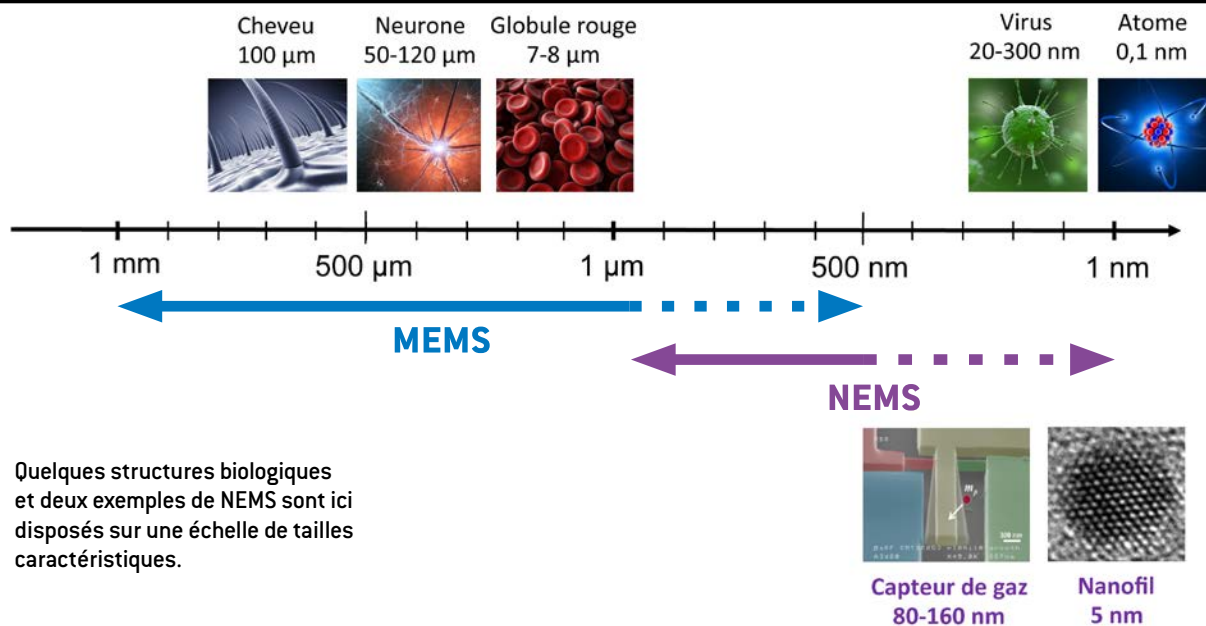


LES ÉCHELLES DE TAILLE DES MEMS ET DES NEMS



© CEA-Leti - Photos Shutterstock.com

Il semble néanmoins possible de tirer parti de ces phénomènes. C'est le cas avec l'effet piézorésistif (la variation de la résistivité électrique d'un matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique), qui peut être décuplé dans certaines conditions, au point de fournir un gain de signal électrique de plusieurs ordres de grandeur par rapport à un matériau cristallin classique.

De plus, lorsque les surfaces des structures sont séparées de moins de 200 nm, des forces particulières sont susceptibles de se manifester. C'est le cas de la force de Casimir, qui n'est plus négligeable par rapport aux forces électrostatiques et qui peut modifier la limite de stabilité d'un NEMS. Cette force qui s'exerce entre deux plans est la manifestation des effets de « fluctuations quantiques du vide ». Des chercheurs du CEA ont apporté aux modèles de NEMS des évolutions qui en tiennent compte. Il est même envisagé, en contrôlant la nanostructure des surfaces et leur espacement, d'exploiter la force de Casimir pour actionner des nanosystèmes.

Outre une masse très faible (entre 10^{-15} et 10^{-18} gramme), les faibles dimensions des structures des NEMS leur confèrent des fréquences de résonance (comparables aux fréquences propres des cordes de guitare, donc à leurs notes respectives) très élevées, allant jusqu'à plusieurs gigahertz (GHz).

