

La vie éphémère

MICHÈLE VIGNES-ADLER • FRANÇOIS GRANER

La mousse du champagne disparaît rapidement. Celle de la bière persiste davantage. Les physiciens découvrent les mécanismes responsables de la fugacité des mousses.

Sur la présence de la mousse dans la bière, les avis sont partagés. Certains cultivent le paradoxe : ils la tiennent comme indispensable (une bière sans mousse n'est plus tout à fait une bière), et pourtant souhaitent qu'elle disparaisse prestement pour apprécier leur breuvage. D'autres, au contraire, aimeraient qu'elle persiste jusqu'à la dernière gorgée. Une célèbre brasserie irlandaise a ainsi cherché à prolonger la durée de vie de la mousse de ses bières brunes.

Les mousses sont utilisées dans des domaines variés : la préparation de produits alimentaires et de cosmétiques, l'extraction pétrolière, la lutte contre les incendies, la flottaison des minerais, ou encore la décontamination nucléaire. Cette multiplicité d'usages tient à leur structure qui leur confère des comportements physiques originaux. De loin, elles ressemblent à une sorte de liquide épais et homogène, mais, observées de plus près, elles apparaissent comme un ensemble complexe de bulles de gaz, isolées les unes des autres par un film liquide. Finalement, la mousse n'est rien d'autre que du gaz dans du liquide : beaucoup de volume pour peu de matière.

Les physiciens étudient comment les caractéristiques des mousses liquides à l'échelle globale, telles que la consistance, la fluidité et la stabilité, naissent de cette structure et des propriétés physico-chimiques du liquide. Aujourd'hui, ils retracent les étapes qui jalonnent la vie d'une mousse : de sa formation, qui mène à un agglomérat désorganisé de bulles, jusqu'à sa disparition. Trois

mécanismes gouvernent cet effondrement : le mûrissement qui impose l'évolution de la mousse en fonction des différences de pression dans les bulles, le drainage qui assèche la mousse, et la coalescence des bulles. Lors de ces étapes, des molécules tensioactives jouent un rôle déterminant. Découvrons quelques épisodes de l'existence d'une mousse.

Une architecture simple

Lorsqu'on prépare des mousses avec très peu de liquide, (moins de un pour cent du volume total), les parois des bulles sont minces (à peine quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur) et les bulles polyédriques (voir la figure 1). En 1873, le physicien belge Joseph Plateau a énoncé les règles qui régissent l'agencement des bulles : les bulles s'accolent par trois (chaque arête des polyèdres est commune à trois bulles), l'angle entre les faces d'une même bulle est égal à 120 degrés, chaque sommet est commun à quatre arêtes et l'angle entre arêtes est très proche de 109,5 degrés. Dans ces conditions, la mousse est en équilibre mécanique.

Pourquoi cette géométrie ? Une paroi de liquide est sous tension. Au sein du liquide, chaque molécule attire celles qui l'entourent. En chaque point, l'énergie de cohésion du liquide correspond à celle qu'il faudrait fournir pour disperser ses molécules. À la surface, l'énergie de cohésion est moindre, puisqu'une molécule y a moins

des mousses

Jipack Photo Library/CORBIS

de voisines qu'une molécule localisée au sein du liquide. Plus la surface est réduite, plus l'énergie de cohésion est favorable. C'est la raison pour laquelle une goutte d'eau en impesanteur adopte une forme sphérique : la sphère est la forme de surface minimale pour un volume donné. Dans les mousses, la force dite de tension superficielle, tend à minimiser la surface des bulles. Les bulles s'agencent de façon à ce que, le long de l'ensemble des arêtes, les tensions entre faces s'équilibrent : les angles entre arêtes doivent être égaux.

Si l'on a des difficultés à visualiser cet agencement dans l'espace, on peut simplifier le problème et le réduire à deux dimensions. En plaçant de la mousse dans le fond d'une assiette et en la comprimant avec un verre jusqu'à n'avoir plus qu'une couche de bulles, on obtient une mousse à «deux dimensions». Les règles de Plateau deviennent apparentes : on voit les bulles se rencontrer trois par trois avec des angles de 120 degrés (voir la figure 1).

Outre la tension superficielle, les bulles sont également soumises à la pression exercée par les molécules de gaz piégées dans ces bulles. L'air s'oppose à l'effondrement des bulles et la taille d'équilibre est atteinte. Dans ces conditions, quelle forme ont les bulles? La réponse diffère selon la dimension de la mousse. À deux dimensions, le problème revient à trouver une configuration de bulles telle que leur périmètre total soit minimal. Faisons un détour par l'architecture des ruches : les abeilles qui construisent leur ruche de façon à économiser la cire bâtissent des alvéoles dont la section est un réseau hexagonal... en «nid-d'abeilles» (la construction des abeilles est tridimensionnelle, mais elle se réduit à un problème à deux dimensions, car la ruche est identique à elle-même sur la troisième dimension). C'est le réseau de périmètre minimal ; si cette affirmation figure dans un traité d'apiculture datant de plus de 2 000 ans, elle n'a été démontrée qu'en 2001 par le mathématicien Thomas Hales, de l'Université du Michigan, et illustre le fossé qui existe souvent entre intuition et démonstrations rigoureuses.

