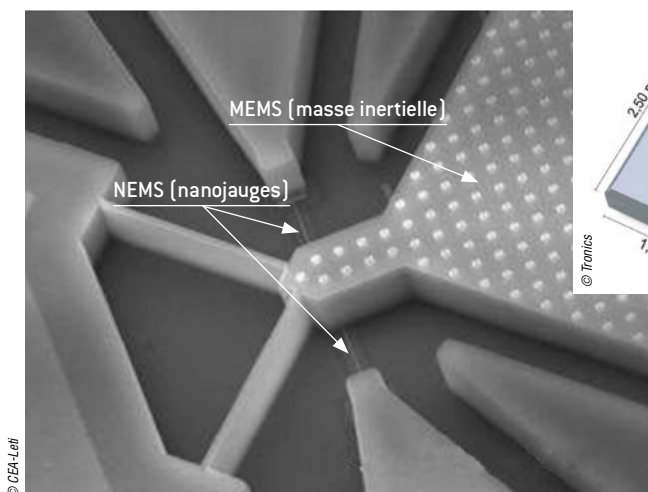


UN COMPOSANT M-NEMS

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.

d'utilisations possibles des NEMS. Ces systèmes ne peuvent toutefois fonctionner que s'ils comportent une masse suffisante, supérieure à celle d'un NEMS. Le Leti s'est donc investi dans le développement de « M-NEMS », qui intègrent, sur la même puce de silicium, une partie dont la masse est typique de celle d'un MEMS et un NEMS capable de détecter les mouvements infimes de cette partie massive. Protégée par un portefeuille de brevets, cette approche a déjà fait l'objet d'un transfert de technologie à la société Tronics en 2013.

Des NEMS pour la biologie

Une autre activité importante en cours de développement au CEA porte sur la spectrométrie de masse (MS). Ses attendus concernent la recherche en biologie et les applications biomédicales. Outre la capacité à compter des molécules biologiques une par une, une MS recourant aux NEMS peut dénombrer des espèces chimiques neutres, une fonctionnalité inaccessible à la MS classique car celle-ci mesure des rapports masse/charge d'espèces ioniques. On entrevoit ainsi la possibilité d'identifier des macromolécules dans un état préservé (aussi parle-t-on de MS *native*), telles que des virus et des anticorps non-ionisés.

Pour y parvenir, il faut conférer aux NEMS une grande capacité de capture de différentes espèces tout en préservant leur grande précision de mesure. La collaboration entre le Leti et le KNI a déjà débouché sur l'identification, par un tel

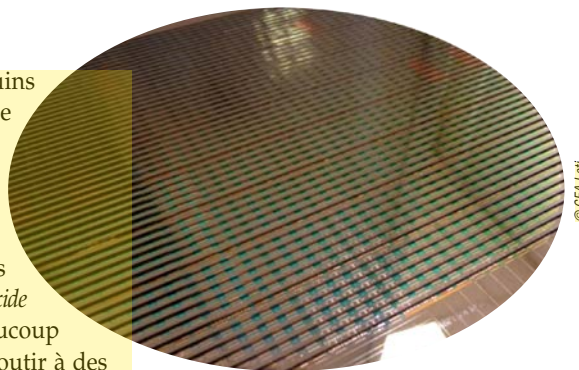
système, d'anticorps sanguins dans un mélange. Une voie prometteuse d'amélioration est le développement de réseaux de centaines de « nanopoutres » couplés à des transistors électroniques CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). Il reste beaucoup à faire, cependant, pour aboutir à des composants et des systèmes compatibles avec des applications industrielles.

Le Leti et d'autres laboratoires travaillent aujourd'hui sur un couplage NEMS-CMOS qui intégrerait, sur une même puce de silicium, des réseaux de NEMS et une électronique sur couche mince permettant de s'affranchir de signaux parasites et de mettre en œuvre un système à la fois simple, compact et économe en énergie. On envisage ainsi de réaliser des structures constituées de milliers de NEMS contrôlables individuellement. De plus, étant donné que les procédés mis en œuvre sont proches de ceux du CMOS, leur production ne devrait pas nécessairement demander de lourds investissements à l'industrie microélectronique.

Finalement, les NEMS sont passés, en quelques années seulement, du statut d'objet de laboratoire à celui de réalité industrielle, et toutes leurs applications possibles n'ont sans doute pas encore été imaginées. Parmi les défis qui restent à relever, il faut comprendre et dépasser certaines limites rencontrées en pratique, comme celle de la stabilité de la fréquence des nanorésonateurs. Des travaux ont été récemment lancés au CEA en vue d'exploiter la

transduction optomécanique, fondée sur le couplage de nanostructures mécaniques et de cristaux photoniques, dont les structures périodiques bloquent certains signaux et en laissent passer d'autres.

