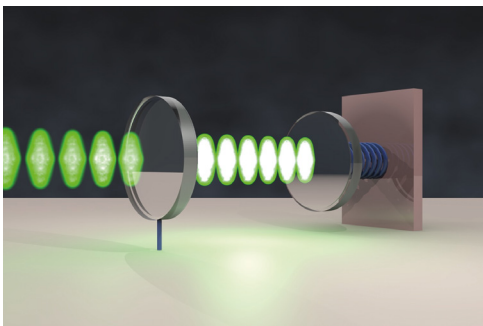


OPTOMÉCANIQUE : SCIENCE ET CAPTEURS

Ivan FAVERO*

Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université Paris Cité, CNRS, Paris, France

* ivan.favero@u-paris.fr



La science de l'optomécanique, qui étudie le couplage de la lumière au mouvement de systèmes mécaniques, a connu un essor inattendu depuis 20 ans. À présent miniaturisés, les résonateurs optomécaniques mesurent des signaux physiques avec une sensibilité et une bande-passante remarquables. Ces technologies de capteurs optomécaniques impactent aujourd'hui la science de la matière, qu'elle soit solide, liquide ou vivante.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412933>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

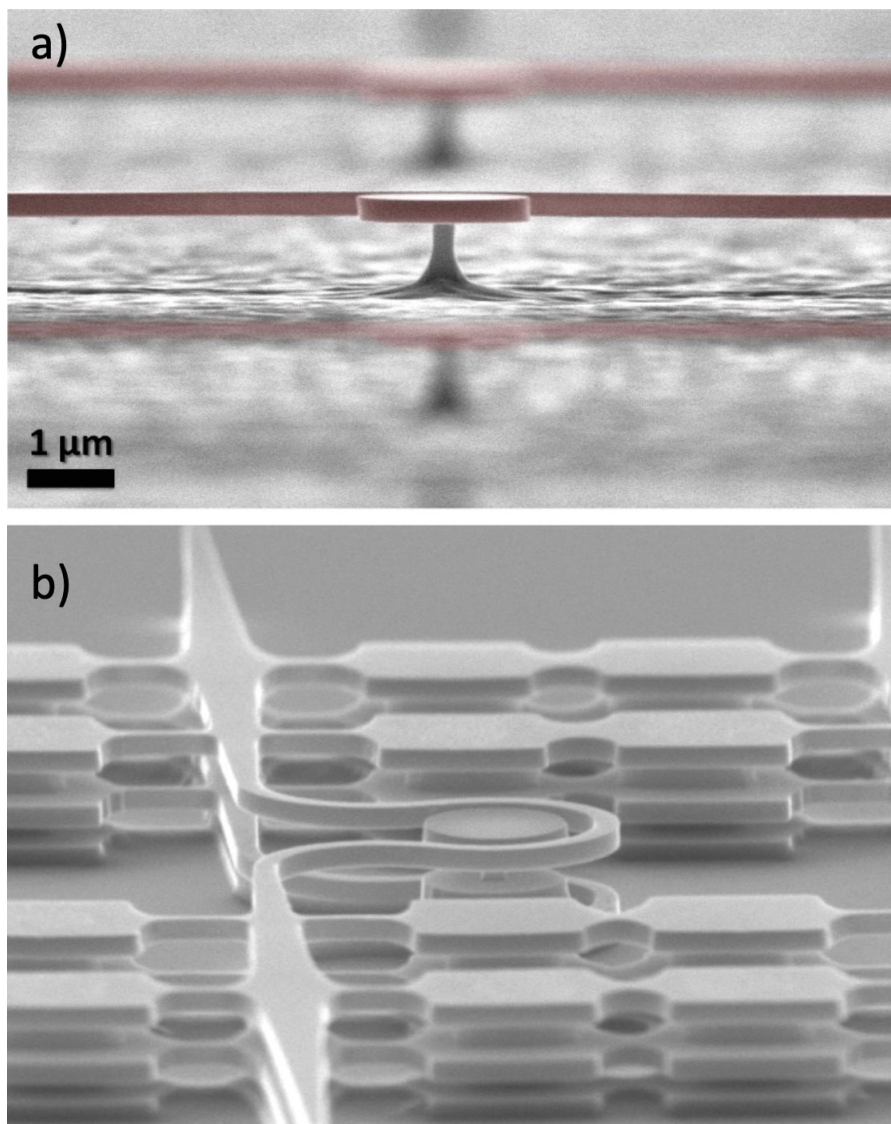
LUMIÈRE ET MÉCANIQUE

La lumière exerce une action mécanique sur les corps, c'est un concept central de l'optomécanique. Si ce concept est depuis longtemps ancré chez l'opticien qui a piégé un atome ou une micro-bille dans une pince laser, il l'est moins à une échelle plus macroscopique, où les effets mécaniques de la lumière restent modestes en regard de l'inertie des corps. Au laboratoire, seules des expériences délicates, appuyées sur une technologie finement maîtrisée, permettent d'observer les effets mécaniques de la lumière à cette échelle. De telles expériences ont été développées pour sonder les limites fondamentales de la mesure optique dans un interféromètre.

L'interférence produite par la lumière cohérente d'un laser se réfléchissant entre deux interfaces est un outil de choix pour détecter les

mouvements relatifs de ces interfaces. Si ces interfaces sont des miroirs hautement réfléchissants, permettant à la lumière de parcourir de nombreuses fois le chemin où se forme l'interférence, on obtient un interféromètre ultra-sensible. Un flux de lumière important à travers cet instrument, permettant d'acquérir l'information à un taux plus rapide que les perturbations extérieures (vibrations externes, variations de température, bruit thermique), autorise alors des sensibilités ultimes au mouvement relatif des objets. C'est l'approche retenue il y a plus de 40 ans maintenant pour détecter le passage d'ondes gravitationnelles sur terre, qui produisent d'infimes déformations d'un tel interféromètre, de l'ordre de 10^{-20} . Pour atteindre la sensibilité nécessaire à la mesure de si petits effets, le flux de lumière dans l'interféromètre doit être

