

Le suivi à long terme du CO₂ atmosphérique

Les modèles en général, et ceux de l'atmosphère en particulier, valent par la quantité et la qualité des mesures qui les alimentent. Cela s'avère d'autant plus vrai pour le suivi à long terme de la concentration en gaz carbonique qu'interviennent de multiples facteurs parasites. D'où le développement de réseaux toujours plus performants au niveau international.



C. Morel/Our Polar Heritage

Connexion et mise en place des lignes de prélèvement, sur les têtes de prélèvements, pour tous les instruments de mesure sur le site d'Ivittuut sur la côte Ouest du Groenland. L'objectif scientifique de la mission, qui s'est déroulée entre le 1^{er} août 2007 et le 20 septembre 2007, était l'installation de deux instruments automatiques de mesure en continu : l'un pour le CO₂ et l'autre pour l'oxygène atmosphérique. Les mesures permettront aux scientifiques du LSCE de mieux contraindre les bilans de carbone dans l'Atlantique Nord et de mieux comprendre le rôle de cet océan pour le cycle global du carbone.

La mesure systématique du CO₂ atmosphérique a été initiée, en 1957, par le scientifique américain Charles-David Keeling⁽¹⁾ avec le support de l'Année géophysique internationale⁽²⁾. Cinquante ans plus tard, à l'occasion de l'Année polaire internationale (API)⁽³⁾, le **Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)** et l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) ont installé une nouvelle station pour mesurer le CO₂ au sud du Groenland. À cette occasion, nous pouvons nous poser

une série de questions : comment s'est développé le réseau de mesure du CO₂ au cours de ce demi-siècle ? Qu'avons-nous appris sur le cycle du CO₂ à partir des mesures atmosphériques ? Quels sont les objectifs pour les prochaines années ? Questions auxquelles nous proposons de répondre en procédant à un tour d'horizon sur le réseau de surveillance du CO₂ atmosphérique.

Les premiers pas de l'observation systématique du CO₂ atmosphérique

En 1957, Charles-David Keeling se fixe comme objectif de déterminer la concentration moyenne de CO₂ dans l'**atmosphère** et d'identifier les processus la contrôlant. À cette époque, des mesures ponctuelles avaient déjà été effectuées, en particulier en Scandinavie, où, dès 1954, un réseau d'une quinzaine de sites avait été mis en place. Au vu des résultats, fortement variables d'une station à une autre, mais aussi d'une journée à l'autre, les scientifiques chargés du projet estimaient alors impossible d'arriver à une évaluation fiable du contenu en CO₂ de l'atmosphère et de sa variabilité à long terme par ce type de mesure. Les enregistrements réalisés par Charles-David Keeling prouveront rapidement le contraire.

(1) Keeling (Charles-David), scientifique américain (1928-2005) dont les mesures du **dioxyde de carbone** au Mauna Loa Observatory ont alerté le monde sur la contribution anthropogénique à l'**effet de serre** et au réchauffement climatique.

(2) Année géophysique internationale (AGI) : ensemble de recherches, coordonnées à l'échelle mondiale, menées entre juillet 1957 et décembre 1958, lors d'une période d'activité solaire maximum, en vue d'une meilleure connaissance des propriétés physiques de la Terre et des interactions entre le Soleil et notre planète.

(3) Année polaire internationale (mars 2007 - mars 2009) : ensemble de programmes de recherche, coordonnés au niveau international, en vue d'une avancée importante des connaissances sur les régions polaires où se trouve une partie des réponses aux questions que l'ensemble de la planète se pose sur l'évolution de son environnement.



Vérification de la tête de prélèvement, avant les tests, de la mallette de prélèvement de flacons, sur le site d'Ivittuut (côte Ouest du Groenland). Au premier plan les flacons de prélèvement.

