

P R I X   C O U P   D E   C Œ U R   2 0 0 3

Gérard LIGER-BELAIR

La physique des bulles  
de champagne

ACADEMIE MORIM





# PRÉFACE

Le Groupe Amorim, né du liège en 1870 au Portugal, a fondé les bases de son développement sur cette extraordinaire matière première, à travers la production de cet humble mais inséparable compagnon du Vin : le bouchon de liège.

Notre volonté de servir la cause du vin s'est toujours exprimée dans la recherche technologique sur la filière liège, base de notre activité.

En 1992, nous avons souhaité aller plus loin et nous engager davantage aux côtés des chercheurs en œnologie en créant l'Académie Amorim, un lieu de rencontre et d'échange entre œnologues, ingénieurs, professeurs, sommeliers, auteurs, artistes... tous animés d'une même passion du Vin. Chaque année, notre Académie encourage et soutient la recherche en œnologie par la remise d'un Prix à un chercheur ou à une équipe de chercheurs ayant fait paraître des travaux significatifs qui concourent à la défense et à la promotion de la qualité du Vin. Que soient ici saluées les personnalités, membres de cette Académie, qui contribuent si généreusement à cette mission. Je formule le vœux que cette collection, dédiée aux Lauréats du Grand Prix de l'Académie, devienne, au fil des ans, une référence et la mémoire vivante des efforts et des travaux engagés dans le monde entier pour servir la noble cause du Vin.

**Americo Ferreira de AMORIM**

Président du Groupe Amorim

## LAURÉATS DE L'ACADÉMIE AMORIM

### Grand Prix 2003 - Dominique ROUJOU DE BOUBÉE

*"Recherches sur la 2-méthoxy-3-isobutylpyrazine dans les raisins et dans les vins."*

### Grand Prix 2002 - Catherine PEYROT DES GACHONS

*"Recherches sur le potentiel aromatique des raisins de Vitis vinifera L. cv Sauvignon."*

### Grand Prix 2001 - René SIRET

*"Etude du polymorphisme génétique de la vigne cultivée (Vitis vinifera L.) à l'aide de marqueurs microsatellites : application à la caractérisation des cépages dans les vins."*

### Coup de Cœur 2001 - Frédéric BROCHET

*"La dégustation. Etude des représentations des objets chimiques dans le champ de la conscience."*

### Grand Prix 2000 - Takatoshi TOMINAGA

*"Recherches sur l'arôme variétal des vins de Vitis vinifera L. cv. sauvignon blanc et sa genèse à partir de précurseurs inodores du raisin."*

### Coup de Cœur 2000 - Jean-Pierre GOT

*"Le verre de vin dans la peinture hollandaise de l'Age d'Or. Les vins de Bergerac et les Provinces-Unis."*

### Grand Prix 1999 - Isabelle CUTZACH-BILLARD

*"Etude sur l'arôme des vins doux naturels non muscatés au cours de leur élevage et de leur vieillissement. Son origine. Sa formation."*

### Prix Chêne-Liège 1999 - Noël HEYES

*"La Perméabilité à l'oxygène de la cire de paraffine macrocristalline et sa conséquence sur les traitements de surface des bouchons en liège naturel destinés aux vins tranquilles."*

### Coup de Cœur 1999 - Julien PILLOT & Jean-Christian LAMBORELLE

*"Le décret du 1<sup>er</sup> décembre 1936 dit "code du vin" : étude critique."*

### Grand Prix 1998 - Virginie MOINE-LEDOUX

*"Recherches sur le rôle des Mannoprotéines de levure vis à vis de la stabilité protéique et tartrique des vins."*

### Coup de Cœur 1998 - Marie-Laure CHAMUSSY-BOUTEILLE

*"Colette : un vin d'écrivain."*

### Grand Prix 1997 - Valérie LAVIGNE-CRUEGE

*"Recherche sur les composés soufrés formés par la levure au cours de la vinification et l'élevage des vins blancs secs."*

### Grand Prix 1996 - Sylvie BIAU

*"Etude de la matière colorante des vins blancs de Bordeaux."*

### Prix Chêne-Liège 1996 - Guillem ROIG I JOSA - Héctor RIU SAVALL Josep SANCHO I VALLS

*"Traitement des résidus de l'industrie du liège par la culture des champignons."*

### Mention d'Honneur du Jury 1995 - P.L. TEISSEDRE - A.L. WATERHOUSE R.L. WALZEM - J.-B. GERMAN - E.N. FRANKEL - A.J. CLIFFORD

*"Composés phénoliques du raisin et du vin et santé."*

### Grand Prix 1995 - Samuel LUBBERS

*"Etude des interactions entre les macromolécules d'origine levurienne du vin et les composés d'arôme."*

### Grand Prix 1994 - Ziya GÜNATA

*"Etude et exploitation par voie enzymatique des précurseurs d'arôme du raisin, de nature glycosidique."*

### Grand Prix 1993 - Pierre-Louis TEISSEDRE

*"Le plomb, du raisin au vin."*

### Grand Prix 1992 - Pascal CHATONNET

*"Incidence du bois de chêne sur la composition chimique et les qualités organoleptiques des vins, applications technologiques."*

# Ah ! Si la vie d'une bulle de champagne nous était contée...

C'est ce qu'a entrepris de faire Gérard Liger-Belair

qui nous propose, en quelques pages, une plongée au cœur

de l'effervescence du champagne.

Pour nous, il va décortiquer, illustrer, le cas échéant interpréter

sous l'angle de la physico-chimie, les différentes étapes fondamentales

de la vie éphémère d'une bulle.