Ainsi, à deux dimensions, les bulles s'agencent selon un réseau hexagonal. À trois dimensions, le problème est plus difficile : quelles bulles remplissent complètement l'espace

sans laisser d'interstices, délimitant des angles de 120 degrés entre les faces, et assurant une surface totale minimale? En 1887, Lord Kelvin prétendit que le meilleur arrangement de bulles identiques est un pavage périodique d'un polyèdre à 14 faces nommé «tétrakaidécaèdre». Cette assertion a été admise, sans être prouvée, jusqu'à ce qu'en 1982, Fred Almgren, de l'Université de Princeton, la mette en doute ; en 1993, Denis Weaire et Robert Phelan, à Dublin, ont démontré qu'elle était fautive. En observant différents assemblages d'atomes présents dans les matériaux cristallins, ils ont imaginé un arrangement dont la surface est inférieure de 0,3 pour cent à celle de Kelvin. Aujourd'hui, on ignore si cette solution est la meilleure, et d'ailleurs D. Weaire et R. Phelan se gardent bien de l'affirmer. La question reste ouverte.

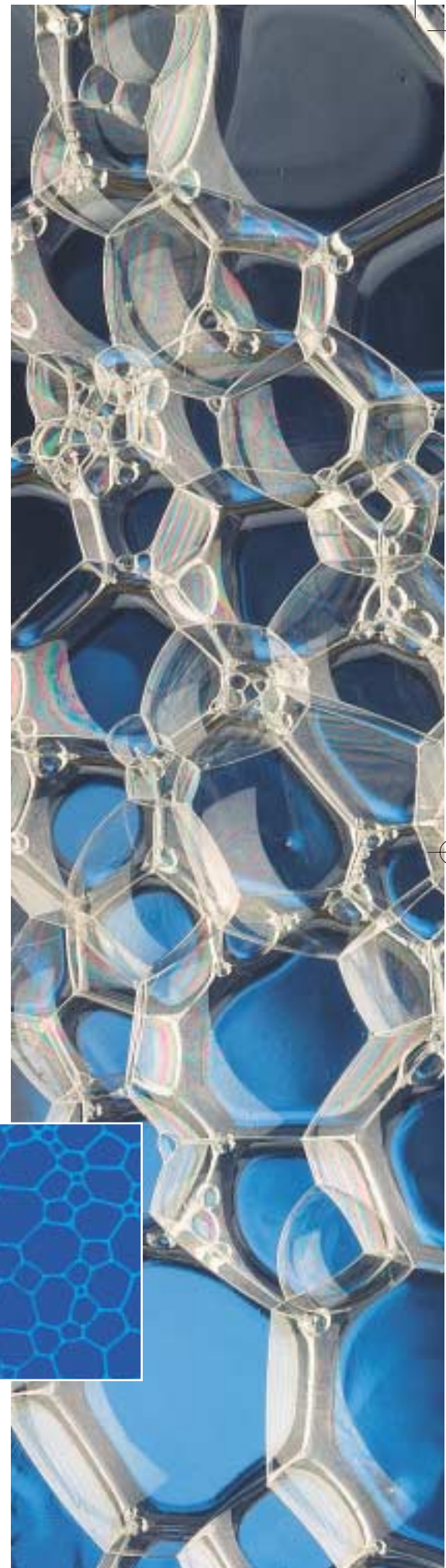
Un nombre de faces variable

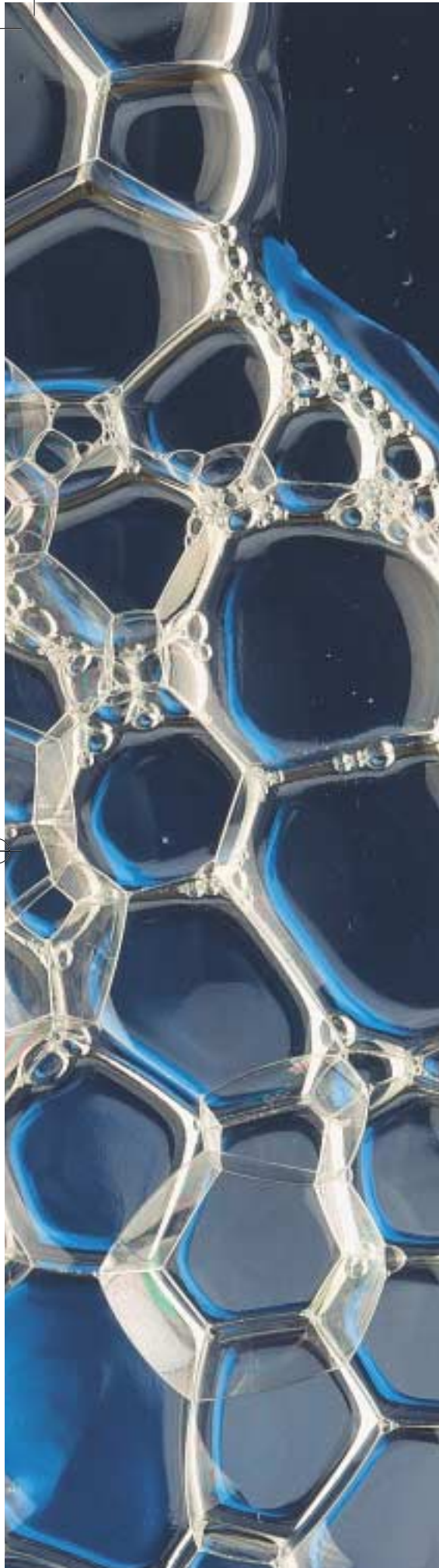
Ces arrangements restent une vision théorique des mousses. Dans la réalité, l'arrangement est rarement optimal, car les bulles ne peuvent se déplacer les unes par rapport aux autres. Les bulles diffèrent en taille et sont agencées de façon désordonnée. Comment les physiciens, confrontés à cette variabilité, se repèrent-ils?

