



HAL
open science

Explorer la nano-optomécanique avec des nanofils suspendus

Michaël Croquette, Francesco Fogliano, Chao Zhang, Cattleya Dousset, Lucas Judéaux, Benjamin Besga, Antoine Reigue, Benjamin Pigeau, Olivier Arcizet

► To cite this version:

Michaël Croquette, Francesco Fogliano, Chao Zhang, Cattleya Dousset, Lucas Judéaux, et al. Explorer la nano-optomécanique avec des nanofils suspendus. *Photoniques*, 2024, 129, pp.42-46. <10.1051/photon/202412742>. <hal-04863990>

HAL Id: hal-04863990

<https://hal.science/hal-04863990v1>

Submitted on 4 Jan 2025

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.



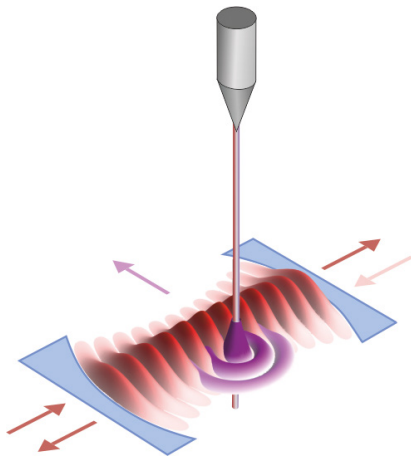
HAL Authorization

EXPLORER LA NANO-OPTOMÉCANIQUE AVEC DES NANOFILS SUSPENDUS

Michael CROQUETTE, Francesco FOGLIANO, Chao ZHANG, Cattleya DOUSSET, Lucas JUDÉAUX, Benjamin BESGA, Antoine REIGUE, Benjamin PIGEAU, Olivier ARCIZET*

Institut Néel, CNRS et Université Grenoble Alpes, 25 rue des martyrs 38000 Grenoble

*olivier.arcizet@neel.cnrs.fr



L'utilisation de nanorésonateurs mécaniques ultrasensibles de taille sub-longueur d'onde permet de cartographier la structure du champ électromagnétique à petite échelle grâce à la mesure des forces et des gradients de force qu'il génère. En mesurant optiquement les vibrations transverses de nanofils suspendus en carbure de silicium, il est possible d'établir le champ de force produit par un faisceau laser focalisé ou par un seul photon peuplant une microcavité, mais aussi par les champs électrostatiques à la surface de nanostructures métalliques.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412742>

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.

DES SONDES DE FORCE VECTORIELLES ET ULTRASENSIBLES

Les nanofils employés sont en carbure de silicium (SiC), un semi-conducteur à grand gap présentant peu d'absorption dans le visible. D'une longueur typique de 100 μm , ils sont collés à l'extrémité d'une pointe métallique qui permet de les manipuler et de positionner finement leur extrémité vibrante, de diamètre sub-longueur d'onde (100-400 nm), dans le champ lumineux ou le champ de force à explorer. Leur indice de réfraction élevé (2.7) leur

permet d'héberger des résonances optiques internes, les résonances de Mie, qui structurent fortement l'interaction lumière-nanofil. Elles sont responsables des couleurs vives observées au microscope en lumière blanche, voir la figure 1, que nous exploitons pour déterminer leur diamètre. Selon les expériences envisagées, on peut souhaiter exacerber l'interaction lumière-nanofil – un nanofil rouge interagira fortement avec un laser He-Ne – ou au contraire opérer dans des régimes peu intrusifs, en utilisant de plus petits diamètres.

Suspendus à une extrémité, les nanofils vibrent transversalement à leur axe, et leurs propriétés mécaniques dépendent essentiellement de la géométrie : en ajustant leurs dimensions, nous avons été amenés à travailler avec des modes propres de vibration oscillant entre 1 kHz et 10 MHz. En travaillant sous vide afin de supprimer les pertes acoustiques induites par l'air, les facteurs de qualité obtenus atteignent alors typiquement 10000 à température ambiante, ce qui leur confère une sensibilité en force élevée, de quelques attonewton (10^{-18} N) en 1s d'intégration. De plus,

les nanofils se déforment de façon quasi identique selon les deux directions transverses, ce qui permet de mesurer non seulement la norme mais aussi l'orientation latérale des forces auxquelles ils sont soumis.

