

La physique des bulles de Champagne

Gérard Liger-Belair

A l'instar de la couleur ou du goût, l'effervescence est un facteur primordial dans l'appréciation de la qualité d'un champagne, tant sur le plan visuel qu'olfactif. La finesse des bulles, l'aspect de la collerette qui se forme à la périphérie de la flûte et le pétilllement en bouche sont des critères très importants dans un jury de dégustation. En outre, un consommateur déçu par l'effervescence d'un champagne dans une flûte risque de déprécier, à tort ou à raison, l'ensemble de ses qualités organoleptiques.

Lors du versement d'un champagne dans une flûte, il se forme tout d'abord une mousse abondante, dont le volume est très supérieur au volume de vin versé. Cette mousse très éphémère s'effondre en quelques secondes pour laisser apparaître un cordon de bulles à la périphérie du verre – la collerette – alimenté par des bulles nucléées dans la flûte. C'est la définition que nous ferons de l'effervescence (du latin *fervere* qui signifie bouillir).

Compte tenu des préoccupations de la profession et de l'enjeu économique majeur que représente le champagne pour la région Champagne-Ardenne, notre laboratoire d'œnologie basé au cœur du vignoble champenois se devait de démarrer un programme consacré aux processus physico-chimiques liés à l'effervescence de ce vin prestigieux.

Avant la fin des années 1990, Il existait peu de travaux concernant l'étude physico-chimique de l'effervescence des vins mousseux en général et du champagne en particulier. On mentionnera essentiellement les travaux de l'australien, John Casey, qui portent sur la description du processus de formation répétitive des bulles dans une bouteille et dans un verre [1]. Ces travaux ne rapportent cependant aucune données quantitatives sur les paramètres pertinents de l'effervescence d'un champagne dans les conditions courantes de consommation (la taille, le grossissement et la vitesse ascensionnelle des bulles dans une flûte, la cinétique du processus de dégazage, l'état de surface des bulles montantes, la durée de vie moyenne des bulles en surface, la dynamique de l'éclatement). Compte tenu de l'absence quasi-totale de données expérimentales concernant l'effervescence du champagne en conditions réelles de consommation et pour rester au plus près de la réalité du produit, nous avons décidé de travailler dans les conditions qui intéressent le consommateur, c'est à dire dans une flûte. Outre ses trois constituants majeurs ; l'eau, l'alcool et le gaz carbonique, des centaines de composés aromatiques cohabitent dans un champagne. Ils assurent sa complexité, sa richesse et sa structure. Mais, compte tenu de l'extrême complexité de ce produit, nous ne commençons à lever le voile sur les mystères liés à son effervescence que depuis quelques années.

Je vous propose ici, en quelques pages, de faire une plongée au cœur de l'effervescence du champagne, de décortiquer, d'illustrer et d'interpréter sous l'angle de la physico-chimie, les différentes étapes fondamentales de la vie éphémère d'une bulle, à savoir : sa naissance, son décollement, son ascension dans le verre, et son éclatement en surface.

1. La naissance et le décollement des bulles

Les vins de Champagne subissent deux fermentations alcoolique successives. Au cours de la deuxième fermentation qui a lieu en bouteille, les levures consomment le sucre mis à leur disposition et libèrent de l'éthanol et du dioxyde de carbone (le CO₂). C'est le bilan découvert par Pasteur en 1837:



Un équilibre s'établit alors progressivement entre le CO₂ qui reste dissous dans le vin et le CO₂ gazeux piégé dans le col de la bouteille. A l'ouverture d'une bouteille de champagne le CO₂ en phase gazeuse s'échappe brutalement. L'équilibre thermodynamique est rompu, et le vin devient sursaturé en CO₂. Il doit inexorablement se débarrasser de ce gaz carbonique en excès. Le CO₂ dissous retourne alors progressivement en phase gazeuse par émission de bulles.

La faible teneur en gaz carbonique d'un champagne à l'ouverture de la bouteille interdit aux bulles d'apparaître spontanément dans le cœur du liquide (on parle de nucléation homogène). Les bulles du champagne apparaissent sur des embryons de bulles présents en solution et généralement invisibles à l'œil nu (on parle alors de nucléation hétérogène). Les amorces de bulles sont des petites poches d'air piégées dans des impuretés microscopiques présentes en solution et qui n'ont pas été totalement mouillées au moment du versement.

Afin d'observer en temps réel la production répétitive de bulles au niveau d'un site de nucléation, le laboratoire d'œnologie s'est équipé d'une caméra ultra-rapide capable de filmer jusqu'à 2000 images/s avec une résolution proche du micromètre. Une photo du dispositif apparaît sur la **figure 1**.

Contrairement à une idée largement répandue, les bulles de champagne n'apparaissent pas sur les défauts du verre ou de la flûte dans lequel il est versé. Dans la grande majorité des cas, ce sont des fibres de cellulose provenant des torchons d'essuyage ou des microcristaux présents dans le vin qui sont responsables de cette production répétitive de bulles dans le champagne [6-8]. Ces particules en solution jouent le rôle de **site de nucléation**. Les molécules de CO₂ dissous diffusent dans ces minuscules poches de gaz. Une bulle apparaît puis grossit. Dès que la poussée d'Archimède à laquelle elle est soumise dépasse la force capillaire qui l'ancre sur son site de nucléation, la bulle se détache, mais l'amorce de bulle reste piégée dans la particule. Une autre bulle naît et subit le même sort que la précédente, et ainsi de suite. Tel un métronome, chaque site de nucléation émet une bulle à intervalle de temps régulier.

