuis sa naissance sur une microscopique particule de poussière présente à la surface de la flûte, jusqu'aux frontières de l'Univers avec l'évocation de la mousse cosmique...

Qu'il me soit permis, à la lecture de cet ouvrage pétillant, d'évoquer un souvenir qui ne l'est pas moins... En mai 2000 et à l'invitation de la profession champenoise, le professeur Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique, était venu à l'université de Reims pour présenter une conférence au titre évocateur, « Bulles de champagne et autres objets fragiles »... On ne parlait pas encore à l'époque de la candidature de la Champagne au Patrimoine mondial de l'Unesco (qui a envahi ma vie et dans laquelle je m'investis passionnément depuis 2002) et encore moins de l'inscription réussie en juin 2015 pour mon plus grand bonheur et celui des Champenois.

Le grand amphithéâtre du campus de l'université de Reims était plein à craquer. La renommée de l'illustre professeur, véritable jongleur d'idées, avait fait mouche, et les bancs, les tables, les escaliers et les gradins avaient été pris d'assaut par les étudiants et les nombreux professionnels de la vigne et du vin de Champagne qui ne voulaient pas manquer une prestation qui promettait d'être brillante. Et elle le fut ! Toutes celles et ceux qui ont eu la chance d'être présents ce jour-là se rappellent le florilège d'idées, d'images, d'analogies et de théories jetées au vol pour capter l'attention d'un auditoire sous le charme des gouttes et des bulles. Pierre-Gilles de Gennes évoqua tour à tour les gouttes de rosée, les ronds dans l'eau, les bulles de savon, les alvéoles des abeilles et sa théorie – très personnelle – du « pinceau à deux poils » pour nous faire comprendre, avec des mots simples et choisis, les lois de la Nature et la perfection des formes qu'elles engendrent, notamment la forme sphérique qui caractérise une bulle. J'étais dans la salle et j'en ai conservé le souvenir d'un grand moment de pédagogie et d'intelligence.

Gérard Liger-Belair, qui n'aurait manqué ce rendez-vous pour rien au monde, était bel et bien présent. Le jeune scientifique était déjà sous le charme du ballet ascensionnel des bulles à l'époque, puisqu'il terminait sa thèse de doctorat consacrée à

l'étude des processus physico-chimiques liés à l'effervescence des vins de Champagne. Pierre-Gilles de Gennes avait d'ailleurs accepté de parrainer la toute première exposition de photographies de notre chercheur en herbe, qui avait déjà figé sur la pellicule quelques-uns des phénomènes effervescents nés de la sublimation du ferment.

Le « jongleur d'idées » qu'était Pierre-Gilles de Gennes passait le témoin, en quelque sorte, au « jongleur de bulles » que devait devenir notre jeune scientifique champenois. Car la bulle est jeune ! Elle appartient au monde moderne. Elle symbolise l'éphémère et l'immédiat, à l'image d'un monde tourbillonnant, exigeant et fragile. Elle mérite, bien sûr, qu'on s'y attarde, pour essayer de comprendre son cortège de phénomènes qui semble défier les lois de l'entropie.

Quittons les chemins balisés de l'œnologie pour franchir d'autres frontières, celles de la musique, de l'esthétique, de la psychanalyse, des océans et même du cosmos. On sait que le propre de l'homme est d'aimer flirter avec sa propre mort. Cette bulle qui réveille nos sens en venant mourir sur notre palais n'est-elle pas la préfiguration en miniature de notre disparition programmée, de l'étape qui nous transportera dans un autre monde ? Chaque pétillement est en soi comme une petite mort, bien inoffensive et si agréable. Un défi à la bienséance, au politiquement correct. Les gamins qui finissent les fonds de verre oubliés sur la table de l'apéritif l'ont bien compris : « Ça pique », disent-ils en grimaçant de plaisir.

Alors accompagnons les bulles dans leur danse et dégustons cet ouvrage qui lève encore un peu plus un coin du voile sur les mystères de l'effervescence, et qui met en lumière ce chef-d'œuvre du champagne qu'est la bulle, jamais solitaire, toujours unique. Laissons-nous guider par Gérard Liger-Belair et Guillaume Polidori et découvrons les beautés cachées de l'effervescence que seule l'imagerie scientifique a pu mettre au jour.

Émerveillons-nous enfin du rôle de cette bulle qui transforme toute dégustation de champagne en un moment unique et festif !

*Pierre Cheval,
viticulteur à Ay, président de l'association
« Paysages du Champagne »
porteuse du classement des coteaux,
caves et maisons de Champagne
au Patrimoine mondial de l'Unesco.*

Avant-propos

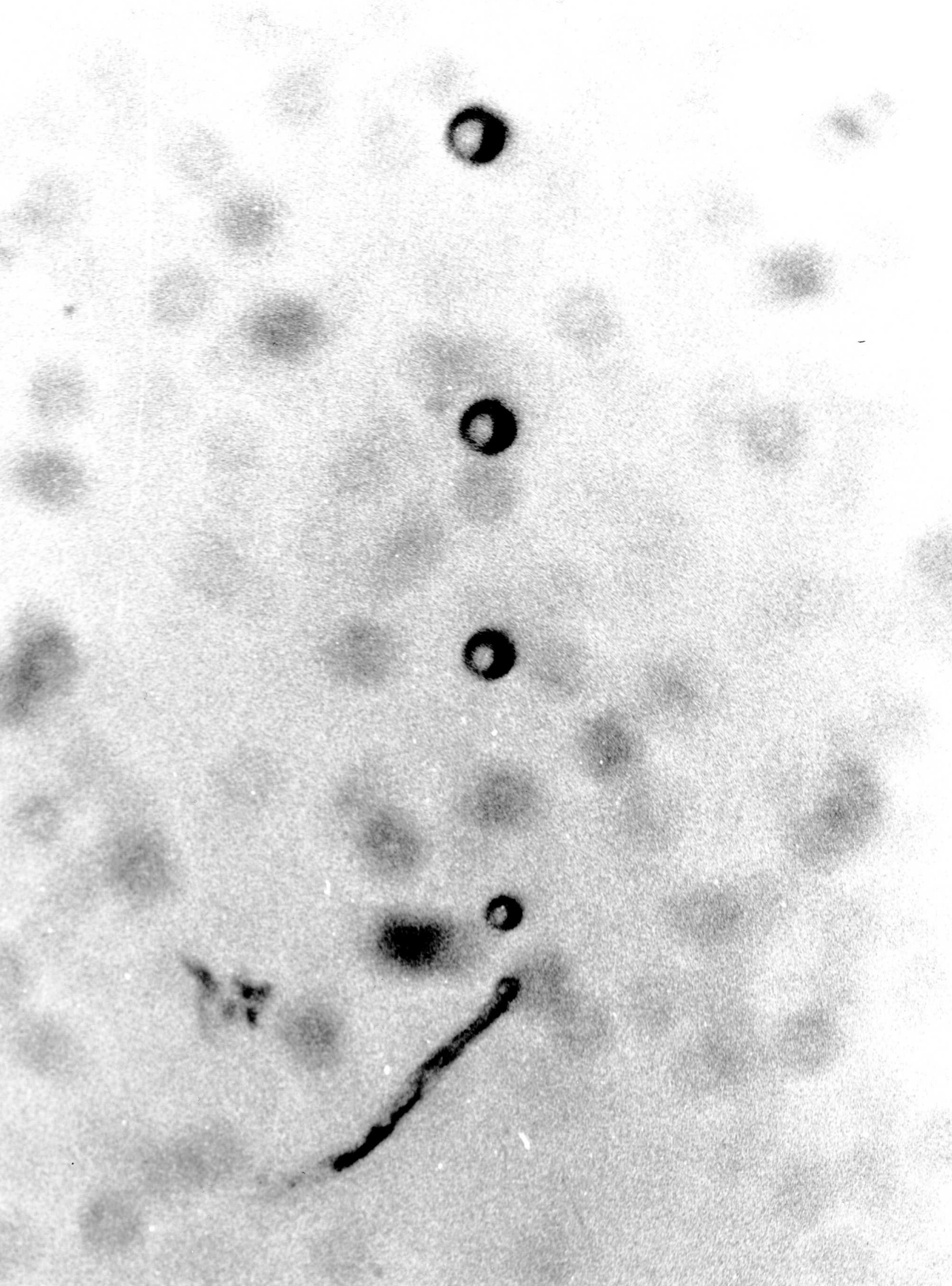
Depuis des millénaires, les bulles nous fascinent, parce qu'elles sont légères, insaisissables, colorées et éphémères... Ce sont des « objets fragiles », comme les définissait avec poésie Pierre-Gilles de Gennes. Cet immense savant réussissait comme personne à tenir en haleine tout un auditoire en évoquant une simple bulle de savon.

Au cours des dernières décennies s'est développée une science considérable des bulles et des mousses. Physiciens, chimistes et mathématiciens se sont passionnés pour ces objets fragiles aux propriétés extraordinaires. Cependant, et à ma grande surprise, peu de physiciens ont choisi de se pencher sur ce vin d'exception qu'est le champagne. Pourtant, dans le petit volume de champagne circonscrit par une flûte, on retrouve toutes les étapes de la vie d'une bulle. Elle naît sur une particule immergée, elle se développe dans la flûte en rejoignant la surface, où inexorablement elle vieillit, puis finit par disparaître. Les bulles du champagne, de leur naissance à leur dernier souffle, ne sont-elles pas une métaphore de notre propre existence?... Chacune de ces étapes mérite qu'on s'y intéresse tant les mécanismes physico-chimiques à l'œuvre dans une flûte sont subtils et délicats... C'est cette histoire de bulles que nous souhaitons vous conter dans ce livre, dont le formalisme mathématique est volontairement écarté pour ne retenir que les idées maîtresses à l'origine des processus, ainsi que les photographies aussi inattendues qu'envoûtantes.

Puisse l'effervescence ainsi dévoilée sous un angle esthétique et scientifique solliciter les papilles et l'œil du dégustateur averti, tout autant que l'imaginaire de celles et ceux qui souhaitent en apprendre un peu plus sur l'univers de la bulle...

Gérard Liger-Belair

Page suivante
Première photo, prise au microscope,
d'un site de nucléation de bulles.



Introduction

Depuis tout petit, je suis émerveillé par les bulles; les bulles aux reflets irisés produites par ces anneaux plongés dans une eau savonneuse et dans lesquels les enfants (et les adultes) soufflent avec bonheur; les bulles des sodas qui chatouillent la langue et le palais lorsqu'on boit au goulot de la bouteille; les bulles du champagne qui dansent dans la flûte... Enfant, on invoque la magie... Lorsque la bouteille est fermée, point de bulles, c'est le calme plat... une fois la bouteille ouverte et le champagne servi dans la coupe ou la flûte, les bulles apparaissent par milliers, semblant surgir de nulle part ! Adolescent, je commence à me poser des questions sur le pourquoi du comment de ces phénomènes, et tout naturellement je m'oriente peu à peu vers les sciences physiques. Étudiant à l'université Paris-VI, j'hésite longuement entre l'océanographie et la physique des liquides. Les deux disciplines me fascinent. Elles sont bien sûr intimement liées, me direz-vous... Après une maîtrise de physique fondamentale, je décide finalement de me diriger vers l'océanographie. Les fantastiques campagnes en mer qui jalonnent la vie des chercheurs qui choisissent cette discipline ainsi que la plongée sous-marine, que je pratique beaucoup à l'époque, ont également contribué à orienter mon choix. Mais, à chaque plongée, le spectacle enivrant des fonds sous-marins ne me fait pas oublier celui des bulles d'air que j'expire et qui remontent à la surface en virevoltant. Après un DEA d'océanologie (l'équivalent du master 2 d'aujourd'hui), au cours duquel j'ai la chance de pouvoir participer à une campagne dans l'océan Antarctique, je décide d'embrasser la carrière de chercheur. Je postule alors pour une thèse de doctorat, préalable nécessaire à une carrière universitaire, mais un accident de plongée viendra mettre un terme à mes rêves d'océanographie en 1995. Cet événement brutal me ramènera à mes premières amours : les bulles...

Sans trop savoir pourquoi, à la même époque, je me mets en tête de photographier les bulles de bière. J'achète un agrandisseur et un appareil photo muni d'un objectif macro. Je passe des nuits entières à traquer les bulles derrière l'objectif de mon appareil photo, puis à développer mes films et à agrandir des clichés dans l'obscurité de ma salle de bains, sous la lumière rouge d'une lampe inactinique. Je suis surpris par la beauté des clichés et par certaines des structures géométriques qui apparaissent. Six mois et beaucoup de nuits blanches plus tard, j'envoie mes meilleurs tirages au département recherche et développement de la maison de champagne Moët & Chandon, avec les premières observations scientifiques que m'inspirent les clichés et un projet de recherche. Dans mon esprit, c'est une bouteille à la mer qui n'a que peu de chances d'aboutir. Compte tenu des millions d'euros en jeu dans l'industrie du champagne, des bières et des sodas, j'imagine le sujet totalement maîtrisé, et

donc sans grande originalité pour cette prestigieuse maison. MM. Bruno Duteurtre et Bertrand Robillard qui dirigent le service sont néanmoins séduits par la démarche et acceptent de me recevoir. De toute évidence, je comprends assez vite que les processus physico-chimiques responsables de l'effervescence des vins de Champagne n'ont pas encore dévoilé tous leurs secrets, et il y a une raison à cela. Au sens strictement chimique, le champagne est formé d'eau, d'alcool, de glycérol, d'acide tartrique, de gaz carbonique dissous et de centaines d'autres molécules organiques complexes et plus ou moins volatiles qui lui confèrent son parfum et sa saveur uniques. Certaines de ces molécules ont aussi un rôle à jouer sur les bulles et la mousse du champagne. Et c'est là que le bât blesse... Les bulles sont des objets instables, dont le comportement peut être considérablement modifié par la présence ou l'absence de certaines molécules. Certaines des molécules présentes dans un vin de Champagne peuvent avoir des propriétés pro-mousses (en se fixant aux bulles et en allongeant leur durée de vie), d'autres au contraire sont plutôt des antimousses (et accélèrent leur éclatement). La mousse d'un champagne, telle qu'elle est perçue par le consommateur, est finalement le résultat macroscopique d'une lutte âpre et sans merci qui se joue à l'échelle moléculaire. Parfois, ce sont les molécules pro-mousses qui l'emportent conférant une mousse abondante et crémeuse à la surface d'une flûte de champagne. Parfois, ce sont les molécules antimousses qui ont le dessus, au grand dam du consommateur qui ne pourra pas se délecter du spectacle des bulles en surface. Mais, attention, le champagne n'est pas toujours le seul fautif de ce comportement « capricieux » vis-à-vis de son effervescence et de sa mousse. En effet, il n'est pas rare au cours du service d'une même bouteille, de constater que certaines des flûtes présentent une effervescence généreuse et une mousse abondante, alors que dans d'autres le champagne ne pétille pratiquement pas. Dans pareilles situations, c'est l'état de surface de la flûte qu'il faudra incriminer...

Le verre à dégustation dans lequel on déguste le champagne rend donc le problème encore un peu plus complexe à appréhender. D'une manière générale, les physiciens préfèrent travailler sur des systèmes modèles mieux définis, plus « propres », ce qui explique que peu se soient finalement attelés à l'étude des bulles et de la mousse de ce vin prestigieux. Pour certains de mes collègues, on ne peut pas faire de bonne science sur un système aussi peu « académique ». Peu importe, je décide néanmoins de consacrer une thèse de doctorat à ce sujet, au laboratoire d'œnologie de l'université de Reims, et en partenariat étroit avec la maison Moët & Chandon.

Comme je le pressentais, le sujet conjugue une science subtile et une dimension esthétique évidente. Dans une simple flûte de champagne, les bulles peuvent donner lieu à toute une zoologie de comportements spectaculaires et insolites. Ce sont des objets qui réconcilient sans nul doute l'art et la science, qu'on oppose encore trop souvent dans l'imaginaire collectif. À l'échelle microscopique, les bulles s'organisent

spontanément en structures parfois inattendues, où ordre et désordre se mêlent intimement pour créer de minuscules œuvres d'art, délicates et éphémères. Mais le champagne est un produit naturel, donc très complexe, et bien des mystères restent encore entiers lorsque ma thèse intitulée *Une première approche des processus physico-chimiques liés à l'effervescence des vins de Champagne* arrive à son terme. De plus, chaque vendange est unique. D'une année sur l'autre la matière première évolue, et il semble que le réchauffement climatique (s'il devait se confirmer) pourrait modifier encore un peu plus rapidement les paramètres analytiques du raisin, et donc du champagne et de son effervescence... C'est la raison pour laquelle je décide de poursuivre mes recherches dans cette voie, toujours à l'université de Reims pour le moment, où je suis enseignant-chercheur depuis 2002. Les premières années sont consacrées à décrypter chacune des étapes de la vie d'une bulle, depuis sa naissance sur les parois du verre, jusqu'à son éclatement en surface. La plupart des expériences que je réalise alors sont des expériences de « coin de table », qui ne nécessitent en général pas de gros moyens. Attention, je ne suis pas en train de dire que le microscope électronique, la résonance magnétique nucléaire ou la spectrométrie de masse (que j'utilise aussi régulièrement) sont inutiles. Ce sont des techniques extraordinaires qui permettent bien sûr de franchir des étapes décisives dans la compréhension des phénomènes, mais je milite, autant que faire se peut, pour une science « légère », aussi légère qu'une bulle de champagne...

Progressivement, le sujet s'étoffe. En 2007, je fais la connaissance de Guillaume Polidori, enseignant et chercheur en mécanique des fluides à l'université de Reims. Guillaume développe et maîtrise des techniques susceptibles de visualiser l'écoulement de fluides en mouvement. Nous les appliquons alors pour tenter de mettre en évidence les mouvements du champagne et du gaz qui s'en échappe, lorsqu'il est servi dans des flûtes de tailles et de formes diverses. Là encore, le résultat visuel est saisissant. Le champagne nous dévoile des structures tourbillonnaires, d'une grande beauté, qui l'agitent et participent ainsi à l'exhalation des arômes du vin...

Nous avons rassemblé cette moisson d'images pour cet ouvrage. Nous invitons le lecteur à entrer dans l'intimité du champagne. Les photographies serviront de fil conducteur aux différents chapitres de ce livre destiné à cerner cette bulle singulière et merveilleuse. Nous souhaitons véritablement l'emmener au cœur de la bulle et de son écrin : la flûte. Nous formulons le vœu que les photographies qui jalonnent l'ouvrage, ainsi que les éclairages scientifiques sur le rôle de la bulle dans la perception des arômes ajouteront de la magie et de l'émotion à votre perception du champagne.

Bon voyage au cœur de l'effervescence !

Gérard Liger-Belair

DOM PERIGNON

1638 - 1715

CELLERIER DE L'ABBAYE D'HAUTVILLERS
DONT LE CLOITRE ET LES GRANDS VIGNOBLES
SONT LA PROPRIETE DE LA MAISON

MOËT & CHANDON



Un peu d'histoire

Avant d'entrer dans le vif du sujet et d'examiner les bulles du champagne sous toutes leurs coutures, je vais évoquer en quelques lignes l'histoire de ce vin d'exception, qui combine tout à la fois le hasard, les aléas du climat et le génie d'un homme. En effet, le vin de Champagne et ses bulles ont une histoire qui se confond souvent avec celle d'un homme, le bénédictin dom Pierre Pérignon. Mais quel est le rôle exact joué par ce moine opiniâtre et rigoureux ?

Comment tout cela a-t-il commencé ? Bien qu'elle reste controversée, l'histoire de ce vin prestigieux aurait débuté à l'abbaye de Hautvillers, vers la fin du XVII^e siècle. Située dans la vallée de la Marne à environ 150 kilomètres à l'est de Paris, non loin de la cathédrale de Reims où les rois de France étaient jadis couronnés, cette abbaye bénédictine est une des plus anciennes au monde.

Le petit âge glaciaire

Depuis l'époque gallo-romaine, la Champagne était l'une des régions viticoles les plus prospères de France. Ses vins furent longtemps les favoris des rois de France. Jusqu'à la fin du XV^e siècle environ, ils étaient en concurrence avec ceux de la région de Bourgogne, souvent avec succès du fait d'une plus grande proximité avec la capitale.

À cette époque, un rafraîchissement général des températures en Europe vit un bouleversement de l'industrie vinicole. C'est le début de ce que l'on appelle le petit âge glaciaire. En effet, les températures chutèrent brutalement dans l'hémisphère Nord à la fin du XV^e siècle. De grandes voies d'eau, comme la Tamise ou les canaux de Venise, furent prises par les glaces. La région de Champagne connut soudainement un climat d'une rigueur inhabituelle. Les levures destinées à transformer le sucre en alcool dans le jus de raisin durant les mois chauds n'avaient plus le temps d'accomplir leur office, car un froid brutal interrompait le processus de fermentation. Au retour du printemps, la fermentation reprenait, cette fois à l'intérieur des fûts où le jus avait été transféré. Cette seconde fermentation produisait un excès de gaz carbonique qui restait captif, créant une légère effervescence... Le champagne était né.

L'aristocratie française haussa le sourcil, considérant cette effervescence inopinée comme le signe d'une mauvaise vinification. Le marché des vins de Champagne commença à décliner, pour finalement abdiquer au profit des vins de Bourgogne. Ils connurent alors une traversée du désert de presque deux siècles, jusqu'à ce que l'Église catholique – qui avait des intérêts dans le vignoble champenois et qui voyait ses revenus s'amenuiser comme peau de chagrin – décidât de régler le problème. En 1668, elle confia à un moine de 29 ans, dom Pierre Pérignon, la tâche de réhabiliter la région en produisant à nouveau des vins (sans bulles) à la hauteur de ceux qui avaient fait la réputation du vignoble champenois. Devenu cellérier de l'abbaye de

Hautvillers, dom Pérignon s'employa à développer différentes méthodes plus ou moins empiriques pour réduire l'effervescence des vins (sans toutefois parvenir à la prévenir totalement).

Des bulles qui plaisent aux Anglais

Alors que dom Pérignon s'évertuait à chasser les bulles des vins de ses caves, les goûts commençaient à évoluer. Les « vins mousseux » connaissaient la faveur de la haute société et faisaient l'objet d'un véritable engouement. En Angleterre, notamment, la nouvelle noblesse sophistiquée et quelque peu décadente qui donnait le ton sous le règne de Charles II (il gouverna de 1660 à 1685, durant la période dont on se souvient comme celle de la « bonne vieille Angleterre ») se passionna pour les vins pétillants. Il semble d'ailleurs que les vins mousseux existaient déjà en Angleterre depuis deux à trois décennies au moins avant l'avènement du champagne français. En décembre 1662 (six ans, donc, avant que dom Pérignon fût intronisé dans ses fonctions à l'abbaye de Hautvillers), l'Anglais Christopher Merret avait adressé un mémoire à la toute nouvelle Royal Society of London sur la fabrication des vins mousseux¹. Indépendamment de la « découverte » française consécutive au coup de froid du siècle, Merret s'était rendu compte que le fait d'ajouter du sucre aux vins de Champagne produisait une effervescence et augmentait leur teneur en alcool. En conséquence, beaucoup de gentilshommes anglais commandaient du vin (non mousseux) en fûts et y introduisaient une dose de sucre avant de le mettre en bouteilles. En l'occurrence, ils ne cherchaient pas à améliorer la qualité du vin, mais plutôt à obtenir à bon compte une boisson pétillante, et surtout plus forte.

Sous le règne de Louis XIV, les membres de la Cour de France se mirent aussi à apprécier les crus pétillants, à tel point qu'à la fin du XVII^e siècle dom Pérignon fit volte-face et employa désormais tous ses efforts à augmenter l'effervescence du vin.

S'il ne fut pas le premier à introduire des bulles dans le vin, il développa de nouvelles techniques qui sont à la base de la fabrication du champagne tel qu'on le connaît aujourd'hui. Il mit notamment au point un bouchon beaucoup plus efficace (inspiré des bouchons de liège utilisés par les moines espagnols pour sceller leurs bouteilles d'eau), destiné à remplacer les traditionnels tampons de charpie ou autres éclats de bois utilisés jusqu'alors. Cette fermeture hermétique était essentielle pour maintenir les bulles à l'intérieur des bouteilles. Cependant, les bouchons de liège commencèrent par produire des effets désastreux. En effet, au cours de la seconde fermentation, le champagne requiert des bouteilles capables, une fois fermées, de résister à une augmentation de la pression. Or la pression interne générée par le gaz carbonique dans des bouteilles closes les faisait parfois exploser. Le savoir-faire des verriers de l'époque n'étant pas suffisamment développé pour produire des bouteilles assez solides, les irrégularités du verre, une pression excessive, un bouchage inadéquat ou les trois facteurs combinés rendaient la fermentation extrêmement délicate. Les bouteilles de champagne avaient si mauvaise réputation que les acheteurs éventuels portaient

des masques de protection pour visiter les caves. La moitié d'entre elles éclataient avant de parvenir sur les lieux des agapes auxquelles elles étaient destinées. De leur côté, les Anglais avaient connu le même problème pour obtenir un verre capable de résister à la pression de leurs vins mousseux. Toutefois, au début du xvii^e siècle, l'industrie du verre avait fait d'énormes progrès, sous l'impulsion notamment de l'amiral Robert Mansell. Sir Robert Mansell s'inquiétait de la destruction des forêts et de l'épuisement des ressources en bois, essentiellement dus au chauffage des habitations et, accessoirement, aux besoins de l'industrie du verre. Soucieux pour l'avenir de la construction navale, il s'en ouvrit au roi Jacques I^{er}, le persuadant de promulguer un décret interdisant aux souffleurs de verre d'alimenter leurs fours avec du bois. C'est ainsi que de nouveaux matériaux de combustion furent développés, grâce auxquels les fours atteignirent des températures si élevées que la structure interne du verre en fut modifiée. On obtint alors des bouteilles d'une teinte plus sombre, mais beaucoup plus solides, idéales pour le champagne.

Un moine, père du champagne

Dom Pérignon, réputé pour la finesse de son nez et de son palais, inventa également l'art de l'assemblage, qui reste l'essence même de l'élaboration du champagne aujourd'hui. L'assemblage consiste à mélanger des vins issus de cépages, de terroirs et d'années différents pour obtenir un produit d'une qualité supérieure à celle de chacune de ses composantes. Même aveugle, à la fin de sa vie, dom Pérignon, prétend-on, était capable d'identifier les cépages et les terroirs dont était issu un vin. Il développa aussi des techniques pour obtenir un jus clair à partir de raisins noirs et améliora la clarification pour créer le vin le plus limpide jamais produit à l'époque.

En 1715, après quarante-sept ans de bons et loyaux services, le « père du champagne » mourait. Un peu plus d'une décennie plus tard, le roi Louis XV, arrière-petits-fils et successeur de Louis XIV, reconnaissant l'importance de l'industrie du vin pour le pays, promulgua en 1728 un décret accordant à la ville de Reims l'exclusivité de la commercialisation du champagne. En 1729, Nicolas Ruinart fonda la première maison de champagne et en 1743, Claude Moët créa ce qui devait devenir le plus grand producteur de champagne aujourd'hui, la maison Moët & Chandon. Les principes de base établis par dom Pérignon sont encore utilisés pour l'élaboration du champagne et des vins mousseux partout dans le monde; rien d'étonnant, donc, à ce qu'une monumentale statue du moine génial trône au siège de Moët & Chandon (voir page 16). En 1936, la Grande Maison, comme on l'appelle en Champagne, a rendu hommage à cet homme d'exception en lançant la marque prestigieuse qui porte son nom.





1

Élaboration du champagne

De la vendange à la bouteille



De nos jours, la technique de production moderne du champagne n'est pas fondamentalement différente de la méthode empirique mise au point par dom Pérignon. Connue sous le nom de « méthode champenoise », cette technique est également utilisée hors de la région de Champagne; les vins produits de cette manière sont labellisés « méthode traditionnelle ». Beaucoup de professionnels qui élaborent des vins mousseux américains et australiens l'utilisent. Celle-ci comporte différentes étapes.

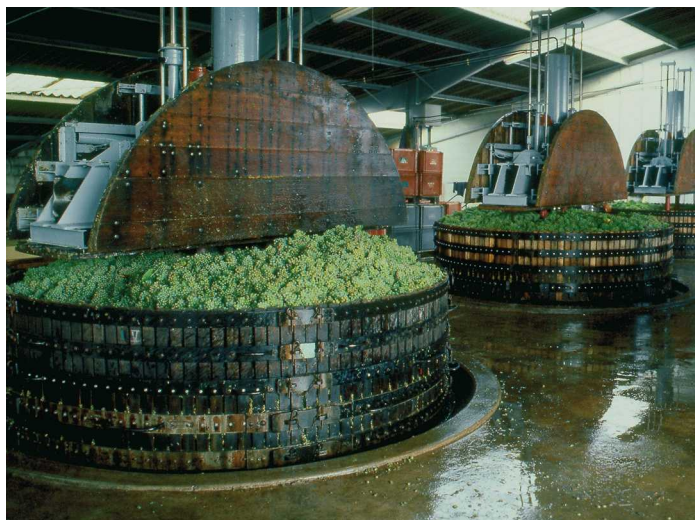
Une première fermentation

Trois variétés de raisins (on parle de cépages) sont cultivées sur les quelque 35 000 hectares du vignoble champenois : le chardonnay (un

2. Le vignoble champenois est le plus septentrional des vignobles français. Son étendue est relativement modeste puisqu'il ne représente en effet que 2 à 3 % de la surface du vignoble français, tout au plus. Ci-dessus, le petit village de Monthelon, situé sur les coteaux sud de la région d'Épernay.

Double page précédente :

1. L'alignement des pieds de vigne en Champagne (dans la Côte des Blancs).

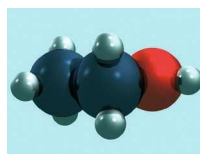


raisin blanc), le pinot meunier (un raisin noir) et le pinot noir... comme son nom l'indique (figure 2). Vendangés vers la mi-septembre, les raisins sont pressés pour obtenir un jus appelé moût (figure 3). Ce moût est alors transféré dans des cœves ouvertes et l'on y ajoute des levures (une variété de champignon unicellulaire connue sous le nom de *Saccharomyces cerevisiae*).

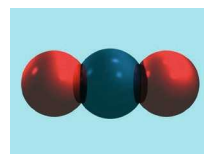
La réaction de base intervenant dans l'élaboration du vin est la fermentation alcoolique, c'est-à-dire la transformation des sucres en alcool et en gaz carbonique (figure 4). C'est probablement en observant la fermentation des fruits mûrs tombés des arbres sur le sol que nos lointains aïeux découvrirent l'alcool; comme nous l'avons vu plus haut, les Anglais se rendirent assez vite compte que le fait d'ajouter du sucre dans un fût permettait d'en augmenter le titre alcoolique tout en créant une effervescence. Quoiqu'il en soit, c'est le chimiste français Joseph-Louis Gay-Lussac qui, le premier, décrit scientifiquement le processus de la fermentation en 1810, démontrant que le glucose constituait le matériau de base indispensable pour produire de l'éthanol. La façon dont la levure intervient dans la fermentation ne fut pas clairement connue avant 1857, date à laquelle le

3. Voici venu le temps des vendanges.
La cueillette sélective du raisin se fait exclusivement manuellement. Une fois cueilli, le raisin est rapidement pressé afin d'éviter son oxydation prématurée. Les fruits sont pressés séparément en fonction de chaque cépage, mais également de leur parcelle d'origine. En séparant les jus, le viticulteur dispose ainsi d'une large palette de goûts et de saveurs au moment de l'étape cruciale de l'assemblage.

4. Au moment de la fermentation,
sous l'action des levures, le sucre est transformé en alcool (l'éthanol) et en gaz carbonique (le dioxyde de carbone).



Éthanol



Dioxyde de carbone

célèbre microbiologiste Louis Pasteur découvrit non seulement que le processus ne requiert pas d'oxygène, mais aussi que la production d'alcool est réduite par sa présence selon la formule suivante : $C_6H_{12}O_6 \Rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$.

En termes simples, cela signifie que le sucre ($C_6H_{12}O_6$) est dénaturé sous l'action de la levure en éthanol (CH_3CH_2OH) et en gaz carbonique (CO_2). La quantité d'alcool générée par cette première fermentation est de 11 % environ. Ce pourcentage correspond à la production maximale d'alcool avant que toutes les cellules de levure soient tuées par la concentration alcoolique. À ce stade, le « champagne » est encore un vin blanc tranquille (on parle alors d'un vin clair), non effervescent, le gaz carbonique s'échappant des cuves laissées ouvertes au cours de la première fermentation (figure 5). Les quantités de gaz carbonique qui s'échappent hors des cuves au cours de cette première fermentation sont gigantesques. On compte environ 50 litres de CO_2 rejetés pour chaque litre de vin qui fermente, d'où l'importance de posséder de puissants extracteurs d'air à la sortie des cuves afin de renouveler régulièrement l'atmosphère d'une cuverie pour ne pas risquer d'intoxication au CO_2 .

L'art de l'assemblage

Il est rare qu'un vin clair issu d'une même récolte, d'un même terroir et d'un même cépage présente le parfait équilibre requis entre l'arôme, la teneur en sucre et l'acidité nécessaire pour obtenir un bon champagne. C'est pourquoi un maître de chai (en Champagne, on parle d'un chef de cave) mélange plusieurs vins différents en procédant à l'assemblage, étape qui prend place juste après la fin de la première fermentation. L'assemblage est considéré comme la clé du savoir-faire en matière de champagne. Un chef de cave mélangera parfois jusqu'à quatre-vingts vins issus de récoltes, de parcelles et de cépages différents pour produire



5. La fermentation alcoolique peut se faire dans des foudres de chêne (en haut). On parle alors de fermentation « sous bois ». De nos jours, elle est réalisée le plus souvent dans des cuves en acier inoxydable et thermorégulées (en bas).

Fermentation alcoolique et effet de serre

Dans le contexte actuel de ce qui semble être un réchauffement global de notre planète lié aux activités anthropiques, et notamment aux rejets des gaz dits à « effet de serre », une question nous brûle les lèvres : « À l'échelle mondiale, la totalité du gaz carbonique issu de la transformation du jus de raisin en vin a-t-il un rôle important à jouer sur l'effet de serre ? » Compte tenu de l'importance des volumes de gaz carbonique rejetés au cours de la fermentation alcoolique, cette interrogation revient très souvent chez les personnes désireuses de relier réchauffement climatique et production de vin.

Je réponds toujours à cette question en deux étapes, la première étape étant le prétexte à un rapide calcul d'ordre de grandeur que voici et qui permet très vite d'évaluer les volumes totaux de CO_2 en jeu.

La production annuelle mondiale de vin est de l'ordre de 200 millions d'hectolitres, soit 2×10^{10} litres/an. Puisque 50 litres de CO_2 sont rejetés dans l'atmosphère pour chaque litre de vin produit, ce sont donc près de 10^{12} litres de gaz carbonique qui sont rejetés dans l'atmosphère chaque année au moment de la fermentation alcoolique (soit 1 000 milliards de litres). Ce chiffre, certes colossal en valeur absolue, peut provoquer un effet de surprise certain. Cependant, avant de conclure quant à l'importance relative de ce volume de CO_2 rejeté au cours de la fermentation alcoolique, il convient de le comparer aux autres sources de CO_2 . La plus familière de ces sources étant liée à l'activité automobile, je propose donc d'évaluer le volume moyen de CO_2 rejeté chaque année par une automobile. Une automobile effectue en moyenne 20 000 kilomètres par an. La combustion du carburant rejette environ 100 grammes de gaz carbonique par kilomètre parcouru (un peu plus en réalité, mais ce sont les ordres de grandeur qui importent ici). Compte tenu de la masse molaire du gaz carbonique et du volume molaire d'un gaz, ces 100 grammes de gaz carbonique correspondent à environ 50 litres de CO_2 rejetés par kilomètre parcouru. En définitive, une automobile rejette en moyenne chaque année, environ 1 million de litres de CO_2 , soit 10^6 litres/an. Le volume total de CO_2 rejeté chaque année par la fermentation alcoolique correspond donc à l'activité annuelle d'environ 1 million d'automobiles, ce qui semble bien dérisoire compte tenu du parc automobile mondial qui dépasse aujourd'hui le milliard de véhicules en activité ! Ce calcul nous montre que les volumes de CO_2 rejetés chaque année par la transformation du jus de raisin en vin restent négligeables en comparaison de ceux rejetés annuellement par l'activité

automobile. Cependant, même s'il nous permet de conclure quant au rôle du CO_2 fermentaire sur l'effet de serre, ce rapide calcul est trompeur. En effet, nous avons comparé deux émissions de gaz carbonique fort différentes quant à leurs origines respectives... Même si les molécules sont bien entendu identiques, le CO_2 fermentaire issu de la transformation du jus de raisin en vin ne peut pas être comparé au CO_2 rejeté par l'industrie automobile. En fermentant, le jus de raisin ne fait que « rendre à l'atmosphère » le gaz carbonique pompé par la vigne dans l'atmosphère pour croître et se développer grâce à la photosynthèse. Ce CO_2 fermentaire fait partie d'un cycle naturel, à la différence du gaz carbonique issu de la combustion du pétrole. Le pétrole est un combustible fossile dont la combustion produit du gaz carbonique qui ne sera pas pompé par ailleurs.

Cependant, il serait hâtif de conclure que l'industrie du vin ne rejette pas de gaz carbonique. Comme toutes les industries, l'industrie du vin rejette du gaz carbonique. Elle utilise des sources d'énergie qui nécessitent l'utilisation de combustibles fossiles (pour faire fonctionner des machines agricoles, pour produire de l'électricité, etc.). C'est donc le CO_2 issu des combustibles fossiles utilisés pour faire fonctionner ces sources d'énergie qu'il faut estimer, et pas le CO_2 fermentaire qui fait partie du cycle naturel et dont le bilan est globalement nul. ●

un champagne. Le chef de cave est en quelque sorte l'architecte du vin. Cette étape requiert une grande attention et un immense savoir-faire car il est extrêmement difficile de prévoir le résultat final pour un champagne qui ne sera souvent consommé que des années plus tard. Le mélange des vins clairs est généralement réalisé à partir de trois cépages dont l'œnologue², chef de cave, détermine les bonnes proportions (figure 6); il constitue la base qui sera soumise à la seconde fermentation, destinée à conférer au champagne son indispensable effervescence.



La prise de mousse ou seconde fermentation

Une fois l'assemblage réalisé, on y ajoute du sucre (environ 18 grammes pour une bouteille classique de 75 centilitres), des levures et des nutriments pour ces dernières. Le tout est versé dans d'épaisses bouteilles scellées, qui sont placées à l'horizontale dans une cave dont la température (10 à 12 °C) et l'hygrométrie demeurent constantes; on laisse ensuite le vin fermenter lentement une seconde fois, afin qu'il produise à nouveau de

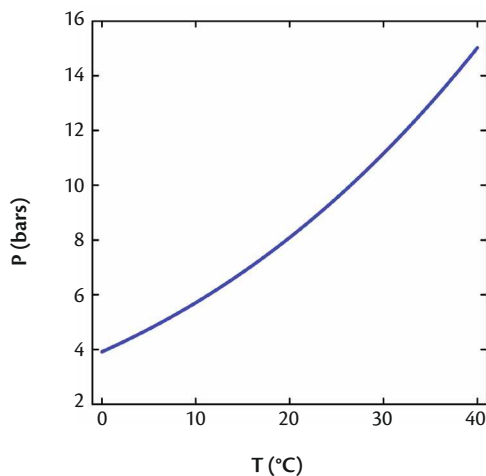
6. L'assemblage est une étape cruciale, qui s'inscrit au cœur de la stratégie d'une maison de champagne.

Le talent du chef de cave et des œnologues en charge de ce processus consiste à anticiper l'évolution du vin en cave et la date à laquelle il aura atteint le style recherché.

Thierry Gasco (ci-dessus), chef de cave et œnologue de la Maison Pommery, est passé maître dans l'art d'assembler les vins clairs.

l'alcool et du gaz carbonique. Ces 18 grammes de sucre vont produire environ 9 grammes de gaz carbonique et une augmentation du degré alcoolique de 1,5 % en volume environ. Cette fois cependant, les bouteilles sont bouchées de sorte que le gaz carbonique ne parvient pas à s'échapper. Il reste piégé dans la bouteille. Le CO_2 étant sous forme gazeuse dans les conditions normales de température et de pression, il est plus pertinent d'évoquer le volume qu'il occuperait à l'état gazeux plutôt que de parler de sa masse. Pour une bouteille standard de 75 cl, ces 9 grammes de gaz carbonique sont équivalents à près de 5 litres de CO_2 gazeux qui se retrouvent ainsi piégés sous le bouchon. Dès lors on comprend mieux que la bouteille soit sous pression, puisqu'elle retient, en plus du précieux liquide, un volume de CO_2 gazeux six fois supérieur à son propre volume ! En fin de prise de mousse et à la température de 12 °C qui règne dans une cave champenoise, il existe dans la bouteille une pression six fois supérieure à la pression atmosphérique. C'est presque trois fois la pression de gonflage d'un pneu de voiture. Il faudrait descendre à 50 mètres sous la mer pour retrouver une telle pression. Cependant, il n'est pas encore question de bulles à cette étape du processus de champagnisation. Rien ne distingue encore un champagne d'un vin blanc plat, si ce n'est la forme du contenant, bien sûr. Sous cette forte pression, les molécules de CO_2 sont intimement liées au liquide qui les entoure, et il n'est pas encore question pour elles de s'en échapper (on parle de CO_2 dissous). De plus, la solubilité du gaz carbonique étant très dépendante de la température, la pression dans une bouteille de champagne dépend aussi de la température ambiante (voir figure 7, qui nous montre le danger que pourrait représenter une bouteille exposée trop longtemps à une forte température). Une bouteille oubliée sur la plage arrière d'une voiture en plein été peut aisément

7. Évolution de la pression dans une bouteille de champagne en fonction de sa température.
Une augmentation de la température provoque un accroissement de la pression interne qui peut alors atteindre des valeurs très importantes, voire dangereuses pour le consommateur.



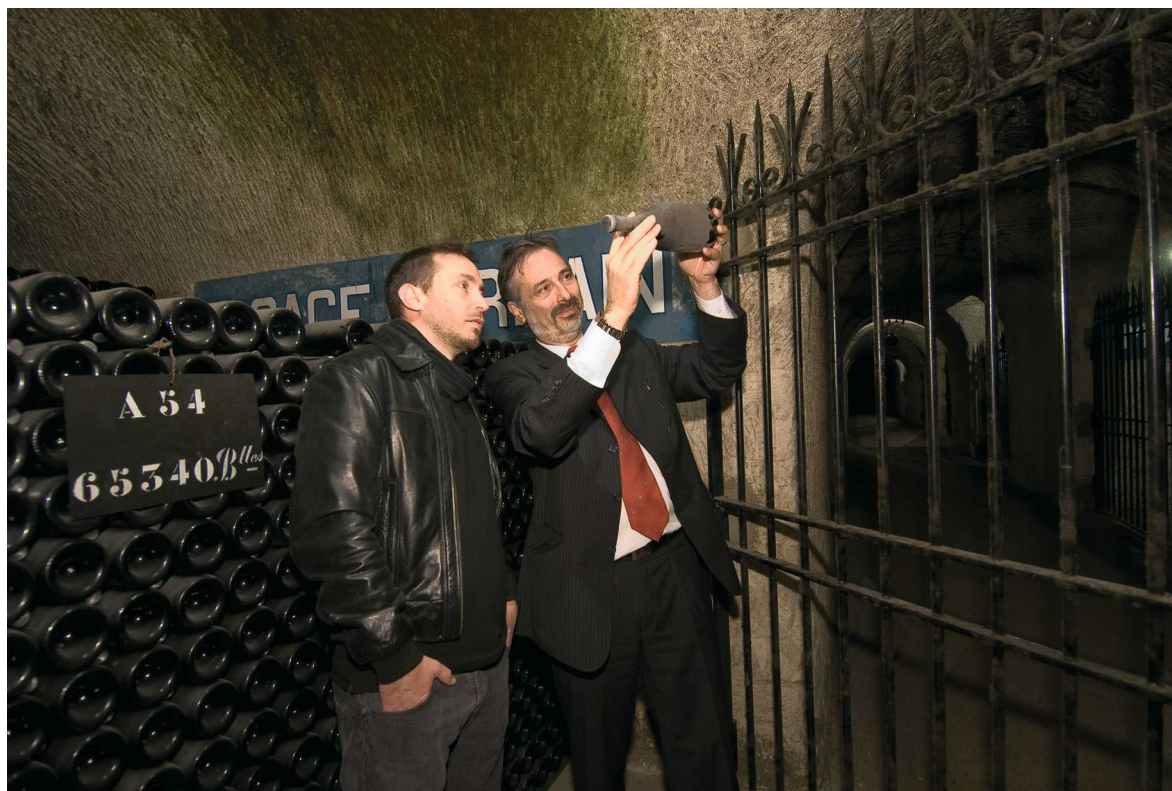
atteindre une température de l'ordre de 40 °C ; la pression sous le bouchon serait alors de l'ordre de 15 bars !

Le temps du vieillissement

Les cellules de levure ne survivent pas à la seconde fermentation qui s'achève au bout de quelques mois. Faute de nourriture (le sucre a été consommé par les levures pour produire de l'alcool et du gaz carbonique), les levures meurent progressivement. Sous le bouchon, la pression des gaz est alors d'environ 6 bars, mais le champagne continue de vieillir tranquillement dans la fraîcheur des caves pendant quinze mois au moins et parfois durant plusieurs années (figures 8). C'est l'étape du vieillissement au contact des levures mortes : on parle de vieillissement « sur lies ». C'est au cours de cette période que se développe le bouquet du champagne. Les cellules de levure

8. Une fois la prise de mousse achevée, les levures n'ont pas encore tout à fait fini leur œuvre.

Dans la fraîcheur et l'obscurité des caves champenoises, un lent processus biochimique se met en route qui permet littéralement aux levures mortes de se décomposer et de se fondre dans le vin, apportant ainsi finesse et complexité aromatique au champagne.





1620 365 10 11

Rant

14-10-55

se dégradent par un processus appelé autolyse des levures. De nombreux échanges biochimiques s'effectuent entre les levures mortes et le vin, apportant des arômes nouveaux et complexes au champagne. Des arômes subtils, dits de « pain grillé », très appréciés des connaisseurs, se développent alors. Plus long est le vieillissement sur lies, plus cet arôme s'enrichit et plus le champagne est typé (figure 9).

Remuage et dégorgement

Lorsque le vieillissement est achevé, tout le problème consiste à se débarrasser des cellules de levure mortes sans perdre le précieux gaz carbonique dissous. On utilise alors la technique du remuage.

L'objectif du remuage est de clarifier le vin en stockant le dépôt de levures mortes dans le col de la bouteille. Les bouteilles sont placées sur des pupitres, le goulot incliné vers le bas. Chaque jour le remueur leur donnera un léger mouvement de rotation en redressant peu à peu la bouteille de façon à ce que le dépôt descende progressivement dans le col (figure 10). Autrefois, le remuage était un métier en soi. Un bon remueur était capable de manipuler jusqu'à 40 000 bouteilles par jour. Aujourd'hui, des machines automatiques, appelées des gyropalettes (figure 11), existent qui tendent à remplacer la main de l'homme.

Page de gauche : 9. Contrairement à une idée encore largement répandue, certains vins de Champagne peuvent vieillir admirablement bien. Pour quelques champagnes d'exception, le vieillissement sur lies peut durer plusieurs décennies avant de passer à l'étape suivante du processus de champagnisation.



10. Gros plan sur le dépôt de levures mortes rassemblées dans le goulot de la bouteille après le remuage.

11. Jadis manuel, le remuage des bouteilles est devenu automatisé de nos jours, à l'aide des gyropalettes.



L'étape suivante est le dégorgement (figure 12). Celui-ci consiste à geler le col de chaque bouteille, créant un bouchon de glace qui piège les sédiments de levure dans le goulot. Les bouchons sont alors retirés et la pression de gaz carbonique chasse la glace chargée de résidus hors de la bouteille. Jadis, cette étape était également réalisée à la main, avant d'être automatisée. Une petite quantité de vin est fatalement perdue au cours du dégorgement; elle doit donc être remplacée, c'est l'objet de l'étape suivante de l'élaboration du champagne, qui est aussi l'une des plus confidentielles : le dosage.

Le dosage

Cette opération consiste à ajouter une petite quantité de « liqueur » (consistant en un mélange de sucre et de vieux vins) dans la bouteille pour remplacer le liquide perdu lors du dégorgement. Chaque maison de champagne détient sa formule secrète pour concocter cette liqueur. Le caractère du champagne figurant sur l'étiquette – allant de l'extra brut (très sec) au doux (plutôt moelleux) – dépend de la quantité de sucre ajoutée lors de cette étape. Les bouteilles sont ensuite rapidement fermées avec les bouchons en liège traditionnels, puis « muselées » à l'aide d'un fil d'acier galvanisé (pour empêcher les bouchons d'être expulsés sous l'effet de la pression) et étiquetées. Elles sont enfin prêtes pour la consommation.

L'ouverture de la bouteille

Il est d'usage de retirer le bouchon d'une bouteille de champagne aussi délicatement que possible, en maintenant le bouchon d'une main et en imprimant un mouvement de rotation à la bouteille de l'autre main. Le bruit d'un bouchon qui saute est certes festif, mais il convient de garder à l'esprit qu'un bouchon de champagne incontrôlé jaillit à une vitesse de l'ordre de 50 km/h. S'il percute un



12. Dégorgement manuel
(dit « à la volée ») d'une bouteille
de champagne.

13. Photographie « haute vitesse »
d'un bouchon de champagne
qui saute. Le débouchage
s'accompagne systématiquement
d'un panache de fumée qui
s'échappe du col de la bouteille.
Il ne s'agit pas de gaz,
mais de microgouttelettes.



œil, la soirée romantique que vous avez planifiée risque de se terminer tristement aux urgences... Ce jaillissement spectaculaire d'un bouchon de champagne est magnifiquement illustré par la photographie de la figure 13. À la différence de nombreux clichés publicitaires retouchés, cette photo a été réalisée sans aucun trucage. Nous la devons à Jacques Honvault, ingénieur des Arts et Métiers, spécialisé dans la photographie dite de « haute vitesse ». Pour réaliser cette image, un flash ultrarapide a été synchronisé avec le « bang » du bouchon qui saute.

Profitions également de ce paragraphe pour tor- dre le cou à une idée reçue. Juste après le débou- chage d'une bouteille de champagne, vous avez certainement déjà remarqué une légère fumée qui s'échappe du col de la bouteille (voir figure 13); cette observation est d'ailleurs valable pour toute boisson effervescente en général. Beaucoup de consommateurs imaginent que ce panache de fumée blanche est formé par les vapeurs de CO_2 qui s'échappent du col de la bouteille. En réa- lité, il ne s'agit pas de vapeurs de CO_2 , mais de microgouttelettes d'eau et d'éthanol. En effet, au moment du débouchage de la bouteille, la pres- sion du gaz dans le col de la bouteille passe quasi

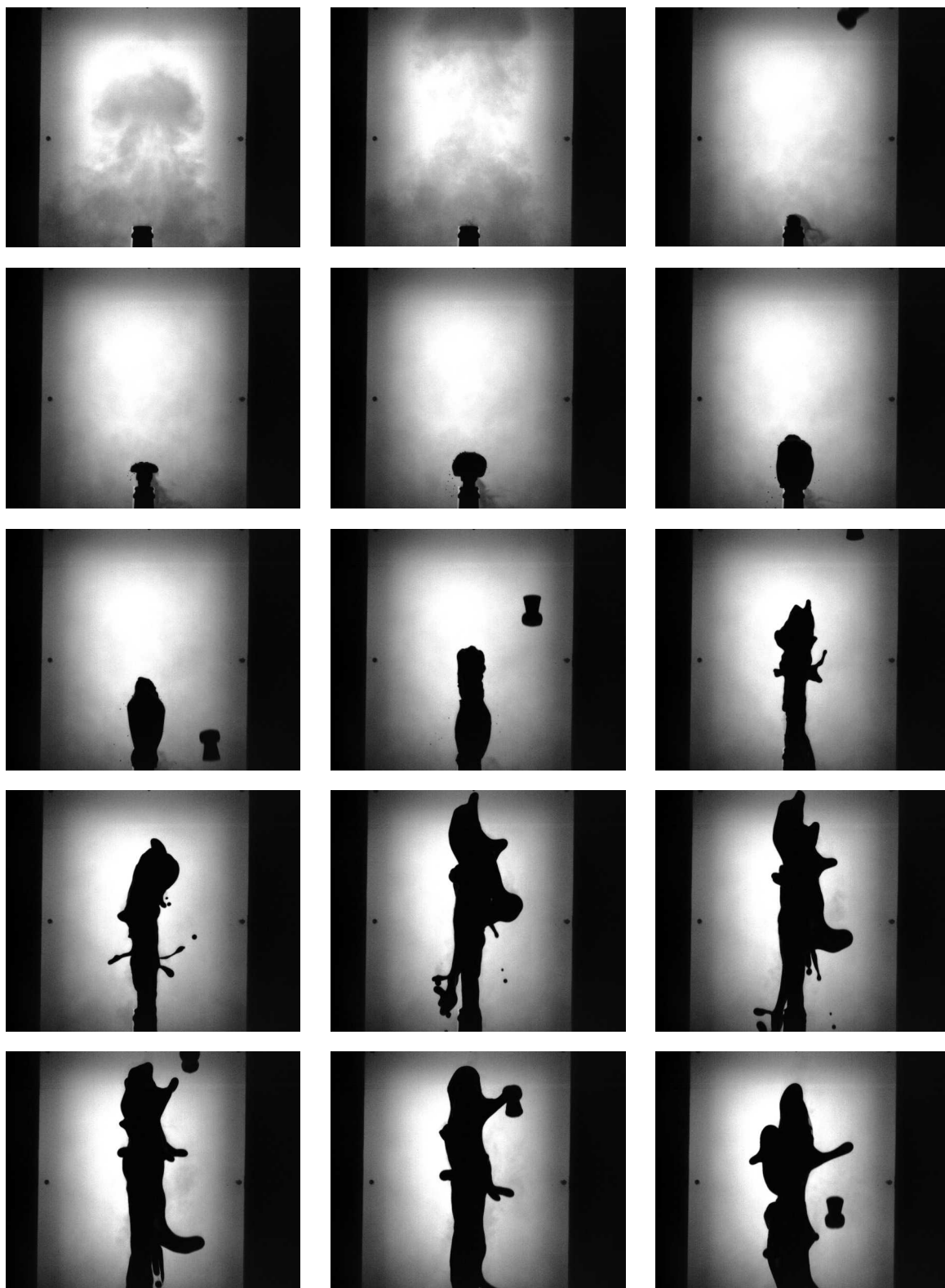
instantanément de presque 6 bars à la pression atmosphérique. Le gaz du col de la bouteille se détend brutalement. La physique nous apprend que cette brusque décompression s'accompa- gne d'une baisse conséquente de la température du gaz (d'environ 90 degrés !). Les vapeurs d'eau et d'alcool contenues dans le gaz du col de la bouteille se condensent alors instantanément en microgouttelettes, formant ainsi ce panache de fumée blanche si caractéristique. De la même manière que de la vapeur d'eau se condense en altitude pour former les nuages, le débouchage d'une bouteille de champagne s'accompagne ainsi localement d'une baisse de la température et de la formation d'un « mininuage »...

