

DES MEMS à l'optomécanique en cavité

L. DURAFFOURG
B. TAUREL
J.M. FEDELI
P. LABEYE

Univ. Grenoble Alpes, CEA,
LETI, DOPT, SNAP/LCO, 38054
Grenoble Cedex 9, France
laurent.duraffourg@cea.fr

Les travaux sur les microsystèmes mécaniques ont abouti à de nombreux succès techniques. Les technologies relatives aux capteurs inertiels sont désormais transférées à l'industrie, démontrant leur maturité. Ce domaine se renouvelle en intégrant la photonique et en exploitant les interactions de modes optiques résonants avec des modes de résonances mécaniques. Cette nouvelle approche aboutit à des preuves de concept de capteurs optomécaniques ultra sensibles ou de fonctions optiques nouvelles.

Des MEMS aux NEMS en passant par les MOEMS

MEMS

Développés depuis les années 1970, les microsystèmes électromécaniques (MEMS pour *micro electromechanical systems*) sont des éléments transducteurs dont la particularité est de transformer une énergie mécanique (mouvement, contrainte) en énergie électrique. Leurs dimensions latérales sont comprises entre quelques microns et quelques centaines de microns et leur épaisseur est en général de quelques dizaines de microns. La transduction peut se faire dans les deux sens : le système mécanique peut être mis en mouvement par une force d'origine électrostatique, piézoélectrique, magnétique ou encore électro/opto/thermique et inversement le déplacement mécanique peut être mesuré via une détection capacitive, piézoélectrique, magnétique ou encore piézorésistive pour ne citer que les principes les plus communs. Les MEMS les plus emblématiques sont les micro capteurs tels que les accéléromètres, gyromètres (*figure 1a*) et les capteurs de pression systématiquement présents dans les applications grand public (téléphones portables, jeux), et les transports (routier et aéronautique). Les micro actionneurs sont, quant à eux, exploités dans les

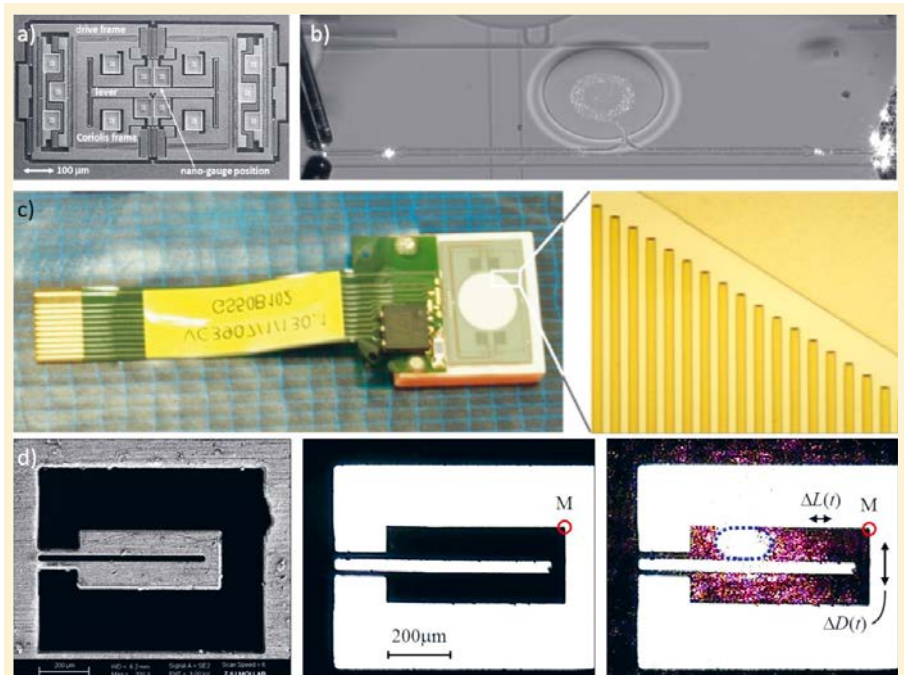
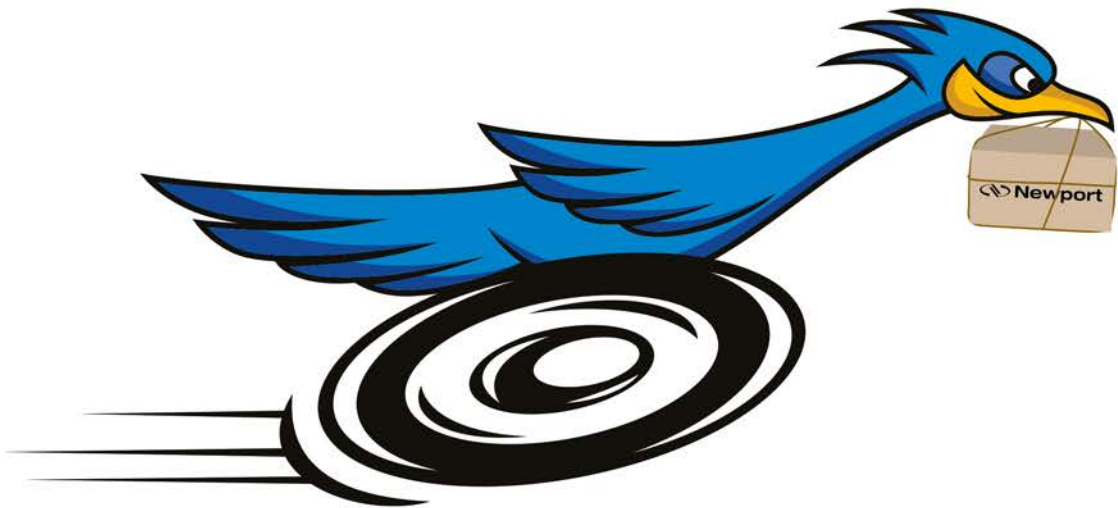


