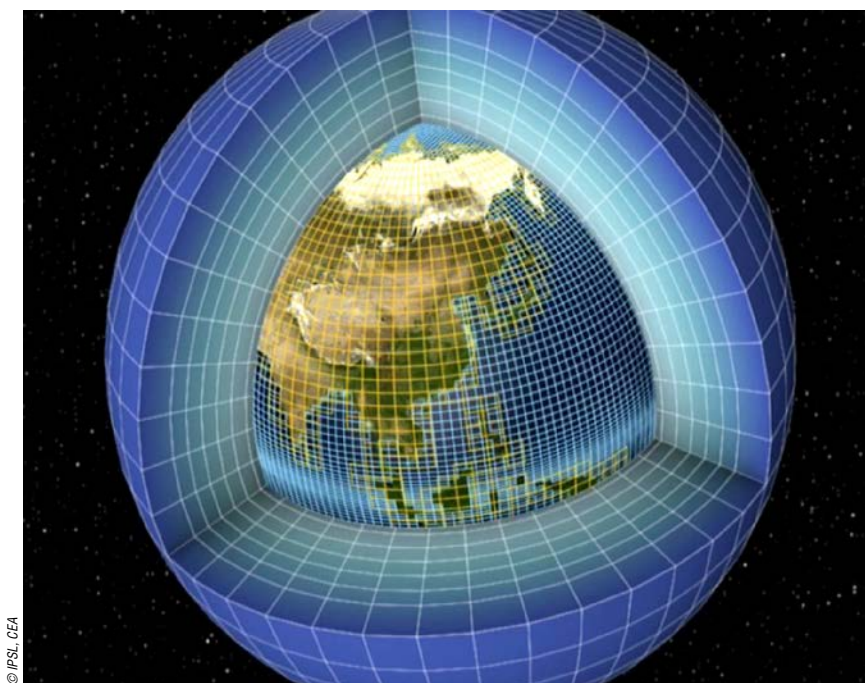




© IPSL, CEA

les différentes composantes du système climatique, en prenant en compte la chimie atmosphérique, les poussières désertiques, les cycles du carbone et de l'azote... et maintenant en améliorant les couplages avec l'hydrologie continentale, le pergélisol et les calottes polaires. L'intégration de ces « composantes lentes » permet d'évaluer les effets à long terme, potentiellement irréversibles, des perturbations anthropiques sur le système climatique. La dynamique, la chimie et la biologie du changement climatique, ainsi que ses conséquences sur les surfaces continentales et sur l'océan, sont également modélisées.

Cette capacité de modélisation est essentielle non seulement pour comprendre les mécanismes des grands changements climatiques passés mais aussi, grâce à la confrontation entre les observations récentes et l'évolution simulée du climat, pour savoir si les changements récents sont exceptionnels et pour identifier leur cause. Le LSCE s'est attaché en particulier à étudier des événements météorologiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les tempêtes ou les fortes précipitations, qui demandent de développer des méthodes statistiques spécifiques. Ses approches visent à évaluer la part d'influence humaine dans ces phénomènes, à connaître les mécanismes et à mieux les anticiper à l'aide d'une régionalisation des simulations climatiques. Tous ces travaux relient des questions de recherche fondamentale, autour de

UN MAILLAGE
de l'atmosphère et de la surface de la Terre utilisé pour les simulations numériques qui reposent sur le modèle de climat de l'institut Pierre-Simon-Laplace. Pour chaque maille est calculée, à partir des équations de ce modèle, l'évolution de différentes grandeurs : température, pression, humidité, nébulosité, précipitations...

la modélisation et la compréhension de systèmes complexes, à des enjeux de recherche sociétale, plus appliquée et construite avec des acteurs socioéconomiques. Le LSCE participe ainsi au développement des « services climatiques ». Cet ensemble d'outils et d'expertises vient en appui des stratégies d'atténuation du changement climatique ou d'adaptation à celui-ci. Il permet par exemple d'identifier des vulnérabilités à ce changement et de définir des indicateurs pertinents pour certains secteurs d'activité.