L'ensemble de ces propriétés rend les NEMS extrêmement sensibles à des « stimuli externes » : leurs fréquences de résonance sont modifiées en présence d'une

masse aussi petite que 10^{-21} gramme ou d'une force d'intensité aussi faible que 10^{-18} newton. Ils peuvent fonctionner avec une puissance aussi réduite que 10^{-18} watt, ce qui les rend très peu consommateurs d'énergie, donc adaptés à la réalisation de capteurs durablement autonomes.

La communauté des chercheurs les a d'abord utilisés pour explorer la physique du « nanomonde » : quantifier la force de Casimir, observer le comportement de nanorésonateurs de très haute fréquence couplés avec des transistors à un seul électron... En 2012, un nanotube de carbone long de quelques centaines de nanomètres, résonant à 2 GHz, placé dans un vide ultrapoussé et sous une température de 5 kelvins a permis d'évaluer une masse à 10^{-24} gramme près, un seuil symbolique visé depuis une dizaine d'années par de nombreux chercheurs.

Parmi les applications envisagées, inaccessibles au moyen de MEMS, se profilent des capteurs de gaz ultrasensibles, des nanorelais qui réduisent la consommation électrique de circuits électroniques et des détecteurs de biomarqueurs de pathologies telles que certains cancers. L'autonomie énergétique et la petite taille des NEMS font entrevoir des systèmes de détection largement distribués, reposant sur la dissémination de très nombreux capteurs.

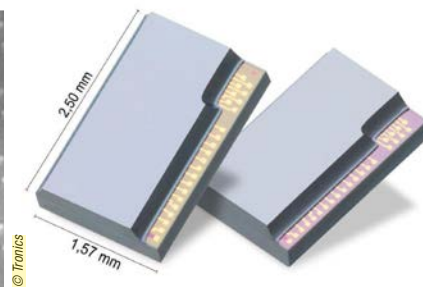
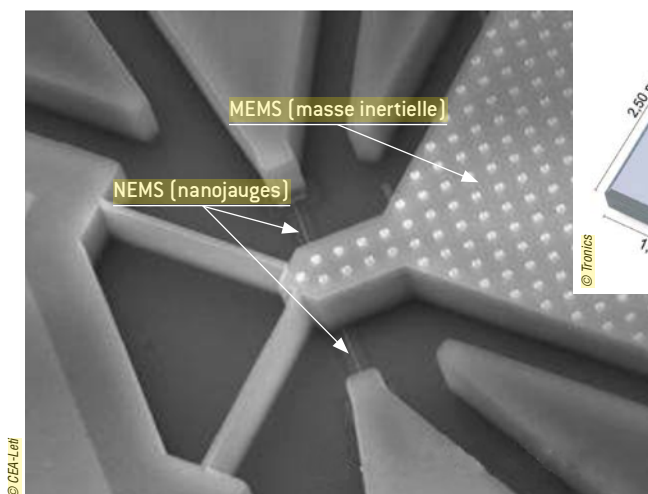
Les NEMS sont aujourd'hui fabriqués dans des salles blanches de laboratoires ou d'usines de microsystèmes ou de

microélectronique, selon deux approches principales : la voie *bottom-up*, qui réorganise la matière à partir de ses constituants, jusqu'à manipuler les atomes un par un, ou la voie *top-down*, qui utilise les technologies les plus avancées en matière de réduction des dimensions des composants microélectroniques. Les deux approches sont explorées par le CEA, avec des travaux de haut niveau sur les nanotubes de carbone, par exemple. Néanmoins, pour les développements à visée applicative, c'est la seconde voie qui est privilégiée au Leti, le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information du CEA.

Des applications industrielles

Les premières réalisations du Leti faites en ce sens datent de 2006. Des MEMS ont été intégrés dans une couche de silicium de 160 nm d'épaisseur pour réaliser des nano-accéléromètres, alors que les couches les plus minces habituellement utilisées comptent plusieurs dizaines de micromètres.

Une difficulté majeure rencontrée dans l'utilisation des NEMS est d'assurer la transmission d'information entre le nanomonde et le macromonde : contrôler précisément le mouvement d'une structure nanométrique ou, inversement, exploiter l'information engendrée par un déplacement de quelques nanomètres. Le recours aux techniques de transduction



UN COMPOSANT M-NEMS
pour système inertiel et deux accéléromètres de la société Tronics. Ce composant comporte une masse de 20 micromètres d'épaisseur et des nanojauges piézorésistives de 250 nanomètres d'épaisseur et de largeur.

utilisées classiquement pour les MEMS se heurte au fait que la diminution des dimensions augmente l'effet néfaste des capacités parasites provenant notamment des connexions électriques, ce qui induit une perte rédhibitoire de qualité du signal électrique fourni par un NEMS.