Revenons aux mousses à deux dimensions. D'après les règles de Plateau, les angles entre les arêtes des bulles sont tous égaux à 120 degrés. L'hexagone est le seul polygone dont les côtés sont rectilignes et qui respecte cette condition. Tout autre polygone



1. UNE MOUSSE à deux dimensions (*ci-dessus*) s'obtient en pressant une mousse entre deux plaques jusqu'à obtenir une couche de bulles. Il y a peu d'eau dans la mousse, de sorte que les bulles sont polygonales. Leur agencement respecte les règles de Plateau : les arêtes se croisent avec des angles de 120 degrés. Dans une mousse tridimensionnelle (*ci-contre*), les angles entre arêtes sont d'environ 109,5 degrés.





est nécessairement concave ou convexe, c'est-à-dire que ses côtés ne sont plus droits : toute bulle ayant plus de six côtés est convexe, et toute bulle ayant moins de six côtés est concave (voir la figure 2). Or, selon une loi découverte par Pierre Simon de Laplace en 1805, la courbure d'une bulle est reliée à la pression qui y règne. Lorsque la pression d'une bulle est supérieure à celle qui règne dans les bulles environnantes, les faces de la bulle sont d'autant plus convexes, c'est-à-dire déformées vers l'extérieur, que la surpression est grande ; inversement, quand la pression est inférieure, les faces sont concaves. Grâce à cette propriété et au fait que les angles sont de 120 degrés, le mathématicien von Neumann a découvert, en 1952, une propriété particulière des mousses à deux dimensions qui lie deux quantités *a priori* très différentes, le nombre de côtés et la pression : les bulles ayant moins de six côtés, qui sont convexes, sont en surpression par rapport à leurs voisines, et les bulles qui ont plus de six côtés, concaves, sont en dépression (voir la figure 2).

L'un de nous (F. Graner) a contribué à la réécriture des conditions de Plateau et de la courbure sous forme d'équations formellement équivalentes aux équations de l'électrostatique. L'idée d'une analogie entre les deux systèmes très différents est venue de la description des bulles en termes de charges topologiques : on attribue aux bulles une valeur, nommée charge topologique, qui est égale à six moins le nombre de côtés. La charge topologique est négative pour les bulles concaves et positive pour les bulles convexes. On décrit alors la mousse comme une répartition de charges topologiques, positives, négatives ou nulles, comme pour des charges électriques.

Cette analogie a permis de ramener le difficile problème de la mousse à un type d'équations bien connu qui lient la répartition de charges électriques au champ électrique auxquelles elles donnent naissance. On démontre ainsi que l'énergie de la mousse est inférieure quand deux bulles adjacentes ont l'une un nombre de côtés supérieur à six, et l'autre, un nombre inférieur. Cela justifie l'observation déjà ancienne que les pentagones et les heptagones sont généralement associés par paires.

Revenons maintenant aux mousses à trois dimensions. Chaque bulle a

faces, c'est-à-dire *f* voisines, et chacune de ces faces a *n* côtés. Une relation, établie théoriquement, lie les valeurs moyennes de ces deux paramètres (la valeur moyenne de *n* est égale à $6 - 12 / (\text{valeur moyenne de } f)$). Dans les années 1940, le botaniste Edwin Matzke a observé sous une loupe binoculaire une à une 1 000 bulles d'une mousse où toutes les bulles avaient à peu près la même taille ; il a constaté que 99 pour cent des bulles ont un nombre de faces compris entre 12 et 15, et que 95 pour cent des faces ont entre quatre et six côtés. Parmi ces faces, la majorité (60 pour cent) est constituée de pentagones, et il y a plus d'hexagones que de quadrilatères. Au total, ni la moyenne du nombre de côtés ni celle du nombre de côtés d'une face ne sont des nombres entiers (la valeur moyenne de *n* est environ égale à 5,1). Contrairement au cas à deux dimensions, le remplissage de l'espace avec des polyèdres dont les faces sont des hexagones engendre des faces courbées.

Il est à noter que, dans une mousse aux bulles arrangées de façon désordonnée, même si toutes les bulles ont presque le même volume (voire ont rigoureusement le même volume, ce qu'on sait réaliser dans des simulations sur ordinateur), les structures ne sont jamais exactement celles des réseaux ordonnés et de surface faible. Ainsi, quand Andrew Kraynik, du Laboratoire Sandia du Nouveau-Mexique, a simulé l'organisation prise par 10 000 bulles, il n'a guère trouvé que deux « tétrakaidécaèdres » de Kelvin, et... pas du tout de structure de Weaire-Phelan. Au final, à deux dimensions comme à trois, loin d'être la structure idéale dont certains rêvaient, la mousse est désordonnée, mais elle est organisée par des lois statistiques d'ensemble.

