



© Shutterstock.com/Piotr Wawrzyniak

L'AVÈNEMENT DE L'ÈRE NUMÉRIQUE est l'une des modifications environnementales les plus importantes de l'histoire humaine. La plasticité cérébrale des adolescents leur offre une opportunité unique de s'y adapter.

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Steinberg, *Age of Opportunity : Lessons from the New Science of Adolescence*, Houghton Mifflin Harcourt, 2014.

Qui sont les ados ?, *L'Essentiel Cerveau&Psycho*, n° 15, août-octobre 2013.

E. L. Dennis et al., *Development of brain structural connectivity between ages 12 and 30 : A 4-tesla diffusion imaging study in 439 adolescents and adults*, *NeuroImage*, vol. 64, pp. 671-684, 2013.

B. Strauch, *The Primal Teen : What the New Discoveries about the Teenage Brain Tell Us about Our Kids*, Doubleday, 2003.

Certaines interventions dites comportementales sont ainsi très efficaces contre les troubles obsessionnels compulsifs (TOC), qui, sinon, risquent de handicaper à vie le sujet. Elles consistent à déclencher le comportement obsessionnel, par exemple en exposant à la saleté quelqu'un qui se lave les mains toutes les cinq minutes, mais en modifiant peu à peu la réaction – ici en forçant le sujet à se savonner un peu moins. Comprendre que le cerveau est modifiable durant toute l'adolescence apporte l'espoir de redresser le cap en cas de problème. Arrêtons de croire que les jeunes sont des causes perdues !

En dehors des pathologies, il est aussi utile de ne pas oublier la plasticité du cerveau adolescent dans la vie quotidienne. Savoir que les fonctions exécutives préfrontales sont encore en construction, par exemple, peut aider les parents à ne pas réagir avec excès lorsque leur fille se teint subitement les cheveux en orange. L'espoir que son jugement évolue est fondé scientifiquement ! En outre, grâce à cette plasticité, un dialogue constructif avec les adolescents sur des sujets tels que les libertés et les responsabilités est susceptible d'influer sur leur développement.

Les recherches sur l'adolescence restent à approfondir. Elles manquent encore d'infrastructures, de financements et de

spécialistes, mais cela commence à changer avec les résultats acquis ces dernières années. La volonté est forte de minimiser les risques pour les adolescents et d'exploiter l'incroyable plasticité de leur cerveau.

Comment se traduira leur capacité d'adaptation face à l'une des modifications environnementales les plus importantes de l'histoire, à savoir la révolution numérique ? Lors des 20 dernières années, les ordinateurs, les jeux vidéo et les téléphones portables ont changé en profondeur la façon dont les adolescents apprennent, jouent et interagissent. Les informations sont aujourd'hui disponibles en masse, mais leur qualité est très variable. À l'avenir, la difficulté ne consistera pas à se souvenir des données, mais à savoir en évaluer une grande quantité de façon critique, y discerner celles que l'on cherche, en faire la synthèse et les utiliser pour résoudre des problèmes réels. Les éducateurs devraient confronter les adolescents à ces tâches, pour entraîner leur cerveau si plastique à répondre aux exigences de l'ère numérique.

La croisée des chemins

Plus généralement, la société pourrait exploiter davantage la passion et la créativité inhérentes à cette période de la vie. Elle devrait aussi se rendre compte que les années de l'adolescence sont un tournant, où l'on peut choisir le chemin de la citoyenneté pacifique, de la criminalité ou, dans de rares cas, de la radicalisation. Dans toutes les cultures, les adolescents sont les plus susceptibles d'être recrutés comme soldats ou comme terroristes, tout comme ils sont le plus facilement orientables vers les professions d'enseignant ou d'ingénieur. Une meilleure compréhension du cerveau adolescent pourrait également aider les juges et les jurés à prendre des décisions dans les procès criminels.

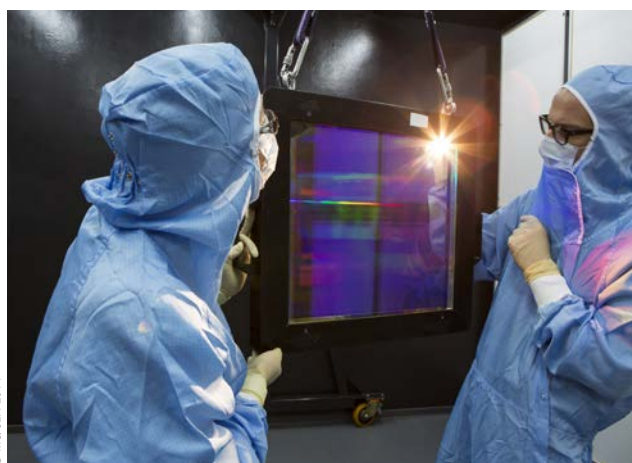
Concernant les adolescents eux-mêmes, les nouvelles connaissances en neurosciences devraient les encourager à solliciter leur plasticité cérébrale pour s'améliorer dans les domaines qui les intéressent. Ils ont une merveilleuse occasion de façonner leur propre identité et d'optimiser leur cerveau en fonction de leurs choix. Ils pourront ainsi naviguer au mieux dans un avenir numérique qui sera prodigieusement différent de ce qu'auront vécu leurs parents. ■

