



HAL
open science

Observation expérimentale d'un effet thermoélastique dans l'état liquide

Laurence Noirez

► **To cite this version:**

Laurence Noirez. Observation expérimentale d'un effet thermoélastique dans l'état liquide. 2021.
hal-03293129

HAL Id: hal-03293129

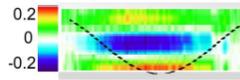
<https://hal.science/hal-03293129>

Submitted on 16 Aug 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

06 novembre 2020

Observation expérimentale d'un effet thermoélastique dans l'état liquide


La thermoélasticité décrit la variation des propriétés élastiques d'un corps solide en fonction de sa température. Pour un fluide incompressible, les coefficients thermoélastiques, dilatation isobare et compressibilité isotherme, sont en pratique nuls. Pour être non nuls, il est nécessaire que des interactions à longue portée soient présentes, mais ceci est a priori exclu de par la définition même de l'état liquide.

Une équipe du LLB vient cependant de mettre en évidence des propriétés thermoélastiques pour un liquide dans des conditions usuelles de pression. Ils observent qu'un liquide ordinaire présente une modulation de température sous l'application d'une contrainte mécanique de cisaillement à basse fréquence (~ 1 Hz) : le liquide se divise en bandes thermiques chaudes et froides, de plusieurs dixièmes de microns de large et variant de manière synchrone avec la déformation. Ce couplage thermomécanique ainsi mis en évidence est une preuve que l'énergie de l'onde de cisaillement n'est pas totalement dissipée au niveau moléculaire du fait de la viscosité du fluide, mais qu'une partie est convertie adiabatiquement (i.e. sans échange avec l'extérieur) en états thermodynamiques locaux. Ceci est en accord avec de nouveaux modèles théoriques, pour lesquels les liquides ont des propriétés élastiques non-extensives qui s'étendent jusqu'à l'échelle de plusieurs dizaines de microns*.

En outre, la transformation quasi-instantanée de l'énergie de déformation, sous la forme d'une modulation locale de température, implique que les fluctuations (thermiques) de densité sont corrélées à longue distance. Le couplage thermomécanique ainsi mis en évidence a des implications directes pour l'étude des liquides physiologiques. Il pourrait également permettre de réaliser de nouveaux convertisseurs de température, en particulier en microfluidique.

*Tel que "les modèles k-gap", où les modes acoustiques présentent un gap dans l'espace réciproque [7].

En physique, selon le modèle bien établi de Maxwell, l'absence de résistance mécanique à une déformation en cisaillement indique un comportement liquide. En revanche, la résistance au cisaillement est propre à l'état solide. Elle s'exprime par le module de cisaillement G , rapport entre la contrainte de cisaillement appliquée (σ) et la déformation (γ) : $\sigma = G \cdot \gamma$. Reliant déformation et température, un coefficient thermoélastique non nul indique un état de type solide (Fig.1).

La thermoélasticité fait partie des propriétés de l'état solide. Elle couple la déformation d'un corps élastique (solide) à sa température (Fig.1). Une telle propriété dans les liquides est un changement de paradigme qui nécessite des interactions collectives à longue portée, qui ne sont pas prises en compte dans les théories actuelles. En effet, les modèles hydrodynamiques et viscoélastiques postulent que pour des excitations de fréquence inférieure à la fréquence propre de la molécule (typiquement $\omega < 10^9$ - 10^{12} Hz pour les liquides simples), les liquides sont en régime d'écoulement hydrodynamique [1,2].

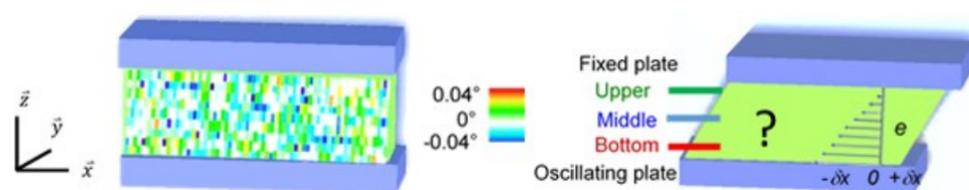


Figure 1 : Pour accéder aux propriétés physiques d'un matériau, une méthode générale est d'observer sa fonction de réponse à une contrainte externe. Ici, un liquide, confiné entre deux plaques se déplaçant à basse fréquence (\sim Hz) parallèlement l'une par rapport à l'autre, est soumis à une déformation mécanique de cisaillement. On observe sa réponse dynamique en accédant à la température instantanée en chaque point de l'entrefer. A gauche, l'image thermique du liquide est visualisée à l'équilibre dans le plan de l'entrefer (xOz) : image thermique renormalisée 63×13 pixels du glycérol à température ambiante.

La présente étude mésoscopique révèle cependant que l'énergie fournie par l'action mécanique de cisaillement à basse fréquence (~ 1 Hz) n'est pas dissipée dans des conditions hydrodynamiques, mais est convertie en signaux thermiques modulés (Fig. 2) : le liquide se découpe en bandes thermiques chaudes et froides d'une dizaine de microns de large, variant de façon synchrone avec l'onde de cisaillement. La variation de température s'amplifie avec la déformation appliquée (atteignant $\pm 0,2^\circ\text{C}$ à grandes déformations) [3]. Ceci montre que les liquides (ordinaires) sont dotés de propriétés thermoélastiques. Ces changements thermiques dynamiques fonctionnent de manière adiabatique, ce qui soutient également l'hypothèse d'un mécanisme élastique.