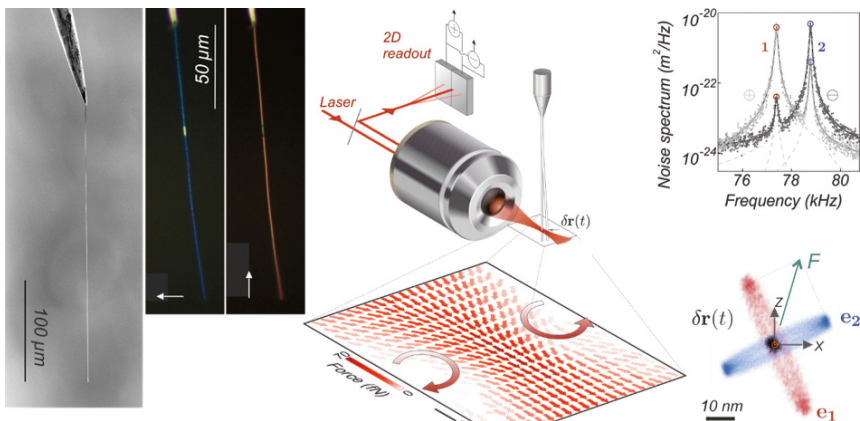
Pour mesurer les vibrations des nanofils, on a recours à des techniques de lecture optique. Un faisceau laser est focalisé grâce à un objectif de grande ouverture numérique sur l'extrémité vibrante du nanofil. En vibrant, ce dernier va moduler le champ diffusé et en particulier la fraction qui est collectée à travers l'objectif sur une photodiode à deux quadrants. En positionnant le nanofil un peu avant le waist optique et en mesurant la somme et la différence des deux photo-courants on peut alors mesurer ses vibrations parallèlement et perpendiculairement à l'axe optique du laser. Cette mesure bidimensionnelle permet alors de mesurer non seulement le bruit thermique du nanofil dans l'espace transverse, mais aussi sa réponse à une force externe, voir la Figure 1. Ces mesures permettent d'identifier les deux modes propres transverses fondamentaux des nanofils, quasi dégénérés (<1%), qui oscillent dans des directions perpendiculaires et de les exploiter afin

de mesurer des forces faibles, en bénéficiant d'une réponse mécanique accrue.

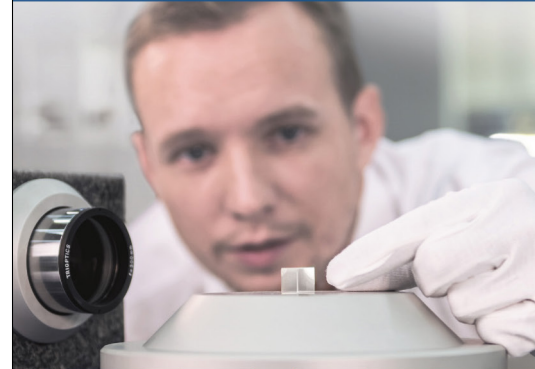
La connaissance des propriétés mécaniques du nanofil (les fréquences, l'amortissement et les directions de vibrations des deux modes fondamentaux, ainsi que leur profil de déformation) permet donc de déterminer la force subie par le nanofil à partir de la mesure des déformations induites. Cette mesure est particulièrement efficace et précise lorsqu'il est possible de moduler temporellement la force à étudier aux fréquences de vibrations du nanofil car on mesure alors directement la projection de cette force dans la direction des modes propres. Ce contrôle temporel est réalisable lorsqu'on étudie des forces optiques ou électrostatiques, en modulant simplement l'intensité des lasers ou des tensions d'échantillon, mais ce n'est pas toujours le cas, en particulier lorsqu'on étudie les forces de proximité, de type Van der Waals ou Casimir qui apparaissent à la surface de nanostructures.