La mise en bière de la mousse

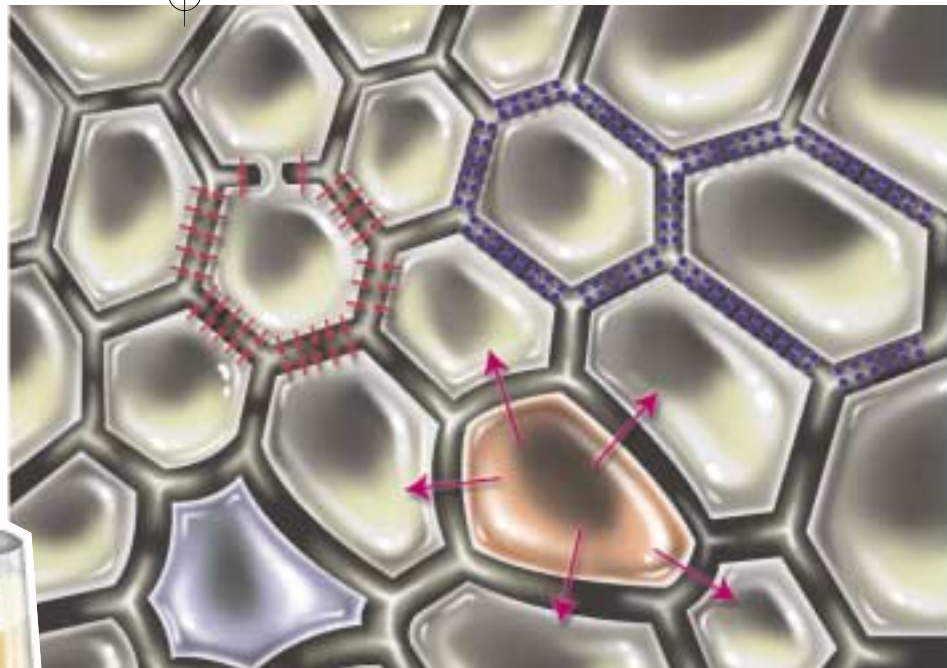
La vie d'une mousse liquide est éphémère. Aussitôt après sa formation, trois mécanismes mènent à sa disparition, classés par ordre décroissant de durée : le mûrissement, lié à la pression du gaz, qui dure d'une minute à plusieurs heures ; le drainage, lié au liquide, qui intervient à l'échelle de la minute ; la rupture des films, phénomène presque instantané en l'absence de molécules stabilisatrices.

Les parois d'une bulle de savon ne sont pas étanches. Le gaz d'une bulle

se dissout lentement dans les parois, puis diffuse jusqu'aux bulles voisines. La quantité de gaz contenu dans une bulle varie progressivement : c'est le «mûrissement» de la mousse. Dans le cas des boissons alcoolisées, où le gaz dissous est le dioxyde de carbone issu de la fermentation, très soluble dans le liquide, la mousse disparaît par mûrissement en quelques minutes. Pour allonger cette durée, les fabricants de bières traditionnelles du Nord de l'Angleterre aèrent leurs bières : avec une pompe à main, ils introduisent de l'azote, moins soluble dans l'eau que le dioxyde de carbone, qui ralentit le mûrissement. La brasserie irlandaise déjà mentionnée a industrialisé ce procédé en mélangeant 70 pour cent d'azote et 30 pour cent de dioxyde de carbone dans ses bières pression.

La façon dont se déroule le mûrissement diffère selon l'épaisseur des parois. Dans une mousse qui contient une grosse proportion d'eau, telles les mousses à raser, les parois de liquide sont d'épaisseur équivalente à la taille des bulles (environ 30 micromètres pour une mousse à raser) : les bulles sont sphériques et la mousse est dite «humide». Donc, la surpression du gaz dans une bulle, proportionnelle à la courbure selon la loi de Laplace, est inversement proportionnelle au rayon de la bulle. Plus la pression est élevée dans la bulle, plus le gaz diffuse rapidement dans les parois, de sorte qu'au cours du mûrissement, les petites bulles se vident dans les grosses.

Le phénomène diffère pour les bulles à parois minces (quelques dizaines de nanomètres), dites sèches car elles contiennent peu de liquide. Dans ce cas, les bulles sont polyédriques et leur courbure – liée à la surpression interne – dépend non de leur taille, mais du nombre de leurs côtés, comme on l'a évoqué. Prenons le cas d'une mousse à deux dimensions et d'une bulle à cinq côtés. Puisque la bulle a moins de six côtés, elle est en surpression par rapport à ses voisines, donc elle se vide vite. Pour conserver les conditions d'équilibre aux arêtes, sa forme reste inchangée à mesure qu'elle se vide ; seule sa taille diminue. Quand la plus petite de ses arêtes est réduite à un point, la bulle perd un côté (voir la figure 2). Elle n'en a alors plus que quatre : la pression y est encore plus



2. ÉVOLUTION D'UNE MOUSSE BIDIMENSIONNELLE : le liquide est drainé vers le bas par gravité, de sorte que les bulles du haut ont des parois plus minces que celles du bas : c'est le phénomène de drainage. Les bulles qui ont cinq côtés ou moins (en rouge), où la pression est supérieure à la pression environnante, sont convexes et rétrécissent, car elles perdent du gaz au profit de leurs voisines (flèches rouges) ; c'est le phénomène de mûrissement. Ces dernières gagnent parfois un côté. Dans le cas où le nombre de côtés devient supérieur au nombre de côtés des bulles adjacentes, la pres-

forte, ce qui accélère la fuite du gaz. Ce phénomène se reproduit jusqu'à la disparition complète de la bulle.