Coupler le fondamental et le sociétal

Que ce soit par l'étude des climats passés, par la surveillance des gaz à effet de serre, par l'évaluation des modèles de climat ou par l'étude des événements extrêmes, le LSCE continue d'alimenter les rapports du Giec et poursuit son action dans la définition et l'avancée des grands programmes de recherche internationaux sur l'évolution passée, présente et future du climat.

Le constat d'une influence humaine sur le climat et ses conséquences graves sont aujourd'hui clairs. Les connaissances scientifiques sont suffisantes pour évaluer les cumuls de rejets de gaz à effet de serre compatibles avec la maîtrise du réchauffement climatique et avec l'objectif, inscrit dans les traités internationaux, de limiter le réchauffement à deux degrés. De nombreuses voies de recherche restent toutefois ouvertes, afin notamment d'anticiper les variations climatiques plus précisément et plus localement.

Les sciences du climat évoluent par la conjonction de recherches fondamentales et d'études sociétales dans le contexte de la transition énergétique et agroforestière (qui consiste à réduire les rejets de gaz à effet de serre, et donc à limiter les aspects inacceptables du réchauffement) et de l'adaptation aux changements. Le volet fondamental comporte en particulier des campagnes d'études de processus mal connus et des travaux qui croisent différentes échelles de temps et d'espace ; le volet sociétal s'élargit aux approches qui couplent sciences du climat, sciences du vivant et sciences humaines et sociales, comme l'illustre le vaste périmètre de la conférence tenue à Paris en juillet 2015 et intitulée « Notre futur commun sous le changement climatique ». ■

Les NEMS en marche

Éric Ollier

**Des systèmes de dimension nanométrique
démultiplient les moyens de mesure rapide
et précise au service de l'industrie,
notamment dans le domaine de la santé.**

Accéléromètres pour airbags ou pour stimulateurs cardiaques, microphones, boussoles, capteurs d'humidité ou de pression atmosphérique dans les smartphones... cela fait plus de vingt ans que les microsystèmes électromécaniques (ou MEMS, pour *Micro-Electro-Mechanical Systems*) investissent notre quotidien. Aujourd'hui, ce sont les nanotechnologies qui poursuivent la miniaturisation de tels systèmes, non sans difficultés techniques mais avec un horizon vertigineux d'applications possibles.

Les MEMS, souvent façonnés dans du silicium, comportent une structure mobile et des éléments dits « de transduction », qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique par laquelle on obtient une information de nature physique ou chimique : température, pression, acidité, etc. Développés dès les années 1980, ils sont d'abord apparus sur le marché automobile et dans le secteur péri-informatique.

Les recherches fondamentales sur les objets de taille nanométrique (nanotubes, nanofils...) se sont développées en parallèle. On a réussi à manipuler des atomes un par un mais, jusque récemment, il était difficile d'industrialiser l'assemblage de ces nanostructures et de collecter les informations qu'elles produisent. Grâce à la mise en place d'équipes multidisciplinaires, constituées de mécaniciens, d'électroniciens, de chimistes et de biologistes, il est désormais possible de fabriquer et de doter de fonctionnalités très diverses des

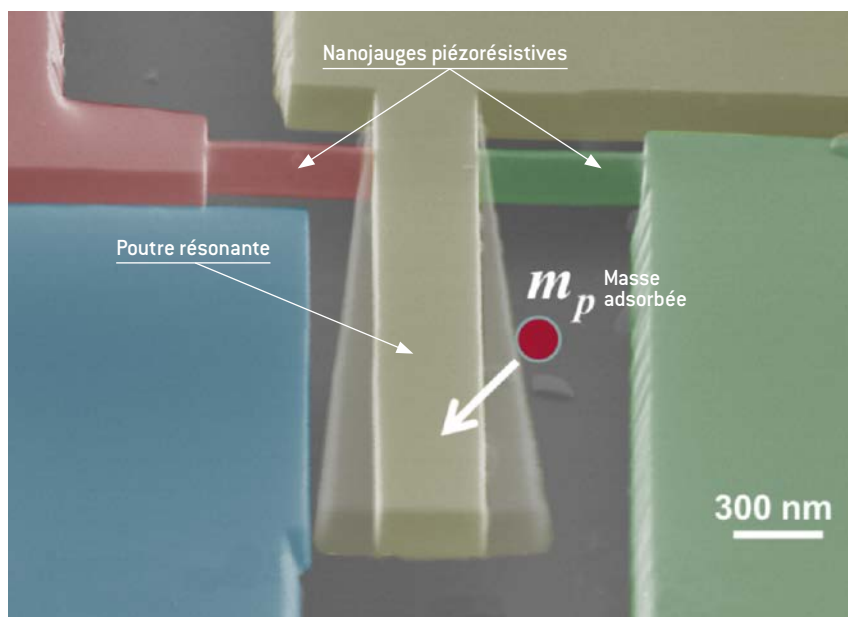
Éric OLLIER est chef de projet, responsable de la thématique NEMS au sein de l'équipe « Capteurs » du Leti, Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information du CEA, situé à Grenoble, sur le site de Minatec Campus.