Dans ce cas, à défaut de mesurer directement les forces, on va néanmoins pouvoir mesurer les gradients spatiaux de ces champs de force, en mesurant leur impact sur les propriétés ●●●

Figure 1. Gauche: images de nanofils obtenues aux microscopes électronique et optique en lumière blanche. Centre : les vibrations du nanofil sont mesurées optiquement, grâce à un objectif de grande ouverture numérique. Droite : spectre de bruit du nanofil révélant ses deux modes propres transverses de vibration dont les directions propres peuvent être déterminées en modulant une force externe à la résonance de chacun des modes. En noir, le bruit thermique du fil en l'absence d'excitation. Carte de la force optique produite au sein du waist par un faisceau de 100 μ W.



Instrumentation de test optique



Mesure de la plupart des paramètres optiques

FTM, EFL, BFL, centrage, alignement front d'onde

Applications en R&D et production



Banc de FTM
UV, VIS, IR

Interféromètre "μPhase"



Station de centrage optique



TRIOPTICS France

76 rue d'Alsace
69100 Villeurbanne
Tel. +33 (0)4 72 44 02 03
www.trioptics.fr

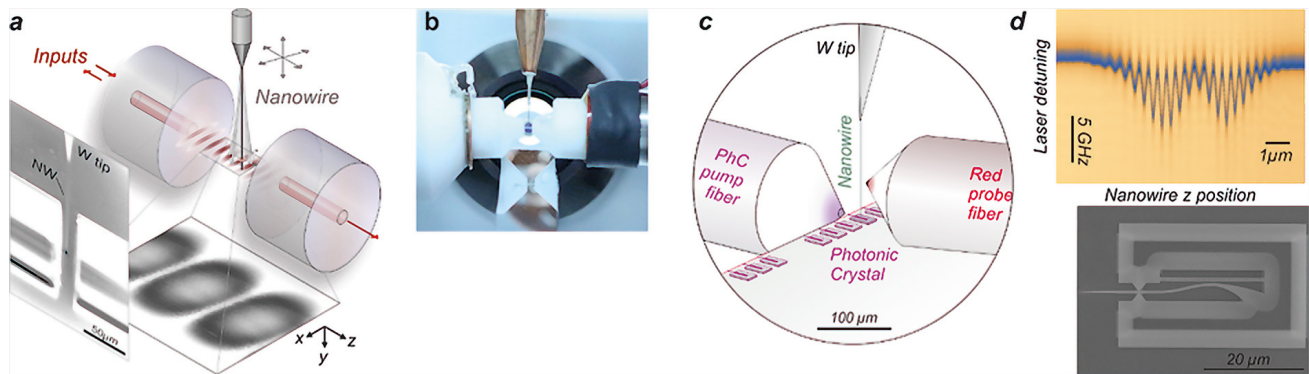


Figure 2. Principe des expériences de nano-optomécanique en cavité. L'extrémité vibrante des nanofils est insérée dans le champ intracavité d'une microcavité fibrée (a,b) et d'un cristal photonique (c,d). Le mode de cavité est perturbé par le nanofil, et en retour le nanofil subit la force optomécanique induite par le mode de cavité. Sa très grande sensibilité en force permet de détecter et de cartographier l'action optomécanique d'une population moyenne proche d'un seul photon.

mécaniques du nanofil. Cette approche représente une transposition à deux dimensions du principe de mesure des microscopes à force atomique en mode non-contact : la mesure des variations de fréquence d'un cantilever oscillant à la surface d'un échantillon, induites par les gradients verticaux de la force normale, permet de déterminer sa topographie. Le nanofil vibrant latéralement, il évolue quant à lui dans un champ de force bidimensionnel (F_x, F_z dans la base (x, z) transverse), et va être potentiellement sensible aux 4 composantes des gradients de force ($\partial_x F_x, \partial_z F_x, \partial_x F_z, \partial_z F_z$), qui vont modifier à la fois les fréquences mais aussi les directions des deux modes propres. On peut montrer que la mesure de ces perturbations mécaniques permet de remonter de façon univoque aux gradients de force locaux générant ces perturbations.