Lorsque la mousse jaillit : le gerbage

L'ouverture d'une bouteille de champagne peut parfois se solder par ce que l'on appelle le ger- bage. Causé par une formation excessive de bul- les au moment du débouchage de la bouteille, le gerbage se traduit par le jaillissement d'un jet de mousse (figure 14). Les pilotes de formule 1 provoquent intentionnellement ce phénomène en secouant la bouteille avant de l'ouvrir. Cette

14. Le débouchage de certaines bouteilles, dites « gerbeuses », se solde par le jaillissement intempestif d'un puissant jet de mousse, comme sur cette séquence vidéo qui détaille les différentes phases du phénomène.





agitation vigoureuse a pour effet de déformer considérablement l'interface (initialement plane lorsqu'elle est au repos) entre le champagne et le gaz sous pression dans le col de la bouteille. Cette très grande déformation de la surface du champagne force le gaz carbonique présent sous le bouchon à se mélanger au reste du liquide, permettant ainsi l'emprisonnement de milliers de bulles de gaz sous la surface. Au moment de l'ouverture, la chute brutale de la pression provoque une telle expansion de ces bulles qu'elles envahissent tout l'espace, entraînant avec elles le champagne hors de la bouteille sous forme d'un véritable raz de marée mousseux.

Bien que ce genre d'épisode puisse être cause d'amusement, les maisons de champagne se préoccupent au contraire de prévenir ce phénomène qui peut s'avérer très problématique. En effet, il arrive parfois que les bouteilles gerbent à l'ouverture, sans même qu'elles aient été agitées de façon inconsidérée. Le gergage se produit généralement au cours du dégorgement, avant l'étape de dosage. Outre la perte de champagne qu'il occasionne, le gergage peut ralentir la cadence de production de manière très significative. On évoque souvent la présence de cristaux de tartrate de calcium dans le champagne, qui seraient susceptibles de produire des bulles en grande quantité au moment du débouchage de la bouteille.

Il semble que tous les champagnes ne connaissent pas le risque de gergage. Plusieurs élaborateurs champenois rapportent davantage d'observations de cuvées « gerbeuses » sur les champagnes rosés (additionné de quelques centilitres de vin de Champagne rouge qui leur confère cette belle robe saumon) et sur les champagnes « blancs de noirs », vinifiés exclusivement avec le pinot noir et le pinot meunier, que sur les champagnes où le cépage chardonnay domine. Les brasseurs rencontrent également ce phénomène à l'ouverture de certaines bières (en brasserie, on parle alors

plutôt de « giclage »). Les brasseurs évoquent quant à eux l'action combinée d'une infection fongique et la présence de cristaux d'oxalate de calcium pour expliquer cette production excessive de bulles à l'ouverture de la bouteille. Cependant, même si des hypothèses existent pour expliquer cette production excessive de bulles au dégorgement, force est de constater que le phénomène reste encore très mal compris. Des programmes de recherche doivent être mis en place afin d'apporter des réponses scientifiques à ces observations empiriques.

À l'origine la coupe...

Nous disposons maintenant d'une bouteille de champagne qui n'attend que d'être partagée, mais comment la servir ?

Les vins plats sont traditionnellement servis dans des verres ballons à l'ouverture assez large ; mais quelle forme choisir pour le champagne ? Aujourd'hui, beaucoup d'amateurs préfèrent la flûte, et sans doute ont-ils de bonnes raisons pour cela. Pourtant, la flûte n'a pas toujours recueilli tous les suffrages en matière de champagne.

En France, la coupe a connu les faveurs du public du XVIII^e siècle aux années 1970 (figure 15). La légende raconte que ce verre aurait été moulé sur les célèbres seins de Mme de Pompadour, maîtresse du roi Louis XV qui régna de 1715 à 1774. L'engouement de Mme de Pompadour pour ce breuvage était bien connu. Elle adorait le champagne et aurait confié aux dames de la Cour, qui cherchaient à percer le secret de sa beauté et de sa fraîcheur inaltérable, qu'elle devait sa belle mine « à ce vin qui vous permet d'être au mieux de vous-même après une nuit tumultueuse ». Une autre légende prétend que la coupe originelle – en porcelaine – devrait sa forme à la plastique de la reine Marie-Antoinette, épouse de Louis XVI. Pour d'autres, la coupe trouverait son origine en Angleterre où, loin de toute référence libertine,



15. Les origines de la coupe demeurent aujourd'hui encore incertaines. On prétend qu'elle aurait été moulée sur le sein de la marquise de Pompadour, épicurienne et grande amatrice de champagne.



elle aurait été conçue uniquement... pour boire du champagne. Quoi qu'il en soit, l'origine de la coupe, si elle reste incertaine, fait encore partie de maintes et passionnantes délibérations autour d'un cocktail.

Même si elle reste populaire, la coupe ne permet pas à l'amateur d'apprécier toutes les qualités d'un champagne (n'en déplaise aux irréductibles). Très large et relativement basse, la coupe est plutôt encombrante, instable et a tendance à se renverser. En outre, elle occulte l'élégant trajet des bulles vers la surface. De nos jours, elle est supplantée par la flûte, long verre à pied fin qui laisse admirer la trajectoire des bulles et concentre dans un espace étroit tous les arômes qu'elles libèrent lors de leur éclatement. À l'inverse, la large ouverture de la coupe favorise la dispersion des gaz, diluant les arômes. Nous reviendrons en détail sur les différences essentielles entre la flûte et la coupe un peu plus loin dans l'ouvrage.

Servir le champagne

L'étape du service du champagne est une étape « critique » en ce qui concerne le gaz carbonique dissous. En effet, le transfert du champagne de la bouteille vers la flûte génère des turbulences

16. Traditionnellement, le champagne est servi au centre d'une flûte tenue verticalement. Il faudra le plus souvent vous y prendre à deux ou trois fois afin de laisser retomber la mousse abondante qui se forme lorsque le champagne envahit la flûte.



qui accélèrent considérablement la fuite du gaz carbonique dissous hors du champagne. Or plus on perd de gaz carbonique dissous à cette étape, moins on en disposera lors de la dégustation pour permettre la production de bulles dans la flûte... Afin de préserver au mieux le CO_2 dissous dans le champagne (et assurer ainsi une meilleure longévité à l'effervescence dans la flûte), il convient de servir le champagne de la façon la plus « douce » possible, afin que le CO_2 dissous ne s'en échappe pas prématurément.

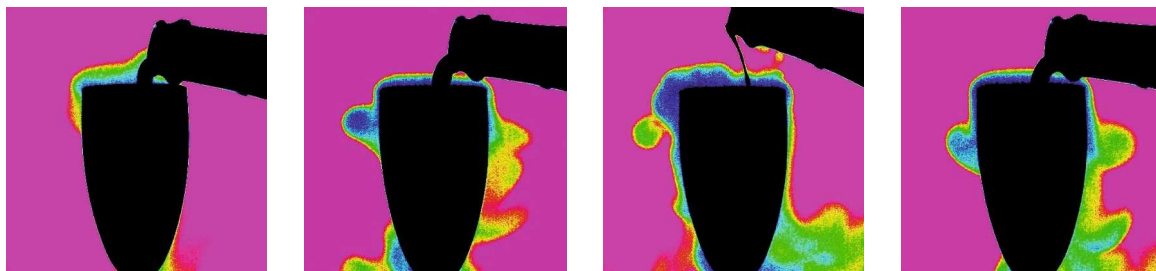
Nous avons testé deux façons de servir le champagne dans une flûte : en versant le champagne directement au centre d'une flûte verticale, ce qui correspond au service le plus fréquemment utilisé dans la restauration (figure 16), puis en ver-

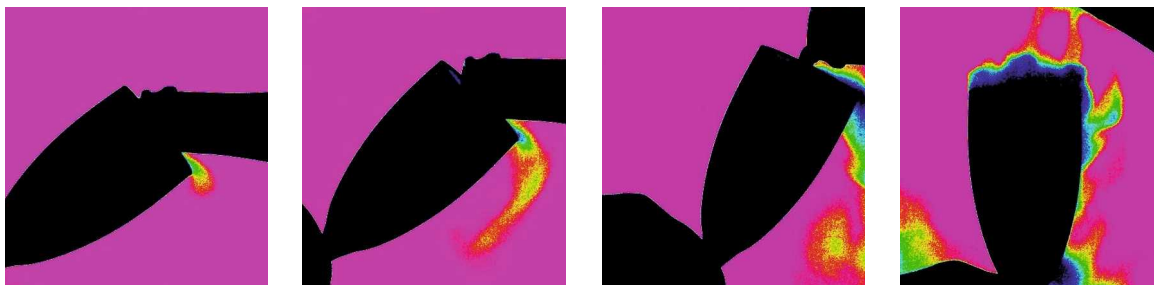
17. Si l'envie vous prend, vous pouvez aussi choisir de servir le champagne en inclinant votre flûte, comme vous le feriez en servant un verre de bière. Ce mode de versement, certes moins conventionnel, présente l'avantage d'éviter la formation de mousse.

sant le champagne le long des parois d'une flûte inclinée, à la façon dont les barmen remplissent un verre de bière (figure 17). Nous avons ensuite mesuré par une technique d'analyse chimique la quantité de gaz carbonique dissous dans la flûte. Le résultat est sans appel. Le champagne qui a été servi dans une flûte inclinée contient plus de gaz carbonique dissous que celui qui a été servi dans une flûte verticale.

En inclinant la flûte au moment du service, le champagne coule le long de ses parois de façon naturellement plus douce que lorsqu'il envahit brutalement la flûte en étant servi dans une flûte verticale. On perd donc moins du précieux gaz dissous en servant le champagne comme une bière, ce qui lui permet de préserver son effervescence un peu plus longtemps que lorsqu'on le sert de façon traditionnelle, dans une flûte verticale. Nous avons également testé l'influence de la température du champagne. Là encore, le résultat est très clair. Plus le champagne est froid, moins on perd de gaz carbonique au moment du service. Cependant, il faut modérer ce dernier résultat. En effet, on sait bien que plus un champagne est froid et moins il exprime ses arômes. Même s'il est souhaitable de préserver au mieux le gaz carbonique dissous lors d'une dégustation de champagne, il convient donc de ne pas le servir trop froid afin qu'il puisse exprimer au mieux ses arômes. La température optimale de dégustation dépend bien entendu du goût de chacun, mais il semblerait qu'elle se situe idéalement entre 8 et 12 °C.

18. En filmant le service du champagne à l'aide d'une caméra infrarouge, l'échappement du gaz carbonique devient bel et bien visible (ce sont les volutes colorées qui s'écoulent le long de la flûte). Cette technique met en évidence un dégagement gazeux plus important lorsque le champagne est servi dans une flûte verticale (ci-dessous) que lorsqu'il est servi dans une flûte inclinée (ci-contre, en haut).



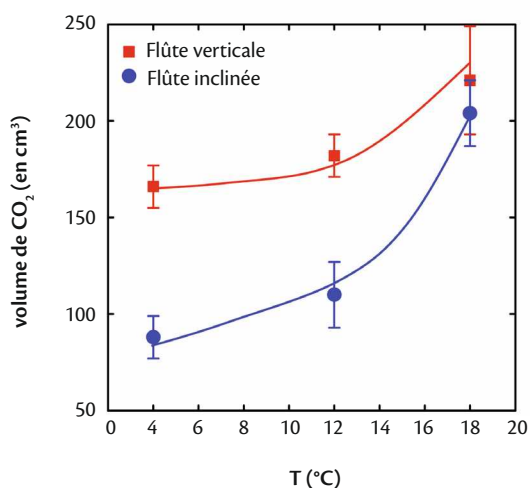


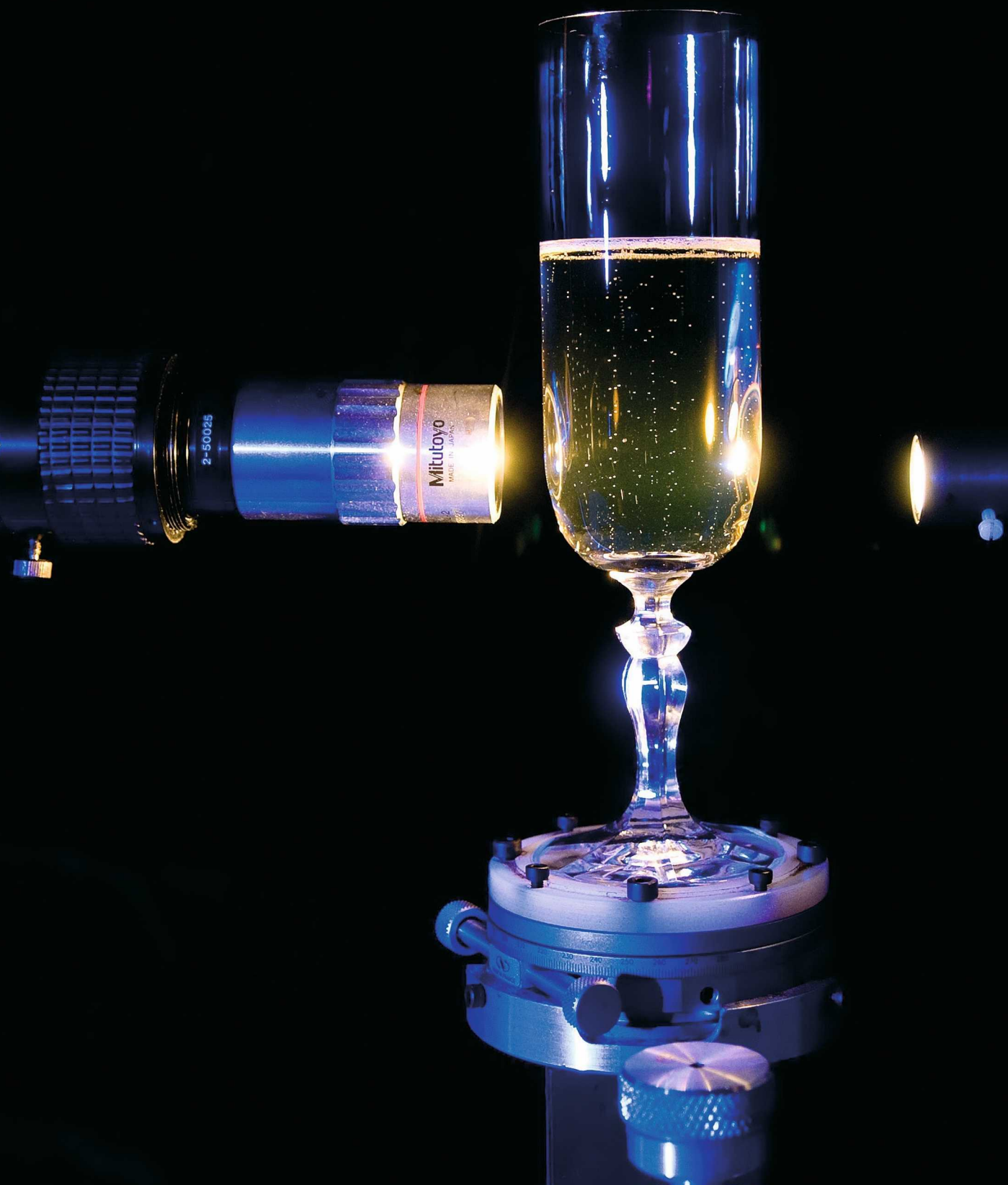
Et le gaz carbonique ?

Le gaz carbonique qui s'échappe au moment du versement est bien entendu totalement invisible à l'œil nu, car parfaitement transparent dans le domaine de la lumière visible auquel notre œil est sensible. Le gaz carbonique est cependant susceptible d'absorber une longueur d'onde bien spécifique, comprise dans le spectre de la lumière infrarouge. En filmant le service du champagne dans une flûte à l'aide d'une caméra dotée d'un capteur sensible à la lumière infrarouge, il devient alors possible de visualiser, pour la toute première fois, les volutes de gaz carbonique qui s'échappent (figure 18). Le panache de gaz carbonique devient alors bel et bien visible.

On constate que ce panache est plus abondant lorsque l'on sert le champagne dans une flûte verticale. Le graphique de la figure 19 présente le volume de gaz carbonique perdu au moment du service, pour les deux modes de versement et trois températures de service. Les deux modes de versement testés se différencient d'autant plus que le champagne est froid. On remarque également que le gaz carbonique s'écoule le long des parois de la flûte. Ce n'est pas une surprise, car c'est un gaz naturellement plus lourd que l'air. Si ce flux de gaz est, comme on peut le supposer, susceptible de drainer dans son sillage les molécules aromatiques volatiles qui s'échappent également du champagne, il y a fort à parier qu'elles coulent aussi le long du verre et qu'une grande partie échappe donc à nos sens...

19. Le volume de gaz carbonique qui s'échappe au moment du service est réduit à basse température (pour les deux modes de versement). Cependant, même s'il est souhaitable de préserver au mieux le gaz carbonique dissous, il convient de ne pas servir le champagne trop froid pour profiter de ses arômes subtils.







2

Naissance d'une bulle

Comment les bulles se forment-elles ?

Il est des spectacles qui incitent à la méditation. Les flammes d'un feu de cheminée, le lent mouvement des nuages dans le ciel, le flux et le reflux des vagues sur une plage... les bulles du champagne qui s'élèvent verticalement dans une flûte. Les bulles exercent sans nul doute un réel pouvoir hypnotique. Comme le rappelait le professeur de psychiatrie, Édouard Zarifian : « Toute sphère est en soi image de la perfection. La bulle, forme de la beauté parfaite, réunit l'air et l'eau, ces éléments fondamentaux. L'Univers est une bulle. C'est l'âme du monde que l'on voit s'envoler et rejoindre la musique des sphères... »

Ouvrez une bouteille de champagne, remplissez une flûte, et observez ce qui se passe dans le petit espace circonscrit par le verre. Des bulles se forment en différents points de la paroi, se détachent, puis fusent vers la surface en traits élégants, comme autant de minuscules montgolfières (figure 21). Écoutez bien : lorsqu'elles parviennent à la surface, les bulles éclatent en un crépitements caractéristique, produisant un nuage de fines gouttelettes qui chatouillent agréablement les narines. Sans bulles, le champagne perdrait tout son caractère, toute son âme...

Bien qu'il n'existe pas de fondement scientifique établissant une relation entre la qualité d'un champagne et la finesse de ses bulles, les amateurs ne manquent pas d'établir un rapport, affirmant volontiers que « plus les bulles sont fines, meilleur est le champagne ». Cette assertion se fonde en grande partie sur des critères esthétiques ; les petites bulles s'élevant plus lentement que les grosses, il est plus aisé et agréable de les regarder monter dans le verre, ce qui permet alors à l'imagination de vagabonder et de vanter les mérites du nectar qui offre un si joli spectacle. Nous verrons dans

Double page précédente
20. Du champagne sous surveillance...

*21. Une fois servi dans votre flûte,
le champagne s'anime. Nous sommes
bien loin du calme apparent
qui régnait dans la bouteille encore
bouchée. Des bulles apparaissent
par milliers, semblant surgir
de nulle part...*

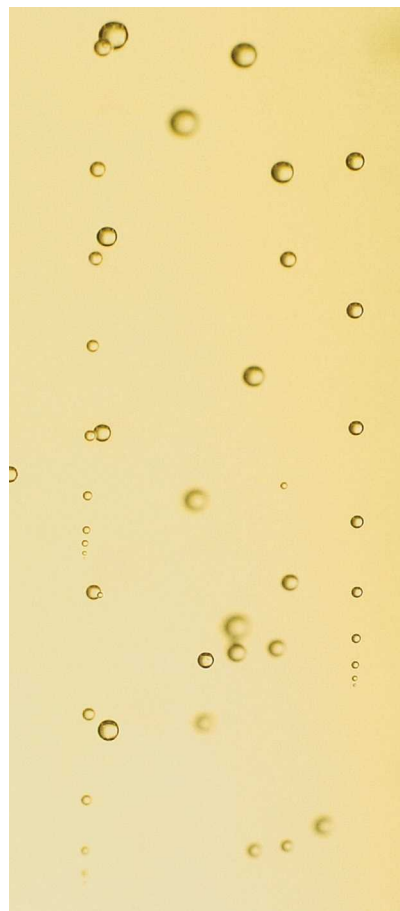


la suite de l'ouvrage que la taille des bulles qui se développent dans un champagne est davantage liée à la forme du verre dans lequel vous le dégustez ainsi qu'à l'âge du champagne, plutôt qu'à ses qualités aromatiques ou gustatives. Mais reprenons le fil de notre réflexion et revenons aux sources de la bulle...

Deux millions de bulles par flûte !

Dans la fraîcheur des caves champenoises, au moment de la prise de mousse qui a lieu dans l'espace clos de la bouteille, un équilibre s'établit progressivement entre le gaz carbonique dissous dans le liquide et le gaz carbonique présent sous le bouchon. Lorsqu'on débouche la bouteille, la pression chute brutalement. L'équilibre du gaz carbonique dans le champagne est rompu. Le champagne doit nécessairement retrouver un nouvel état d'équilibre où le gaz carbonique dissous n'est présent qu'à l'état de traces. Dès lors, les molécules de gaz carbonique dissous ont une idée fixe : fuir le liquide pour rejoindre l'atmosphère. On dit que le champagne devient « sursaturé » en gaz carbonique. Une bouteille de champagne de 75 cl doit ainsi évacuer les quelque 5 litres de CO_2 dissous qu'elle contient en excès.

Pour se faire une idée du nombre de bulles potentielles que cela représente, un rapide calcul s'impose. Nous pouvons diviser le volume du gaz carbonique contenu dans la bouteille (environ 5 litres) par le volume moyen d'une bulle de champagne (dont le diamètre est d'environ 0,5 millimètre). On aboutit au chiffre étonnant de 80 millions de bulles par bouteille de champagne, soit plus que le nombre d'habitants en France ! Si on rapporte ce nombre de bulles potentielles à la contenance d'une flûte, on trouve un chiffre de l'ordre de 10 millions de bulles potentielles par flûte de champagne (figure 22). Cependant, la totalité du gaz carbonique dissous ne va pas s'échapper sous forme de bulles. Une fois le cham-

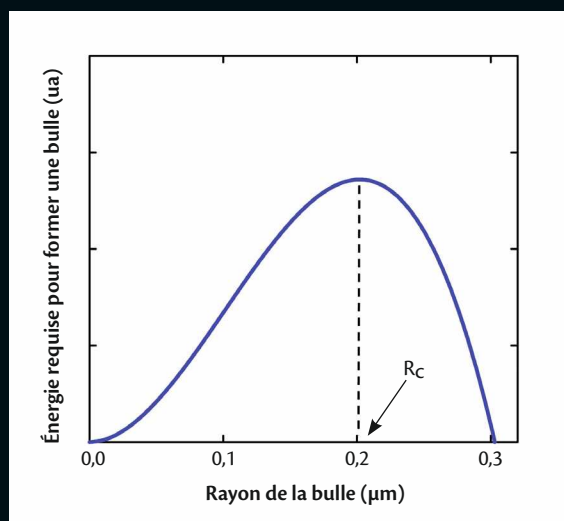


22. Si tout le gaz carbonique dissous dans le champagne était susceptible de s'échapper sous forme de bulles, environ dix millions de bulles seraient susceptibles de naître au sein de votre flûte pour rejoindre la surface.

La notion de rayon critique

Nous venons de voir qu'à l'ouverture de la bouteille, le champagne devient sursaturé en gaz carbonique. Il doit évacuer cet excès de CO_2 dissous afin de retrouver un état d'équilibre thermodynamique. Cet état de sursaturation du champagne en gaz carbonique est certes une condition nécessaire, mais pas encore suffisante pour y voir apparaître des bulles. En effet, créer des bulles

au sein d'une phase liquide n'est pas chose aisée. Pour ce faire, il faut vaincre les forces de cohésion (ce sont les interactions dites de Van der Waals*) qui relient les molécules du liquide entre elles. Former spontanément des bulles de gaz dans le liquide nécessite de briser ces liaisons et cela requiert beaucoup d'énergie, donc beaucoup de gaz carbonique dissous. Or il n'y a tout simplement pas assez de gaz carbonique dissous dans un champagne pour permettre ainsi la formation spontanée de bulles.



23. La thermodynamique nous apprend que, pour qu'une bulle de champagne puisse croître librement, son rayon doit dépasser environ 0,2 micromètre.

Du fait de cette barrière énergétique inhérente au liquide lui-même, les bulles de champagne ne peuvent pas se créer *ex nihilo*. Un calcul basé sur les lois de la thermodynamique nous apprend que des bulles dont le rayon est inférieur à un rayon dit « critique » ne pourront

pas grossir en absorbant du gaz carbonique dissous. À l'ouverture d'une bouteille de champagne, ce rayon critique se situe autour de 0,2 micromètre, soit 0,2 millième de millimètre (figure 23).

Les lois de la thermodynamique nous conduisent donc à cette situation qui semble pour le moins paradoxale. Pour que des bulles grossissent dans le champagne, il faut nécessairement que des embryons de bulles de rayon supérieur au rayon critique préexistent au sein de la phase liquide. ●

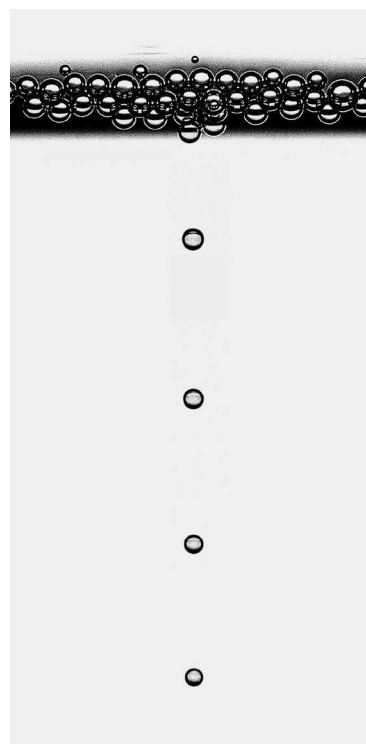
* Les interactions de Van der Waals sont des forces attractives, relativement faibles, d'origine électromagnétique qui attirent les molécules neutres les unes vers les autres dans presque tous les liquides et solides organiques.

pagne servi dans un verre, les molécules de gaz carbonique disposent de deux moyens pour s'échapper du liquide sursaturé : soit directement par la surface du champagne, de façon invisible (on parle alors de dégazage par diffusion libre) ; soit par la formation de bulles (figure 24). Le flux de CO_2 qui s'échappe de façon invisible, par diffusion libre, dépend de la surface offerte au dégazage. L'intensité de ce dégazage invisible sera donc naturellement plus importante dans une coupe qui offre une surface beaucoup plus grande que la flûte pour un volume de vin comparable. Dans une flûte classique, environ 20 % des molécules de CO_2 s'échappent par formation de bulles, contre environ 80 % qui s'échappent directement par la surface libre. Ainsi, si vous résistez à la tentation de boire votre champagne jusqu'à ce que l'effervescence soit totalement retombée, environ 2 millions de bulles de gaz carbonique se seront échappées de votre flûte. Mais où et comment ses myriades de bulles apparaissent-elles ?

Des pouponnières de bulles

Une question nous brûle nécessairement les lèvres : d'où viennent les germes gazeux qui sont véritablement les catalyseurs de l'effervescence dans une flûte ?

Il y a une dizaine d'années maintenant, j'ai consacré une partie de ma thèse à l'observation et à l'identification de ces sites de nucléation, ou « pouponnières de bulles ». L'observation attentive à l'œil nu d'une flûte de champagne fait apparaître des chapelets de bulles, qui grimpent le long des parois, voire au sein du liquide. Les bulles semblent naître de façon répétitive à partir de quelques points précis de la paroi ou du cœur de la flûte. En langage scientifique, ces points sont appelés des « sites de nucléation ». Afin de voir en détail le processus de nucléation, il faut utiliser des outils qui nous permettent de grossir considérablement ces pouponnières de bulles.



24. En réalité, une fois le champagne servi dans une flûte, le gaz carbonique dissous dispose de deux façons pour fuir le liquide avec qui il n'a plus aucune affinité. Il peut le faire soit sous forme de bulles (c'est l'effervescence si familière), soit de façon totalement invisible, par la surface du champagne.

Page de droite : 25. Photographie du banc optique destiné à scruter la naissance des bulles dans une flûte. Les phénomènes en jeu étant à la fois minuscules et très rapides, notre dispositif allie une caméra rapide (susceptible de filmer plusieurs milliers d'images par seconde) et un objectif de microscope.

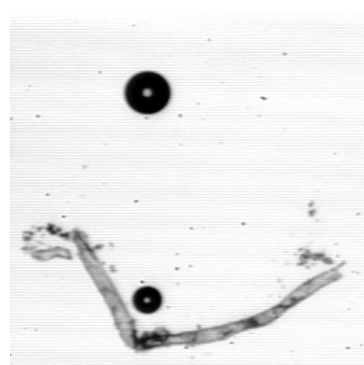
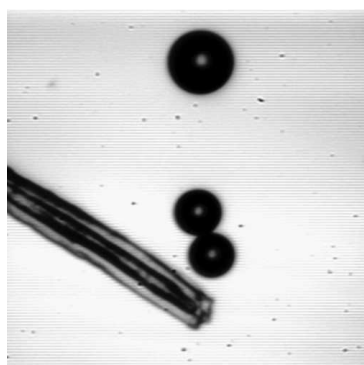
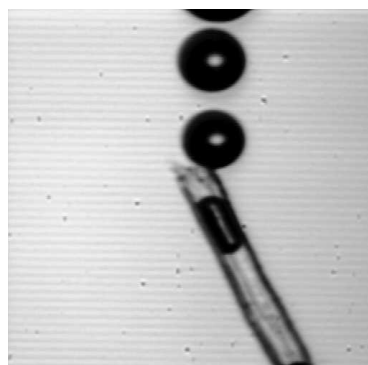


Dans un premier temps, nous avons utilisé des microscopes optiques pour identifier la nature des sites de nucléation. Les premières images sont d'une qualité plutôt médiocre, mais elles sont riches en émotion. Même si sa définition laisse encore à désirer, la toute première photo, prise au microscope, d'un site de nucléation de bulles nous révèle des détails auparavant invisibles à l'œil nu (voir page 12). Les bulles naissent à partir de ce qui semble être une petite particule, fine et très allongée, de quelques dizaines de micromètres de long.

Toutefois, si nous voulions en apprendre plus sur l'origine de ces chapelets de bulles, nous devons

nous approcher encore un peu plus près... Notre laboratoire s'est alors équipé d'une caméra rapide sur laquelle nous avons fixé un objectif de microscope susceptible de nous offrir des clichés de meilleure qualité. En dirigeant l'objectif de la caméra à la base des chapelets de bulles qui courent le long des parois d'une flûte, le processus de formation des bulles *in situ* devient enfin accessible à nos sens (figure 25). L'œil de la caméra nous apporte la confirmation expérimentale que les bulles du champagne ne naissent pas *ex nihilo*. En effet, à la base de chaque chapelet de bulles, on trouve toujours une microscopique particule de matière, particule à l'origine de l'effervescence

dans une flûte (figures 26 et 27). Contrairement à une idée encore largement répandue, ce ne sont pas les imperfections du verre ou de la flûte qui sont responsables de la formation de bulles dans le champagne. Dans la majorité des cas, ce sont des structures tubulaires, creuses, et longues de quelques dizaines de micromètres. Il s'agit le plus souvent de fibres de cellulose, en suspension dans l'air ou abandonnées par le chiffon utilisé pour essuyer le verre, qui se sont déposées à la surface du verre. Chacune de ces fibres présente en son sein une cavité qu'on appelle le lumen (figure 28, page 52).



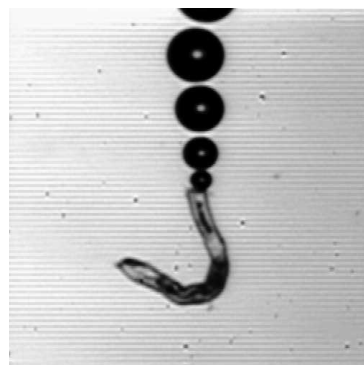
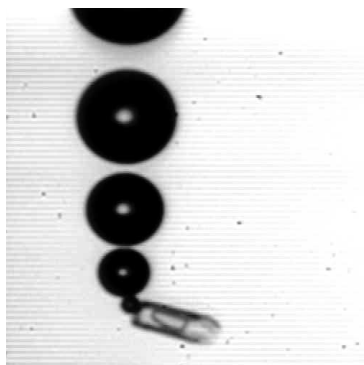
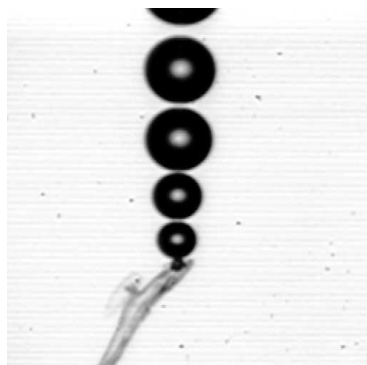
Le secret de l'effervescence

Malgré leur complète immersion, ces particules ne sont pas totalement mouillées par le liquide qui les enrobe. Leurs propriétés physiques et géométriques permettent l'emprisonnement d'une minuscule poche d'air ambiant. Et c'est là que réside le secret de l'effervescence... Par le biais de ces particules immergées, c'est un peu d'atmosphère que l'on mêle au champagne. Vous vérifierez aisément à partir des différents clichés de la figures 26 que la taille caractéristique des germes gazeux pris au piège des fibres de cellulose dépasse largement la taille critique de 0,2 micromètre requise par les lois de la thermodynamique pour permettre aux bulles de se développer. Ces minuscules poches d'air

prisonnières du champagne seront donc autant de minuscules germes gazeux par lesquels le gaz carbonique dissous pourra fuir le champagne pour rejoindre l'atmosphère.

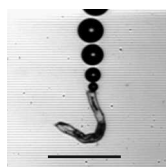
Cette formation de bulles à partir de cavités gazeuses préexistantes est décrite sous l'appellation de « nucléation hétérogène non classique ». À l'inverse, les scientifiques parlent de « nucléation homogène » lorsque les bulles apparaissent directement dans un liquide sursaturé, sans l'aide de germes gazeux préexistants.

Il peut sembler étrange de penser que les bulles de champagne naissent à partir d'impuretés dépo-

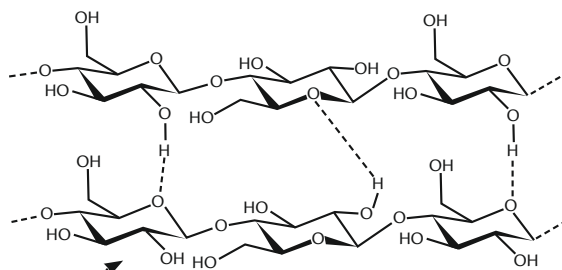
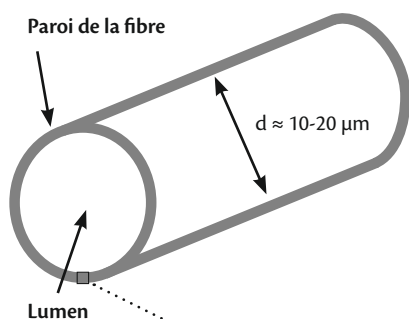


sées à la surface du verre. Cependant, imaginez une flûte parfaitement exempte de la moindre particule de matière : le champagne que l'on verserait dans ce verre idéalement « propre » serait totalement dénué de bulles. Toutes les molécules de gaz carbonique en excès s'échapperaient directement par diffusion libre à travers la surface du liquide et pas une bulle n'y prendrait naissance. Pour se convaincre de la nécessité de ces petites poches de gaz pour provoquer l'effervescence, il suffit de nettoyer parfaitement une flûte et d'y verser un champagne ou un vin effervescent. L'expérience a été réalisée sur un vin de Champagne par Bertrand Robillard et Patrice Lehuédé, dans une salle blanche³, au laboratoire de recherche de

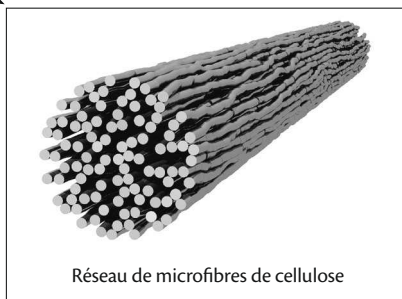
26. L'objectif de notre caméra nous a permis de mettre en évidence de minuscules particules à l'origine des chapelets de bulles qui dansent dans votre flûte.



27. Pour donner une idée de la grosseur des fibres émettrices de bulles, la barre ci-contre représente 100 µm.



Structure moléculaire d'une microfibre de cellulose

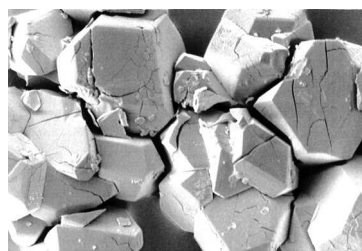


Réseau de microfibrilles de cellulose

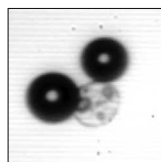
28. Les fibres de cellulose sont de minuscules structures tubulaires au sein desquelles les bulles voient le jour. Ici, les trois échelles de structure d'une fibre de cellulose.

la maison Moët & Chandon. Après la production de mousse très éphémère liée au versement, le champagne dans la flûte ressemblait tristement à un vin blanc plat.

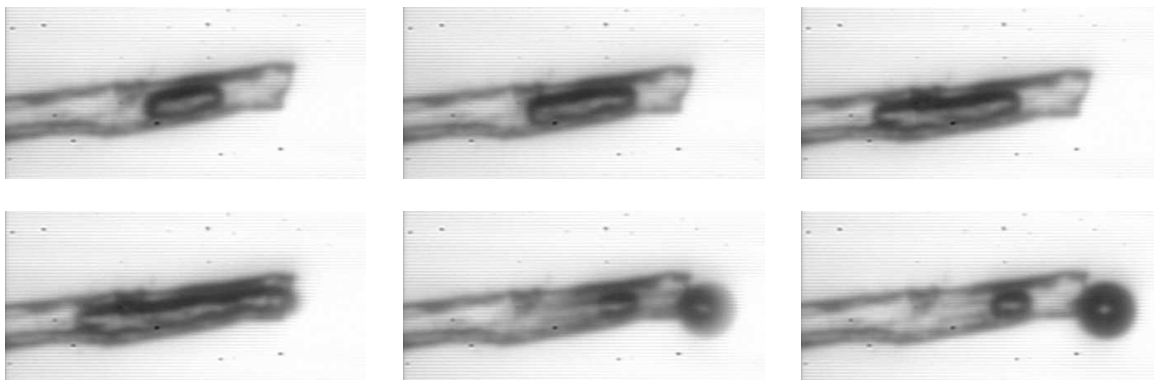
Il arrive également que certains sites de nucléation soient de minuscules cristaux de sel tartrique (bitartrate de potassium ou de calcium) ou de minuscules débris de bouchon tombés dans la bouteille ou dans la flûte au moment du versement. Sur un cristal de sel tartrique grossi (figure 29), on devine aisément des irrégularités susceptibles d'emprisonner des poches d'air au moment du versement. Compte tenu de la géométrie des cristaux de sels tartriques, ce sont très souvent plusieurs poches de gaz qui sont piégées en leur sein. En conséquence, un cristal présentera souvent plusieurs points de « bullage » (figure 30). Cela explique que les trains de bulles provenant de cristaux présentent souvent un aspect plus chaotique que ceux issus des fibres de cellulose dont la géométrie, plus régulière, permet le plus souvent l'emprisonnement d'une seule poche de gaz.



29. Cristal de sel tartrique présentant des anfractuosités. Elles permettent l'emprisonnement de poches d'air lorsque le champagne est servi dans une flûte.



30. Cristal susceptible de générer des bulles à partir de plusieurs poches de gaz piégées en son sein.



Gestation et naissance d'une bulle *in situ*

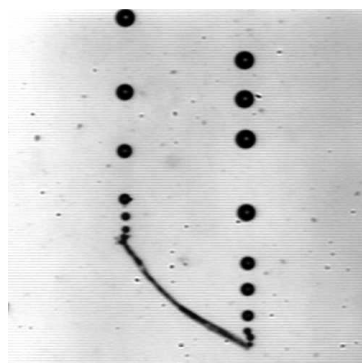
Afin d'observer les mécanismes fins de la naissance d'une bulle de champagne, nous avons filmé à haute vitesse le processus de production de bulles à partir d'une fibre de cellulose. La séquence vidéo de la figure 31 nous fait entrer dans le « ventre » d'une minuscule fibre de cellulose qui dissimule en son sein une poche d'air. Ces clichés illustrent une période du cycle de production de bulles : c'est la phase de gestation de la bulle, en quelque sorte...

Puisque le champagne est sursaturé en gaz carbonique dont l'unique dessein est de rejoindre une phase gazeuse, les molécules de CO_2 dissous vont s'engouffrer par diffusion dans le germe gazeux piégé au cœur de la fibre. On distingue très clairement le germe gazeux qui grossit au fur et à mesure qu'il se nourrit du gaz carbonique dissous. Très vite, cette poche de gaz va se sentir à l'étroit dans son écrin de cellulose. Une fois arrivée en bout de fibre, la poche se déleste d'une partie de son volume en libérant une minuscule bulle de gaz carbonique. La bulle de champagne est née... Sa gestation au creux de la fibre aura duré quelques dizaines de millisecondes (1 milliseconde = 1 millième de seconde). Le germe gazeux se rétracte dans la fibre, puis recommence à grossir en se nourrissant de gaz

31. L'objectif de la caméra rapide met en lumière le processus qui, au sein de la fibre de cellulose, conduit à la production d'une minuscule bulle de gaz carbonique. Environ 10 millisecondes séparent chaque cliché.

dissous. Une nouvelle bulle naîtra en bout de fibre, et ainsi de suite, jusqu'à épuisement du gaz carbonique dissous...

Lorsqu'elle est expulsée de son site de nucléation, la bulle présente un diamètre comparable à celui du lumen de la fibre dont elle s'est extraite, qui se situe généralement entre 10 et 20 micromètres. Les poches de gaz présentes dans les fibres qui adhèrent aux parois du verre apparaissent donc comme autant de minuscules « canons à bulles » envoyant leurs salves vers la surface du champagne. Il arrive même de temps en temps que les deux extrémités d'une fibre de cellulose émettent des bulles de concert (figure 32).



32. En scrutant attentivement une flûte de champagne, on peut observer qu'une même fibre de cellulose émet parfois des bulles par ses deux extrémités.

Action des canons à bulles

Tel un minuscule métronome, chaque site de nucléation émet une bulle à intervalle de temps régulier. Les fibres les plus fécondes peuvent donner naissance à plus de trente bulles chaque seconde. Au cours d'une dégustation de champagne qui va durer quelques minutes, les pouponnières de bulles les plus efficaces auront ainsi « enfanté » plus de dix mille petites bulles. Un site émettant des bulles de façon régulière sera alors caractérisé par sa fréquence d'émission de bulles, notée f , qui correspond au nombre de bulles émises chaque seconde. On l'appelle la fréquence de bullage. La cinétique de formation des bulles dépend directement de la quantité de gaz carbonique dissous. Pour un site de nucléation donné, cette fréquence de bullage va progressivement décroître avec le temps, le CO_2 dissous s'échappant progressivement du champagne. Cette émission régulière de bulles peut être mise en évidence en éclairant le chapelet de bulles en lumière stroboscopique. En effet, lorsque la fréquence des flashes lumineux du stroboscope devient égale à la fréquence de bullage du site de nucléation, le chapelet de bulles correspondant apparaît comme figé. Cette apparente immobilité

s'explique de la façon suivante : entre deux flashes lumineux, chaque bulle dans le chapelet prend la place de celle qui la précède immédiatement. Or, étant donné que rien ne ressemble plus à une bulle qu'une autre bulle, notre œil ne distingue plus de mouvement.

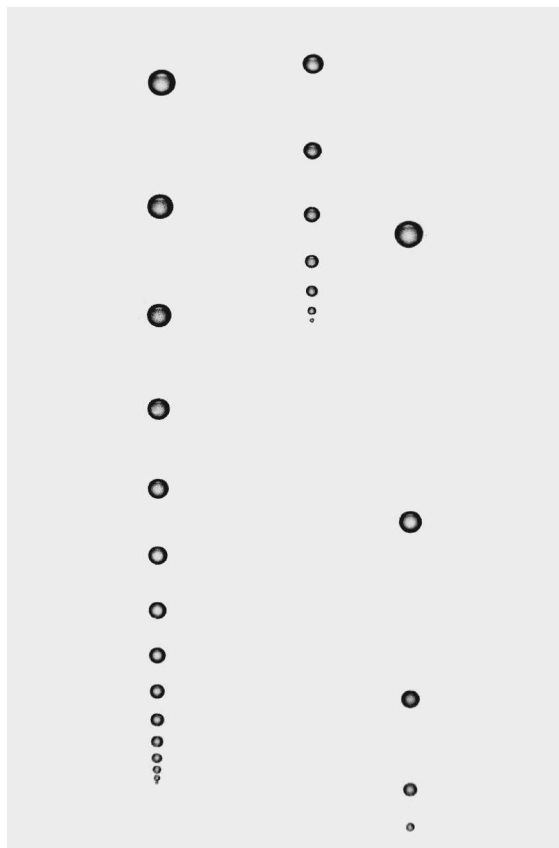
La cinétique de production des bulles dépend également de la taille et de la forme des particules faisant office de sites de nucléation. Or il existe sans aucun doute des sites de nucléation de forme et de taille diverses sur les parois d'une flûte. C'est la raison pour laquelle on peut observer des émissions de bulles de fréquences différentes au sein d'un même verre (figure 33). Dans une flûte, quelques secondes après le versement, nous remarquons que la gamme des fréquences observables est large. Au sein d'un même verre et au même moment, les fréquences de bullage sont comprises typiquement entre 1 et 30 bulles par seconde.

De plus, puisque la cinétique de formation des bulles dépend de la quantité de gaz carbonique dissous dans un liquide, les fréquences de bullage moyennes doivent varier d'une boisson gazeuse à une autre. En effet, dans une bière où la quantité de gaz carbonique dissous est typiquement deux fois plus faible que dans un champagne, la fréquence de bullage moyenne n'est que d'une dizaine de bulles par seconde.

Le décollement des bulles à partir d'une fibre de cellulose

La question du décollement est cruciale, car c'est la physique du décollement de la bulle à partir de son site de nucléation qui détermine en partie sa taille.

Pourquoi et comment une bulle sphérique se détache-t-elle de son site de nucléation sans emporter avec elle la totalité du germe gazeux ? Notons que la nature est bien faite. Si la totalité du germe gazeux s'échappait au moment de la



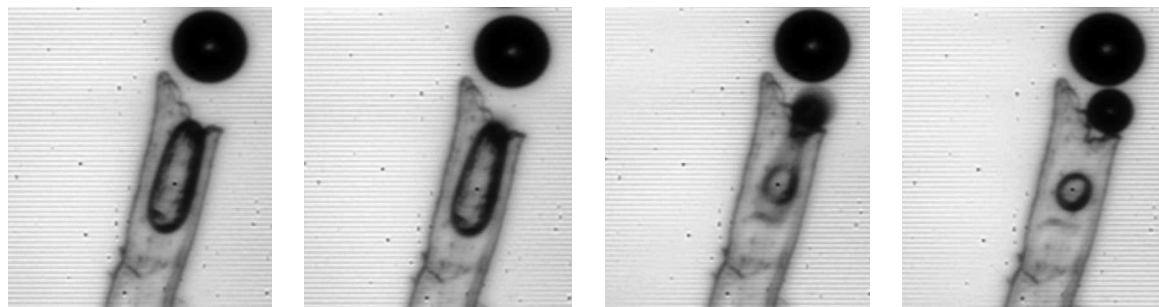
33. Au sein d'une même flûte, compte tenu des différences de forme qui peuvent exister entre les particules à l'origine de la formation des bulles, il n'est pas surprenant de constater que les fréquences d'émission de bulles peuvent changer considérablement d'un train de bulles à l'autre.

formation d'une bulle, chaque fibre de cellulose ne serait susceptible de former qu'une seule bulle... Imaginez la déception de vos convives si tel était le cas !

La séquence vidéo de la figure 34 nous montre la façon dont une bulle parfaitement sphérique se détache d'une fibre de cellulose, tout en laissant derrière elle un germe gazeux qui permettra au processus de se répéter à l'identique. La théorie n'est pas encore aboutie, mais il semblerait que joue l'effet Rayleigh, qui stipule qu'une interface telle que celle qui sépare le vin du gaz se minimise dans le but de limiter son énergie de surface. Lorsqu'elle jaillit du lumen de la fibre, hors de sa gangue de cellulose, la poche de gaz se déforme afin de se placer dans la configuration de moindre énergie (donc de surface minimale). Or c'est la sphère parfaite qui offre une surface minimale pour un volume donné. C'est (à l'inverse) le même effet que celui qui dissocie en fines gouttelettes la rosée se déposant sur une toile d'araignée au petit matin. Le physicien anglais lord Rayleigh fut le premier à étudier la façon dont un cylindre de liquide se déstabilise puis se divise progressivement en gouttelettes. L'effet Rayleigh est donc à l'origine de la naissance d'une bulle. On retrouvera l'effet Rayleigh plus loin dans ce livre, lorsque les bulles disparaissent en éclatant à la surface de la flûte.

Difficile d'imaginer un objet plus adapté à la production de bulles dans une flûte de champagne

34. Séquence vidéo qui détaille les différentes phases de l'éjection d'une bulle en bout de fibre. Seule une partie de la poche se transforme en bulle, ce qui permet la conservation d'un germe gazeux dans la fibre et la reproduction du phénomène à l'identique, jusqu'à épuisement du gaz dissous.



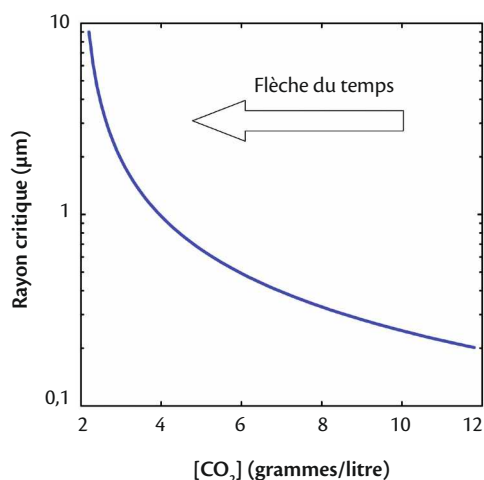
que la fibre de cellulose. Il faudrait déployer des trésors d'ingéniosité et de technologie pour réussir à usiner un objet aussi petit et précisément calibré pour émettre des bulles de façon aussi harmonieuse dans une flûte. La nature nous l'offre sur un plateau... Notre seule intervention consiste à essuyer la flûte avec un chiffon. Des fibres de cellulose s'en détacheront pour venir adhérer à la paroi de la flûte, servant ainsi de sites de nucléation.

Progressivement, les sites de nucléation s'éteignent..

Les lois de la thermodynamique nous enseignent que le rayon critique requis pour permettre la formation de bulles à partir de cavités gazeuses préexistantes n'est pas constant. Une fois le champagne servi dans la flûte, le rayon critique diminue continûment au cours du temps, étant inversement proportionnel à la quantité de gaz carbonique dissous dans le liquide. À mesure que les bulles éclatent à la surface du champagne et évacuent progressivement le gaz carbonique dissous, le rayon critique des germes gazeux requis pour rendre possible la formation de bulles augmente (figure 35). Ainsi, chaque germe gazeux initialement actif (car de taille supérieure au 0,2 micromètre requis à l'ouverture de la bouteille pour permettre la production répétitive de bulles) verra sa taille devenir égale à celle du rayon critique qui croît inexorablement... La production de bulles dans la flûte s'interrompt alors progressivement, les plus gros sites de nucléation cessant leur activité les derniers. Il faudra généralement attendre plusieurs dizaines de minutes avant de pouvoir assister à l'arrêt des sites de nucléation les plus petits.

Avec un peu de patience, on pourra même assister au dégonflement des sites de nucléation dont la taille est devenue inférieure à celle du rayon critique (qui ne cesse de croître puisque la

35. Inexorablement, et à mesure que le gaz carbonique s'échappe de votre flûte en cours de dégustation, le rayon critique en dessous duquel la production de bulles devient impossible augmente. Par conséquent, les sites de nucléation de bulles deviennent peu à peu inactifs au cours du temps.



concentration en gaz carbonique dissous ne cesse de décroître). La séquence vidéo de la figure 36 illustre ce dégonflement progressif du germe gazeux lorsque sa taille est devenue inférieure au rayon critique de la théorie de la nucléation. Une fois le germe gazeux disparu, le site de nucléation ne pourra plus jamais redevenir actif, même si vous versez à nouveau du champagne encore pétillant dans la flûte.

Bulles dans un gobelet en plastique

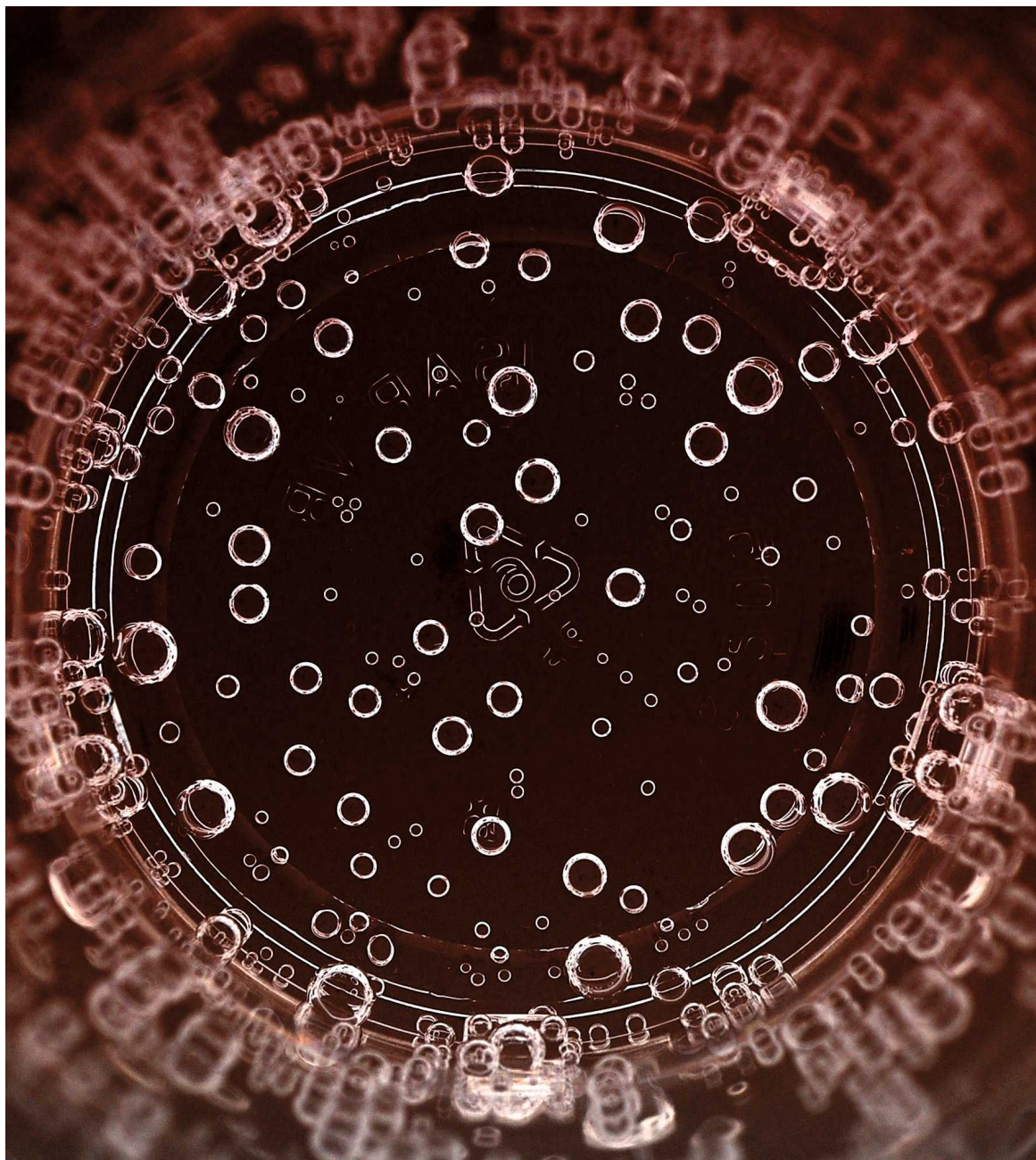
À quoi ressemble l'effervescence d'un champagne ou d'un vin effervescent si celui-ci est servi dans un gobelet en plastique ?