Nous assisterons ainsi à sa naissance, à son décollement,

à son ascension dans le verre et à son éclatement en surface.

Gérard Liger-Belair nous raconte une histoire passionnante

et montre combien le rôle des bulles est important et combien

il influe sur la perception de l'arôme des vins de Champagne.

Ce très joli sujet qui associe l'art à la recherche scientifique

est allé droit au cœur des membres de l'Académie Amorim

qui lui décernent, comme il se doit, le « Coup de cœur »

**Robert TINLOT**

Président de l'Académie Amorim



La physique  
des  
bulles de champagne

*Par*

Gérard Liger-Belair

*Laboratoire d' nologie, Faculté des Sciences de Reims*





*"J'aime à boire du champagne après une victoire, pour la célébrer ... mais aussi après une défaite, pour me consoler ..."*

**Napoléon Bonaparte**

## **Introduction**

---

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, qui est la première région au monde pour le chiffre d'affaire, notre laboratoire d'œnologie basé au cœur du vignoble champenois se devait de démarrer un programme consacré aux processus physico-chimique liés à l'effervescence de ce vin prestigieux.

Avant 1998, 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 donnée quantitative 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).

En démarrant directement l'étude sur une batterie de solutions modèles gazéifiées, comme cela avait été envisagé dans un premier temps, nous aurions pris le risque de conduire une étude académique, certes très intéressante sur le plan strictement scientifique, mais trop éloignée du produit final et, par là même, des attentes des industriels. C'est pourquoi, 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 au début de cette étude, en accord avec nos partenaires industriels, les Champagnes Moët & Chandon, Pommery et la Verrerie Cristallerie d'Arques, 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, en quelques pages, de faire une plongée au cœur de l'effervescence du champagne, de décortiquer, d'illustrer et le cas échéant 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.

J'ai également joint à la fin de ce document, sous la forme d'un petit portfolio, quelques unes des photos qui font désormais partie d'une exposition itinérante.

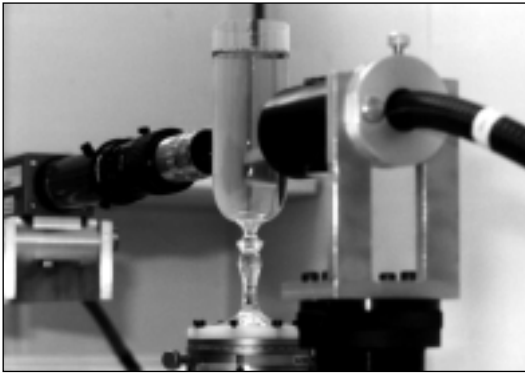
## **I. La naissance et le décollement des bulles**

Au cours de la deuxième fermentation alcoolique qui a lieu en bouteille, les levures consomment le sucre mis à leur disposition et libèrent du dioxyde de carbone (le  $\text{CO}_2$ ). Un équilibre s'établit progressivement entre le  $\text{CO}_2$  qui reste dissous dans le vin et le  $\text{CO}_2$  gazeux piégé dans le col de la bouteille. A l'ouverture d'une bouteille de champagne le  $\text{CO}_2$  en phase gazeuse s'échappe brutalement. L'équilibre thermodynamique est rompu, et le vin devient sursaturé en  $\text{CO}_2$ . Il doit inexorablement se débarrasser de ce gaz carbonique en excès. Le  $\text{CO}_2$  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.

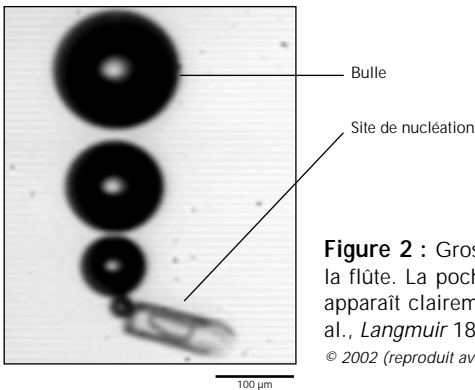
Afin d'observer en temps réel la production répétitive de bulles au niveau d'un site de nucléation, le laboratoire d'oenologie s'est équipé d'une caméra ultra-rapide capable de filmer jusqu'à 2000 images/s avec une résolution proche du micromètre. Une photo du dispositif apparaît sur la figure 1.

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 [7-12]. Ces particules en solution jouent le rôle de site de nucléation. Les molécules de  $\text{CO}_2$  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. 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 (quelques centièmes de millimètres seulement !).



**Figure 1 :** Détail du banc d'observation des sites de nucléation en conditions réelles de consommation (d'après Liger-Belair et al., *Am. J. Enol. Vitic.* 53, 151-153, 2002).

© 2002 (reproduit avec l'aimable autorisation de l'American Society for Enology and Viticulture)



**Figure 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  $\mu\text{m}$  (d'après Liger-Belair et al., *Langmuir* 18, 1294-1301, 2002).

© 2002 (reproduit avec l'aimable autorisation de l'American Chemical Society)

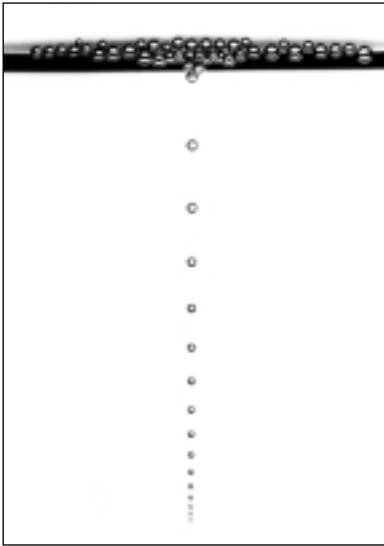
La figure 2 illustre cette formation répétitive de bulles sur une impureté de la surface du verre (très probablement une structure de cellulose creuse et allongée).