Nous avons validé ce principe de mesure d'abord dans le cas d'une force électrostatique produite par une nano-pointe métallique approchée au voisinage du nanofil. D'abord en analysant la structure spectro-angulaire de son bruit thermique [1], puis en développant des protocoles de mesure plus évolués, permettant d'atteindre un rythme de mesure en

quasi temps réel. Cela nous a permis de nous approcher plus finement de nanostructures métalliques et d'étudier en particulier les forces électrostatiques et de proximité à leur surface.

NANO-OPTOMÉCANIQUE DANS UN FAISCEAU FOCALISÉ

Étant extrêmement sensible, la dynamique du nanofil peut également être impactée par le faisceau laser qui sert à mesurer ses vibrations. Il est donc nécessaire de caractériser en détail cette interaction pour pouvoir la dissocier des forces que l'on cherche à mesurer. Nous avons d'abord cartographié le champ de force produit par un faisceau laser focalisé, grâce à la mise en œuvre de techniques de mesure pompe-sonde [2]. Il est reproduit sur la figure 1, où l'on reconnaît une structure de type pression de radiation avec un champ de force convergent puis divergent en amont et en aval du waist, et une force maximale de quelques 100 fN pour 100 μ W de puissance. Cette structure révèle également la nature non-conservative du champ de force, avec des zones à rotationnel non nul de chaque côté du waist optique. Un tel champ de force, qui ne dérive pas d'une énergie potentielle

comme on s'y attend pour les forces de pression de radiation, perturbe fortement la dynamique du nanofil : lorsqu'on le positionne sur le bord du waist, on observe une brisure de l'orthogonalité des modes propres et une convergence progressive des modes, dont les fréquences et les directions de vibrations convergent vers une valeur commune, conduisant à plus forte puissance à une instabilité dynamique : le nanofil se mettant alors à « tourner » dans le sens du rotationnel du champ de force [2].

NANO-OPTOMÉCANIQUE EN CAVITÉ À FAIBLE NOMBRE DE PHOTON

Les nanofils permettent donc d'obtenir des informations assez fines sur la structure des champs lumineux. Il était donc assez naturel de chercher à travailler avec des modes optiques stationnaires, confinés dans des microcavités de grande finesse et à petit volume de mode, afin d'exacerber le champ électromagnétique par photon intracavité et donc l'intensité du couplage. On a ainsi exploré le couplage optomécanique entre les vibrations des nanofils et le champ lumineux de microcavités fibrées produites au Laboratoire Kastler Brossel [3], et de cavités à cristaux photoniques produites au Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, dans les groupes de Jakob Reichel et Rémy Braive, voir la figure 2.

Lorsque l'extrémité vibrante du nanofil est positionnée à un ventre

de l'onde stationnaire du mode de cavité, il modifie le chemin optique de la cavité, ce qui induit un décalage paramétrique de la fréquence de résonance optique et accroît sa largeur spectrale car les nanofils diffusent fortement les photons vers l'extérieur. On parle de couplage optomécanique dispersif et dissipatif. Au contraire, la perturbation induite sera minimale si le nanofil est positionné à un nœud de l'onde stationnaire. On peut ainsi cartographier la structure spatiale et les propriétés du champ intracavité grâce au nanofil, avec une précision sub-longueur d'onde, voir la figure 2. Ces mesures en balayage, permettent de localiser et mesurer la structure de l'onde stationnaire, que ce soit entre les deux miroirs de la microcavité fibrée, ou à la surface du cristal photonique, dans la partie évanescente du mode. On peut en déduire l'intensité du couplage optomécanique (qui peut atteindre plusieurs GHz/nm), et vérifier que ces dispositifs permettent d'atteindre largement le régime de couplage ultrafort, lorsqu'un seul photon dans la cavité est capable de déplacer le nanofil de plus que ses fluctuations quantiques de

point zéro, le plus petit déplacement observable pour un oscillateur ultrafroid.