À la différence du verre sodocalcique standard ou du cristal, le polyéthylène dont sont faits les gobelets en plastique est très hydrophobe. C'est la raison pour laquelle le liquide mouille très mal les parois d'un gobelet en plastique. Par conséquent, les bulles générées par nucléation hétérogène non classique sur les parois du gobelet vont avoir tendance à s'y accrocher puisque le plastique préfère le contact du gaz à celui du liquide. Les bulles vont donc grossir accrochées à la paroi sur laquelle elles vont alors progressivement glisser (sous l'effet de la poussée d'Archimède) pour rejoindre la surface (figures 37 et 38, pages 60-61). C'est cette différence de mouillabilité entre le verre et le plastique qui explique pourquoi les bulles sont fines lorsque le vin est versé dans une flûte en verre ou en cristal, et pourquoi elles sont très grossières dans un gobelet en matière plastique.

On déplore également l'absence quasi totale de trains de bulles dans un gobelet en plastique. En effet, pour se succéder en un fin chapelet, les bulles doivent nécessairement se suivre très rapidement, sans s'accrocher à la paroi du contenant. On peut même avoir une idée de la taille caractéristique des bulles lorsqu'elles commencent à glisser le long des parois du gobelet en plastique. Les bulles sont assimilées à des demi-sphères qui

36. Lorsque la taille d'un site de nucléation de bulles devient inférieure au rayon dit critique, la poche de gaz piégée au sein de la fibre se résorbe progressivement par diffusion, jusqu'à disparaître complètement au bout de quelques heures.





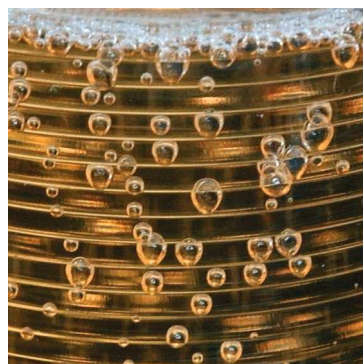
37. Gros plan sur le fond d'un gobelet en plastique dans lequel du champagne vient d'être servi. Les bulles qui apparaissent par nucléation hétérogène restent accrochées sur le plastique hydrophobe sous l'effet de la force capillaire.

grossissent par diffusion, accrochées sur les parois du gobelet. En égalant la poussée d'Archimède à laquelle une bulle est soumise et la force capillaire qui ancre la bulle sur le plastique hydrophobe, on peut évaluer le diamètre caractéristique des bulles au moment où elles vont se mettre à glisser le long de la paroi du gobelet. On trouve un diamètre de décrochage de l'ordre de quelques millimètres qui peut être aisément vérifié par l'expérience commune.

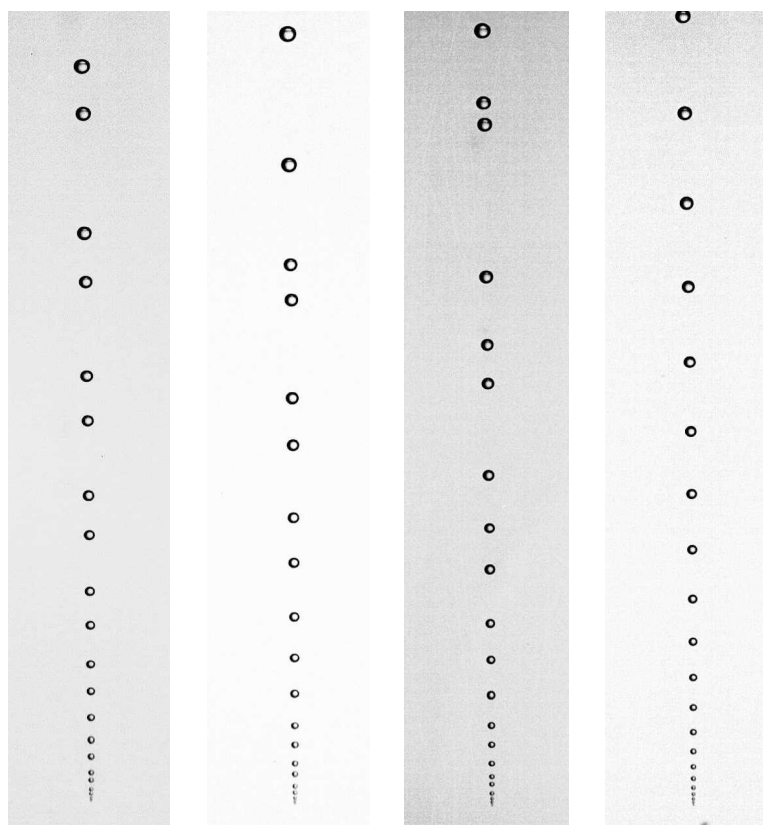
Toutefois, les surfaces hydrophiles se contaminent très rapidement (en quelques heures seulement pour le verre) en fixant les molécules organiques de l'air, nombreuses dans les cuisines mal aérées. Même le verre ou le cristal peuvent alors devenir localement hydrophobes s'ils sont contaminés par une mince pellicule de matières organiques (s'ils reposent, par exemple, sur une planche en bois qui libère des essences organiques). L'aspect de l'effervescence dans une flûte ainsi contaminée et rendue hydrophobe va se rapprocher de ce que l'on peut observer dans un gobelet en plastique.

Quand le champagne cadence ses bulles

Nous venons de montrer comment, dans leur grande majorité, les bulles des boissons gazeuses en général et du champagne en particulier naissent à partir de poches de gaz piégées dans des fibres de cellulose adsorbées sur les parois du verre. Certes, beaucoup de sites de nucléation dans une flûte émettent des bulles de façon régulière, à la manière d'un métronome, avec une fréquence de bullage qui décroît progressivement au cours du temps suite au dégazage qui s'opère de façon continue. Cependant, l'observation attentive (à l'œil nu) nous apprend que l'émission des bulles n'est pas systématiquement aussi régulière que les figures des paragraphes précédents pourraient le laisser croire.



38. Lorsque le champagne est servi dans un gobelet en plastique, hydrophobe, des bulles de gaz vont progressivement tapisser les parois en s'y accrochant, puis grossir en accumulant du gaz carbonique. Elles finiront par rejoindre la surface sous l'effet de la poussée d'Archimède qui les fera glisser le long des parois.



39. *L'observation attentive d'un train de bulles sur la durée nous montre qu'un même site de nucléation peut émettre des bulles selon des rythmes très différents au cours du temps (de gauche à droite).*

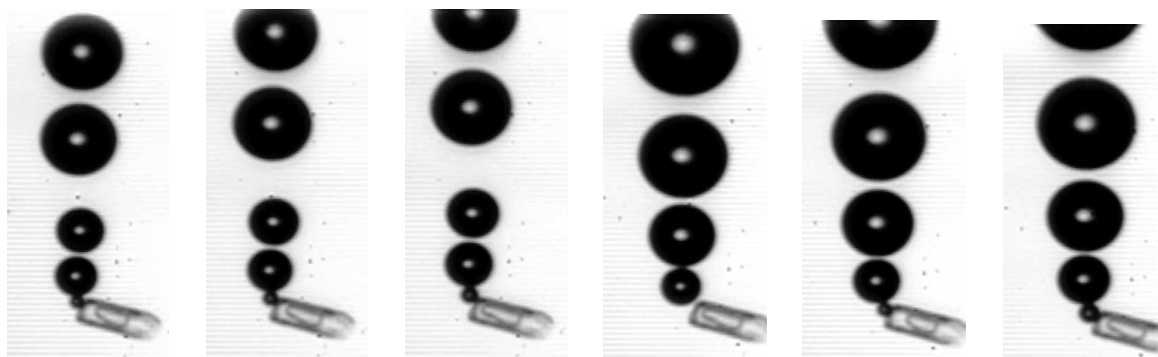
Nous avons pu observer un phénomène spectaculaire et inattendu au niveau de plusieurs sites de nucléation. Certains d'entre eux voient leur dynamique de « bullage » changer au cours du temps pendant le processus de dégazage. Tour à tour, un site de nucléation peut émettre des bulles suivant des rythmes très complexes et subir de brusques transitions entre chacun de ces régimes de bullage, pour systématiquement finir par émettre des bulles de façon régulière et métronomique en fin de dégazage.

La séquence de la figure 39 illustre notre propos. Un même site de nucléation sur la paroi d'une flûte a été suivi et photographié au cours du temps, au fur et à mesure du dégazage progressif. On constate que le rythme de production des bulles varie au cours du temps. Avant d'émettre des bulles de façon métronomique (figure 39, dernier

cliché), le site de nucléation passe par plusieurs régimes où le « bulle à bulle » n'est plus caractérisé par une fréquence unique. Au début, les bulles sont produites à un rythme composé de deux périodes (autrement dit, les intervalles de temps entre deux lâchers de bulles suivent une séquence T_1, T_2, T_1, T_2 , etc.). Visuellement, cela se traduit par des regroupements de bulles deux par deux (premier cliché). Puis le site semble changer de régime pour émettre des bulles de façon apparemment erratique (deuxième cliché). Ensuite apparaît un régime à trois périodes – $T_1, T_2, T_3, T_1, T_2, T_3$, etc. (troisième cliché) –, auquel succède finalement un régime métronomique caractérisé par une période unique (quatrième cliché).

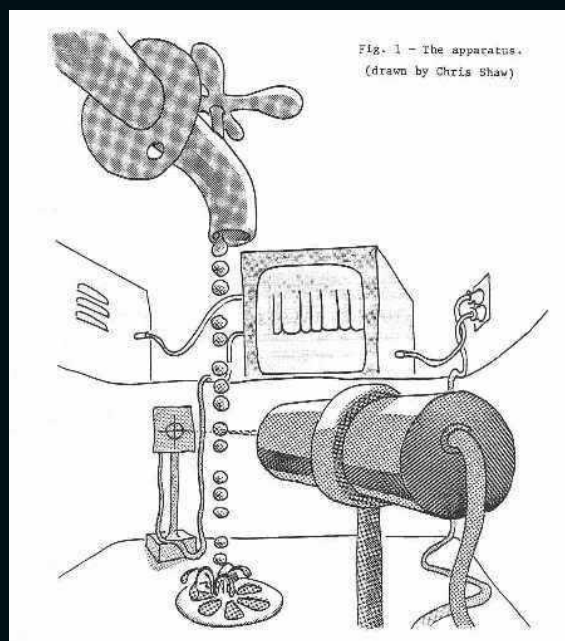
Dès lors, comment expliquer ce genre d'évolution ? Chaque fois que nous avons identifié un train de bulles présentant des instabilités de ce type, nous avons dirigé l'objectif de notre caméra rapide sur ces sites de nucléation « capricieux » pour essayer de voir ce qui se passe au moment même de l'émission des bulles. Le début de la séquence temporelle de la figure 40 présente une fibre de cellulose émettant des bulles sur un rythme binaire (suivant une séquence T_1, T_2, T_1, T_2 , etc.). Ce régime dure quelques dizaines de secondes, puis la fibre change de régime pour émettre des bulles de façon métronomique, avec un intervalle de temps constant entre deux bulles successives (trois derniers clichés).

40. Gros plans sur une minuscule fibre de cellulose en train d'émettre des bulles sur un rythme binaire (trois premiers clichés). Puis, le régime change brusquement et la fibre émet les bulles selon un rythme métronomique plus conventionnel (trois derniers clichés).



Robinet qui fuit et bulles de champagne

À première vue, les observations sur les changements de régime qui peuvent se produire lors de l'émission des bulles à partir d'un site de nucléation dans une flûte ne sont pas sans rappeler les changements de régime hydrodynamique qui se produisent lorsqu'un robinet fuit. Il s'agit de l'expérience désormais mythique conduite par Robert Shaw dans les années 1980 à l'Université de Californie, à Santa Cruz. Cette petite expérience, anodine en apparence et ne nécessitant pas de gros moyens, se révélera extraordinairement riche d'enseignements et débouchera sur la théorie du chaos qui rendit Shaw célèbre dans le monde entier. En effet, suivant l'ouverture qui lui est imposée par l'expérimentateur, un robinet qui fuit passe par une gamme de régimes allant du simple « goutte-à-goutte » strictement monopériodique au régime chaotique. La transition vers le chaos se fait, dans le cas du robinet, par cascades de doublements de période. Les gouttes sont d'abord émises une à une, puis lorsque le débit augmente, deux à deux, puis quatre à quatre, puis huit à huit, et ainsi de suite... jusqu'à l'obtention d'un régime chaotique (figure 41). La nucléation des bulles de champagne obéit-elle à la même physique que celle d'un robinet qui goutte ?



41. Schéma de principe de l'expérience du robinet qui fuit, conduite par Robert Shaw au début des années 1980.

Dans un premier temps, nous avons naïvement imaginé que la dynamique des sites « irréguliers » de nucléation de bulles pourrait être semblable à celle d'un robinet qui fuit. Le « bulle à bulle » produit par les fibres de cellulose serait une sorte de goutte-à-goutte inversé. La concentration de gaz carbonique dissous dans le champagne, force motrice du processus de diffusion, serait en quelque sorte l'analogue du débit imposé par le degré d'ouverture du robinet qui fuit. Cependant, nous n'avons jamais pu mettre en évidence de séquences de doublement de période. Dans le cas du robinet qui goutte, le comportement non linéaire a pour origine l'oscillation de la goutte avant qu'elle ne quitte le robinet, le décrochement de la goutte pouvant être légèrement avancé ou au contraire retardé selon que l'oscillation de la goutte pendante est en phase montante

ou bien descendante. La fréquence propre d'oscillation d'une goutte pendante résulte d'un équilibre entre son inertie et sa tension superficielle. Elle prend la forme suivante :

$f_G \approx 1/\pi \sqrt{2\gamma / \rho R^3}$, où γ est la tension de surface du liquide, ρ sa masse volumique et R est le rayon caractéristique de la goutte. On trouve une fréquence caractéristique de l'ordre de 15 Hertz pour une goutte d'eau pendante de quelques millimètres de diamètre. Il se trouve que cette fréquence est du même ordre de grandeur que la fréquence du goutte-à-goutte du robinet qui fuit, ce qui explique le fort couplage entre ces deux paramètres. De plus, l'amortissement de cette oscillation se fait sur une échelle de temps caractéristique, selon la formule suivante :

$\tau_G \approx \sqrt{\rho R / \pi \eta f_G}$, η étant la viscosité de l'eau. Ce temps caractéristique d'amortissement de l'oscillation vaut environ 0,3 seconde. Ce qui signifie que, lorsque le débit du robinet n'est pas trop faible, l'oscillation se fait encore sentir lorsque la goutte atteint sa taille critique de décrochage. Le décrochage de la goutte est donc bien sous l'influence directe de cette oscillation.

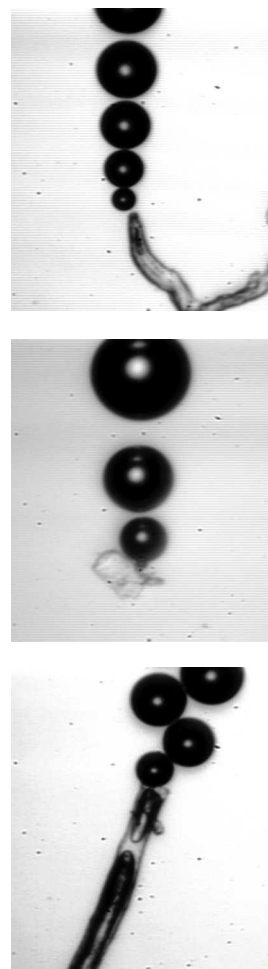
Examinons maintenant l'ordre de grandeur des fréquences d'oscillation d'une bulle émise par le lumen d'une fibre de cellulose. Une bulle de rayon R émise par une fibre de cellulose (juste après son détachement de la poche de gaz) va également osciller avec une fréquence caractéristique qui vaut cette fois-ci :

$f_B \approx 1/2\pi \sqrt{3\Gamma P_B / \rho R^2}$, où Γ est le rapport des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant du CO_2 gazeux ($\Gamma \approx 1,3$), P_B est la pression dans la bulle (sensiblement égale à la pression atmosphérique) et ρ la masse volumique de l'eau. Dans le cas d'une bulle d'environ 10 μm émise par une fibre de cellulose, la fréquence d'oscillation vaut environ 300 kHz. Cette oscillation est amortie au bout d'un temps caractéristique qui est $\tau_B \approx \rho R^2 / 20\eta$, et vaut environ 10^{-5} seconde pour une bulle de 10 μm . Or l'intervalle de temps entre l'émission de deux bulles successives à partir d'une fibre de cellulose étant de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-1} s ($\gg \tau_B$), l'oscillation de la bulle naissante sera amortie bien avant l'émission de la bulle suivante. En définitive, l'oscillation de la bulle naissante ne peut en aucun cas jouer un rôle sur la dynamique de bullage d'un site de nucléation. La dynamique de notre système de bullage est donc fondamentalement différente de celle d'un robinet qui goutte, et la source des instabilités est ailleurs... ●

Pourquoi l'émission de bulles peut changer de régime

Pour essayer de rendre compte des changements de régime observés sur certains sites de nucléation, nous avons pris contact avec un physicien spécialisé dans ce type d'instabilités, Alberto Tufaile, de l'Université de São Paulo, au Brésil.

Un examen attentif des séquences vidéo de nucléation nous a permis de déceler une forte interaction entre la poche de gaz piégée dans le lumen de la fibre et la bulle qui vient d'être libérée en bout de fibre. En effet, une bulle libérée en bout de fibre a un diamètre de l'ordre de 10 micromètres. Elle monte sous l'effet de la poussée d'Archimède, mais à une vitesse u encore modeste à cause de sa petite taille ($u \approx 50 \mu\text{m/s}$). Il se peut alors, lorsque les fibres de cellulose sont courtes, que la poche de gaz qui oscille dans le lumen entre en contact avec la bulle qu'elle vient d'émettre lors de son précédent aller-retour. Si c'est le cas, il arrive qu'une portion du gaz de la poche coalesce dans la petite bulle, brisant par là même la régularité du processus d'émission des bulles. On constate que chaque aller-retour de la poche de gaz dans le lumen n'est pas forcément synonyme d'émission de bulle. Il existe donc un fort couplage entre la fréquence de bullage d'un site de nucléation et la fréquence d'oscillation de la poche de gaz dans le lumen. Considérés séparément, les deux processus – oscillation de la poche de gaz dans le lumen de la fibre et détachement des bulles – auraient chacun leur propre fréquence, que l'on peut estimer en fonction des paramètres en jeu (taille de la fibre, viscosité du liquide, concentration en gaz carbonique dissous, etc.). Cependant, comme on vient de le constater, ils ne sont pas indépendants : une interaction a lieu si la bulle formée par une première poche de gaz se trouve encore au point de départ lorsque la deuxième poche s'apprête à sortir à son tour. En termes scientifiques, on dit



42. Illustration de quelques sites de nucléation qui émettent des bulles sur des rythmes complexes.

que le système équivaut à un couplage de deux oscillateurs mécaniques. Les clichés de la figure 42 illustrent quelques sites qui émettent des bulles suivant des rythmes complexes.

Un examen attentif de la littérature scientifique révèle que le minuscule système de bullage qu'est la fibre de cellulose reste le plus petit système de bullage irrégulier observé à ce jour.

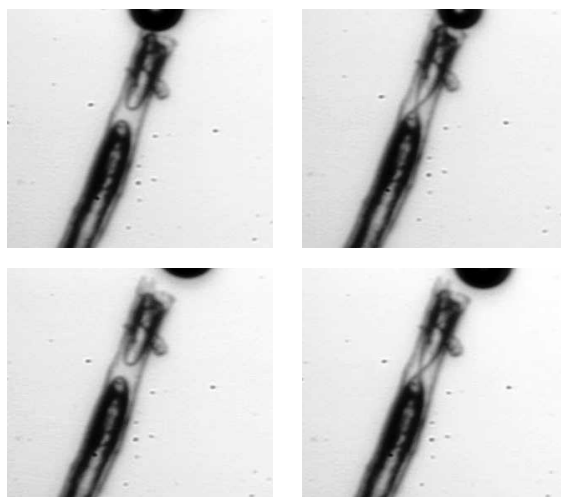
D'autres sources d'instabilités

Il existe d'autres sources d'instabilités qui peuvent s'ajouter à l'interaction entre la bulle naissante et la poche de gaz, rendant ainsi le système beaucoup plus complexe. Parfois, plusieurs poches de gaz se trouvent piégées au sein d'une même fibre. Ces poches, dans lesquelles le gaz carbonique dissous s'engouffre par diffusion, peuvent interagir, se connectant périodiquement par l'intermédiaire de ponts capillaires (lorsque deux poches de gaz entrent en contact, elles préfèrent se connecter afin de réduire leur énergie de surface).

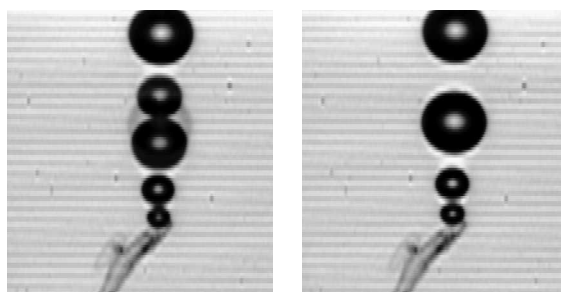
Ces connexions, lorsqu'elles se produisent, rendent les rythmes de production de bulles encore bien plus complexes à décrypter (figure 43)... Parmi toutes les observations que nous avons effectuées, le record est détenu par une fibre qui a présenté pendant quelques dizaines de secondes un régime à 16 périodes (autrement dit, le rythme de production des bulles est calé sur un régime pendant lequel la fibre émet 16 bulles avec des intervalles de temps entre l'émission de deux bulles bien définis, puis le schéma se répète, et ainsi de suite jusqu'au prochain changement de régime...).

Une dernière source d'instabilité peut encore compliquer la donne. Il se peut que deux bulles se heurtent et fusionnent (on dit qu'elles coalescent), déstabilisant encore un peu plus la régularité du chapelet de bulles dans la flûte tel qu'il sera perçu par le consommateur (figure 44).

Pour conclure au sujet des instabilités qui carac-



43. Au sein d'une même fibre, deux poches de gaz peuvent parfois entrer en contact, échanger du gaz et déstabiliser le rythme de production des bulles qui sont émises par l'extrémité de la fibre en question (1 milliseconde sépare chaque cliché).



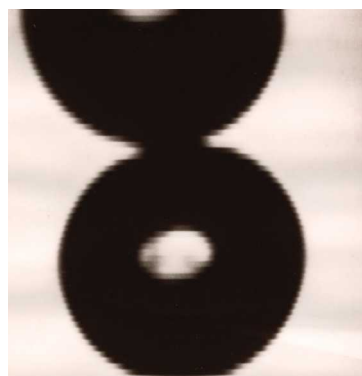
44. Une fois émises par l'extrémité de la fibre, deux bulles peuvent aussi se heurter, puis fusionner. Lorsqu'il a lieu, ce phénomène ajoute encore une source d'instabilité à la production des bulles dans une flûte de champagne (1 milliseconde sépare les deux clichés).

térisent quelquefois l'émission des bulles au niveau de certains sites de nucléation, tordons le cou à une rumeur encore parfois colportée par une certaine presse œnologique et par des amateurs soi-disant éclairés, soucieux de briller en société : la qualité d'un grand vin de Champagne se reconnaîtrait aussi à la régularité de son effervescence... Comme on vient de le voir, la régularité de l'émission des bulles n'est bien entendu aucunement reliée à la qualité du champagne qui se trouve dans la flûte. Ces instabilités de bullage touchent les champagnes les plus prestigieux, comme les vins effervescents de piètre qualité. Il s'agit d'un phénomène physique, lié exclusivement aux caractéristiques géométriques des sites de nucléation, qui ne doit en aucun cas être corrélé avec les qualités aromatiques ou gustatives du champagne.

Le monde de l'œnologie regorge d'idées reçues solidement ancrées dans l'inconscient collectif, transmises de génération en génération, sans que certaines des observations les plus élémentaires n'aient été menées de façon rigoureuse. Certaines de ces idées reçues ne sont plus compatibles avec une œnologie moderne et rationnelle qui dispose aujourd'hui d'outils susceptibles d'apporter des éclairages scientifiques nouveaux. Certes, les croyances populaires qui entourent le monde du vin participent sans nul doute de son charme ou de sa magie, mais elles nuisent parfois à la communication et à la transmission des connaissances œnologiques. Un point de vue scientifique plus objectif permet en réalité d'apprécier encore plus précisément les qualités d'un vin.

Des bulles pas toujours rondes...

Comme nous l'avons évoqué en début d'ouvrage, une bulle prend naturellement la forme d'une sphère (qui offre une surface minimale pour un volume donné), afin de minimiser son énergie de surface. Cela n'est cependant plus tout à fait vrai



lorsque la bulle est soumise à une action extérieure, susceptible alors de modifier radicalement sa forme. La séquence vidéo de la figure 45 en est une illustration. On peut y voir deux bulles millimétriques et collées à la surface du verre (rendu probablement localement hydrophobe par contamination organique) qui entrent en contact et coalescent pour ne plus faire qu'une seule et même bulle. Cet événement a des conséquences indéniables sur la bulle nouvellement formée qui voit sa surface parcourue par un réseau d'ondes lui conférant des formes surprenantes et inattendues... Ces ondes de surface seront amorties au bout d'un dixième de seconde environ, et la bulle prendra alors une forme quasi sphérique plus conventionnelle. Trop bref pour être perçu à l'œil nu, ce phénomène nécessite une caméra rapide pour pouvoir en apprécier toutes les phases.

Provoquer l'effervescence

Graver un verre est une façon radicale de provoquer l'effervescence. Une nucléation « artificielle », par gravure optimisée et rationnelle, peut être une alternative intéressante à la maîtrise de l'effervescence dans une flûte. On parle parfois de « point mousse ». Beaucoup de verriers proposent ainsi depuis déjà plusieurs années des verres à dégustation gravés, afin de pallier un déficit de sites de nucléation naturels (lorsque les flûtes sont passées au lave-vaisselle et qu'elles sont stockées la tête en bas, par exemple, cela leur interdit de capter les minuscules fibres de cellulose susceptibles de provoquer l'effervescence). Les microfissures de la gravure, obtenues par



45. Séquence vidéo nous dévoilant les formes surprenantes prises par deux bulles qui se heurtent et fusionnent (environ 330 microsecondes séparent chaque cliché).

gravure mécanique ou impact laser, favorisent le piégeage de poches d'air au moment où le champagne est versé dans le verre, permettant ainsi la production répétitive de bulles. L'effervescence provoquée par ces gravures est alors qualifiée d'artificielle, par opposition à l'effervescence naturelle lorsque le verre n'a pas subi de traitement particulier.

Parfois même sans que les dégustateurs en aient conscience, une gravure circulaire, très caractéristique, est présente sur différents modèles de flûtes à dégustation en Champagne (figure 46). Cependant, ces gravures, qui jouent le rôle de sites de nucléation artificiels, sont aisément reconnaissables. L'effervescence induite artificiellement ne ressemble en rien aux trains de bulles très caractéristiques issus des microfibrilles de cellulose. Dans une flûte ainsi gravée, les sites de nucléation (les microfissures de la gravure) sont très rapprochés et les bulles émises interagissent entre elles dès la nucléation et tout au long de leur trajet vers la surface (figure 47). Le résultat, plutôt désordonné, est souvent moins flatteur pour l'œil.

Le rôle invisible de l'effervescence

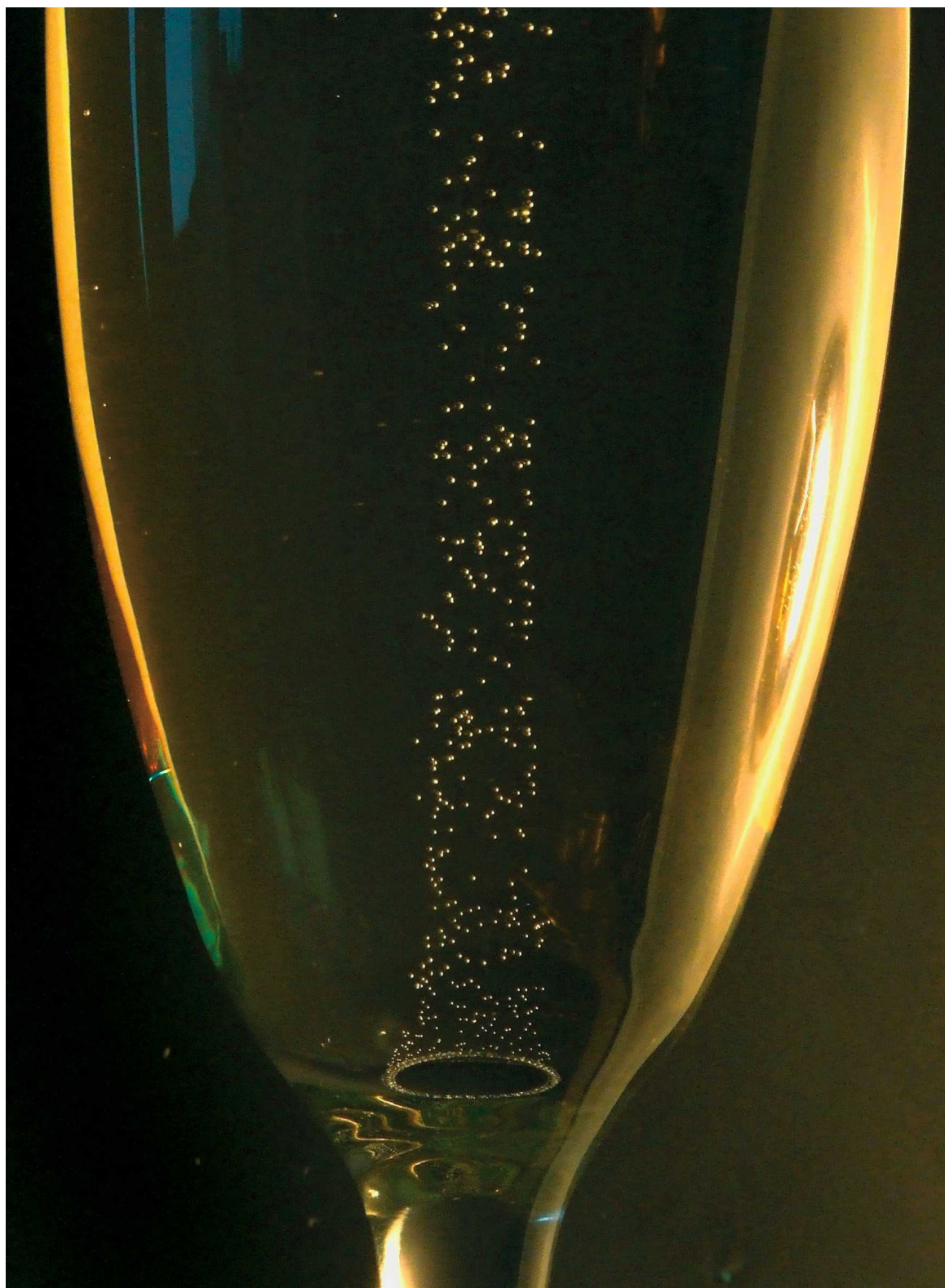
Cependant, le rôle des bulles ne s'arrête pas à cet aspect strictement esthétique et finalement subjectif lors d'une dégustation. En effet, lors de leur migration dans le champagne, les bulles entraînent le liquide qui les entoure en un mouvement très structuré. Les bulles de champagne mettent ainsi en mouvement le liquide qui les a vues naître, créant un brassage continu du champagne qui va s'avérer fondamental lors de la dégustation.

Ce rôle invisible de l'effervescence en cours de dégustation est demeuré jusqu'il y a peu totalement inexploré. Nous y reviendrons en détail.

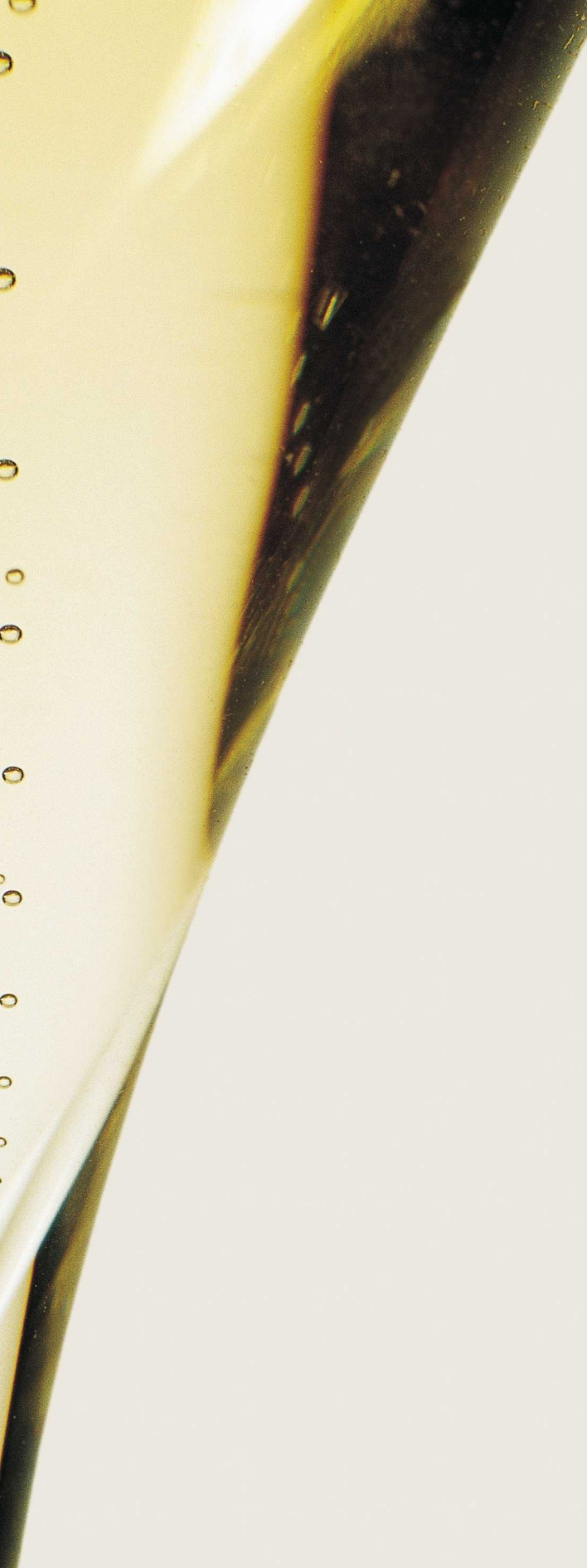


46. Gros plan de la gravure réalisée dans le fond de certaines flûtes afin de provoquer l'effervescence (le diamètre de cette petite couronne est de 2,5 mm). Cette pratique se justifie lorsque les verres à dégustation sont lavés dans un lave-vaisselle puis stockés la tête en bas, interdisant ainsi aux fibres de cellulose de tapisser les parois de la flûte et de permettre une effervescence naturelle.

47. Le flux de bulles, souvent très intense lorsqu'il est généré artificiellement par une gravure centrale, trahit généralement son origine anthropique. Les effervescences naturelles, qui ont pour origine de minuscules fibres de cellulose, sont généralement plus discrètes.







3

Ascension d'une bulle

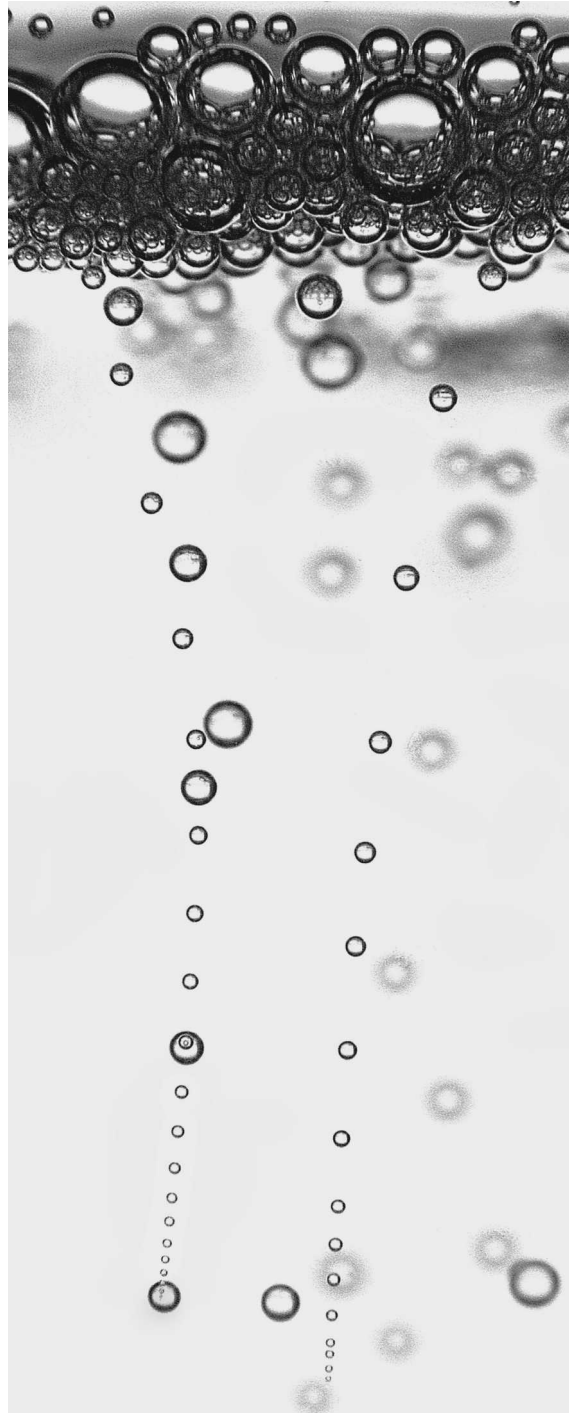
Comment les bulles montent vers la surface

La bulle qui vient de naître est encore invisible à l'œil nu. Son diamètre d'une dizaine de micromètres est comparable à celui de la fibre qui lui a donné le jour. Libérée de sa gangue de cellulose, et sous l'effet de la poussée d'Archimède, elle commence son ascension vers la surface du liquide.

Tout en se frayant un chemin dans la matrice liquide, elle continue de se nourrir des molécules de gaz carbonique dissous qu'elle rencontre. Elle grossit ainsi progressivement et devient enfin visible après un trajet de quelques dizaines de micromètres. Pendant leur trajet, les bulles se gavent littéralement de gaz carbonique, à en devenir obèses. C'est pendant cette phase ascensionnelle qu'elles acquièrent leur taille adulte et arrivent à « maturité ». En début de dégustation, après un trajet de 10 centimètres environ, elles atteignent un diamètre proche du millimètre, ce qui signifie qu'elles ont multiplié leur volume par 1 million durant leur périple (rappelons que leur diamètre originel était de 10 micromètres environ). Nous autres humains voyons seulement notre volume multiplié par 20 environ au cours de notre existence.

En début de dégustation, les bulles émises au fond de la flûte, dont le trajet est le plus long, atteignent la surface du champagne avec un diamètre proche du millimètre et une vitesse d'environ 15 à 20 centimètres par seconde (soit à peu près 0,5 km/h). Cette vitesse relativement faible est comparable à celle d'une tortue terrestre. C'est le grand nombre de bulles et leur proximité qui donnent l'impression qu'elles vont beaucoup plus vite.

49. Des centaines de bulles remontent de concert dans une flûte pour rejoindre la surface.



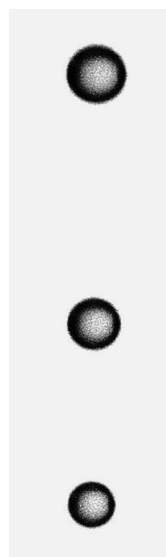
La forme des bulles en cours d'ascension

Comme on l'a rappelé au chapitre précédent, une bulle adopte naturellement la forme d'une sphère qui offre une surface minimale pour un volume donné. Une bulle en mouvement pourra néanmoins être déformée par l'écoulement du fluide autour d'elle. Cependant, cette déformation par rapport à la sphère parfaite n'intervient que pour des bulles dont le diamètre dépasse *grosso modo* le millimètre. Or, dans une flûte, le diamètre des bulles qui montent dans le vin effervescent excède rarement le millimètre. Les bulles pourront donc être considérées comme parfaitement sphériques pendant leur ascension (figure 50).

Cette observation n'est plus tout à fait vraie dans une bouteille où les bulles susceptibles de naître au fond disposent d'une distance plus longue pour grossir. Certaines dépassent alors parfois ce diamètre « critique » à partir duquel elles se déforment. Les bulles dont le diamètre est supérieur au millimètre sont légèrement aplaties sous l'effet de leur propre vitesse à cause de la pression du fluide qui s'exerce sur la face avant de la bulle lorsqu'elle rejoint la surface. Elles apparaissent alors légèrement ellipsoïdales (figure 51).

Une instabilité de sillage

Cette déformation des bulles en fonction de leur taille a une conséquence directe sur la façon dont elles montent dans le liquide. Les bulles sphériques montent verticalement et en ligne droite (pour peu que le liquide soit au repos). Juste après que le champagne a été versé, des mouvements de convection agitent le vin, mouvements qui font tourbillonner les bulles qui s'élèvent. Quelques dizaines de secondes après le versement toutefois, lorsque la convection liée aux turbulences du versement s'est atténuée, on peut constater que les bulles montent verticalement et en ligne droite (figure 48).



50. En cours d'ascension, les petites bulles qui s'agrègent verticalement en remontant dans la flûte adoptent la forme d'une sphère parfaite.



51. Lorsqu'elles dépassent une taille critique de l'ordre du millimètre, les bulles perdent progressivement leur forme sphérique pour adopter une forme ellipsoïdale moins conventionnelle.

Double page précédente :
48. Quelques trains de bulles cohabitent au sein d'une flûte de champagne.

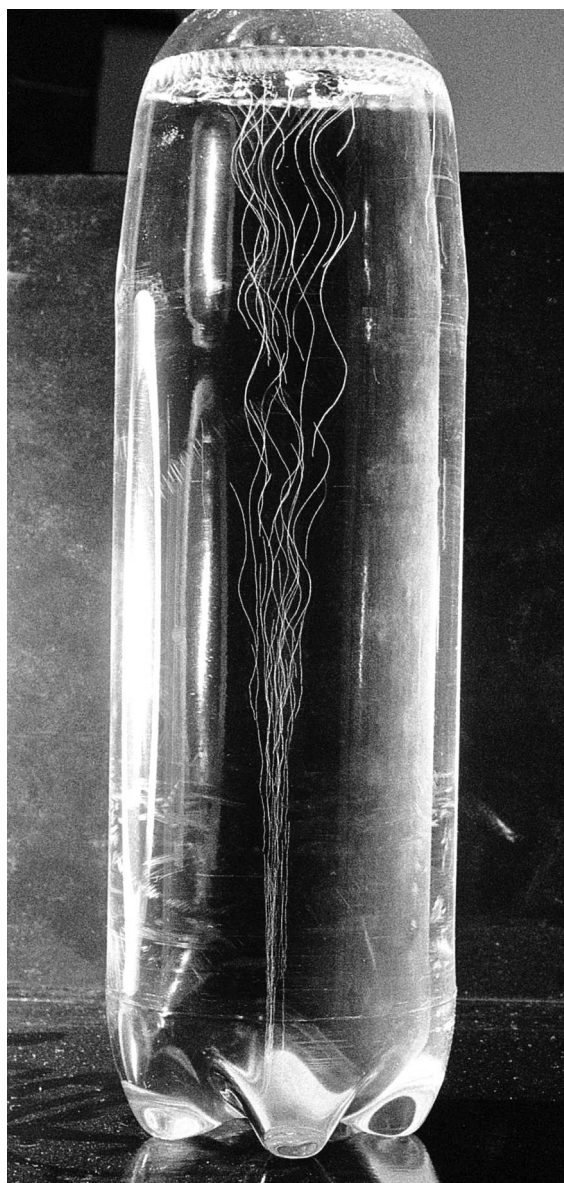
Lorsqu'une bulle se déforme sous l'effet de sa propre vitesse, une instabilité hydrodynamique se développe dans son sillage où de petits tourbillons (invisibles à l'œil nu) apparaissent. Ces derniers sont susceptibles de modifier la trajectoire de la bulle qui va alors se mettre à osciller de droite à gauche tout en montant. Cette situation nécessite que la bulle dépasse environ 2 millimètres de diamètre, ce qui ne peut se produire qu'en bouteille (figure 52). Par exemple, à l'ouverture du magnum, la limonade devient sursaturée en gaz carbonique. Des bulles apparaissent alors sur les défauts de moulure de la bouteille en plastique qui jouent le rôle de sites de nucléation.

Les filaments blancs qui traversent la bouteille de haut en bas sont le reflet de la lumière ambiante sur les bulles pendant leur ascension. Les bulles disposent donc d'une trentaine de centimètres pour grossir par diffusion dans le liquide sursaturé en gaz carbonique.

Au cours des dix premiers centimètres, les bulles s'élèvent en ligne droite. Puis, elles atteignent le diamètre critique qui permet à l'instabilité de se développer dans leur sillage. Elles commencent alors à osciller. L'amplitude des oscillations est de plus en plus prononcée à mesure que les bulles augmentent de volume et s'approchent de la surface. Des instabilités semblables existent aussi à une tout autre échelle, qui est celle des mouvements des nuages dans l'atmosphère (figure 53).

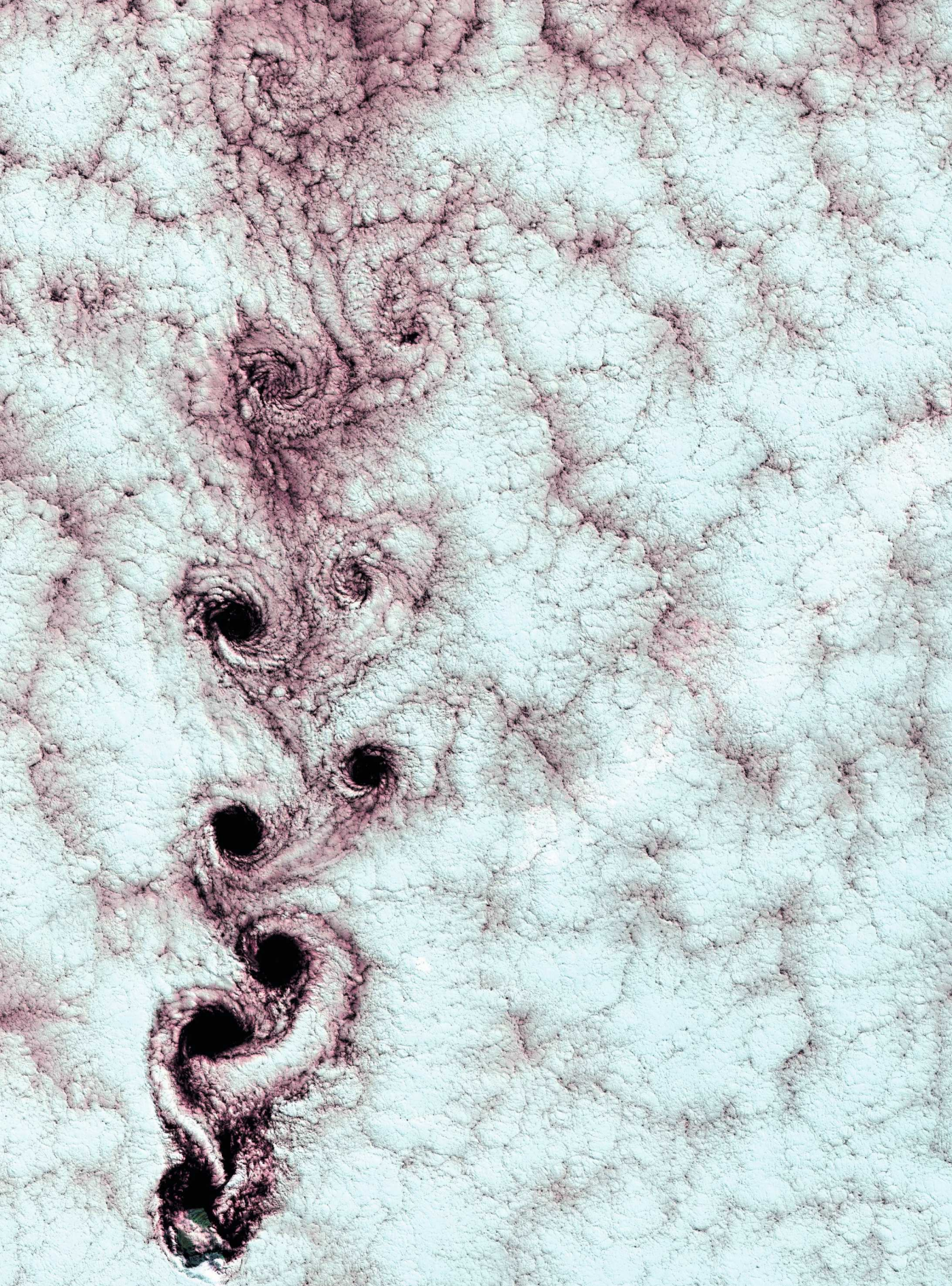
Pourquoi les bulles accélèrent-elles ?

La poussée d'Archimède qui tire la bulle vers le haut est responsable de son ascension dans le verre. Or cette poussée, à laquelle est soumise une bulle, est proportionnelle à son volume. Puisque le volume d'une bulle augmente tout au long de son trajet vers la surface, la poussée d'Archimède augmente également, d'où l'accélération observée au fur et à mesure que la bulle grossit. Cette accé-



52. Illustration de la trajectoire oscillante des bulles dans un magnum de limonade révélée sur ce cliché avec une pause longue.

53. Photo satellite de l'instabilité provoquée par la rencontre entre les vents dominants et l'île de Juan Fernandez au large du Chili. Des tourbillons géants apparaissent dans la couche nuageuse (comme parfois dans le sillage d'une bulle).





lération continue explique pourquoi les bulles s'écartent progressivement les unes des autres à mesure qu'elles approchent de la surface, comme on peut le voir sur bon nombre des photographies qui jalonnent cet ouvrage. Si elles voyageaient à vitesse constante, l'écartement entre deux bulles successives serait constant (pour les sites de nucléation dont le rythme d'émission des bulles est strictement métronomique, bien sûr).

Croissance d'une bulle

Une fois libérées de leur site de nucléation, les petites bulles entament leur course vers la surface du liquide en grossissant à mesure qu'elles s'élèvent. Mais pourquoi grossissent-elles au cours de leur ascension ? Pour les mêmes raisons qui font qu'elles naissent par nucléation hétérogène à partir d'un germe gazeux dont la taille est supérieure à une taille critique. La croissance des bulles en cours d'ascension est due à la diffusion des molécules de gaz carbonique vers les bulles, puisqu'elles présentent une taille supérieure au rayon critique requis pour croître librement.

La vitesse de grossissement des bulles de champagne est fondamentale, car elle détermine la taille moyenne maximale qu'elles vont pouvoir atteindre. Du point de vue du dégustateur, la taille des bulles qui parviennent en surface a son importance, même si, à ce jour, aucune corrélation scientifique n'a encore été établie entre la taille des bulles d'un champagne et ses qualités gustatives et/ou organoleptiques. Les idées reçues ont cependant la vie dure, et la taille des bulles reste encore un critère d'excellence chez bon nombre de consommateurs, d'œnologues et de sommeliers.

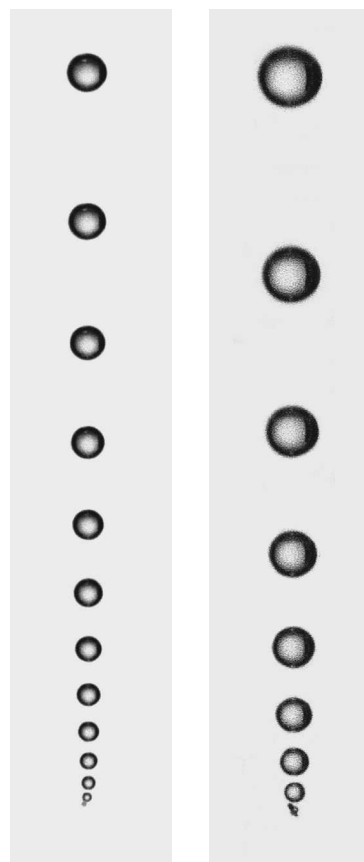
Il a été démontré que la croissance des bulles dans un verre dépend d'un certain nombre de paramètres physico-chimiques. Attardons-nous un moment sur les principaux facteurs dont le rôle sur la taille des bulles dans un verre est avéré.

Page de gauche : 54. Train de bulles qui remontent vers la surface d'une flûte de champagne pour nourrir le fin cordon de mousse. On peut observer sur ce cliché que les bulles grossissent progressivement en cours d'ascension.

Le rôle du gaz carbonique dissous

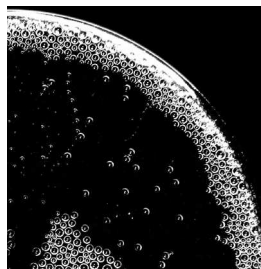
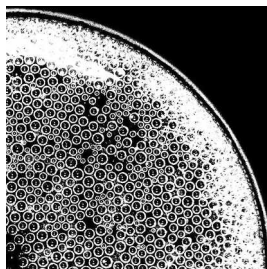
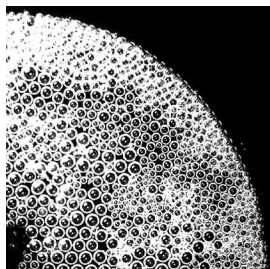
L'un des facteurs qui influencent beaucoup la vitesse de croissance des bulles est la quantité de gaz carbonique dissous. Plus il y en a, et plus les bulles grossissent vite. Étant donné que le gaz carbonique dissous s'échappe du champagne lorsque celui-ci est versé dans une flûte (à la fois directement par la surface et par le processus de formation des bulles), la vitesse de croissance des bulles durant leur ascension diminue progressivement à mesure que le temps s'écoule. Vous avez probablement dû le remarquer en dégustant un verre de champagne : les bulles sont plus fines et moins nombreuses en fin de dégustation qu'au tout début (figure 56).

À votre avis, entre les bulles de bière et les bulles de champagne, lesquelles sont les plus fines ? Pour le découvrir, observons les clichés de la figure 55. Nul doute que les bulles de bière apparaissent plus fines que celle du champagne, et il ne faut pas s'en étonner. En effet, compte tenu de l'élaboration d'une bière, il existe en son sein environ deux fois moins de gaz carbonique dissous que dans un vin de Champagne. Contrairement aux idées reçues, les bulles de bière sont nettement plus petites que celles du champagne, et de très loin même... Néanmoins, dans la grande majorité, nombreux sont ceux intimement convaincus que le champagne est le champion toutes catégories des bulles les plus fines. Certains seront même déçus d'apprendre qu'une boisson aussi « populaire » que la bière présente des bulles plus



55. Contrairement à une idée reçue, les bulles de bière (à gauche) sont plus fines que celles du champagne (à droite).

56. Vues successives de la surface d'une flûte de champagne sur la durée (de gauche à droite). Vous remarquerez aisément que les bulles qui tapissent la surface s'affinent au fil du temps.



finer que celles d'un champagne. Là encore, il est amusant de remarquer qu'on associe souvent inconsciemment la finesse des bulles au prestige de la boisson effervescente.