CEA

70 ans de recherche et d'innovation

Dossier réalisé en partenariat avec le CEA

Édition : Olivier Néron de Surgy - Graphisme : Ghislaine Salmon-Legagneur



© MSCEA-2014

À l'occasion de son 70^e anniversaire, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives présente, dans ce cahier spécial de *Pour la Science*, quelques-uns de ses grands chantiers de recherche et d'innovation technologique. Climatologie, imagerie médicale, lasers, nanotechnologies, réacteurs nucléaires... ces travaux sont à l'avant-garde de la science d'aujourd'hui.

sommaire

52 Une climatologie plurielle

Valérie Masson-Delmotte

56 Les NEMS en marche

Éric Ollier

60 Les systèmes nucléaires du futur

Christophe Béhar

65 Des lasers ultrabrefs

Philippe Martin

66 Mégajoule, laser de l'extrême

Pierre Vivini et Charles Lion

70 Mieux voir le corps

Régine Trebossen et Patrick Philippon

Une climatologie plurielle

Valérie Masson-Delmotte

Les recherches menées depuis 70 ans au CEA contribuent à mieux connaître le climat. Elles sont engagées dans des approches innovantes qui aideront à mieux anticiper les variations climatiques en appui aux politiques climatiques.

L'état des connaissances qui portent sur le changement climatique fait l'objet, depuis 1990, de rapports du Giec, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. Leurs auteurs s'appuient sur les résultats de travaux de recherche pour effectuer tous les cinq ou six ans une synthèse critique sur les changements climatiques, leurs causes, leurs impacts et l'espace des solutions.

Les sciences du climat ont apporté des résultats majeurs et explorent de nouvelles voies de recherche. C'est grâce à ses savoir-faire en métrologie (la science de la mesure), en réseaux d'observation et en techniques de simulation que le CEA a pu s'engager tôt dans ce domaine.

Comme ses précurseurs (le Centre des faibles radioactivités, le Laboratoire de géochimie isotopique et le Laboratoire de modélisation du climat et de l'environnement), le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), dont le CEA est partie prenante, a apporté des contributions fortes à la compréhension du fonctionnement du climat et a participé à la rédaction des rapports du Giec. Ses résultats sont le fruit de voies de recherche ouvertes au cours des 70 dernières années :

Valérie MASSON-DELMOTTE est directrice de recherche CEA au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) à Saclay, près de Paris. Laboratoire mixte du CEA, du CNRS et de l'université Versailles-Saint-Quentin, le LSCE fera partie du département « Sciences de la planète et de l'univers » de l'université Paris-Saclay.



© S. Renard/CEA

L'ANALYSE CHIMIQUE
d'un échantillon d'air préparée
au LSCE à Saclay.

l'application de méthodes physiques pointues, la surveillance de l'atmosphère et la modélisation du système climatique, dans le cadre de grands programmes scientifiques internationaux (*World Climate Research Programme, Past Global Changes, Global Carbon Project*, etc.).

Exploiter les archives naturelles

Le climat terrestre est aujourd'hui surveillé de manière intensive par des réseaux météorologiques et océanographiques, par des observations spatiales... Mais les données obtenues ne sont disponibles que depuis un temps court par rapport aux échelles de temps caractéristiques de la plupart des composantes du système climatique (voir le schéma page ci-contre) : 20 ans pour la circulation profonde de l'océan Atlantique, 40 pour l'extension de la glace de mer autour de l'Antarctique, 150 pour la température moyenne à la surface de la Terre... Or, connaître les variations climatiques antérieures est essentiel pour



savoir si un changement récent relève ou non de la variabilité naturelle du climat.

Une telle histoire donne aussi accès à des « expériences naturelles » sur les réponses du système climatique aux perturbations astronomiques, volcaniques ou tectoniques. Les résultats permettent de décortiquer le fonctionnement de ce système, ses rétroactions, ses points de bascule... et fournissent un banc d'essai pour tester des modèles de climat.