C. Morel/Our Polar Heritage

Deux raisons expliquent la différence de résultats entre ces programmes. La première vient du fait que Charles-David Keeling a poussé la précision de son instrument de mesure (un **spectrophotomètre à absorption infrarouge**) à des niveaux jamais atteints jusqu'alors ($\pm 0,3$ ppm). La seconde raison découle de sa décision d'installer ses stations sur des sites éloignés de sources d'émission de CO₂ dues aux activités humaines ou à la respiration des plantes. Ce choix de construire des stations pour recevoir des instruments de pointe

dans l'Antarctique ou à Mauna Loa, un volcan de 3 400 m d'altitude situé au milieu de l'océan Pacifique, ne relève en rien de la solution de facilité. Mais, grâce à cette initiative, et après avoir procédé à une minutieuse élimination des quelques pics de CO₂ associés aux émissions volcaniques d'Hawaii ou aux moteurs diesel de la base du pôle Sud, Charles-David Keeling obtenait des enregistrements remarquablement stables. Ils lui permettront d'estimer, pour la première fois, le contenu en CO₂ de notre atmosphère, soit à l'époque, environ 315 ppm.

Réalisée pendant une année complète sur ces deux sites éloignés, une campagne de mesures de haute précision apportera un grand nombre d'informations sur le **cycle global du carbone**. Elle a notamment permis de détecter un cycle saisonnier de 5 à 6 ppm d'amplitude à Mauna Loa, absent dans l'hémisphère Sud, et de l'attribuer aux échanges de **carbone** avec la végétation – un résultat obtenu grâce à des mesures complémentaires de l'**isotope** ¹³CO₂. La concentration atmosphérique de CO₂ diminue au printemps et en été en raison de l'absorption du carbone par les plantes et leurs réactions de **photosynthèse**. À l'inverse, la respiration des plantes et des micro-organismes dans le sol provoque une augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique en automne et en hiver. Pour un cycle du carbone à l'état d'équilibre, les deux mécanismes se compensent et la concentration de CO₂ reste stable sur le long terme. Pourtant, dès la fin de l'année 1958, le suivi à haute précision du CO₂ en Antarctique montrait déjà un déséquilibre du cycle du carbone en indiquant une augmentation de l'ordre de 0,8 ppm par an.

Dans ce sillage, la contribution française au suivi du CO₂ atmosphérique démarre en 1981, sur l'îlot Amsterdam (à peine 58 km²), situé au milieu de l'océan Indien et faisant partie des Terres australes et antarctiques françaises. À cette époque, le réseau

