



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com



Liquid and solid foams / Mousses liquides et solides

Foreword: Some thoughts on the art and science of using holes...



Foams and cellular materials are ubiquitous both in nature (wood, trabecular bone) and in engineering (polymeric foams for cushions, ceramic foams for support of catalysis, metallic foams for crash absorbers, various foams in food industry...). They consist of a distribution of matter and voids (possibly filled with gas) that provides a combination of properties unattainable for bulky materials.

Their properties are a direct consequence of the ability to move matter (both the constitutive materials and also the included gas) more easily than in bulk materials. For instance, when loaded mechanically, the elastic deformation of a solid foam is not restricted to the extension of interatomic bonds, but can also result from more macroscopic movements such as “microbeam bending or buckling”. When the foam is fluid, an extra degree of freedom contributing to rheology is the topological switch between neighboring cells. Of course, since the filling with atomic bonds is sparser, the absolute mechanical properties are weaker, but when normalized to the foam density, they become often very attractive in engineering applications where weight saving is an issue, such as in transport industry. From these extra degrees of freedom result attractive properties for acoustic applications, thermal management, chemical reaction processes.

There are two main classes of foams, and two communities who rarely meet. Each community has its classics [1,2], and its own set of problems. It is one virtue of the present dossier of *Comptes rendus Physique* to bring together contributions concerning liquid foams and solid foams. In solid foams, the energy resulting from deformation is controlled by the elastic/plastic distortion of the matter included in cell foam walls or edges, whereas in liquid foams the capillary term becomes dominant. The general introduction by S. Zabler [3] provides a general introduction to the variety of materials encountered under the name “foams”.

At the beginning of any material is processing. The variety of processes to obtain solid foams is presented in [4]: a number of “bubbling techniques” using foaming agents, but also more intriguing ones such as infiltration of a preform, or replicating of a preexisting foam (for instance by vapor deposition of metals onto a foamed polymer, of a carbonized wood). A question still puzzling is to understand why polymeric foams tend to be rather regular, while metallic foams have a more irregular pore distribution. More recently, new processing techniques such as additive manufacturing can provide a very controlled geometry of matter distribution that may turn to be useful both from a fundamental viewpoint but also for applications, to ensure more reproducible properties. For liquid foams, a summary of the physics of the basic mechanisms leading to the incorporation of gas into a liquid is described in a recent review [5].

For processing techniques using foaming agents, the “community of solid foams” would greatly benefit from a stronger interaction with the “liquid foam community”, since most of the variability in the end-product results from instabilities in the liquid situation, and therefore the issues related to viscosity, and the role of the surfactant as described in [6] could give valuable hints for a more stable processing route, which has been, so far, very empirical despite some fundamental studies exist [7–9]. The possible influence of particles [10] on the various instability processes such as drainage, coalescence and coarsening would benefit from a cross-examination between metallic foams and polymeric ones.

The quantitative 3D characterization methods presented in [11] illustrate the progress made in recent years to have, not only a realistic description of matter distribution in a foam, but also an insight into physical mechanisms, via in situ experiments [12], into the local mechanisms governing its behavior. In that sense, the temptation to perform 3D Finite-Element calculations on realistic structures, made possible by the availability of computer power [12], should not be seen as a replacement of the simple “back of the envelope calculations” allowing one to derive major scaling laws for foams’ mechanical behavior, whether it be elasticity and collapse of solid foams or rheological behavior of liquid foams [12,13]. In parallel, a review of recently developed experimental and numerical techniques to investigate liquid foams can be found in [14].

The concept of “local event governing global behavior” is familiar to metallurgists via the theory of dislocations. In liquid foams, the local topological switch [15] plays a similar role, while in solid foams cell collapse via buckling [13] provides an equivalent. It may be useful to develop further the physics of a collection of such interacting events to understand

the phenomenon of strain localization, which seems to be common to solid foams, to liquid foams, but also to granular media. The conditions of occurrence of such events, in relation with the local geometrical configuration, the interaction between them, and the possible enhanced nucleation at irregularities in the matter distribution are open questions worth investigating in a comparative manner.

In the present dossier, the properties investigated are mainly mechanical [12,13,15] and thermal [16]. These two examples provide an overview of the role of computer simulation for understanding the macroscopic behavior, and relate the characteristics of the distribution of materials to the searched properties. A similar presentation could be made for acoustics, fluid flow, and electromagnetic properties. In all cases, it is important to a better grasp of the information needed from all that modern characterization techniques can provide.