Figure 1. Quelques exemples de MEMS & MOEMS de la littérature. (a) Micro-gyromètre mesurant la force de Coriolis appliquée sur une masse mobile (cette force étant induite par une vitesse de rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan du capteur). Source : CEA-LETI. (b) Capteur de pression optique intégré sur silicium : un guide en spirale est fabriqué sur une membrane suspendue se déformant sous l'effet d'une dépression entre le volume de référence sous la membrane et le volume de mesure au-dessus de la membrane, la modulation d'indice liée à la contrainte est mesurée par interférence à deux ondes via un Mach-Zehnder sur silicium. (c) Micro réseau de Bragg mobile permettant de sélectionner les modes de cavité d'un laser à cascade quantique à cavité étendue externe (EC-QCL). (d) Micro levier en forme de fer à cheval actionné par effet opto-thermique en focalisant un faisceau optique sur une partie du levier ; la différence de dilatation entre la partie recevant le flux optique et la partie laissée dans l'obscurité induit un déplacement perpendiculaire à l'axe de dilatation. Crédits : (a) S. Dellea et al., Ultra-low-voltage gyroscopes based on piezoresistive NEMS for drive-motion and coriolis-motion sensing, 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp. 21-24 (2017) ; (b) V. Rochus et al., Fast analytical model of MZI micro-optomechanical pressure sensor, *J. Micromech. Microeng.* **28**, 064003 (2018) ; (c) L. Butschek et al., Microoptoelectromechanical systemsbased external cavity quantum cascade lasers for real-time spectroscopy, *Optical Engineering* **57**, 011010 (2018) ; (d) Q.Y. You et al., Dynamic properties of symmetric optothermal microactuator, *J. Micromech. Microeng.* **27**, 105011 (2017). (a), (b), (d) Figures protégées par le droit d'auteur et non couvertes par la licence Creative Commons : (a) © IEEE ; (b), (d) © IOP Publishing.



La recherche prend du temps. *Pas les commandes de matériel.*

Des milliers de produits en stock et
une livraison en 2 jours GRATUITE*

Equiper votre labo ou vos installations de recherche doit être rapide et efficace. Chez MKS, nous avons compris cela. C'est pourquoi nous augmentons considérablement nos stocks, nous vous proposons une nouvelle expérience d'achat en ligne simplifiée et la livraison en **2 jours GRATUITE***. L'achat de produits Newport pour votre labo vient de gagner beaucoup en facilité et en rapidité.

- **Un CHOIX plus rapide** – Trouvez plus vite avec la recherche améliorée et des filtres
- **Une LIVRAISON plus rapide** – Livraison en 2 jours GRATUITE* sur tous vos produits Newport préférés
- **Des RÉSULTATS plus rapide** – L'excellente qualité des produits et de notre support technique vous ouvre la voie du succès

Soyez réactifs avec Newport. Il n'y a pas de temps à perdre.
Visitez www.newport.com dès aujourd'hui

* Pour plus de détails et les conditions, consultez www.newport.com/free2day
S'applique uniquement aux commandes passées et livrées en Amérique du Nord et en Europe



Pour plus d'informations sur notre marque Newport, visitez
www.newport.com.

Un choix, une livraison et des résultats plus rapides.

