

# Les mousses

**M**ousse de shampoing, mousse à raser, mousse de champagne, mousse au chocolat, matelas en mousse, mousse de plâtre, mousse métallique, mousse de polystyrène..., les mousses liquides ou solides sont tellement familières que l'on pourrait croire tout savoir sur elles ! Et pourtant, depuis une trentaine d'années, elles sont l'objet de recherches extraordinairement actives dans presque toutes les disciplines scientifiques – mathématiques, physique, chimie, ou encore sciences de l'aliment... Rappelons quelques-unes de leurs caractéristiques bien connues. Les mousses liquides ont une durée de vie limitée, éphémère dans le cas du champagne, longue dans celui de la mousse au chocolat. Le contrôle de leur stabilité est un problème majeur. Une propriété rhéologique remarquable de la mousse telle la mousse à raser est de s'écouler sous le fil du rasoir, mais de rester en place sur le visage : ce sont des milieux viscoplastiques. Les mousses solides sont recherchées entre autres raisons pour leur légèreté et leurs capacités isolantes thermique et/ou acoustique. Toute mousse solide ayant été d'abord liquide, nous commencerons par décrire les propriétés des mousses liquides, avant de présenter les « nouvelles » mousses.

## Formation et stabilisation des mousses liquides

Les mousses sont créées soit par injection mécanique d'air dans un liquide moussant, soit par nucléation *in situ* de bulles du gaz produit par une réaction chimique et dissous dans le liquide (par exemple le gaz carbonique produit par la fermentation alcoolique).

Une mousse est donc un ensemble compact de bulles, tout d'abord sphériques puis polyédriques, séparées par des films minces lorsqu'elles se sont drainées (*figures 1a et 1b*). Les mousses sont dites humides tant que la fraction volumique de gaz  $\varphi$  est comprise entre 64 et 95 % et sèches lorsque  $\varphi$  est supérieure à 95 %.

Ce sont des systèmes thermodynamiquement instables du fait de leur très grande surface et donc très grande énergie de surface. En effet, une mousse dont les films ont une épaisseur de 100 nm a une énergie de surface 100 000 fois supérieure à celle d'une goutte de même quantité de liquide. Pour diminuer l'énergie de surface de la mousse, on utilise des tensioactifs – molécules amphiphiles ayant une partie hydrophile et une autre hydrophobe – qui, en s'adsorbant à la surface du

liquide, abaissent sa tension de surface d'un facteur 2 ou 3 (*figure 2*).

Rappelons la loi de Laplace qui relie la différence de pression de part et d'autre de la surface à son rayon de courbure  $R$ . Dans le cas d'une bulle, la pression capillaire est  $P_i - P_e = 2 \sigma / R$ , où  $P_i$  et  $P_e$  sont les pressions à l'intérieur et à l'extérieur de la bulle,  $\sigma$  est la tension de surface du liquide. Il y a deux causes essentielles à la déstabilisation d'une mousse : son mûrissement et la rupture de ses films. Le **mûrissement** se produit lorsque les petites bulles – où la pression capillaire est la plus élevée – diminuent de volume puis disparaissent par diffusion de gaz vers de plus grosses bulles voisines (*figure 2a*) ; il peut être supprimé soit en utilisant un gaz insoluble dans le liquide pour créer la mousse, soit en fabriquant des mousses dont toutes les bulles ont le même diamètre (voir ci-après). La **rupture des films** se produit à la suite du drainage gravitaire excessif du liquide contenu dans la mousse. Elle peut être évitée si on empêche les films de trop s'amincir. Pour cela, il faut utiliser des liquides très visqueux, ce qui ralentit le drainage, ou choisir des molécules tensioactives appropriées qui stabilisent les films minces lorsque la mousse est sèche. Quand les tensioactifs à la surface des films forment une couche compacte, les surfaces du film se comportent comme des surfaces solides, ce qui ralentit aussi le drainage. Avec des tensioactifs ioniques, les surfaces des films sont chargées et se repoussent en contrebalançant les forces attractives déstabilisatrices de van der Waals (*figure 2b*). Les protéines, très utilisées pour stabiliser les mousses alimentaires, empêchent les films de trop s'amincir pour de simples raisons de répulsion stérique.

## Les nouvelles mousses

### Les mousses monodisperses

Les mousses monodisperses sont des mousses dont toutes les bulles ont le même diamètre. Elles sont fabriquées par des techniques dérivées de la microfluidique. On injecte simultanément et à débit constant le gaz et le liquide moussant dans un fin canal à section rectangulaire (*figure 3*). Le jet gazeux se rompt sous forme de bulles ayant toutes le même diamètre. On peut contrôler la taille des bulles d'une dizaine à une centaine de microns en variant les débits de gaz et de liquide.