Let us conclude this presentation of this dossier by a few thoughts on the implementation of these materials. In many situations, foamed materials have an internal structure that is not widely different in scale from the component in which they are implemented. This makes the classical “homogenization procedure” not only hopeless, but even sometimes useless. Most likely, an appropriate continuum description of such materials is bound to be non-local, and thus, rather cumbersome. Alternatively it can be seen as a challenge for modelling.

Some fundamental issues

Via their diversity, foams provide a number of open issues that should stimulate further fundamental investigations. These issues would greatly benefit from a comparative approach between solid foams and liquid foams, and the hope is that the present dossier of *Comptes rendus Physique* could initiate such a comparative approach for a fundamental understanding. Some issues come immediately to mind while reading the various contributions:

- the mechanisms of morphological instabilities of liquid foams and their consequences on the final distribution of matter in solid foams,
- the role of localized interacting events in the macroscopic behavior and possibly in the heterogeneous flow distribution,
- the appropriate “average quantities” to be extracted from a detailed 3D characterization to understand the macroscopic behavior,
- the confinement effects expected when these materials are forced to interact with boundaries whose separation is of the order of their internal length scale,
- the key role of interfaces, evidenced for polymers in [17], but probably also present in foams coming from slurries, or bubbling in semisolid metals.
- *In fine*, a nice and lucid overview [18] of the possible industrial applications for this class of materials, assessing their strengths and weaknesses, insisting on the key role of mastering the various aspect of the processing route, shows that it is not useless to be fundamental, and that overselling new materials is a bad habit the scientific community should get rid of.

Avant-propos: quelques réflexions sur l’art et la science d’utiliser les trous...

Les mousses et les matériaux cellulaires sont omniprésents à la fois dans la nature (bois, os trabéculaire) et en ingénierie (mousses polymères pour les coussins, mousses céramiques comme supports catalytiques, mousses métalliques pour amortisseurs de chocs, mousses diverses dans l’industrie alimentaire...). Ils sont constitués d’une distribution de matière et de porosités (éventuellement remplies de gaz) qui assure une combinaison de propriétés hors de portée des matériaux pleins.

Leurs propriétés sont une conséquence directe de leur capacité à déplacer la matière (aussi bien les matériaux constitutifs que les gaz qu’ils contiennent) plus facilement que les matériaux pleins. Par exemple, sous l’effet d’une charge mécanique, la déformation élastique d’une mousse solide ne se réduit pas à un allongement des liaisons interatomiques, mais peut aussi être provoquée par des mouvements plus macroscopiques tels que la « la flexion ou le flambage des poutres ». Quand la mousse est fluide, un degré de liberté supplémentaire qui contribue à la rhéologie est la commutation topologique entre cellules voisines. Bien entendu, puisque le remplissage avec des liaisons atomiques est plus pauvre, les propriétés mécaniques absolues sont plus faibles, mais quand elles sont normalisées par la densité de la mousse, elles deviennent souvent très attractives pour des applications d’ingénierie dans lesquelles l’allègement de la structure est crucial, comme dans l’industrie du transport. De ces degrés de liberté supplémentaires résultent des propriétés attractives pour les applications dans les domaines de l’acoustique, de la thermique, des processus réactionnels chimiques.

Il y a deux catégories principales de mousses, et deux communautés qui ne se rencontrent que rarement. Chaque communauté a ses classiques [1,2] et ses propres problématiques. C’est l’une des vertus du présent dossier des *Comptes rendus Physique* que de réunir des contributions sur les mousses liquides et les mousses solides. Dans ces dernières, l’énergie résultant de la déformation est contrôlée par la distorsion élastique/plastique de la matière incluse dans les parois ou les bords des cellules de mousse, tandis que dans les premières le terme capillaire devient dominant. L’introduction générale par S. Zabler [3] fournit une introduction générale à la gamme de matériaux rassemblés sous le vocable « mousses ».

Au commencement de tout matériau se trouve sa fabrication. La panoplie de procédés conduisant aux mousses solides est présentée dans la contribution [4] : un certain nombre de « techniques de bullage » faisant intervenir des agents moussants, mais aussi d'autres méthodes plus surprenantes, telles que l'infiltration d'une préforme, ou la réplique d'une mousse préexistante (par exemple, par dépôt en phase vapeur de métaux sur une mousse polymère, ou sur un bois carbonisé). Une question toujours ouverte est de comprendre pourquoi les mousses polymères tendent à être plutôt régulières, alors que les mousses métalliques présentent une distribution de pores plus irrégulière. Plus récemment, de nouvelles techniques de fabrication telles que la transformation additive peuvent fournir une géométrie très contrôlée de la distribution de matière, qui peut s'avérer utile à la fois d'un point de vue fondamental, mais aussi appliqué, pour s'assurer d'une meilleure reproductibilité des propriétés. Pour les mousses liquides, un condensé de la physique des mécanismes de base conduisant à l'incorporation d'un gaz dans un liquide est décrit dans une revue récente [5].