structures mécaniques aussi petites que l'ADN ou des virus. L'adaptation, à cette échelle, de techniques de miniaturisation propres à la microélectronique permet même aux premières applications industrielles de ces NEMS (*Nano-Electro-Mechanical Systems*) de voir le jour.

Des propriétés singulières

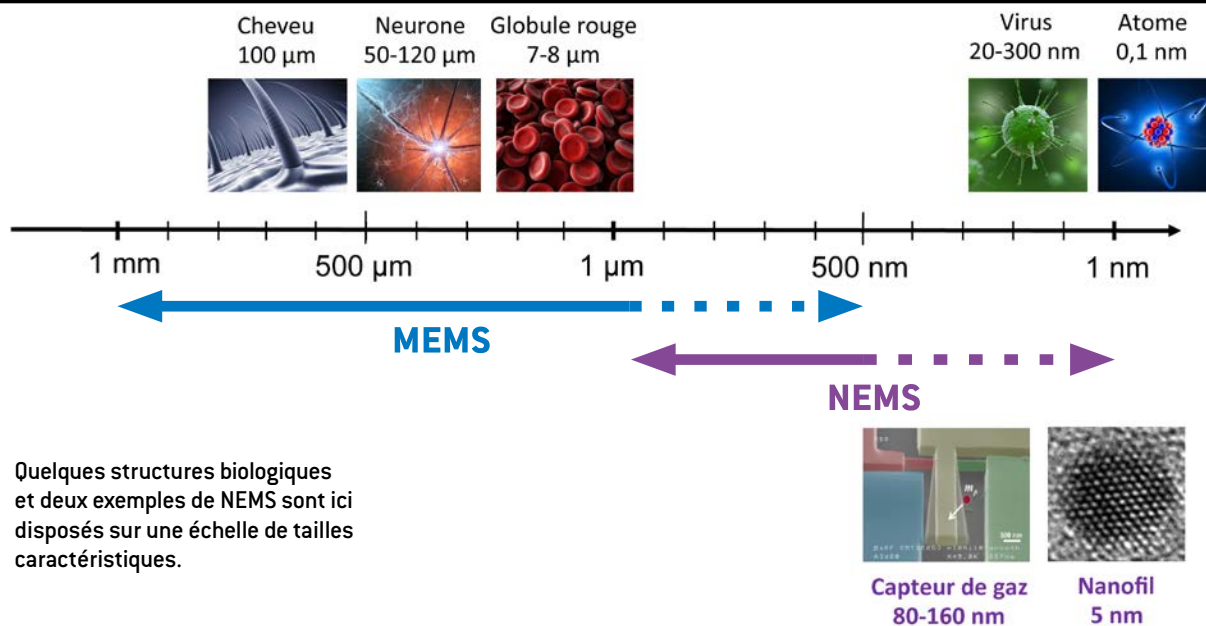
Les NEMS, comme les MEMS, comportent une structure mécanique mobile et des éléments de transduction, mais au moins une de leurs trois dimensions est inférieure à 100 nanomètres (nm) ; cette différence a des conséquences notables.