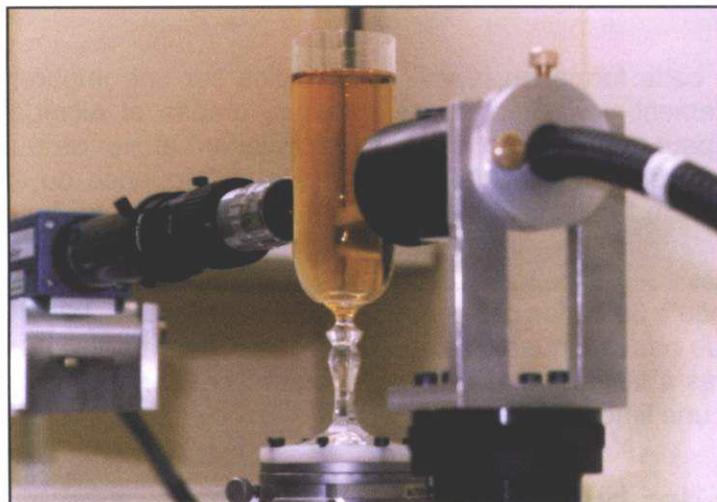


Fig. 1 : Détail du banc d'observation des sites de nucléation en conditions réelles de consommation [7].

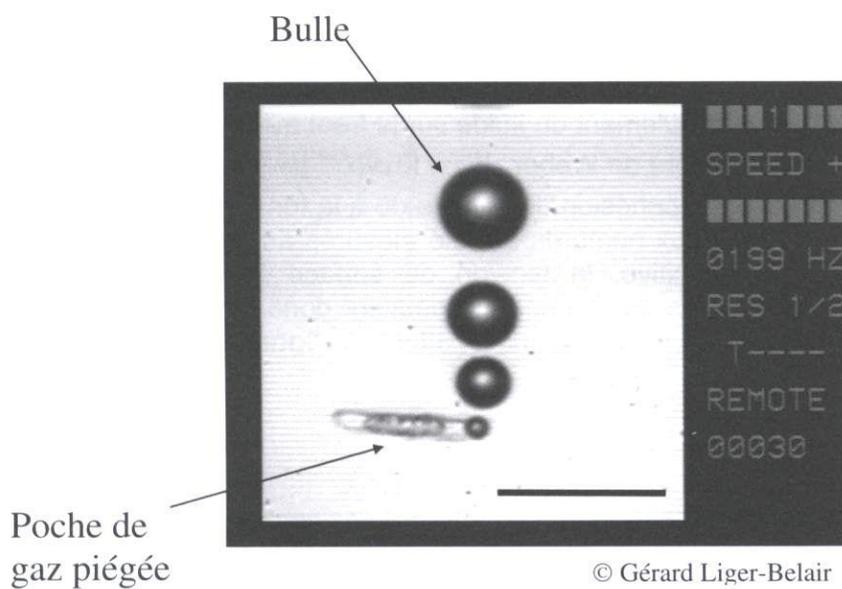


Fig. 2 : Gros plan d'un site de nucléation sur la paroi de la flûte. La poche de gaz piégée à l'intérieur de la particule apparaît clairement ; barre = 100 μm .

La **figure 2** illustre cette formation répétitive de bulles sur une impureté de la surface du verre (très probablement une structure de cellulose creuse et allongée). Cette émission régulière de bulles peut-être mise en évidence en éclairant le site de nucléation en lumière stroboscopique. Entre deux éclairs de flash, lorsque la fréquence du stroboscope devient égale à la fréquence de "bullage" d'un site de nucléation, chaque bulle du train prend la place de la bulle qui la précède immédiatement. A l'œil nu, l'observateur ne distingue plus de mouvement et le train de bulles semble figé [3,8,9]. Les sites de nucléation les plus actifs peuvent émettre jusqu'à 30 bulles par seconde et, au décollement, le diamètre des bulles de champagne n'excède pas quelques dizaines de microns, tout au plus. Cette expérience peu coûteuse devient très à la mode dans les collèges et lycées, non pas avec du champagne bien sûr, mais avec une limonade ou un soda.

2. L'ascension des bulles

2.1. Poussée d'Archimède contre force de frottement

Une fois détachée de son site de nucléation, la bulle entame sa progression dans la matrice liquide. Le CO_2 dissous continue de diffuser dans la bulle qui grossit et accélère progressivement durant son trajet vers la surface. En début de dégustation, les bulles émises au fond de la flûte et dont le trajet dans le verre est le plus long atteignent la surface du champagne avec un diamètre proche du millimètre et une vitesse d'environ 15 cm/s.

Entre le début de son parcours et le moment où elle éclate en surface, le nombre de Reynolds $Re = (2\rho RU)/\eta$ qui lui est associé augmente progressivement¹. Il se peut alors que les bulles en grossissant et en accélérant soient déformées par les forces visqueuses et par la pression inertielle liée à l'écoulement du fluide sur le front avant de la bulle. Le nombre capillaire, $Ca = (\eta U)/\gamma$, et le nombre de Weber, $We = (2\rho RU^2)/\gamma$, sont deux nombres sans dimension qui comparent l'effet de cohésion de la bulle dû à la tension de surface, aux deux contributions précédentes. Ces deux nombres ont été mesurés au cours de l'ascension [8]. Ils restent petits ($\ll 1$). En définitive, la tension de surface l'emporte sur les forces visqueuses et inertielles. Les bulles du champagne peuvent donc être considérées comme quasiment sphériques pendant l'ascension, comme l'atteste la **figure 3**.

¹ R , U , ρ , η et γ sont respectivement le rayon et la vitesse de la bulle, la masse volumique, la viscosité et la tension de surface du champagne.