colossal, typiquement supérieur au kilowatt. A ces niveaux de puissance, les effets mécaniques de la lumière ne peuvent plus être ignorés : la lumière peut déplacer les miroirs en bout d'interféromètre. On accède alors à un second niveau de lecture : la lumière qui effectue la mesure perturbe l'instrument de mesure même. Ce problème circulaire entre mesure et rétro-action sur la mesure a été au cœur des développements historiques en optomécanique. A ce titre, on peut considérer que les détecteurs d'ondes gravitationnelles sont les premiers instruments optomécaniques, et ils ont d'ailleurs servi de matrice aux concepts du domaine. Les miroirs suspendus dans ces détecteurs oscillent à des fréquences propres de l'ordre du Hertz. Aujourd'hui, le système optomécanique canonique prend plutôt la forme d'une ●●●



cavité Fabry-Pérot à miroir mobile. Cette géométrie à une dimension est en effet plus simple et conserve les ingrédients de base du problème : une haute sensibilité optique interférométrique et une capacité à se déformer élastiquement. Le miroir arrière (une masse) est monté sur un ressort, devenant ainsi un résonateur mécanique.

Depuis une vingtaine d'années, on a assisté à une miniaturisation des instruments optomécaniques, passant de l'échelle kilométrique des détecteurs astronomiques à des dispositifs qui ne dépassent guère quelques micromètres de taille et parfois moins. La raison en est simple : une telle réduction de taille s'accompagne d'une réduction de masse drastique. Les

Figure 1. Disques optomécaniques en Arséniure de Gallium. a) Disque simple sur piédestal, avec guide optique. b) Disque complexe, avec circuiterie nanophotonique et suspensions mécaniques.

dispositifs micro ou nano-optomécaniques rencontrés aujourd'hui au laboratoire possèdent une masse plus de quinze ordres de grandeur inférieure à la dizaine de kilogrammes des grands miroirs suspendus aux extrémités d'un détecteur d'ondes gravitationnelles. Les effets optomécaniques s'en trouvent décuplés, y compris à des niveaux de puissance optique beaucoup plus faibles qui deviennent accessibles à des expériences de table et compatibles avec

des applications bas-coût. Par ailleurs, les progrès immenses réalisés en design et en nano-fabrication ont permis aux résonateurs micro et nano-optomécaniques d'atteindre des niveaux de performance qui n'ont rien à envier aux détecteurs d'onde gravitationnelles, bien qu'opérant dans des gammes différentes. En conséquence, une véritable zoologie optomécanique a émergé, couverte dans plusieurs articles de revues.