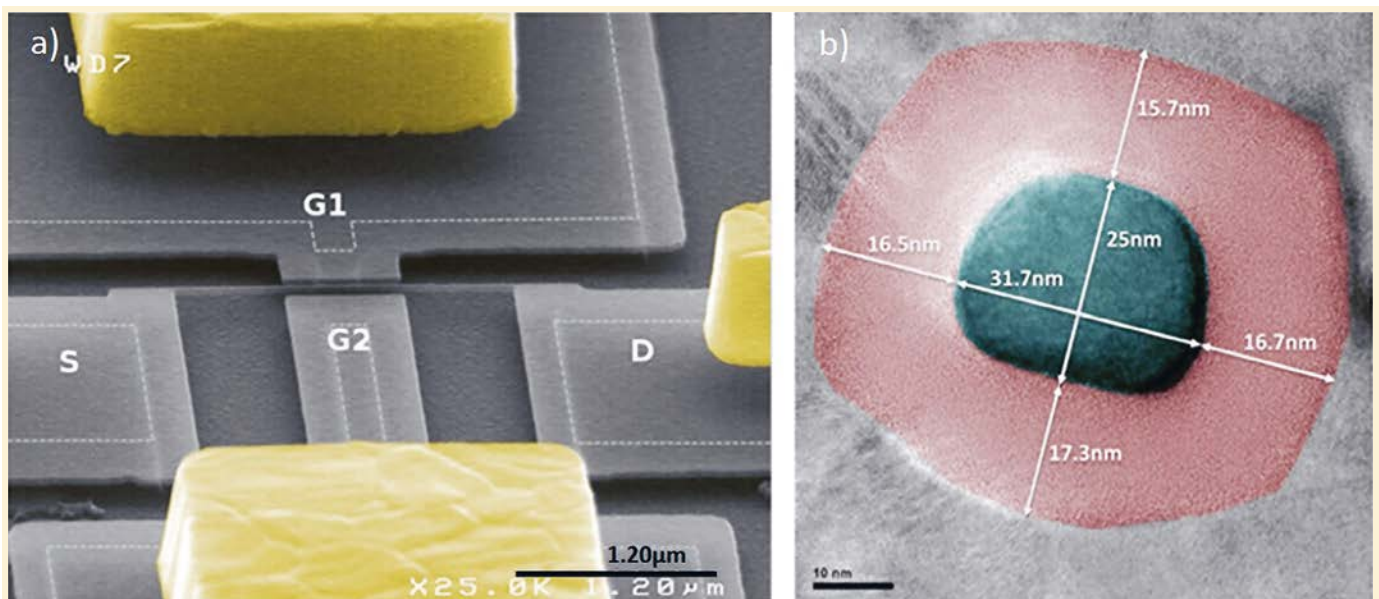


Figure 2. Exemple d'une nanostructure vibrante (source : CEA-LETI). (a) Nanofil suspendu utilisé en transistor sans jonction dont la déplétion est modulée par sa vibration induite par les deux grilles G1 et G2 placées de part et d'autre du fil. (b) Section du nanofil (la partie colorée correspond à l'enrobage pour réaliser la microscopie par transmission électronique). Crédit : A. Koumela et al., High frequency top-down junction-less silicon nanowire resonators, *Nanotechnology* **24**, 435203 (2013). Figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons : © IOP Publishing.

microphones ou pour constituer des micro pompes pour des applications fluidiques médicales. À l'heure actuelle, la détection capacitive est la plus largement répandue car elle consomme peu d'énergie et bénéficie d'une compatibilité naturelle avec les technologies CMOS des circuits de contrôle [1]. C'est un point qui a fortement handicapé l'utilisation de l'optique pour réaliser la lecture des mouvements mécaniques malgré la grande précision de mesure inhérente à la lumière (en mesure interférentielle notamment). Cette limitation est désormais moins évidente avec l'émergence de la photonique sur silicium qui est pensée et calquée sur l'approche CMOS (mêmes matériaux, mêmes outils de fabrication, puissances électriques consommées et tension de commande compatibles avec les circuits CMOS) (figure 1b). Ceci étant, la gestion de fonctions optiques par des MEMS est un domaine connexe actif.

MOEMS

En effet, les microsystèmes optiques (appelés MOEMS pour *micro optomechanical systems*) se résument à des MEMS gérant une ou plusieurs fonctions optiques. Ils servent en