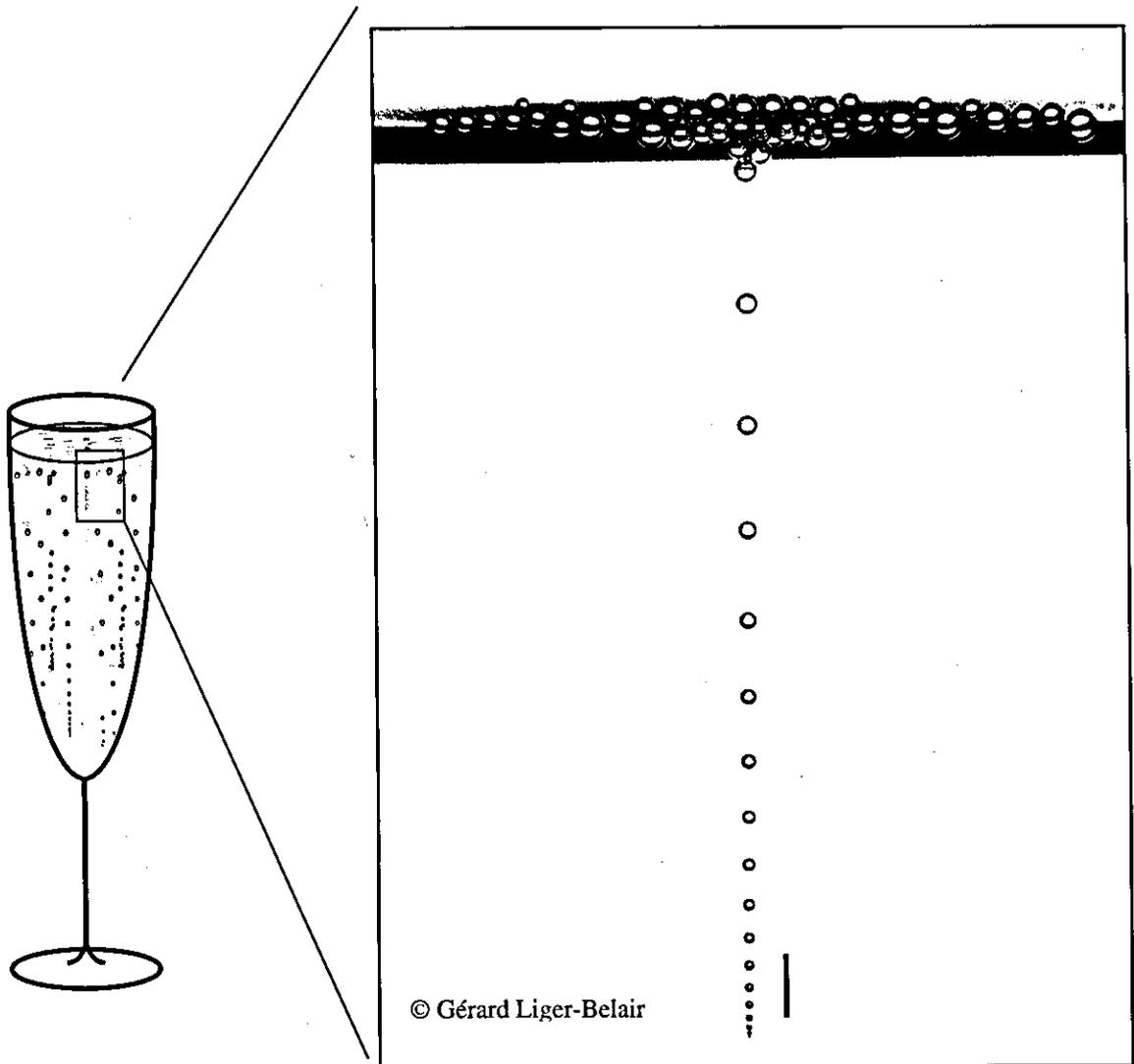


Fig. 3: Train de bulles dans sa globalité; on remarquera sa contribution individuelle à la formation de la collerette; la en surface est due au ménisque de liquide formé au niveau de la paroi de la flûte; barre bande noire = 1 mm.

Une bulle montante est soumise à l'action de plusieurs forces. Outre la poussée d'Archimède, $F_B = 4/3 \rho g \pi R^3$, et la force de frottement, $F_D = 1/2 C_D \pi R^2 \rho U^2$, liée à l'écoulement du fluide autour de la bulle, la bulle met en mouvement le liquide qui se trouve dans son voisinage immédiat¹. Ce déplacement du fluide environnant conduit à une force supplémentaire dite de "masse ajoutée", $F_{AM} = \rho d/dt(VU)$, liée à la variation de la quantité de mouvement du volume V de liquide déplacé. Le volume V de liquide entraîné dans le sillage de la bulle équivaut environ à la moitié du volume de la bulle. Ainsi, $F_{AM} \approx 2/3 \pi \rho d/dt(R^3 U)$. Cependant, cette force a été comparée à la poussée d'Archimède, et ce, tout au long du trajet de la bulle vers la surface. La force de masse ajoutée qui s'oppose au mouvement n'excède pas 2 à 3 % de la poussée d'Archimède [3]. Dans un souci de simplification, nous la négligerons par la suite. L'équation du mouvement se réduit finalement à une simple égalité entre la force de frottement et la poussée d'Archimède. On peut alors déterminer expérimentalement le coefficient de traînée d'une bulle montante à partir de la mesure de son rayon et de sa vitesse ascensionnelle:

