



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.

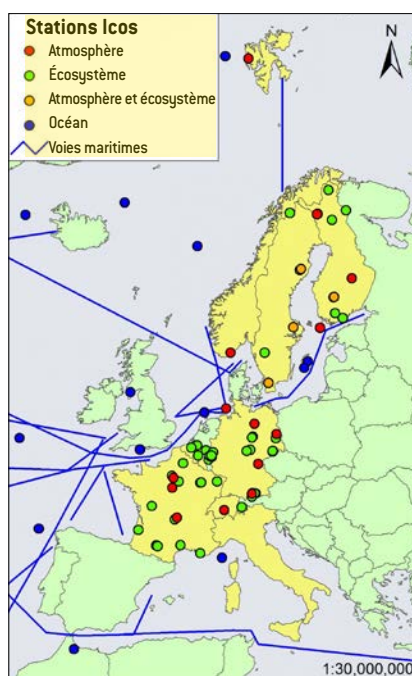
Les connaissances acquises au CEA sur les climats passés font maintenant partie du socle emblématique des sciences du climat et sont intégrées dans les programmes scolaires de sciences de la vie et de la Terre. Elles fournissent des repères pour situer les risques d'évolution climatique future par rapport 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.

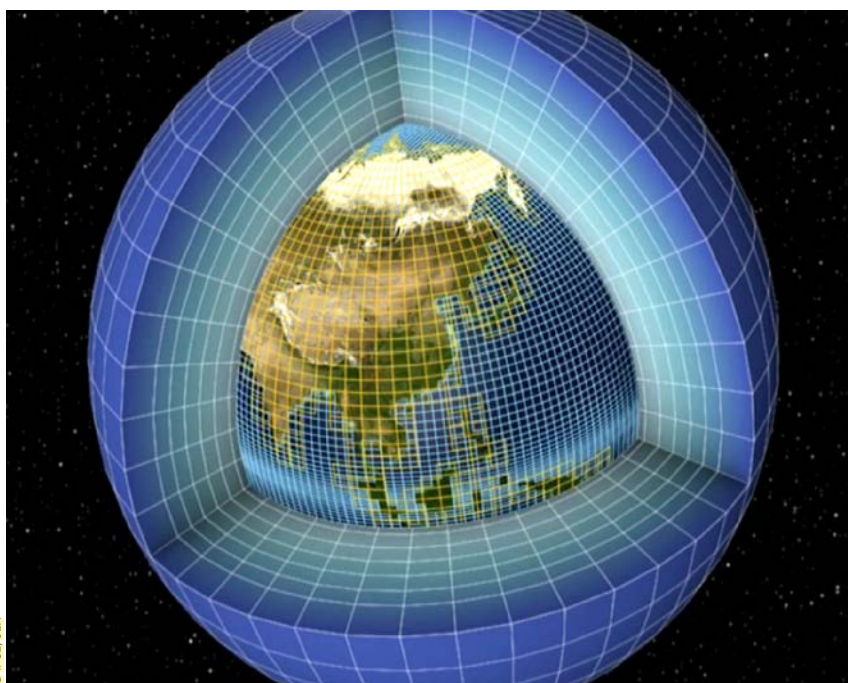
précision des concentrations atmosphériques du méthane et du CO_2 . Au cours des 30 dernières années, des réseaux coordonnés de stations de prélèvement ou de suivi *in situ* de la composition atmosphérique ont été mis en place à l'échelle française et à l'échelle européenne au travers de la très grande 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



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

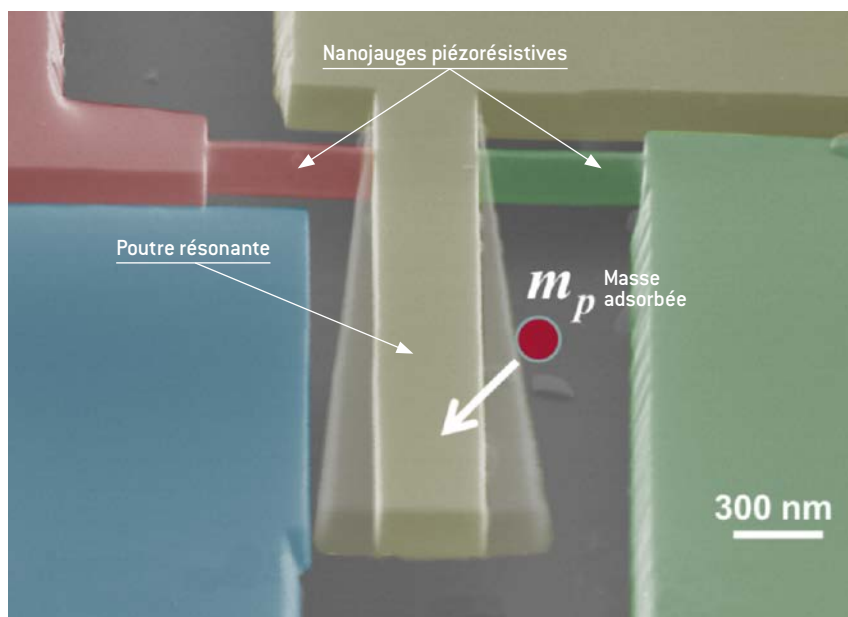
ÉRIC OLLIER est chef de projet, responsable de la thématique NEMS au sein de l'équipe « Capteurs » du Leti, Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information du CEA, situé à Grenoble, sur le site de Minatec Campus.

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.