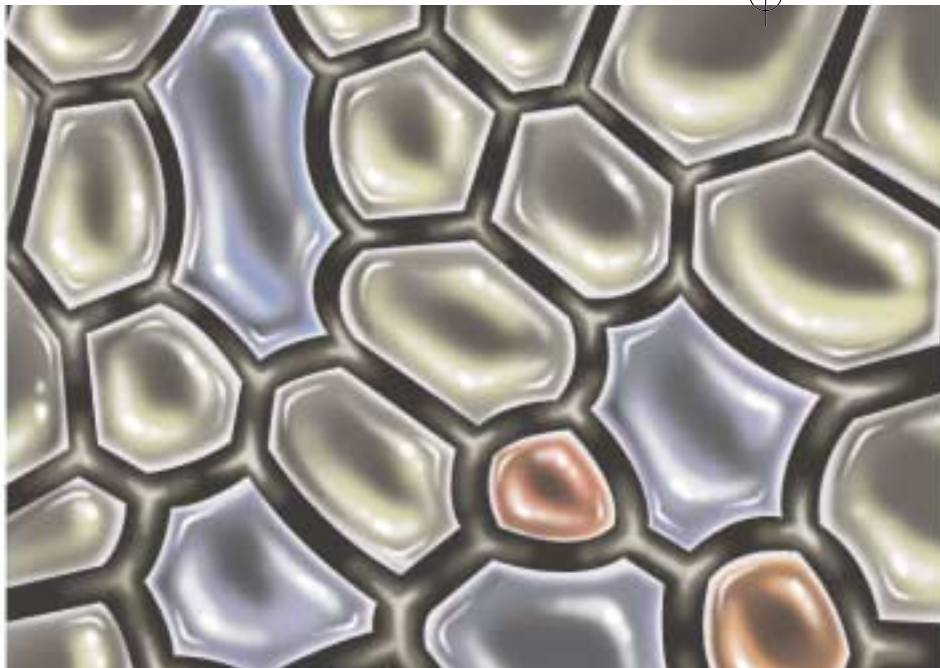
Ses trois voisines ont alors certes grossi, mais elles ont perdu un côté, et sont à leur tour plus susceptibles de se vider. Chaque bulle finit par entrer dans une phase de décroissance. La mousse atteint un régime permanent, au cours duquel son aspect ne change plus : à tout moment, les proportions respectives de bulles à trois, quatre, cinq, six et sept côtés sont constantes, et la moyenne se maintient à six. Ces proportions sont universelles, c'est-à-dire qu'elles sont identiques, quelle que soit la mousse de départ.

Identique à un recuit

À trois dimensions, la croissance des bulles est analogue à une autre croissance rencontrée par les métallurgistes qui opèrent des recuits sur les métaux. À la sortie de la fonderie, les métaux, constitués de nombreux grains polygonaux, ont une structure hétérogène. L'opération de recuit consiste à chauffer à nouveau le métal pour l'homogénéiser : l'élévation de température fait croître les plus gros grains aux dépens des petits qui disparaissent. Dans le meilleur des cas, tous les domaines fusionnent, et le métal est formé d'un unique cristal. Peut-on prévoir à quelle vitesse varient le volume d'un grain et celui d'une bulle ?

Aujourd'hui, on ne dispose d'aucune relation mathématique rigoureuse entre la surpression dans une bulle (et, par conséquent, son taux de décroissance) et son nombre de faces ou de sommets. James Glazier, de l'Université Notre-Dame dans l'Indiana, qui avait contribué, à la fin des années 1980, à établir la loi du mûrissement à deux dimensions, a créé la surprise en 1993 lorsqu'il a découvert, grâce à des simulations numériques, que le taux de croissance moyen des bulles, à trois dimensions, est proportionnel au nombre de voisins. Pendant cinq ans, personne n'a été capable d'expliquer cette observation, ni même de la reproduire expérimentalement, car on mesure difficilement le volume d'une bulle donnée à l'intérieur d'une mousse, loin des bords, et sans détruire la mousse – et *a fortiori* la vitesse de variation de ce volume !

Toutefois, à partir de 1998, les physiciens ont développé diverses techniques, tant sur le plan théorique et numérique, qu'expérimental, pour étudier le mûrissement. Ainsi, Claire Monnerau et l'une d'entre nous (M. Vignes-Adler) ont reconstruit, par tomographie optique, l'image tridimensionnelle d'une mousse de savon dont les bulles ont toutes à peu près le même volume ; elles ont ainsi suivi la forme et le volume de chaque bulle (voir la figure 3). Très récemment, un groupe de physiciens de Grenoble a utilisé la tomographie par rayons X



sion y est inférieure et les parois sont concaves (*bulles bleues*). Quand une paroi a un déficit de molécules stabilisatrices (*en haut à gauche*), elle s'amincit et un trou peut s'y former. Les deux bulles situées de part et d'autre de cette paroi fusionnent : c'est le phénomène de coalescence. Pour lutter contre l'amincissement des films, on emploie de minuscules particules sphériques solubles (*billes bleues*) qui, à cause de leur encombrement, empêchent les surfaces des films de se rapprocher. Les phénomènes sont identiques à trois dimensions, où les bulles sont polyédriques au lieu d'être polygonales.

pour observer l'organisation tridimensionnelle des bulles dans une mousse opaque (voir la figure 3).