Ici, nous nous concentrerons sur la géométrie optomécanique circulaire, qui permet d'illustrer les développements récents. Le résonateur visible en Figure 1a est un disque optomécanique, posé sur un piédestal central. Il possède une masse d'un picogramme, et est le siège de modes de galerie qui atteignent des facteurs de qualité de quelques millions. Il est l'équivalent circulaire de la cavité Fabry-Pérot à miroir mobile : l'interférence optique au sein du mode de galerie dépend très finement de la déformation mécanique radiale du disque, qui est permise par l'élasticité de l'objet. De manière réciproque, la lumière circulant dans cette galerie produit un effet mécanique radial centrifuge sur le disque, écartant ses parois. Les dimensions de l'objet, quelque part entre l'échelle micro et nano, lui confèrent de très hautes fréquences de vibrations radiales, de l'ordre du gigahertz, qui élargissent considérablement la bande passante mécanique potentielle. Comme illustrée en Figure 1b, une véritable circuiterie nanophotonique peut être déployée dans le plan du disque, pour optimiser son contrôle optique, alors qu'une structuration verticale peut-être réalisée pour découpler les vibrations du disque du substrat, garantissant de hauts facteurs de qualité mécanique. Ces capacités d'ingénierie et d'intégration, combinées aux sensibilités et bande-passante extrêmes atteintes par cette optomécanique miniaturisée, offrent de nombreuses perspectives dans le domaine des capteurs et détecteurs. Nous allons l'illustrer par trois approches ci-dessous.

CAPTEURS OPTOMÉCANIQUES DE FORCES

Un microscope à force atomique (AFM) est déjà un capteur optomécanique. Le levier de l'AFM est l'élément mécanique du capteur, qui mesure les forces. Dans les protocoles, c'est souvent sa fréquence qui est mesurée : elle donne accès au gradient local de force (Figures 2a et 2b). Le mouvement mécanique est détecté optiquement par un faisceau laser. Pas de détection interférométrique ultra-sensible ici, et des fréquences mécaniques saturant au megahertz, qui restent loin des avancées récentes en optomécanique. Et pourtant les instruments AFM offrent une résolution suffisante pour imager directement des liens moléculaires, et une vitesse qui approche aujourd'hui le taux vidéo, permettant d'imager des biomolécules individuelles en action. L'optomécanique miniaturisée est une opportunité pour aller plus loin, notamment en vitesse. En effet, si la détection du mouvement est excellente, c'est la fréquence mécanique qui fixe l'horizon de la bande-passante de mesure de forces. L'optomécanique combine donc les ingrédients nécessaires. Avec une fréquence mécanique du gigahertz, on espère atteindre une résolution temporelle à la nanoseconde, mille fois meilleure qu'un AFM rapide. Les phénomènes ultra-rapides dans la matière deviendraient accessibles, ainsi que des comparaisons poussées aux simulations moléculaires numériques.