Ainsi, après avoir mesuré l'impact du nanofil sur le mode optique, on a cherché à mesurer l'autre facette du couplage optomécanique, c'est-à-dire de cartographier la force exercée par le mode optique sur le nanofil. Pour cela nous mesurons les déformations du nanofil induites par une modulation de l'intensité du champ intracavité, grâce à un laser sonde indépendant. Les nanofils de petit diamètre sont généralement attirés vers les zones de fort champ lumineux, les ventres du mode de cavité, mais ceci peut s'inverser pour les nanofils plus gros, lorsque les résonances de Mie entrent en jeu.

La très grande sensibilité des nanofils a permis de mesurer la force produite par une modulation de la population moyenne du mode de cavité inférieure à un photon, avec une sensibilité atteignant 300 aN/photon dans les zones de forte interaction, sur les bords des ventres de l'onde stationnaire. Le champ de force optomécaniques est ainsi fortement structuré à l'échelle de la longueur d'onde et on a pu vérifier que ses gradients

de force, pourtant produits par un nombre de photons proche de l'unité, étaient largement décelables par les nanofils (générant des variations de fréquence de 100 Hz pour un fil vibrant à 10 kHz) [3]. De telles mesures démontrent donc la capacité des nanofils à explorer le couplage optomécanique et imager la répartition spatiale du champ intracavité, pour des occupations moyennes de l'ordre de 1 photon.

Ces travaux ouvrent donc la voie à l'optomécanique en cavité opérant à très faible nombre de photon, un régime encore quasiment inexploré à l'opposé des expériences traditionnelles dans le domaine, dans lesquelles il était nécessaire de fortement pomper les cavités pour palier à la faiblesse de l'interaction produite par un seul photon. Ce régime dans lequel les non-linéarités se développent à l'échelle de quelques photons seulement, présente un fort intérêt fondamental, pour l'optique et l'optomécanique quantique.

UNE SONDE DE FORCE UNIVERSELLE

Les nanofils sont donc particulièrement adaptés à l'étude des champs électromagnétiques ●●●



LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE
AU SERVICE DE L'INNOVATION

LED UV

LED / MODULES LED
VERSION STANDARD ET CUSTOM
POUR PETITES À GRANDES SÉRIES

- De 237 à 405 nm
- Large choix de puissances et d'angles
- Boîtiers CMS ou traversants

Large gamme de Photodiodes UV également disponible



Hi-Tech Detection Systems





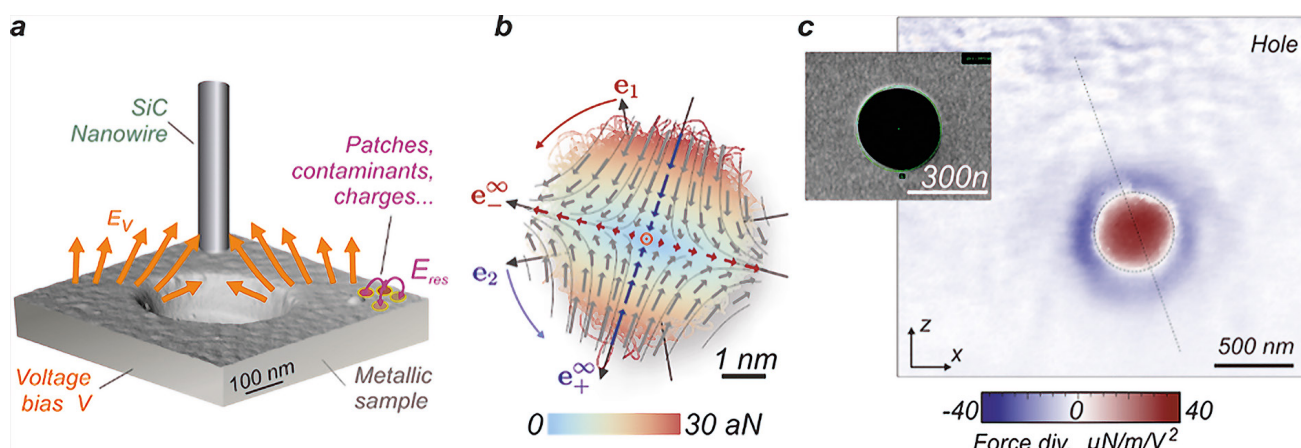
APPLICATIONS

Décontamination - Stérilisation surfaces, fluides et air -
Analyse de gaz - Spectroscopie - Curing - Fluorescence -
Effets spéciaux - Forensic - Détection de contrefaçon...