$$C_D = 8gR/3U^2 \quad (1)$$

2.2. Quand les tensioactifs entrent en scène

Au sens strictement chimique, le champagne est une solution d'eau et d'alcool, diluée en macromolécules complexes et sursaturée en dioxyde de carbone. Le champagne contient également une quantité non négligeable de macromolécules dites tensioactives (essentiellement des protéines et des glycoprotéines). De par leur structure moléculaire, ces molécules présentent une double affinité : une partie hydrophile et une partie hydrophobe. En conséquence de quoi, ces molécules se placent préférentiellement aux interfaces, la partie hydrophile au contact du liquide et la partie hydrophobe vers le gaz. La surface d'une bulle de champagne va donc se comporter comme un véritable piège pour les molécules tensioactives qui vont progressivement venir s'y accrocher au cours de l'ascension (Cf. figure 4). Du point de vue de la mécanique des fluides, cette couche de molécules tensioactives rigidifie la surface d'une bulle et modifie l'écoulement du liquide autour d'elle. Les conditions hydrodynamiques s'en trouvent alors modifiées et le coefficient de frottement de la bulle augmente par rapport à celui d'une bulle qui monte dans une solution ultra-pure, vierge de toute molécule tensioactive.

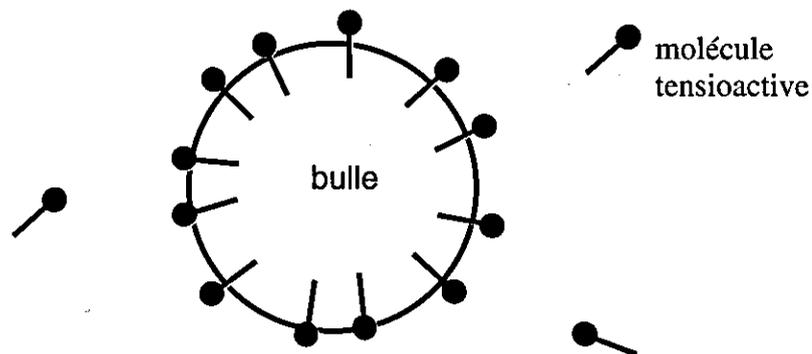


Fig. 4: Les molécules tensioactives présentes dans le champagne envahissent progressivement la surface des bulles de gaz carbonique.

¹ g est l'accélération de la gravité ($9,81 \text{ m/s}^2$) et C_D le coefficient de frottement d'une bulle.

Le coefficient de traînée d'une bulle montante de taille donnée se situe donc nécessairement entre deux limites extrêmes, $C_{FS} \leq C_D \leq C_{RS}$. C_{RS} et C_{FS} sont respectivement les coefficients de traînée d'une bulle saturée en molécules tensioactives (hydrodynamiquement équivalente à une sphère rigide), et d'une bulle dont l'interface est vierge (hydrodynamiquement équivalente à une sphère fluide).

De nombreuses déterminations empiriques et semi-empiriques du coefficient de traînée sont rapportées dans la littérature scientifique. Nous avons comparé le coefficient de traînée expérimental des bulles de champagne tout au long de leur trajet vers la surface libre avec deux coefficients empiriques, respectivement C_{RS} et C_{FS} , qui correspondent aux deux cas limites précédemment définis. Afin d'appréhender expérimentalement l'état de surface des bulles de champagne, nous utiliserons le coefficient de traînée normalisé défini ci-après,

$$C_D^* = (C_D - C_{FS}) / (C_{RS} - C_{FS}) \quad (2)$$

Ainsi, le coefficient de traînée normalisé d'une bulle "propre" tendra vers 0, alors que celui d'une bulle saturée en macromolécules tensioactives tendra vers 1.