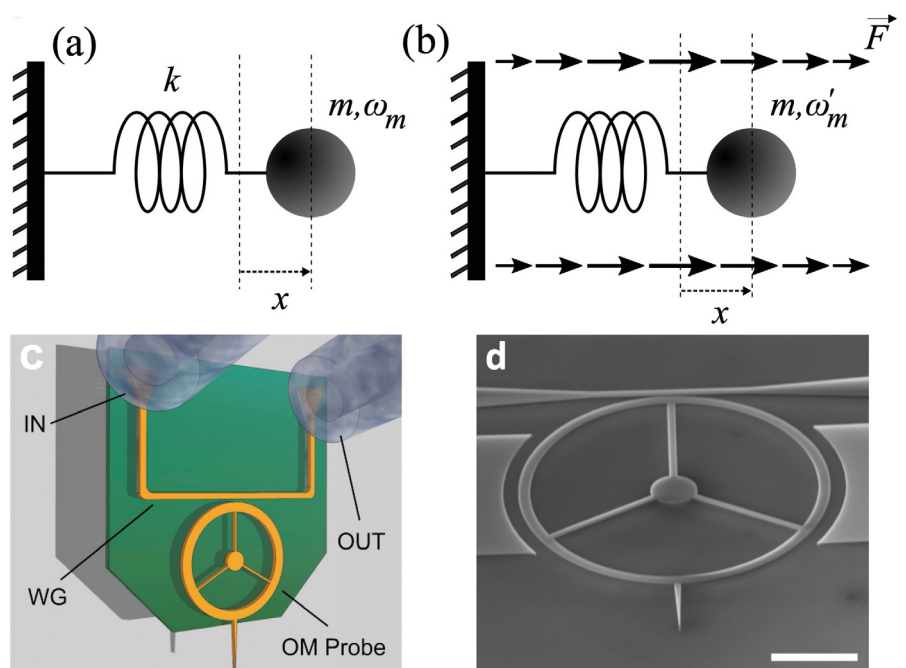
La Figure 2c illustre un dispositif optomécanique circulaire aspirant à atteindre cette résolution. Il s'agit d'un anneau en silicium d'une dizaine de micromètres de rayon et d'une épaisseur de 220 nanomètres, qui est le siège de modes optiques guidés circulairement et de modes mécaniques de vibration radiale. Une pointe nanoscopique, à la manière de celle d'un AFM pointant vers l'objet, est intégrée en bas de l'anneau, avec son mouvement vertical rigidement lié au mouvement de l'anneau. Les fréquences mécaniques atteintes sont de centaines de megahertz, et les interférences optiques

circulaires permettent de détecter aisément le mouvement Brownien de l'anneau (donc de la pointe). Cet objet combine ainsi les performances attendues. Il peut être utilisé en mode actuation : la lumière injectée est modulée à la fréquence mécanique, et les forces optiques centrifuges entrent en résonance avec l'anneau mécanique. Ce mode optomécanique « actif » permet d'abandonner les méthodes d'excitation piezoélectrique de l'AFM, pour monter en fréquence. Cette sonde optomécanique annulaire a été qualifiée par des mesures de forces à l'échelle du pixel unique [1] et récemment montée dans la tête d'un instrument AFM, intégration facilitée par la connexion de la sonde avec des fibres optiques (Figure 2c). Les chercheurs travaillent à présent à réaliser des images avec cette technologie. Le Figure 2d montre une sonde sortie de salle blanche, produite par des procédés large échelle compatibles avec un principe de sondes jetables.

OPTOMÉCANIQUE AU SEIN D'UN LIQUIDE

Le second champ d'application de l'optomécanique que nous voulons aborder est celui de la mesure des liquides. L'indice de réfraction des matériaux utilisés en optomécanique miniature, bien souvent des semiconducteurs, est largement supérieur à celui des liquides usuels. Il est donc possible d'immerger un dispositif optomécanique miniature dans un liquide sans corrompre sa capacité à piéger la lumière, qui continue à interagir efficacement avec le mouvement mécanique de l'objet. La Figure 3a illustre le cas d'un disque optomécanique immergé dans l'eau. Les guides d'onde optiques amenant la lumière au résonateur, et la collectant en sortie, restent aussi fonctionnels en milieu liquide, pour les mêmes raisons. Il devient ainsi possible d'effectuer des mesures optomécaniques locales directement au cœur d'un liquide, avec une ●●●

Figure 2. Sonde optomécanique pour les forces atomiques. a) Une masse sur un ressort oscille à ω_m . b) Plongée dans un champ de force, la fréquence se déplace en proportion du gradient local de force. c) Principe d'un anneau optomécanique pour mesurer les forces atomiques, développé par les laboratoires LAAS-CNRS, CEA-LETI, et MPQ-CNRS-Université Paris Cité. d) Réalisation sur une technologie SOI (Silicon On Insulator). Barre 5 μm .