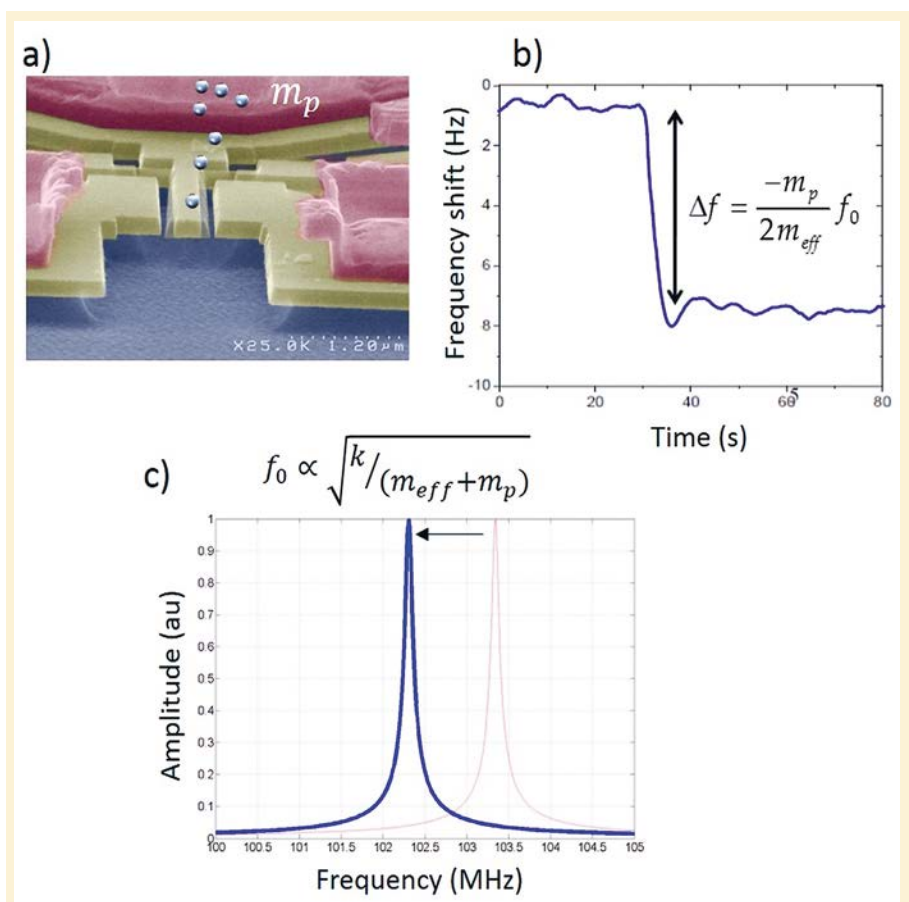


Figure 3. Principe de mesure de masse (source : CEA-LETI). (a) Exemple de nano-résonateur utilisé pour réaliser la mesure de masse et sur lequel des particules sont envoyées (adapté de [1]). (b) Mesure en temps réel de la fréquence de résonance du levier vibrant via une PLL : le saut de fréquence est provoqué par l'arrivée d'une masse. (c) Vue spectrale : décalage de la fréquence de résonance propre du nano-levier induit par l'arrivée d'une particule (passage du spectre rouge au spectre bleu).

particulier à modifier la propagation de la lumière en milieu libre ou guidé [2]. Les micro-miroirs actionnés selon un ou deux angles de rotation (DMD pour *digital micro-mirror devices* par exemple) utilisés dans les vidéoprojecteurs, des guides optiques suspendus reconfigurables ou bien encore des systèmes optiques reconfigurables pour l'optique adaptative en sont quelques exemples typiques. Plus récemment, des réseaux de Bragg MEMS ont été intégrés à des sources laser à cascade quantique à cavité étendue afin d'accorder la longueur d'onde d'émission sur une large plage de longueurs d'onde pouvant atteindre $1,5 \mu\text{m}$ (figure 1c). L'application visée est la spectroscopie infrarouge de gaz en temps réel. Ces exemples trouvent des applications concrètes dans des produits commerciaux.

Des micro-accéléromètres ou des capteurs de pression optiques (figure 1b) ont aussi été mis en œuvre. Différentes architectures ont été proposées : (i) mesure de la variation de l'intensité transmise induite par le mouvement d'une masse d'épreuve, par exemple, en venant contraindre un guide d'onde provoquant ainsi une variation de l'indice effectif, (ii) mesure interférentielle à deux ondes ou en cavité menant à des résolutions extrêmement fines du déplacement. Plus récemment encore, des tentatives d'actionnement par effet opto-thermique de MEMS ont été réalisées (figure 1d).

NEMS

Depuis le début de ce siècle les micro systèmes ont basculé dans le domaine de la nano-mécanique et sont devenus des nanosystèmes (*nano electromechanical systems*, NEMS). Ainsi, des éléments mécaniques suspendus 2D (nano-membrane), 1D (nanofil présenté en figure 2a et 2b) voire 0D (boîte quantique) ont rapidement vu le jour [3]. Leurs dimensions extrêmement faibles sont à l'origine de propriétés physiques intrinsèques particulières : conduction thermique ou électrique balistique, piézorésistivité géante sont parmi les plus connues. Des phénomènes extrinsèques tels que la raréfaction de l'air dans les faibles volumes, les forces de proximité purement quantiques (force de Casimir, ou de Van der Waals) ont aussi un impact fort sur leurs mouvements. Les NEMS, d'abord mis en œuvre dans des expériences fondamentales pour sonder des mécanismes de physique mésoscopique, ont démontré des capacités hors normes pour des applications non conventionnelles pour des MEMS. On peut citer par exemple les capteurs de forces moléculaires, les capteurs biochimiques, des capteurs de masse ultra-sensibles pour la mesure de gaz ou la spectrométrie [3].

Avant de conclure cette vision forcément parcellaire des micro ou nanosystèmes, il est très instructif de s'intéresser au principe de mesure utilisé dans ces « nano-balances ». Celui-ci consiste à suivre le décalage en fréquence d'un nano-résonateur maintenu en vibration (à amplitude fixe contrôlée) à l'aide d'un circuit à boucle fermée telle qu'une *phase locked loop* (PLL) ou un circuit d'auto-oscillation.