Quid de l'âge du champagne ?

L'adéquation entre la taille des bulles d'un vin de Champagne et sa teneur en gaz carbonique dissous explique également pourquoi un champagne qui a vieilli longtemps en cave présente généralement des bulles plus fines qu'un champagne jeune. En effet, le bouchon de la bouteille n'est pas absolument hermétique aux échanges gazeux, et du gaz carbonique va progressivement s'échapper au cours du vieillissement. Connaissant la porosité du liège dont on fait les bouchons, on peut estimer la décroissance progressive, au fil des ans, de la concentration en gaz carbonique dissous dans un champagne embouteillé.

La teneur en CO_2 dissous d'un champagne qui a eu le temps de vieillir est donc systématiquement inférieure à celle d'un champagne jeune, et ses bulles sont naturellement plus fines (faute de gaz dissous). C'est d'ailleurs peut-être l'origine du dicton populaire qui associe la taille des bulles à la qualité du produit. En effet, on laisse vieillir les vins effervescents qui ont un bon potentiel de garde. Lorsqu'on les déguste plusieurs années après leur élaboration, ces vins présentent souvent de très bonnes qualités organoleptiques, car ils ont été sélectionnés par les œnologues pour leur capacité à développer des arômes au cours du vieillissement. Or ces vins qui ont eu le temps de vieillir présentent également des bulles naturellement plus fines, car le volume de gaz carbonique dissous qu'ils contiennent est souvent très inférieur aux 5 litres qui caractérisent une bouteille de 75 centilitres de champagne jeune à la fin de la prise de mousse.

La taille de la bulle n'est pas en soi un indicateur de la qualité, mais plutôt de l'âge du vin. Cepen-

dant, il est possible qu'au fil des siècles les amateurs aient fini par établir une association entre les qualités gustatives d'un champagne « âgé » et la finesse de ses bulles. C'est sans doute là qu'il faut trouver l'origine de l'adage : « Plus petites sont les bulles, meilleur est le champagne. » Il est vrai que, au-delà de sa prétendue « rondeur » et de ses arômes, un champagne d'âge se reconnaît autant à la finesse de son effervescence qu'à la complexité de ses arômes et de son goût.

On peut même estimer la concentration en gaz carbonique dissous théorique en deçà de laquelle la production de bulles devient énergétiquement impossible dans un champagne. En effet, rappelez-vous que le rayon critique de la théorie de la nucléation est inversement proportionnel à la concentration en CO_2 dissous (figure 35, page 57). En deçà d'une concentration en gaz carbonique dissous d'environ 2,5 grammes par litre, ce rayon critique devient supérieur à la taille des germes gazeux piégés dans les fibres de cellulose ou les anfractuosités du verre (dans le cas d'une flûte gravée) susceptibles de jouer le rôle de sites de nucléation. En débouchant un champagne d'âge vénérable (qui a vieilli pendant quelques décennies), on prend donc le risque de se retrouver avec un champagne plat, sans âme, incapable de produire la moindre petite bulle dans une flûte.

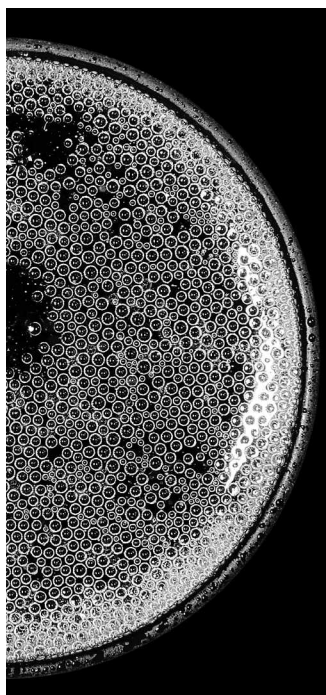
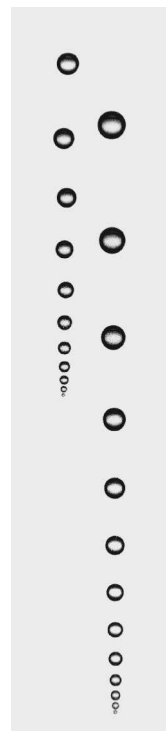
L'effet « hauteur du verre »

En dépit de tout autre paramètre d'ordre physico-chimique, la bulle grossira d'autant plus qu'elle passera du temps immergée dans le champagne sursaturé en gaz carbonique. Or la bulle grossira d'autant plus que la distance qui la sépare de la surface est grande. En conséquence de quoi, plus un site de nucléation est loin sous la surface du liquide, plus les bulles qui en sont issues seront grosses. Le cliché de la figure 57 illustre cette situation. On peut y voir deux chapelets de bulles issus

de deux sites de nucléation situés à différentes profondeurs dans une flûte. À une altitude donnée, les bulles issues du site de nucléation le plus profond dans la flûte sont les plus grosses. La théorie nous apprend que le volume d'une bulle qui monte dans un verre est proportionnel à la distance qu'elle a parcourue. Il faut donc se méfier de la taille du contenant dans lequel on déguste un vin effervescent avant de faire des conclusions hâtives quant à la taille de ses bulles.

Nous avons testé l'effet « hauteur du verre », en servant le même champagne dans une coupe et dans une flûte. Comme l'attestent les deux clichés de la figure 58, juste après le versement et à concentration de CO_2 sensiblement identique, les bulles qui parviennent à la surface de la coupe sont naturellement plus fines que celles qui parviennent à la surface de la flûte, puisque la hauteur de liquide est nettement plus faible dans la coupe que dans la flûte. Ce phénomène ira même en s'accroissant en cours de dégustation,

57. À une hauteur donnée, les bulles sont d'autant plus grosses qu'elles ont été émises profondément dans la flûte.



58. Illustration de la distribution en taille des bulles qui parviennent à la surface de la coupe (à gauche) et de la flûte (à droite) 30 secondes après le service du champagne. Les bulles sont plus grosses à la surface de la flûte car leur ascension a été naturellement plus longue.

car la concentration en CO_2 dissous du champagne dans la coupe ne cessera d'être inférieure à celle dans la flûte au cours des dix premières minutes qui suivent le versement. Un bon point donc pour la coupe qui favorise systématiquement la finesse des bulles par rapport à la flûte ! C'est, hélas, probablement le seul « avantage » de la coupe comme nous le verrons plus tard.

La pression ambiante

La pression ambiante de l'endroit où nous dégustons un champagne (ou toute autre boisson effervescente) a également une influence sur la taille moyenne des bulles dans le verre. Sur Terre et au niveau de la mer, la pression atmosphérique est de 1 bar, mais cette pression diminue avec l'altitude. Des alpinistes parvenus au sommet du mont Blanc (à 4 807 mètres d'altitude, la pression ambiante est environ la moitié de ce qu'elle est au niveau de la mer) et qui souhaiteraient porter un toast à leur exploit en dégustant une flûte de champagne seraient certainement surpris par la taille des bulles dans leur flûte. Sous une pression de 0,5 bar, le diamètre moyen des bulles est augmenté d'environ 40 % dans une flûte (ce qui signifie que les bulles y sont presque trois fois plus grosses en volume !).

Lors de la pratique de la plongée sous-marine, c'est exactement le même phénomène qui guette les plongeurs imprudents qui remontent trop vite à la surface. Des bulles d'azote apparaissent puis grossissent dans le système vasculaire des plongeurs soumis à une décompression trop rapide, conduisant parfois à des embolies gazeuses mortelles.

Cet effet sur la taille et le nombre des bulles produites dans un verre se fait même sentir dans un avion de ligne. Les avions de ligne volent à une altitude de croisière d'environ 10 000 mètres. À cette altitude, la pression à l'extérieure de la cabine n'est que d'environ le quart de ce qu'elle est au niveau de la mer. Bien entendu, un air aussi raréfié



59. Photo prise avec son téléphone portable par l'un de mes amis œnologue, Warren Edwardes, lors d'un voyage en avion. Curieux de tout et très attentif lorsqu'il s'agit de déguster un bon millésime, Warren observe que les bulles de champagne sont plus nombreuses et plus grosses en avion, où la pression est réduite.

(et froid) serait totalement irrespirable pour les passagers et membres d'équipage. C'est la raison pour laquelle l'avion est pressurisé. Cependant, afin de ménager le fuselage de l'appareil, qui doit supporter la différence de pression entre la cabine et l'air extérieur, la pression en cabine n'est pas celle qui existe au niveau de la mer. La pression en cabine est d'environ 0,75 bar, ce qui équivaut à la pression qui règne à environ 2 500 mètres d'altitude. Cette pression réduite ne provoque aucun trouble physiologique chez les passagers. Cependant, les plus attentifs d'entre eux pourront se rendre compte que les bulles du champagne qu'ils dégustent sont plus nombreuses et plus grosses qu'à l'accoutumée. Qu'ils se rassurent, ce n'est pas une hallucination liée au mal de l'air ! Cette observation est tout simplement due aux lois de la physique, qui s'appliquent sur Terre comme au ciel (figure 59, page précédente)...

À l'inverse, sous une atmosphère hyperbare, les bulles de champagne s'affineraient. Sous 2 bars de pression, elles seraient ainsi environ trois fois moins volumineuses que sous 1 bar. Pour évaluer l'influence de l'effervescence sur la perception des arômes d'un vin de Champagne on envisage très sérieusement d'organiser des séances de dégustation en atmosphère pressurisée, afin de faire varier l'intensité de l'effervescence sans modifier les propriétés organoleptiques intrinsèques du vin.

Le rôle de la gravité

On l'a dit, la poussée d'Archimède, et donc la gravité terrestre, est la force motrice à l'origine de l'ascension des bulles. La vitesse d'ascension d'une bulle est ainsi directement fonction de la gravité du lieu où vous dégustez le champagne. Certes, la gravité terrestre varie bien peu, quel que soit le lieu où nous nous trouvons à la surface du globe (même au sommet des plus hautes montagnes ou au fond des gouffres les plus profonds). Mais que se passerait-il si nous changions de planète ?

Chaque planète possède sa propre gravité, intrinsèquement liée à sa masse. Sur la Lune par exemple, où la gravité est six fois inférieure à la gravité terrestre, les bulles monteraient environ six fois moins vite que sur Terre (du fait d'une gravité six fois inférieure). Elles passeraient ainsi plus de temps à grossir par diffusion dans le liquide saturé en gaz carbonique. Le modèle théorique que nous avons développé nous apprend que le diamètre moyen des bulles sur la Lune serait supérieur d'environ 50 % à ce qu'il est sur Terre. Il y aurait également des conséquences sur le nombre de bulles qui cohabitent au même moment dans une flûte. En effet, sur la Lune, les bulles mettraient six fois plus de temps que sur Terre pour rejoindre la surface de la flûte. Or une gravité réduite n'aurait aucune conséquence sur le rythme d'émission des bulles qui resterait inchangé. Dans deux flûtes identiques, il y aurait donc six fois plus de bulles dans la flûte sur Terre que dans la flûte sur la Lune... À défaut de pouvoir m'y rendre moi-même, je compte beaucoup sur la prochaine mission lunaire habitée pour tenter de vérifier, photographies à l'appui, ces hypothèses.

Un bouclier tensioactif

Le champagne, les vins mousseux, les bières et autres sodas ne sont pas des liquides purs. Au sens strictement chimique, ils sont formés d'eau, d'alcool pour les premiers, de gaz carbonique dissous et de beaucoup d'autres composés organiques plus ou moins complexes. Ces boissons contiennent également une quantité non négligeable de macromolécules dites « tensioactives ». Ce sont essentiellement des protéines et des glycoprotéines issues de la baie de raisin et des levures. De par leur structure moléculaire, ces éléments présentent une double affinité : une partie est hydrophile, alors que l'autre partie est hydrophobe (figure 60). En conséquence de quoi, afin de satisfaire leurs deux pôles aux affinités

Il y a fort à parier que le tourisme spatial se développe et se démocratise dans les décennies à venir. Or qui dit tourisme spatial dit vol en apesanteur. À quoi ressemblerait donc une dégustation de champagne en apesanteur ?

Après le débouchage d'une bouteille en apesanteur, sans l'aide de la gravité, il serait déjà fort difficile de servir le champagne dans un verre... L'absence de gravité n'empêche cependant pas le champagne d'être sursaturé en gaz carbonique après l'ouverture de la bouteille. Même en l'absence de gravité, le gaz carbonique doit donc toujours s'échapper du champagne (et notamment sous forme de bulles s'il existe dans la bouteille des germes gazeux d'une taille supérieure à la taille critique requise pour grossir par diffusion). Par contre, en l'absence de gravité, les bulles de gaz carbonique nucléées sur les quelques sites de nucléation présents sur les parois de la bouteille seraient totalement incapables de s'élever. Des bulles se formeraient et grossiraient dans le champagne, mais sans pouvoir se détacher de leur site de nucléation pour rejoindre la surface, comme elles le feraient sur Terre. Elles deviendraient de plus en plus grosses à l'intérieur de la bouteille et prendraient rapidement toute la place, chassant peu à peu tout le champagne hors de la bouteille.

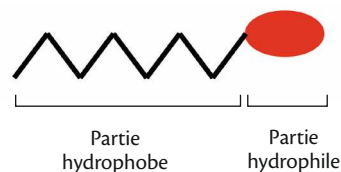
Hors de la bouteille et en apesanteur, le champagne se rassemblerait en de grosses gouttes, plus ou moins sphériques, pour peu qu'elles ne soient pas perturbées par un choc. Ces gouttes fusionneraient ensemble au premier contact pour former une seule et unique boule de champagne (dont la surface est inférieure à la somme des surfaces des gouttes individuelles). C'est la mésaventure qui arrive au capitaine Haddock lorsqu'il tente de boire du whisky dans la fusée lunaire. Mais l'histoire ne s'arrête pas là car, à la différence du whisky, le champagne est sursaturé en gaz carbonique dissous qui ne demande qu'à s'en échapper. Or, à moins de faire cette expérience dans une capsule spatiale équipée d'une salle blanche, l'air ambiant n'est pas exempt de microscopiques particules en suspension. Si nos gouttes de champagne entraient en contact avec ces particules, qui joueraient inévitablement leur rôle de site de nucléation, des bulles de gaz carbonique seraient générées à la surface du champagne qui donnerait alors l'impression d'entrer véritablement en ébullition. Il y a fort à parier que l'expérience serait du plus bel effet ! ●

contraires, ces molécules tensioactives se placent préférentiellement sur une interface gaz/liquide, par un processus nommé « adsorption », la partie hydrophile étant au contact du liquide et la partie hydrophobe tournée vers le gaz.

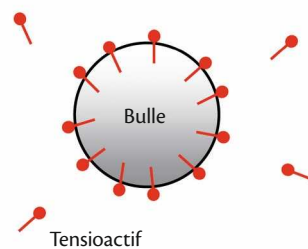
La surface d'une bulle de champagne va dès lors se comporter comme un véritable piège pour les molécules tensioactives qui vont progressivement venir s'y accrocher au cours de l'ascension. Les tensioactifs adsorbés vont former une sorte de bouclier, ou de coquille, à la surface de la bulle (figure 61). Du point de vue de la mécanique des fluides, ce bouclier tensioactif rigidifie la surface de la bulle et modifie l'écoulement du liquide autour d'elle. Lorsqu'elle est complètement recouverte par ces molécules tensioactives, la surface de la bulle se comporte alors comme une paroi rigide par rapport à l'écoulement du fluide environnant, ce qui a pour effet d'augmenter le frottement du fluide et de diminuer la vitesse d'ascension de la bulle. On dit que la bulle a perdu sa mobilité interfaciale (l'effet de lubrification autour de la bulle est annulé). Ce phénomène a été compris et analysé dans les années 1960 par l'illustre physico-chimiste russe Benjamin Levich.

Le coefficient de frottement d'une bulle de champagne

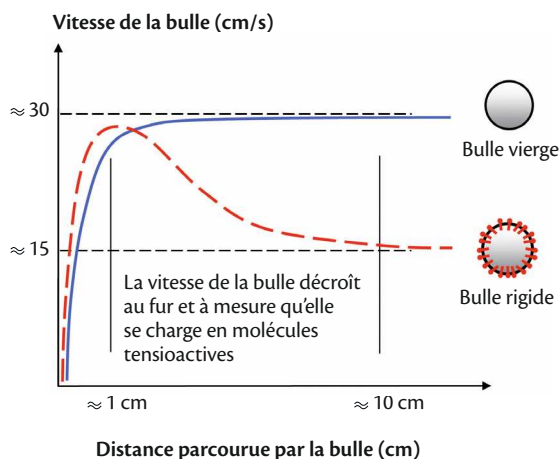
De façon très générale, lorsqu'un liquide s'écoule autour d'un objet, les molécules du liquide frottent sur la surface de l'objet en mouvement. L'objet est donc soumis à un coefficient de frottement d'autant plus élevé que ce frottement est intense. Une bulle ne déroge pas à la règle. Elle est soumise au frottement du liquide au sein duquel elle se fraie un chemin pour rejoindre la surface. Ce frottement du fluide sur la « peau » de la bulle est caractérisé par un coefficient de frottement (c'est en quelque sorte l'équivalent du « C_x » des voitures que les ingénieurs cherchent à réduire



60. Représentation schématique d'un tensioactif. La partie hydrophile se place préférentiellement au contact du liquide, alors que la partie hydrophobe fuit le liquide pour se placer au contact du gaz.



61. Les bulles sont de véritables pièges pour les molécules tensioactives du champagne qui viennent progressivement s'y accrocher en cours d'ascension, formant ainsi une véritable « carapace » susceptible de freiner les bulles tout au long de leur trajet vers la surface.



62. Évolution, avec la distance parcourue, de la vitesse d'une bulle dans de l'eau pure (courbe en trait plein bleu), puis dans une solution aqueuse de BSA à 10 milligrammes par litre (courbe en pointillé rouge).

pour diminuer la force de freinage exercée par l'air sur le véhicule).

Plus les tensioactifs adsorbés à la surface d'une bulle sont nombreux, plus le frottement exercé sur la bulle est important. Dans sa thèse de doctorat, le physicien Christophe Ybert a étudié l'influence d'une protéine (l'albumine de sérum bovin, plus communément appelée BSA) sur la vitesse d'ascension de bulles millimétriques dans de l'eau. La figure 62 compare, en fonction de la distance parcourue, l'évolution de la vitesse d'une bulle de 1 millimètre de diamètre dans de l'eau pure et dans une solution aqueuse de BSA à 10 milligrammes par litre. Après une première phase d'accélération, la vitesse de la bulle dans l'eau pure se stabilise à une valeur constante d'environ 30 centimètres par seconde. En présence de BSA, la situation est très différente. Après la première phase d'accélération, la vitesse de la bulle décroît avec la distance parcourue, au lieu de se stabiliser comme dans le cas de l'eau pure. Au bout d'une dizaine de centimètres d'ascension, la vitesse de la bulle finit néanmoins par se stabiliser à une valeur de l'ordre de 15 centimètres par seconde. La vitesse de la bulle a donc été divisée par deux ! Ce ralentissement progressif de la bulle est logiquement attribué à une augmentation de la force de frottement liée à

la collecte de protéines pendant l'ascension. L'état final coïncidant à la vitesse minimale correspond au stade ultime, à savoir la surface rigide, lorsque la surface de la bulle est entièrement tapissée de molécules tensioactives.

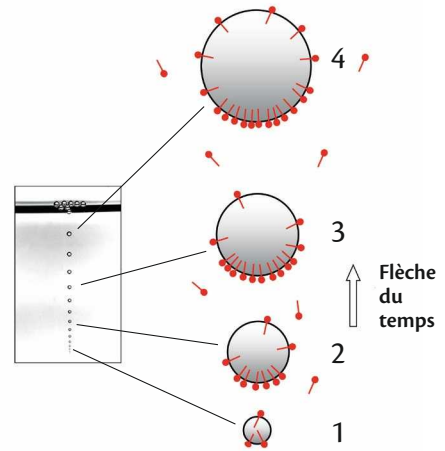
Des bulles qui se défendent...

Le cas d'une bulle qui monte en grossissant dans une boisson sursaturée en gaz carbonique dissous est néanmoins un peu plus complexe que celui d'une bulle de taille fixe qui monte dans un liquide exempt de gaz dissous. En effet, contrairement au cas d'une bulle de taille fixe dont la surface se trouve progressivement et inexorablement envahie par les molécules tensioactives du milieu, la bulle de champagne ne se laisse pas faire... Elle « lutte » contre cet envahissement en grossissant. Dans la mesure où une bulle de champagne ne cesse de croître au cours de son ascension dans le liquide sursaturé en gaz carbonique dissous, son interface avec le milieu augmente continûment, offrant ainsi aux tensioactifs une surface toujours plus importante à coloniser. Elle se défend contre l'envahisseur, en quelque sorte (figure 63, page suivante). En définitive, si l'accroissement de la surface des bulles dépasse le taux de recouvrement de tensioactifs, on assistera à une dilution

progressive des tensioactifs à la surface des bulles. Dans le cas contraire, la surface de la bulle se fera progressivement et inexorablement envahir par les tensioactifs. Qu'en est-il des bulles de champagne et des bulles de bière ? Qui l'emporte finalement de l'envahissement ou de la dilution ?

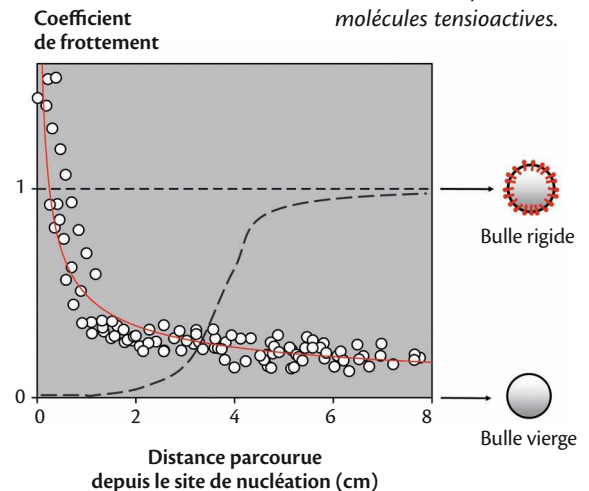
Bulles de champagne et bulles de bière

Avant d'entreprendre mes propres expériences sur le sujet, un article sur les bulles de bière publié dans la revue *Physics Today* en octobre 1991 m'avait interpellé. Deux chimistes américains de l'Université de Stanford, Neil Shafer et Richard Zare, décrivaient les résultats d'une observation qu'ils avaient effectuée sur l'ascension de bulles dans un verre de bière. Shafer et Zare y rapportaient que le déplacement des bulles était identique à celui de sphères rigides, ce qui donnait à penser que leur surface était entièrement tapissée de tensioactifs. La composition du champagne étant sensiblement différente de celle de la bière, rien n'assurait que les conclusions de cet article s'appliquaient aux bulles présentes dans le champagne et les autres vins effervescents. En mesurant les coefficients de frottement exercés respectivement sur les bulles de champagne et les bulles de bière, je découvris que les bulles de bière devenaient effectivement rigides au cours de leur ascension vers la surface, preuve qu'elles étaient totalement tapissées de molécules tensioactives. Par contre, les bulles du champagne et celles des vins mousseux me racontèrent, quant à elles, une tout autre histoire. En mesurant le coefficient de frottement exercé sur les bulles de champagne tout au long de leur trajet vers la surface, je découvris que les bulles passaient progressivement de l'état rigide à l'état fluide, preuve qu'elles diluaient progressivement les molécules tensioactives adsorbées à leur surface à mesure qu'elles grossissaient (figure 64).



63. Au cours de l'ascension d'une bulle dans la flûte, on assiste à une compétition entre l'adsorption des molécules tensioactives et le grossissement de la bulle, qui offre ainsi toujours plus de surface à coloniser.

64. Le coefficient de frottement d'une bulle décroît progressivement au fur et à mesure de son ascension, preuve indirecte que l'accroissement de la surface d'une bulle l'emporte sur la vitesse d'adsorption des molécules tensioactives.



Stabilité latérale des chapelets de bulles

Si des boissons comme le champagne et la bière étaient exemptes de tout tensioactif, leurs bulles ne pourraient pas s'élever vers la surface selon la succession linéaire qui les caractérise. Dans un liquide pur, la course verticale des bulles vers la surface est très vulnérable au moindre petit déplacement latéral qui pourrait survenir. En effet, si, pour une raison quelconque liée aux inévitables turbulences qui peuvent agiter une flûte de champagne, une bulle est déviée de son cheminement en ligne droite, elle subira instantanément une force exercée par la bulle qui lui succède qui contribuera à l'écarter encore un peu plus de sa trajectoire verticale. La bulle sera alors « mise en touche » hors du chapelet de bulles, brisant ainsi par la même occasion sa belle régularité verticale.

Que se passe-t-il donc dans le cas d'un chapelet de bulles en présence de tensioactifs ? Si une petite bulle est recouverte de tensioactifs et qu'elle est soumise à une turbulence qui l'écartera légèrement de son axe, elle sera naturellement ramenée vers cet axe par une force de rappel exercée par les bulles qui l'encadrent. Cette force de rappel, directement liée au bouclier tensioactif qui tapisse les bulles, a pour conséquence de préserver la stabilité verticale des chapelets de bulles, pour le plus grand plaisir des yeux du consommateur.

On doit cette démonstration au mathématicien John Harper, professeur émérite à l'Université de Wellington, en Nouvelle-Zélande. Dans le champagne comme dans la bière, tous deux riches en tensioactifs, la trajectoire verticale des chapelets de bulles vers la surface est donc assurée (sauf si les bulles atteignent la taille critique d'environ 2 millimètres qui permettra à une instabilité de se développer dans leurs sillages les faisant alors tourbillonner, sans que les tensioactifs ne puissent être d'aucun secours...). ●

Cela ne doit finalement pas nous surprendre car, sur le plan strictement chimique, deux différences essentielles distinguent le champagne et la bière. D'une part, la bière contient beaucoup plus de tensioactifs que le champagne (de l'ordre de plusieurs centaines de milligrammes par litre alors que le champagne n'en contient que quelques milligrammes par litre). Cela s'explique par le fait que l'orge libère naturellement beaucoup plus de tensioactifs (principalement des protéines et des glycoprotéines) que ne le fait la baie de raisin. D'autre part, la quantité de gaz dissous dans le champagne est environ deux fois plus élevée que dans la bière. De ce fait, la vitesse de grossissement des bulles de bière est nettement plus faible que celle des bulles de champagne, comme on a pu le constater (figures 55, page 80). En conséquence de quoi, l'effet de « dilution » des tensioactifs en surface dû à l'expansion des bulles est beaucoup plus limité dans la bière que dans le champagne. En conclusion, il y a plus d'« envahisseurs » tensioactifs dans la bière que dans le champagne et les bulles de bière, en grossissant beaucoup moins vite, se « défendent » moins bien que celles du champagne.

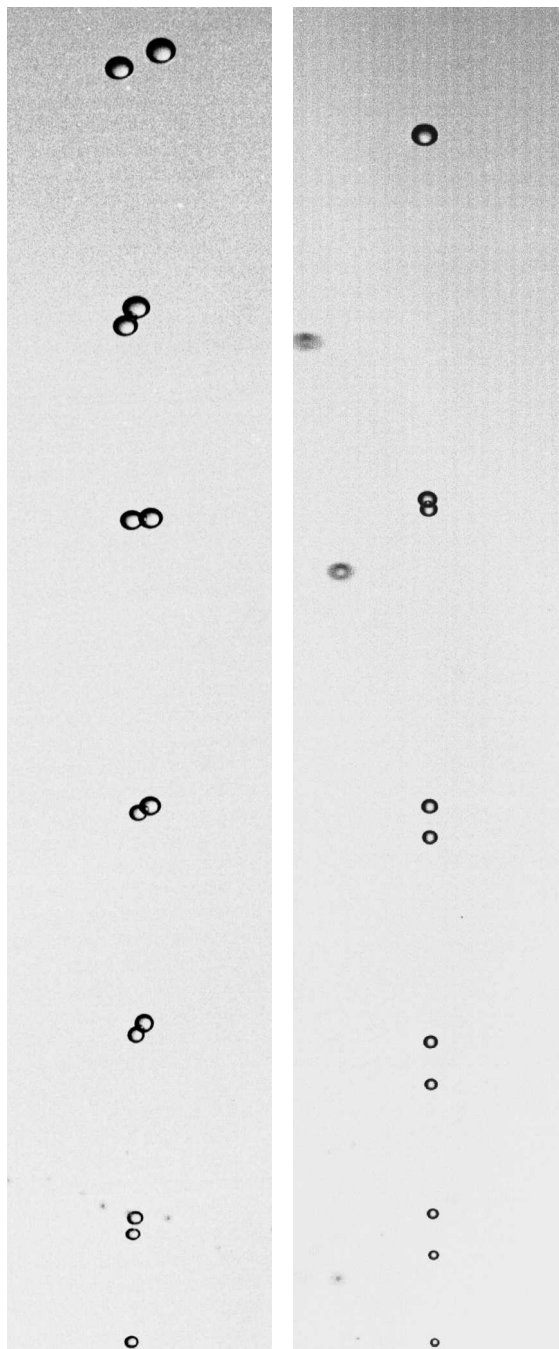
Appariement et coalescence en ligne

Les bulles émises par les sites de nucléation sont parfois très proches les unes des autres et il arrive fréquemment qu'elles se heurtent au cours de leur ascension. Dans une colonne, une bulle peut ainsi entrer en collision avec celle qui la précède. Dans le sillage d'une bulle qui monte, la pression est légèrement inférieure à celle qui règne dans le reste du liquide. Par conséquent, lorsqu'une bulle pénètre dans le sillage de celle qui la précède, elle accélère progressivement sa course, se rapproche de sa comparse et vient la heurter. Ce choc fait pivoter les deux bulles et elles poursuivent alors leur ascension côte à côte.

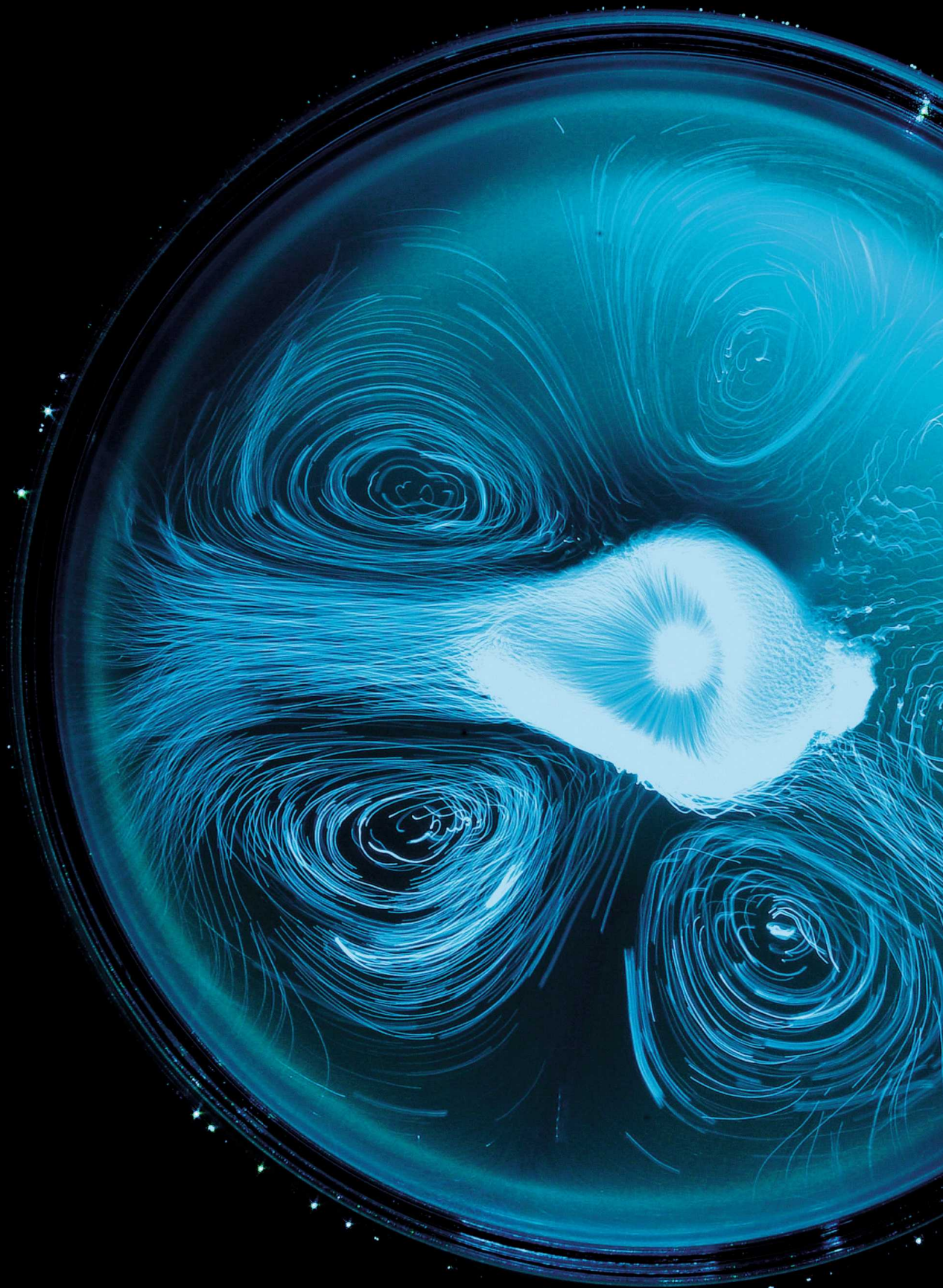
En physique des fluides, on appelle ce scénario le *drafting, kissing and tumbling scenario* (« aspiration, embrassade et culbute »). Vous pouvez observer le phénomène d'aspiration dans une course cycliste, lorsqu'un des concurrents se « colle » derrière un de ses adversaires, bénéficiant ainsi de la moindre résistance à l'air créée dans le sillage de son prédécesseur. Il peut alors maintenir la même vitesse que son rival tout en dépensant moins d'énergie. De la même manière, dans un liquide, la bulle « suiveuse » accélère son déplacement en mettant à profit le sillage de celle qui la précède.

Après la phase de contact, le *kissing*, les bulles ne s'accrochent pas toujours pour continuer leur course côte à côte. Il arrive en effet que le choc les fasse fusionner. On dit alors qu'elles coalescent « en ligne ». Le scénario dépend de la vitesse du choc, des tailles respectives des bulles et de l'étendue de leurs boucliers de tensioactifs (figure 65).

Deux bulles sont d'autant plus susceptibles de fusionner qu'elles se choquent vite et que leur surface est dépourvue de molécules tensioactives. En outre, si c'est la coalescence en ligne qui survient dans un champagne, cela aura pour conséquence directe d'augmenter la taille moyenne des bulles qui parviennent en surface. On peut donc envisager de tenter de limiter ce phénomène qu'est la coalescence en ligne afin de réduire la taille moyenne des bulles qui parviennent en surface. Pour ce faire, il faudrait enrichir le vin en macromolécules tensioactives, pour rigidifier les bulles et les rendre ainsi réfractaires à la fusion.



65. Ces deux clichés, pris dans des champagnes différents, illustrent les deux scénarios susceptibles de se produire lorsque deux bulles se heurtent : elles peuvent rebondir et poursuivre leur ascension côte à côte (à gauche), ou fusionner (à droite).





4

Tourbillons d'arômes

Pourquoi le champagne tourbillonne-t-il ?

Reprenons le fil de notre réflexion sur l'effervescence. Nous savons maintenant pourquoi et comment les bulles naissent puis montent en grossissant dans la flûte, participant ainsi au spectacle de l'effervescence qui s'offre à nos yeux. Mais nous ignorons encore tout un pan de l'histoire, car le rôle des bulles ne s'arrête pas à cet aspect strictement esthétique, et finalement subjectif, lors d'une dégustation.

Le mouvement a un sens

Lorsqu'elles migrent dans le champagne, les centaines de bulles nucléées (émises) dans le verre entraînent avec elles le liquide qui les entoure en un mouvement très structuré. En effet, comme le stipulent les lois de la mécanique des fluides, chaque bulle draine dans son sillage un peu du liquide au sein duquel elle s'élève. Puisque des centaines de bulles cohabitent au même instant dans une flûte, leur flux continu est finalement susceptible de mettre en mouvement l'ensemble du volume de champagne circonscrit dans votre verre. Les bulles assurent ainsi un brassage continu du champagne, qui s'avère absolument fondamental lors d'une dégustation. De fait, les mouvements qui agitent le champagne renouvellent en permanence sa surface en molécules aromatiques et composés volatils odoriférants. Or les lois de la diffusion nous apprennent qu'il existe une corrélation directe entre la vitesse des mouvements de convection dans un fluide sursaturé en gaz carbonique (et en molécules volatiles) et la vitesse de diffusion de ce gaz carbonique et des molécules en surface. Plus la surface du fluide est agitée de mouvements rapides, plus la diffusion du gaz carbonique et des arômes est rapide. En l'absence de mouvements de convection suscep-

Double page précédente :

66. Dans certaines conditions, et par l'emploi d'outils ad hoc, on peut observer des tourbillons énigmatiques à la surface d'une flûte de champagne.

tibles de renouveler la surface de la flûte, l'évaporation aurait vite fait d'appauvrir la couche superficielle en composés volatils odoriférants, diminuant ainsi progressivement la perception des arômes du vin.

Les courants de convection générés par l'effervescence dans un verre sont bien entendu totalement invisibles à l'œil nu. La difficulté de cette étude réside donc dans le fait de *rendre visible ce qui ne l'est pas*. Il existe une technique expérimentale qui rend possible ce petit miracle : la tomographie laser.

Comment voir le champagne en mouvement ?

Avec Guillaume Polidori, enseignant et chercheur en mécanique des fluides à l'université de Reims, nous avons ainsi réadapté des techniques expérimentales initialement développées pour l'industrie aéronautique afin de mettre en évidence les mouvements qui agitent le champagne dans une flûte. Une photographie du dispositif expérimental apparaît sur la figure 67. Une source lumineuse génère une nappe laser qui coupe la flûte dans son plan de symétrie. Afin de mettre en évidence les mouvements du champagne, il suffit de déposer délicatement quelques gouttes

67. Visualisation des écoulements tourbillonnaires dans une flûte de champagne, par tomographie laser. Cette technique nécessite l'emploi de colorants qui sont rendus fluorescents lorsqu'ils sont éclairés par une source de lumière laser.





68. La flûte de gauche a été traitée de manière à empêcher la formation de bulles. Elle ne présente aucun mouvement en son sein. La flûte de droite présente une effervescence naturelle et la tomographie permet de visualiser des mouvements de convection (détail ci-dessus).

de colorant à la surface d'une flûte. Éclairé par la lumière du laser, le colorant devient fluorescent et matérialise les mouvements du champagne agité par son effervescence.

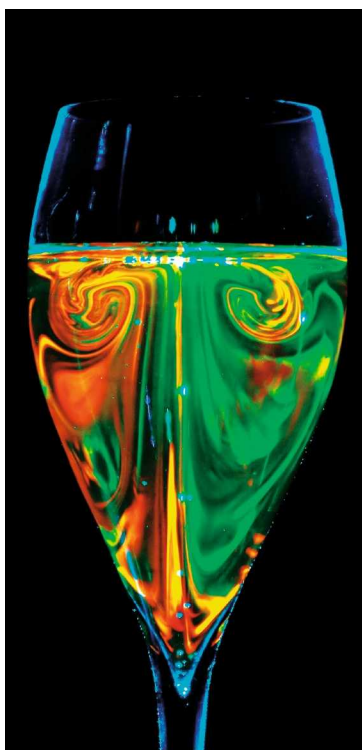
Pour matérialiser le fluide en mouvement, on peut également remplacer les colorants par de minuscules particules en matière plastique, de même densité que le fluide environnant et qui sont susceptibles de diffuser la lumière du laser. Afin de visualiser la trajectoire des particules (qui suivent strictement la trajectoire du fluide environnant), il suffit de prendre des clichés avec un temps de pause suffisamment long pour matérialiser le déplacement des particules. Les images fournies par cette technique représentent la cartographie des mouvements qui agitent le champagne (dans le plan de symétrie traversé par la nappe laser). Cette cartographie du fluide en mouvement est, telle une empreinte digitale, propre et unique aux conditions d'effervescence et à

la forme de la flûte ou de la coupe dans laquelle vous dégustez votre champagne. Sur les clichés de la figure 68, on peut voir les mouvements de convection qui existent dans deux flûtes de forme identique. L'une a été lavée à l'acide afin de ne présenter aucun site de nucléation susceptible de faire des bulles lorsque le champagne y est servi. Dans cette flûte sans bulles, les particules restent sur place, preuve que le champagne ne présente aucune agitation en son sein (à gauche). Dans la flûte susceptible de faire des bulles, les particules sont mises en mouvement par les bulles qui remontent vers la surface (à droite).

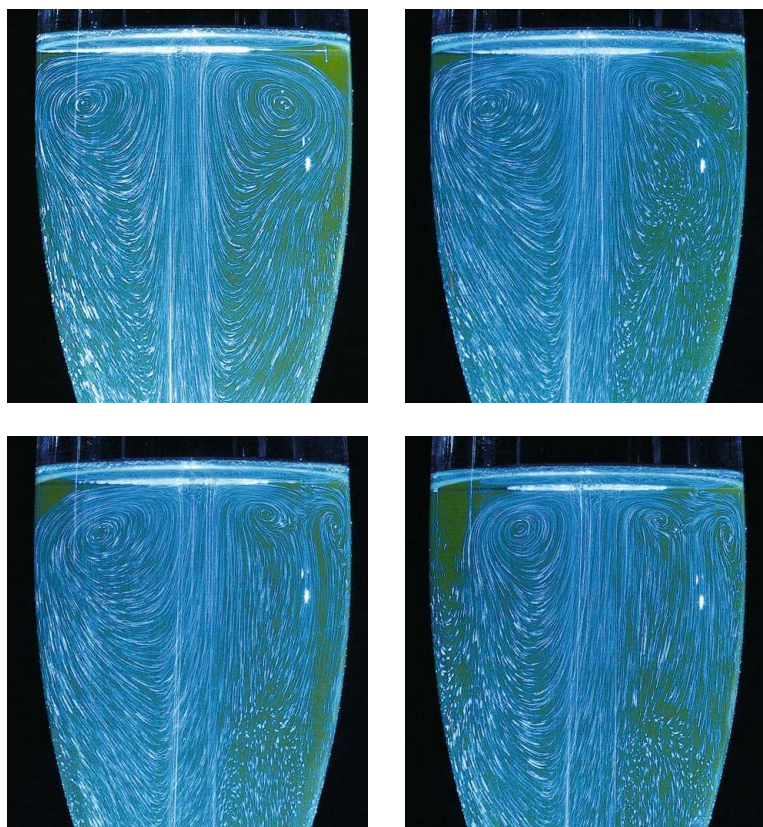
Le tourbillon des arômes : un petit bestiaire sans cesse renouvelé

Les photographies des figures 69 et 70 vous donnent un aperçu des courants de convection qui agitent le champagne lorsqu'il est servi dans des verres de tailles et de formes diverses. Comment





*Page précédente et ci-contre :
69. Que ce soit par l'emploi
de colorants ou de particules en
matière plastique, la tomographie
laser révèle la beauté et la complexité
des écoulements qui agitent
le champagne, qu'il soit servi
en flûte ou en coupe.*



70. Au sein d'une flûte, au fil du temps, un tourbillon peut parfois devenir instable et se scinder en deux petits tourbillons.

ne pas s'émerveiller devant ce spectacle, hélas invisible à l'œil nu... ? La mécanique des fluides est riche, et le jeu des tourbillons dans une flûte peut donner lieu à quantité d'événements zoologiques plus surprenants les uns que les autres. Deux tourbillons peuvent fusionner pour ne plus en faire qu'un (comme pour les bulles, on dit alors qu'ils coalescent). À l'inverse, un tourbillon peut se scinder en deux, comme sur la séquence de la figure 70.

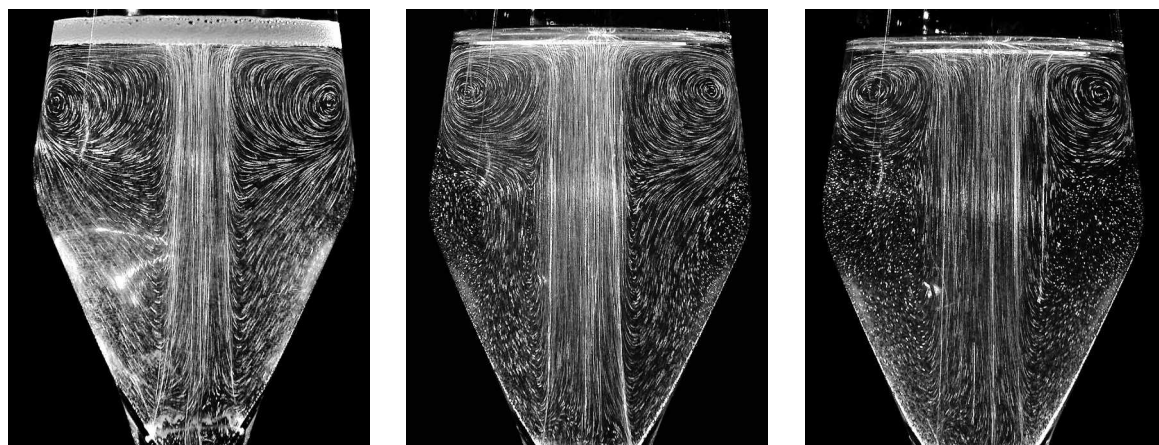
Nous avons passé des heures à examiner chaque cliché afin de traquer le jeu des tourbillons. Comme vous pouvez le constater, la science offre des satisfactions esthétiques insoupçonnées. Nous sommes bien loin de l'image d'Épinal des chercheurs qui remplissent un tableau d'équations rébarbatives (ça peut arriver, bien sûr, mais l'observation attentive prime largement dans nos

disciplines expérimentales). L'émerveillement devant la beauté des phénomènes naturels fait partie intégrante des satisfactions qu'offre le métier de chercheur.

L'effervescence s'épuise. les tourbillons aussi...

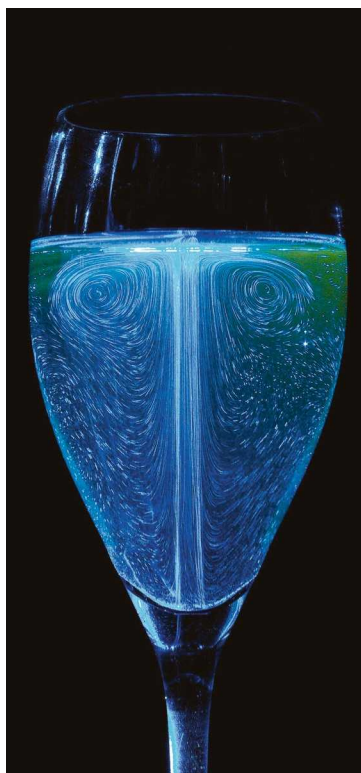
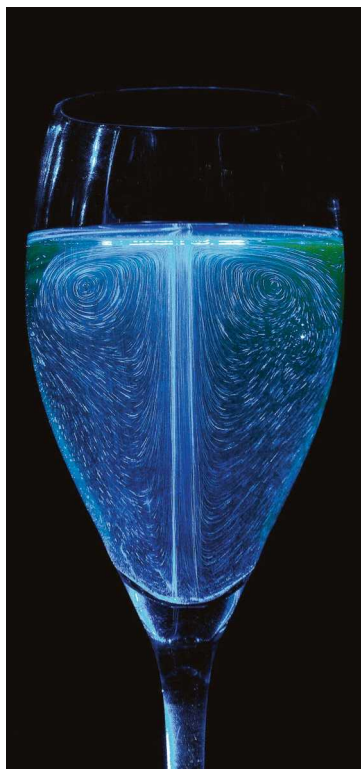
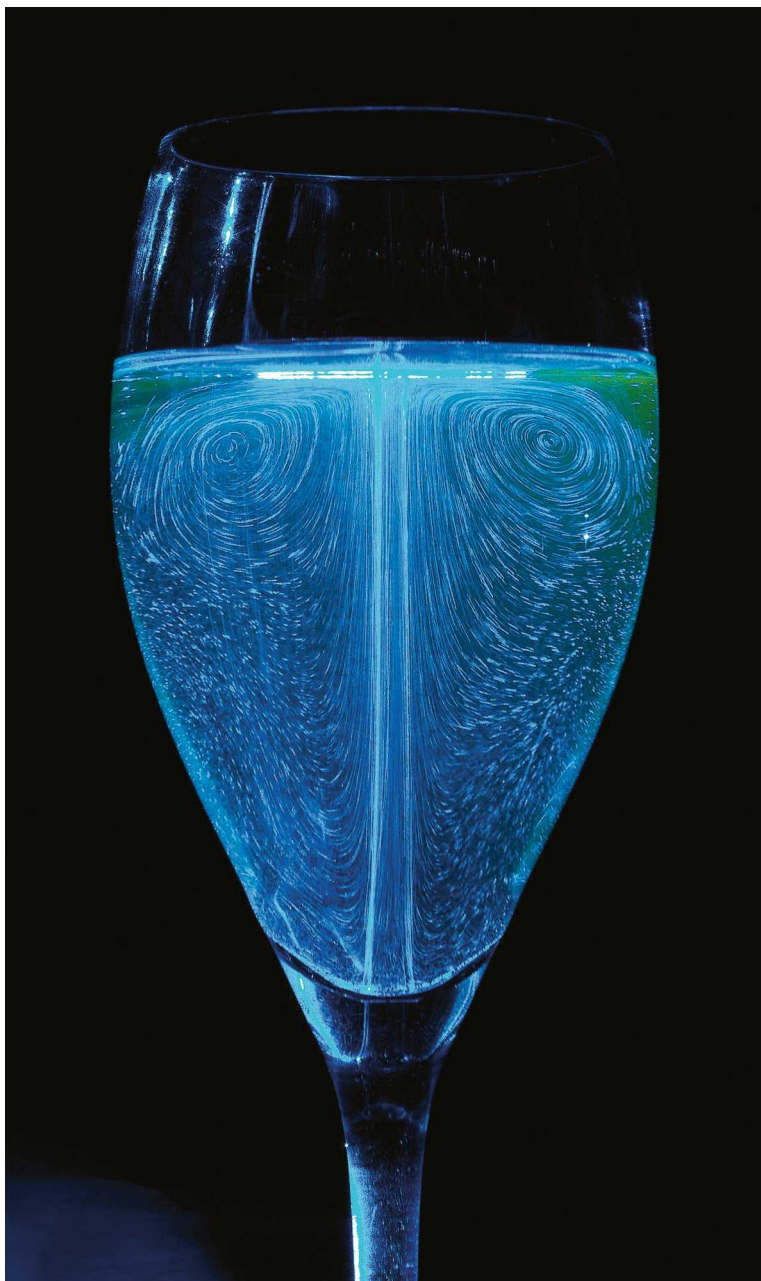
Dans une flûte, l'effervescence devient de moins en moins intense et les bulles s'affinent au cours du temps. Le « moteur » du processus de brassage s'amenuise donc inexorablement au cours d'une dégustation. On peut alors assister à des modifications de l'écoulement en cours de dégustation. Les trois photographies de la figure 71, page suivante, illustrent notre propos. Ces images ont été prises, respectivement, deux minutes (à gauche), quinze minutes (au centre), puis vingt minutes après le versement du champagne dans

une flûte gravée (à droite). On constate que, vingt minutes après le versement, l'effervescence n'a plus l'énergie suffisante pour mettre en mouvement l'ensemble du volume de champagne, comme c'était le cas en début de dégustation. On retrouve bien l'anneau tourbillonnaire torique en surface mais, quelques centimètres plus bas, le calme règne. C'est près de la moitié du volume de champagne qui est littéralement coupée de la surface et qui, de fait, ne participera plus aux échanges gazeux.



Dans le cas de la flûte que nous venons d'évoquer, l'écoulement ne parvient plus à brasser l'ensemble du champagne au bout d'une vingtaine de minutes, mais ça n'est pas le cas de toutes les flûtes. Les trois clichés de la figure 72 illustrent l'allure des courants de convection dans le cas d'une flûte de forme différente. On constate qu'au cours des trente minutes qui suivent le versement du champagne dans cette flûte, les courants de convection permettent au champagne d'être brassé de façon homogène dans l'ensemble du volume de la flûte. La forme du verre dans lequel on déguste le champagne a donc aussi un impact sur la façon dont le champagne tourbillonne en son sein.

71. La même flûte a été photographiée respectivement 2 minutes (à gauche), 10 minutes (au centre), puis 20 minutes (à droite) après que du champagne y a été servi. Au fil du temps, les tourbillons se concentrent progressivement au niveau de la surface de la flûte.



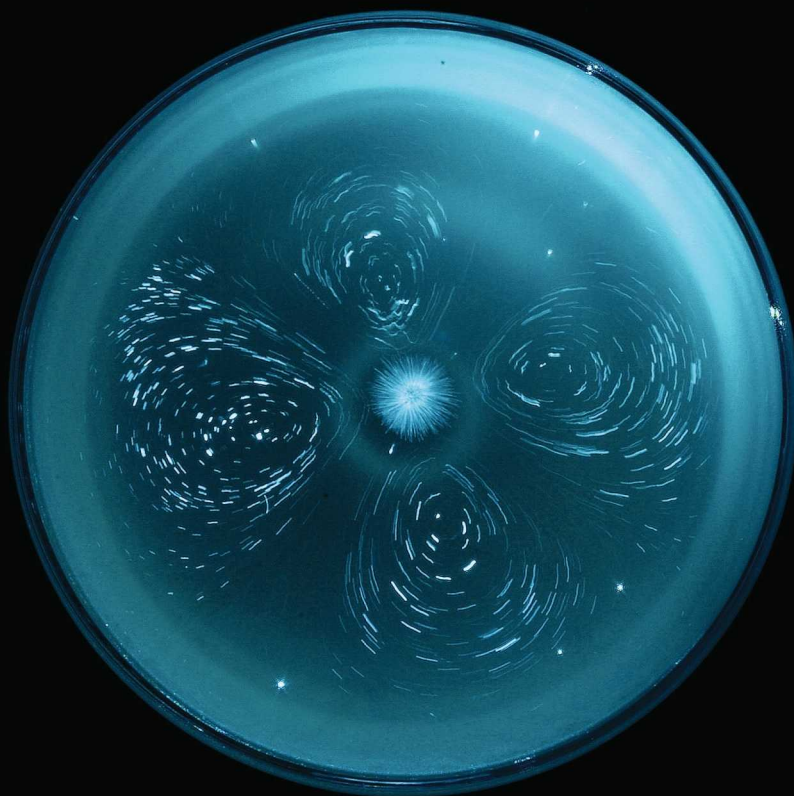
72. Cette flûte, différente de la précédente, a également été photographiée 2 minutes (à gauche), 15 minutes (en haut, à droite), puis 30 minutes (en bas, à droite) après que du champagne y a été servi. Même au bout de 30 minutes, les tourbillons sont susceptibles d'agiter le champagne sur toute la hauteur de la flûte.