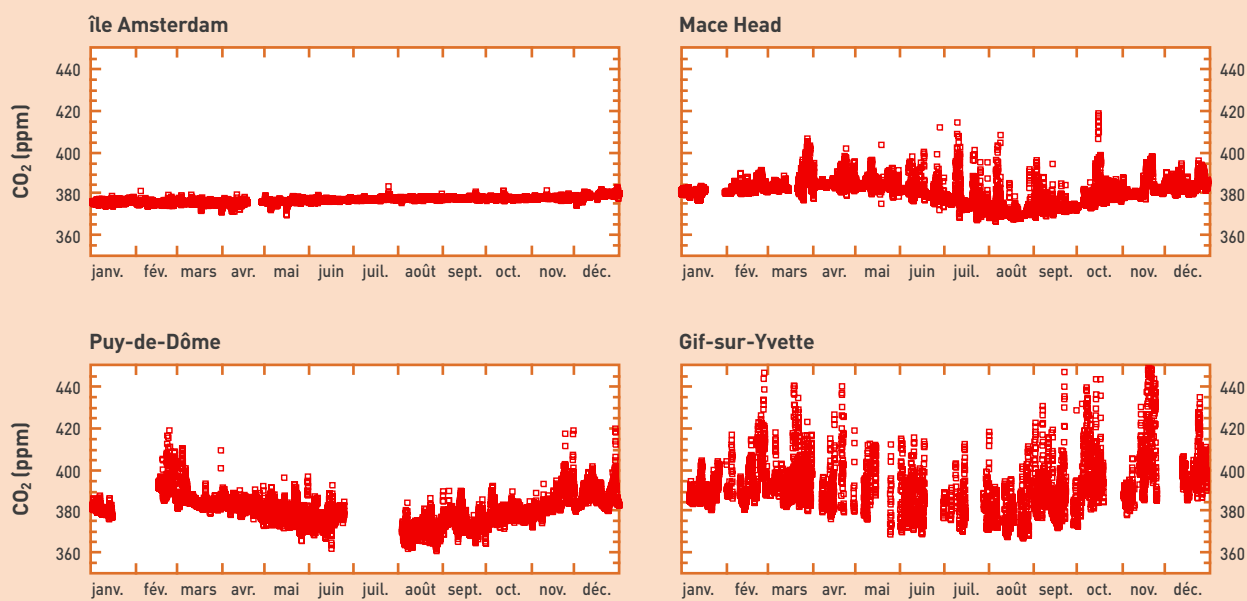


Figure 1. Moyennes journalières de CO₂ mesurées, en 2005, dans quatre observatoires Ramces, localisés dans des environnements très différents : un site de fond éloigné de toute source de pollution (l'île Amsterdam), un site côtier en Irlande (Mace Head), un site en milieu rural au sommet du puy-de-Dôme et un site périurbain à Gif-sur-Yvette.

international se compose de 10 observatoires effectuant des mesures en continu de CO₂ auxquels s'ajoute une quinzaine de sites de prélèvements hebdomadaires d'échantillons de l'air. Ce second dispositif permet un suivi des tendances du CO₂ avec une très faible logistique locale – les échantillons étant analysés par des laboratoires centraux dont le LSCE qui démarrera en 1996.

Au début des années 80, tous les nouveaux sites seront installés sur des îles, des côtes ou au sommet de montagnes – l'objectif étant alors de caractériser le gradient Nord/Sud de CO₂ dans l'atmosphère "de fond", c'est-à-dire l'atmosphère éloignée des sources de contamination locales engendrant une très forte variabilité à court terme (figure 1). Concernant le CO₂, les résultats montrent alors que les sources parasitant le signal émanent à la fois des activités humaines et de la végétation et que celles-ci varient fortement en l'espace de quelques heures ou de quelques kilomètres. Les sites de mesure ayant été sélectionnés en raison de leur représentativité des émissions de CO₂ à grande échelle, le réseau d'observation a donc trop longtemps négligé les surfaces continentales.

Quantifier et suivre les puits de carbone

Nous devons l'essentiel de nos connaissances sur le cycle global du carbone aux séries de mesures longues, c'est-à-dire d'une durée supérieure à 20 ans, dont les résultats sont disponibles pour une dizaine de stations situées en atmosphère de fond. Ces mesures permettent notamment de suivre le taux d'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère. Sachant que depuis 1800, environ 350 GtC (milliard de tonnes de carbone) ont été émises dans l'atmosphère par la combustion des **énergies fossiles** et la déforestation, les concentrations atmosphériques moyennes de CO₂ devraient avoisiner aujourd'hui les 450 ppm. Or, la teneur moyenne en CO₂ s'établit à 385 ppm. Ce résultat démontre que les réservoirs naturels (océan et **biosphère** continentale) jouent le rôle de **puits de carbone** en absorbant plus de la moitié du CO₂ émis par les activités humaines.

En moyenne, seulement 45 % des émissions de CO₂ s'accumulent dans l'atmosphère. Cette valeur, appelée fraction atmosphérique, varie fortement d'une année sur l'autre bien que les émissions anthropogéniques de CO₂ augmentent régulièrement sans à-coup très marqué. La forte variabilité interannuelle du taux de croissance de CO₂ dans l'atmosphère ne peut donc s'expliquer que par la variabilité des échanges avec les océans et la biosphère continentale. Par exemple, l'analyse des mesures obtenues sur l'île Amsterdam indique de forts taux de croissance pendant les années 1983, 1987, 1988, 1995, 1998 et 2002. Ces périodes correspondent aux perturbations océano-climatiques provoquées par le courant côtier **El-Niño** (figure 2). Elles se caractérisent par des changements, à grande échelle, dans le régime des vents et des précipitations à l'origine des anomalies de température, de sécheresse et d'incendies. Les mesures atmosphériques démontrent que les bouleversements climatiques dus aux influences successives du courant *El-Niño* réduisent temporairement l'absorption de carbone par les puits naturels, laissant ainsi une fraction plus importante d'émissions d'origine humaine dans l'atmosphère.