150 références de fibres en stock !

Livrables sous 3 jours
Commandes en ligne possible



Fibres actives simple et double clad

- Er, Er/Yb, Yb, Ho, Tm, Tm/Ho et Nd
- PM, LMA jusqu'à $30 \mu\text{m}$

Fibres PM, Polarisantes et Spun

Fibres durcies

- Revêtement Polyimide HT
- Résistantes aux radiations
- Spatiales

CODE PROMO REVUE PHOTONIQUES : P0918

Frais de bobinage et d'expédition offerts*

* Offre valable jusqu'au 31/10/2018

IXblue Photonics
Division Fibres
rue Paul Sabatier
22300 Lannion

02 96 04 10 50
contact.photonics@ixblue.com
www.photonics.ixblue.com

IXblue
PHOTONICS

Tout élément venant se déposer à sa surface induit un changement de fréquence qu'on mesure en continu (la masse et/ou les contraintes de surface changent) (cf. *figure 3*). Le principe est donc d'utiliser une nano-horloge dont la période des battements est modifiée par l'ajout de masse – le but du jeu étant de compter le nombre de périodes sur une certaine durée de mesure avant et après dépôt. À la résonance, son amplitude de vibration $x(\omega_0) \propto Q/m_{\text{eff}}\omega_0^2$ est inversement proportionnelle à la raideur mécanique équivalente $k_{\text{eff}} = m_{\text{eff}}\omega_0^2$. On retrouve ainsi la loi de Hook multipliée par le facteur de qualité Q . On peut aussi montrer que la plus faible masse mesurable δm par ce nano-oscillateur dépend de sa masse effective m_{eff} (masse effectivement en mouvement selon le mode de résonance choisi) et de sa stabilité fréquentielle ce qui paraît tout à fait naturel $\delta m = 2m_{\text{eff}}\delta\omega/\omega_0$.

Les masses effectives utilisées varient entre 1 pg et 10 fg. Les fréquences de résonance mécaniques $\omega_0/2\pi$ varient entre 10 MHz et 1 GHz ce qui peut paraître extrêmement élevé par rapport à notre sens commun de la mécanique. La stabilité fréquentielle relative $\delta\omega/\omega_0$ est classiquement estimée par la variance d'Allan $\sigma_A(\tau)$ sur la gigue en fréquence en fonction du temps d'intégration τ . Ce type de composant a démontré des stabilités de l'ordre de 10^{-7} sous vide ce qui a permis d'atteindre des limites de détection massiques de l'ordre de l'atogramme (10^{-18} g) à la dizaine de daltons (10^{-20} g) soit une dizaine d'atomes d'hydrogène ! Ceci offre des opportunités uniques de mesurer des atomes, des molécules chimiques, ou des biomolécules telles que des protéines ou des virus sans dénaturer le composé original [3]. Il est aussi tout à fait possible de mesurer le mouvement Brownien

du nanosystème lui-même dû à son couplage avec le bain thermique environnant. Les mesures électriques capacitatives ou piézorésistives ont démontré des résolutions en déplacement de l'ordre du fm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ et en force d'environ 10 fN/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Ces valeurs sont meilleures que les résolutions obtenues par mesure interférentielle classique.

L'optomécanique vient finalement compléter ce cycle de recherche en couplant un résonateur mécanique tel que décrit ci-dessus et un résonateur optique.

Cavité optomécanique

Formellement un système optomécanique exploite l'interaction réciproque entre un résonateur mécanique et un résonateur optique qui est une cavité optique [4] : les forces optiques contrebalancent les forces de réactions mécaniques menant à des systèmes bouclés