Pour les techniques de fabrication faisant appel à des agents moussants, la « communauté des mousses solides » bénéficierait grandement d'une interaction plus forte avec la « communauté des mousses liquides », puisque la plus grande part de la variabilité dans le produit final résulte d'instabilités dans l'état liquide. Ainsi, l'étude de la viscosité et du rôle du surfactant, tel qu'il est décrit dans [6], pourraient mettre sur la voie d'un procédé plus stable, alors qu'on a jusqu'ici un procédé relativement empirique, malgré l'existence de quelques études fondamentales [7–9]. La possible influence des particules [10] sur les divers processus d'instabilité, tels que le drainage, la coalescence et la maturation, pourrait être éclairée par l'examen croisé des mousses métalliques et polymères.

Les méthodes quantitatives de caractérisation 3D présentées dans [11] illustrent les progrès accomplis au cours de ces dernières années, non seulement vers l'obtention d'une description réaliste de la distribution de la matière dans une mousse, mais aussi vers une meilleure compréhension, grâce à des expériences *in situ* [12], des mécanismes gouvernant son comportement. Dans ce sens, la tentation de réaliser des calculs tridimensionnels par éléments finis sur des structures réalistes, rendus possibles par la disponibilité d'ordinateurs puissants [12], ne devrait pas être vue comme visant à remplacer les simples « calculs sur un coin de table » nous autorisant à dériver les grandes lois d'échelle du comportement mécanique des mousses, qu'il s'agisse d'élasticité et d'effondrement de mousses solides ou du comportement rhéologique des mousses liquides [12,13]. En parallèle, on trouvera une revue des techniques expérimentales et numériques récemment développées pour les mousses liquides dans la référence [14].

Le concept d'« événement local gouvernant un comportement global » est familier aux métallurgistes via la théorie des dislocations. Dans les mousses liquides, la commutation topologique locale [15] joue un rôle similaire, alors que dans les mousses solides l'affaissement des cellules par déformation [13] en fournit un équivalent. Il peut être utile de développer davantage la physique d'une suite de tels événements interagissant afin de comprendre le phénomène de localisation de contrainte, qui semble être commun aux mousses solides, aux mousses liquides, mais aussi aux milieux granulaires. Les conditions de l'apparition de tels événements, en relation avec la configuration géométrique locale, l'interaction entre eux, la possible germination renforcée aux irrégularités dans la distribution de la matière sont des questions ouvertes dignes d'être traitées de manière comparative.

Dans le présent dossier, les propriétés étudiées sont principalement mécaniques [12,13,15] et thermiques [16]. Ces deux exemples donnent une vue d'ensemble du rôle de la simulation sur ordinateur dans la compréhension du comportement macroscopique, et mettent en perspective les caractéristiques de la distribution des matériaux avec les propriétés recherchées. Une présentation similaire pourrait être faite pour l'acoustique, l'écoulement des fluides, les propriétés électromagnétiques. Dans tous les cas, il est important de mieux puiser l'information nécessaire dans tout ce que les techniques modernes de caractérisation peuvent offrir.

Nous concluons cette introduction au présent dossier par quelques réflexions sur l'utilisation de ces matériaux. Dans beaucoup de situations, les matériaux faits de mousse ont une structure interne qui n'est pas profondément différente en échelle du produit dans lequel ils sont mis en place. Ceci rend la classique « procédure d'homogénéisation » non seulement sans espoir, mais même quelquefois inutile. Très vraisemblablement, une description appropriée du continuum de tels matériaux est condamnée à être non locale, et ainsi, plutôt lourde. Alternativement, on peut aussi la voir comme un défi pour la modélisation.