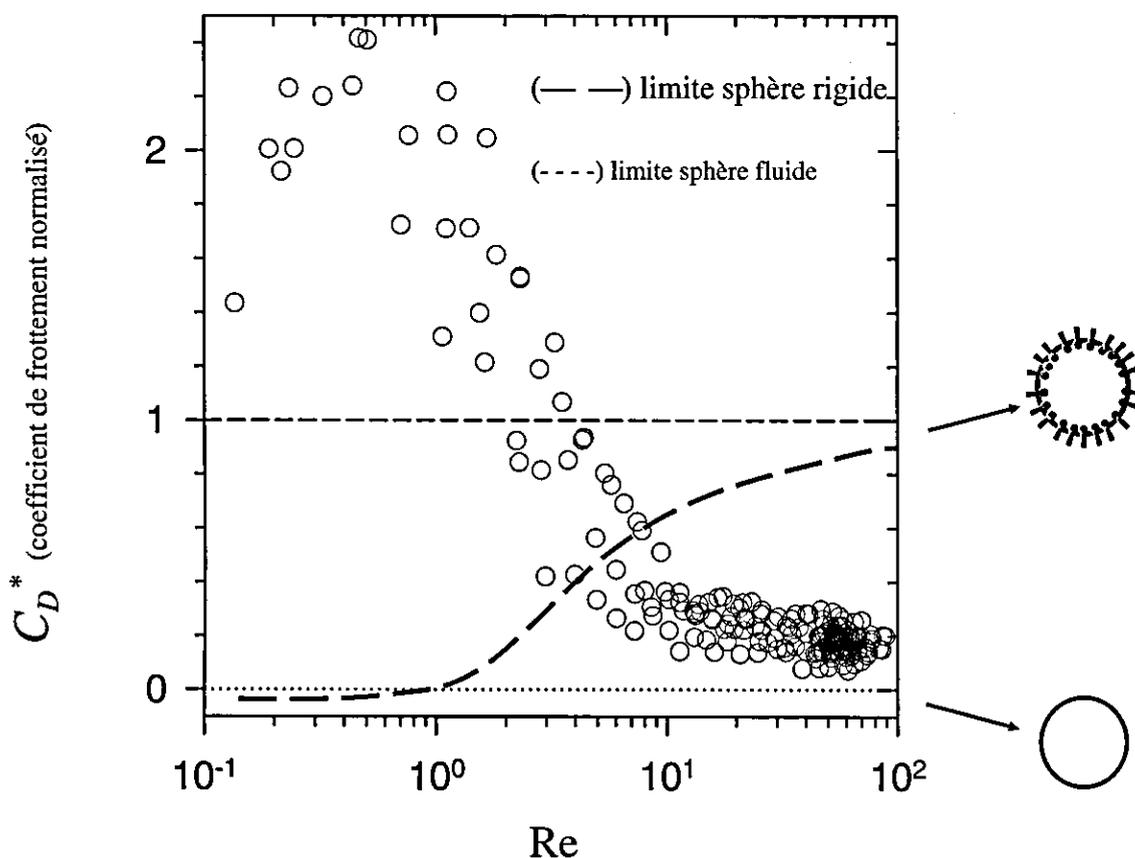


Fig. 5: Evolution du coefficient de frottement normalisé des bulles de champagne au cours de leur ascension vers la surface (\circ), comparé à l'allure du coefficient de traînée normalisé qu'une bulle de taille fixe subit lorsqu'elle monte dans une solution contenant des macromolécules tensioactives (— —) [9].

La **figure 5** représente l'évolution de C_D^* en fonction du nombre de Reynolds, pendant le trajet des bulles vers la surface de la flûte. On distingue clairement deux régimes:

- Un premier régime ($Re < 10$) où C_D^* décroît brusquement depuis une valeur supérieure à C_{RS} jusqu'à une valeur proche de C_{FS} .
- Un second régime quasi-stationnaire ($Re > 10$) où C_D^* se stabilise. Au bout de quelques millimètres d'ascension, l'état de surface des bulles apparaît constant et proche de celui d'une bulle "propre". Au cours de leur ascension vers la surface libre, la mobilité interfaciale des bulles reste proche de celle d'une sphère "propre". Elles sont donc faiblement contaminées en molécules tensioactives.

2.3. Des bulles qui se «nettoient»

Ces résultats diffèrent radicalement de ceux obtenus avec des bulles montantes de rayon fixe. En effet, suite à l'adsorption progressive des macromolécules tensioactives présentes en solution, la « rigidité » d'une bulle de rayon fixe augmente progressivement jusqu'à finalement s'annuler après un trajet d'autant plus court que la bulle est petite et que la solution est riche en tensioactifs [2]. La bulle se comporte alors comme une sphère rigide, de même diamètre et de même différence de densité par rapport au liquide environnant.

Le résultat obtenu sur les bulles du champagne peut s'interpréter par un effet de dilution du matériel tensioactif lié au grossissement continu de la bulle lors de son trajet vers la surface. En effet, contrairement au cas d'une bulle de rayon fixe dont la surface se fait progressivement et inexorablement envahir par les molécules tensioactives du milieu, la bulle de champagne « lutte » contre cet envahissement en grossissant. Elle offre ainsi toujours plus de place au matériel tensioactif susceptible de s'adsorber à sa surface [8,9]. Elle se défend contre l'envahisseur, en quelque sorte...

En définitive, il semblerait, au vu des éléments de la **figure 5**, que l'accroissement de surface de la bulle l'emporte sur la collecte des molécules tensioactives pendant l'ascension. Résultat net : la concentration de surface moyenne en molécules tensioactives d'une bulle de champagne diminuerait pendant son cheminement dans la matrice liquide, à la différence d'une bulle montante de taille fixe dont la concentration de surface moyenne augmente régulièrement.

A titre de comparaison, nous avons réalisé le même type de mesures sur des bulles de bière. Contrairement aux bulles de champagne, les bulles de bière adoptent vite un comportement de type sphère rigide qui suggère une contamination complète de l'interface en molécules tensioactives [3,8]. Ce résultat ne doit pas nous surprendre. En effet, le contenu en macromolécules tensioactives d'une bière (plusieurs centaines de milligrammes par litre) étant beaucoup plus important que celui d'un champagne (seulement quelques milligrammes par litre), l'adsorption massive de tensioactifs à la surface d'une bulle ne peut plus être compensée par l'effet de dilution lié au grossissement de la bulle.

Ces résultats peuvent expliquer la très forte différence de tenue de mousse entre un champagne et une bière. En effet, la durée de vie d'une bulle en surface est directement corrélée à sa concentration de surface en molécules tensioactives. Ainsi, la mousse de bière est beaucoup plus épaisse que celle du champagne, car les bulles qui la constituent sont beaucoup plus chargées en molécules tensioactives qui la rigidifient, la rendant ainsi plus compacte et plus durable que celle du champagne.

3. L'éclatement des bulles en surface

3.1. Autopsie d'un éclatement

La bulle a maintenant gagné la surface. En début de dégustation, les bulles de champagne atteignent la surface du liquide avec un diamètre proche du millimètre.