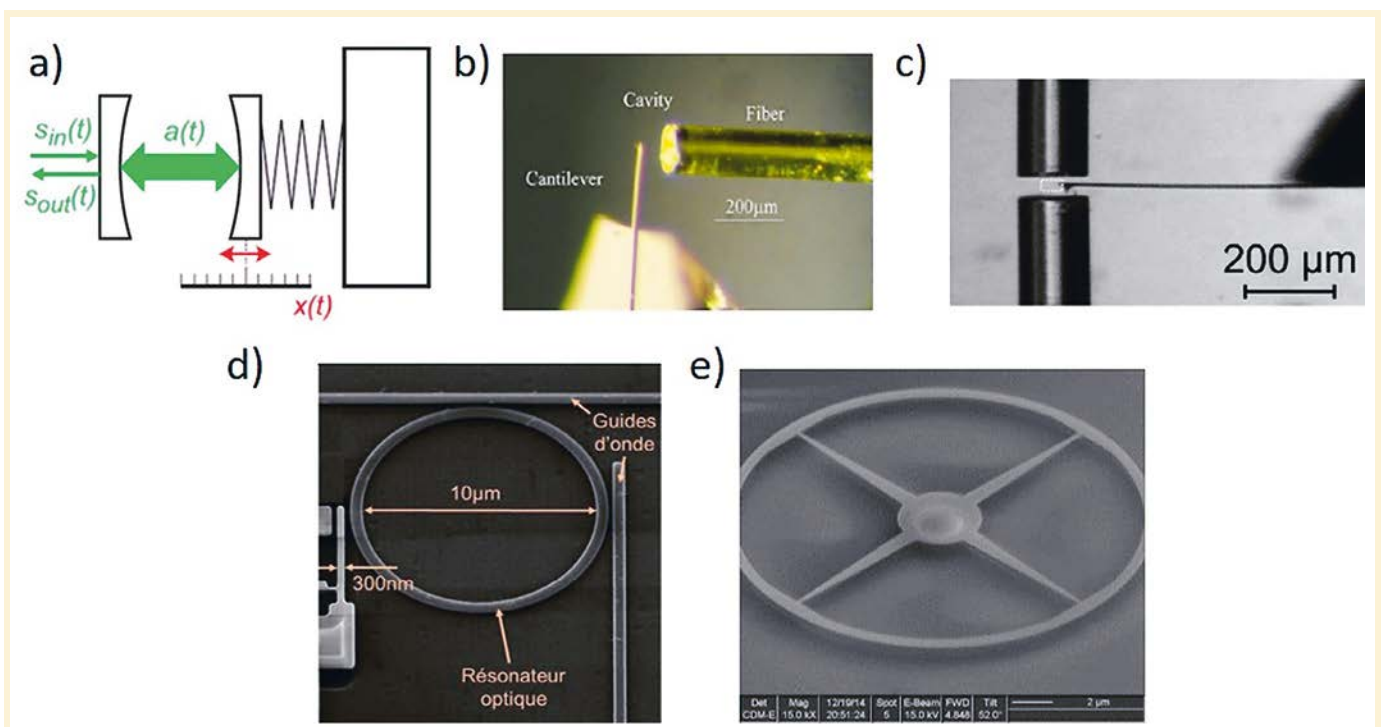


Figure 4. Exemple de cavités optomécaniques. (a) Schéma de principe d'une cavité optomécanique. (b) Cavité Fabry-Pérot matérialisée par un cantilever et une fibre optique, le cantilever faisant office de miroir mobile. (c) Nanostructure suspendue placée dans une cavité Fabry-Pérot, la condition d'accord de phase des ondes stationnaires présentes dans la cavité étant modulée par la vibration du nano-élément (nano-poutre, nanotube, nano-membrane par exemple). (d) Cavité optomécanique constituée d'un élément vibrant dans le champ proche d'un anneau résonant, l'indice effectif de ce dernier étant modifié avec le mouvement de la poutre ; en retour la cavité optique actionne le cantilever par effet du gradient de champ. (e) Micro-cavité optique suspendue en anneau dont la longueur effective varie avec son propre mouvement de respiration mécanique, ce dernier étant mis en vibration par la pression des photons intracavité. Crédits : (b) C. Metzger et al., Optical self-cooling of a deformable Fabry-Perot cavity in the classical limit, *Physical Review B* **78**, 035309 (2008) ; (c) I. Favero et al., Fluctuating nanomechanical system in a high finesse optical microcavity, *Optics Express* **17**, 12813 (2009) ; (d),(e) : CEA-LETI. (b) Figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons : © American Physics Society.

en interaction permanente. Ces systèmes diffèrent donc drastiquement des MOEMS, les forces optiques (de gradient de champ ou de pression radiative) étant explicitement utilisées pour générer des oscillations mécaniques, qui en retour modulent la puissance optique intra cavité. Dans la plupart des réalisations, la fréquence de résonance optique de la cavité $\omega_c/2\pi$ varie avec le mouvement de l'oscillateur mécanique. Ce couplage a été initialement étudié dans les expériences de mesure du déplacement quantique ultime des miroirs utilisés dans les interféromètres géants LIGO ou VIRGO afin d'optimiser le schéma de mesure des ondes gravitationnelles. Ce type de cavités couplées a démontré des résolutions en déplacement proche de 10^{-21} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$, soit une fraction infinitésimale du diamètre d'un noyau atomique... Cette valeur étant une conséquence du principe d'incertitude d'Heisenberg fixant les fluctuations quantiques de point zéro du système mécanique $x_{zpf} = \sqrt{\hbar/2m_{\text{eff}}\omega_0}$ (\hbar est la constante de Planck réduite) lorsque le mode mécanique est d'amplitude moyenne nulle. Notons tout de même que ce régime quantique n'est atteignable que pour des ultra-basses températures telles que $\hbar\omega_0 > k_B T$ soit pour un résonateur de 1 GHz une température de 50 mK.