La paléoclimatologie acquiert de nouvelles informations à l'aide de « reconstructions » appuyées sur des enregistrements indirects, c'est-à-dire des empreintes physiques, chimiques ou biologiques (nommées *proxies*) laissées par les variations climatiques dans des milieux naturels tels que les sédiments des océans ou des lacs, les concrétions des grottes, les sols, les anneaux de croissance des arbres, les coraux et les glaciers, et en datant ces enregistrements. Elle recourt à une logistique antarctique ou maritime, avec notamment le navire océanographique *Marion-Dufresne*, et à des forages ou des carottages opérés avec

l'appui de l'institut polaire Paul-Émile-Victor. Elle s'appuie aussi sur des plateformes de laboratoire et leurs innovations en matière de datation et d'analyse ultra-précise de milliers d'échantillons. Certaines reconstructions sont ainsi réalisées à partir de la mesure de l'abondance de différents isotopes du carbone ou de l'oxygène, qui dépend des conditions climatiques présentes lors de la formation des dépôts étudiés. Un travail important, mené à l'aide notamment d'approches statistiques et de modélisations, porte sur la quantification des relations entre les paramètres mesurés sur les *proxies* et les variables climatiques.

Les recherches menées au CEA sur les archives naturelles ont apporté des clés pour caractériser et comprendre les variations climatiques les plus intenses ou brusques au cours du dernier million d'années, lors des transitions entre les périodes glaciaires et interglaciaires. Elles ont mis en évidence l'importance des interactions entre le climat, la circulation océanique, les calottes de glace (et donc le niveau des mers) et le cycle du carbone, tout particulièrement dans l'océan Austral. Appréhender correctement le rôle de ces interactions dans les variations climatiques passées et futures reste néanmoins un grand défi. Un nouveau projet de forage dans les glaces antarctiques, *Beyond Epica*, vise à comprendre les mécanismes de la

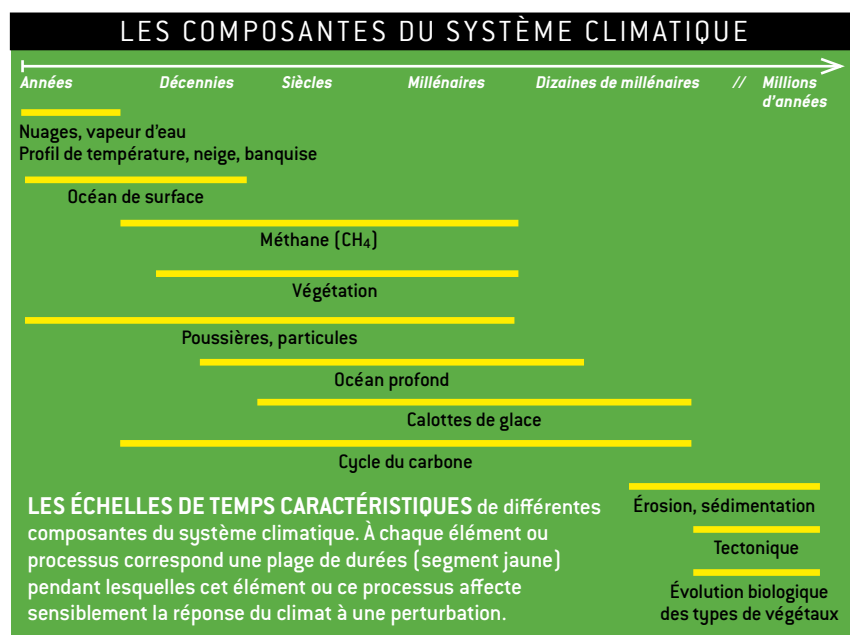
dernière grande réorganisation du climat, il y a environ un million d'années, marquée par une augmentation de l'amplitude et de la durée des glaciations par rapport aux périodes antérieures.

Évaluer les modèles

Les informations issues de périodes clés de climats passés jouent un rôle déterminant dans l'évaluation de la confiance qu'on peut accorder aux modèles numériques, seuls outils qui permettent de prédire l'évolution climatique future. Cette évaluation repose en effet sur la confrontation entre ces données et les résultats de simulations qui sont généralement effectuées à partir d'un climat moyen sur plusieurs siècles et « à l'équilibre ».

Les travaux en cours portent sur l'évaluation de la capacité des modèles à rendre compte correctement des aspects transitoires des variations climatiques passées, comme celles du dernier millénaire dues aux variations de l'activité des volcans et du Soleil, ou des instabilités les plus rapides intervenues lors des glaciations.