A la manière d'un iceberg, une bulle de champagne n'émerge que très peu. La presque totalité du volume de la bulle se situe sous la surface (Cf. **cliché 6a**). Le film liquide qui constitue la partie émergée de la bulle s'amincit progressivement jusqu'à se rompre lorsque l'épaisseur du film avoisine le micromètre. Un trou apparaît alors dans le film qui va achever de s'ouvrir sous l'effet de la force dite de tension superficielle. La vitesse de progression d'un trou dans un film liquide micrométrique est de l'ordre de la dizaine de mètres par seconde. Par conséquent, compte tenu de la taille caractéristique des bulles de champagne (≈ 1 mm), le temps de disparition de cette calotte sphérique n'est que de quelques dizaines de microsecondes ! Ce temps caractéristique, très inférieur à la durée du flash de notre appareil photographique, ne nous permet pas d'obtenir d'images du film en train de se rompre. Nous avons néanmoins pu obtenir, pour la première fois, quelques images de la situation qui suit immédiatement la rupture du film d'une bulle de champagne. La **figure 6** représente, dans l'ordre chronologique, quatre moments qui suivent l'éclatement d'une bulle en surface. Environ 0,5 ms sépare chaque cliché [5].

Sur le **cliché 6b**, le mince film liquide qui constitue la partie émergée de la bulle vient juste de se rompre. Il reste alors un cratère béant à la surface du liquide (la partie immergée de la bulle). Cette situation, très instable du point de la vue de l'hydrodynamique, ne va pas durer. De violents courants hydrodynamiques apparaissent et, en se refermant, cette cavité projette vers le haut un mince jet de liquide à très haute vitesse (plusieurs m/s), comme on peut le voir sur le **cliché 6c**. A la base du jet, à sa gauche, on distingue une minuscule bulle d'air probablement emprisonnée pendant ce processus. Puis, sous l'effet de sa propre vitesse, des instabilités (dites de Rayleigh-Plateau) apparaissent dans ce mince filet liquide. Le jet se brise alors en fines gouttelettes d'une centaine de micromètres de diamètre qui subissent chacune le jeu combiné de la tension superficielle et de l'inertie. C'est le même phénomène qui casse en fines gouttelettes le mince filet d'eau qui s'écoule d'un robinet à faible débit. Immédiatement après la rupture du jet, sur le **cliché 6d**, on devine deux gouttelettes encore très déformées, qui retrouvent vite une forme sphérique plus conventionnelle sur le **cliché 6e**. On constate également que l'éclatement de la bulle a engendré une onde circulaire centrée sur la bulle « mère ».

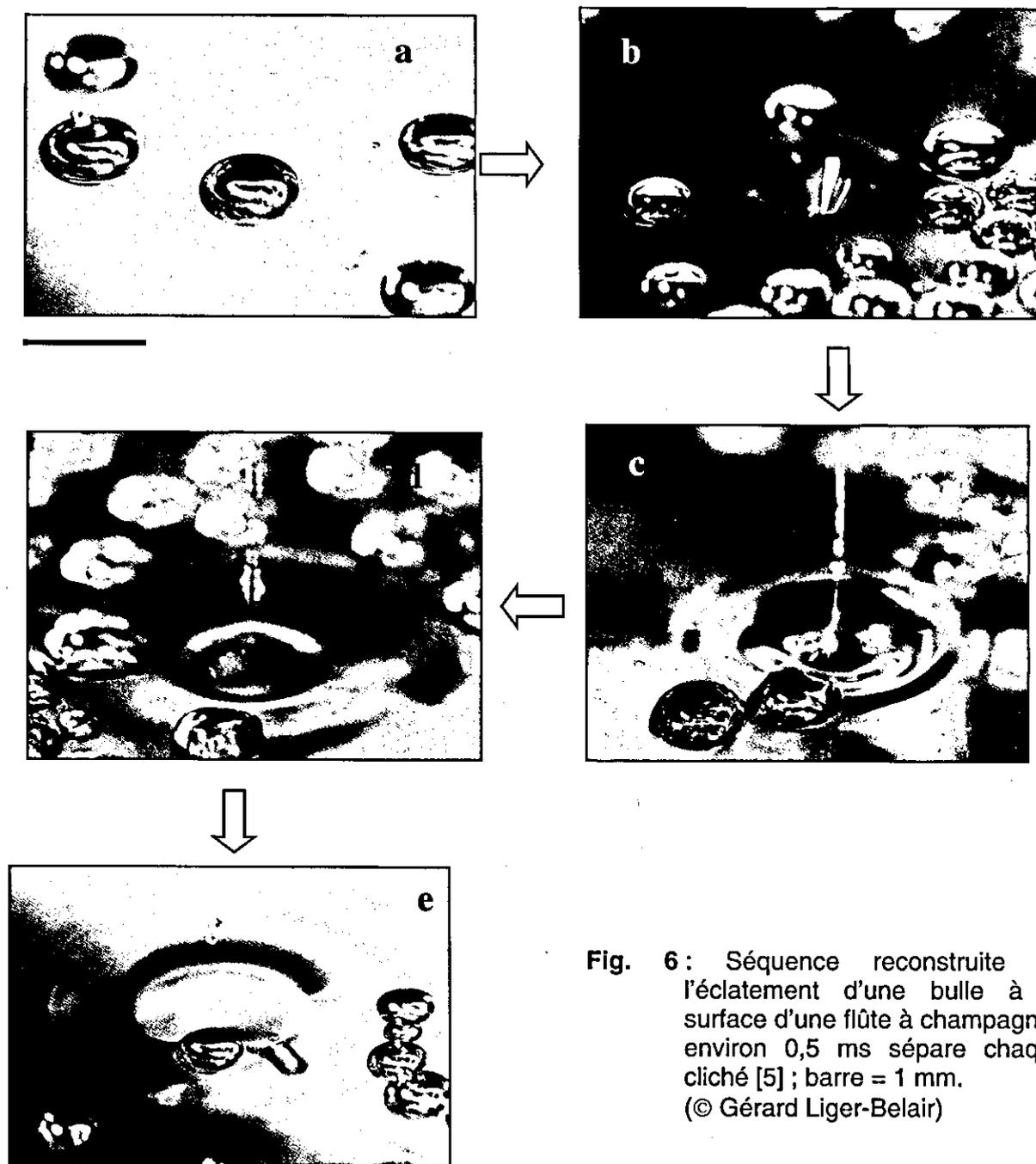


Fig. 6: Séquence reconstruite de l'éclatement d'une bulle à la surface d'une flûte à champagne ; environ 0,5 ms sépare chaque cliché [5] ; barre = 1 mm. (© Gérard Liger-Belair)