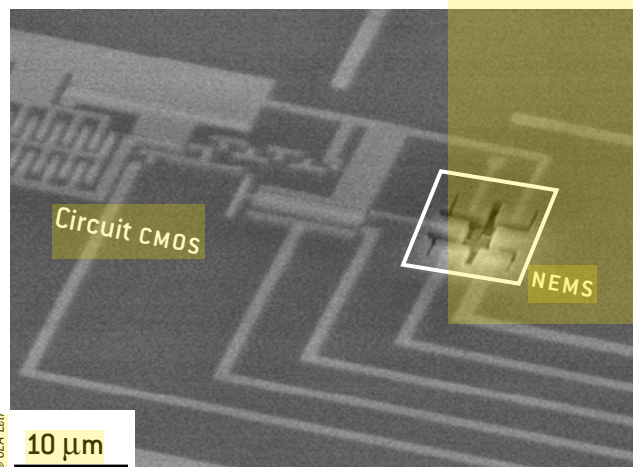
Les prochaines orientations technologiques devront évidemment tenir compte de l'utilité potentielle des nouveaux systèmes et de leur coût de production. ■



© CEA-Leti

UNE PLAQUETTE DE SILICIUM

de 200 millimètres de diamètre, comportant plusieurs milliers de capteurs de gaz NEMS.



© CEA-Leti

UNE STRUCTURE NEMS-CMOS. Un nanofil de silicium de 30 nanomètres de large est connecté à des transistors CMOS de la filière FDSOI. Cette réalisation du CEA-Leti, en 2012, constitue l'un des couplages NEMS-CMOS les plus avancés à l'heure actuelle.

Les systèmes nucléaires du futur

Christophe Béhar

L'industrie nucléaire présente des atouts forts au regard de la demande croissante en énergie et de la nécessaire limitation du réchauffement climatique. Les maintenir sur le long terme passe par la mise au point de systèmes innovants, dits « de quatrième génération », auxquels le CEA consacre de grands efforts.

Certains chiffres parlent d'eux-mêmes : en 2030, la consommation énergétique mondiale devrait augmenter de 50 % par rapport à celle de 2005, sous l'effet conjugué de l'augmentation de la population et de la croissance des pays émergents ; les pays non membres de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) devraient totaliser plus de 80 % de cette hausse.

En regard de cette demande, on trouve de nombreuses contraintes, parmi lesquelles la lutte contre le réchauffement climatique, la raréfaction des ressources énergétiques, la sûreté d'approvisionnement, la maîtrise des coûts de l'énergie et la préservation de la balance commerciale.

Quant à la contrainte climatique, le cinquième rapport du Giec, rendu public l'année dernière, est sans appel : d'une part, le réchauffement du climat est sans équivoque et sans précédent (les trois dernières décennies ont été les plus chaudes depuis au moins 1 400 ans) et, d'autre part, l'influence des activités humaines est clairement établie. Limiter la hausse des températures à 2°C représente donc un objectif majeur (qui sera au cœur de la 21^e conférence internationale Climat, aussi nommée Cop21 ou Paris 2015 et organisée en France à la fin de l'année). Cela implique de diminuer le recours aux énergies fossiles et d'augmenter la part d'électricité dans le mix énergétique.

Christophe BÉHAR est Directeur de l'énergie nucléaire au CEA

Dans ce contexte, l'énergie nucléaire a un rôle incontournable à jouer en synergie avec les énergies renouvelables puisqu'elles constituent les seuls modes de production d'électricité qui émettent très peu de gaz à effet de serre. Dans le projet de loi française sur la transition énergétique et la croissance verte, elles interviennent en complémentarité : de grandes unités fonctionnant en base pour l'énergie nucléaire ; de petites unités décentralisées et intermittentes pour les énergies renouvelables.

La quatrième génération de réacteurs

Si l'industrie nucléaire dispose d'atouts qui lui permettent de s'imposer comme l'une des solutions prometteuses pour l'avenir, au sein d'un mix énergétique décarboné, elle est aussi confrontée à des enjeux en termes de compétitivité, de disponibilité, de sûreté, de lutte contre la prolifération, de raréfaction de la ressource et de gestion des déchets. Autant de défis qui imposent de poursuivre sur la voie de l'innovation technologique qui a toujours été un moteur du développement de cette industrie. Aujourd'hui, cette innovation passe par le développement de systèmes nucléaires du futur, dits aussi de quatrième génération.

L'évaluation la plus récente et la plus aboutie des technologies capables de répondre aux objectifs définis pour ces