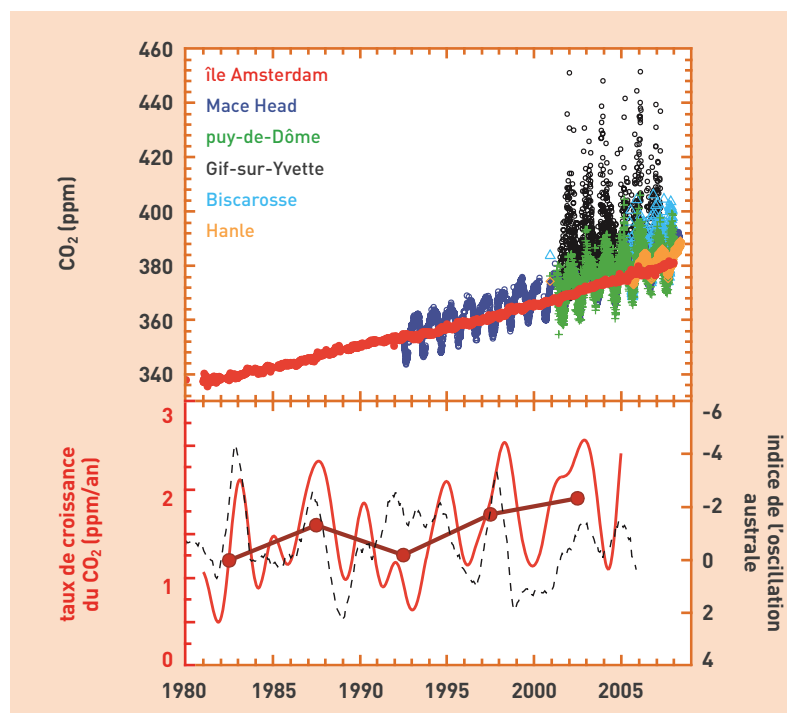


Figure 2. Haut : Suivi du CO₂ atmosphérique dans les observatoires Ramces. Bas : Taux de croissance du CO₂ à l'île Amsterdam (rouge) et indice de l'oscillation australe (pointillés noirs) qui est une mesure de la variation mensuelle de la différence de pression de surface normalisée entre Tahiti et Darwin. Une valeur négative persistante de cet index indique un épisode du courant *El Niño*.

Plusieurs processus peuvent expliquer une variation, à grande échelle, des concentrations de CO₂ atmosphériques. Dès lors, la question se pose de savoir comment évaluer les contributions respectives des sources et des puits de carbone d'origine anthropogéniques ou naturels. Outre les **modèles** conçus pour la végétation et pour l'océan qui apportent des éléments de réponses, l'approche expérimentale permet de mesurer d'autres composés atmosphériques (CO, O₂, H₂...) ainsi que les différents rapports isotopiques du CO₂ (¹³C/¹²C, ¹⁴C/¹²C, ¹⁶O/¹⁸O). Ces différents traceurs suivront les échanges de CO₂, dans des proportions différentes suivant le processus. Par exemple, une source de CO₂ par combustion (feux, chauffage, transport...) s'accompagnera d'une émission de CO alors que la respiration de CO₂ par les plantes n'émet pas de CO. Pareillement, un puits de carbone continental va augmenter le rapport ¹³C/¹²C dans l'atmosphère (car la végétation absorbe préférentiellement le ¹²C) alors qu'un puits de carbone océanique ne modifiera quasiment pas le rapport ¹³C/¹²C. Grâce à la mesure simultanée de plusieurs traceurs atmosphériques dans les observatoires, il s'avère donc possible de quantifier les contributions respectives des sources et puits de carbone. Ainsi, le suivi du CO₂ atmosphérique montre que les puits de carbone absorbent en moyenne 55 % des émissions anthropogéniques tandis que les mesures de traceurs additionnels permettent de répartir les contributions respectives du puits océanique (~ 25 %) et du puits continental (~ 30 %). Néanmoins, il faut également noter que des mesures atmosphériques et océanographiques récentes semblent indiquer des mécanismes de saturation du puits de carbone océanique dans des régions comme l'océan Indien subantarctique et l'Atlantique Nord.