La figure 7 représente schématiquement l'éclatement d'une bulle en coupe transversale. Ce sont les différences de pression autour de la cavité laissée vacante par la bulle dont le film en surface vient de disparaître qui sont responsables de l'éjection à haute vitesse de ce filet liquide qui se brise en fines gouttelettes.

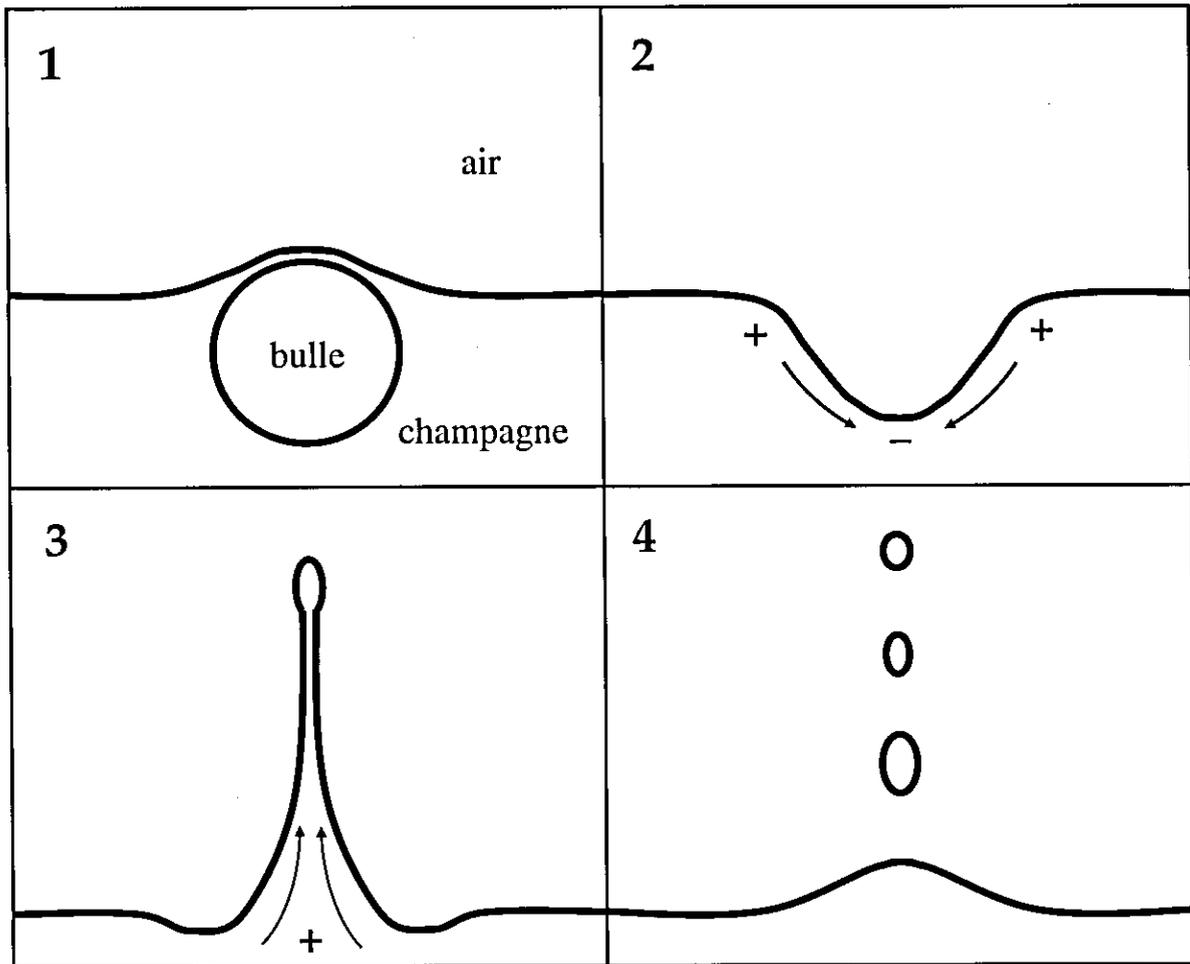


Fig. 7 : Représentation schématique, en coupe, du processus hydrodynamique qui accompagne l'éclatement d'une bulle en surface. Les signes +/- représentent les surpressions/dépressions liées aux courbures de l'interface champagne/air (loi de Laplace) [5].

3.2. L'effervescence : un phénomène exhausteur d'arômes?

L'éclatement incessant des bulles à la surface d'une flûte provoque ainsi la mise en suspension au dessus de la flûte, d'un nuage de fines gouttelettes issues de la couche superficielle à l'interface champagne/air. Or du fait du transfert des molécules tensioactives du cœur de phase vers la surface lié au ballet incessant des bulles et aux mouvements de convection du liquide, cette fine couche interfaciale s'enrichit progressivement en molécules tensioactives par rapport au cœur du liquide. Cet enrichissement progressif de la couche limite proche de la surface libre du champagne n'a pas encore été clairement démontré. En revanche, cette démonstration existe pour l'interface océan/atmosphère. Plusieurs études quantitatives sur le "pétilllement de l'océan" ont montré que les gouttelettes issues des éclatements de bulles à la surface de l'océan constituent un hyper-concentrat des particules et des molécules tensioactives présentes dans l'eau.