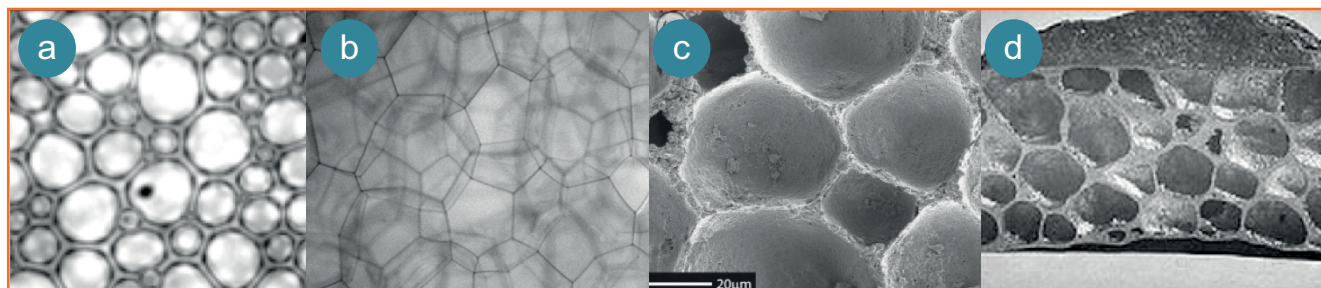


Figure 1 - (a) Mousse humide désordonnée avec des films d'épaisseur de l'ordre du micron ; (b) mousse très sèche avec des films d'épaisseur inférieure à 50 nm ; (c) mousse d'alumine uniquement stabilisée par des particules Janus solides [1] ; (d) mousse d'aluminium stabilisée par des particules d'hydrure de titane [4].

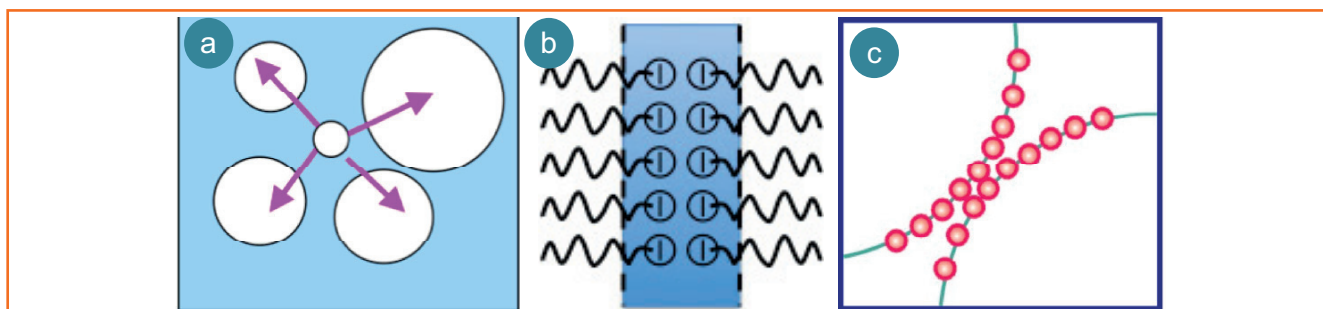


Figure 2 - (a) Mûrissement d'une mousse ; (b) film stabilisé par des tensioactifs anioniques ; (c) particules solides piégées à la surface des bulles.

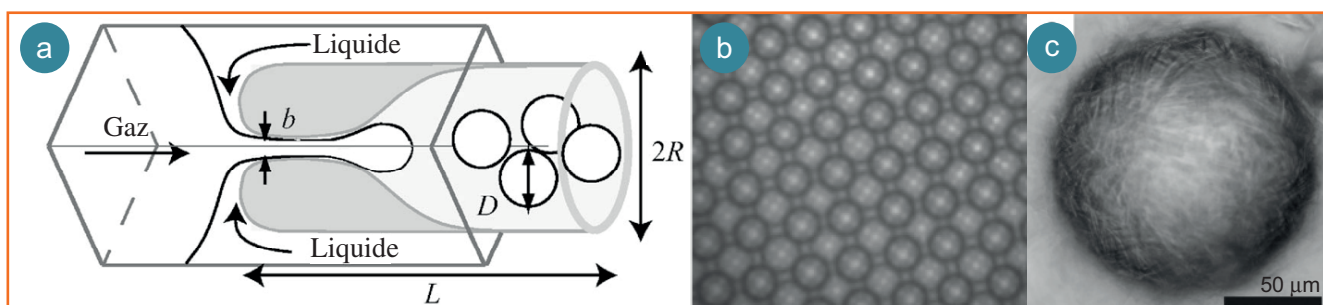


Figure 3 - (a) Dispositif microfluidique de création de mousses monodisperses ; (b) mousse monodisperse dont les bulles se sont organisées en réseau cristallin ( $\varnothing \sim 250 \mu\text{m}$ ,  $\phi = 64 \%$  [3]) ; (c) bulle d'air d'une mousse superstable recouverte d'une couche de microbâtonnets de polymère de longueur  $\sim 23 \mu\text{m}$  et de diamètre  $\sim 0,60 \mu\text{m}$  [1].