Le LSCE joue un rôle moteur dans le *Paleoclimate Modelling Intercomparison Project*, un programme de recherche international qui porte sur l'évaluation des modèles de climat par leur confrontation aux données paléoclimatiques. Un autre travail en cours





LA REMONTÉE D'UN CAROTTIER à bord du *Marion-Dufresne*, lors d'une campagne océanographique menée dans l'océan Indien en 2011.

concerne les mesures isotopiques effectuées sur la cellulose de cernes d'arbre pour connaître les variations climatiques au cours des derniers siècles : elles fournissent un banc d'essai pour évaluer les modèles de réponse de la végétation à l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone (CO_2) et au changement climatique.

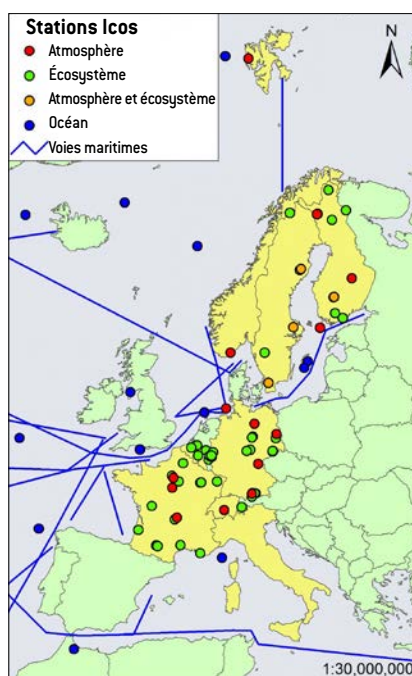
Les connaissances acquises au CEA sur les climats passés font maintenant partie du socle emblématique des sciences du climat et sont intégrées dans les programmes scolaires de sciences de la vie et de la Terre. Elles fournissent des repères pour situer les risques d'évolution climatique future par rapport aux amplitudes et aux rythmes des changements passés. Elles motivent l'extension de la modélisation du climat à toutes ses composantes (atmosphère et océan mais aussi cycles biogéochimiques, surfaces continentales, hydrologie, glaces...).

Surveiller l'atmosphère

Les développements instrumentaux récents ont consisté notamment à mettre au point des moyens de télédétection de gaz à effet de serre et des outils précis (des spectromètres infrarouges) pour le suivi *in situ* des concentrations d'éléments présents à l'état de traces dans l'atmosphère. Ils ont permis d'analyser précisément la composition de l'atmosphère dans le cadre de campagnes de mesures intensives ou de surveillance à grande échelle et à long

terme. Celles-ci servent à évaluer la qualité de l'air, à identifier les émissions de gaz ou de particules et les processus à l'origine de pics de pollution, et à suivre l'évolution de la composition atmosphérique liée aux activités humaines.

Le CEA est ainsi un acteur majeur du suivi des gaz à effet de serre sur le long terme. Il a été l'un des pionniers européens du développement de la métrologie de



LES STATIONS DE MESURES impliquées dans le programme européen Icos.

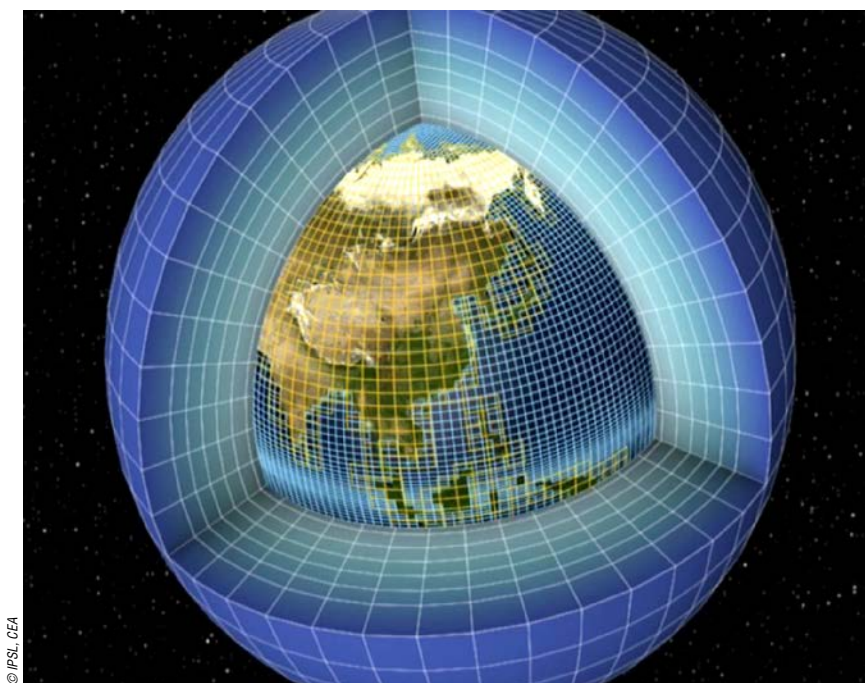
précision des concentrations atmosphériques du méthane et du CO_2 . Au cours des 30 dernières années, des réseaux coordonnés de stations de prélèvement ou de suivi *in situ* de la composition atmosphérique ont été mis en place à l'échelle française et à l'échelle européenne au travers de la très grande infrastructure de recherche Icos. Les données collectées sont combinées aux calculs des modèles de circulation océanique et atmosphérique qui intègrent les cycles biogéochimiques et les processus couplant le climat et le cycle du carbone. L'inventaire des émissions d'origine humaine et la prise en compte des mesures de concentrations atmosphériques sont essentiels pour déterminer la moyenne et la variabilité de la fraction des émissions anthropiques qui est stockée par les puits de carbone constitués par l'océan, les sols et la végétation.