Quelques problèmes fondamentaux

De par leur diversité, les mousses donnent lieu à nombre de questions ouvertes qui devraient stimuler de futures recherches fondamentales. Ces questions bénéficieraient grandement d'une approche comparative entre les mousses solides et liquides, et notre espérance est que le présent dossier des *Comptes rendus Physique* puisse initier une telle approche comparative pour une compréhension fondamentale. Certaines viennent immédiatement à l'esprit en lisant les différentes contributions :

- les mécanismes des instabilités morphologiques dans les mousses liquides et leurs conséquences sur la distribution de matière finale dans les mousses solides,
- le rôle des événements localisés interagissant dans le comportement macroscopique et éventuellement dans la distribution non homogène des écoulements,
- les « quantités moyennes » appropriées à extraire d'une caractérisation 3D détaillée pour comprendre le comportement macroscopique,

- les effets de confinement attendus quand ces matériaux sont contraints à interagir avec des films ou parois dont la séparation est de l'ordre de leur échelle de longueur interne,
- le rôle clé des interfaces, mis en évidence pour les polymères dans [17], mais probablement également présent dans les mousses provenant de boues, ou bullant dans des métaux semi-solides.
- *in fine*, une belle et lucide vue d'ensemble [18] des possibles applications industrielles de cette classe de matériaux, mettant en lumière leurs forces et leurs faiblesses, insistant sur le rôle clé de la maîtrise des différents aspects des procédés, montre qu'il n'est pas inutile d'être fondamental, et que survendre les nouveaux matériaux constitue une mauvaise habitude dont la communauté scientifique devrait se débarrasser.

References

- [1] L. Gibson, M. Ashby, *Cellular Solids*, Cambridge University Press, 1997.
- [2] D. Weaire, S. Hutzler, *The Physics of Foams*, Oxford University Press, 1999.
- [3] S. Zaber, General introduction: liquid and solid (materials, main properties and applications...), *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 653–661, in this issue.
- [4] L. Salvo, G. Martin, M. Suard, A. Marmottant, R. Dendievel, J.-J. Blandin, Processing and structures of solids foams, *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 662–673, in this issue.
- [5] W. Drenckhan, A. Saint-Jalmes, *Adv. Colloid Interface Sci.* (2014), forthcoming.
- [6] A.-L. Fameau, A. Salonen, Effect of particles and aggregated structures on the foam stability and aging, *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 748–760, in this issue.
- [7] F. García-Moreno, S.T. Tobin, M. Mukherjee, C. Jiménez, E. Solórzano, G.V. Kumar, J. Banhart, Analysis of liquid metal foams through X-ray radioscopy and microgravity experiments, *Soft Matter* 10 (36) (2014) 6955–6962.
- [8] K. Heim, G.S. Kumar, F. García-Moreno, I. Manke, J. Banhart, Drainage of particle-stabilised aluminium composites through single films and Plateau borders, *Colloids Surf. A, Physicochem. Eng. Asp.* 438 (2013) 85–92.
- [9] K. Heim, F. García-Moreno, G.V. Kumar, A. Rack, J. Banhart, The rupture of a single liquid aluminium alloy film, *Soft Matter* 10 (26) (2014) 4711–4716.
- [10] V. Schmitt, M. Destribats, R. Backov, Colloidal particles as liquid dispersion stabilizer: pickering emulsions and materials thereof, *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 761–774, in this issue.
- [11] É. Maire, J. Adrien, C. Petit, Structural characterization of solid foams, *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 674–682, in this issue.
- [12] A. Burteau, J.-D. Bartout, Y. Bienvenu, S. Forest, On the creep deformation of nickel foams under compression, *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 705–718, in this issue.
- [13] P. Lhuissier, Structural properties of solid foams, *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 696–704, in this issue.
- [14] I. Cantat, S. Cohen-Addad, F. Elias, F. Graner, R. Hohler, O. Pitois, F. Rouyer, A. Saint-Jalmes, *Foams: Structure and Dynamics*, Oxford University Press, Oxford, UK, 2013.
- [15] B. Dollet, C. Raufaste, Rheology of aqueous foams, *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 731–747, in this issue.
- [16] J. Randrianalisoa, D. Baillis, Thermal conductive and radiative properties of solid foams: traditional and recent advanced modelling approaches, *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 683–695, in this issue.
- [17] C. Monteux, Adsorption of soluble polymers at liquid interfaces and in foams, *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 775–785, in this issue.
- [18] Y. Bienvenu, Application and future of solid foams, *C. R. Physique* 15 (8–9) (2014) 719–730, in this issue.

Yves Bréchet, Luc Salvo

Grenoble University & CNRS, SIMaP/GPM2, UMR 5266, 101, rue de la Physique, BP 46, 38402 Saint-Martin-d'Hères, France

Arnaud Saint-Jalmes

Institut de physique de Rennes, UMR CNRS 6251, Université Rennes-1, 263, avenue du Général-Leclerc, 35700 Rennes, France