Gouttes, perles et filaments de gel sous déformations extrêmes

Résumé : Nous étudions le comportement de gels, transitoires auto-assemblés et réticulés permanents, soumis à des contraintes mécaniques extrêmes. D'une part, nous étudions la déformation biaxiale de nappes libres produites par impact d'une goutte liquide (Newtonienne ou viscoélastique) ou d'une perle de gel polymère sur des surfaces solides dans des conditions de dissipation minimale, obtenues soit avec une petite cible solide, soit avec une surface répulsive. Lors de l'impact, la goutte ou perle est transformée en une nappe mince qui s'étend et se rétracte sous l'action de forces de rappel élastiques. Pour les fluides viscoélastiques avec un temps de relaxation plus petit que la durée de vie typique de la nappe, la dynamique de la nappe viscoélastique est similaire à d'un liquide visqueux Newtonien de même viscosité. L'expansion maximale de la nappe diminue avec la viscosité et est modélisée quantitativement en utilisant un bilan énergétique entre l'inertie, la tension superficielle et la dissipation du cisaillement visqueux sur la cible solide, qui peut être prise en compte en mesurant une vitesse effective de la nappe à temps court, en sortie de cible. Nous montrons en outre que la dissipation visqueuse peut être sensiblement éliminée en utilisant une surface solide sur la base d'un effet de Leidenfrost inverse. Les expériences effectuées à l'aide de perles élastiques de modules élastiques variables, de gouttes liquides de tensions superficielles variables et de gouttes viscoélastiques révèlent un comportement universel pour l'expansion maximale de la nappe avec la vitesse d'impact, avec une dynamique analogue à celle d'un système ressort-masse conventionnel. Nous montrons en outre que, pour les gouttes qui impactent une petite cible solide, une description similaire peut être utilisée une fois que la dissipation visqueuse est prise en compte en remplaçant la vitesse d'impact par la vitesse effective. Un autre comportement fascinant des fluides viscoélastiques est l'expansion hétérogène de la nappe associée à l'apparition de fissures, révélant la nature élastique du fluide viscoélastique. D'autre part, nous étudions la déformation uniaxiale et la facture de filaments de doubles réseaux transitoires en couplant rhéométrie extensionnelle et imagerie rapide des filaments étirés. Nous établissons un diagramme d'état qui délimite le régime de du filament, lorsqu'il est étiré à un taux supérieur à l'inverse du temps de relaxation du plus lent des deux réseaux. Nous démontrons quantitativement que les processus de dissipation ne sont pas pertinents dans nos conditions expérimentales et que, suivant la densité des nœuds dans les réseaux, la rupture se produit dans le régime élastique linéaire, ou non linéaire précédé d'une augmentation considérable de la viscosité extensionnelle. L'analyse des profils d'ouverture des fissures indique, pour des réseaux faiblement connectés, des écarts par rapport à une forme parabolique en pointe de fissure, caractéristique d'une fracture fragile en régime linéaire. Nous montrons une corrélation directe entre l'amplitude de la déviation de la forme parabolique et le caractère non linéaire de la déformation élastique.

Mots-clés : nappe liquide, impact de goutte, expansion maximale, fluides viscoélastiques, fluides Newtoniens, solides élastiques, élasto-capillarité, étirage de filaments, fracture, rhéomètrie extensionnelle

Drops, beads and filaments of gels under extreme deformations

Abstract: We investigate the behavior of transient self-assembled and permanently crosslinked gels subjected to extreme mechanical stresses. On the one hand, we study the dynamics of freely expanding sheets produced by impacting a (Newtonian or viscoelastic) liquid drop or a bead of polymeric gel on solid surfaces in minimal dissipation conditions, achieved using either a small solid target or a repellent surface. Upon impact, the drop or bead is transformed into a thin sheet that expands and retracts due to elasticity. For viscoelastic fluids with a relaxation time smaller than the typical lifetime of the sheet, the dynamics of the viscoelastic sheet is similar to that of Newtonian liquids with equal viscosity. The maximal expansion of the sheet decreases with the viscosity and is quantitatively modeled using an energy balance between inertia, surface tension and viscous shear dissipation on the solid target that can be accounted by measuring an effective velocity of the expanding sheet at short time scale. We further show that the shear dissipation can be substantially eliminated by performing impact experiments on a solid surface based on an inverse Leidenfrost effect. Experiments performed using elastic beads of various elastic moduli, viscoelastic or liquid drops of various surface tensions reveal a universal scaling behavior of the maximum expansion with the impact velocity, with a dynamics that mimics that of a conventional spring-mass system. We furthermore show that, for drops impacting a solid target, a similar scaling holds once the viscous dissipation is accounted by replacing the impact velocity with the effective velocity. Another fascinating behavior of viscoelastic fluids is a heterogeneous expansion of the sheet with the occurrence of cracks, revealing the elastic nature of the viscoelastic fluid. On the other hand, we study the uniaxial deformation and the fracture of reversible double transient networks by coupling extensional rheology to fast imaging. We provide a state diagram that delineates the regime of fracture without necking of the filament, when it is stretched at a rate larger than the inverse of the slowest relaxation time of the networks. We quantitatively demonstrate that dissipation processes are not relevant in our experimental conditions and that, depending on the density of nodes in the networks, fracture occurs in the linear elastic regime, or in a non-linear elastic regime preceded by a considerable strain hardening. In addition, analysis of the crack opening profiles indicates, for weakly connected networks, deviations from a parabolic shape close to the crack tip, which is expected for the linear elasticity of a brittle fracture. We demonstrate a direct correlation between the amplitude of the deviation from the parabolic shape and the amount of non-linear elasticity.

Keywords: drop impact, liquid sheet, maximal expansion, viscoelastic fluids, Newtonian fluids, elastic solids, elasto-capillarity, filament stretching, fracture, extensional rheometry