sensibilité au mouvement égale à celle obtenue à l'air, et qui suffit à résoudre le mouvement Brownien de l'objet, d'une centaine de femtomètres seulement [2]. La Figure 3b montre le spectre du mouvement mécanique d'un disque oscillant au gigahertz, mesuré dans l'air puis en immersion dans un liquide. Avec l'immersion, on observe un déplacement vers les basses fréquences et un élargissement important de la résonance de vibration. Ces effets dispersif et dissipatif révèlent l'interaction entre le corps vibrant et le liquide. Autrement dit, le capteur répond aux forces exercées par le liquide sur ses parois externes. La modélisation de ces forces

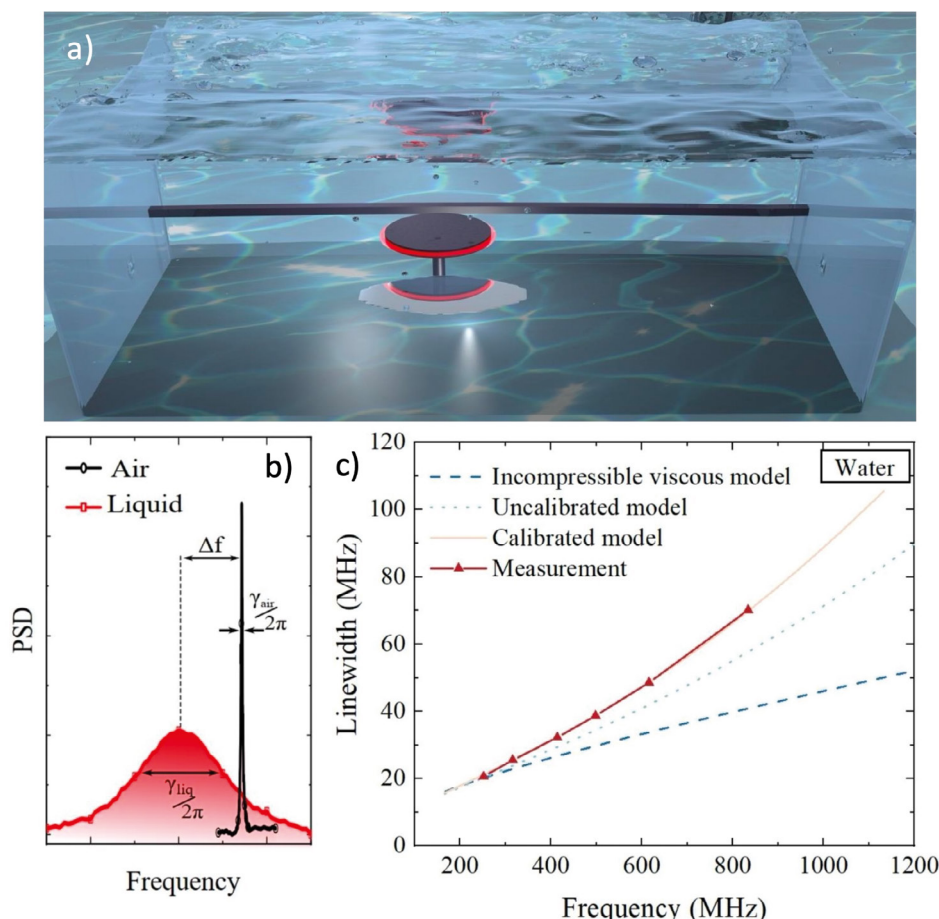
et de leur effet sur le mouvement est une tâche ardue, qui combine des problèmes d'hydrodynamique et d'élasticité. Des travaux théoriques récents ont traité ce problème pour la géométrie simple d'un disque, obtenant l'accord entre expériences et théorie présenté en Figure 3c. On y voit que les effets de compressibilité de l'eau sont essentiels à ces fréquences mécaniques élevées, un résultat non-conventionnel pour les interactions fluide-structure. Grâce à cette modélisation des expériences, on peut renverser le problème et utiliser les mesures pour effectuer une micro-rhéologie mécanique du fluide : mesurer sa viscosité, sa

densité, son élasticité. La mesure est locale, dans un volume de quelques microns cube, et peut être obtenue en moins d'une milliseconde grâce à l'efficacité de détection. Cette mesure optomécanique au gigahertz permet de sonder la dynamique rapide du liquide. Nous avons récemment utilisé ce principe pour révéler le comportement non-Newtonien d'un alcool courant aux temps courts [3].