Cette approche requiert des mesures très précises, des campagnes spécifiques pour mieux évaluer les émissions de gaz à effet de serre dans certaines régions (le pergélisol arctique, par exemple) ou certains processus naturels ou anthropiques ; elle repose également sur des méthodes statistiques « d'assimilation de données » ou « d'inversion » grâce auxquelles sont évaluées les marges d'erreur des résultats. Là encore, le LSCE y a contribué en combinant modélisation et savoir-faire métrologique (campagnes de terrain, réseau de mesures). Ses résultats motivent une amélioration de la modélisation des cycles biogéochimiques et des interactions entre climat, cycle du carbone, cycle de l'azote et maintenant celui du phosphore, pour le climat actuel comme pour l'évolution climatique passée et future.

Développer de nouveaux modèles

Dès les années 1980, des travaux pionniers de modélisation des climats passés ont été menés au CEA à l'aide des premières versions du modèle développé par le Laboratoire de météorologie dynamique ; ils sont aujourd'hui poursuivis au sein de la fédération de recherche de l'institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL). Dans les années 1990, le développement de la puissance de calcul du CEA a donné un coup d'accélérateur à cette activité.

Le LSCE contribue activement à la construction du modèle « du système Terre » de l'IPSL avec des couplages entre



© 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

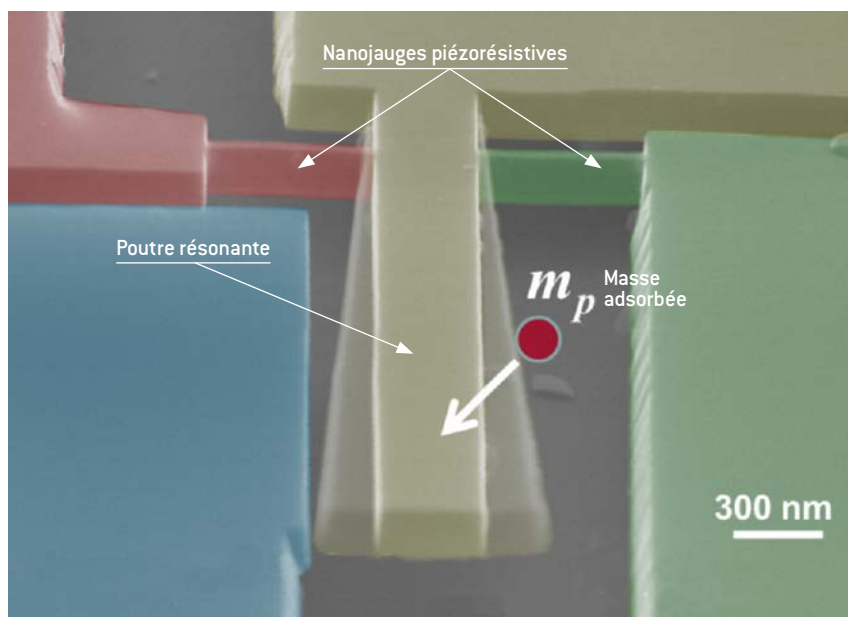
Éric OLLIER est chef de projet, responsable de la thématique NEMS au sein de l'équipe « Capteurs » du Leti, Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information du CEA, situé à Grenoble, sur le site de Minatec Campus.

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.

© CEA-Leti