



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

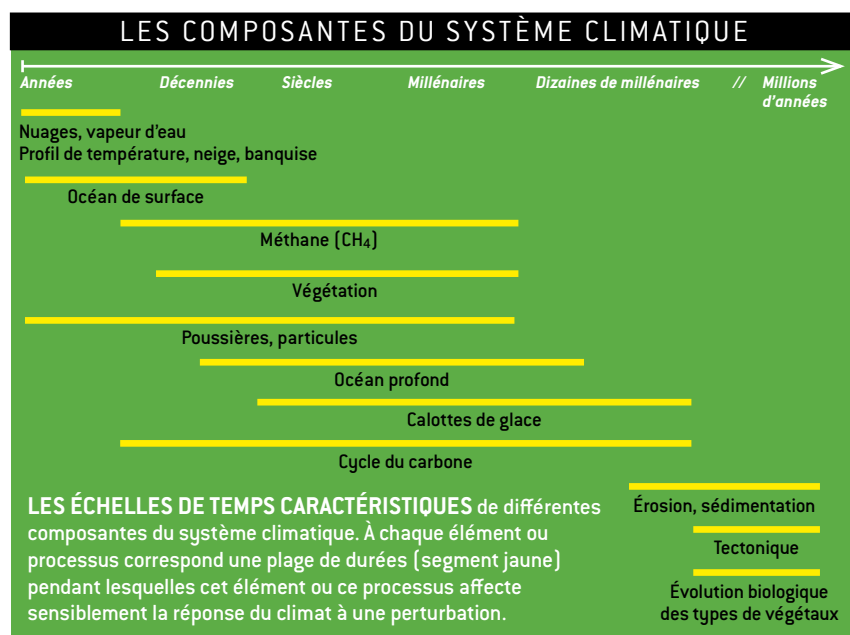
dernière grande réorganisation du climat, il y a environ un million d'années, marquée par une augmentation de l'amplitude et de la durée des glaciations par rapport aux périodes antérieures.

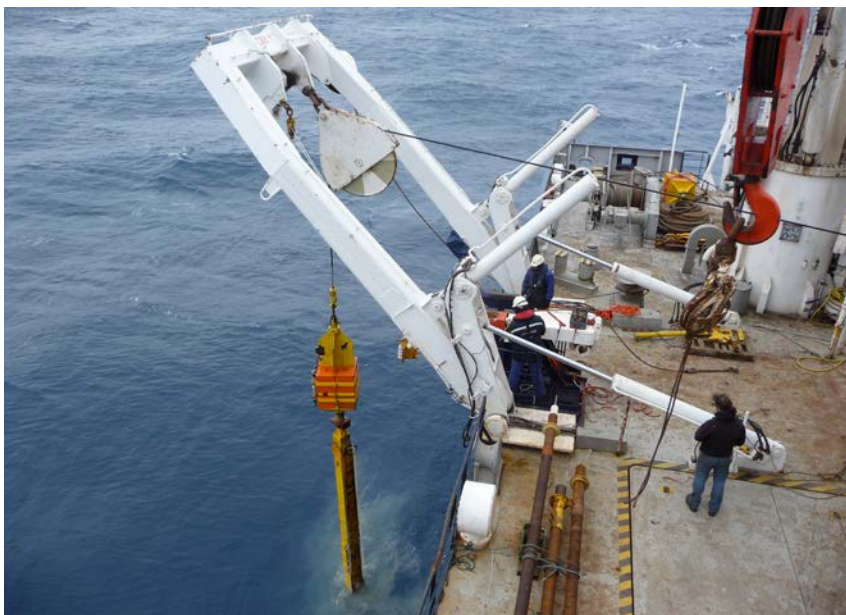
Évaluer les modèles

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.

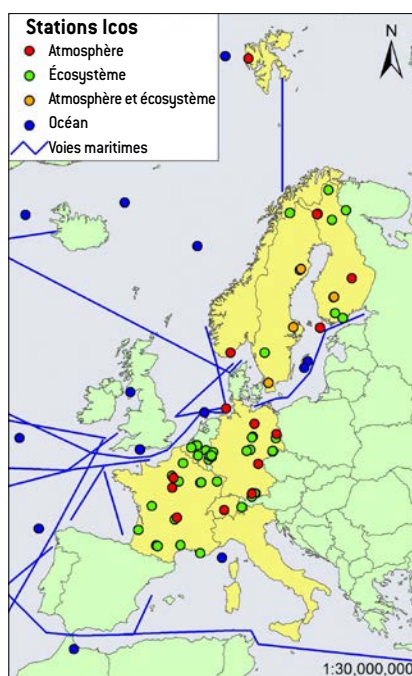
Les connaissances acquises au CEA sur les climats passés font maintenant partie du socle emblématique des sciences du climat et sont intégrées dans les programmes scolaires de sciences de la vie et de la Terre. Elles fournissent des repères pour situer les risques d'évolution climatique future par rapport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