Les recherches de moyens adaptés se sont engagées dans des voies innovantes : la transduction piézorésistive à nanofil de silicium, la transduction piézoélectrique et la transduction magnétique. Le CEA privilégie la première voie ; il a déposé plusieurs brevets en la matière. Sur les aspects fondamentaux comme sur les développements applicatifs, le Leti collabore étroitement avec d'autres équipes, en particulier celle du Kavli Nanoscience Institute (KNI) de Caltech, en Californie.

Une application principalement ciblée par le Leti est la mise au point de NEMS capables de mesurer la concentration de différents gaz présents à l'état de traces (quelques « ppm » ou « ppb », soit quelques millionnièmes ou milliardièmes d'un volume) dans des mélanges complexes, comportant typiquement plusieurs dizaines ou centaines d'espèces chimiques. Leur principe de fonctionnement repose sur la mesure des masses de molécules adsorbées à la surface de la nanostructure vibrante, ainsi qu'il a été évoqué précédemment. Le dépôt d'une couche poreuse innovante — et brevetée — sur un tel NEMS dope l'adsorption et améliore ainsi sa sensibilité.

Le succès obtenu dans cette voie constitue une contribution majeure du CEA aux nanotechnologies. *A fortiori*, la technologie élaborée depuis une dizaine d'années en collaboration avec le KNI a donné naissance, début 2012, à la start-up Apix (collaboration qui se poursuit aujourd'hui au sein du Laboratoire commun CEA-Apix), qui a réalisé la toute première application industrielle de NEMS dans le monde. Ce système portable révolutionne l'analyse par chromatographie gazeuse : il permet de réaliser des analyses sur site et en temps réel. Il intéresse ainsi diverses industries (la pétrochimie, notamment), l'environnement, la sécurité... Sa grande sensibilité offre une solution pour mesurer la qualité de l'air, notamment à l'intérieur des bâtiments, qui est parfois riche de composés organiques volatils néfastes pour la santé.

Les « applications inertielles » (qui exploitent des accélérations ou des rotations), telles que les accéléromètres des systèmes d'airbag ou les gyroscopes de maintien de cap, sont aussi un domaine

Des laboratoires de poche

Les applications des NEMS qui semblent aujourd'hui susciter les plus grandes attentes portent sur la détection d'espèces chimiques dans des mélanges complexes. Elles comptent parmi les plus avancées sur le long chemin qui va de la recherche fondamentale à la production industrielle.

La société Apix exploite déjà la technologie dans des applications en pétrochimie, pour l'analyse de la qualité des gaz dans les réseaux de distribution ou pour la sécurité des personnes sur les sites industriels. Grâce à la capacité des NEMS à mesurer, en temps réel et très précisément, de très faibles concentrations de gaz (des composés organiques volatils, par exemple), leur intégration à des produits nomades, tels que des objets connectés ou des téléphones, multiplierait les moyens de surveillance de la qualité de l'air.

Une surveillance facile à réaliser en tout lieu devrait satisfaire non seulement l'intérêt du porteur d'un tel objet, par exemple pour savoir si son environnement présente des risques pour sa santé, mais aussi le souhait de partager cette information avec une communauté particulière ou avec les pouvoirs publics. On peut espérer des NEMS qu'ils permettent d'étendre aussi largement les moyens d'analyse de l'eau, voire



UN SYSTÈME D'ANALYSE DE GAZ
de la société Apix, incorporant les capteurs NEMS du CEA-Leti.

des aliments. La mesure aisée, instantanée et précise de l'alcoolémie est une autre application envisagée ; le diagnostic de certains types de cancers semble également accessible par une analyse de l'haleine. L'étude actuelle de NEMS capables de mesurer des tensions cellulaires ouvre la voie à d'autres applications biomédicales : l'évaluation rapide de l'état de santé d'un tissu organique et le diagnostic précoce de différentes pathologies.