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 bulle semble figé [2,4,7-12]. 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.

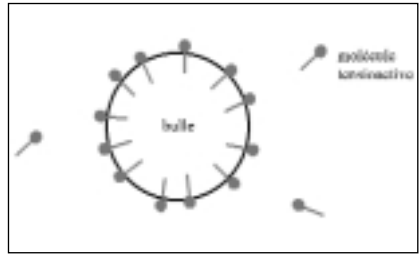
## 2. L'ascension des bulles

Une fois détachée de son site de nucléation, la bulle de champagne entame sa progression dans la matrice liquide. Le  $\text{CO}_2$  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. Les bulles du champagne peuvent être considérées comme sphériques pendant l'ascension, comme l'atteste la figure 3.

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).



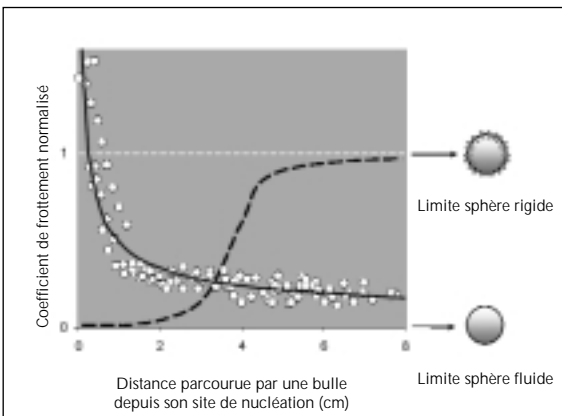
**Figure 3 :** Train de bulles dans sa globalité ; on remarquera sa contribution individuelle à la formation de la collerette ; la bande noire en surface est due au ménisque de liquide formé au niveau de la paroi de la flûte ; barre = 1 mm. (Photographie : Gérard Liger-Belair).



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

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 traînée (ou coefficient de frottement) de la bulle augmente par rapport à celui d'une bulle de même taille qui monte dans une solution ultra-pure, vierge de toute molécule tensioactive. Le coefficient de frottement d'une bulle de champagne de taille donnée se situe donc nécessairement entre deux limites extrêmes : le coefficient de frottement d'une bulle saturée en molécules tensioactives (hydrodynamiquement équivalente à une sphère rigide), et celui 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. La figure 5 représente l'évolution de ce coefficient de frottement exercé sur les bulles de champagne pendant leur trajet vers la surface libre. Au bout de quelques millimètres d'ascension, l'état de surface des bulles apparaît grossièrement constant et proche de celui d'une bulle "propre". Les bulles de champagne apparaissent donc faiblement chargées en molécules tensioactives pendant la majeure partie de leur trajet vers la surface [4].



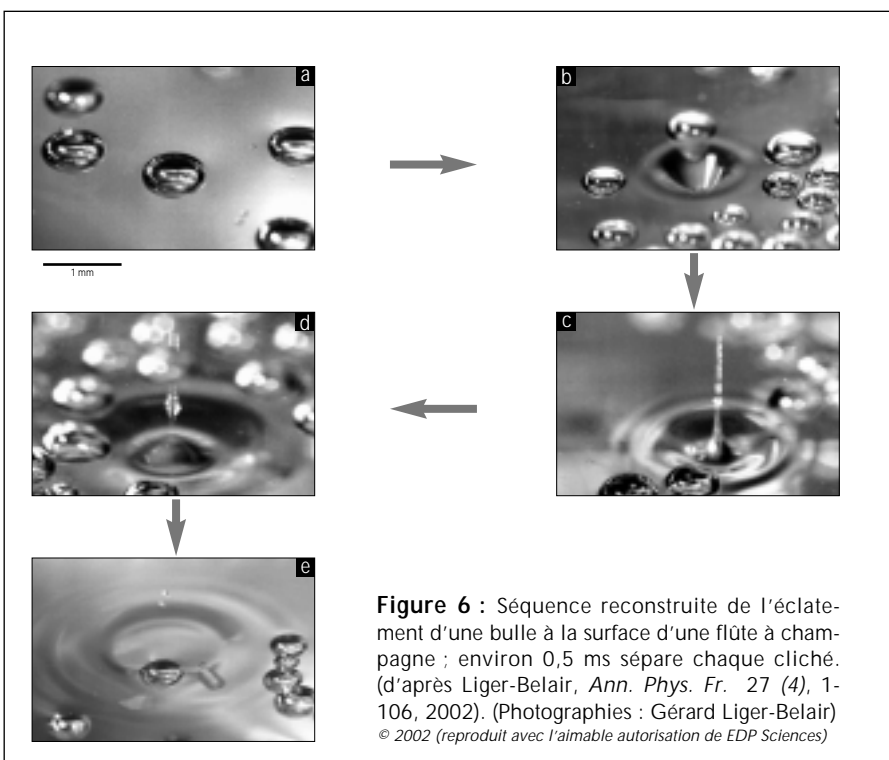
**Figure 5 :** Coefficient de frottement normalisé des bulles de champagne au cours de leur ascension vers la surface, comparé à l'allure du coefficient de traînée normalisé qu'une bulle de taille fixe subit lorsqu'elle monte dans une solution contenant des macromolécules tensioactives (d'après Liger-Belair et Jeandet, *Langmuir* 19, 801-808, 2003).

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 pour finalement devenir totale après un trajet d'autant plus court que la bulle est petite et que la solution est riche en tensioactifs [3].