Les chercheurs ont d'abord étudié les propriétés fondamentales de ces objets et les spécificités dues à leur faible dimension, nommées effets d'échelle. Ces effets concernent notamment la conduction électrique. Par exemple, quand la section d'un fil de silicium est réduite à moins de 100 nm, des phénomènes surfaciques deviennent prépondérants : le piégeage de charges électriques en surface réduit la conductivité globale. Au-dessous de 10 nm, on ne peut plus considérer la section du nanofil comme un milieu continu et il apparaît des phénomènes dits « de confinement quantique » qui nécessitent d'adapter les modèles usuels de structure électronique des atomes.



LA STRUCTURE D'UN NEMS ÉLÉMENTAIRE pour la mesure de masse, avec des nanojauges de 80 nanomètres de large et de 160 nm d'épaisseur. L'adsorption de la masse (m_p) sur la nanopoutre modifie sa fréquence de résonance.

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.

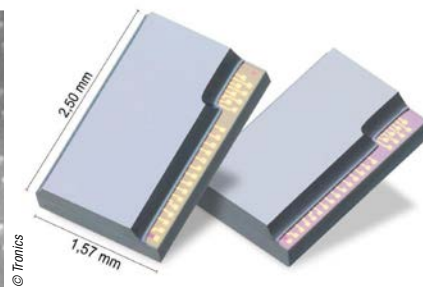
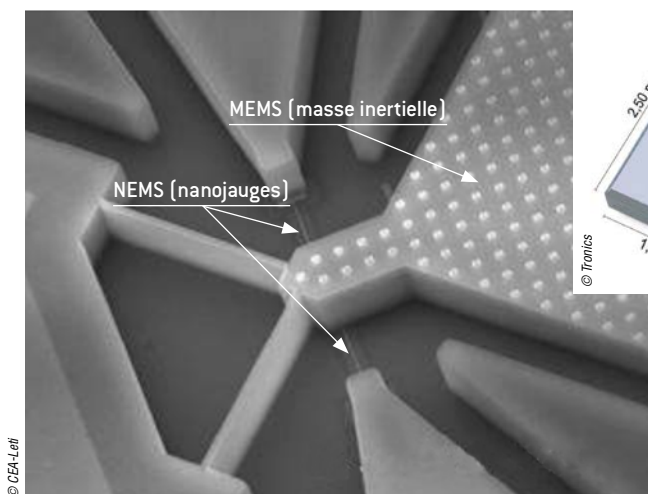
Les NEMS sont aujourd'hui fabriqués dans des salles blanches de laboratoires ou d'usines de microsystèmes ou de

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.

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

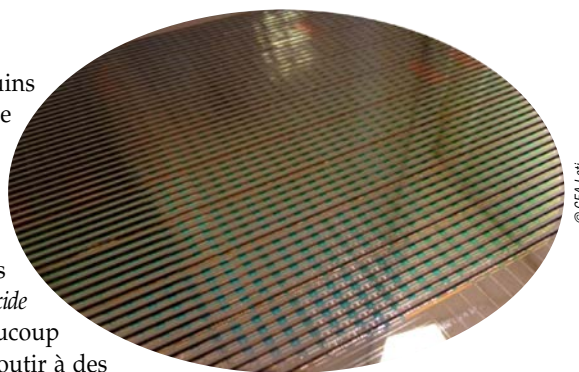
système, d'anticorps sanguins dans un mélange. Une voie prometteuse d'amélioration est le développement de réseaux de centaines de « nanopoutres » couplés à des transistors électroniques CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). Il reste beaucoup à faire, cependant, pour aboutir à des composants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

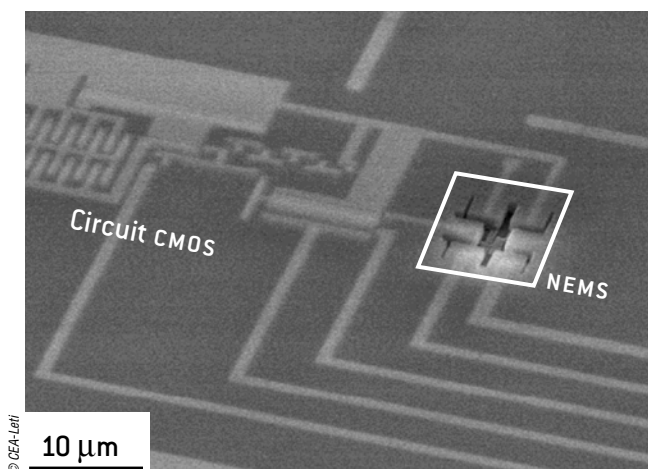
transduction optomécanique, fondée sur le couplage de nanostructures mécaniques et de cristaux photoniques, dont les structures périodiques bloquent certains signaux et en laissent passer d'autres.