Suivez nous !



www.htds.fr
info@htds.fr



à l'échelle nanométrique, mais pas uniquement. On les emploie également pour imager les champs électrostatiques à la surface de nanostructures métalliques, ce qui nous renseigne sur la topographie des structures et les imperfections de surface (patches électrostatiques, joints de grains, contaminants...), voir la Figure 3. Ces mesures permettent également d'établir des protocoles permettant d'annuler le champ électrostatique ressenti par le nanofil grâce à l'emploi d'électrodes externes. L'objectif est alors de mesurer quantitativement et de cartographier les forces résiduelles présentes dans le vide, les forces de Casimir causées par les fluctuations quantiques du champ électromagnétique, dans des géométries nouvelles.

Les expériences précédentes ont été conduites à température ambiante. Refroidir les nanofils permet d'abord d'accroître encore leur sensibilité en force, grâce à la réduction de leur agitation thermique et des sources de dissipation mécanique, mais aussi d'explorer de nouvelles thématiques, en particulier dans le monde de la matière condensée où beaucoup de phénomènes ne se manifestent qu'à froid. Cependant, la thermalisation des nanofils est très délicate, car ils conduisent très mal la chaleur à cause de leur rapport d'aspect gigantesque (>1000) qui évacue difficilement la chaleur déposée par le laser de lecture et à

Figure 3. a: Mesure des champs de force électrostatique au-dessus d'une nanostructure métallique. En variant le potentiel on peut discriminer les effets de la topographie de l'échantillon des imperfections de surface. b: Les protocoles de mesure permettent en chaque position d'établir une mesure du gradient de force que ressent le nanofil, tracé ici sur l'étendue de son bruit thermique. c: Cartographie de la divergence du champ de force électrostatique mesurée à 100 nm au-dessus d'un trou percé dans un plan métallique d'or. La divergence mesurée est répulsive, le nanofil étant attiré vers les bords du trou, et on devine la contribution résiduelle des joints de grains.

la réduction dramatique des conductances thermique à très basse température. Grâce au développement de techniques de mesure opérant dans le régime de comptage de photon ainsi que d'objectifs interférométriques fonctionnant à très basse température et de suspensions mécaniques dédiées, on a pu s'affranchir suffisamment du chauffage optique et des sources de bruit parasite, pour observer dans un cryostat à dilution un nanofil thermalisé à 32mK [4]. La sensibilité en force atteinte est alors gigantesque, de quelques 10 zN (10^{-20} N)

en 1 s, suffisante en principe pour mesurer la force de Coulomb entre deux électrons séparés de $100\mu\text{m}$, ou encore de mesurer le retournement d'un spin électronique unique dans un gradient de champ magnétique de 1000 T/m [5].

Ainsi, l'utilisation de nano-résonateurs mécaniques ultrasensibles devrait permettre d'apporter un regard nouveau dans l'étude des interactions fondamentales, en particulier grâce à la détection des forces qu'elles génèrent, à l'échelle du photon ou du spin uniques, ou des fluctuations quantiques du vide. ●

RÉFÉRENCES

- [1] L. Mercier de Lépinay, B. Pigeau, B. Besga, P. Vincent, P. Poncharal and O. Arcizet, *Nat. Nanotechnol.* **12**, 156 (2017).
- [2] A. Gloppe, P. Verlot, E. Dupont-Ferrier, A. Siria, P. Poncharal, G. Bachelier, P. Vincent and O. Arcizet, *Nat. Nanotechnol.* **9**, 920 (2014).
- [3] F. Fogliano, B. Besga, A. Reigue *et al.*, *Phys. Rev. X* **11**, 021009 (2021)
- [4] F. Fogliano, B. Besga, A. Reigue *et al.*, *Nat. Commun.* **12**, 4124 (2021)
- [5] O. Arcizet, V. Jacques, A. Siria *et al.*, *Nat. Phys.* **7**, 879 (2011)