L'ensemble de ces études révèle que le nombre moyen de faces, compris entre 13 et 14, joue le même rôle pour les mousses à trois dimensions que le nombre de côtés moyen, égal à six, pour les mousses à deux dimensions : tant que la topologie de la mousse ne change pas (qu'il n'y a pas de coalescence par exemple), en moyenne le volume des bulles de 13 faces ou moins diminue et celui des bulles de 14 faces ou plus augmente.

Le drainage

L'exemple familier de la mousse de bière fournit une bonne illustration du drainage d'une mousse. Versez vigoureusement de la bière dans un verre, vous verrez apparaître une mousse très épaisse qui emplirait d'abord tout le verre, puis qui disparaît progressivement au profit du liquide : la mousse se draine naturellement en quelques secondes sous l'action de la gravité et de la capillarité. Observez attentivement et vous verrez qu'ensuite la mousse reste épaisse près du liquide, tandis qu'elle est ténue dans le haut du verre : après l'élimination du surplus de liquide, les parois des bulles se sont amincies. Du bas au haut du verre, la mousse passe de l'état humide (l'épaisseur des parois est comparable au diamètre des bulles et les bulles sont essen-

tiellement sphériques) à l'état sec (les bulles, de forme polyédrique, ont des films d'épaisseur de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres).

Pour étudier ce drainage, une méthode consiste à le forcer. On assèche une colonne de mousse contenue dans un très long tube vertical, et on la réhumidifie ensuite en versant du liquide par le haut de la mousse. On observe alors l'avancée du front qui sépare la zone humide de la zone encore sèche. Le groupe de Dublin a montré que la vitesse de propagation du front est constante et varie comme la racine carrée du débit d'injection de liquide. Ce résultat semblait universel, indépendant de la mousse. Or, de son côté, Howard Stone et ses collègues de l'Université de Harvard ont obtenu, à la fois expérimentalement et théoriquement, une loi en racine cubique. Des deux côtés de l'Atlantique, les expériences étaient menées correctement avec des mousses comparables, préparées avec de l'eau et du liquide vaisselle. D'où provient le désaccord?

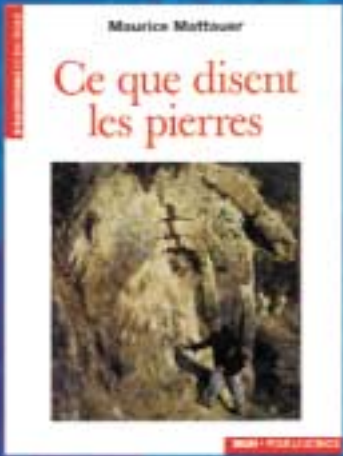
La réponse tient aux molécules stabilisatrices de la mousse. Quand on la prépare avec un liquide pur, la mousse disparaît immédiatement, telle l'écume des vagues. En revanche, elle subsiste quand des molécules spécifiques stabilisent les interfaces. Ces molécules «amphiphiles» ont une extrémité hydrophile et l'autre hydrophobe. Cette différence d'affinité provient d'une dissymétrie de charges.

Quand les électrons d'une molécule ne sont pas répartis uniformément dans la molécule, le barycentre (la «position moyenne») des charges négatives diffère du barycentre des charges positives : la molécule est dite polaire. L'eau est polaire et l'huile ne l'est pas, et c'est pourquoi la seconde n'est pas miscible à la première : l'huile est rejetée à la surface de l'eau, car une molécule d'eau attire plus ses congénères qu'elle n'attire une molécule d'huile. Quand on introduit dans un liquide une molécule amphiphile, pourvue d'une région polaire et d'une région non polaire, celle-ci se place à l'interface liquide-gaz, et la stabilise. Les molécules amphiphiles sont, par exemple, les molécules de savons, ou des protéines, telles les protéines du lait, de la bière, du blanc d'œuf. Elles appartiennent à la grande famille des molécules tensioactives, famille qui regroupe l'ensemble des molécules faisant varier la tension superficielle d'un liquide.

Lors des études sur le drainage, le groupe de Dublin et celui de Harvard avaient employé deux liquides vaisselle différents, ce qui fut la cause des écarts de résultats. En effet, les molécules amphiphiles modifient l'élasticité et la viscosité de la surface des films de savon, et influent sur l'écoulement de l'eau : en s'adsorbant à la surface des films, elles freinent l'écoulement. Marc Durand et Dominique Langevin du Laboratoire de physique des solides d'Orsay, ont réconcilié les deux résultats en utilisant des molécules amphiphiles différentes dont les caractéristiques sont connues : ils ont fait varier la rhéologie de surface des solutions, c'est-à-dire la façon dont s'écoule l'eau dans des films de savon contenant les molécules amphiphiles, et ont retrouvé les deux cas – celui de Dublin et celui de Harvard – qui correspondent à des cas limites.

La coalescence des bulles

Le mûrissement n'est pas le seul chemin vers la disparition de la mousse. Une observation nous l'indique : en agitant fortement un liquide contenant des molécules amphiphiles, on obtient une mousse abondante, mais qui, par endroits, s'effondre rapidement. Au contraire, quand on remue modérément, la mousse est plus réduite, mais dure longtemps.