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.

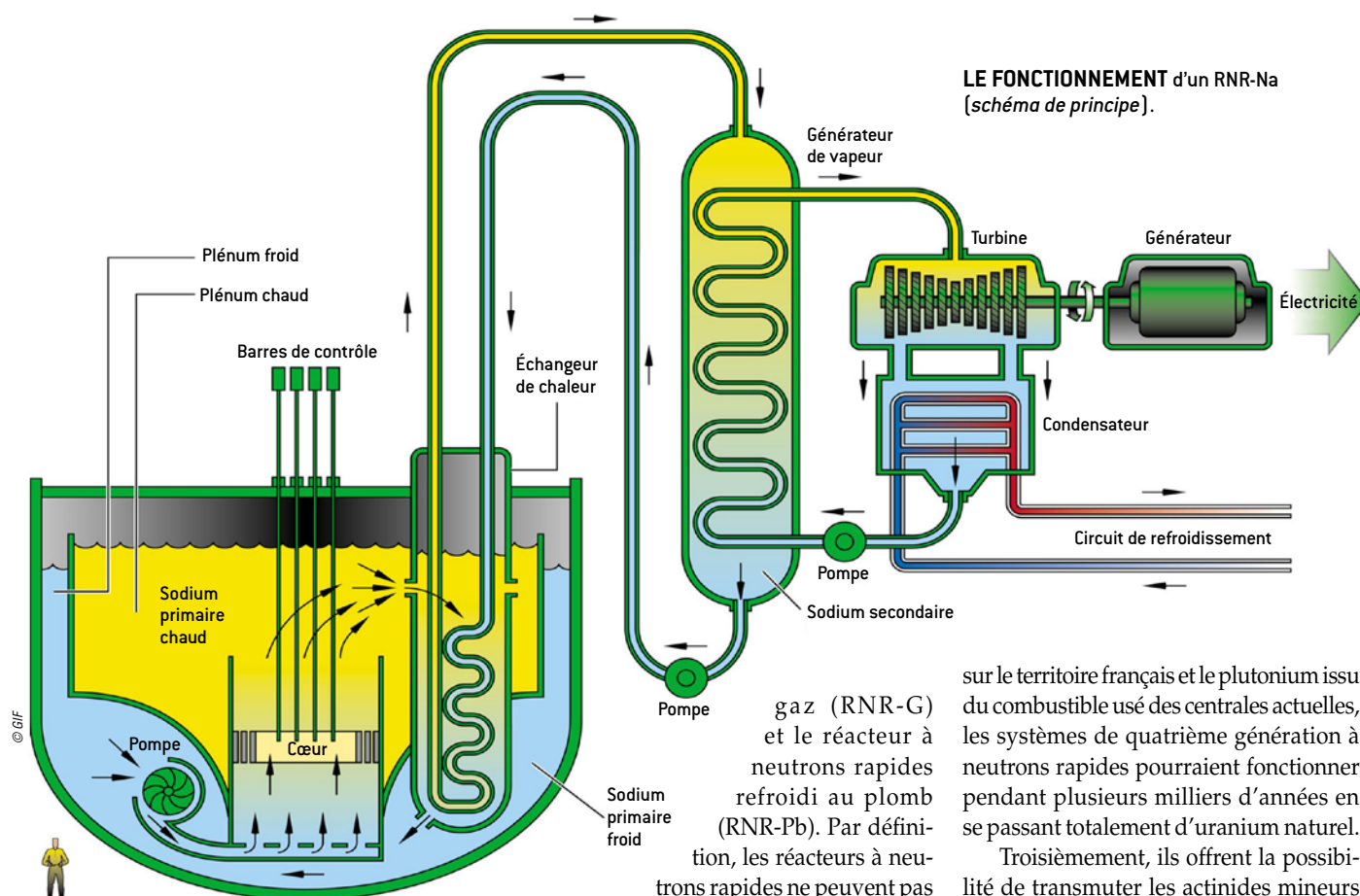
.....
Christophe BÉHAR est Directeur
de l'énergie nucléaire au CEA
.....