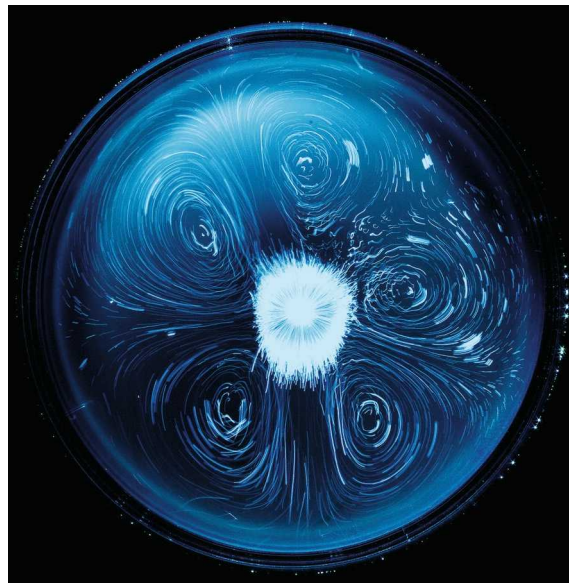
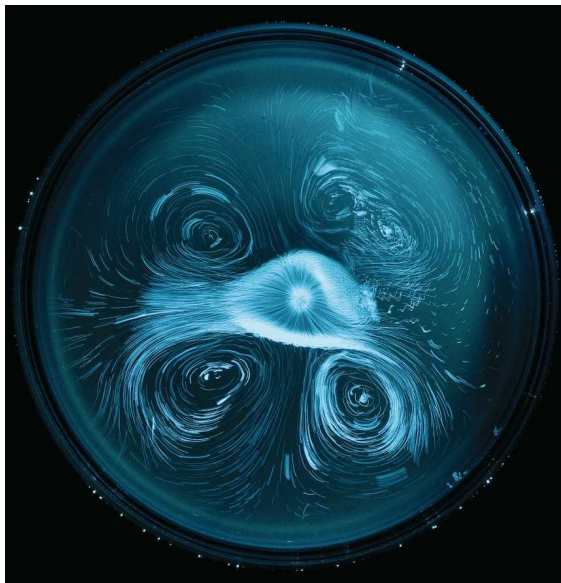
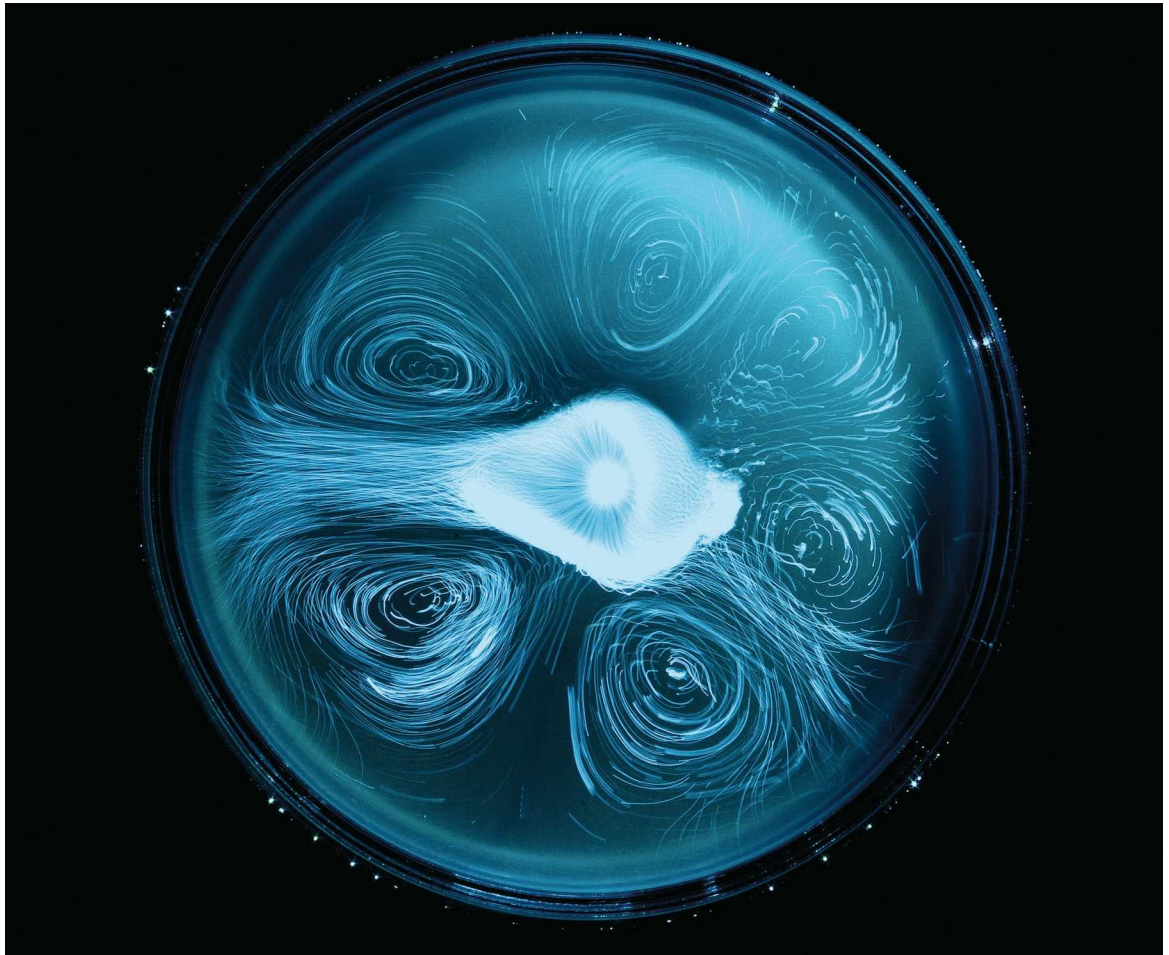
En surface, le champagne tourbillonne aussi...

La tomographie laser nous a dévoilé le jeu des tourbillons qui agitent le cœur du champagne, accélérant ainsi l'échappement du gaz carbonique et la libération des arômes du champagne. Mais la mécanique des fluides est parfois facétieuse et, à la surface du champagne, une autre surprise nous attendait.

En orientant le plan laser parallèlement à la surface du champagne, en incidence rasante, la lumière du laser révèle des cellules tourbillonnaires, régulièrement réparties autour de l'axe central (clichés des figures 73 et 74). Le scénario de ce phénomène complexe et inattendu n'est pas encore élucidé, mais les bulles et leur mouvement en sont la cause, bien entendu.

73. Grâce à l'emploi de la tomographie laser, le spectacle continue ! De puissants tourbillons, tout aussi invisibles à l'œil nu que ceux présents au cœur du champagne, agitent sa surface.

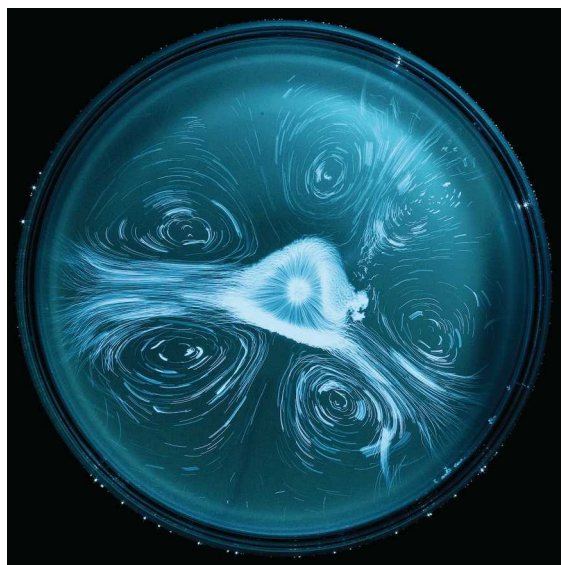
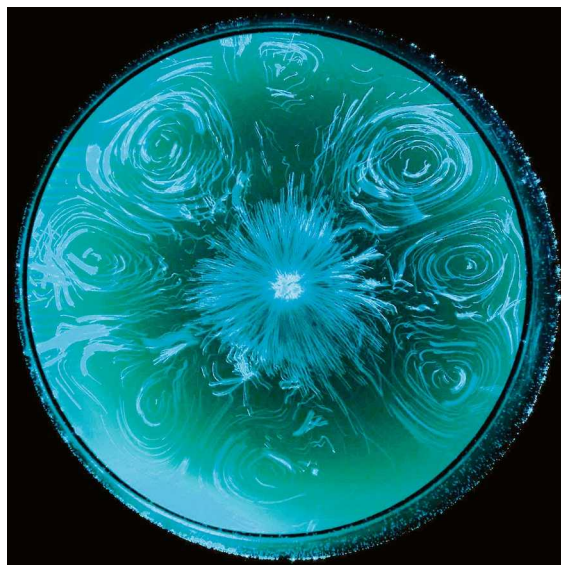




Lorsqu'elles arrivent en surface, sous l'effet de la poussée d'Archimède, les bulles drainent avec elles un peu de liquide. Lorsqu'il parvient en surface, ce fluide en excès migre inévitablement du centre de la flûte vers sa périphérie. Lorsqu'il a rejoint la paroi, le fluide de la surface n'a pas l'énergie suffisante pour replonger. Or, puisque le mouvement est entretenu par les bulles qui ramènent continûment du fluide en surface, le liquide incapable de replonger en périphérie doit bien aller quelque part... Il va donc réorienter sa course en longeant la paroi de la flûte. Inévitablement, il va rencontrer sur son chemin du fluide de surface qui aura connu exactement le même destin. Cette rencontre va réorienter le courant de fluide de la paroi vers le centre de la flûte, et ainsi de suite...

Par conséquent, le champagne de la surface s'organise spontanément en cellules tourbillonnaires, qui tournent en sens inverse les unes des autres (exactement comme un système d'engrenages). Le nombre de cellules tourbillonnaires est donc nécessairement pair, et varie probablement selon l'intensité du flux ascendant de bulles au centre de la flûte ou de la coupe. Nous avons pu remarquer que, lorsque le flux de bulles est encore très intense (juste après le versement), le nombre de tourbillons est très instable et semble « hésiter » entre un réseau de quatre, six, voire huit cellules (clichés de la figure 74). À la surface aussi, les tourbillons peuvent tantôt s'entre-dévorer, tantôt se scinder en deux.

Une fois encore, les outils de la mécanique des fluides mettent au jour des phénomènes d'une grande beauté, invisibles à l'œil nu, et qui se jouent juste sous votre nez lorsque vous portez le champagne aux lèvres. La science et ses mystères s'invitent parfois là où on s'y attend le moins...



74. En surface, le nombre de tourbillons est toujours pair. Peu après le service du champagne, ce nombre varie, semble-t-il, entre six et huit. Puis le réseau se stabilise généralement autour de quatre cellules tourbillonnaires.







5

Éclatement d'une bulle

Quelle destinée pour une bulle de champagne ?

Les bulles rejoignent la surface peu après leur naissance sur les parois de la coupe ou de la flûte. Mais elles sont par essence éphémères, et leur fin de vie approche. La prochaine fois que vous dégusterez du champagne, approchez la flûte de votre oreille. Vous pourrez entendre très distinctement le bruit fait par les bulles qui éclatent de concert. C'est leur chant du cygne, en quelque sorte, qui provoque ce chuintement si caractéristique...

Avant de disparaître, certaines auront néanmoins le temps de se regrouper et de migrer vers les parois de la coupe ou de la flûte pour nourrir le fin cordon de bulles – l'indispensable « collerette » (figure 76). Après avoir assisté à leur gestation dans le ventre d'une fibre de cellulose, puis à leur ascension dans la flûte, nous vous proposons d'être les témoins privilégiés de leur dernier souffle, et quel dernier souffle !

Forme d'une bulle en surface

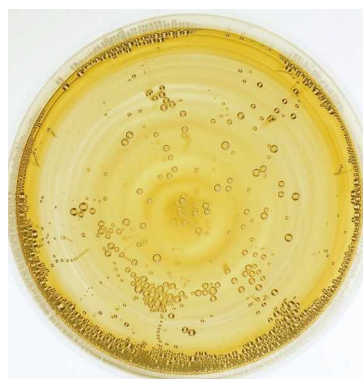
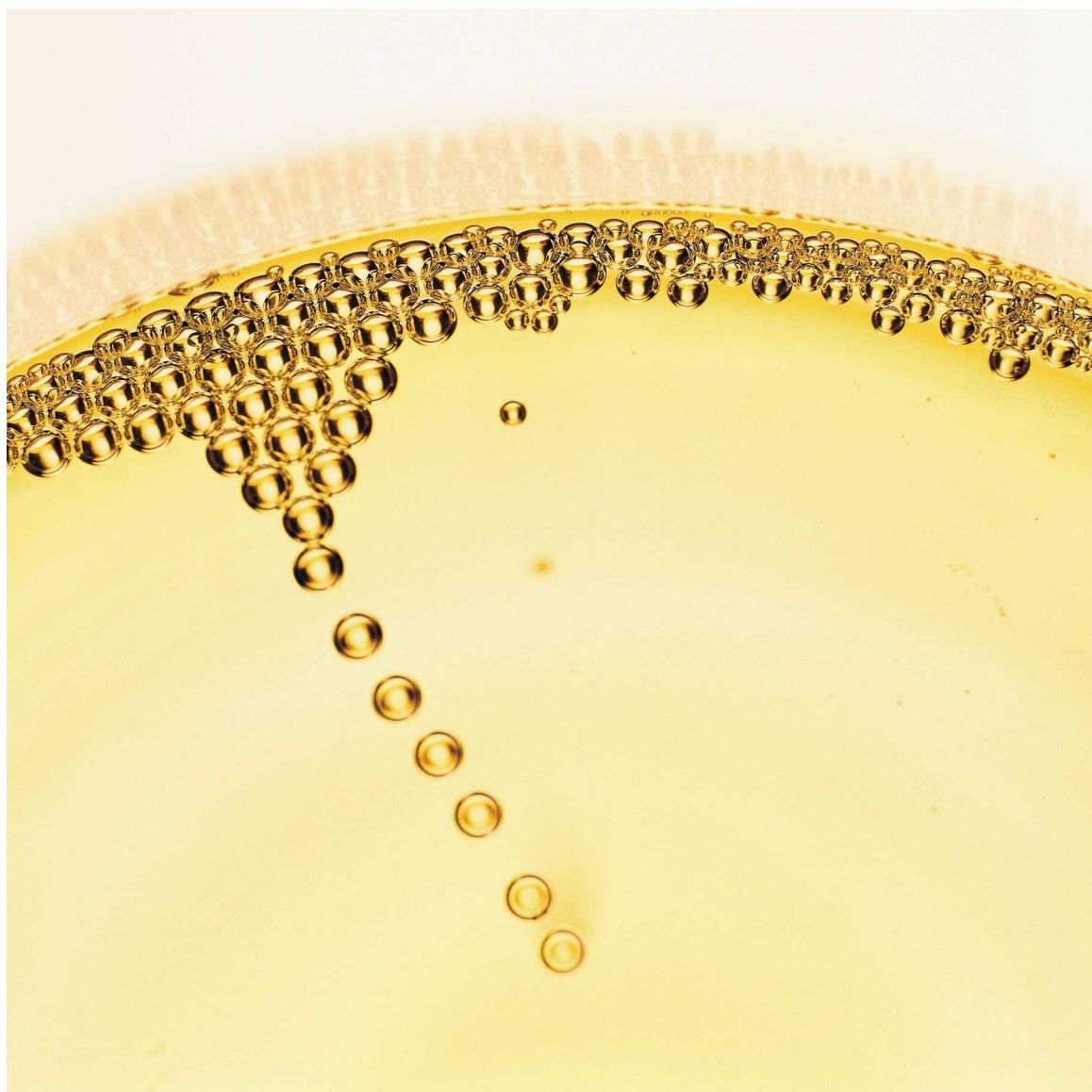
La forme d'une bulle à la surface du champagne résulte d'un équilibre entre, d'une part, la pression dans le film liquide intercalé entre le gaz carbonique de la bulle et l'atmosphère et, d'autre part, la poussée d'Archimède qui tend à faire émerger la bulle.

Dans un bain moussant, les grosses bulles de savon sont de forme hémisphérique, la demi-sphère émergeant en totalité. À la différence de celles-ci, les bulles du champagne et des vins effervescents sont trop petites (leur diamètre est presque toujours inférieur au millimètre) pour que la poussée d'Archimède qu'elles subissent suffise à les faire émerger. L'essentiel du volume de la bulle reste sous la surface. À la manière d'un minuscule iceberg, une bulle n'émerge que très peu. Seule une infime partie affleure en sur-

Double page précédente :

75. Collerette de bulles à la surface d'une flûte de champagne.

Page de droite : 76. On observant attentivement la surface d'une flûte de champagne, on peut voir les bulles migrer du centre vers la périphérie, où elles s'accumulent pour former la collerette.



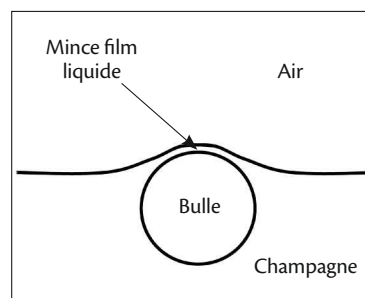


face, l'essentiel de son volume restant immergé (figure 78), ce qui aura des conséquences sur la façon dont la bulle éclate. On se rend mieux compte de cette propriété en observant la surface d'une flûte de champagne par-dessous. La photographie de la figure 77 a été prise en contre-plongée, ce qui permet de constater que les bulles restent essentiellement sphériques et « coincées » sous la surface en raison de leur petite taille.

La partie émergée de la bulle est séparée de l'atmosphère par un très mince film liquide qui prend la forme d'une portion de calotte sphérique. Sous l'action conjuguée de la poussée d'Archimède et de la pression capillaire, ce film, qui constitue la partie émergée de la bulle, s'amincit à mesure que le liquide s'écoule dans l'« océan » de champagne que représente le verre. C'est la phase dite de « drainage ». Le film finit par atteindre une épaisseur critique en deçà de laquelle, devenant trop fin, trop fragile et trop vulnérable aux vibrations et aux infimes variations de température, il se rompt. Son épaisseur est alors de l'ordre de 100 nanomètres (soit 0,1 micromètre ou 1/10 000 de millimètre). Schématiquement, il en va de même avec la paroi d'un ballon de baudruche qui s'amenuise de plus en plus à mesure que celui-ci est gonflé, pour finir par éclater.

En 1959, deux physiciens, Geoffrey Taylor, de l'Université de Cambridge au Royaume-Uni, et Fred Culick, du California Institute of Technology en Californie, se sont penchés sur le processus de désintégration d'un film liquide (comparable à celui qui sépare la bulle de champagne de l'atmosphère). Taylor et Culick s'aperçurent qu'un minuscule orifice circulaire apparaît à l'endroit où le film est le plus mince (en son sommet donc, dans le cas d'une bulle qui affleure) et se propage à grande vitesse sous l'effet de la force dite de tension superficielle.

Page de gauche : 77. À cause de leur petite taille, généralement inférieure au millimètre, les bulles du champagne affleurent sous la surface.

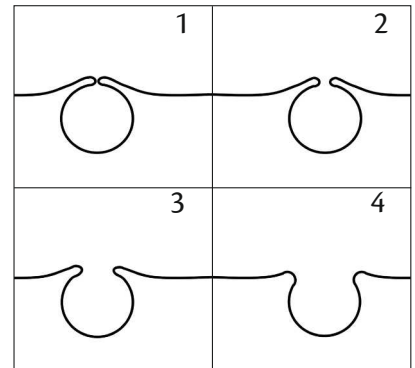


78. En surface, un très mince film de champagne sépare la bulle de l'atmosphère environnante. Comme c'est le cas pour un iceberg, seule une infime portion de la bulle émerge de la surface liquide.

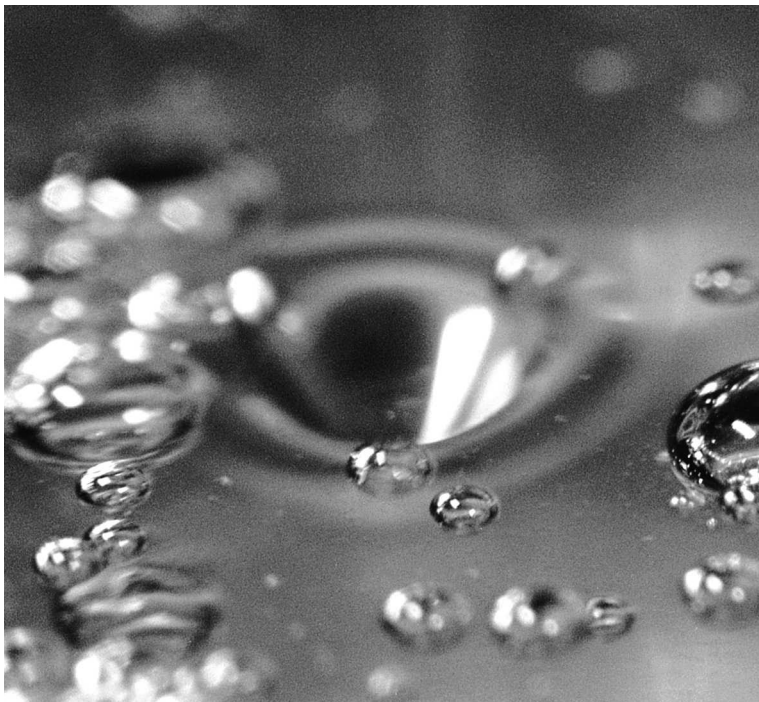
À la vitesse d'un sprint

Cet orifice se propage à la vitesse considérable d'environ 10 mètres par seconde – soit celle d'un champion du monde de sprint ! Par conséquent, compte tenu de la taille caractéristique des bulles du champagne et des vins effervescents (dont les diamètres n'excèdent pas le millimètre), le temps de disparition de cette portion de calotte sphérique n'excède pas quelques dizaines de microsecondes (1 microseconde = $1/1\,000\,000$ de seconde). Si on en croit le schéma de principe de la figure 79, il existerait à la surface d'une flûte de champagne de minuscules cavités millimétriques, qui résulteraient du processus de désintégration des films liquides séparant les bulles de l'atmosphère environnante.

Pour mettre en évidence ces cavités millimétriques, il a fallu utiliser des techniques photographiques qui empruntent à la macrophotographie haute vitesse (utilisée, par exemple, pour photographier les insectes en mouvement). La figure 80



79. Le film de liquide qui sépare une bulle de l'atmosphère s'affine, puis finit par se rompre. L'orifice s'ouvre alors à une vitesse considérable et la bulle se transforme en un minuscule trou béant à la surface du champagne.



80. Sur ce cliché haute vitesse, on aperçoit une minuscule cavité millimétrique, postérieure à la désintégration du film liquide d'une bulle en surface.

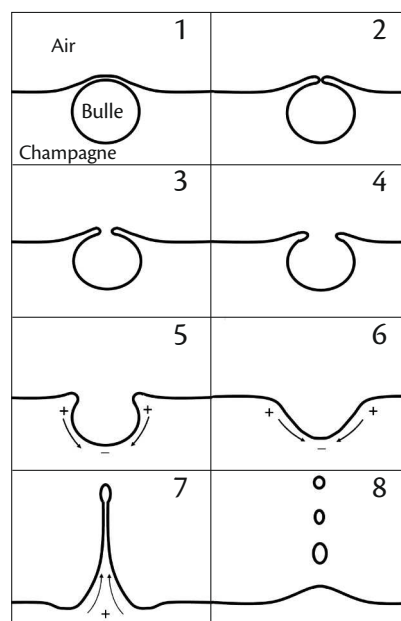
présente une prise de vue de la surface d'une flûte de champagne quelques dizaines de secondes après le versement. On distingue très bien l'une de ces cavités, figée par l'éclair du flash, cohabitant avec des bulles encore intactes qui affleurent en surface.

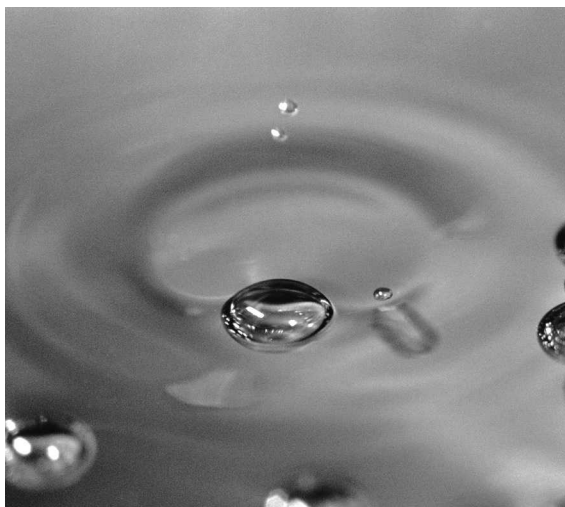
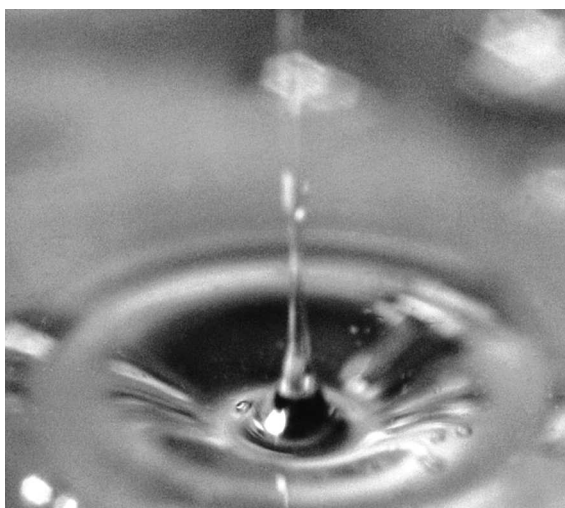
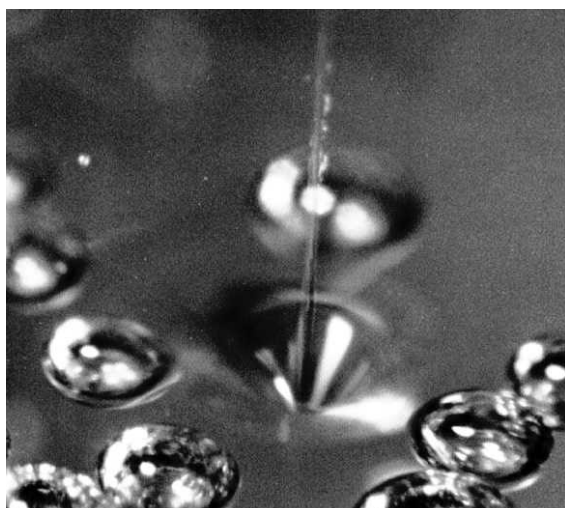
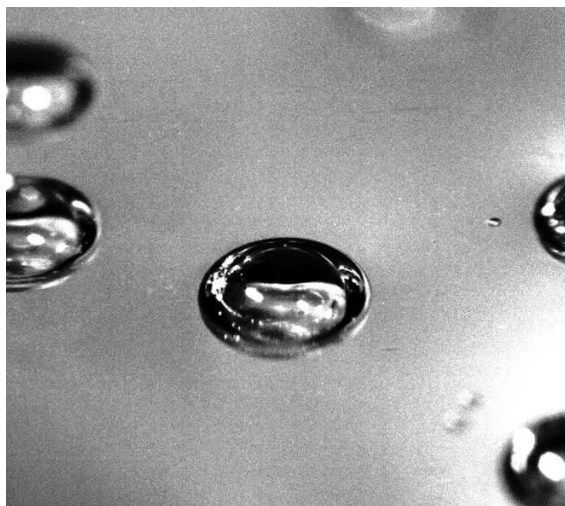
Ces cavités millimétriques, véritables crevasses liquides à la surface du champagne, ne peuvent bien entendu pas perdurer longtemps (c'est d'ailleurs la raison pour laquelle nous avons eu tant de mal à les débusquer). En effet, comme toute surface liquide qui se respecte, la surface du champagne n'aspire qu'à une seule chose : retrouver son horizontalité. Un processus hydrodynamique surprenant va alors se mettre en route afin de refermer cette cavité béante et de « cicatiser » l'interface liquide. Ce processus a été décortiqué dans ses moindres détails (figure 81).

Autopsie d'un éclatement

Nous avons pu réaliser quelques clichés du processus qui permet au fluide de retrouver une interface plane suite à la désintégration quasi instantanée de la calotte émergée d'une bulle de champagne. À l'échelle microscopique et figé par l'éclair du flash, le phénomène est saisissant ! Une séquence reconstruite détaille quelques étapes du processus (figure 82, page suivante). Entre les deux clichés du haut, le film liquide qui coiffe la partie de la bulle émergée s'est entièrement désintégré. Durant ce très bref intervalle de temps, la partie immergée de la bulle reste figée comme une plaie béante à la surface du liquide. Mais son temps est compté. En se refermant, cette cavité projette vers le haut un mince filet de liquide qui jaillit à une vitesse de l'ordre du mètre par seconde au-dessus de la surface du champagne (clichés 3 et 4). Il existe aussi, de manière symétrique, un petit jet de liquide s'enfonçant sous la surface du champagne qui peut être mis en évidence à l'aide d'un colorant. On distingue parfois, à la base

81. Schéma de principe du processus qui va permettre à la cavité millimétrique de se refermer, cicatisant ainsi la surface du champagne.





du jet de champagne, une minuscule bulle (de 100 micromètres environ) probablement piégée dans le liquide durant la désintégration de la bulle mère (cliché 4).

Ce jet de liquide qui jaillit à haute vitesse devient vite instable et se brise spontanément en gouttelettes (cliché 5). Les effets combinés de l'inertie et de la tension de surface donnent des gouttelettes de formes variées et souvent surprenantes. Quelques fractions de milliseconde plus tard, les gouttelettes éjectées par la bulle mère retrouvent une forme quasi sphérique plus conventionnelle (cliché 6). Du fait des turbulences imprimées au liquide lors de l'éclatement d'une bulle, on distingue très nettement un réseau d'ondes concentriques qui se propagent à la surface du champagne, un peu à la manière des ondes capillaires qui naissent à partir du point d'impact, lorsque vous jetez un caillou dans un étang. On notera que sur le côté droit de la bulle centrale du cliché 6, la minuscule bulle piégée lors de l'éclatement (observée au cliché 4) est encore visible. La séquence de la

Page de gauche : 82. Séquence photographique qui illustre six étapes de l'éclatement d'une bulle à la surface du champagne, de gauche à droite et de haut en bas (environ 0,5 milliseconde sépare chaque cliché).

83. Séquence vidéo qui illustre la propagation d'une onde circulaire engendrée par l'éclatement d'une bulle. Sur les trois clichés du bas, on distingue la minuscule bulle d'air piégée lors du processus (1 milliseconde sépare chaque cliché).

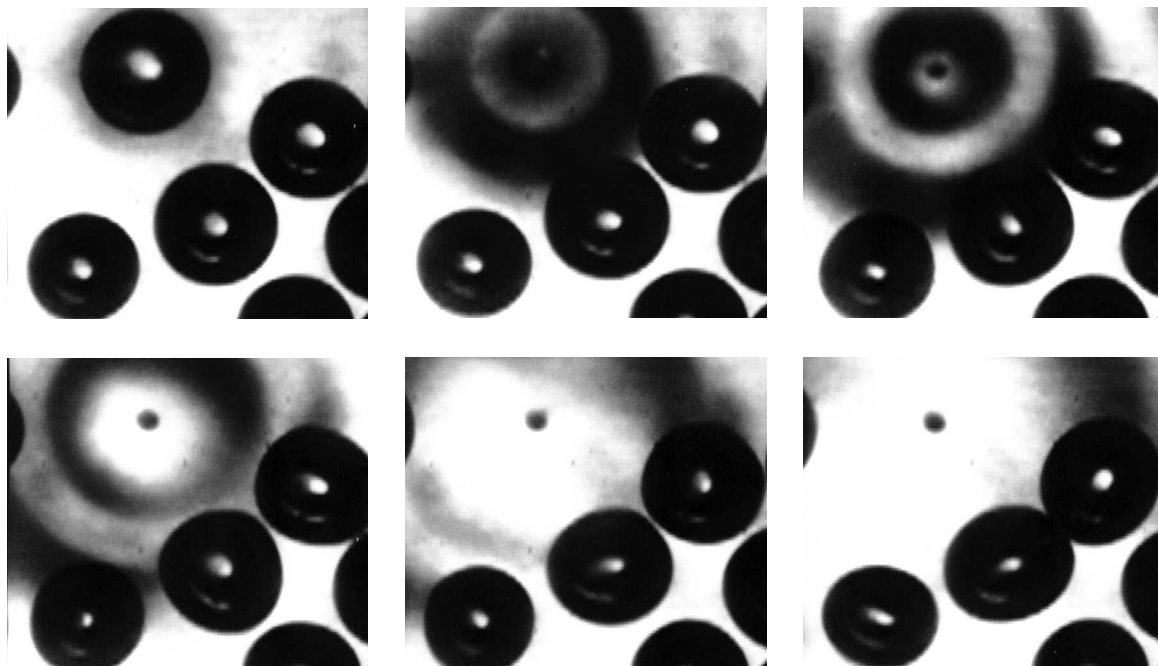


figure 83 fait apparaître la propagation du front de l'onde émise par une bulle qui éclate, ainsi que la minuscule bulle piégée au moment où la cavité se referme.

Dans le cadre de la thèse de doctorat de Laurent Duchemin, doctorant au laboratoire de modélisation en mécanique de l'université Paris-VI, des simulations numériques ont été effectuées pour essayer de mieux comprendre la formation et le jaillissement du jet postérieur à l'éclatement d'une bulle qui affleure à la surface d'un fluide. La figure 84 est le résultat d'une simulation numérique. On remarquera que cette simulation, qui utilise les équations de la mécanique des fluides, rend magnifiquement compte des phénomènes observés.

La puissance de l'instabilité de Rayleigh

Nous avons déjà rencontré l'instabilité de Rayleigh au moment de l'éjection de la bulle hors de la fibre de cellulose (figure 34, page 56). En se développant le long du jet de champagne, l'instabilité de Rayleigh est responsable de sa rupture en plusieurs petites gouttelettes (figure 85). En effet, la somme des surfaces individuelles des multiples gouttelettes étant inférieure à la surface du cylindre de liquide qui jaillit, celui-ci se brise systématiquement en gouttelettes. Chaque bulle millimétrique qui éclate à la surface du liquide donne naissance à *grosso modo* cinq gouttelettes (d'une centaine de micromètres de diamètre environ).

Notons que ce phénomène se développe moins vite dans le jet de champagne qui suit l'éclatement d'une bulle que dans le minuscule « jet » de gaz soufflé par la fibre de cellulose (pour cause de diamètre du jet), ce qui permet au cylindre de liquide de parcourir une certaine distance au-dessus de la surface du champagne et de se briser en plusieurs gouttelettes. Si tel n'était pas le cas, la bulle



84. Simulation numérique du jet liquide provoqué par l'éclatement d'une bulle (en haut), comparé avec le jet, bien réel, associé à l'éclatement d'une bulle de champagne (en bas).

de champagne, en éclatant, ne pourrait donner naissance qu'à une seule et grosse gouttelette, beaucoup plus massive, et qui jaillirait beaucoup moins haut.

C'est encore et toujours cette même instabilité qui brise en gouttelettes un mince filet d'eau qui s'écoule d'un robinet à faible débit (figure 85).

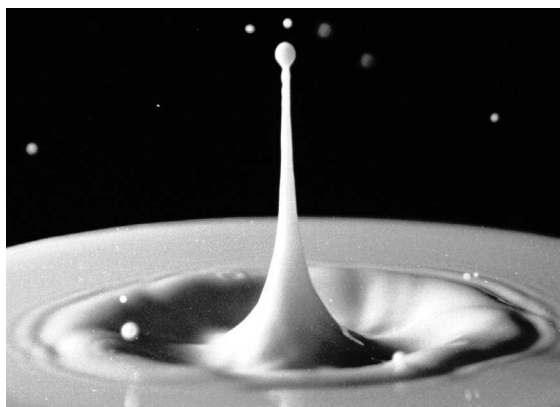
Une comparaison avec l'impact d'une goutte

Maître incontesté de la photographie instantanée au xx^e siècle, Harold Edgerton inventa et développa le flash électronique. Il popularisa sa découverte en photographiant des projectiles en plein vol, des athlètes en mouvement et – incidemment – des gouttes de liquide frappant une surface. Son cliché le plus célèbre, la « couronne » créée par l'impact d'une goutte de lait, a fait le tour du monde et est devenu le symbole du lien entre la science pure et l'art moderne. Même les studios Walt Disney se sont inspirés des photographies d'Edgerton ; les dessinateurs de Disney utilisèrent notamment l'image de la goutte de lait dans le dessin animé *Bambi* pour donner plus de vraisemblance aux gouttes de pluie tombant sur le sol.

Hervé Lemaesquier, un de mes amis et collègues de l'université de Reims, s'est inspiré des travaux d'Edgerton pour décomposer les différentes phases de l'impact d'une goutte de lait frappant la surface d'une coupelle remplie du même liquide. Le jet de liquide projeté par une bulle lors de son éclatement ressemble étrangement, en miniature, à celui qui est produit par la goutte qui tombe dans le lait et rebondit (figure 86). En dépit de différences notables en termes d'échelle, les structures hydrodynamiques observées après l'impact d'une goutte sont très semblables à celles résultant de l'éclatement d'une bulle et évoquent de minuscules tours Eiffel. Cette étrange similitude entre deux phé-



85. Gros plan sur l'instabilité de Rayleigh qui se développe le long du jet de champagne, juste avant de le fractionner en minuscules gouttelettes. À plus grande échelle, c'est le même phénomène qui brise en gouttelettes le jet qui s'écoule d'un robinet à faible débit.



86. Gros plan sur l'instant précis où une goutte de lait rebondit à la surface d'une coupelle. La structure ressemble à s'y méprendre au petit jet de champagne.

nomènes apparemment dissemblables nous conduit tout naturellement à imaginer que les forces qui les façonnent sont de même nature.

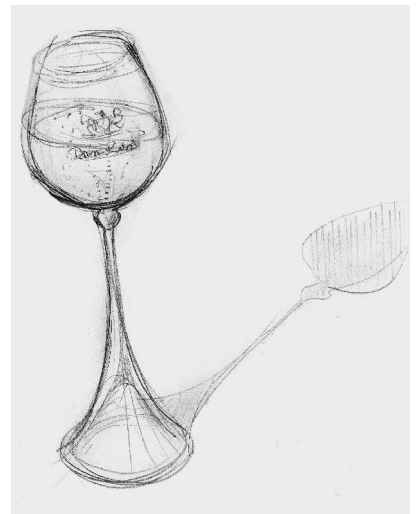
Lorsque le design s'inspire de la science...

Dans le domaine de l'infiniment grand comme dans celui de l'infiniment petit, les forces de la nature à l'œuvre façonnent souvent des structures d'une grande beauté. Les designers, toujours à l'affût de formes originales pour les objets de notre quotidien, disposent ainsi d'une source d'inspiration presque sans limites. Les courbes harmonieuses du minuscule jet de champagne, figées par l'éclair du flash, ont inspiré le designer Emmanuel Dietrich pour concevoir le pied d'une flûte destinée à la dégustation d'une cuvée de prestige (figure 87).

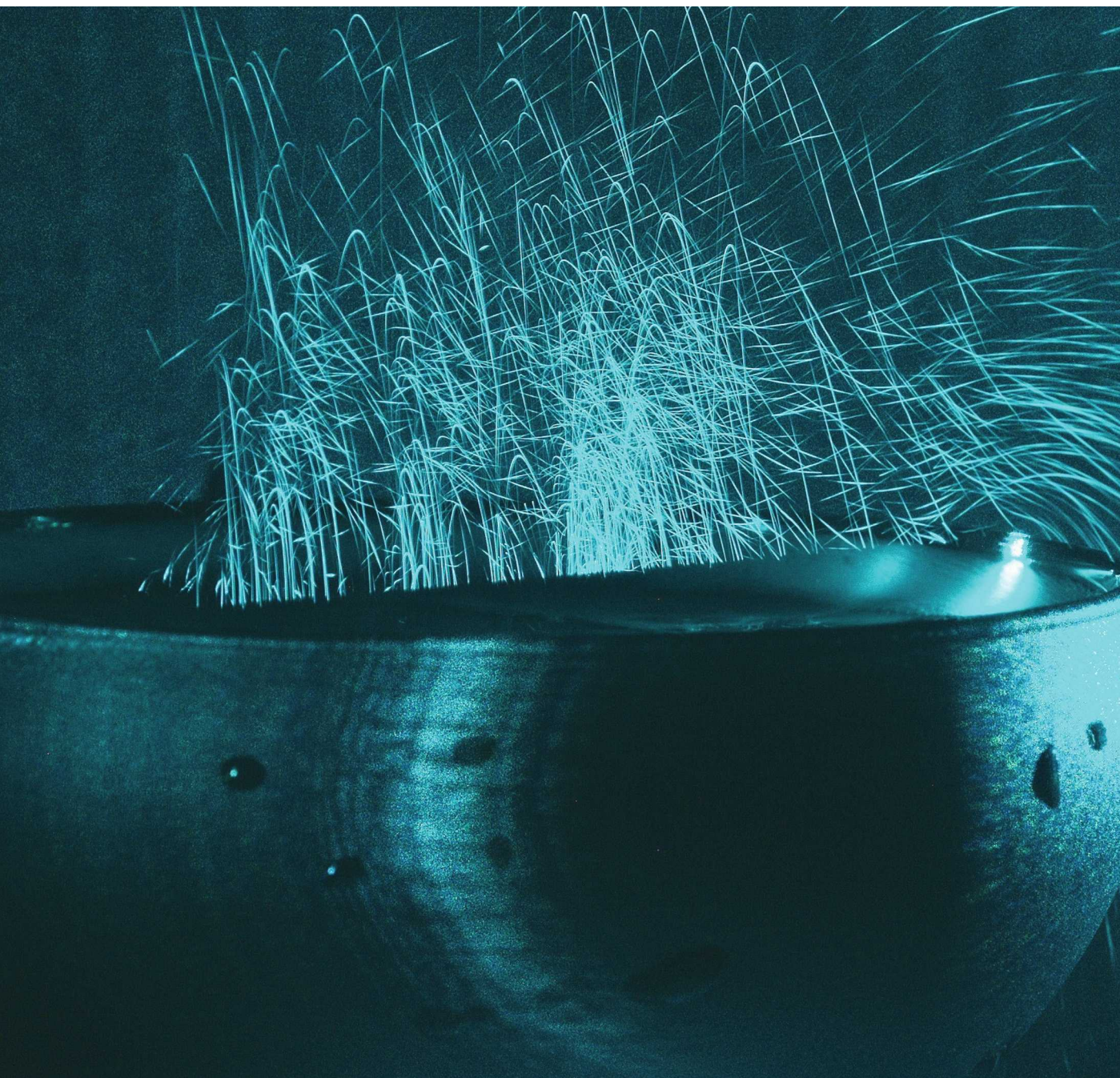
Les bulles et le gaz carbonique. ça pique...

Des centaines de bulles éclatent chaque seconde au cours des quelques minutes qui suivent le remplissage d'une flûte de champagne. La surface du liquide est alors littéralement piquetée de centaines de jets minuscules semblables à celui de la figure 87. Puisque chacun de ces minuscules jets se brise en *grosso modo* cinq gouttelettes, ce sont des centaines et parfois même des milliers de gouttelettes qui sont projetées chaque seconde, plusieurs centimètres au-dessus de la surface, sous la forme d'un aérosol de champagne qui picote et rafraîchit agréablement le visage. Peut-être l'avez-vous déjà testé ?

La photographie de la figure 88 donne une très bonne idée de l'intense activité qui règne au-dessus de la surface d'une coupe suite au ballet des bulles qui éclatent. Les gouttelettes de champagne qui traversent la nappe laser réfléchissent la lumière et deviennent visibles. Chaque filament bleuté matérialise ainsi le trajet qu'effectue une



87. La délicate et éphémère structure du jet postérieur à l'éclatement d'une bulle (en haut) a inspiré Emmanuel Dietrich, designer de renom, pour imaginer le pied d'une flûte à dégustation (en bas).



88. Cette photographie, réalisée par l'emploi de la tomographie laser, illustre la trajectoire des centaines de gouttelettes projetées au-dessus de la surface d'une coupe de champagne.

gouttelette pendant le temps de pause de l'appareil photographique. Au vu de cette image, on comprend aisément que la dégustation d'un champagne ou d'un vin effervescent puisse être radicalement différente de celle d'un vin tranquille.

Au-delà des considérations esthétiques (accessibles seulement par l'emploi de la photographie haute vitesse), ce phénomène apporte une dimension sensorielle indéniable à la dégustation du champagne et des boissons gazeuses en général. La sensation « tactile » caractéristique apportée par ce brouillard de gouttelettes constitue en effet une part importante du plaisir que l'on éprouve à le consommer. Si vous portez des lunettes et buvez une gorgée de champagne à ce moment-là, une légère buée se formera instantanément sur vos verres... Les gouttelettes de liquide projetées par les éclatements de bulles quelques centimètres au-dessus de la surface permettent de stimuler mécaniquement les nocicepteurs (récepteurs de la douleur) situés dans votre nez. Ils sont concernés au premier chef durant votre dégustation, tout comme les récepteurs de la douleur situés dans la bouche et le palais lorsque les bulles éclatent sur votre langue. Cette stimulation mécanique qui accompagne l'éclatement des bulles sur votre langue et votre palais contribue à la sensation de piqure très caractéristique qui accompagne la dégustation d'un champagne (ou d'une boisson gazeuse en général). Ces piqures mécaniques, liées aux modifications de la pression exercée sur les muqueuses du palais et de la langue lors du pétilllement, sont véhiculées par le nerf trijumeau. Ce nerf se subdivise en trois branches innervant entièrement les muqueuses de la face, l'une dans la cavité buccale, une autre dans la région nasale et la dernière au niveau oculaire. C'est pourquoi lorsque nous consommons certains aliments (comme la moutarde ou le piment), la sensation

de picotement remonte de la bouche vers le nez ou les yeux. Cette sensation de piqure est naturellement d'autant plus marquée que le champagne est effervescent (donc riche en gaz carbonique dissous). C'est la raison pour laquelle les vieux champagnes, moins riches en gaz carbonique dissous suite aux fuites de CO_2 via le bouchon poreux, vous apparaissent aussi beaucoup moins « vifs » que les champagnes jeunes. Mais ce n'est pas l'unique raison (voir ci-contre)...

L'effervescence libère des arômes

Outre ces deux stimulations, mécanique et chimique, liées aux éclatements de bulles et à la présence de gaz carbonique dissous, il semblerait que l'éclatement des bulles en surface joue un rôle majeur dans la libération des arômes.

Nous avons vu au chapitre précédent comment les bulles qui montent et grossissent dans le champagne parviennent à se charger progressivement en molécules tensioactives, qui s'accrochent à leur paroi en plongeant leur partie hydrophile dans la phase aqueuse et en plaçant au contraire leur partie hydrophobe vers le gaz de la bulle. Les bulles constituent donc autant de mini-« ascenseurs » pour les molécules tensioactives qui vont ainsi venir s'y adsorber au cours de l'ascension. Or beaucoup des composés aromatiques présents dans le champagne, et dans les vins effervescents au sens large, présentent des propriétés plus ou moins tensioactives. Suite au ballet incessant des bulles vers la surface, on s'attend donc à ce que les molécules tensioactives (et pour certaines potentiellement aromatiques) enrichissent la pellicule liquide à la surface du champagne et s'y concentrent progressivement.

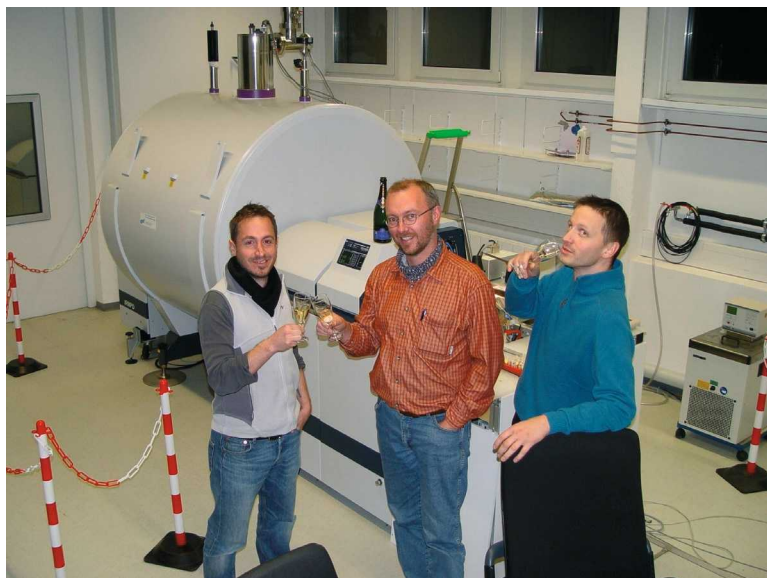
Puisque les bulles qui éclatent provoquent la mise en suspension d'un brouillard de fines gouttelettes issues de la couche superficielle du champagne, nous avons donc toutes les raisons de penser que les gouttelettes devaient être plus

La piqure chimique de l'effervescence

Dans votre bouche, en plus de l'action mécanique liée aux bulles qui éclatent, le CO_2 exerce une piqure « chimique », totalement indépendante de l'éclatement des bulles. C'est la découverte fascinante que l'on doit au professeur Charles Zuker et à ses collègues de l'Université Columbia à New York, qui ont mené une série d'expériences d'électrophysiologie et de manipulations génétiques sur des souris. Leurs conclusions sont sans appel. En plus de la stimulation mécanique qui accompagne l'éclatement des bulles de gaz carbonique, le CO_2 dissous active des détecteurs biochimiques – des enzymes – logés dans des cellules réceptrices aux saveurs acides. Le CO_2 dissous provoque ainsi une piqure chimique qui participerait en grande partie à la sensation de piqure lorsque vous portez le champagne (ou toute autre boisson effervescente) en bouche.

Afin de vérifier sur les humains les conclusions de Zuker et de son équipe, il faudrait organiser une dégustation de champagne dans une enceinte sous pression, pour interdire aux bulles de s'échapper du champagne, et donc d'éclater dans votre bouche. Dans ces conditions, le CO_2 dissous devrait néanmoins stimuler ces enzymes et provoquer une sensation de piqure (exclusivement chimique) dans votre bouche, sans qu'aucune bulle ne soit susceptible de se former...

Une petite anecdote amusante vient d'ailleurs renforcer les conclusions de l'équipe du professeur Zuker. En 1988, un médecin dénommé Stephan Kelleher vient de gravir une montagne. Afin de se prémunir contre le mal de l'altitude dont il souffre, le docteur Kelleher a avalé un médicament à base d'acétazolamide. Or il se trouve que les enzymes logées dans les cellules réceptrices à la saveur acide sont désactivées par cette molécule. Pour célébrer leur ascension, le docteur Kelleher et ses compagnons de randonnée décident d'ouvrir une bouteille de champagne. Hélas, et à sa grande surprise, le docteur Kelleher rapporte que dans sa bouche le divin breuvage fut d'une grande platitude. En 1988, le médecin ne s'explique pas le phénomène. On le comprend mieux désormais à la lumière des travaux de l'équipe américaine. Les enzymes des cellules réceptrices à la saveur acide, neutralisées par l'acétazolamide, ne lui permettaient tout simplement plus de ressentir la piqure chimique du gaz carbonique dissous. ●



89. Gérard Liger-Belair, Philippe Schmitt-Kopplin et Régis Gougeon devant le spectromètre de masse du laboratoire de chimie analytique du centre Helmholtz de Munich, en Allemagne. C'est cet outil qui nous a permis de lever un coin du voile sur la chimie complexe des arômes du champagne.

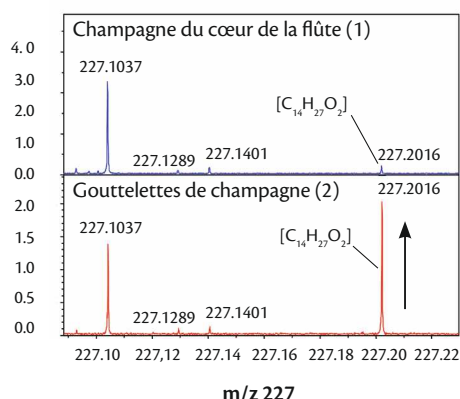
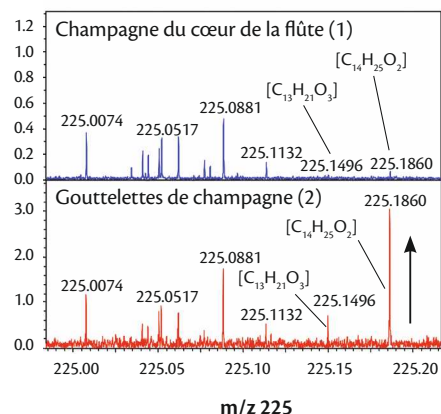
concentrées en molécules aromatiques que le champagne lui-même. Telle était l'hypothèse émise à la fin de ma thèse, en 2001. Nous n'avions pas encore accès à l'époque au matériel susceptible de vérifier (ou pas) cette hypothèse. C'est chose faite depuis peu.

Nous avons eu la chance de pouvoir analyser ce brouillard de gouttelettes à l'aide d'un spectromètre de masse à ultrahaute résolution, au laboratoire de chimie analytique du centre Helmholtz de Munich. Nous nous sommes penchés sur le problème avec trois collègues et amis, Philippe Schmitt-Kopplin de Munich, Régis Gougeon de l'université de Bourgogne et Clara Cilindre de l'université de Reims (figure 89). Nous avons pu comparer la composition chimique fine de ce brouillard de gouttelettes avec celle du champagne du cœur de la flûte, et le résultat fut sans appel. L'analyse fine des deux phases respectives démontre que le brouillard de gouttelettes est beaucoup plus concentré en plusieurs dizaines de molécules d'intérêt organoleptique que le champagne du cœur de la flûte, jusqu'à plus de trente fois pour certaines molécules (figure 90).



Parmi ces molécules en état de surconcentration, on retrouve des acides gras, des composés terpéniques et bien d'autres molécules impliquées dans l'arôme des vins, comme des précurseurs de la bêta-damascénone par exemple.

En définitive, l'éclatement des bulles provoque bien la mise en suspension au-dessus du verre d'un nuage de très fines gouttelettes chargées d'arômes. Ce phénomène contribue à faire de la dégustation du champagne une expérience sensorielle à nulle autre pareille. Notons que si ce phénomène met en valeur les arômes jugés agréables par un dégustateur, il concentre aussi inévitablement les arômes herbacés ou les déviations organoleptiques, si elles existent dans le champagne (pour peu que les molécules responsables de ces déviations présentent des propriétés suffisamment tensioactives pour être ramenées en surface par les bulles, puis projetées dans les aérosols de champagne au-dessus de la flûte).



90. La spectrométrie de masse permet de comparer la composition chimique du champagne au cœur de la flûte (1) à celle du champagne des gouttelettes projetées (2). Chacun des pics ci-dessus caractérise la présence d'une molécule de masse donnée (plus le pic est haut, plus la molécule est concentrée). L'examen détaillé des centaines de pics issus des spectres révèle que des dizaines de molécules aromatiques sont plus concentrées dans les gouttelettes que dans le champagne du cœur de la flûte.

Double page suivante : 91. Gros plan sur les bulles qui affleurent en surface et le brouillard de gouttelettes qu'elles engendrent en éclatant.