Ces mousses sont très stables car leurs bulles sont de petite taille et de même diamètre, et ni le mûrissement ni la gravité ne jouent. Elles se regroupent en réseau cristallin dont on peut contrôler l'ordre (figure 3b). Leurs applications sont nombreuses : si le liquide des films peut se solidifier, on obtient des milieux microporeux à porosité ouverte, contrôlée et structurée, utilisée pour la micro/nanocatalyse. Si le liquide peut se gélifier, le gel poreux obtenu peut servir de support calibré pour la culture de cellules vivantes.

### Les mousses superstables

Les premières mousses d'eau uniquement stabilisées par des particules solides modérément hydrophobes ont été obtenues dès 2004 [1] : de telles particules solides sont mouillées aussi bien par le liquide que par l'air, c'est-à-dire qu'elles font un angle de contact de  $90^\circ$  avec l'eau. On peut aussi utiliser des particules solides Janus qui ont une partie hydrophile et une autre hydrophobe, comme les tensioactifs (figure 1c) [4]. Les mousses métalliques à porosité homogène sont généralement stabilisées par des particules d'oxyde métallique (figure 1d) [2]. Les mousses ainsi obtenues sont dites superstables car elles ont une durée de vie exceptionnelle pouvant atteindre plusieurs mois, voire une année. Pourquoi ces mousses sont-elles plus stables que celles à base de tensioactifs traditionnels ? Les particules solides utilisées s'adsorbent de façon presque irréversible à la surface des films où elles s'entrelacent, formant une véritable armure sur les bulles (figure 3c). Leur taille très supérieure à celle des tensioactifs traditionnels rend les films très épais, de l'ordre de  $1-2 \mu\text{m}$ , ce qui limite considérablement le risque de rupture.

Placées sur la surface des films, elles empêchent localement la diffusion de gaz à l'origine du mûrissement, qui s'en trouve très diminué.

### Les mousses intelligentes

La créativité des chercheurs semble sans limite pour fabriquer des mousses dites intelligentes (« smart foams ») :

- mousses stabilisées avec des nanoparticules magnétiques que l'on peut manipuler dans un champ magnétique ;
- mousses thermosensibles stabilisées par des molécules tensioactives qui s'agrègent sous forme de micelles sphériques (mousses faiblement stables) ou de nanobâtonnets (mousses très stables) selon la température : il est alors possible de modifier réversiblement la stabilité de ces mousses simplement en changeant la température ;
- mousses acides servant à la décontamination d'installation nucléaire, etc.

### Pour en savoir plus

- Cantat I. et coll., *Les mousses : structure et dynamique*, Belin, 2010.
- Site du Groupement de recherche « Mousses et émulsions », [www.msc.univ-paris-diderot.fr/~cgay/gdr-mousses-emulsions/doku.php?id=bienvenue](http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~cgay/gdr-mousses-emulsions/doku.php?id=bienvenue)
- [1] Alargova R.G., Warhadpande D.S., Paunov V.N., Velev O.D., Foam superstabilization by polymer microrods, *Langmuir*, **2004**, *24*, p. 10371.
- [2] Matijasevic B., Banhart J., Improvement of aluminium foam technology by tailoring of blowing agent, *Scripta Materialia*, **2006**, *54*, p. 503.
- [3] Höhler R., Sang Y.Y.C., Lorenceau L., Cohen-Addad S., Osmotic pressure and structures of monodisperse ordered foam, *Langmuir*, **2008**, *24*, p. 418.
- [4] Gonzenbach U.T., Studart A.R., Tervoort E., Gauckler L.J., Macroporous ceramics from particle-stabilized wet foams, *J. Am. Ceramic Soc.*, **2007**, *90*, p. 16.

Cette fiche a été préparée par **Michèle Adler** (michele.adler@univ-mlv.fr), directrice de recherche émérite à l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée.

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par un comité éditorial mené par Jean-Pierre Foulon, Véronique Nardello-Rataj et Michel Quarton (contact : [bleneau@actualitechimique.org](mailto:bleneau@actualitechimique.org)).