BALANCE OPTOMÉCANIQUE POUR UN NANO-OBJET

La troisième approche que nous désirons présenter est celle de la balance optomécanique. Dans ce cas, un objet est déposé sur le résonateur optomécanique et affecte sa réponse optique comme mécanique. L'opérateur mesure le déplacement des fréquences optiques et mécaniques de résonance, et en déduit des propriétés optiques et/ou mécaniques du nano-objet. Du point de vue mécanique, le capteur ressemble alors à une balance à quartz, mais ses dimensions miniatures le rendent sensible à une bien plus petite quantité de matière, par exemple un nano-objet unique. Cette balance n'est pas que mécanique, et la mesure optique concomitante donne accès à des informations complémentaires (par exemple le volume du nano-objet, qui peut compléter l'information sur sa masse). L'utilisation de cette mesure duale, mécanique et optique, a été récemment utilisée pour élucider le mode d'évaporation d'une nano-goutte de quelques dizaines d'attolitres, en bénéficiant de la résolution temporelle autorisée par l'optomécanique (Figure 4a, [4]). La technique de la balance optomécanique a également été utilisée pour mesurer la masse et l'élasticité de nanoparticules individuelles solides, telles que celles visibles en Figure 4b. L'application en vue est ici la mesure optomécanique d'un virus unique, dont la masse et l'élasticité permettent de former une carte d'identité simplifiée. Dans ces exemples, il faut souvent connaître la position d'atterrissage du nano-objet

Figure 3. Optomécanique au cœur d'un liquide. a) Disque optomécanique miniature immergé dans l'eau. b) Spectre mécanique du mouvement Brownien du disque, mesuré par détection optomécanique dans l'air et en liquide. γ est le taux de dissipation mécanique, et Δf le déplacement fréquentiel dû à l'immersion. c) Taux de dissipation mécanique dans l'eau, pour différentes fréquences du mouvement. Comparaison aux différents modèles d'interaction fluide-structure. Le modèle du liquide incompressible n'est plus suffisant à ces fréquences.