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 [13-15]. Elle se défend, en quelque sorte...

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 [4,12]. 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 sont intéressants car ils 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.



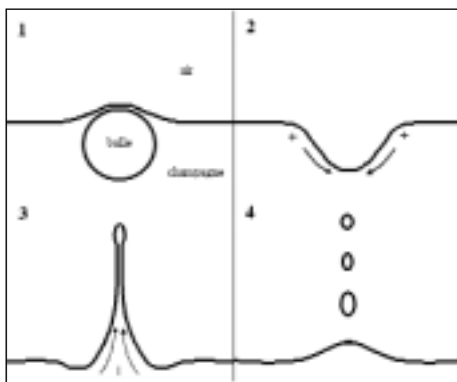
### 3. L'éclatement des bulles en surface

#### 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 (1/1 000 mm). 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 ( $\approx 1$  mm), le temps de disparition de cette calotte sphérique n'est que de quelques dizaines de microsecondes (quelques 1/100 000 s) ! 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 [6,12].

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, on distingue une minuscule bulle d'air, probablement emprisonnée pendant ce processus. Puis, sous l'effet de sa propre vitesse, des instabilités 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. 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.



**Figure 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). (d'après Liger-Belair et al., *Am. J. Enol. Vitic.* 52, 88-92, 2001).

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.

#### 3.2. L'EFFERVESCENCE : UN PHÉNOMÈNE EXHAUSTEUR D'AROMES ?

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

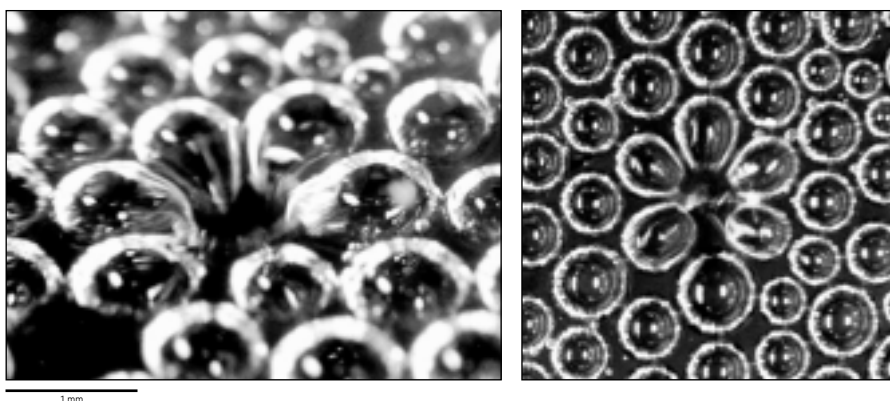
superficielle à l'interface champagne/air. Or du fait du transfert des molécules tensioactives du cœur de phase vers la surface lié au ballet incessant des bulles et aux mouvements de convection du liquide, cette fine couche interfaciale s'enrichit progressivement en molécules tensioactives par rapport 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 [6,12]. 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.



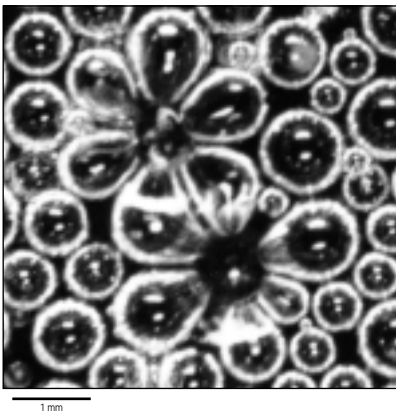
**Figures 8 et 9** : Vue oblique et de dessus d'un éclatement de bulle dans le radeau de bulles à la surface d'une flûte à champagne. (d'après Liger-Belair, *Ann. Phys. Fr.* 27 (4), 1-106, 2002) ; barre = 1 mm. (Photographies : Gérard Liger-Belair)

© 2002 (reproduit avec l'aimable autorisation de EDP Sciences)

Avec beaucoup de patience et aussi un peu de chance, j'ai pu réaliser des clichés de la situation qui suit immédiatement l'éclatement d'une bulle au contact d'autres

bulles. Trois clichés apparaissent sur les figures 8, 9 et 10. 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 existe à la surface du liquide suite à l'éclatement d'une bulle centrale [16].

Ces résultats sur les effets collatéraux d'un éclatement de bulles au contact de bulles voisines apparaissent originaux en œnologie, mais aussi dans le vaste domaine de la physique des bulles. Ces premiers résultats surprenants ont fait l'objet d'une note présentée aux Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris par le Professeur Pierre-Gilles de Gennes [5].



**Figure 10** : Deux bulles éclatent simultanément dans le tapis de bulles à la surface d'une flûte à champagne. (d'après Liger-Belair, *Scientific American* 288, 68-73, 2003) ; barre = 1 mm. (Photographie : Gérard Liger-Belair).

© 2003 (reproduit avec l'aimable autorisation de Scientific American Inc.)