La chimie complexe des arômes du champagne

Le champagne est élaboré à partir de trois cépages (chardonnay, pinot noir et pinot meunier, séparément ou en assemblages) qui sont dits non aromatiques, c'est-à-dire qui ne contiennent pas de composés spécifiquement responsables d'arômes qui se retrouveraient dans le vin, contrairement aux cépages muscat ou gewurztraminer par exemple. Les cépages utilisés en Champagne ne contiennent que des précurseurs non volatils de molécules odorantes. Les précurseurs d'arômes connus à ce jour sont de différentes natures et correspondent à l'association du composé odorant à une molécule de type glucoside par exemple. C'est au cours de la vinification et en particulier de la fermentation alcoolique que de telles associations inodores vont libérer des métabolites odorants par l'action de systèmes enzymatiques qui vont couper cette liaison glucosidique.

Cependant, la particularité des cépages utilisés pour l'élaboration du champagne (en particulier chardonnay et pinot noir) est que, dans les vins, leurs arômes ne peuvent pas être associés à un composé unique. Au contraire, ils sont le résultat d'un mélange complexe de nombreuses molécules d'origine fermentaire et non fermentaire (donc provenant du raisin). Parmi les familles de molécules qui participent à l'arôme de ces vins, on peut citer entre autres des acides organiques (acides méthylbutanoïque, octanoïque...) avec des odeurs décrites comme douces, épicées, rances..., des alcools supérieurs (penténol, hexénol...) avec des odeurs décrites comme herbacées, vertes..., des norisoprénoides (béta-damascenone, béta-ionone...) avec des odeurs décrites comme florales, douces..., et bien sûr des esters (hexanoate d'éthyle, octanoate d'éthyle...) avec des odeurs décrites comme fruitées, de banane, de fraise...

La nature des molécules qui participent à l'arôme et à la saveur du champagne est évidemment influencée par la seconde fermentation qui correspond à la prise de mousse en méthode traditionnelle champenoise. En effet, la période pendant laquelle le vin est au contact de levures peut durer plusieurs années pendant lesquelles les levures vivantes puis en autolyse vont libérer des métabolites responsables d'arômes secondaires du champagne. Parmi ceux-ci, on trouve notamment les esters, les acides gras et les alcools. Cependant, au cours de cette étape d'élevage, les teneurs en ces composés peuvent également être modulées par le fait que les lies de levures ont la propriété d'adsorber ces composés. Il en va de même avec les molécules de tanins, les complexes tanins-

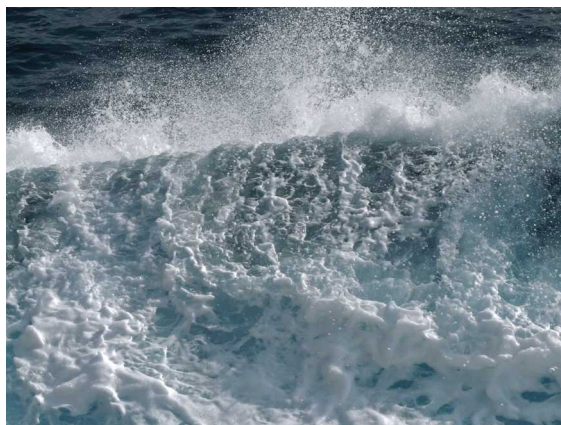
protéines ou les complexes tanins-anthocyanes (dans le cas des champagnes rosés), qui participent à l'astringence et à la couleur des vins.

Enfin, les arômes qui caractérisent les vieux champagnes évoquent des odeurs de torréfaction, de brioche ou de pain grillé. Ces arômes sont dus à la formation de composés soufrés volatils (mercaptopropionate d'éthyle, furaneméthanethiol...) dont la concentration augmente avec l'âge du champagne.

En conclusion, pour les vins tranquilles comme pour les champagnes, les parfums ne sont pas seulement le résultat de la présence de molécules odorantes distinctes, mais également le produit de complexes interactions synergiques ou antagonistes entre ces différentes molécules ou entre ces molécules et d'autres composés du vin tels que les macromolécules (protéines, polysaccharides). Ainsi, de nombreux paramètres physico-chimiques – acidité, teneur en alcool, en tannins, en sucres... et bien sûr la présence de CO_2 dissous – contribuent à la complexité du bouquet finalement perçu par le dégustateur. ●

Un océan qui pétille !

Une belle analogie peut être établie entre le pétilllement de l'océan et celui du champagne dans la flûte. La source majeure de bouillonnement à la surface de l'océan est le résultat de l'action des vagues combinée à celle de la pluie, les deux phénomènes piégeant l'air dans l'eau de mer sous forme de bulles. Lorsque les bulles éclatent à la surface de la mer, elles diffusent un brouillard de gouttelettes analogue à celui du champagne. Ce sont les embruns (figure 92). Dès le début des années 1970, des océanographes ont établi que ces gouttelettes concentraient certaines molécules présentes dans l'eau de mer dont elles étaient issues. Récemment, lors d'une campagne dans les océans Atlantique et Antarctique menée par Philippe Schmitt-Kopplin sur le brise-glace allemand *Polarstern*, le transport vers l'atmosphère, sous forme d'embruns, de centaines de composés organiques dissous dans l'océan a été décrit. Les bulles qui éclatent « écrèment » la surface de l'océan, tout comme les bulles de champagne écrèment les molécules aromatiques de la surface du vin. Si les bulles de champagne ont pour effet de décupler notre plaisir en projetant au-dessus du verre un brouillard de gouttelettes chargées d'arômes, les gouttelettes produites par le pétilllement des océans constituent la plus grande source d'embruns et de composés organiques dissous impliqués dans la chimie complexe de l'atmosphère et donc dans l'équilibre climatique global.

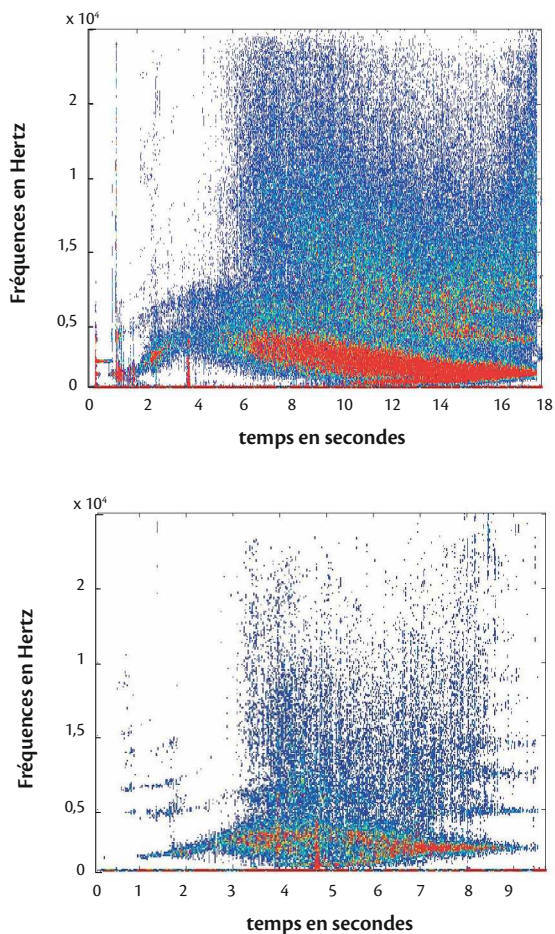


92. Dans son principe, la production d'embruns océaniques est similaire au pétilllement du champagne dans la flûte et à la production du brouillard de gouttelettes qui l'accompagne.

La petite musique du champagne

Le champagne et les vins effervescents offrent une gamme complète de sensations, puisque même l'ouïe est impliquée. « Il faut prêter l'oreille à la mélodie des bulles qui dansent dans le verre. Au début, le son est vif. Il crépite, craque et croustille, puis, doucement, il s'atténue, chuchote et murmure... » On doit cette citation au professeur de psychiatrie et de psychologie médicale, Édouard

Zarifian, grand amoureux de la vigne et du vin, malheureusement décédé en février 2007. Dans son dernier ouvrage, Édouard Zarifian s'interroge sur les aspects symboliques qui entourent la bulle du champagne. La dimension acoustique est de toute évidence bel et bien présente dans son analyse, et il y a des raisons objectives à cela. Comme le suggèrent les photographies des pages précédentes, une somme considérable d'énergie est mise en œuvre au moment de l'éclatement d'une bulle. Une partie de cette énergie est dépensée pour assurer le jaillissement du liquide sous forme de gouttelettes; une autre partie est libérée dans l'atmosphère sous la forme d'une onde sonore à peine audible, un minuscule « pop ». Le bruit du champagne tel qu'il parvient à nos oreilles est constitué de la somme de milliers de ces petits pops émis à la surface de la mousse. À l'aide d'un magnétophone très sensible et dans une chambre anéchoïque⁴, un chercheur du laboratoire de mécanique de l'université de technologie de Compiègne, Patrice Simard, a mesuré les sons émis lors d'une dégustation de champagne. Patrice Simard a enregistré le son du bouchon qui saute, celui du champagne versé dans une flûte et de sa mousse sans cesse renouvelée par des bulles nucléées sur les parois de la flûte. En numérisant ces sons, et après de multiples calculs, il obtient une « image sonore » appelée périodogramme, qui permet d'observer de quelle façon les fréquences du signal acoustique évoluent au cours du temps. La figure 93 illustre deux périodogrammes associés respectivement l'un à un vin de Champagne, l'autre à une limonade. Avec le champagne, l'évolution des sons peut durer plusieurs dizaines de secondes et la gamme des fréquences balayées par le « bruit » des bulles est plus riche que dans le cas de la limonade. Avec la plupart des autres boissons effervescentes de type « soda », ce phénomène sonore est extrêmement éphémère et la qualité du verre n'inter-



93. Représentations graphiques qui retranscrivent l'évolution des fréquences produites par l'éclatement des bulles à la surface d'une flûte de champagne (en haut) et d'un verre de limonade (en bas), en fonction du temps écoulé depuis le versement.

vient que très peu. Pour un même champagne, les enregistrements sonores ont montré de grandes différences selon le type de verre utilisé, sa forme et son niveau de remplissage. Il n'est d'ailleurs pas surprenant que ces paramètres jouent de façon prépondérante sur l'activité acoustique d'un champagne ou d'un vin effervescent, puisque l'espace vide entre la surface du liquide et le haut de la flûte ou de la coupe se comporte comme une véritable caisse de résonance vis-à-vis des sons émis par l'éclatement des bulles sous-jacentes.

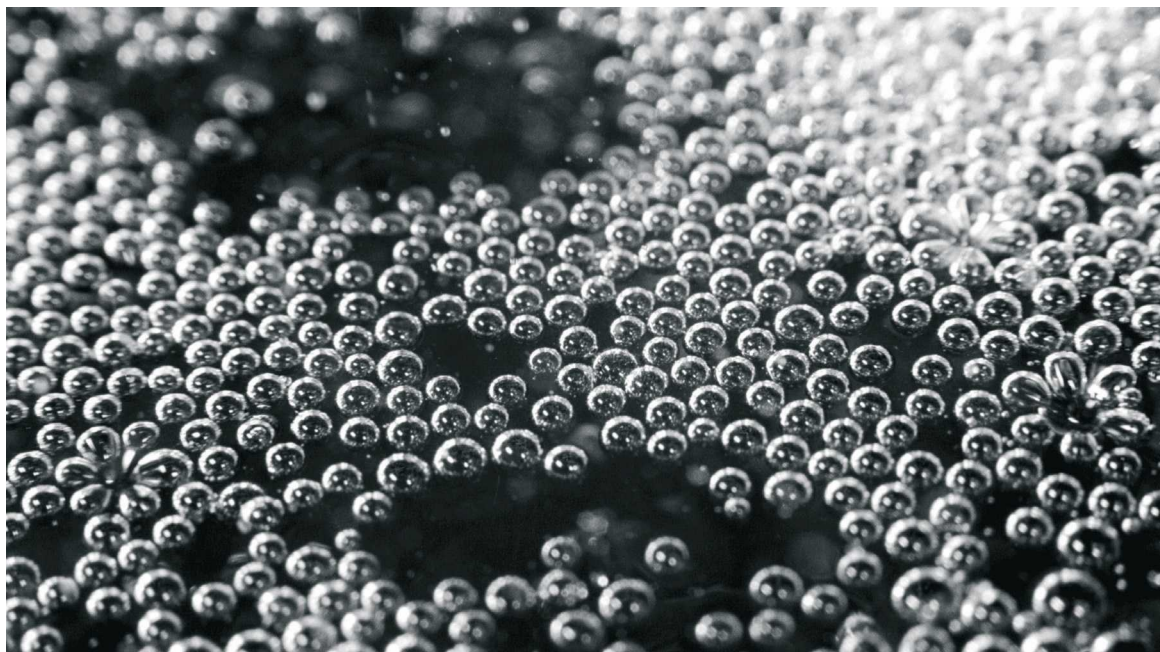
Lorsque les bulles se font fleurs

Une observation attentive du comportement des bulles en surface met en évidence un autre phénomène, aussi merveilleux qu'inattendu. C'est sans nul doute le phénomène qui me procure le plus d'émotion lorsque je me replonge avec nostalgie à l'époque où j'ai pris les clichés qui suivent. Je reprends le fil de mon raisonnement de l'époque pour vous faire partager ma démarche, et donc ma surprise.

Après la chute de mousse, immédiatement après le versement du champagne dans la flûte, un équilibre dynamique s'établit entre les bulles générées dans le verre sur plusieurs sites de nucléation et les bulles qui éclatent en surface. Pendant cette courte phase qui n'excède pas quelques dizaines de secondes, la surface du champagne est tapissée d'une monocouche de bulles, sorte de « radeau » où chaque bulle est généralement entourée de six de ses semblables (figure 94). On dit qu'elles forment un réseau hexagonal, un peu à la manière des alvéoles dans une ruche. Dans une bulle, du fait de sa courbure naturelle, le gaz carbonique est légèrement sous pression (pression d'autant plus grande que la bulle est petite). Lorsqu'une bulle éclate en surface, ce gaz sous pression s'échappe et provoque l'émission d'une onde acoustique, comme on vient de le voir. Lorsqu'une bulle éclate au contact de bulles

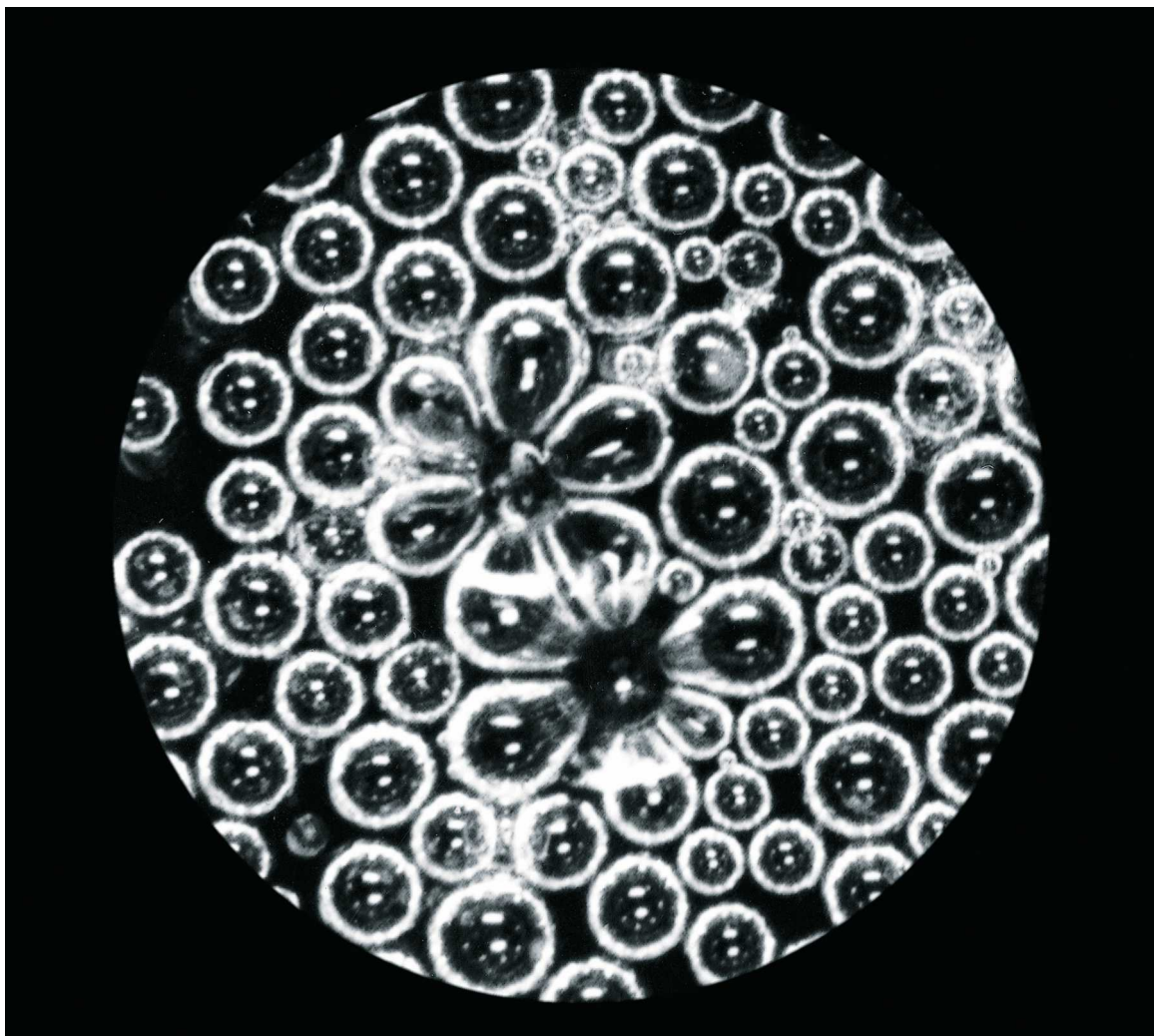
94. *Vue rasante du radeau de bulles à la surface d'une flûte, quelques secondes après le service du champagne. Les bulles de taille identique s'organisent en un réseau très structuré, où chacune est généralement entourée par six de ses semblables.*





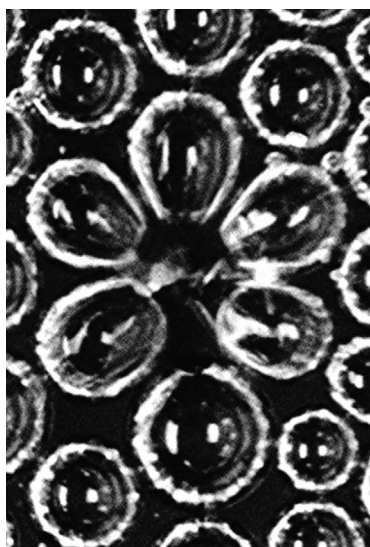
voisines, j'imaginai naïvement à l'époque que le souffle de cette minuscule explosion devait être susceptible de perturber les bulles voisines en les repoussant plus ou moins. J'espérais ainsi figer ce phénomène sur la pellicule. Bien entendu, les conséquences d'un éclatement étant bien trop rapides pour être perceptibles à l'œil nu, il fallut là encore utiliser la macrophotographie à haute vitesse pour espérer figer ce phénomène. J'ai donc multiplié les clichés de la surface d'une flûte entièrement recouverte de bulles, afin d'espérer mettre en évidence cet effet de souffle ressenti par les bulles voisines d'un éclatement. La grande majorité des clichés ne montrait rien de particulier, si ce n'est une couche de mousse constituée de jolies bulles parfaitement sphériques... aucune trace des effets d'une minidéflagration, comme je l'aurais souhaité à l'époque. Cependant, avec un peu de chance et beaucoup d'acharnement, j'ai pu obtenir quelques clichés qui m'ont raconté une tout autre histoire que celle à laquelle je m'attendais (figures 95 et 96). Ces clichés représen-

95. Photographie haute vitesse de la surface d'une flûte de champagne, juste après le service. Figées par l'éclair du flash, des zones apparaissent, à droite et à gauche sur l'image, où les bulles semblent perdre leur forme sphérique.



tent des détails de la surface d'une flûte, quelques secondes après y avoir servi le champagne. Un examen attentif de l'image fait apparaître des zones où les bulles prennent des formes surprenantes. Des structures se dessinent où des bulles apparaissent très déformées en direction d'une zone sans bulles. Si les bulles étaient soufflées par l'éclatement d'une de leurs consœurs voisines, comme je le pensais, elles auraient dû être aplaties par le souffle dans la direction perpendiculaire à l'éclatement, et non pas allongées vers son centre, comme c'est clairement le cas sur les

96. Très fort grossissement de deux structures voisines, qui trahissent localement l'éclatement d'une bulle sous-jacente. Les bulles apparaissent considérablement déformées et prennent des formes qui évoquent de minuscules fleurs.



clichés. Paradoxalement et contre toute attente, les bulles voisines semblent être attirées, et non pas soufflées par une bulle qui éclate.

Afin d'avoir une vision plus claire de la structure spatiale du phénomène, j'ai cherché à reproduire des vues obliques d'éclatements dans une couche de bulles. La très faible profondeur de champ de l'objectif macro (de l'ordre du millimètre) s'ajoute à l'extrême brièveté d'un éclatement et au caractère spatialement aléatoire du phénomène, ce qui rend cette tâche d'autant plus hasardeuse et difficile. Là encore, je ne compte pas les clichés ratés et les centaines d'heures passées à développer les films puis à tirer les épreuves. Mais l'obstination a fini par payer, et j'ai pu obtenir quelques clichés spectaculaires qui font apparaître des bulles voisines violemment étirées vers la partie inférieure de la cavité laissée vacante par une bulle dont le film vient de se rompre. Ce processus conduit, autour des bulles qui viennent d'éclater, à d'éphémères structures en forme de fleurs (photographies de la figure 97). La violence et l'ampleur du phénomène d'aspiration sont encore plus spectaculaires sur le cliché de la figure 98, lorsque le radeau de bulles est incomplet.

97. Bien trop brefs pour être observés à l'œil nu, les éclatements de bulles transforment le tapis de mousse à la surface d'une flûte de champagne en un champ de minuscules fleurs !

98. Photographie haute vitesse du phénomène, lorsque le tapis de bulles est incomplet. Ce cliché est saisissant car il permet de saisir l'ampleur du processus d'aspiration généré par l'éclatement d'une bulle sur ses semblables.



Une dépression qui aspire !

Le phénomène identifié, il va falloir maintenant apporter une explication au processus d'aspiration plutôt contre-intuitif... Certes, la bulle centrale qui se rompt évacue son gaz carbonique en surpression par rapport à l'air ambiant et on aurait volontiers imaginé, comme je l'ai fait à l'époque, que les bulles voisines soient soufflées par ce processus (ce qui aurait été le cas en l'absence d'un autre phénomène qui va prendre totalement le dessus). Mais, compte tenu de la cavité laissée vacante par la bulle qui vient de disparaître, il existe à cet endroit précis, sous la surface du liquide, une légère dépression (c'est cette même zone de dépression qui est à l'origine de la formation du minuscule jet de champagne présenté dans les paragraphes précédents). À l'inverse, le film des bulles qui bordent cette cavité est une zone de légère surpression.

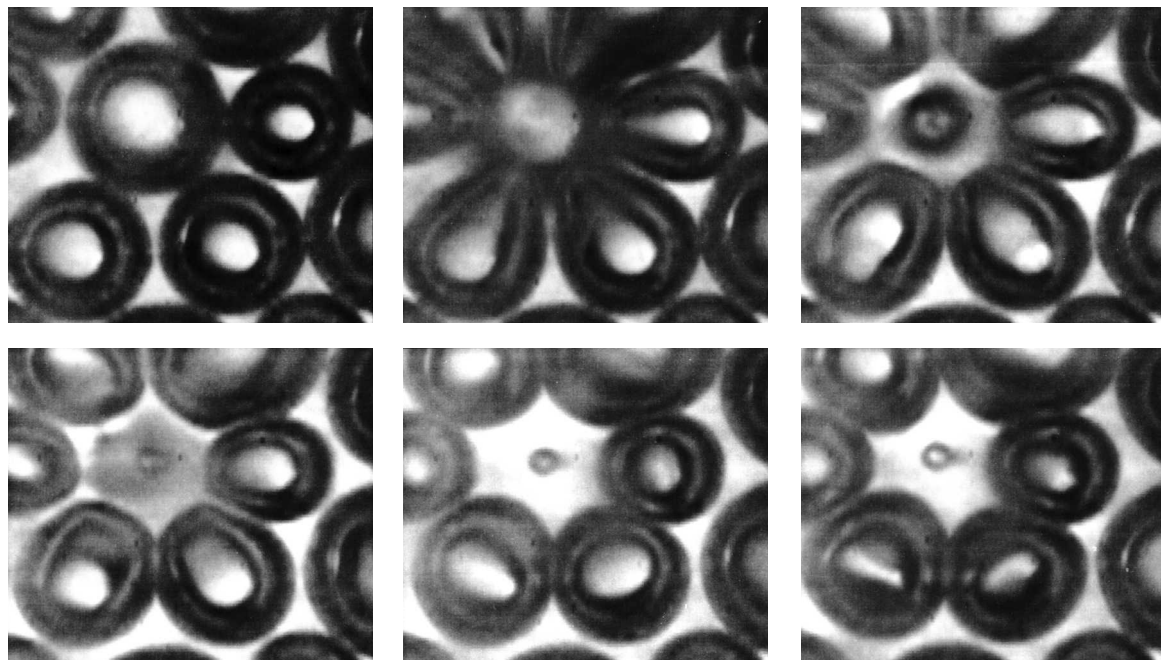
En définitive, puisque le fluide se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression, le film des bulles voisines (auparavant

à l'équilibre) se retrouve violemment aspiré par la cavité vacante.

Les subtilités de la physique des interfaces sont ainsi à l'origine de ces minuscules et éphémères structures en forme de fleurs se développant autour de chaque bulle qui éclate (le nombre de pétales de la fleur étant égal au nombre de bulles voisines...). Ces fleurs de bulles sont désormais immortalisées sur la pellicule, mais elles restent malheureusement invisibles à l'œil nu tant leur durée de vie est fugace – quelques dizaines de microsecondes, tout au plus. Mais pouvait-on rêver plus bel emblème pour le roi des vins ?

Des éclatements en cascades ?

L'ampleur des déformations et des contraintes subies par les bulles voisines d'un éclatement nous conduit à nous interroger quant à leur devenir. Des bulles peuvent-elles supporter de telles déformations ? Vont-elles éclater en retour et créer ainsi une cascade d'éclatements au sein du radeau de bulles ? Les photographies



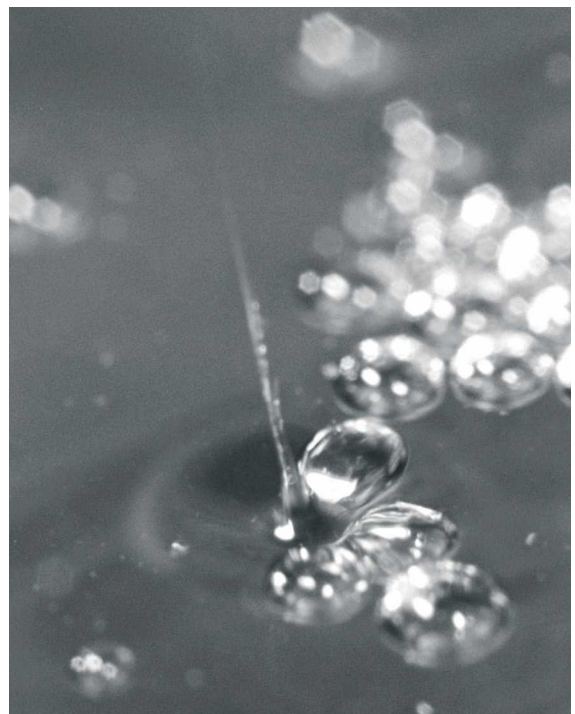
des figures précédentes ne nous permettent pas de trancher. C'est la raison pour laquelle nous avons également souhaité filmer le processus à l'aide d'une caméra rapide. Une séquence vidéo caractéristique de l'éclatement d'une bulle au sein d'un radeau de bulles est présentée sur la figure 99. Malgré la violence du phénomène d'aspiration, on se rend bien compte que les six bulles voisines de la bulle qui éclate retrouvent progressivement leur forme initiale. Il n'y a donc pas d'éclatements en cascade au sein du radeau de bulles, contrairement à ce qui a pu être observé lors du drainage et de l'effondrement de mousses aqueuses par Nicolas Vandewalle et ses collègues de l'Université de Liège. Cependant, ce très beau travail réalisé par nos collègues belges démontre clairement que des cascades d'éclatements sont à l'origine de l'effondrement souvent très rapide du chapeau de mousse qui suit le versement d'un champagne ou d'un vin effervescent dans une flûte.

Une situation insolite : lorsque le jet n'est plus vertical

Le cliché de la figure 100 illustre l'allure du jet qui suit l'éclatement d'une bulle dans une situation un peu particulière. D'un côté, la bulle qui éclate est bordée de trois bulles voisines, de l'autre, le terrain est vierge. La symétrie est rompue. Dans ce cas, on remarque que le jet (auparavant vertical) est maintenant dévié du côté où la bulle qui éclate n'a pas de voisines. Nous sommes surpris. Intuitivement, nous pensions plutôt que le jet allait être dévié du côté où la dissipation d'énergie est maximale, c'est-à-dire du côté des bulles voisines qui sont déformées par la succion capillaire (un peu comme un bateau qui dévie de sa trajectoire du côté où le gouvernail tourne et dissipe de l'énergie sous forme de tourbillons). Même les événements du quotidien, en apparence anodins, recèlent encore leur part de mystère. Certes, les

Page de gauche : 99. Séquence vidéo de l'éclatement d'une bulle filmé à 1 500 images/s. Dans un premier temps, les six bulles voisines de l'éclatement sont violemment aspirées. Elles résistent néanmoins, et finissent par retrouver leur forme sphérique initiale.

100. Le jet de champagne est dévié de la verticale lorsque la symétrie des bulles qui bordent l'éclatement est rompue.



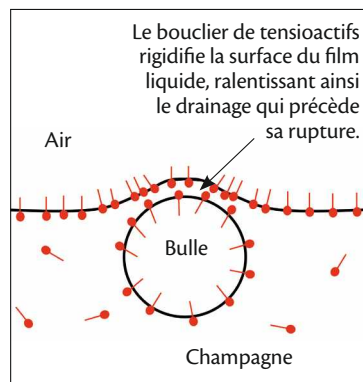
conséquences œnologiques de cette situation un peu particulière sont limitées, mais cette photographie originale illustre néanmoins comment l'observation attentive des phénomènes qui nous entourent peut nous emmener assez loin sur le questionnement du pourquoi et du comment de leur origine...

Progressivement, les éclatements se font plus rares

Juste après le remplissage de la flûte, l'effervescence est à son paroxysme; les bulles qui éclatent diffusent des milliers de minuscules gouttelettes dans l'air, libérant un concentré d'arômes pour notre plus grand plaisir. Mais, à mesure que le temps passe, les éclatements deviennent moins fréquents. Quelques dizaines de secondes après le versement, il n'est pas rare que le nuage de gouttelettes ne soit déjà plus visible, et ce, bien que les sites de nucléation situés sur les parois de la flûte continuent à alimenter la surface du vin en bulles « fraîches ». Comment expliquer ce phénomène ?

La réponse à cette question se trouve une fois de plus à l'échelle moléculaire. Après le remplissage de la flûte, des milliers de bulles entraînent les molécules tensioactives du vin vers la surface où elles s'accumulent progressivement (figure 101). Ces molécules agissent à la manière d'un bouclier protecteur sur la calotte émergée des bulles, exactement comme elles l'avaient fait sur les bulles pendant la phase ascensionnelle. Progressivement, les tensioactifs du vin rigidifient en quelque sorte la surface des bulles. Le drainage et l'amincissement du mince film liquide qui précède l'éclatement des bulles en surface sont alors considérablement ralentis, augmentant d'autant la durée de vie des bulles. *A contrario*, dans les sodas et les eaux pétillantes qui sont presque totalement dépourvus de molécules tensioactives susceptibles de rigidifier les bulles, la formation d'une collerette de bulles stable est

101. Le film liquide qui sépare la bulle de l'atmosphère est progressivement envahi par les molécules tensioactives du champagne, ramenées en surface suite au ballet incessant des bulles et aux mouvements de convection qui agitent le liquide.



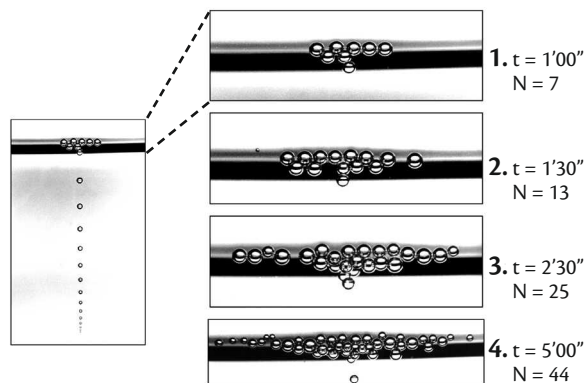
quasiment impossible. L'existence de cette couche de molécules tensioactives qui s'accumulent à la surface du liquide a été mise en évidence par nos collègues du centre de recherche agronomique de l'INRA de Reims. Les propriétés physiques de cette couche, dont les conséquences sur la durée de vie des bulles et donc la tenue de mousse des vins effervescents sont cruciales, font aujourd'hui encore l'objet de recherches très poussées.

La durée de vie d'une bulle

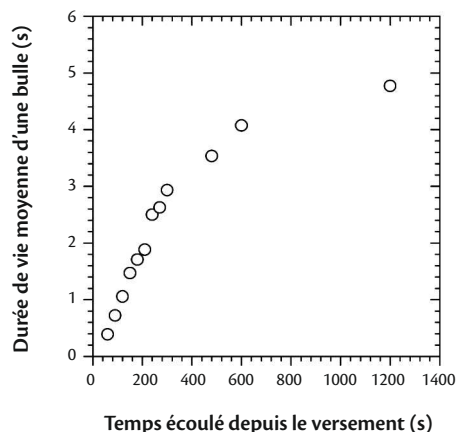
Nous avons souhaité illustrer le processus d'enrichissement progressif de la surface en mesurant la durée de vie moyenne d'une bulle en surface. Pour mesurer la durée de vie des bulles en surface, nous avons tiré profit de la formation répétitive et régulière de bulles au niveau d'un site de nucléation. Après le versement du champagne dans la flûte, nous nous focalisons sur un train de bulles suffisamment isolé des autres. De cette façon, nous sommes certains que les bulles présentes au-dessus de ce train sont issues de ce seul site de nucléation (figure 102). Ainsi, à partir du nombre N de bulles présentes en surface et de la fréquence d'émission du site f , on peut alors facilement accéder à la durée de vie moyenne des bulles en surface.

Très clairement, le nombre de bulles qui s'accumulent en surface, suite à l'activité de cet unique train de bulles, augmente avec le temps. Nous pouvons ainsi évaluer la durée de vie moyenne d'une bulle en surface. Comme on peut le constater sur la figure 103, cette durée de vie moyenne augmente au cours du temps. Cette augmentation progressive de la durée de vie des bulles est la conséquence directe de l'accumulation progressive du matériel tensioactif à la surface du champagne, suite à l'effervescence qui ramène progressivement les molécules tensioactives vers la surface.

102. Évolution, au cours du temps (de haut en bas), du nombre de bulles qui s'accumulent en surface lorsqu'elles sont émises par un même site de nucléation.



103. Évolution de la durée de vie moyenne d'une bulle en surface, en fonction du temps écoulé depuis le service du champagne dans une flûte.



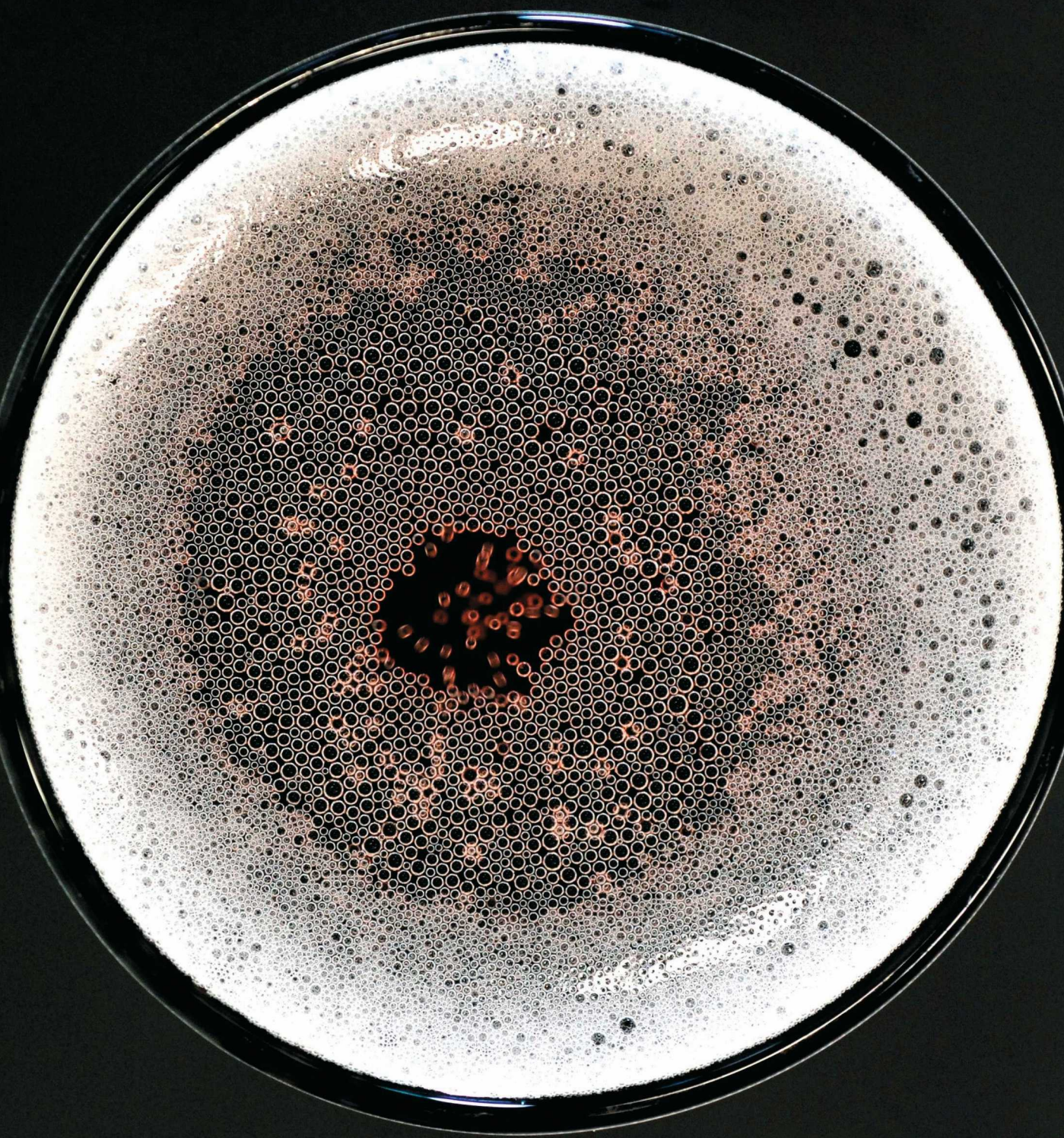


Avec ou sans mousse votre champagne ?

Maintenant que nous connaissons le rôle des tensioactifs sur l'allongement de la durée de vie des bulles en surface, on peut tout à fait envisager de traiter un champagne ou un vin effervescent, dont la tenue de mousse serait jugée trop faible par son élaborateur. Pour cela, il suffit de l'enrichir en molécules tensioactives, scrupuleusement choisies pour leur propriété pro-mousse, afin d'augmenter la durée de vie des bulles en surface et donc la tenue de mousse telle qu'elle sera perçue par le dégustateur.

Un organisme champenois, l'Institut œnologique de Champagne, travaille activement sur cette thématique. Les clichés de la figure 104 montrent les fortes différences de tenue de mousse d'un champagne (en l'occurrence, il s'agit d'un champagne rosé), lorsqu'on y ajoute des quantités croissantes d'un additif tensioactif, bien évidemment autorisé par l'industrie agroalimentaire et sans aucune conséquence sur les qualités organoleptiques du champagne. Plus le champagne est riche en molécules tensioactives, plus la mousse en surface devient généreuse. Quelques dizaines de milligrammes par litre suffisent. Prenons garde cependant à ne pas en mettre trop, faute de quoi une dégustation de champagne risquerait de s'apparenter à une dégustation de bière, ce qui n'est pas non plus le but recherché...

104. Dès lors qu'est connu le rôle des molécules tensioactives sur l'allongement de la durée de vie des bulles en surface, il devient possible de stabiliser « à façon » la mousse d'un vin de Champagne. On peut constater que la tenue de mousse du champagne rosé présenté ici augmente avec sa teneur en molécules tensioactives (de haut en bas). Plus on en met, et plus ça mousse !



Les bulles n'apprécient pas la matière grasse

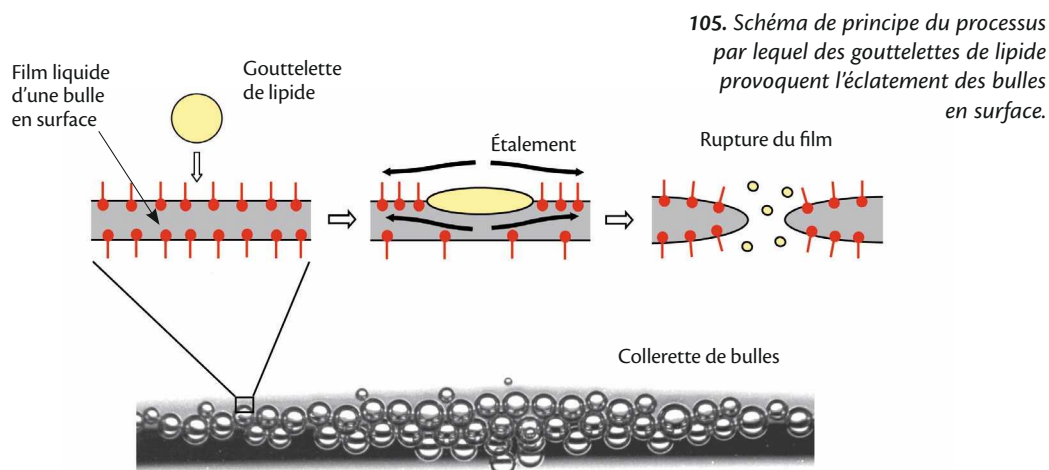
Le rôle bénéfique des macromolécules tensioactives d'un vin effervescent peut toutefois être instantanément annihilé par la présence de la moindre trace de corps gras à la surface du liquide. Au moindre contact, le corps gras se répand rapidement sur le film liquide de la bulle et étire celui-ci, le rendant si mince par endroits qu'il finit par se rompre (voir figure 105). C'est la raison pour laquelle le fait de grignoter chips ou cacahuètes en buvant du champagne peut se solder par une disparition totale et quasi instantanée de la collerette. Mesdames, attention également au rouge à lèvres : il contient des composés lipidiques qui peuvent être fatals aux bulles dès la première gorgée.

D'autres issues possibles que l'éclatement pour une bulle

Si vous leur épargnez ces mauvaises rencontres, les bulles présentes à la surface d'un champagne ou d'un vin effervescent peuvent encore vous offrir quelques satisfactions esthétiques. Les molécules de gaz carbonique qu'elles contiennent continuent à migrer dans l'atmosphère à travers le mince film liquide qui coiffe leur partie émer-

gée. Ainsi les bulles diminuent progressivement de volume, et beaucoup d'entre elles disparaissent avant même d'éclater. Cette résorption des bulles peut s'observer à l'œil nu. Longtemps après le remplissage, à la surface, les bulles qui survivent suivent les mouvements du liquide. Si vous évitez de remuer votre flûte, vous pourrez observer qu'elles s'organisent très souvent d'elles-mêmes en de magnifiques spirales bidimensionnelles, un peu à la manière d'une galaxie (figure 106). Cette rotation à la surface du champagne est due à la forme circulaire de la flûte qui contraint les bulles à évoluer dans les limites de ses parois.

À la surface du liquide, lorsque deux bulles sont en contact, il arrive également que le film de liquide qui sépare les deux bulles se rompe. Elles fusionnent alors pour ne plus faire qu'une seule et même bulle. Il s'agit du processus de coalescence (qui peut également se produire au cœur du liquide lorsque les bulles entrent en contact, comme on a pu le voir au chapitre 3). La coalescence entre deux bulles est bien évidemment un phénomène d'une extrême rapidité qui nécessite l'emploi d'une caméra ultrarapide pour pouvoir en apprécier toutes les phases. Ce processus a récemment pu être filmé à très haute vitesse (10 000 images par seconde). La séquence d'une





coalescence entre deux bulles de champagne est présentée sur la figure 107.

En revanche, si le film liquide qui sépare deux bulles en contact résiste suffisamment longtemps, on peut assister à un autre phénomène, également visible à l'œil nu pour le dégustateur attentif. La plus petite des deux bulles va progressivement se vider dans la plus grosse. La petite bulle possède en effet en son sein une pression supérieure à celle qui règne dans la grosse bulle. C'est cette différence de pression qui est à l'origine de ce phénomène qu'on appelle le « disproportionnement » ou encore le « mûrissement d'Ostwald ».

106. L'univers dans une flûte de champagne... Longtemps après le service, les bulles rendues rigides par un épais bouclier de molécules tensioactives s'enroulent spontanément en de belles structures bidimensionnelles qui évoquent des galaxies.



107. Séquence vidéo filmée à très haute vitesse (10 000 images/s) qui illustre la coalescence entre deux bulles à la surface d'une flûte de champagne.





6

Quel verre
choisir ?

Existe-t-il un verre idéal pour le champagne ?

Il n'y a pas de limite à l'imagination des designers et des verriers, et il existe aujourd'hui une très large gamme de verres à dégustation, de formes et de contenances très différentes. Mais existe-t-il un verre idéal pour la dégustation du champagne et des vins effervescents, et si oui, la science a-t-elle son mot à dire pour le déterminer ?

La science du verre

Aujourd'hui, les panels de dégustation de champagnes et de vins effervescents, comme les consommateurs avertis d'ailleurs, sont très demandeurs d'informations objectives quant au rôle joué par les bulles dans un verre et par le CO_2 qu'elles libèrent. Comment évolue la concentration en CO_2 dissous dans un verre au cours d'une dégustation ? Quel est l'impact de la forme du verre et d'une éventuelle gravure sur la désorption progressive du CO_2 dissous et des arômes d'un champagne ou d'un vin effervescent ? Quel est le rôle de la température de service et de l'âge du champagne sur la libération progressive du gaz carbonique dissous et des arômes ? Voilà autant de questions auxquelles la science peut effectivement répondre facilement par l'emploi des outils de mesure adaptés.

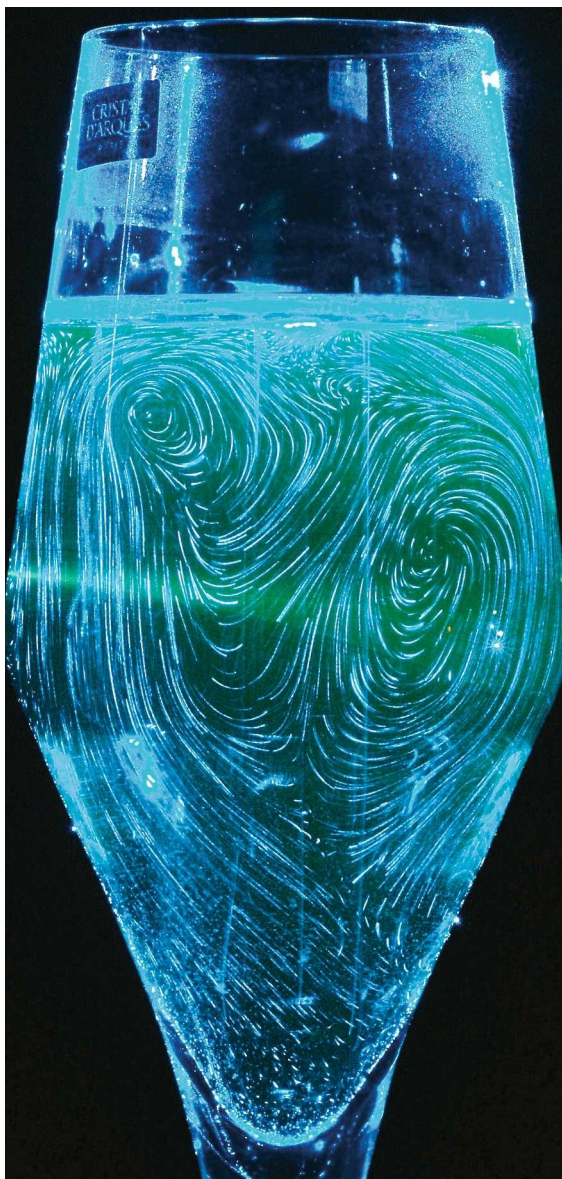
Toutefois, avant de proposer un verre « idéal », il faut avoir la réponse sensorielle du panel le plus large possible pour tenter de corréler le plaisir du consommateur avec quelques-uns des paramètres analytiques accessibles à l'expérience. On peut alors imaginer, en multipliant les dégustations et en ajustant petit à petit les paramètres analytiques selon la réponse du panel, parvenir progressivement à une forme de verre dans lequel la dégustation d'un champagne plaise à la majorité des membres du panel. On aurait alors

une forme de verre qui plaît statistiquement au plus grand nombre pour la dégustation d'un champagne en particulier. Mais, attention, cette forme de verre identifiée comme « idéale » par la majorité des dégustateurs du panel pour un champagne ne serait pas nécessairement adaptée à la dégustation d'un autre champagne. Il existe bien entendu une large gamme de vins de Champagne qui offrent aux consommateurs des caractères très différents. Certains sont jeunes, d'autres d'âge respectable, certains sont bruts, d'autres doux, certains sont élaborés avec 100 % de chardonnay, d'autres sont des assemblages comprenant les trois cépages champenois (mais dans des proportions variables selon le millésime, le terroir), etc. De plus, en raisonnant exclusivement sur les paramètres analytiques évoqués plus haut, on occulte complètement l'aspect strictement esthétique (propre à chacun) de ce verre soi-disant idéal, aspect qui joue certainement un rôle dans le plaisir qu'on a à déguster un vin. Tout cela rend bien évidemment notre quête du verre « idéal » et « unique » absolument illusoire.

S'il y a probablement autant de verres à dégustation idéaux que de consommateurs et de types de champagnes, l'analyse de plusieurs paramètres analytiques objectifs peut cependant nous permettre d'éviter certains écueils lorsqu'on imagine un verre pour la dégustation d'un champagne ou d'un vin effervescent.

Effervescence naturelle ou artificielle, laquelle privilégier ?

La figure 109 illustre les tomographies laser d'un même champagne au sein de deux flûtes de formes identiques, mais dont l'une présente un fond gravé.



Double page précédente :

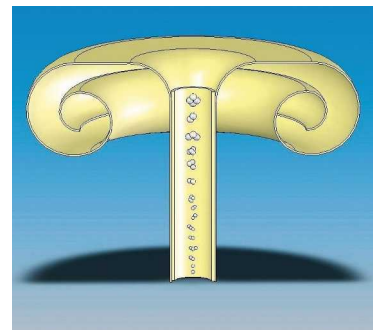
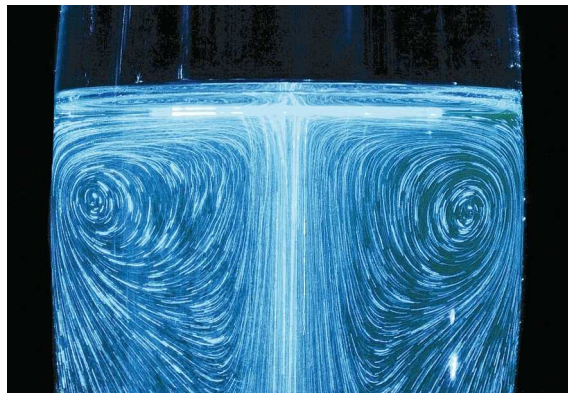
108. Pétilllement du champagne dans une flûte. Ce contenant est-il le mieux adapté à la dégustation ? C'est ce que nous avons examiné...

109. Visualisation des écoulements dans deux flûtes distinctes. Celle de gauche présente une effervescence naturelle, alors que celle de droite présente un fond gravé destiné à provoquer une effervescence artificielle. On remarque que le brassage du champagne n'est pas le même d'une flûte à l'autre.

Dans le cas de la flûte non gravée, qui présente par conséquent une effervescence naturelle, le champagne est agité de tourbillons qui permettent un brassage homogène et relativement lent du fluide.

Dans la flûte gravée, la situation est sensiblement différente. En effet, l'écoulement principal se compose de deux tourbillons qui tournent en sens inverse de part et d'autre de la colonne de bulles centrale générée par la gravure. Cette colonne de bulles qui s'élève au centre de la flûte est si intense qu'elle impose la forme des tourbillons tout au long de la dégustation. Puisque la gravure est située sur l'axe de symétrie de la flûte, l'écoulement du fluide qui en résulte présente une symétrie cylindrique autour de cet axe central. L'écoulement du champagne se fait donc suivant un anneau tourbillonnaire unique, en forme de beignet, qui s'enroule autour de l'axe de la flûte, comme l'illustre la figure 110. Dans une flûte gravée, le champagne est également brassé de façon homogène, mais les vitesses des tourbillons sont très supérieures à celles relevées dans la flûte non gravée. Or, dans la mesure où il existe une corrélation directe entre la vitesse des tourbillons dans un fluide sursaturé et la vitesse de diffusion du gaz carbonique et des molécules aromatiques en surface, la libération de ces derniers se fait nécessairement plus rapidement dans la flûte gravée que dans la flûte qui ne l'est pas.

Au cours d'une dégustation, le danger serait dès lors d'utiliser des verres qui présentent une effervescence artificielle excessive, comme c'est encore souvent le cas. Si le champagne est de la sorte agité par une effervescence excessive, il risque de perdre son gaz carbonique et ses arômes subtils prématurément. Un dégustateur pourra également être gêné par un excès de gaz carbonique au-dessus de la flûte, susceptible de masquer les arômes du champagne. C'est pourquoi



110. *Détail des tourbillons qui agitent la surface du champagne dans une flûte gravée (en haut), et reconstitution tridimensionnelle de l'écoulement correspondant (en bas).*

il convient, lorsque le verrier décide de proposer des flûtes à dégustation gravées, de prendre garde à ce que les impacts de la gravure ne soient pas trop nombreux, ce afin que le champagne ne soit pas agité de façon intempestive.

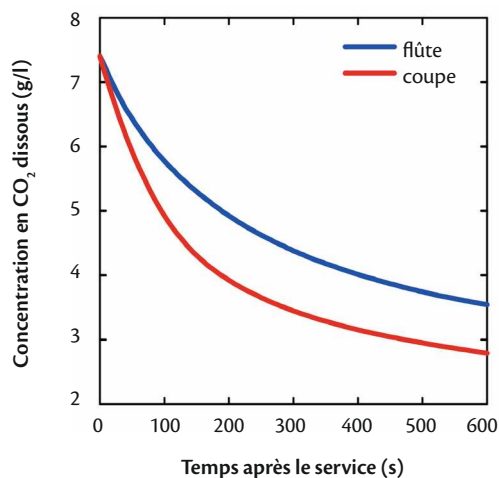
Impact de la forme du verre : flûte ou coupe ?