Or, bon nombre de composés aromatiques présents dans le champagne présentent, de part leur structure moléculaire, des propriétés plus ou moins tensioactives. Ceux-ci se retrouvent probablement à une concentration plus élevée à l'interface champagne/air. En définitive, l'éclatement des bulles à la surface du champagne provoquerait ainsi la mise en suspension au-dessus du verre d'un nuage de très fines gouttelettes chargées en molécules tensioactives et potentiellement aromatiques [5,8].

L'éclatement des bulles en surface jouerait peut-être un rôle non négligeable dans l'effet exhausteur d'arômes au cours de la dégustation d'un champagne. Cette hypothèse basée sur une analogie entre l'éclatement des bulles de champagne et l'éclatement des bulles à la surface de l'océan reste à confirmer expérimentalement.

En observant attentivement à l'œil nu le comportement des bulles en surface, on se rend compte que la durée de vie des bulles s'allonge progressivement. Les éclatements se font plus rares. En effet, suite aux mouvements de convection dans le liquide et au ballet incessant des bulles, les macromolécules tensioactives du champagne migrent vers la surface libre, s'y adsorbent, et la rigidifient. Le drainage et l'amincissement qui précèdent la rupture du film des bulles " côté air " sont considérablement ralentis. Les bulles se stabilisent progressivement. Dès lors, les bulles disparaissent plus lentement, essentiellement par résorption (dégonflement d'une bulle) et « mûrissement d'Ostwald » (lorsqu'elles sont en contact, les petites bulles se vident dans les plus grosses).

3.3. Quand les bulles de champagne se déguisent en fleur...

Comme on peut le constater sur les clichés de la **figure 6**, l'éclatement est un processus très violent à l'échelle d'une bulle. Dans le cadre de mon travail de recherche scientifique et photographique, je me suis également intéressé aux conséquences de l'éclatement d'une bulle sur les bulles voisines.

Avec beaucoup de patience et aussi un peu de chance, j'ai pu réalisé des clichés de la situation qui suit immédiatement l'éclatement d'une bulle au contact d'autre bulles. Trois clichés apparaissent sur les **figures 8** et **9**. On constate que les bulles voisines sont violemment étirées vers la partie inférieure de la cavité laissée vacante par la bulle centrale qui vient de disparaître. Paradoxalement, les bulles voisines sont aspirées et non pas « soufflées » par une bulle qui éclate, contrairement à ce que notre intuition attendrait ... Ce processus conduit autour des bulles qui viennent d'éclater, à des structures en forme de fleur aussi éphémères qu'inattendues (quelques centaines de microsecondes seulement !). Elles sont, bien entendu, malheureusement invisibles à l'œil nu ... Ce violent phénomène d'aspiration est lié aux fortes différences de courbure qui existent à la surface du liquide suite à l'éclatement d'une bulle centrale.

Ces résultats sur les effets collatéraux d'un éclatement de bulles au contact de bulles voisines apparaissent originaux en œnologie, mais aussi dans le domaine plus vaste de la physique des bulles [4,12].

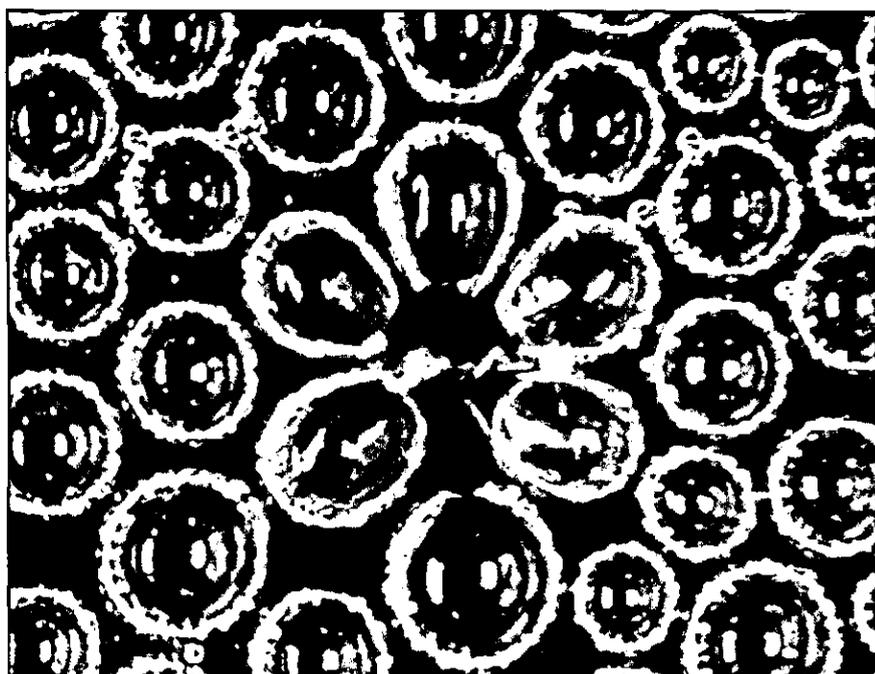


Fig. 8 et 9 : Vue oblique et de dessus d'un éclatement de bulle dans le radeau de bulles à la surface d'une flûte à champagne [4] ; barre = 1 mm (© Gérard Liger-Belair).