## 4. Conclusions

Cette première étude consacrée aux processus physico-chimiques liés à l'effervescence des vins de Champagne a permis, par la mise en place de méthodes simple d'abord, puis de plus en plus complexes, de mettre en évidence, de quantifier et le cas échéant d'interpréter les trois phases fondamentales de la courte vie d'une bulle que sont : sa naissance, son ascension et son éclatement en surface. Entre la naissance d'une bulle dans le champagne et son éclatement en surface, il ne s'écoule que quelques secondes, tout au plus. Mais, comme vous avez pu le constater, bien qu'éphémère, la vie d'une bulle de champagne n'en est pas moins riche d'évènements. Une de mes satisfactions serait que vous ne regardiez plus tout à fait de la même façon une flûte de champagne, la prochaine fois que vous en consommerez... Pour ce qui est des perspectives à venir, ce travail ouvre la voie à un axe de recherche majeur pour les prochaines études, et ce, tant sur le plan de la recherche appliquée que de la recherche fondamentale. En effet, si la naissance et l'ascension de la bulle dans le champagne sont deux étapes aujourd'hui assez bien comprises dans leurs principes, le mécanisme intime de l'éclatement et son effet potentiellement exhausteur d'arômes se doivent d'être approfondis. C'est dans cette voie que nous concentrerons nos efforts de recherche à venir.

**REMERCIEMENTS** : JE REMERCIE L'INSTITUT EUROPOL'AGRO ET L'ASSOCIATION RECHERCHE ŒNOLOGIQUE CHAMPAGNE ET UNIVERSITÉ POUR LEUR SOUTIEN FINANCIER, LES SOCIÉTÉS MOËT & CHANDON, POMMERY, AINSI QUE LA VERRERIE CRISTALLERIE D'ARQUES POUR LEUR PARTICIPATION ACTIVE À LA RECHERCHE EN COURS.



# Bibliographie

---

- CASEY, G. "Bubble size, bubble frequency and rate of gas loss in sparkling wines" *Australian Grapegrower and Winemaker* **1988**, 295, 19-23.
- LIGER-BELAIR, G., MARCHAL, R., ROBILLARD, B., VIGNES-ADLER, M., MAUJEAN, A. & JEANDET, P. "Study of Effervescence in a Glass of Champagne : Frequency of Bubble Formation, Growth Rates and Velocities of Rising Bubbles" *Am. J. Enol. Vitic.* **1999**, 50, 317-323.
- YBERT, C. "Stabilisation des mousses aqueuses par des protéines" **1998**, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- LIGER-BELAIR, G., MARCHAL, R., ROBILLARD, B., VIGNES-ADLER, M., MAUJEAN, A. & JEANDET, P. "On the Velocity of Expanding Spherical Gas Bubbles Rising in line in Supersaturated Hydroalcoholic Solutions : Application to Bubble Trains in Carbonated Beverages" *Langmuir*<sup>2</sup> **2000**, 16, 1889-1895.
- LIGER-BELAIR, G., ROBILLARD, B., VIGNES-ADLER, M., & JEANDET, P. "Flower-Shaped Structures Around Bubbles Collapsing in a Bubble Monolayer" note présentée par Pierre-Gilles de Gennes, *C. R. Acad. Sci. Paris, série IV (physique-astronomie)* **2001**, 2, 775-780.
- LIGER-BELAIR, G., LEMARESQUIER, H., ROBILLARD, B., DUTEURTRE, B., & JEANDET, P. "The secrets of fizz in Champagne wines: A phenomenological study" *Am. J. Enol. Vitic.* **2001**, 52, 88-92.
- LIGER-BELAIR, G. "Une première approche des processus physico-chimiques liés à l'effervescence des vins de Champagne" **2001**, Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne -Ardenne, Reims, France.
- LIGER-BELAIR, G., VIGNES-ADLER, M., VOISIN, C., ROBILLARD, B., & JEANDET, P. "Kinetics of gas discharging in a glass of champagne: the role of nucleation sites" *Langmuir* **2002**, 18, 1294-1301.
- LIGER-BELAIR, G., & JEANDET, P. "Naissance, vie et mort d'une bulle de champagne" *Revue Française d'Oenologie* **2002**, 193, 45-48.
- LIGER-BELAIR, G., & JEANDET, P. "Effervescence in a glass of champagne: A bubble story" *europysicsnews* **2002**, 33, 10-14.
- LIGER-BELAIR, G., MARCHAL, R., & JEANDET, P. "Close-up on bubble nucleation in a glass of champagne" *Am. J. Enol. Vitic.* **2002**, 53, 151-153.
- LIGER-BELAIR, G. "La physique des bulles de champagne" *Ann. Phys. Fr.* **2002**, 27 (4), 1-106. ISBN 2-86883-624-0
- LIGER-BELAIR, G., & JEANDET, P. "More on the surface state of expanding champagne bubbles rising at intermediate Reynolds and high Peclet numbers" *Langmuir* **2003**, 19, 801-808.
- LIGER-BELAIR, G. "The science of bubbly" *Scientific American* **2003**, 288 (1), 68-73.
- MARCHAL, R & LIGER-BELAIR, G. "Mousse et effervescence des vins de Champagne: Bilan de 15 années de recherche champenoise" *Revue des Enologies et des Techniques Vitivinicoles et Oenologiques* **2003**, 107, 41-50.
- LIGER-BELAIR, G., & JEANDET, P. "Capillary-driven flower-shaped structures around bubbles collapsing in a bubble raft at the surface of a liquid of low viscosity" *Langmuir* **2003**, 19, 5771-5779.