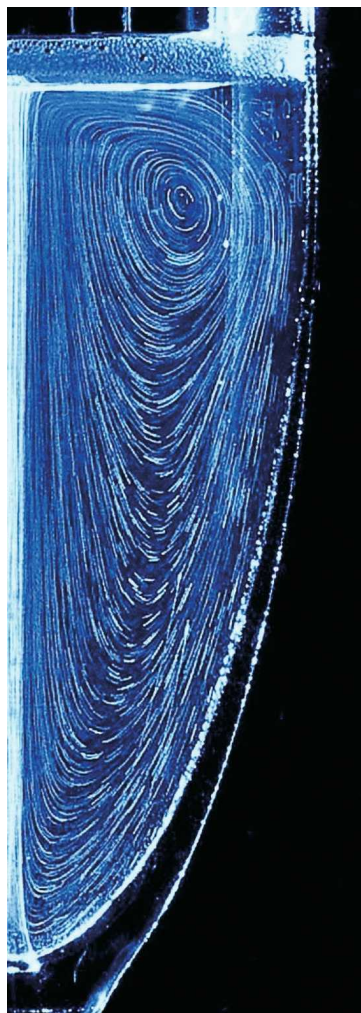
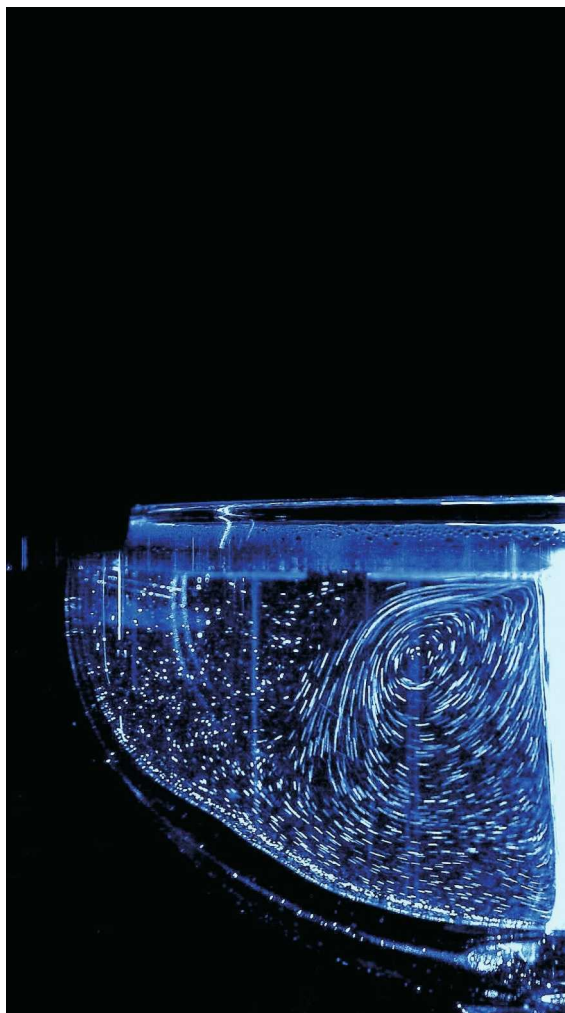
Pour illustrer l'impact de la forme d'un verre sur quelques paramètres analytiques essentiels lors d'une dégustation, nous avons choisi de comparer les deux types de verres totalement opposés pour la dégustation du champagne que sont la flûte et la coupe.

Du point de vue du dégustateur, la concentration en gaz carbonique dissous dans le champagne joue un rôle essentiel. C'est elle qui est responsable de la sensation tactile en bouche (sous l'action des piqûres mécaniques et chimiques, comme cela a été mentionné p. 121). De la même façon, plus la concentration en CO_2 dissous est élevée, plus les bulles sont grosses et nombreuses dans un verre. Afin de faire durer l'effervescence le plus longtemps possible, un verre doit donc conserver le plus longtemps possible son gaz carbonique une fois le champagne servi.

En utilisant une balance ultrasensible (au dixième de milligramme près), il est possible de mesurer la perte progressive de gaz carbonique dissous une fois le champagne versé dans chaque type de verre, flûte et coupe. C'est une expérience toute simple qui nous renseigne sur la capacité d'une forme de verre donnée à retenir plus ou moins longtemps le gaz carbonique dissous, et donc l'effervescence, en son sein (figure 111). De toute évidence, comme on pouvait s'y attendre, compte tenu de sa surface plus faible, la flûte permet de conserver plus longtemps le CO_2 dissous (et donc les arômes dont les bulles sont le vecteur) que la coupe.

111. Décroissance progressive de la concentration en gaz carbonique dissous dans la flûte et dans la coupe, une fois le champagne servi. Compte tenu de sa large ouverture, la coupe perd plus vite son gaz carbonique dissous que la flûte, plus étroite.





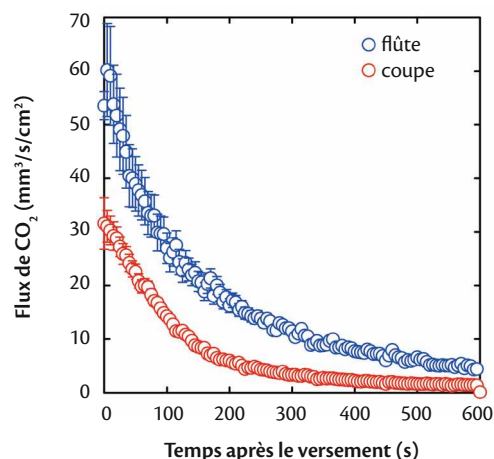
En définitive, un verre doit donc présenter une surface d'échange avec l'atmosphère qui ne soit pas excessive afin de préserver les bulles et les arômes qu'elles diffusent.

Du point de vue du dégustateur, la concentration en CO_2 dissous dans le champagne joue certes un rôle important, mais le flux de CO_2 gazeux qui s'échappe des verres doit aussi être quantifié. En effet, lorsque le dégustateur inhale l'espace de tête au-dessus de son verre, les composés aromatiques volatils responsables du « bouquet » du vin sont inévitablement mélangés aux vapeurs de CO_2 qui s'échappent *via* les bulles et l'interface champa-

112. Allure des mouvements de convection qui agitent le champagne, révélés par la tomographie laser, selon que le champagne est servi en coupe (à gauche) ou en flûte (à droite).

gne/air. La façon dont le CO_2 gazeux peut modifier la perception des arômes d'un vin n'est pas encore clairement établie à ce jour. Il est cependant bien connu des amateurs de champagne et de vins effervescents qu'un excès de vapeurs de CO_2 peut irriter les muqueuses nasales lors de son inhalation, provoquant ainsi une sensation de piquêr très désagréable qui mettra souvent plusieurs secondes avant de disparaître. Grâce à la tomographie laser, nous pouvons voir, sur la figure 112, l'allure des mouvements de convection qui agitent le champagne selon qu'il est servi en flûte ou en coupe. Ces mouvements accélèrent l'échappement du gaz carbonique et des molécules aromatiques volatiles du champagne.

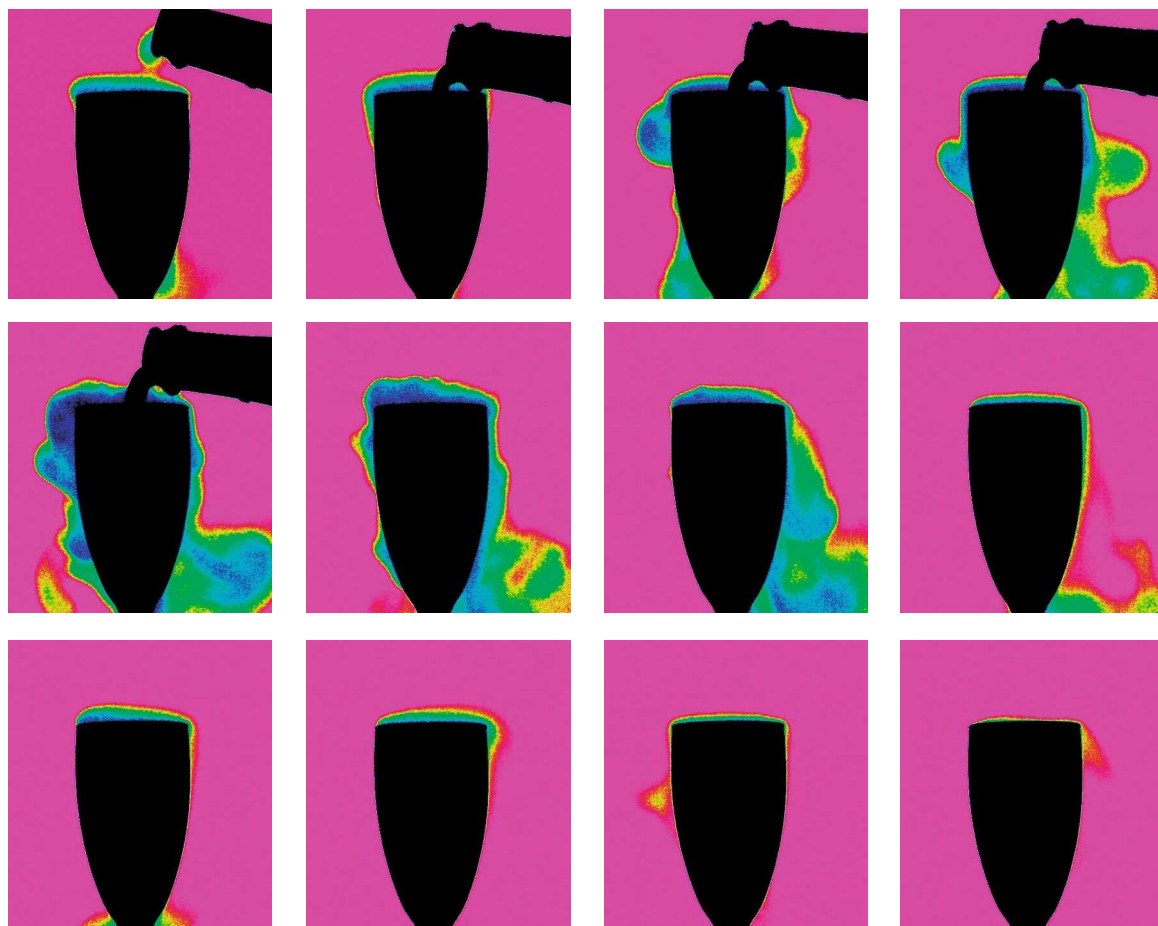
Les flux de CO_2 qui s'échappent de la flûte et de la coupe, au cours des dix premières minutes qui suivent le versement du champagne, ont été précisément quantifiés. Ils apparaissent sur la figure 113. Tout au long des dix premières minutes qui suivent le versement, le flux de CO_2 qui s'échappe de la flûte apparaît nettement supérieur à celui qui s'échappe de la coupe, et ce, bien que la coupe permette une libération plus rapide du CO_2 dissous dans le champagne (voir plus haut, figure 111). Ce résultat est tout simplement dû à la large ouverture de la coupe qui dilue le CO_2 gazeux qui s'en échappe sur une surface bien plus importante que celle de la flûte, conduisant ainsi à des flux de CO_2 plus faibles que lorsque le champagne est servi dans la flûte. Si, comme on vient de le voir, la large ouverture de la coupe dilue le CO_2 gazeux qui s'échappe, il en va de même avec les composés aromatiques volatils qui s'évaporent. Des mesures de l'évolution de la concentration d'un certain nombre de composés volatils dans le ciel gazeux au-dessus de verres de formes variées sont venues confirmer cette tendance (figure 114). Quel impact pour le dégustateur ? Plus le flux gazeux d'un composé volatil est important, plus ce composé sera perçu



113. Évolution des flux de gaz carbonique qui s'échappent au-dessus de la flûte et de la coupe au cours du temps. Compte tenu de sa faible ouverture et des tourbillons homogènes qui règnent en son sein, le flux de gaz carbonique est toujours plus élevé au-dessus de la flûte.



114 Analyse des composés volatils par chromatographie gazeuse.



par celui qui inhale les vapeurs qui se dégagent au-dessus d'un verre. En filmant à l'aide de la caméra infrarouge le service du champagne en flûte et en coupe, on peut d'ailleurs très bien voir les volutes de gaz carbonique qui s'en échappent (figure 115).

Le bon verre

Le bon verre est finalement celui qui réalise un compromis entre la conservation du gaz carbonique dissous en son sein (ce qui assure une bonne longévité à l'effervescence), et la diffusion des arômes à un rythme suffisant pour pouvoir être perçus par le nez du dégustateur. En définitive, la coupe est à proscrire pour deux raisons. Tout



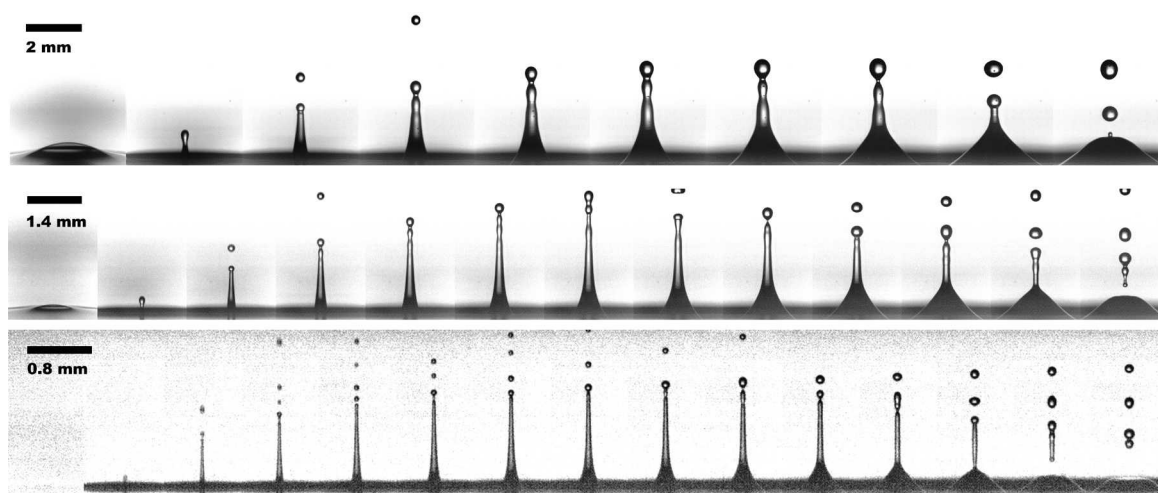
d'abord, elle empêche le champagne de retenir correctement son gaz carbonique dissous. De plus, elle dilue les arômes qui s'en échappent sur une surface trop importante. Un champagne dégusté en coupe vous paraîtra le plus souvent très peu aromatique au nez.

La flûte retient bien mieux le gaz carbonique dissous dans le champagne que la coupe. Cependant, si elle est trop étroite, elle risque de concentrer le gaz carbonique et les arômes qui s'en échappent de façon excessive. Les « premiers nez » sur une flûte étroite sont systématiquement très agressifs pour les muqueuses nasales. Le bon compromis se situe donc probablement dans une forme plutôt intermédiaire entre la coupe et la flûte.

115. L'emploi d'une caméra infrarouge permet de mettre en évidence l'échappement du gaz carbonique selon que le champagne est servi en flûte ou en coupe. La couleur des volutes de gaz nous renseigne sur la concentration de gaz carbonique. Plus les volutes tirent sur le bleu, plus la concentration du gaz carbonique est élevée.

L'influence de la taille des bulles

Au cours d'une dégustation de champagne, des centaines de bulles éclatent chaque seconde, projetant ainsi des milliers de gouttelettes plusieurs centimètres au-dessus de la surface, sous la forme d'un aérosol qui rafraîchit le visage (voir au chapitre 5). L'analyse fine de cet aérosol a montré qu'il était concentré en plusieurs dizaines de molécules aromatiques. Or la mécanique de l'éclatement d'une bulle répond à des régimes bien définis selon sa taille. Plus les bulles sont petites, plus la vitesse d'éjection du jet est grande et plus le nombre de gouttelettes pro-



duites sera important, comme le montrent les séquences de la figure 116. En définitive, plus les bulles sont fines et meilleure sera l'évaporation des arômes en retour. Un bon point donc pour les bulles fines qui dispersent plus efficacement les arômes lorsqu'elles éclatent !

Cet effet « fines bulles » devient extrêmement subtil lorsqu'on sait que la taille d'une bulle en surface varie avec la hauteur de champagne servi dans le verre (voir au chapitre 3). En effet, les bulles grossissent en captant le gaz carbonique dissous lorsqu'elles remontent dans le verre. Nous retiendrons que le volume d'une bulle varie propor-

116. Séquences haute vitesse qui illustrent la production de gouttelettes lors de l'éclatement de trois bulles de tailles différentes.



tionnellement avec la distance qu'elle parcourt, et donc avec la hauteur de champagne servi dans le verre. Or, puisque la mécanique de l'éclatement d'une bulle dépend fondamentalement de sa taille, on comprend maintenant que la hauteur de service, et donc la taille du verre, joue un rôle majeur sur la formation de l'aérosol de champagne et donc l'évaporation des arômes du vin.

Le service du champagne au Domaine Les Crayères

Philippe Jamesse est le chef sommelier du Domaine doublement étoilé Les Crayères à Reims. Philippe est un expert connu et reconnu pour sa grande connaissance du champagne et de la Champagne. Il y a quelques années, il a eu l'intuition de dessiner trois verres très différents pour le service du champagne (figure 117). Ces trois verres, lorsqu'ils sont servis avec un volume identique de champagne, procurent une expérience

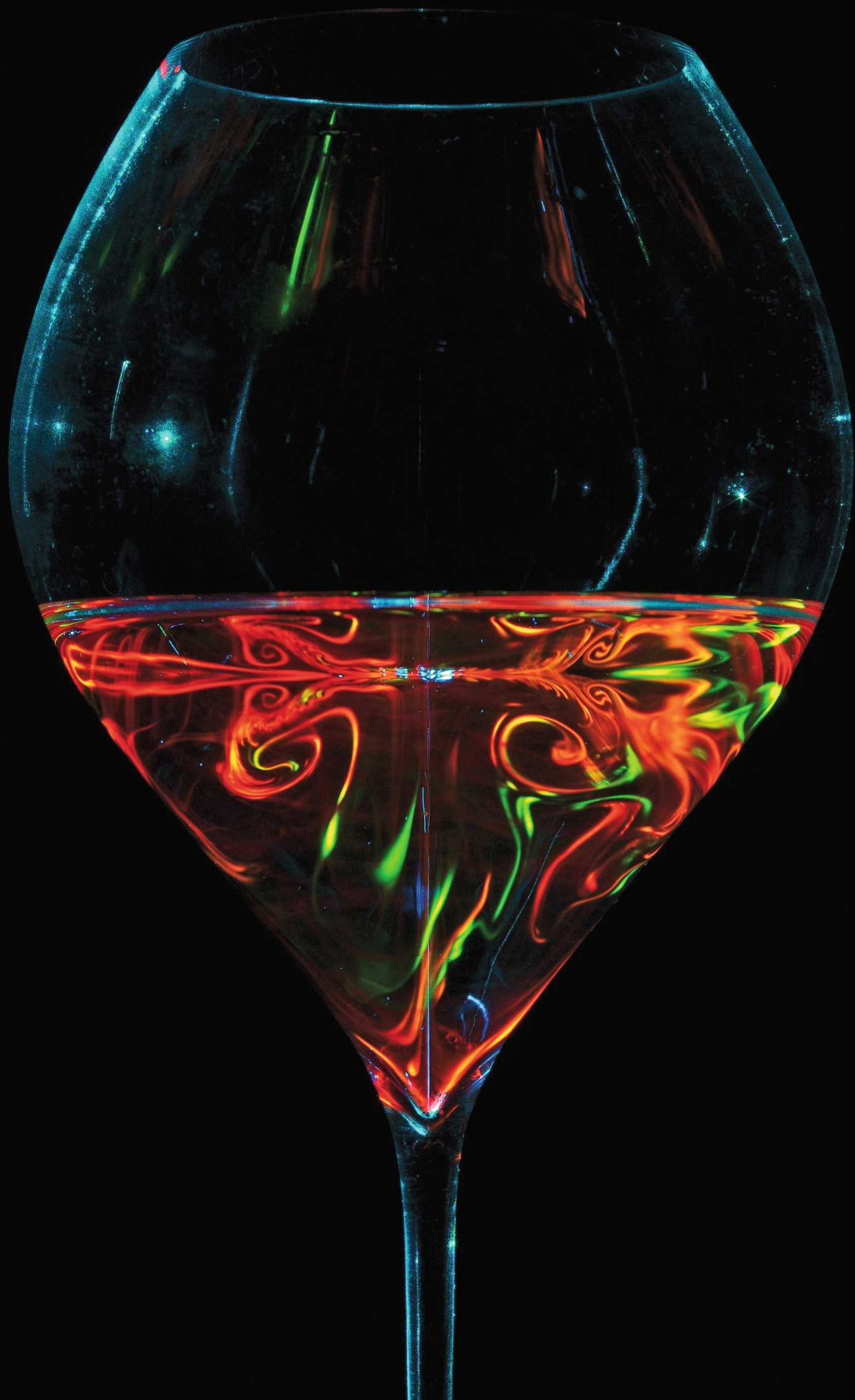
117. Nos résultats scientifiques permettent d'éclairer sous un jour nouveau les trois verres destinés à la dégustation du champagne au Domaine Les Crayères.

sensorielle différente lors de la dégustation d'un champagne donné. Toutes celles et ceux qui ont eu l'occasion de faire cette dégustation comparée le confirment.

On peut voir sur les photographies de la figure 117 que trois paramètres géométriques permettent de distinguer les trois verres lorsqu'ils sont identiquement servis avec 120 millilitres de champagne. Tout d'abord, la hauteur de service y est très différente. Elle diminue du verre le plus étroit au verre le plus évasé. Les bulles vont donc avoir tendance à s'affiner du verre le plus étroit au verre le plus évasé. La dispersion des arômes sera donc plus efficace dans le verre évasé, propice aux bulles plus fines. De plus, la surface du disque de champagne offerte au dégazage et à l'évaporation des arômes augmente très nettement du verre le plus étroit au verre le plus évasé. L'évaporation des arômes sera donc plus efficace dans le verre évasé. Cependant, le champagne servi dans le verre évasé aura tendance à dissiper plus rapidement son gaz carbonique et à s'oxyder plus rapidement que s'il est servi dans la flûte étroite. Enfin, le volume du ciel gazeux, tel qu'il sera inhalé par le dégustateur, augmente considérablement du verre le plus étroit au verre le plus évasé. Le rôle du volume variable de l'espace de tête dans lequel le gaz carbonique et les molécules aromatiques volatiles se mélangent est actuellement en cours d'analyse dans notre laboratoire (figure 118).

Ces observations nous permettent de comprendre pourquoi l'expérience sensorielle varie tant suivant la forme du verre proposé pour la dégustation. Cette approche scientifique s'inscrit donc dans une démarche innovante et totalement complémentaire de celle du sommelier, dont le travail consiste à proposer au dégustateur un verre qui valorise au mieux les caractéristiques du champagne qu'il souhaite déguster. Nos travaux académiques pourraient ainsi permettre d'orienter le sommelier dans ses choix.

118. *La tomographie laser et l'emploi de colorants nous permettent de mettre au jour la façon dont le champagne tourbillonne et dissipe ses arômes dans ce verre très évasé, dessiné par Philippe Jamesse et destiné à la dégustation du champagne Veuve Clicquot.*







7

Autres histoires de bulles

Que nous racontent les bulles ?

Ainsi s'achève notre odyssée hédonique et scientifique au cœur d'une flûte de champagne, à l'échelle de la bulle... Nous espérons que vous avez pris autant de plaisir à découvrir les mécanismes scientifiques à l'origine de la formation des bulles dans une flûte, que nous en avons pris à les débusquer et à les analyser grâce aux outils de la science.

Il existe bien entendu une multitude d'autres disciplines scientifiques dans lesquelles les bulles, sous d'autres formes, ont un rôle majeur à jouer. Bulles et mousses interviennent dans une extraordinaire variété de phénomènes, qu'ils soient naturels ou provoqués par l'homme. Dans les pages qui suivent, j'ai souhaité mettre à l'honneur des scientifiques qui, eux aussi, ont parfois des bulles pour compagnons de jeu. Voici quelques-uns de ces autres chasseurs de bulles avec qui j'ai eu l'occasion d'échanger au cours des dernières années.

Des bulles de savon géantes

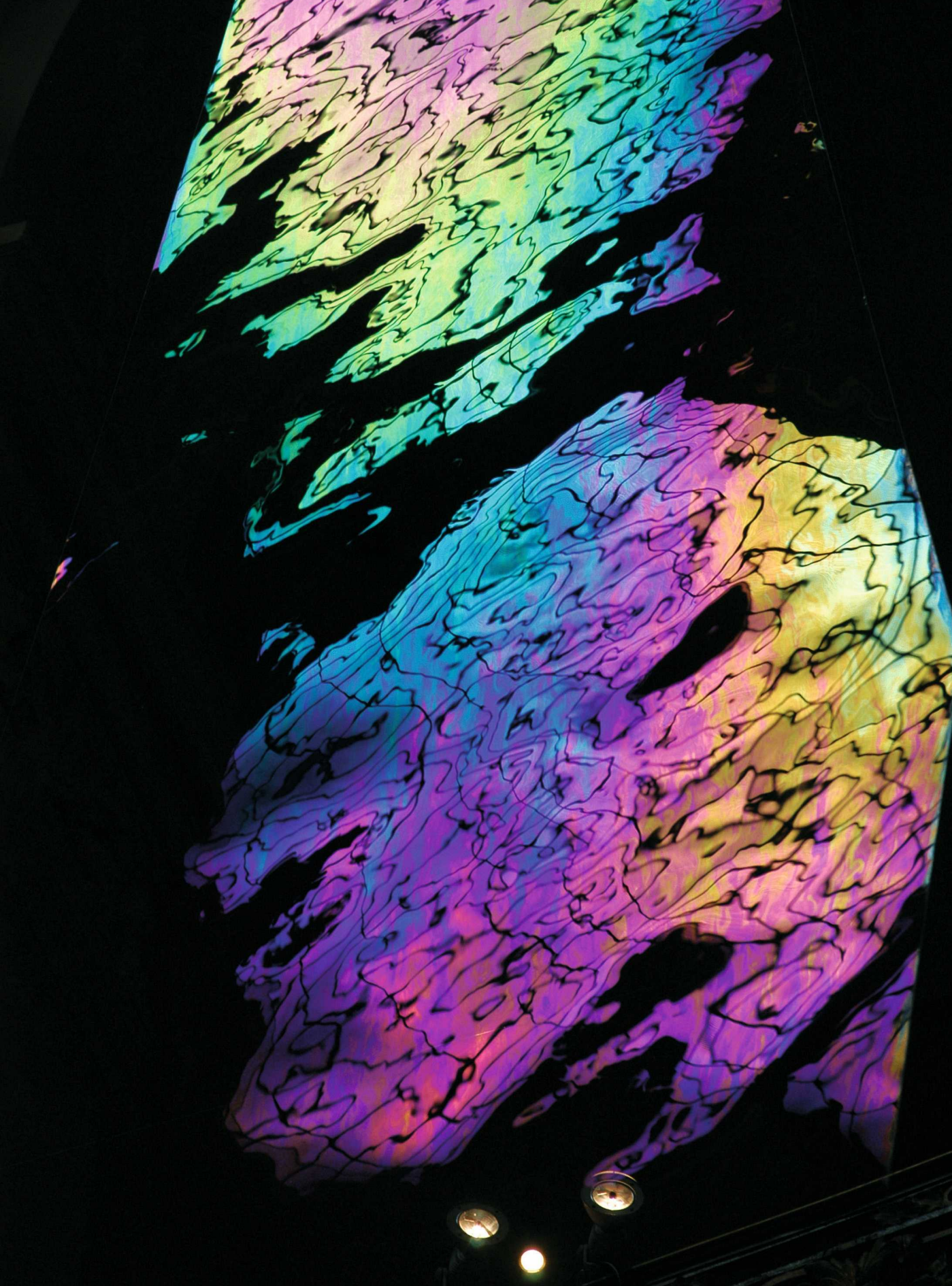
À l'échelle moléculaire, une bulle de savon consiste en une mince couche d'eau maintenue en « sandwich » entre deux couches de molécules de savon amphiphiles (qui plongent leurs têtes hydrophiles dans l'eau, et placent leurs queues hydrophobes dans l'air). Ce sont ces molécules amphiphiles qui permettent de retenir le poids de l'eau et qui empêchent ainsi le film de se rompre...

Quelle est la taille maximale que peuvent atteindre ces films de savon ? C'est la question à laquelle François Graner, physicien à l'Institut Curie, a souhaité répondre (figures 120). Pour y parvenir, il a fallu réquisitionner rien moins que le hall du Palais de la découverte et faire preuve de beaucoup de patience... Le record du film le plus



Ci-dessus et page de droite :
120. Gigantesque film de savon déployé dans le hall du Palais de la découverte, à Paris, en 2005.

Double page précédente :
119. Bulle qui éclate dans une mare de boue du Parc national de Yellowstone, aux États-Unis.



long a été battu en octobre 2005, avec un film de 18 mètres de haut ! Les couleurs irisées de ce film de savon géant sont totalement naturelles. Elles traduisent des modifications locales de l'épaisseur du film qui permettent à des couleurs bien spécifiques de se réfléchir sur les deux faces du mince film de savon. On se rend compte également de l'extraordinaire finesse de ce film (de l'ordre du millième de millimètre). Le souffle permet de le déformer considérablement et de former de gigantesques bulles qui pourront s'en détacher...

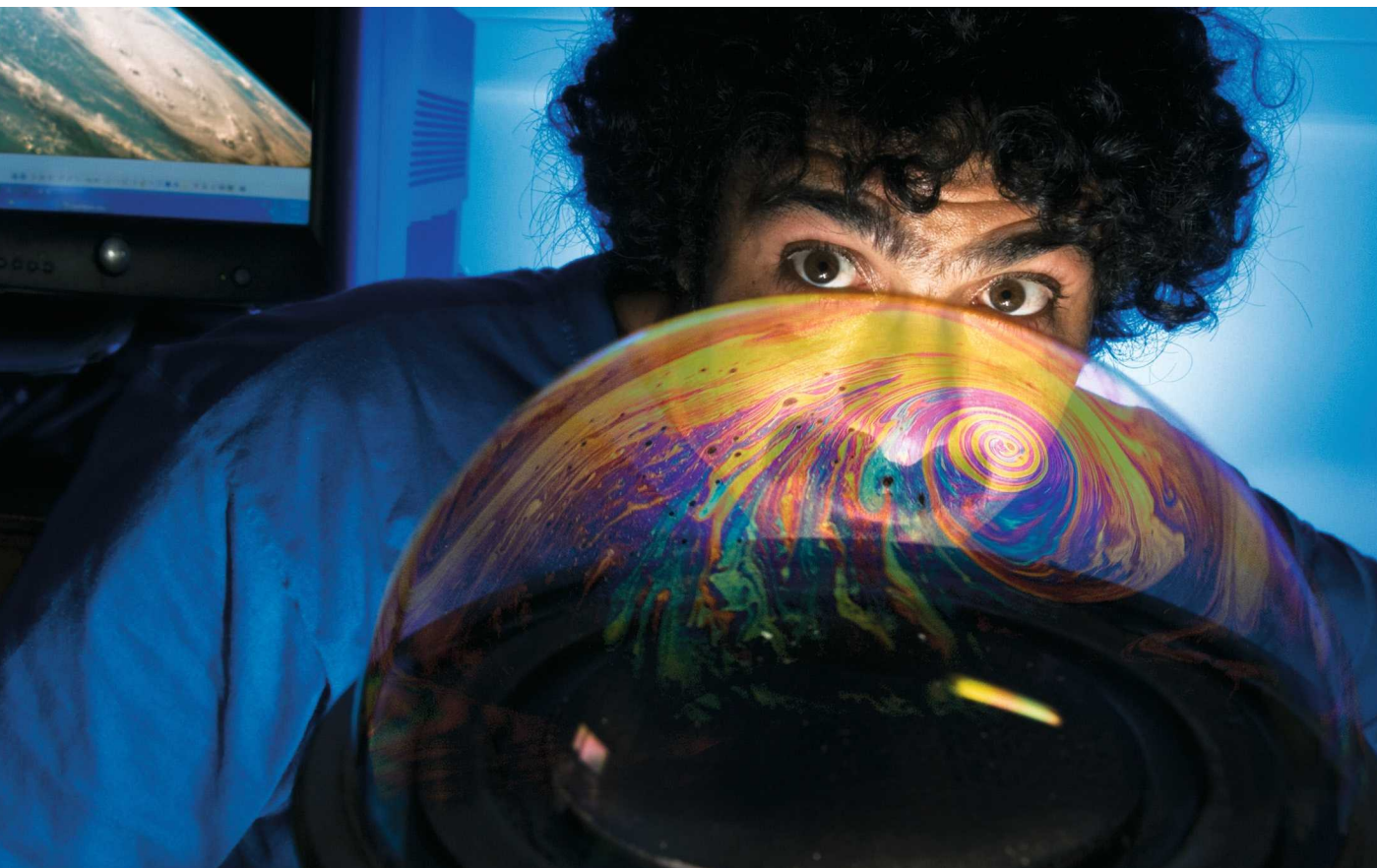
Des cyclones dans une bulle de savon !

L'atmosphère terrestre, siège des phénomènes climatiques, est une fine couche de 10 à 15 kilomètres d'épaisseur. En proportion de la taille du globe terrestre qui fait presque 13 000 kilomètres de diamètre, l'atmosphère terrestre s'apparente à un univers en deux dimensions. Elle peut ainsi se comparer, à échelle réduite, aux quelques microns d'épaisseur du film d'une bulle de savon de quelques centimètres de diamètre.

La Terre et son atmosphère réduites à... une bulle de savon ! Tel est le modèle audacieux imaginé par le physicien Hamid Kellay, professeur à l'université Bordeaux-I. Ce sont les différences de température à la surface du globe qui sont à l'origine des mouvements de l'atmosphère. Hamid Kellay a donc imaginé l'atmosphère terrestre comme une demi-bulle de savon posée sur un socle en laiton. Ce socle est chauffé pour simuler l'élévation des températures à l'équateur de la bulle, alors que l'unique pôle de la bulle est, lui, refroidi. « Au début de la vie de la bulle, on observe des panaches thermiques qui s'agitent en tous sens; puis il se forme un tourbillon unique, une spirale, qui ressemble à s'y méprendre à un cyclone (figure 121) », explique Hamid Kellay (figure 122). Le physicien et son équipe se sont donc mus en créateurs de cyclones. En étudiant ces tourbillons

121. Photo satellite du cyclone Floyd, à l'approche des côtes américaines, en septembre 1999.





et leur trajectoire en apparence chaotique, ils ont découvert que celle-ci relevait en fait du mouvement brownien bien connu des physiciens et formulé mathématiquement par Einstein. Forts de cette découverte, les scientifiques bordelais ont pris contact avec des météorologues de l'île de la Réunion, spécialisés dans l'étude des cyclones, et se sont penchés sur les trajectoires d'une dizaine de cyclones remarquables par leur puissance et leur durée de vie, tels Katrina, Ivan, Nicholas... Dans les boucles et les brusques changements de direction des cyclones atmosphériques qui se déplacent au-dessus des océans tropicaux, les scientifiques ont décrypté les mêmes propriétés statistiques des fluctuations de trajectoires que celles observées avec les bulles de savon.

122. À Bordeaux, au Centre de physique moléculaire, optique et hertzienne, le physicien Hamid Kellay scrute la formation et le déplacement des tourbillons à la surface d'une bulle de savon.



Des bulles visqueuses

Il existe des fluides bien plus visqueux que l'eau savonneuse ou le champagne, d'où s'échappe également du gaz sous forme de gigantesques bulles : ce sont des bulles de gaz carbonique, d'anhydride sulfureux et de vapeur d'eau qui, lorsqu'elles remontent dans le magma terrestre, sont à l'origine des éruptions volcaniques. Le volcanologue allemand, Tom Pfeiffer, est passé maître dans l'art de photographier les volcans en activité. On lui doit notamment des clichés pris lors d'une éruption de l'Etna, en juillet 2001 (figures 123). On peut y voir une gigantesque bulle de lave en fusion qui éclate et projette des scories hors du cratère.

123. Immortaliser les éruptions volcaniques ! Tel est le passe-temps favori du volcanologue allemand Tom Pfeiffer. Sur ce cliché, une bulle de lave en fusion explose dans le cratère de l'Etna, lors de l'éruption de juillet 2001.



Moins catastrophiques sont les remontées de gaz à la surface des mares de boue observables dans presque toutes les zones géothermiques et volcaniques de la planète. Mon collègue et ami Philippe Schmitt-Kopplin, chercheur au laboratoire de biogéochimie du centre Helmholtz, à Munich, parcourt régulièrement le globe en quête d'échantillons pour les analyses qu'il mène dans son laboratoire. En 2010, Philippe se rend au parc national de Yellowstone, aux États-Unis, dans le Nord-Ouest du Wyoming. Ce parc est célèbre pour ses phénomènes géothermiques. Il abrite les deux tiers des geysers de la planète et de nombreuses sources chaudes et autres mares de boue, d'où s'échappent des bulles de gaz, tels de fantastiques chaudrons en ébullition permanente... Connaissant mon addiction pour les bulles sous toutes leurs formes, Philippe immortalise quelques-unes d'entre elles. On

124. Séquence photographique qui illustre l'explosion d'une bulle de gaz à la surface d'une mare de boue, provoquant l'éjection d'un jet de boue analogue à celui projeté par l'éclatement d'une bulle de champagne.

peut ainsi voir des bulles qui éclatent à la surface de ces mares de boue en ouverture du présent chapitre (pages 158-159) et sur la figure 124. Sur cette dernière, on retrouve une structure familière qui rappelle la formation et la rupture du jet de champagne en fines gouttelettes.

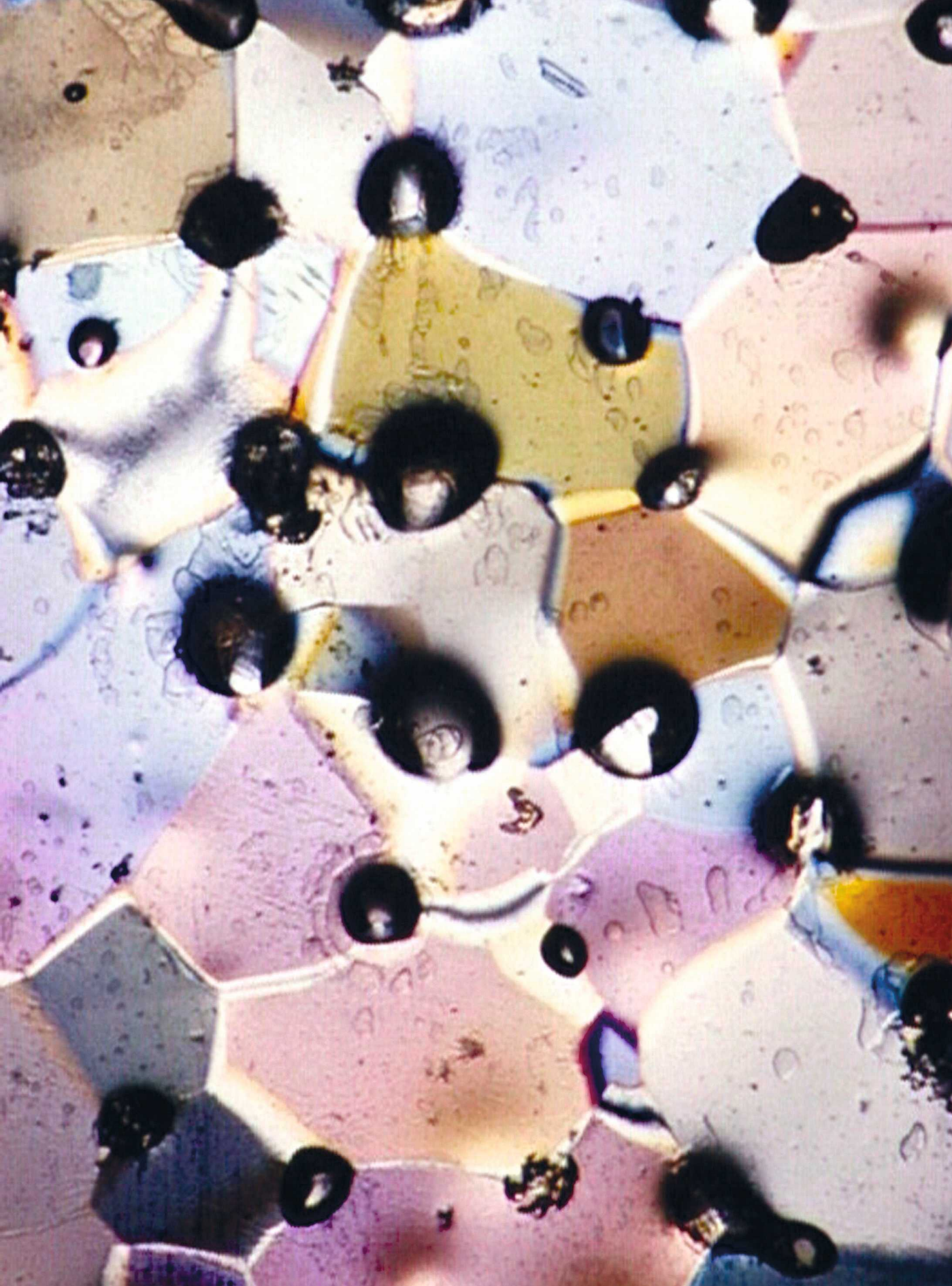
Des bulles piégées dans la glace

Lorsqu'on pense aux bulles, le sens commun veut que l'on imagine plutôt des bulles de gaz formées dans un liquide. Ce n'est pas toujours le cas. Des bulles peuvent se trouver piégées dans une « matrice » solide. Les trous de la mie du pain, par exemple, ne sont rien d'autre que des bulles de gaz (issu de l'action des levures) emprisonnées dans la pâte rendue solide par la cuisson.

À l'occasion d'un congrès à Nantes en 2009, j'ai eu l'occasion de rencontrer Amaëlle Landais, chercheuse au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement de Gif-sur-Yvette. Amaëlle s'intéresse à l'étude des changements climatiques qu'a connus notre planète par le passé. L'un des moyens pour les étudier consiste à analyser la composition chimique fine de l'atmosphère qui baignait le globe autrefois. Mais comment faire pour remonter le temps et se procurer des échantillons témoins de ces époques reculées?...

Lorsqu'il neige, les flocons qui tombent sur le sol gelé emprisonnent de l'air. Sous les latitudes polaires, la neige ne fond pas. Elle s'accumule au fil des siècles en d'épaisses couches très denses qui ne permettent pas à l'air piégé de circuler. Il reste des traces de ces atmosphères passées, figées dans la glace sous forme de minuscules bulles d'air. Le tour est joué ! En forant l'épaisse couche de glace, on peut ainsi remonter des carottes qui retiennent en leur sein des bulles d'air, vestiges de l'atmosphère de l'époque à laquelle la neige est tombée. On peut voir sur le cliché de la figure 125 (en lumière polarisée) de minuscules bulles d'air (en noir) piégées dans un réseau de cristaux de glace.

125. Photographie, prise en lumière polarisée, d'une tranche de carotte de glace. Les inclusions sombres sont de minuscules bulles d'air piégées dans un réseau de cristaux de glace rendus colorés par la lumière polarisée. La nature nous offre ici un kaléidoscope inattendu et du plus bel effet!



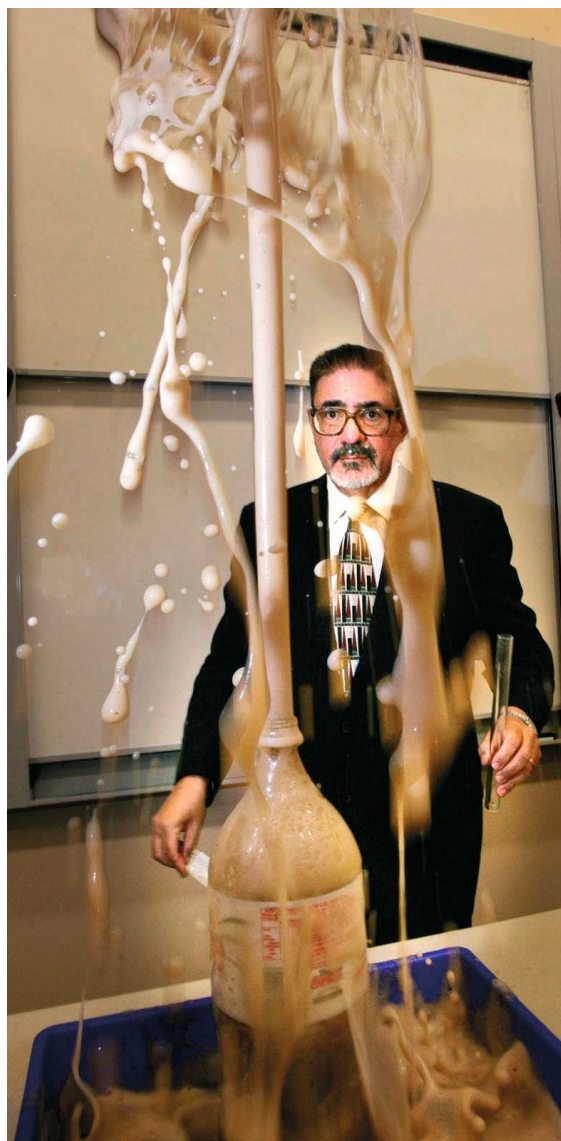
Les carottes de glace, en Antarctique et au Groenland, sont donc des témoins précieux du climat passé. L'analyse fine de la composition chimique des bulles d'air piégées dans ces glaces permet alors de remonter à l'étude des climats du passé, afin de comprendre, à terme, les éventuels changements climatiques futurs...

Richard Zare. un touche-à-tout facétieux

Richard Zare est un chimiste de l'Université de Stanford, aux États-Unis. Il est l'inventeur de la fluorescence induite par laser, une technique largement utilisée pour l'étude de la dynamique réactionnelle en chimie. Richard Zare a consacré sa vie à la science. Il a reçu le prix Wolf en chimie (considéré comme le plus prestigieux après le prix Nobel) pour ses applications ingénieuses des techniques laser en chimie analytique. Richard Zare a également participé à l'aventure spatiale en ayant l'immense privilège de pouvoir analyser des échantillons de roches lunaires ainsi que quelques-unes des plus précieuses météorites tombées récemment sur Terre.

Mais Zare est un scientifique facétieux et touche-à-tout. On lui doit également le tout premier article intitulé « Through a beer glass darkly » sur l'étude de la dynamique ascensionnelle des bulles dans la bière. Récemment, comme l'atteste le cliché de la figure 126, il a apporté sa contribution à une expérience spectaculaire qui a fait le « buzz » sur Internet. Procurez-vous une bouteille de soda et ajoutez-y une pastille de bonbon Mentos (il semble que l'effet soit encore plus marqué s'il s'agit d'un soda light). La pastille dense tombe au fond de la bouteille. Sa surface, très irrégulière, devient rapidement le siège de très nombreux sites de nucléation de bulles qui vont considérablement grossir pendant leur ascension vers la surface, forçant ainsi le liquide à jaillir hors de la bouteille sous la forme d'un puissant jet de

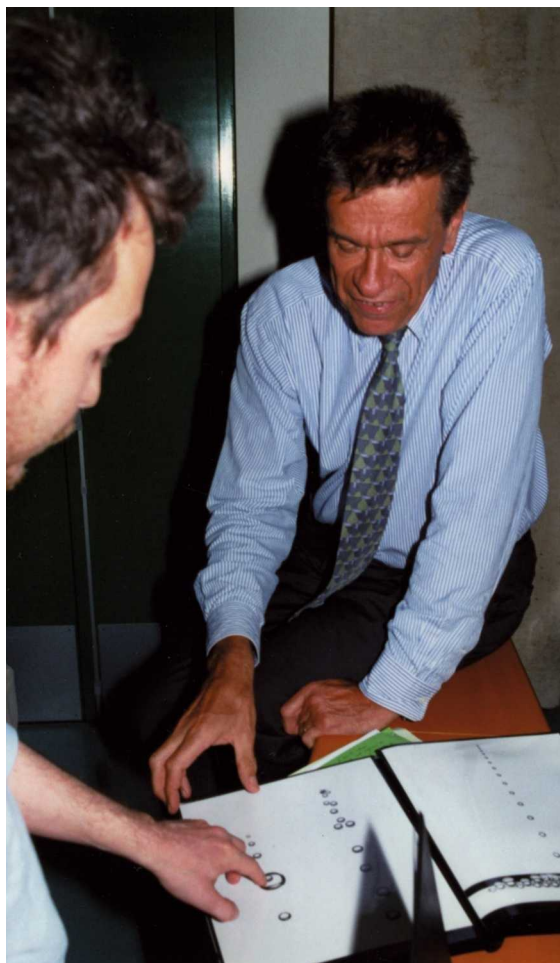
126. Même les chercheurs les plus sérieux s'adonnent parfois avec bonheur à des expériences de collégiens. Richard Zare reproduit ici l'expérience, désormais mythique, qui consiste à jeter un bonbon Mentos dans un célèbre soda, avec pour conséquence l'expulsion d'un puissant jet de mousse.



mousse. Même les plus brillants scientifiques peuvent se passionner pour des phénomènes en apparence futiles...

Pierre-Gilles de Gennes, un Nobel pas comme les autres...

La contribution de Pierre-Gilles de Gennes aux sciences est considérable. C'est très probablement l'un des plus illustres physiciens de tous les temps. Lauréat unique du prix Nobel en 1991, il a été qualifié de « Newton du xx^e siècle » par les membres de l'Académie royale de Suède, pour sa contribution dans des domaines très variés de la science, depuis les matériaux supraconducteurs, jusqu'aux cristaux liquides, en passant par les bulles et les mousses... Encore étudiant en licence à l'université Pierre-et-Marie-Curie, j'ai eu la chance de pouvoir assister à plusieurs des conférences qu'il a données sur les bulles et les mousses suite à son prix Nobel, en 1991. Quel orateur et quel charisme ! Là où d'autres enseignants se seraient perdus (et leur public avec) en équations rébarbatives et en démonstrations mathématiques arides pour les non-initiés, de Gennes savait capter l'attention de son auditoire en utilisant un langage limpide et volontairement imagé. L'année suivante, j'ai eu le privilège de pouvoir faire mon stage de maîtrise au Collège de France dans le laboratoire de physique de la matière condensée dirigé par de Gennes. Un an après l'obtention de son prix Nobel, l'« effervescence » était encore palpable dans le laboratoire. Cette ambiance, extraordinairement stimulante, a contribué à consolider encore un peu plus ma vocation naissante pour la recherche et pour les bulles... Quelques années plus tard, Pierre-Gilles de Gennes m'a fait l'immense plaisir de préfacer ma première exposition de photos de bulles (de champagne) et de présenter à l'Académie des sciences l'un de mes premiers articles sur l'éclatement d'une bulle et les déformations qu'elle induit



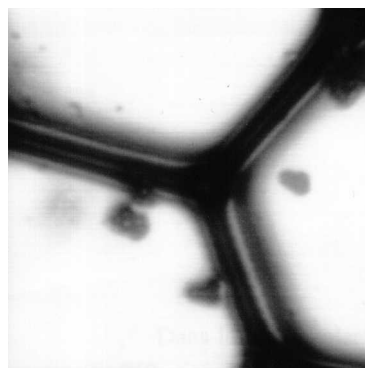
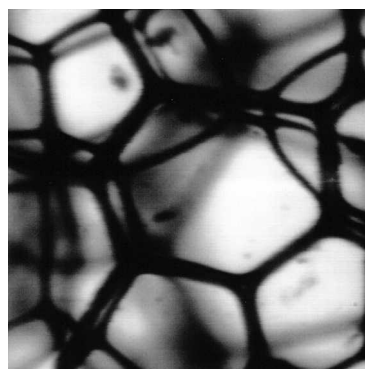
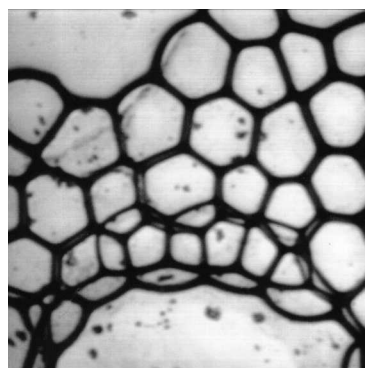
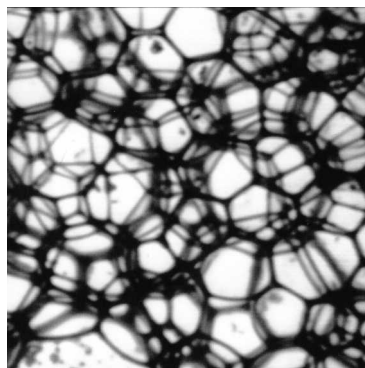
127. À la suite d'une conférence donnée par Pierre-Gilles de Gennes à l'université de Reims en mai 2000, nous entamons une conversation sur le comportement des bulles au sein d'une flûte de champagne. Le sujet et les photographies amusent de Gennes qui écrira la préface de ma première exposition de photos.

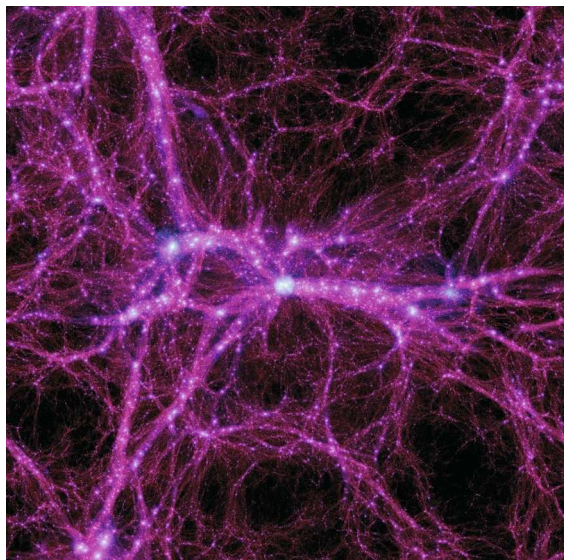
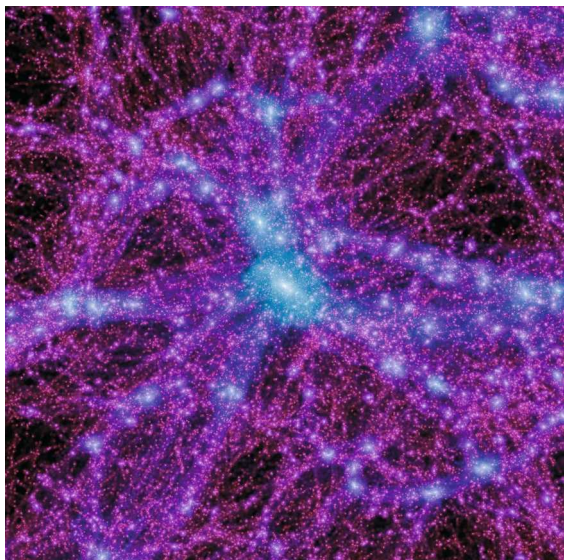
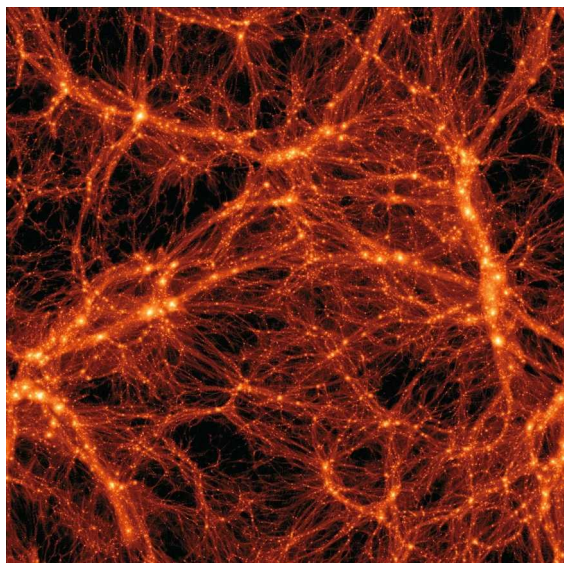
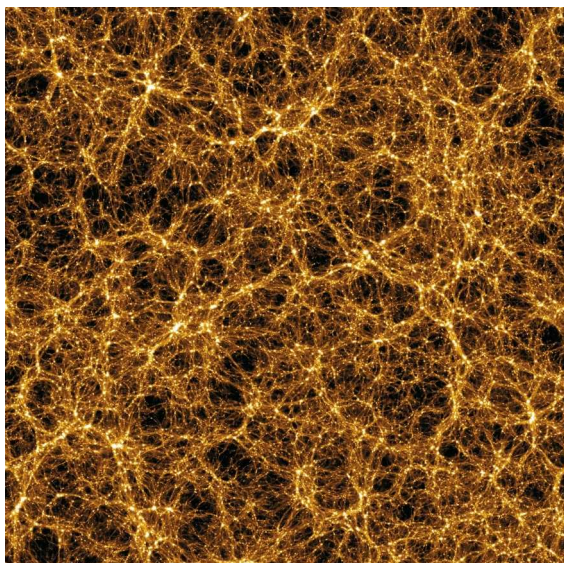
sur ses voisines (ce sont les « fleurs de bulles » du chapitre 5). Je mesure aujourd'hui la chance que j'ai eue de croiser son chemin (figure 127). Son ouvrage *Les Objets fragiles*, coécrit avec Jacques Badoz et publié en 1994 chez Plon, reste aujourd'hui encore une extraordinaire source d'inspiration et de plaisir.