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



LE FONCTIONNEMENT d'un RNR-Na
[schéma de principe].

systèmes a été réalisée dans le cadre du Forum international Génération IV (GIF). Cette association intergouvernementale, lancée en 2000 à l'initiative des États-Unis, regroupe treize membres : l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada, la Chine, les États-Unis, Euratom, la France, le Japon, la Corée du Sud, le Royaume-Uni, la Russie et la Suisse. Elle élabore et pilote des programmes coordonnés de recherche et développement en support aux systèmes nucléaires, qui doivent satisfaire aux critères de cette quatrième génération de réacteurs : durabilité, économie des ressources en uranium, poursuite des progrès en compétitivité et en sûreté atteints sur les réacteurs à eau de troisième génération, minimisation de la production de déchets radioactifs, plus grande résistance à la prolifération nucléaire, application de l'énergie nucléaire à d'autres voies que la production d'électricité.

Le GIF a sélectionné six concepts de réacteur, dont trois sont intrinsèquement à neutrons rapides : le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na), le réacteur à neutrons rapides refroidi au

gaz (RNR-G) et le réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb (RNR-Pb). Par définition, les réacteurs à neutrons rapides ne peuvent pas comporter dans leur cœur d'éléments modérateurs des neutrons, ce qui est le cas de l'eau, par exemple. Le choix du caloporteur se limite à quelques matériaux présentant une bonne transparence aux neutrons, pour l'essentiel des métaux fondus (sodium ou plomb) ou des gaz (hélium).

L'énergie des neutrons rapides est typiquement plusieurs centaines de fois supérieure à celle des neutrons thermiques des réacteurs du parc actuel. Les systèmes à neutrons rapides (RNR) présentent de ce fait trois intérêts majeurs.

Premièrement, ils peuvent utiliser sans limitation tout le plutonium produit par le parc actuel des réacteurs à eau légère ou par eux-mêmes, ce qui permet d'assurer une gestion rationnelle et pérenne du plutonium, justifiant ainsi pleinement son statut de matière énergétique valorisée.

Deuxièmement, ils peuvent brûler tout type d'uranium, alors que dans les systèmes actuels, seul l'uranium 235 (un isotope minoritaire) est utilisé. En permettant de valoriser la totalité de l'uranium extrait du sol, ils multiplient par un facteur proche de 100 l'énergie que l'on peut extraire d'une masse donnée d'uranium naturel. Avec l'uranium appauvri présent

sur le territoire français et le plutonium issu du combustible utilisé des centrales actuelles, les systèmes de quatrième génération à neutrons rapides pourraient fonctionner pendant plusieurs milliers d'années en se passant totalement d'uranium naturel.

Troisièmement, ils offrent la possibilité de transmuter les actinides mineurs (l'américium, par exemple), qui sont les principaux contributeurs de l'émission de chaleur et de la radiotoxicité résiduelle à long terme des déchets ultimes. Il est ainsi possible d'envisager une réduction d'un facteur 10 de l'emprise de la zone de stockage des déchets de haute activité à vie longue, et, au bout de 300 ans, une diminution jusqu'à un facteur 100 de la radiotoxicité contenue dans ces déchets.

Les RNR représentent donc la composante clé d'une stratégie de cycle fermé permettant de gérer efficacement les matières valorisables présentes dans les combustibles usés, d'abord ceux d'un parc de réacteurs à neutrons thermiques, puis ultérieurement ceux d'un parc homogène de réacteurs à neutrons rapides.

Une filière de référence

Au sein du CEA, la Direction de l'énergie nucléaire est chargée de mener pour la France les recherches sur ces systèmes nucléaires en rupture technologique forte par rapport aux précédentes générations de réacteurs du même type. Les recherches se concentrent sur deux filières à neutrons rapides : celle des réacteurs refroidis au gaz, qui apparaît