Le système optomécanique le plus intuitif correspond à une cavité Fabry-Pérot dont l'un des miroirs est libre de se mouvoir sous la pression optique intra-cavité. La force du couplage optomécanique est usuellement exprimée par le coefficient $g_\omega = (\partial\omega_c/\partial x) \sim 1/d$ (en nm/Hz) qui mesure le décalage de la fréquence de résonance optique induit par le mouvement $x(\omega_0)$ du résonateur mécanique (voir *figure 4a*). On constate que ce couplage est inversement proportionnel à la longueur effective d de la cavité optique. Le décalage fréquentiel optique sera aussi d'autant plus fort que l'amplitude mécanique sera grande. En retour la puissance optique intra-cavité appliquée sur le résonateur mécanique sera modulée proportionnellement au nombre de

photons intracavité $\bar{n}_{\text{cav}} : F_{\text{rad}} = -\bar{n}_{\text{cav}}\hbar g_\omega$. À partir de ces deux constatations, nous sommes tentés de réaliser des systèmes de petites tailles capables d'accumuler une énergie intra-cavité la plus grande possible. On pense évidemment à une mini cavité Fabry-Pérot (*figure 4b*) qui est le système le plus simple. Pour aller plus loin dans l'analyse il est souvent utile d'extraire le taux de couplage mécanique/optique réduit : $g_0 = g_\omega x_{zpf}$ (en Hz) qui mesure le décalage de la fréquence de résonance induit par les fluctuations de point zéro du système mécanique, x_{zpf} . g_0 constitue un paramètre caractéristique permettant de comparer les différentes architectures proposées. Ces expressions montrent finalement que le système doit avoir une fréquence de résonance mécanique élevée, un couplage photon/phonon g_0 fort et une interaction ultra-faible avec l'environnement (faible taux de dissipation). Tout ceci incite les chercheurs à exploiter des micro-résonateurs tels qu'illustrés en *figure 4* avec des facteurs de qualité mécanique et optique les plus forts possibles [4]. La *figure 4b* montre la reproduction miniaturisée d'une cavité Fabry-Pérot de la *figure 4a*. L'approche la plus commune consiste à réaliser une micro-cavité optique (anneau, disque, tore, cristal photonique) dont la longueur de cavité effective est modulée avec ses vibrations mécaniques (*figure 4e*). Une seconde approche consiste à exploiter un effet de modulation de l'indice effective via le mouvement d'un résonateur mécanique placé en champ proche de la cavité optique (*figure 4d*). On peut constater que ces composants sont issus des développements technologiques de la photonique sur silicium ou sur matériaux 3/5 notamment. Ces systèmes permettent de réduire drastiquement la complexité de mise en oeuvre relative aux systèmes macroscopiques. De nombreux autres modes de réalisation exploitant une micro cavité photonique sont présentés dans la référence [4]. Selon les modes de réalisation la valeur de g_0 varie entre 1 kHz et 1 MHz.

Laser Accordable à Haute Performance



L'innovation depuis 1979

Lasers accordables disponibles de 1260 à 1680nm, pour vos applications de guides d'ondes et de caractérisation de composants optiques.