Romain Teyssier et la mousse cosmique...

Nous avons tous en tête les photographies du cosmos que le télescope spatial Hubble nous offre depuis une vingtaine d'années maintenant. Ces images, d'une beauté à couper le souffle, associées aux textes souvent poétiques de grands vulgarisateurs, tel l'astrophysicien Hubert Reeves, ont également bercé mon adolescence et continuent de nourrir mon imaginaire aujourd'hui. L'astrophysique est une science qui invite à la contemplation. Cette quête des origines de l'Univers et des structures qui le composent à très grande échelle peut sembler bien éloignée de nos préoccupations effervescentes, et pourtant...

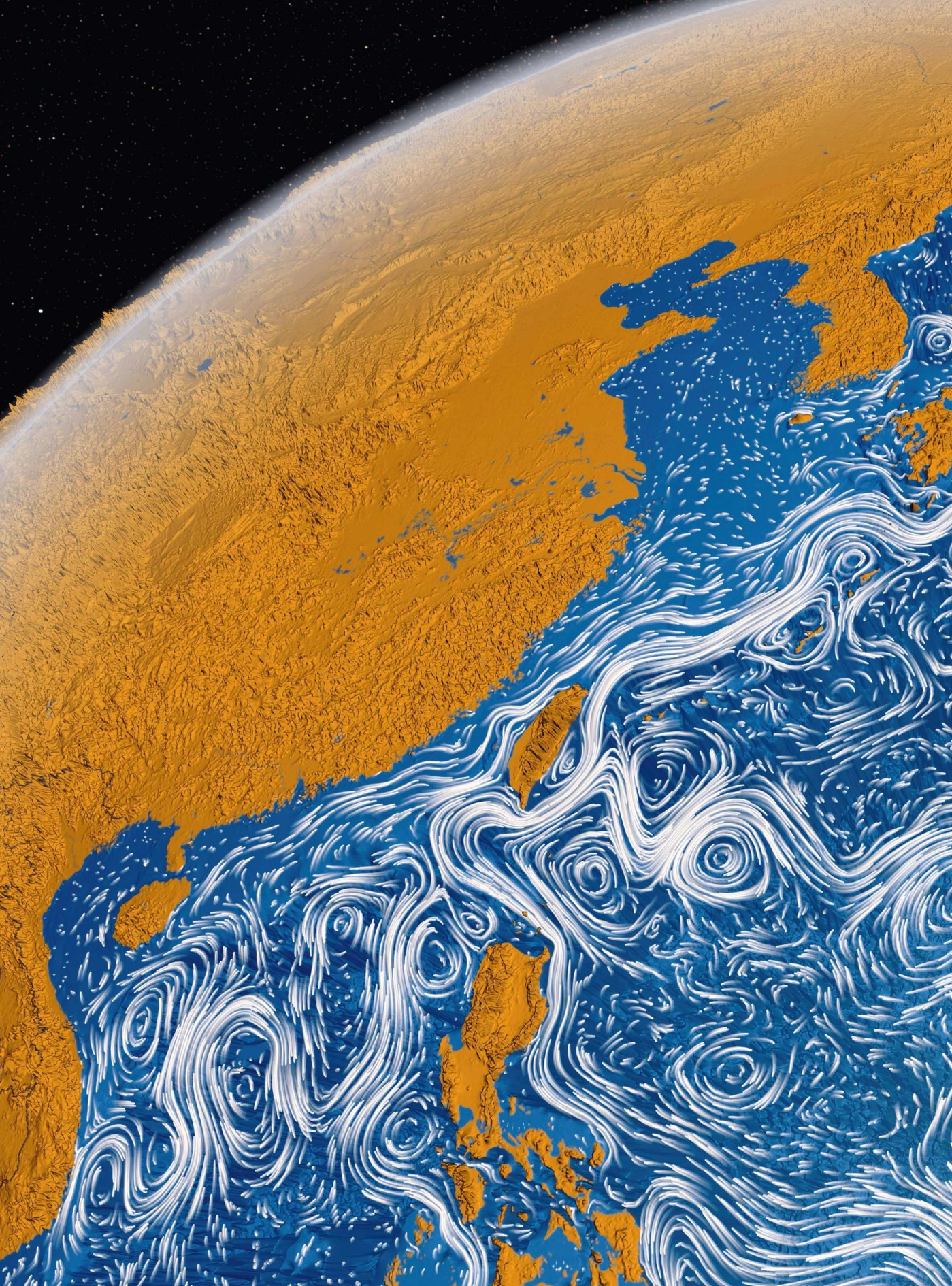
Des études récentes montrent que la répartition des galaxies dans le cosmos n'est pas uniforme, loin s'en faut. Une équipe de chercheurs français, sous la direction de Romain Teyssier, a mené à terme la plus grande simulation jamais réalisée à ce jour sur la formation des grandes structures de l'Univers. Leurs conclusions sont extraordinaires. Les amas de galaxies s'organisent en longs filaments, laissant ainsi de vastes zones de vide quasi intégral. Cette structure s'apparente effectivement à celle d'une « mousse cosmique » dont les parois des bulles seraient formées d'amas de galaxies, et le creux des bulles de gigantesques zones vides. Les photographies des figures 128 et 129, qui comparent la structure d'une mousse de bière avec celle de l'Univers à très grande échelle, laissent songeur. Les deux infinis se rejoignent, et les bulles n'ont pas fini de nous faire rêver...





Page de gauche : 128. Photographies illustrant les différentes échelles de structure d'une mousse de bière sur la paroi d'un verre (de haut en bas). La mousse s'organise spontanément en cellules polyédriques.

129. Simulation numérique multi-échelle de l'organisation des amas de galaxies dans l'Univers. À partir d'une bouillie originelle informe, la matière s'organise spontanément en nappes ou filaments qui laissent d'immenses bulles de vide quasi intégral : une sorte de mousse cosmique, en quelque sorte...





8

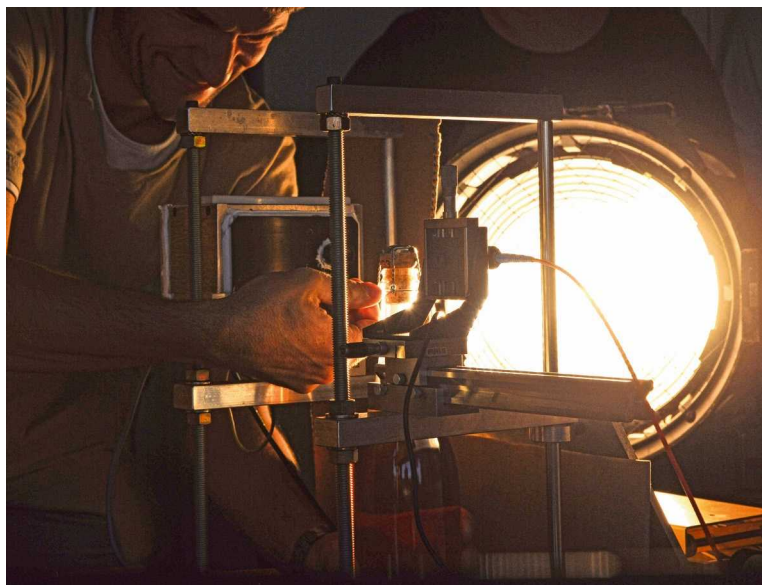
Un océan
dans une
flûte de
champagne

De l'infiniment petit à l'infiniment grand

Il y a quelques années, nous avons créé l'équipe « Effervescence, champagne et applications », rattachée au Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (GSMA), une unité mixte du CNRS de l'université de Reims. L'activité première de l'équipe s'articule autour de l'étude des phénomènes d'effervescence et de mousse. La transdisciplinarité est au cœur de notre démarche. Les chercheurs de l'équipe explorent les nombreuses passerelles qui existent entre l'effervescence du champagne et la formation de bulles dans d'autres disciplines. La science du champagne s'enrichit ainsi progressivement de l'expérience et du savoir-faire de chercheurs issus d'autres horizons. Nous vous livrons dans cet ultime chapitre un aperçu de quelques phénomènes qui accompagnent une dégustation de champagne, mais se retrouvent aussi à une tout autre échelle qui est celle de l'atmosphère, de l'océan, et même du cosmos...

Le débouchage du champagne en slow motion !

Il existe aujourd'hui des caméras ultrarapides susceptibles de nous dévoiler des phénomènes d'une extrême fugacité. Nous avons décidé d'utiliser une caméra de ce type afin d'examiner le détail des mécanismes qui accompagnent le débouchage d'une bouteille, sous l'effet de sa pression. Or la pression qui règne dans la bouteille augmente avec sa température. Elle varie de 5 bars à 6 °C, à presque 8 bars à 20 °C. Le rôle de la température a donc retenu toute notre attention. Filmer à haute vitesse nécessite énormément de lumière. Un projecteur de cinéma éclaire la scène en « backlight » (figure 131). La séquence vidéo de la figure 132 saisit le tout premier millième de seconde qui accompagne le débouchage d'une bouteille stockée au frigo, à 6 °C. La décompression brutale du volume de gaz qui jaillit hors du col s'accompagne d'une chute de sa température.

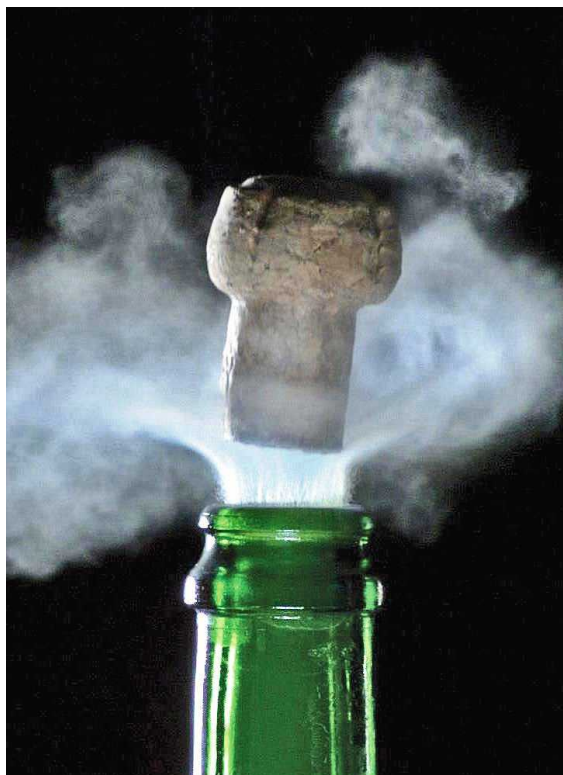
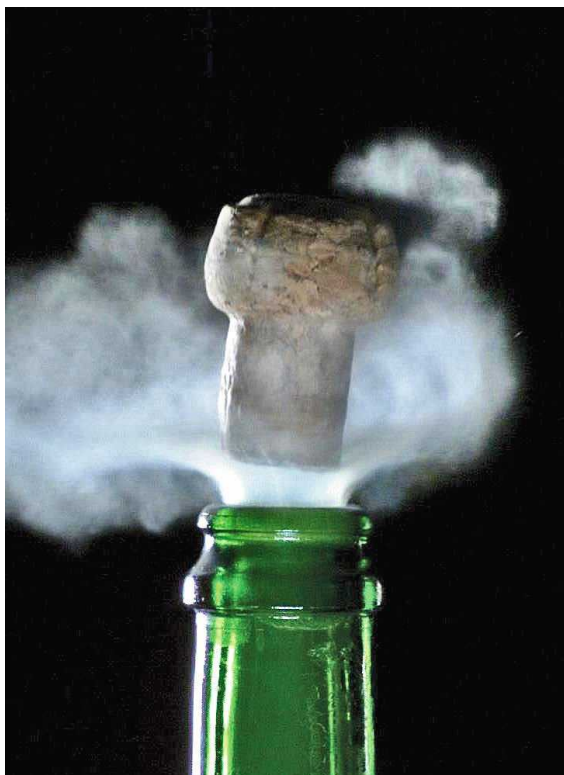
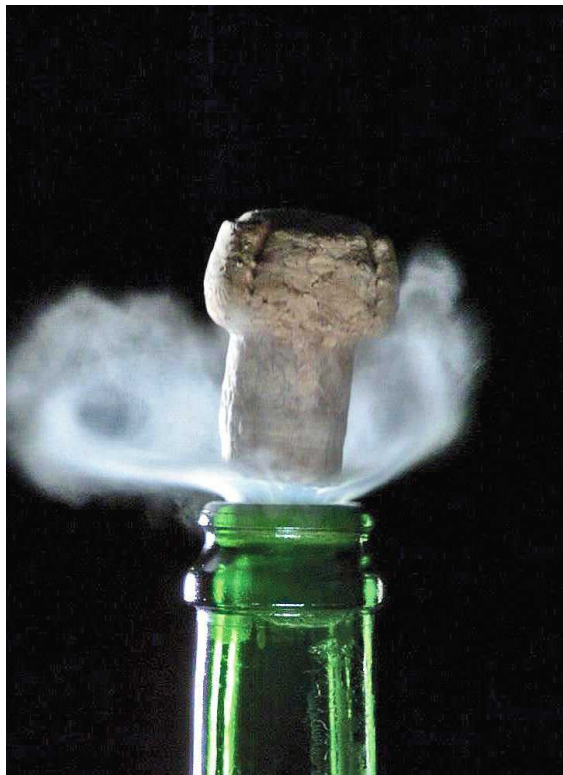
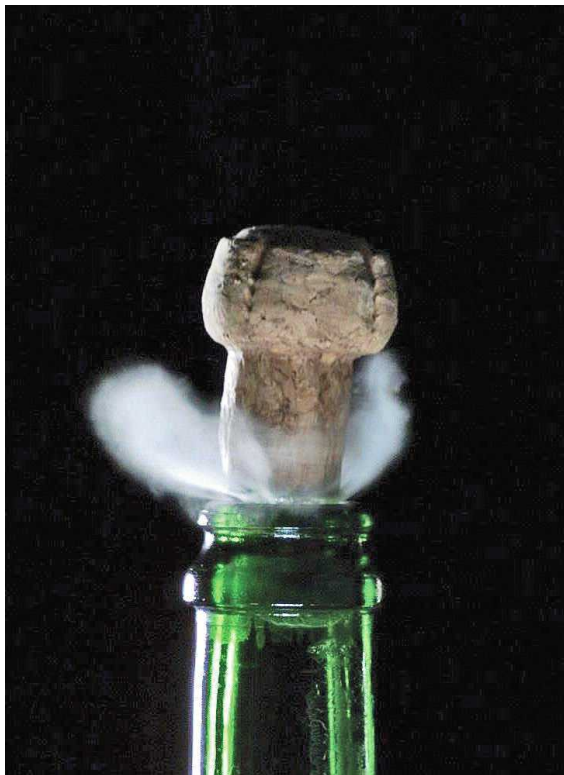


Double page précédente

130. Les courants océaniques de surface s'organisent en cellules tourbillonnaires qui rappellent celles agitant le champagne dans une flûte.

131. L'imagerie haute vitesse nécessite une grande puissance lumineuse, apportée ici par un projecteur de cinéma de 5000 watts.

Page de droite : 132. Nuage de condensation blanchâtre qui accompagne systématiquement le débouchage des bouteilles stockées à basse température (environ 300 μ s séparent chaque cliché).

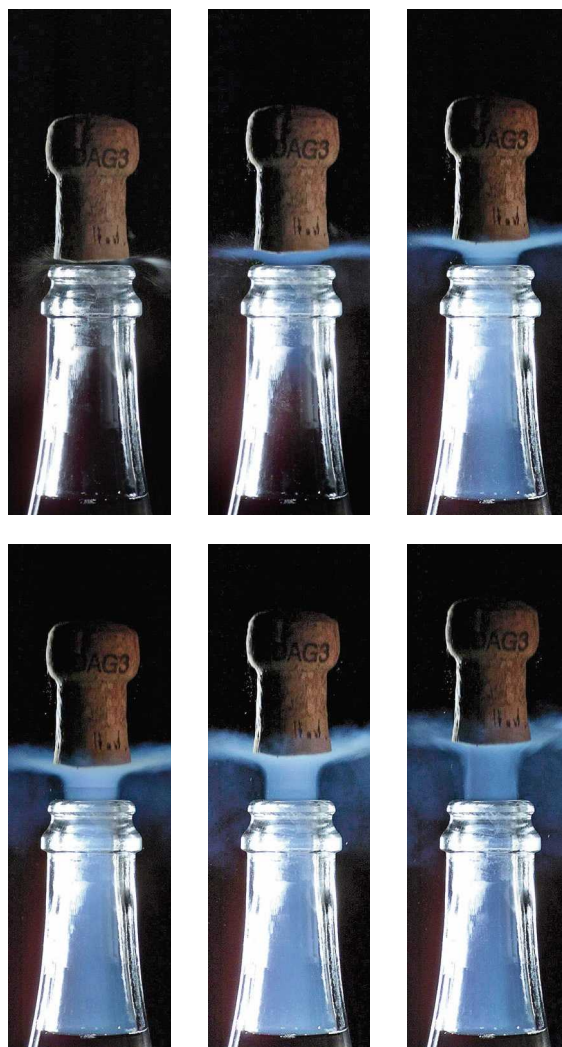


Les scientifiques parlent d'une détente adiabatique. Cette chute brutale de la température provoque instantanément la condensation de la vapeur d'eau environnante sous forme d'un brouillard de minuscules gouttelettes dont les tailles varient de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. C'est la diffusion de la lumière du projecteur par ces gouttelettes – de façon quasi isotrope dans l'espace et pour toutes les longueurs d'onde du spectre visible – qui confère au panache de condensation une teinte blanchâtre⁵.

À une tout autre échelle qui est 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 qu'ils contiennent en masses nuageuses, rendues visibles par diffusion de la lumière solaire.

Comme le bleu du ciel...

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 allait nous réserver une surprise. Pour ces bouteilles, sous une pression plus importante de l'ordre de 8 bars, le nuage de fumée blanchâtre disparaît, comme on peut le voir sur la séquence de la figure 133. Dans le sillage du bouchon qui saute, on retrouve une structure bien plus éphémère, moins étendue et surtout... étrangement bleutée. 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, si la taille de ces noyaux devient inférieure aux longueurs d'onde du spectre de la lumière ambiante, les noyaux diffusent bien plus efficacement les

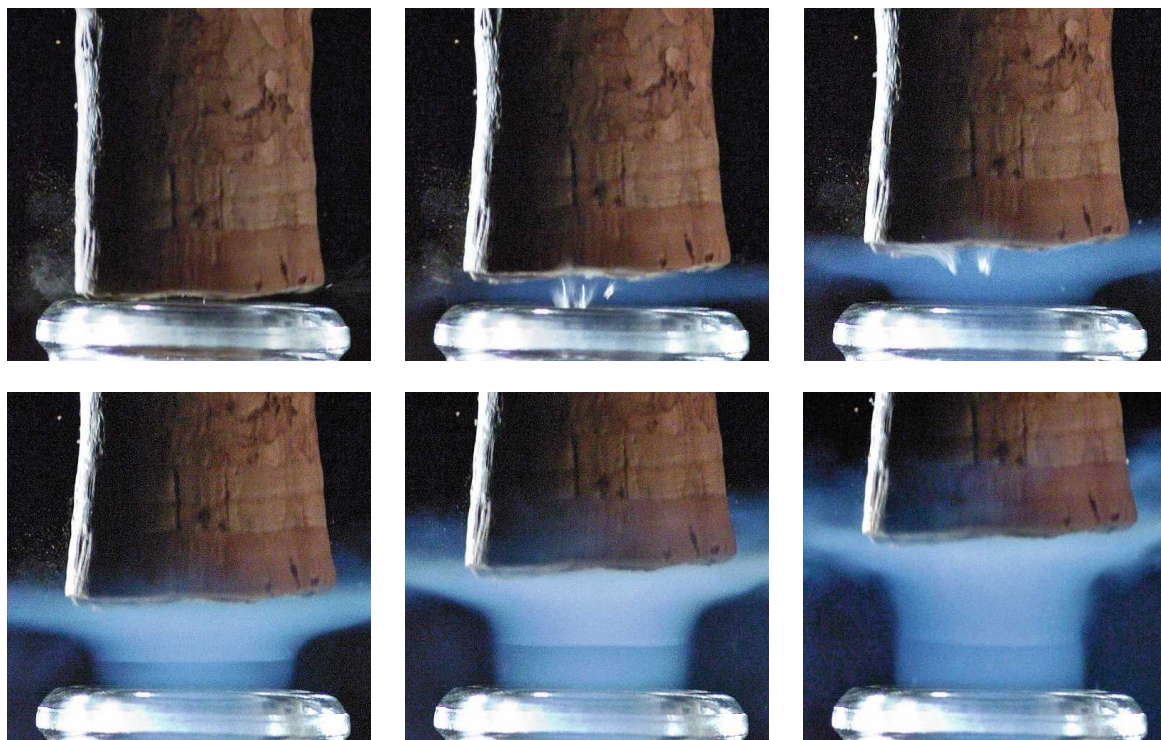


133. Lorsque le champagne est stocké à température ambiante, le nuage de condensation qui jaillit hors du col de la bouteille apparaît curieusement bleuté et bien moins étendu (environ 200 μ s séparent chaque cliché).

petites longueurs d'onde du spectre, et donc la lumière bleue. Le nuage apparaît alors bleuté et non plus blanc. C'est le même phénomène qui explique d'ailleurs 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, donnant ainsi cette couleur à l'atmosphère terrestre.

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 (figure 134). 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. Ce sont les parois des cellules du liège qui confèrent au bouchon de champagne son extraordinaire résilience.

134. On identifie clairement ce qui semble être une onde de choc, progressant dans le sillage du bouchon qui jaillit, parallèlement au goulot de la bouteille (environ 100 μ s séparent chaque cliché).



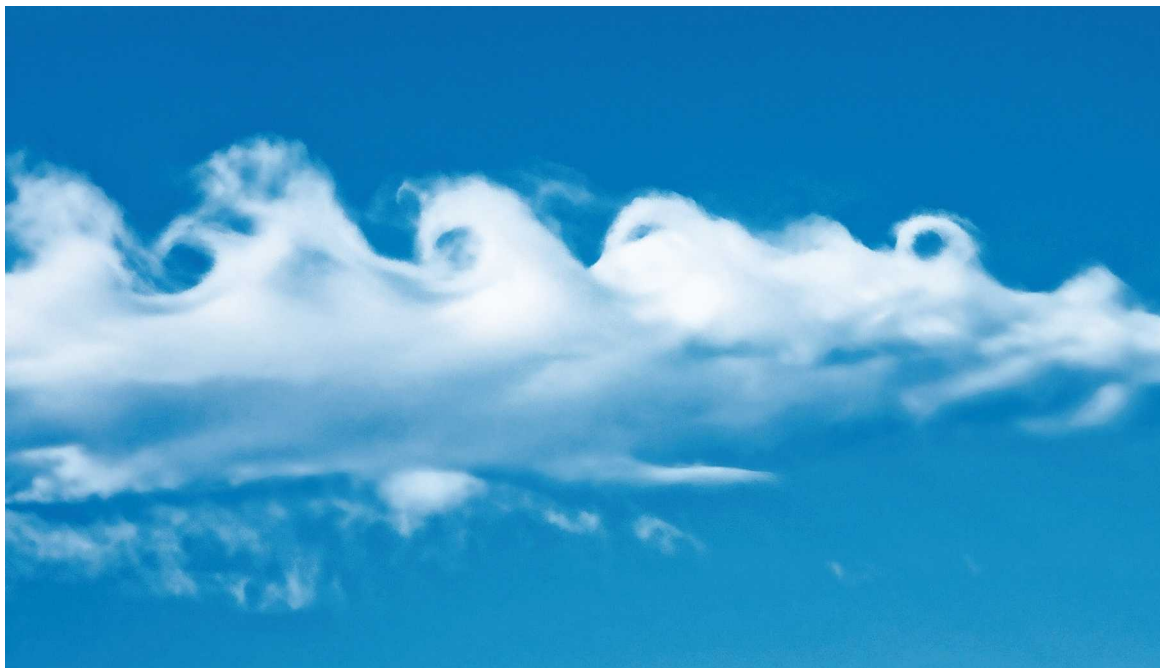
Une instabilité bien connue des océanographes

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 qui s'échappe parallèlement au goulot de la bouteille et dont les caractéristiques aérodynamiques diffèrent nettement de celles du panache qui accompagne un débouchage brutal (figure 135). On reconnaît une instabilité, dite de Kelvin-Helmoltz, qui apparaît à la frontière entre deux couches de fluides qui glissent l'une sur l'autre. Des ondulations voient le jour au sommet de cette fumerolle, puis déferlent, un peu comme des vagues à la surface de l'océan. Il s'agit d'un phénomène bien connu des océanographes et des météorologues. En météorologie, ces instabilités apparaissent parfois à la frontière entre les



135. Lorsque la bouteille est débouchée en retenant délicatement le bouchon, le panache de condensation qui accompagne la décompression du gaz carbonique est généralement parcouru d'une minuscule ondulation qui rappelle le déferlement d'une vague. Il s'agit d'une instabilité dite de Kelvin-Helmoltz, bien connue des physiciens.

136. En météorologie, l'instabilité de Kelvin-Helmoltz apparaît parfois au sommet d'une bande nuageuse.





couches nuageuses et le ciel clair (figure 136). En océanographie, on les retrouve lors de variations brutales de la densité de l'eau, comme à l'embouchure d'un fleuve, lorsque les eaux douces et peu denses se mélangent à l'eau de mer salée et donc plus dense. On les retrouve même en astrophysique ! La structure en bandes de l'atmosphère de Jupiter, avec des vents contraires atteignant plusieurs centaines de kilomètres par heure, est le siège de spectaculaires instabilités de Kelvin-Helmoltz (figure 137).

La ronde des étoiles

En plus de leur rôle esthétique évident en dégustation, les bulles qui remontent dans le verre génèrent des tourbillons au cœur du champagne. Ce processus, hélas invisible à l'œil nu, peut être mis en évidence par un procédé bien connu des physiciens et décrit au chapitre 4 : la tomographie laser. Ces mouvements tourbillonnaires ont

137. L'atmosphère de Jupiter, agitée de vents très violents, est aussi le siège de nombreuses instabilités de Kelvin-Helmoltz.



une importance considérable. Ils renouvellent en permanence la surface libre du champagne en composés volatils odoriférants, accélérant ainsi l'évaporation des arômes du vin. Notons d'ailleurs que l'olfaction d'un vin tranquille (incapable de tourbillonner par lui-même) se fait 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, nul n'est besoin d'agiter son verre. L'effervescence joue ce rôle à merveille en faisant tourbillonner le champagne dans un verre au repos (figure 138).

138. *La tomographie laser met en évidence les mouvements circulaires qui agitent le champagne à sa surface.*



Nous ne résistons pas au plaisir de faire un parallèle visuel entre ces tourbillons mis en évidence par tomographie laser et la course des étoiles dans le ciel. La Terre tourne autour de son axe et effectue une révolution complète en 24 heures. En prenant une photo des étoiles du ciel nocturne avec un long temps de pause, il devient possible de matérialiser cette rotation de la Terre autour de son axe (figure 139). En effet, l'appareil photo n'est fixe qu'en apparence puisqu'il tourne avec la Terre. Dès lors, seule l'étoile polaire, dans le prolongement de l'axe de rotation terrestre, apparaît fixe, toutes les autres étoiles du ciel semblant tourner autour

139. Du point de vue graphique, la course des étoiles dans le ciel nocturne s'apparente à la rotation du champagne dans la flûte...

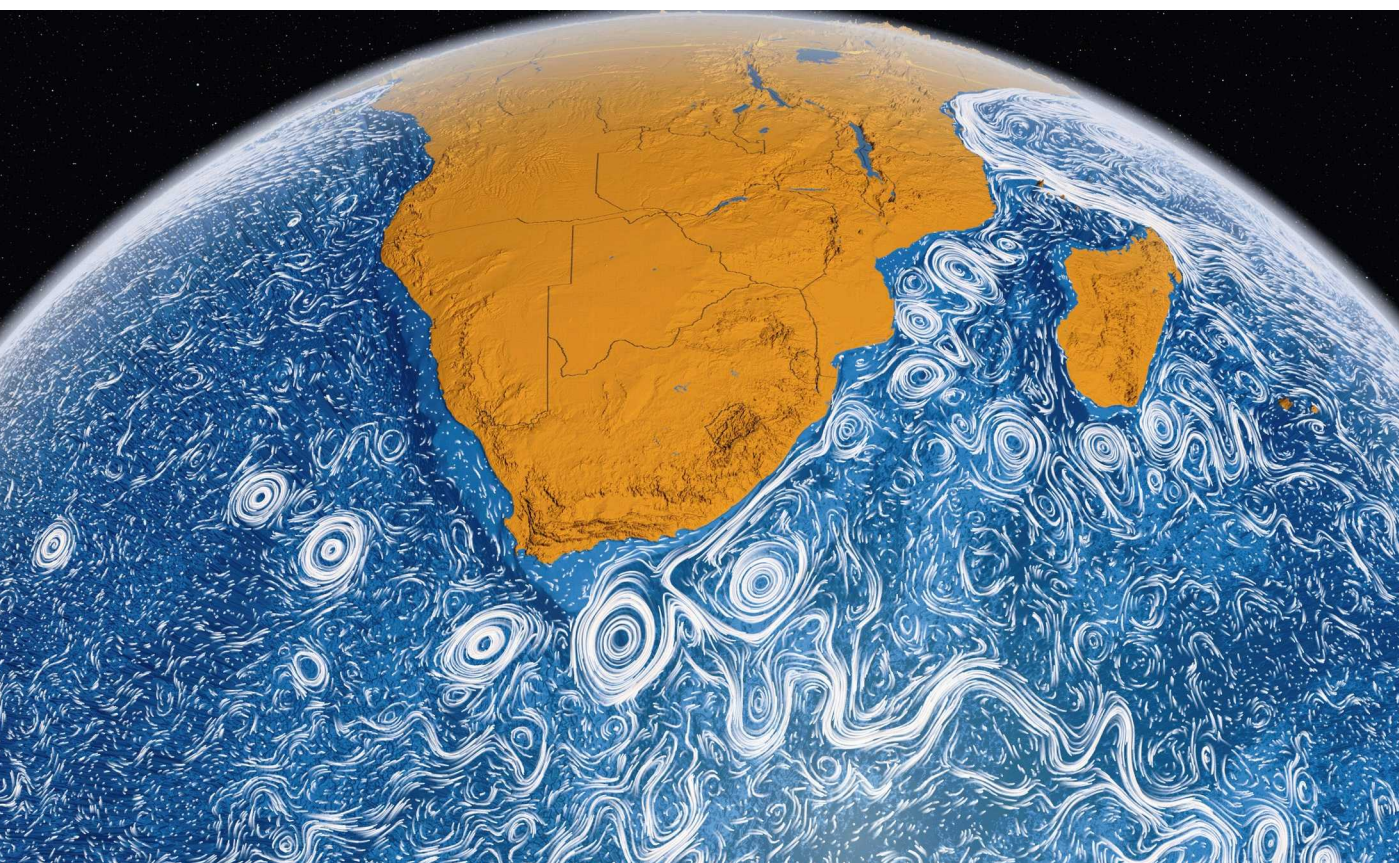
d'elle. Il en résulte une très belle analogie graphique entre les tourbillons qui agitent le champagne et la course des étoiles dans le ciel...

Le tourbillon des océans

Prenons encore un peu de hauteur 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 décide de synthétiser l'ensemble des données satellitaires concernant la circulation océanique de surface. 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 (figure 140). 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 bouge et s'organise spontanément en de multiples cellules convectives (figure 141), tout comme le font les courants océaniques à la surface du globe.

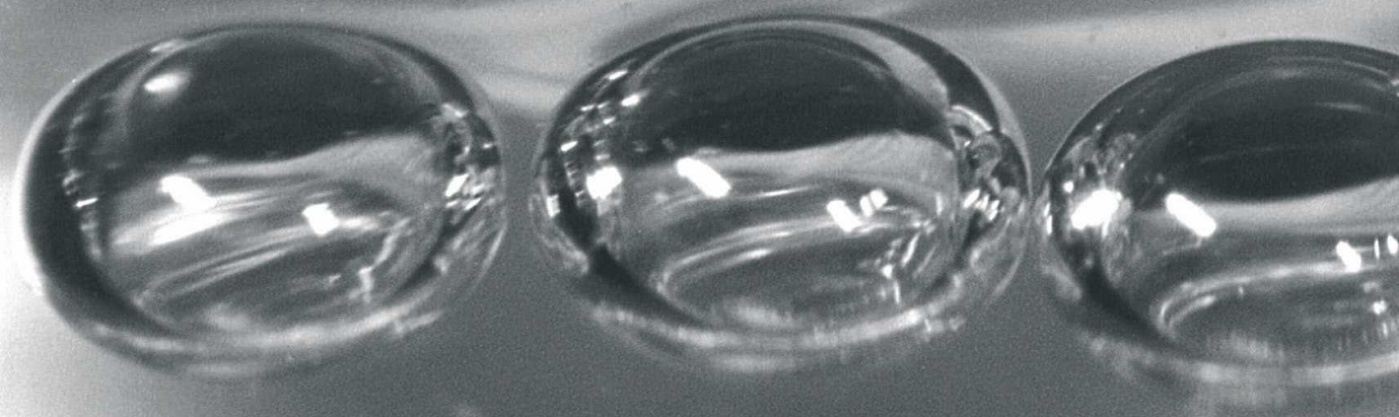
Le microcosme de la flûte de champagne rejoint le macrocosme de la surface océanique ! Émerveillons-nous de cette leçon de choses à portée de nos lèvres, rendue possible grâce aux progrès de la science et à la curiosité de celles et ceux qui la font. L'infiniment petit de la flûte de champagne est une leçon sur l'infiniment grand qui nous entoure et dans lequel l'homme se retrouve plongé...





140. À grande échelle,
et à proximité des continents,
les courants océaniques s'organisent
en une multitude de cellules
tourbillonnaires, comme
le démontrent les images prises
par un satellite de la NASA.

141. À l'échelle de votre flûte,
le champagne tourbillonne aussi à
proximité des parois, un peu comme
le fluide océanique à proximité
du plateau continental...





Annexes

Notes

1. L'article original de Christopher Merret, « Some observations concerning the ordering of wines », fut publié pour la première fois par Tom Stevenson dans la *Christie's World Encyclopedia of Champagne and Sparkling Wines* (Bath, Absolute Press, 1998).

2. Un œnologue est en charge de tout le processus de vinification, depuis le pressage du raisin jusqu'à la mise en bouteilles. L'œnologie est la science et l'étude des vins. On confond souvent l'œnologue avec le sommelier qui est le spécialiste des vins, des alcools, des liqueurs et des champagnes dans les restaurants gastronomiques et les grands hôtels. Il conseille et sert les vins et s'occupe de la gestion de la cave.

3. Une salle blanche est constamment filtrée et l'air y est mis sous pression pour éviter le passage de poussières. L'ensemble des paramètres climatiques est vérifié comme, par exemple, la température et l'humidité.

Ce sont des entreprises spécialisées qui s'occupent de fournir et d'installer le matériel adéquat aux salles blanches, depuis la porte jusqu'aux vêtements.

4. Une chambre anéchoïque est spécialement conçue pour offrir un environnement préservé de tout bruit et de toute vibration en provenance de l'extérieur.

5. Les gouttelettes d'eau issues de la condensation de la vapeur d'eau au voisinage du bouchon qui saute sont susceptibles de diffuser la lumière du projecteur dans toutes les directions de l'espace – exactement comme le feraient les microgouttelettes d'un épais brouillard au petit matin. Lorsqu'elles dépassent une taille critique de l'ordre du micromètre, ces gouttelettes diffusent la lumière ambiante (qui est blanche s'il s'agit du soleil ou d'un projecteur standard) dans toutes les directions, sans privilégier aucune longueur d'onde du spectre lumineux. Le brouillard apparaîtra alors blanchâtre.

Bibliographie

- Ballet, P., Graner, F. (2005), « Un film de savon géant », *Revue Découverte*, 332, p. 41-45.
- Baur, J., Baur, M., Franz, D. (2006), « The ultrasonic soda fountain : A dramatic demonstration of gas solubility in aqueous solutions », *Journal of Chemical Education*, 83, p. 577-580.
- Beaumont, F., Popa, C., Liger-Belair, G., Polidori, G. (2014), « Numerical modelling of bubble-driven flow patterns in champagne glasses », *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 24, p. 563-578.
- Chandrashekar, J., Yarmolinsky, D., von Buchholtz, L., Oka, Y., Sly, W., Ryba, N., Zuker, C. (2009), « The taste of carbonation », *Science*, 326, p. 443-445.
- Cilindre, C., Conreux, A., Liger-Belair, G. (2011), « Simultaneous monitoring of gaseous CO₂ and ethanol above champagne glasses via micro gas chromatography (μGC) », *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, p. 7317-7323.
- Dessirier, J.-M., Simons, C., Carstens, M., O'Mahony, M., Carstens, E. (2000), « Psychophysical and neurobiological evidence that the oral sensation elicited by carbonated water is of chemogenic origin », *Chemical Senses*, 25, p. 277-284.
- Duchemin, L. (2001), *Quelques problèmes fortement non linéaires de surface libre et leur résolution numérique*, thèse de doctorat, université d'Aix-Marseille-II.
- Dussaud, A., Robillard, B., Carles, B., Duteurtre, B., Vignes-Adler, M. (1994), « Exogenous lipids and ethanol influences on the foam behavior of sparkling base wines », *Journal of Food Science*, 59, p. 148-167.
- Duteurtre, B. (2010), *Le Champagne. De la tradition à la science*, Paris, Lavoisier.
- Edgerton, H., Killian, J. R. (1939), *Flash ! Seeing the Unseen by Ultra High-Speed Photography*, Boston, Hale.
- Gennes, P.-G. de, Badoz, J. (1994), *Les Objets fragiles*, Paris, Plon.
- Guyon, E., Petit, L., Hulin, J.-P. (2005), *Ce que disent les fluides*, Paris, Belin.
- Harper, J. (1970), « On bubbles rising in line at large Reynolds numbers », *Journal of Fluid Mechanics*, 41, p. 751-758.
- Harper, J. (1997), « Bubbles rising in line : Why is the first approximation so bad ? », *Journal of Fluid Mechanics*, 351, p. 289-300.
- Jones, S. F., Evans, G. M., Calvin, K. P. (1999) « Bubbles nucleation from gas cavities : A review », *Advances in Colloid and Interface Science*, 80, p. 27-50.
- Lehuédé, P., Robillard, B. (1996), « Le champagne dans la flûte », *Pour la science*, 229, p. 14.
- Levich, B. (1962), *Physicochemical Hydrodynamics*, Englewood Cliffs (New Jersey).
- Liger-Belair, G. (2003), « The science of bubbly », *Scientific American*, 288, p. 80-85.
- Liger-Belair, G. (2006), « Nucléation, ascension et éclatement d'une bulle de champagne », *Annales de physique*, 31 (2), p. 1-133.
- Liger-Belair, G. (2013), « Champagne ! Les dialogues d'un scientifique et d'un sommelier », éditorial, *Revue des œnologues*, 149, p. 7-8.
- Liger-Belair, G. (2014), « How many bubbles in your glass of bubbly ? », *Journal of Physical Chemistry B*, 118, p. 3156-3163.
- Liger-Belair, G., Bourget, M., Villaume, S., Jeandet, P., Pron, H., Polidori, G. (2010), « On the losses of dissolved CO₂ during champagne serving », *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, p. 8768-8775.
- Liger-Belair, G., Cilindre, C., Gougeon, R., Lucio, M., Gebefügi, I., Jeandet, P., Schmitt-Kopplin, P. (2009), « Unraveling different chemical fingerprints between a Champagne wine and its aerosols », *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 106, p. 16545-16549.
- Liger-Belair, G., Cilindre, C., Polidori, G., Pron, H., Seon, T., Ghabache, E., Antkowiak, A., Jamesse, P. (2013), « La dégustation du champagne : quelques éléments de réflexion sur l'impact de la forme du verre et de la taille des bulles », *Revue des œnologues*, 149, p. 43-46.
- Liger-Belair, G., Cilindre, C., Bourget, M., Pron, H., Beaumont, F., Polidori, G., Jamesse, P., Cabral, M., Lopes, P. (2015), « La perception du CO₂ dans les vins effervescents. Un univers multisensoriel spécifique et ses influences sur les sensations gustatives », *Revue des œnologues*, 155, p. 47-52.

- Liger-Belair, G., Cilindre, C., Honvault, J., Gasco, T., Cabral, M., Lopes, P. (2015), « Le débouchage du champagne en slow motion ! », *Revue des œnologues*, 155, p. 53-56.
- Liger-Belair, G., Gougeon, R., Schmitt-Kopplin, P. (2010), « Champagne : l'arôme au cœur des bulles », *Pour la science*, 398, p. 34-38.
- Liger-Belair, G., Jeandet, P. (2003), « More on the surface state of expanding champagne bubbles rising at intermediate Reynolds and high Peclet numbers », *Langmuir*, 19, p. 801-808.
- Liger-Belair, G., Lemauresquier, H., Robillard, B., Duteurtre, B., Jeandet, P. (2001), « The secret of fizz in Champagne wines: A phenomenological study », *American Journal of Enology and Viticulture*, 52, p. 88-92.
- Liger-Belair, G., Polidori, G. (2007), « Tempête dans un verre ... de champagne ! », *Pour la science*, 362, p. 66-70.
- Liger-Belair, G., Polidori, G., Jeandet, P. (2008), « Recent advances in the science of champagne bubbles », *Chemical Society Reviews*, 37, p. 2490-2511.
- Liger-Belair, G., Robillard, B., Vignes-Adler, M., Jeandet, P. (2001), « Flower-shaped structures around bubbles collapsing in a bubble monolayer », *Comptes rendus de l'Académie des sciences, série physique*, 2, p. 775-780.
- Liger-Belair, G., Rochard, J. (2008), *Les Vins effervescents. Du terroir à la bulle*, Paris, Dunod.
- Liger-Belair, G., Tufaile, A., Robillard, B., Jeandet, P., Sartorelli, J.-C. (2005), « Period-adding route in sparkling bubbles », *Physical Review E*, 72, 037204.
- Liger-Belair, G., Villaume, S. (2011), « Losses of dissolved CO₂ through the cork stopper during champagne aging: Toward a multi-parameter modeling », *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, p. 4051-4056.
- Liger-Belair, G., Voisin, C., Jeandet, P. (2005), « Modeling non-classical heterogeneous bubble nucleation from cellulose fibers: Application to bubbling carbonated beverages », *Journal of Physical Chemistry B*, 109, p. 14573-14580.
- Lohse, D. (2003), « Bubble puzzles », *Physic Today*, 56 (2), p. 36-41.
- Mougin, G., Magnaudet, J. (2002), « Path instability of a rising bubble », *Physical Review Letters*, 88, 014502.
- Perkowitz, S. (2000), *Universal Foam: From Cappuccino to the Cosmos*, New York, Walker Publishing.
- Pichon, C., Sousbie, T. (2011), « Cartographier l'Univers », *Pour la science*, 71, p. 76-83.
- Polidori, G., Jeandet, P., Liger-Belair, G. (2009), « Bubbles and flow patterns in champagne », *American Scientist*, 97, p. 294-301.
- Pron, H., Caron, D., Beaumont, F., Liger-Belair, G., Polidori, G. (2010), « Dynamic-tracking desorption of CO₂ in Champagne wine using infrared thermography », *Journal of Visualization*, 13, p. 181-182.
- Shafer, N., Zare, R. (1991), « Through a beer glass darkly », *Physics Today*, 44, p. 48-52.
- Shaw, R. (1984) *The Dripping Faucet as a Model Chaotic System*, Santa Cruz, Aerial Press.
- Stevenson, T. (1998), *Christie's World Encyclopedia of Champagne an Sparkling Wine*, Bath, Absolute Press.
- Vandewalle, N., Lentz, J. F., Dorbolo, S., Brisbois, F. (2001), « Avalanches of popping bubbles in collapsing foams », *Physical Review Letters*, 86, p. 179-182.
- Vreme, A., Pouligny, B., Nadal, F., Liger-Belair, G. (2015), « Does shaking increase the pressure inside a bottle of champagne ? », *Journal of Colloid and Interface Science*, 439, p. 42-53.
- Wu, M., Charib, M. (2002), « Experimental studies on the shape and path of small air bubbles rising in clean water », *Physics of Fluids*, 14, p. 49-52.
- Ybert, C., Di Meglio, J.-M. (1998), « Ascending air bubbles in protein solutions », *European Physical Journal B*, 4, p. 313-319.
- Zarifian, E., Coutant, C., Liger-Belair, G. (2005), *Bulle de champagne*, Paris, Perrin.

Sites Internet

- Site du projet Horizon (Simulation de la structure du cosmos à grande échelle) : www.projet-horizon.fr
- Site du photographe Jacques Honvault : <http://jacqueshonvault.com/>
- Site du Comité Champagne : <http://www.champagne.fr/>
- Site du photographe Hubert Raguet : <http://www.hubertraguets.com/>
- Site de François Graner (chercheur au CNRS, Institut Curie, Paris) : <http://www.graner.net/francois/>
- Site du laboratoire du professeur Richard Zare (chercheur à l'université de Stanford) : <http://www.stanford.edu/group/Zarelab/>

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement Odile Jacob et Bernard Gotlieb pour l'accueil très enthousiaste qu'ils ont réservé à cet ouvrage sur le champagne, ainsi que Caroline Rolland et Claire Rouyer pour la qualité de leur implication dans l'organisation de l'ouvrage et l'élaboration de la maquette.

Nos remerciements s'adressent ensuite à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à cette recherche sur la bulle, apportant ainsi leur concours à la réalisation de cet ouvrage, et plus particulièrement à : Yannick Bailly, Fabien Beaumont, Marielle Bourget, Clara Cilindre, Christophe Clément, Jean-Claude Colson, Alexandra Conreux, Thomas Decarpenterie, Bruno Duteurtre, Julien Fossier, Thierry Gasco, Istvan Gebefügi, Régis Gougeon, Philippe Jeandet, Lilian Joly, Hervé Lemaesquier, Maxime Mulier, Jean-Marc Nuzillard, Maryline Parmentier, Bertrand Parvitte, Hervé Pron, Henri Quenardel, Bertrand Robillard, Philippe Schmitt-Kopplin, Daniel Topgaard, Alberto Tufaile, Michèle Vignes-Adler, Sandra Villaume, Cédric Voisin et Virginie Zéninari.

Nous remercions celles et ceux qui nous ont fourni des documents photographiques, des schémas ou des croquis : Fabien Beaumont, Marielle Bourget, Alain Cornu, Emmanuel Dietrich, Laurent Duchemin, Benjamin Foster, Élisabeth Ghabache, François Graner, Gérard Hamalian, Jacques Honvault, Hamid Kellay, Amaëlle Landais, Hervé Lemaesquier, François Mondot, Tom Pfeiffer, Christophe Pichon, Hervé Pron, Chantal Rousselin (du Palais de la découverte), Philippe Schmitt-Kopplin, Thomas Séon, Chris Shaw, Patrice Simard, Romain Teyssier et Richard Zare.

Un merci tout particulier au photographe Hubert Raguet, qui a mis gracieusement à notre disposition plusieurs photographies issues d'un reportage qu'il a réalisé à l'université de Reims sur la science du champagne.

Nous remercions toutes les maisons de champagne, les coopératives vinicoles et les organismes interprofessionnels qui s'intéressent aux recherches universitaires visant à l'amélioration des connaissances œnologiques, et plus particulièrement les champagnes Cattier, Moët & Chandon, Mumm, Nicolas Feuillatte, Palmer, Pommery, Ruinart et Veuve Clicquot Ponsardin, la coopérative de Nogent l'Abbesse, le Comité interprofessionnel du vin de Champagne (CIVC), l'Institut œnologique de Champagne (IOC) et l'Union des œnologues de Champagne, dont le soutien nous est précieux.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à l'Association recherche œnologique Champagne et Université (AROCU), à son président Jean-Pierre Dargent ainsi qu'à tous ses membres, qui apportent un soutien financier et moral essentiels à nos laboratoires respectifs.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement l'Académie Amorim et ses membres pour leur action en faveur d'une recherche œnologique de qualité, ainsi que Elizabeth Ebel et Emilie Loubié, de l'agence YESwecan, pour le plaisir que nous avons à nous retrouver chaque année autour de notre passion commune.

Nous remercions aussi Hervé Fort et Philippe Jamesse, respectivement directeur général et chef sommelier du Domaine Les Crayères à Reims, avec qui c'est toujours un grand plaisir de discuter des dernières avancées en matière de bulles autour d'un grand champagne.

Ce livre est le fruit d'une dizaine d'années de travail à l'université de Reims Champagne-Ardenne. Les rencontres furent nombreuses, riches, intenses, et souvent fructueuses. La liste complète de celles et ceux, parents, amis, collègues, vignerons, œnologues et étudiants, qui nous ont accompagnés depuis le début de cette aventure, apportant ainsi une contribution indirecte à l'ouvrage, est fort longue. Qu'ils soient ici tous collectivement et chaleureusement remerciés !

Un grand merci également à Brigitte Batonnet qui a mis à notre disposition des clichés issus de la photothèque du CIVC.

Merci enfin à Clara Cilindre pour son regard bienveillant ainsi que sa relecture attentive du manuscrit.

Gérard LIGER-BELAIR et Guillaume POLIDORI

Crédits photographiques

Gérard Liger-Belair : p. 12, 16, 28, 37, 38, 39, 41 en bas, 47, 48, 50-51, 52 en haut, 52 bas, 53, 54, 55, 57, 60, 61, 62, 63, 66, 67, 68-69, 74, 75, 80, 82, 86, 87, 88, 91, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 117 en haut à gauche, 118 en haut, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140-141, 142, 143, 149, 151 en haut, 170, 174-175 • Gérard Liger-Belair et Cédric Voisin : p. 76 • Fabien Beaumont : p. 70, 71 • Beaumont/Liger-Belair/Polidori : p. 92-93, 96, 98, 99, 100, 101, 102-103, 104-105, 119, 147, 148, 150, 156, 180, 183 • Mike Boylan-Kolchin : p. 171 en bas • Collection CIVC : p. 30 • Alain Cornu/Collection CIVC : p. 4-5, 27, 45, 46, 72-73, 78, 106-107, 109, 123, 124-125, 144-145 • Marc Delmotte : p. 167 • Étienne Derat : p. 23 en bas • Emmanuel Dietrich/Champagne Ruinart : p. 118 en bas • Laurent Duchemin/Gérard Liger-Belair : p. 116 • Domaine Les Crayères : p. 155 • Warren Edwardes : p. 83 • ESO/A. Santerne : p. 181 • Julien Fossier et Gérard Liger-Belair : p. 59 • Benjamin Foster : p. 178 • Michel Guillard/Collection CIVC : p. 22 • Michel Guillard et Gianluigi Sosio/Collection CIVC : p. 24 • Gérard Hamalian : p. 169 • Centre Helmholtz, Munich : p. 122 • John Hodder/Collection CIVC : p. 20-21 • John Hodder et Michel Hetier/Collection CIVC : p. 23 en haut • Jacques Honvault : p. 33, 174 • Institut Jean Le Rond d'Alembert (IJLRDA) : p. 154 • Jan Jonker/Collection CIVC : p. 31 en haut • Kumesawaga/Collection CIVC : p. 32 • Hervé Lemaesquier : p. 117 • François Mondot et Chantal Rousselin/Palais de la découverte : p. 160-161 • NASA : p. 77, 162, 172-173, 179, 182 • Tom Pfeiffer : p. 164 • Christophe Pichon/Romain Teyssier : p. 171 (haut) • Hubert Raguet : p. 29, 44-45, 49, 95, 97, 151, 159 • Rohrscheid et Michel Guillard/Collection CIVC : p. 31 en bas • Robert Shaw : p. 64 (reproduit avec la gracieuse permission de Robert Shaw) • Philippe Schmitt-Kopplin : p. 128, 158-159, 165 • Daniel Schwen/Wikimedia : p. 117 en haut à droite • Jérôme Senée : p. 52 au milieu • Patrice Simard : p. 129 • Université de Reims : p. 34-35, 40-41 en haut, 152-153, p. 175-178 • Cédric Voisin : p. 56 • Richard Zare/Université de Stanford : p. 168.

Nouveau voyage au cœur d'une bulle de champagne

Le champagne est un monde à découvrir ! Gérard Liger-Belair et Guillaume Polidori ont mis au point des techniques de prise de vue qui permettent d'obtenir des images inédites de ce vin d'exception.

Dans une flûte, la course des bulles donne lieu à des phénomènes spectaculaires et insolites qui réconcilient l'art et la science. On y retrouve même des phénomènes analogues à ceux qui apparaissent à une tout autre échelle qui est celle de l'atmosphère, de l'océan et même du cosmos...

Émerveillons-nous de cette leçon de choses à portée de nos lèvres, rendue possible grâce aux progrès de la science et à la curiosité de celles et ceux qui la font.

Une approche scientifique surprenante pour découvrir et encore mieux apprécier le champagne.

Gérard Liger-Belair
Guillaume Polidori

Gérard Liger-Belair est professeur de physique à l'université de Reims-Champagne-Ardenne. Ses recherches portent sur les processus à l'origine de la formation et du comportement des bulles dans le champagne et les vins effervescents. Il est lauréat de plusieurs prix scientifiques internationaux et auteur de *Le Champagne. Effervescence, la science du champagne* et de *Voyage au cœur d'une bulle de champagne*.

Guillaume Polidori est professeur de mécanique des fluides à l'université de Reims-Champagne-Ardenne. Ses recherches portent sur la visualisation des écoulements et les transferts convectifs. Il est le coauteur de *Voyage au cœur d'une bulle de champagne*.