Ce que disent les pierres
Maurice Mattauer

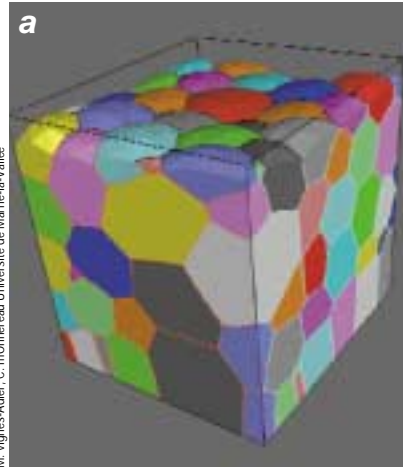
CE QUE DISENT LES PIERRES
Maurice Mattauer

Ce livre vous convie à une promenade illustrée dans l'univers des pierres. À partir de l'image, Maurice Mattauer, professeur de géologie à l'Université de Montpellier, reconstitue l'histoire des roches et les grands événements dont elles sont les témoins, et invite à un «retour aux pierres», gage d'une nouvelle compréhension de la nature.

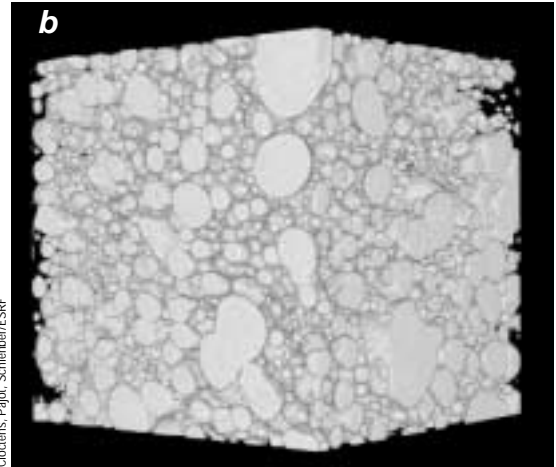
Code 075001 • 14,95 €
144 pages

Voir bon de commande page 96

BELIN • POUR LA SCIENCE



M. Vignes-Adler, C. mOmercau, Université de Marne-la-Vallée



Clodius Pajot, Schreiber/ESRF

3. LES OBSERVATIONS TRIDIMENSIONNELLES d'une mousse sont récentes. Grâce à l'une des méthodes utilisées, on prend des photographies d'une mousse transparente au microscope, à diverses profondeurs, et, à l'aide d'un logiciel, l'on reconstitue avec précision la géométrie de l'ensemble à trois dimensions (a). La seconde méthode (b) utilise un faisceau de rayons X. Les rayons X sont diffusés par les atomes de la mousse et indiquent la présence de matière. En balayant le faisceau selon tous les angles, on parvient à reconstruire une image tridimensionnelle, même si la mousse est opaque.

Le phénomène du mûrissement n'est pas la cause de la différence de stabilité. L'explication tient à la vitesse de formation des bulles.

Les molécules amphiphiles sont nécessaires à la stabilisation des bulles, mais encore faut-il qu'elles aient le temps de diffuser dans le liquide pour s'adsorber à la surface des bulles, et qu'elles y soient en concentration suffisante pour former une couche dense et résistante. Prenons l'exemple des protéines. Elles sont 100 à 200 fois plus grosses que les molécules de savon. Celles que l'agitation enfouies dans le liquide mettent du temps, de par leur masse, à atteindre l'interface du liquide et du gaz. On comprend dès lors qu'il faille fabriquer lentement les mousses pour qu'elles aient le temps d'être stabilisées par les protéines.

Dans le cas contraire, les parois entre bulles s'amincissent, par exemple par drainage. Trois cas se présentent alors : soit le film s'épaissit à nouveau, soit il continue à s'amincir et finit par se stabiliser en obscurcissant (pour une épaisseur de quelques nanomètres, le film transmet totalement la lumière : sur fond noir, il apparaît noir), soit un trou se forme et le film éclate. Dans ce dernier cas, deux bulles adjacentes n'en forment plus qu'une, la coalescence provoque un désordre dans l'environnement et occasionne des réarrangements, ce qui accélère le mûrissement : localement, la mousse s'effondre.

L'élixir de jouvence

Pour stabiliser une mousse, il faut empêcher l'amincissement des films, ralentir le drainage, ou favoriser la cicatrisation des trous. Pour lutter contre l'amincissement, on ajoute dans le liquide de microscopiques particules solubles, qui empêchent les deux faces de se rapprocher. Ce phénomène a lieu, notamment, dans les zones polluées des bords de mer et engendre des écumes épaisses et stagnantes. C'est aussi pour cette raison que les molécules amphiphiles stabilisent les mousses : les molécules adsorbées de chaque côté du film se repoussent à cause des charges électriques qu'elles portent.

Pour ralentir le drainage, on procède de deux façons. La première consiste à augmenter la viscosité du liquide par addition de polymères (c'est le cas des mousses à raser) ou d'hydrocolloïdes, tels les gélifiants alimentaires qui sont des polymères réticulés (les molécules enchevêtrées forment un réseau et freinent l'écoulement). Par la seconde méthode, on modifie la rhéologie de surface des films. Par exemple, en ajoutant une infime quantité de dodécylsulfate de sodium ($C_{12}SO_4^{2-}$), on rigidifie la surface des films qui séparent les bulles. Après amincissement, les films sont alors comparables aux plus fines des fissures d'un rocher : l'eau s'y écoule difficilement. Enfin, pour favoriser la cicatrisation des films, on augmente l'élasticité de surface par des

molécules amphiphiles qui agissent de telle façon que du liquide est ramené là où le film s'est aminci.