<sup>(1)</sup> American Journal of Enology and Viticulture

<sup>(2)</sup> Langmuir, the American Chemical Society Journal of Colloids and Surfaces

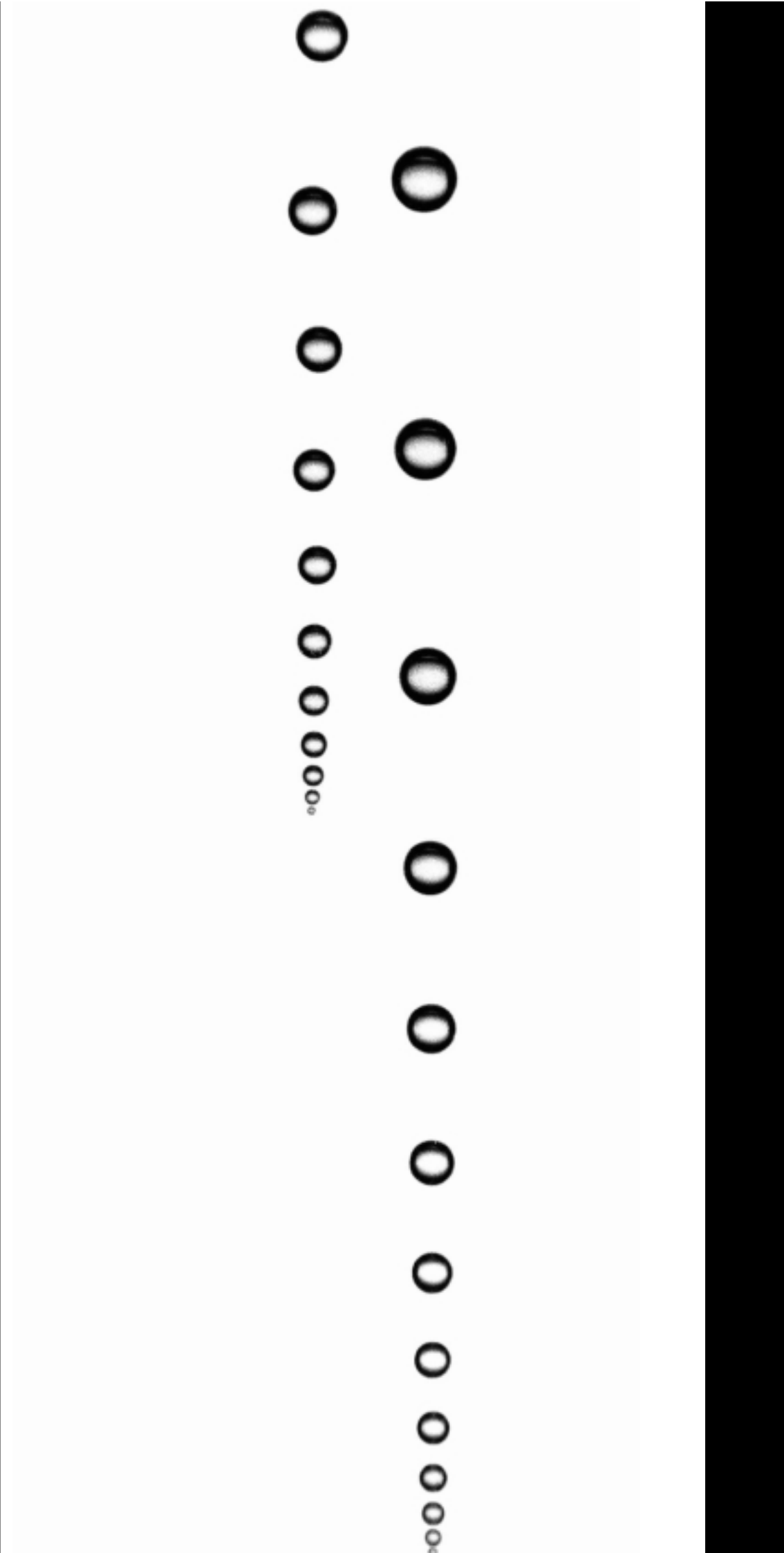
<sup>(3)</sup> Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, série IV (Physique-Astronomie)

## Portfolio

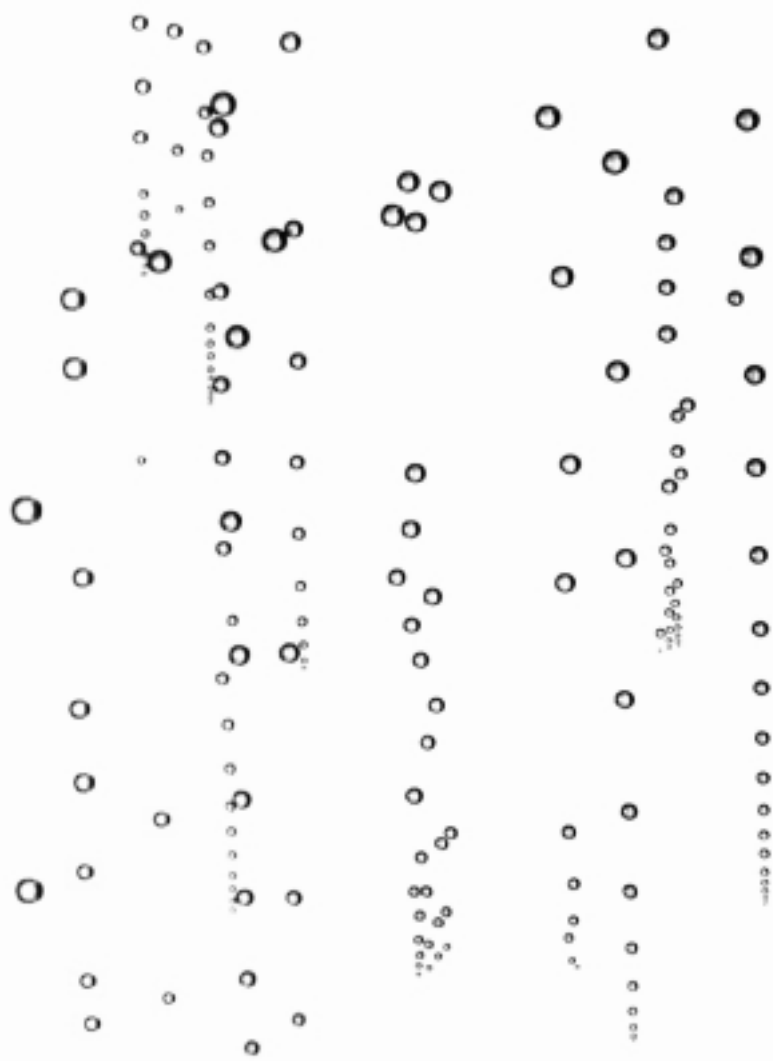
Les bulles fascinent enfants et adultes depuis des milliers d'années, parce qu'elles sont insaisissables, parce qu'elles sont colorées et surtout parce qu'elles sont fragiles. Il s'est développé une science considérable des bulles et des mousses. Mais, comme toujours, il ne faut pas que cette science étouffe la poésie : avoir des images, savoir les regarder est un élément précieux de notre culture. Les photos de Gérard Liger-Belair vont bien dans ce sens. Je souhaite qu'elles suscitent beaucoup de curiosité et de rire.