SANTEC EUROPE LIMITED

Tel: +44-20-3176-1550

Grand Union Studios,
332 Ladbroke Grove,
London, W10 5AD, UK



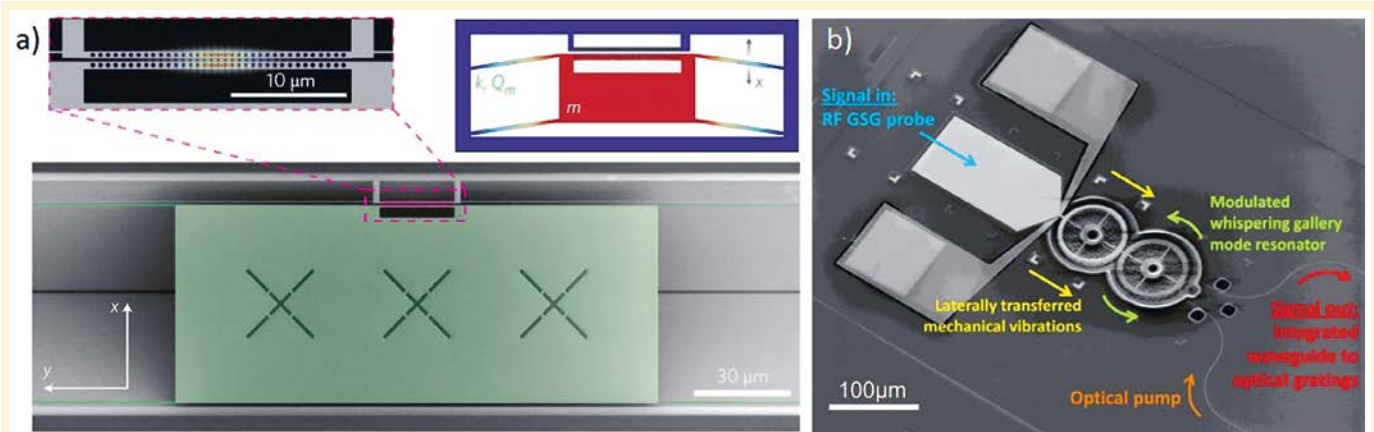


Figure 5. Exploitation pratique des systèmes optomécaniques [5]. (a) Résonateur piézoélectrique en anneau en AlN actionnant un second résonateur optique en anneau ; ce système permet de transformer un signal RF en un signal optique modulé à la même fréquence. (b) Microaccéléromètre dont le déplacement change le couplage optomécanique entre deux cavités optiques formées par des cristaux photoniques. Crédits : (a): S. Ghosh et al., *IEEE Transactions on electron devices* **65**, 1391 (2018) ; (b) A.G. Krause et al., A high resolution microchip optomechanical accelerometer, *Nature Photonics* **6**, 768 (2012). (b) Figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons : © SpringerNature.

Une approche alternative au Fabry-Pérot de la *figure 4b* consiste à placer une nanostructure entre deux miroirs dont les dimensions sont sous la longueur d'onde de résonance de la cavité optique (*figure 4c*) – structure sublambda. Les conditions de résonance sont alors modifiées par la position de cette nanostructure.

L'optomécanique commence à investir des domaines applicatifs tels que les capteurs inertiels ultra-sensibles ayant des bandes passantes de mesure élevées (*figure 5a*), les capteurs de force, les oscillateurs hyperfréquences à faible bruit de phase (*figure 5b*) et le traitement du signal optique [5]. Des résolutions en déplacement de quelques 10^{-17} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ont été annoncées laissant imaginer que ce principe de mesure est particulièrement intéressant pour réaliser des accéléromètres, gyromètres ou magnétomètres de petites dimensions, rapides et d'une extrême sensibilité [5]. Imaginons un accéléromètre optomécanique ayant une partie mécanique massive de 10^{-10} kg et une fréquence de résonance de 10 kHz pour un facteur de qualité de 100. Cet élément peut être couplé à une micro cavité optique haute finesse ($Q \sim 10^5$) dont le coefficient de couplage g_0 est de l'ordre de 100 kHz. Ce type de système a une sensibilité théorique de 25 $\mu\text{m}/g$ ($g = 9,81$ m/s $^{-1}$) et une limite de détection de 10^{-9} g sur une durée de mesure de 250 ms, soit 0,25 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$. À titre de comparaison, un accéléromètre

de très haute performance possède typiquement des résolutions de l'ordre 100 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$ avec une boucle d'asservissement numérique. Des gyromètres optomécaniques formés par exemple d'une micro cavité en anneau sont aussi des composants en cours d'évaluation et sont pressentis pour concurrencer les gyro-lasers massifs actuels.

Conclusion et perspectives

L'optomécanique revisite le couplage de deux systèmes résonants formés par un micro ou nano-résonateur mécanique et une cavité optique. Ce domaine est tout à fait connexe de l'électrodynamique en cavité couplant un système à deux états à une cavité optique. Des phénomènes similaires ont effectivement été démontrés. L'efficacité de couplage de type Stokes ou anti-Stokes n'a néanmoins rien d'évident au regard des valeurs des énergies optiques et élastiques mises

en jeu. Les cavités optomécaniques ont démontré leur capacité à observer des propriétés quantiques sur des macro (VIGO, Fabry-Pérot), micro (anneau, tore) voire nanosystèmes mécaniques (nano-membrane, nano-cantilever ou nanotube de carbone). Plus encore, on ne peut pas conclure cet article sans évoquer les systèmes hybrides qui couplent des nano-résonateurs mécaniques à des systèmes à deux niveaux de type centre NV ou boîte quantique en matériau 3/5 où l'émetteur interagit à la fois avec l'oscillateur mécanique et avec les photons piégés dans la cavité optique. À basse température, les développements théoriques et des premières observations expérimentales démontrent qu'il est possible de manipuler les états quantiques de la lumière (en comprimant par exemple un état cohérent par l'interaction mécanique) ou inversement d'exploiter des états non classiques de la lumière pour améliorer le rapport signal à bruit en déplacement des capteurs.

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] A.C. Fischer, Integrating MEMS and ICs, *Microsystems & Nanoengineering* (2015) **1**, 15005 (2015)
- [2] M.C. Wu, Optical MEMS for lightwave communication, *Journal of Lighthwave Technology* **24**, 4433 (2006)
- [3] L. Duraffourg, J. Arcamone, *Nanoelectromechanical Systems*, 1st edn., R Baptist, L Duraffourg, John Wiley & Sons, Inc (2015)
- [4] M. Aspelmeyer et al., Cavity optomechanics, *Reviews of Modern Physics* **86**, 1391 (2014)
- [5] M. Metcalfe, Applications of cavity optomechanics, *Applied Physics Reviews* **1**, 031105 (2014)