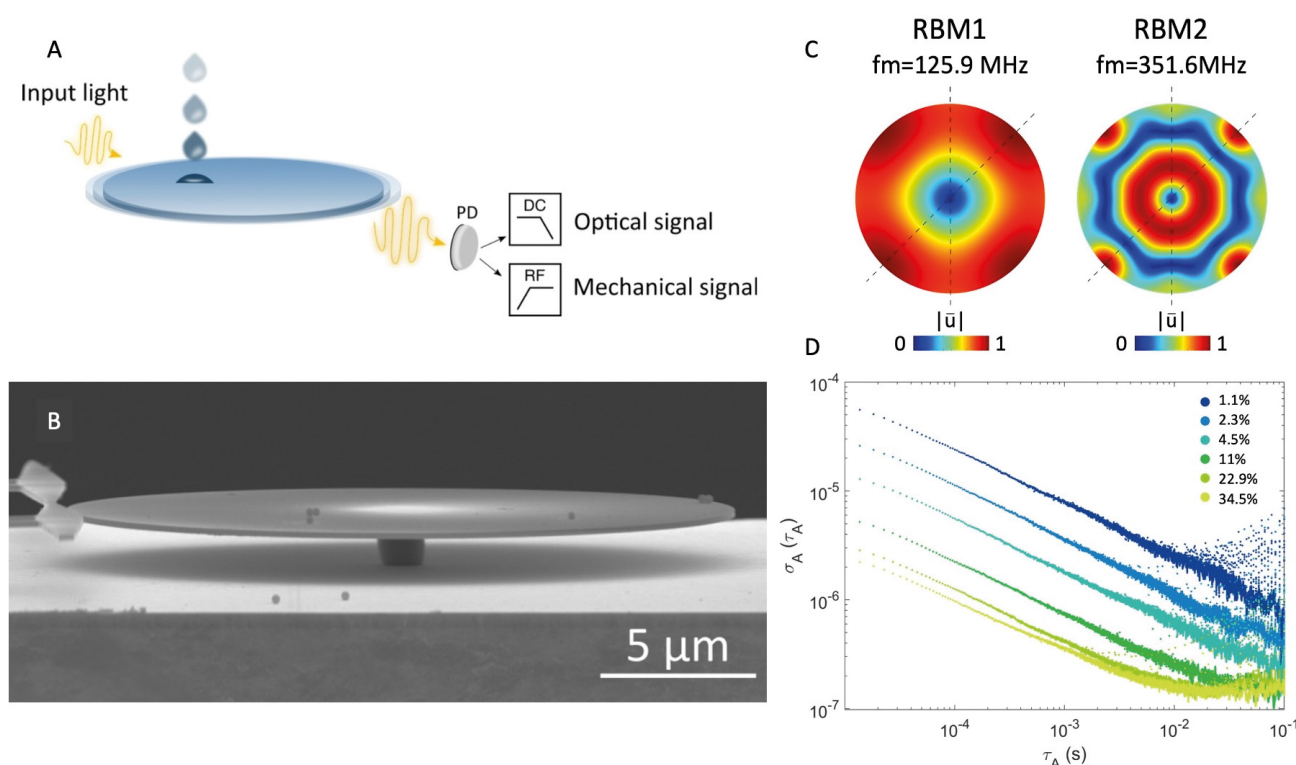


Figure 4. Balance optomécanique. a) Disque optomécanique miniature sur lequel un nano-objet individuel (ici une nano-goutte) atterrit, produisant un signal optique et mécanique en sortie. b) Une dizaine de nanoparticules solides sont tombées une par une sur une balance optomécanique. c) Différents modes mécaniques du disque peuvent être utilisés pour déconvoluer l'information. u est le vecteur déplacement. RBM : Radial Breathing Mode. d) Stabilité fréquentielle mécanique de la balance pour différentes conditions d'opération, en fonction du temps d'intégration τ_A .

sur la balance, afin de déconvoluer correctement l'information. Dans les expériences, cela peut être obtenu en visualisant *in-situ* chaque atterrissage en surface du capteur, ou en utilisant de multiples modes mécaniques et/ou optiques (Figure 4c) afin de trianguler la position de l'objet à partir des signaux optomécaniques. La stabilité fréquentielle de l'oscillation mécanique est un paramètre clé dans ces applications : tout comme la stabilité d'une horloge elle fixe notre capacité à mesurer de petits signaux et gagner en résolution dans la mesure des nano-objets. Cette stabilité atteint déjà un niveau de 100 ppb dans des conditions ambiantes d'utilisation (Figure 4d). Les balances optomécaniques miniatures en disque ont récemment été utilisées pour détecter les vibrations d'une bactérie unique [5], et sont en cours

de développement sur d'autres sujets biophysiques, amenant ici encore la sensibilité et la bande-passante que permet l'approche optomécanique.

CONCLUSION

Les domaines d'application évoqués ci-dessus couvrent l'imagerie de la matière à l'échelle atomique, la micro-rhéologie, et la mesure physique et résolue dans le temps d'objets

vivants individuels. Ces applications permettent d'illustrer la performance de l'approche optomécanique, qui offre sensibilité et bande-passante avec un compromis remarquable entre les deux. Ces exemples n'ont cependant rien d'exhaustif. Dans sa quête des effets quantiques de la lumière et de la mécanique, l'optomécanique a également réalisé des progrès remarquables, tels que l'observation des fluctuations quantiques du mouvement d'un résonateur, ou encore l'intrication entre lumière et mécanique. Une perspective naturelle sera dans un futur proche de combiner ces avancées avec des cas concrets d'applications comme ceux présentés ici. ●

RÉFÉRENCES

- [1] P. E. Allain *et al.* *Nanoscale* **12**, 2939 (2020)
- [2] E. Gil-Santos *et al.* *Nature Nanotechnol.* **10**, 810 (2015)
- [3] H. Neshasteh *et al.* *arXiv:2410.13467*, *Nature Commun.*, in press (2024)
- [4] S. Sbarra *et al.* *Nature Commun.* **13**, 6462 (2022)
- [5] E. Gil-Santos *et al.* *Nature Nanotechnol.* **15**, 469 (2020)