**P.G. de Gennes**

*Septembre 2000*

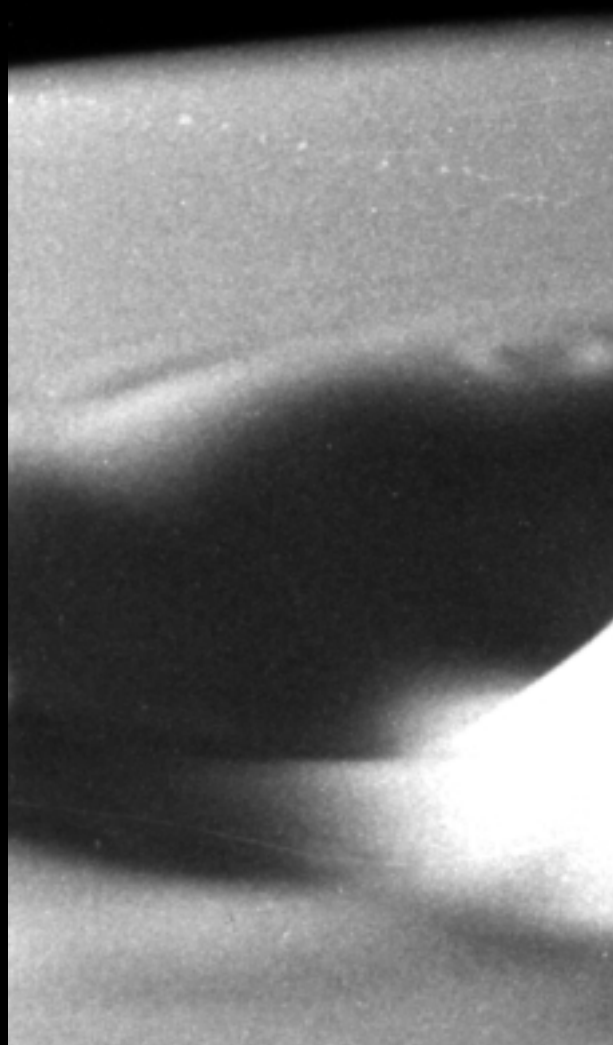




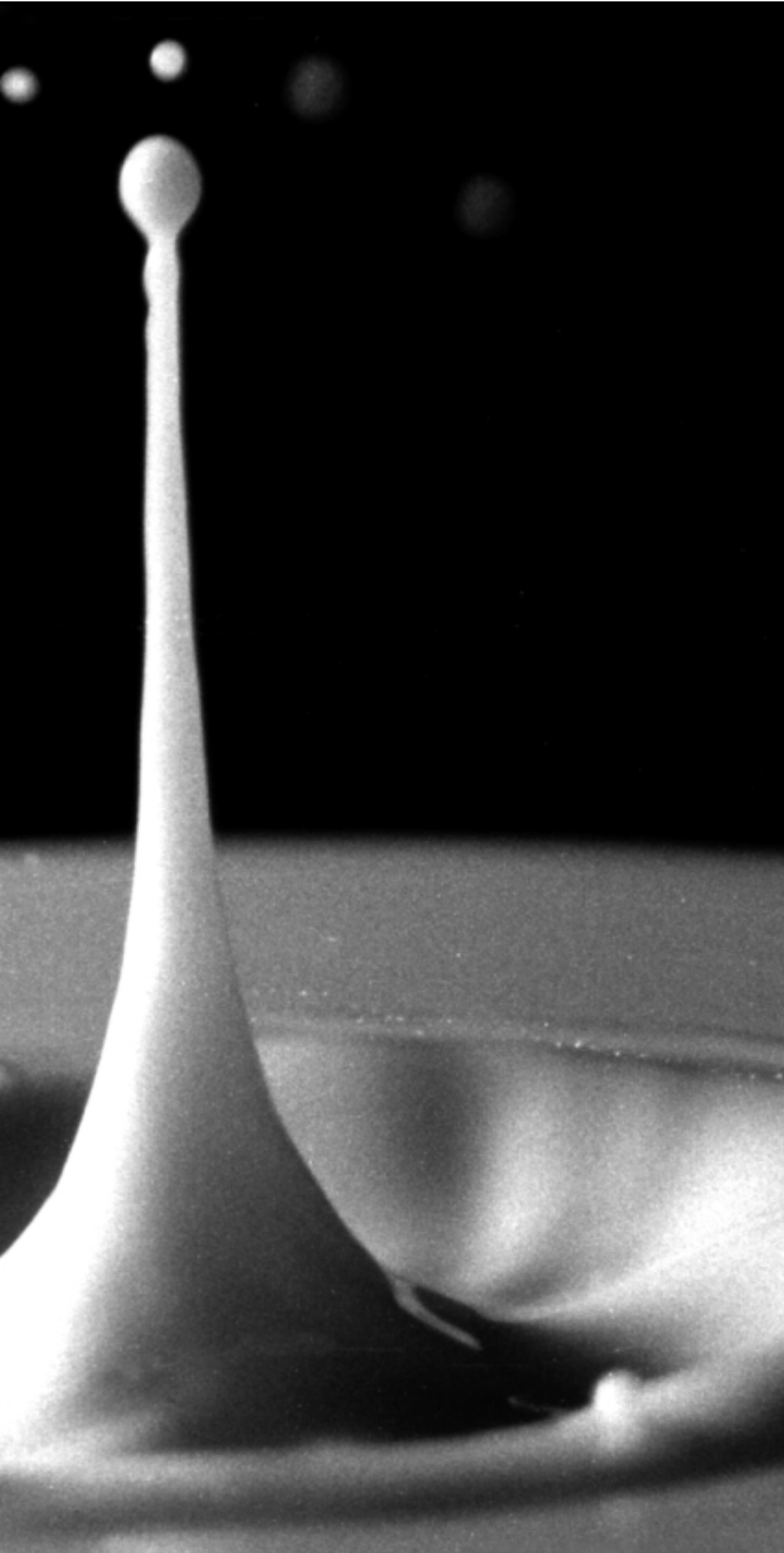


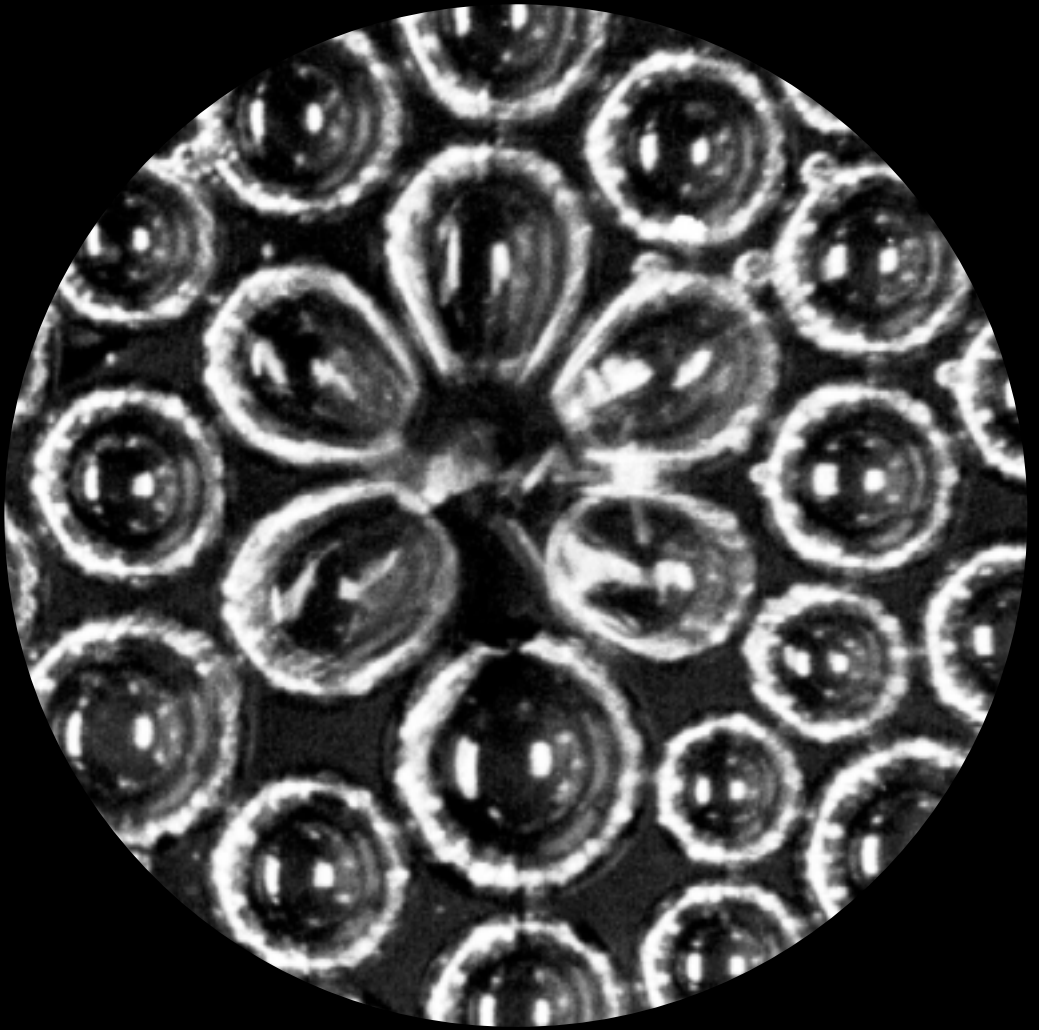










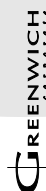




ACADEMIE  MORIM

11, Villa Wagram Saint-Honoré - 75008 Paris - France  
Tel : 01 58 05 10 70 - Fax : 01 58 05 10 71 - Email : [contact@academie-amorim.com](mailto:contact@academie-amorim.com)

**L'Académie AMORIM est sur INTERNET**  
[www.academie-amorim.com](http://www.academie-amorim.com)

 GREENWICH