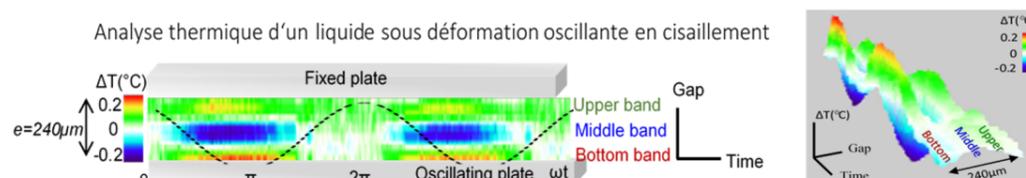


Figure 2 : En appliquant un déformation mécanique basse fréquence (\sim Hz) en cisaillement (ici la surface inférieure est animée d'un déplacement oscillant sinusoïdal tandis que la supérieure est fixe), on observe

qu'un liquide émet un signal thermique modulé synchrone avec le stimulus. Les figures a) et b) (représentation 3D) sont une cartographie en temps réel (2 cycles) de la variation de température du polypropylène glycol (PPG-4000) dans un entrefer de 240 μm lors d'une déformation en cisaillement (fréquence $\omega = 0,5$ rad/s, amplitude $\gamma = 4000$ %). Le trait en pointillé est un guide pour l'œil pour la déformation (mesures à température ambiante sur substrat d'alumine).

Ce résultat expérimental s'oppose au concept selon lequel les molécules liquides sont libres à basses fréquences (modèle de Frenkel "Kinetic Theory of Liquids", pierre d'angle à la physique des liquides [1]) et l'énergie dissipée dans les fluctuations thermiques. Mais il est en adéquation avec des développements expérimentaux récents montrant qu'à l'échelle mésoscopique (jusqu'à plusieurs centaines de microns), les fluides présentent une réponse élastique au cisaillement, c'est à dire des corrélations élastiques à longue portée [4,5]. Ces corrélations sont inexistantes dans les modèles conventionnels. Cependant, et indépendamment de nos résultats, des théoriciens ont repris le calcul de Frenkel à l'origine du modèle viscoélastique (de Maxwell), et montrent que la théorie des liquides est en fait inachevée. Comme un solide, un liquide peut supporter des ondes de cisaillement de basses fréquences sur des échelles de plusieurs microns (modèle k-gap) [6]. Il a été récemment montré, par une simple analyse dimensionnelle que cette réponse élastique au cisaillement doit varier comme $1/e^3$, où e est la largeur de l'entrefer [7].

L'élasticité liquide désormais avérée rend possible l'identification de nouvelles propriétés mésoscopiques des liquides, importantes en microfluidique et pour les circuits de liquides physiologiques.

Références :

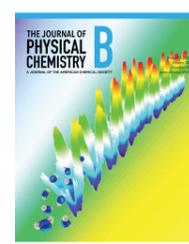
- [1] "Kinetic Theory of Liquids" J. Frenkel Oxford University Press, Oxford, 1946.
- [2] "Viscoelastic Properties of Polymers" J.D. Ferry, John Wiley & Sons, 1980
- [3] "Strain-induced violation of temperature uniformity in mesoscale liquids"
E. Kume, P. Baroni, L. Noirez, *Sci. Rep.* **10** 13340 (2020).
- [4] "Solid-like rheological response of non-entangled polymers in the molten state"
H. Mendil, P. Baroni, L. Noirez, *The European Physical Journal E* **19** 77 (2006) Focus point.
- [5] "Revealing the solid-like nature of glycerol at ambient temperature",
L. Noirez, P. Baroni, *J. Mol. Struct.* **972** 16 (2010)
- [6] "Gapped momentum states"
M. Baggioli; M. Vasin; V. Brazhkin, K. Trachenko, *Physics Reports*, **865** 1 (2020).
- [7] "Explaining the low-frequency shear elasticity of confined liquids"
A. Zaccone, K. Trachenko, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **117**, 19653 (2020).

Voir aussi :

- Universal $G' \sim L^{-3}$ law for the low-frequency shear modulus of confined liquids
Alessio Zaccone and Laurence Noirez, *J. Phys. Chem. Lett.* **2021**, *12*, XXX, 650–657.

En 2021 :

Identification of thermal response of mesoscopic liquids under mechanical excitation: from harmonic to nonharmonic thermal wave,
Eni Kume and Laurence Noirez, *J. Phys. Chem. B* **125**(30)(2021) 8652.



Contact CEA-IRAMIS : [Laurence Noirez \(LLB/NFMQ\)](#).

Ce travail est un des résultats de thèse de [Eni Kume](#) - LLB/NFMQ (en préparation).

#3291 - Màj : 05/08/2021

Tweeter

-  Physics, chemistry, nanoscience and materials around large instruments > Physique de la matière condensée, étude par l'interaction rayonnement matière
-  Institut Rayonnement Matière de Saclay • Laboratoire Léon Brillouin (LLB)
- Nouvelles frontières dans les matériaux quantiques - NFMQ