Pour certaines applications, on ne cherche pas à stabiliser les mousses, mais, au contraire, à les éliminer. C'est le cas sur les sites de production industrielle, où les débordements de mousse peuvent être catastrophiques, ou quand on souhaite se débarrasser d'une mousse qui a servi à piéger les minuscules poussières qui jonchent les conduites des centrales nucléaires après leur nettoyage. On utilise alors souvent comme « anti-mousses » des particules solides qui transpercent les films et engendrent des ruptures en avalanche. Dans les savons pour lave-vaisselle se trouvent des grains de silice enrobés d'huile de silicone. Ces grains empêchent la mousse de se former : dès qu'un grain touche la surface d'une bulle qui se forme, l'huile s'étale sur la paroi de la bulle, provoquant un amincissement local si brutal qu'il ne peut y avoir cicatrisation et que le film éclate. Le rouge à lèvres a les mêmes conséquences dévastatrices sur la collerette de champagne!

Les principes physiques décrits ici n'expliquent qu'en partie les phénomènes qui siègent dans les mousses. Certaines mousses industrielles sont des mélanges de molécules amphiphiles, de polymères et de protéines, qui éventuellement s'organisent et forment des complexes. Après le drainage, lorsque l'épaisseur des films atteint une centaine de nanomètres, l'effet de confinement se ressent : les complexes se structurent. La façon dont les complexes agissent alors sur la mousse est très variable. Parfois, alors qu'une mousse ne contenant que les seules molécules amphiphiles est tout à fait stable, ils se comportent comme des antimousses. Pour progresser dans la compréhension de cette variabilité, on devra s'intéresser à ce qui se passe à l'intérieur des films.

Le futur consistera également à coupler plusieurs des aspects que nous avons abordés séparément. Ainsi, on étudie les relations entre la structure et les propriétés mécaniques des mousses, entre une stimulation mécanique et le mûrissement, et entre le drainage et la rupture des films. Afin de mieux déduire le comportement des mousses de ses paramètres, plusieurs équipes élaborent des expériences permettant d'observer les phénomènes à diverses échelles.

D'ores et déjà, nos connaissances nous permettent de mieux comprendre

les mousses qui nous sont familières, telle celle du champagne. Quand on débouche une bouteille de champagne, des myriades de bulles prennent naissance. Tant que le bouchon est en place, la pression qui règne au-dessus du liquide est élevée, de sorte que la concentration en dioxyde de carbone dissous est importante ; dès que le bouchon saute, le liquide est soumis à la pression atmosphérique, et la concentration d'équilibre en dioxyde de carbone dissous diminue brusquement ; des bulles apparaissent dans le liquide et remontent rapidement à la surface. Cette mousse est éphémère : elle s'effondre en quelques secondes pour former une collerette alimentée par quelques traînes de bulles qui naissent sur les parois, au fond du verre.

À quoi la mousse et la collerette doivent-elles leur durée de vie? Le champagne est une solution alcoolique acide composée notamment de peptides, de protéines, de glycoprotéines. La mousse doit principalement sa stabilité aux glycoprotéines : lorsque les films sont minces, elles s'agglomèrent et empêchent les faces de se souder. La collerette, elle, subsiste grâce à d'autres molécules organiques, peut-être des peptides. Le plaisir procuré par la mousse du champagne n'est pas uniquement visuel, il est aussi gustatif. En se remémorant les mécanismes en jeu, y prendra-t-on encore davantage de plaisir, plaisir cérébral bien sûr?

Michèle VIGNES-ADLER, directeur de recherche au CNRS, dirige le Laboratoire de physique des matériaux divisés et des interfaces de l'Université de Marne-la-Vallée. François GRANER est chercheur au Laboratoire de spectrométrie physique de l'Université de Grenoble.

D. EXEROWA et P.M. KRUGLYAKOV, *Foam and foam films*, Elsevier Amsterdam, 1998.

C. MONNEREAU et M. VIGNES-ADLER, *Dynamics of real three dimensional foams*, in *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, n° 23, pp. 5228-5231, 1998.


S. HUTZLER et D. WEAIRE, *Physics of foams*, Oxford University Press, 1999.

J. SENÉE, B. ROBILLARD et M. VIGNES-ADLER, *Films and foams of champagne wines*, in *Food Hydrocolloids*, vol. 13, pp. 15-26, 1999.

F. GRANER, Y. JIANG, E. JANIAUD et C. FLAMENT, *Equilibrium energies of 2D fluid foams*, in *Phys. Rev. E.*, vol. 63, pp. 11402/1-13, 2001.

Le CNED présente

LES LEÇONS INAUGURALES DU COLLÈGE DE FRANCE

 COLLÈGE DE FRANCE
1579


une série de huit leçons filmées dans de nombreux domaines (sciences, littérature, philosophie, mathématiques, etc)

Titres disponibles :

- **Civilisation pharaonique : archéologie, philologie, histoire**
Nicolas Grimal
- **Théorie économique et organisation sociale**
Roger Guesnerie
- **Philosophie et histoire des concepts scientifiques**
Ian Hacking
- **Philosophie des sciences biologiques et médicales**
Anne Fagot-Largeault
- **Biologie et génétique du développement**
Spyros Artavanis-Tsakonas
- **Théorie des nombres**
Don Zagier
- **Sur un vers d'Hamlet**
Michael Edwards
- **Anthropologie de la nature**
Philippe Descola

Support : cassette vidéo avec livret
Tarif : 30 euros unitaire
200 euros la série complète de 8 cassettes

Informations au
05 49 49 94 94
www.cned.fr

 CNED
Centre national d'enseignement à distance