Au-delà du bilan global du cycle du carbone, le réseau de mesures atmosphériques ambitionne désormais de quantifier l'intensité mais aussi l'évolution des sources et des puits de carbone à l'échelle régionale. Pour les chercheurs, il s'agit d'un défi aux multiples enjeux. Enjeu scientifique d'abord, car déterminer les **écosystèmes** ou les bassins océaniques responsables de l'absorption du CO₂ anthropogénique permettra de comprendre les processus en jeu et donc de prédire plus précisément leur vulnérabilité et leur évolution face aux changements **climatiques** à venir. Enjeu socio-économique aussi, dans la mesure où la mise en place des politiques de réduction d'émissions de **gaz à effet de serre** nécessitera des stratégies de vérification des bilans de ces gaz, par exemple à l'échelle d'un pays comme la France.

Le développement du réseau de mesure du CO₂ atmosphérique

À ce jour, le réseau de suivi du CO₂ atmosphérique comprend environ 50 observatoires opérant des mesures en continu ainsi que 60 sites dédiés au prélèvement hebdomadaire d'échantillons d'air destinés à l'analyse en laboratoire central (figure 3). Parmi les principaux acteurs de ce réseau de mesures figurent le laboratoire américain Earth System Research Laboratory de la National Oceanic and Atmospheric Administration (ESRL/NOAA)⁽⁴⁾, la Marine and Atmospheric Research de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation⁽⁵⁾ australienne (MAR/CSIRO), le National Institute for

(4) L'Earth System Research Laboratory (ESRL) est un laboratoire américain, basé à Boulder (Colorado) travaillant sur la compréhension du climat de la Terre et de son évolution au sein de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), l'agence américaine responsable de l'étude de l'océan et de l'atmosphère.

(5) Marine and Atmospheric Research (MAR) est un laboratoire de recherche australien, travaillant sur les changements climatiques et leurs impacts au sein de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), organisme gouvernemental australien pour la recherche scientifique.

(6) Le National Institute for Environmental Studies est la section "Recherche" de l'Agence environnementale du gouvernement japonais devenu le ministère japonais de l'environnement.



Connexion de la ligne d'air sur le dispositif de mesure de l'oxygène atmosphérique.

C. Morel/Our Polar Heritage

Environmental Studies⁽⁶⁾ du Japon. Pour l'Europe s'ajoutent le Max Planck Institut für Biogeochemie⁽⁷⁾ (MPI-BGC) et le LSCE pour la France.

Le réseau de mesure européen présente la particularité de se trouver à la fois relativement dense et très hétérogène. La raison en est que de nombreux instituts y participent mais avec un seul site de mesure – la plus forte contribution étant apportée par le Réseau atmosphérique de mesure des composés à effet de serre (Ramces)⁽⁸⁾ développé par le LSCE (figure 4). En termes de précision de mesure, ce réseau international vise à maintenir, sur le long terme, une comparabilité de 0,1 ppm (0,025 %) entre les stations. Y parvenir suppose de poursuivre et d'amplifier les programmes d'intercomparaison mis en place entre les principaux instituts en charge du réseau mais aussi de maintenir une instrumentation performante dans les stations. Pour réaliser des mesures de haute précision, la majorité des observatoires utilisent des spectrophotomètres à absorption infrarouge comme

(7) Le Max Planck Institut für Biogeochemie (MPI-BGC) est un laboratoire allemand, situé à Iéna, dont les recherches concernent principalement l'étude du cycle biogéochimique du carbone.

(8) Le Réseau atmosphérique de mesure des composés à effet de serre (Ramces) est un réseau d'observatoires atmosphériques répondant à deux grands objectifs. Le premier étant de comprendre le cycle des principaux gaz à effet de serre et leur rôle au sein du système climatique, et le second de quantifier le bilan de carbone d'une grande région ainsi que sa variabilité dans un contexte de vérification de politiques de contrôle ou de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

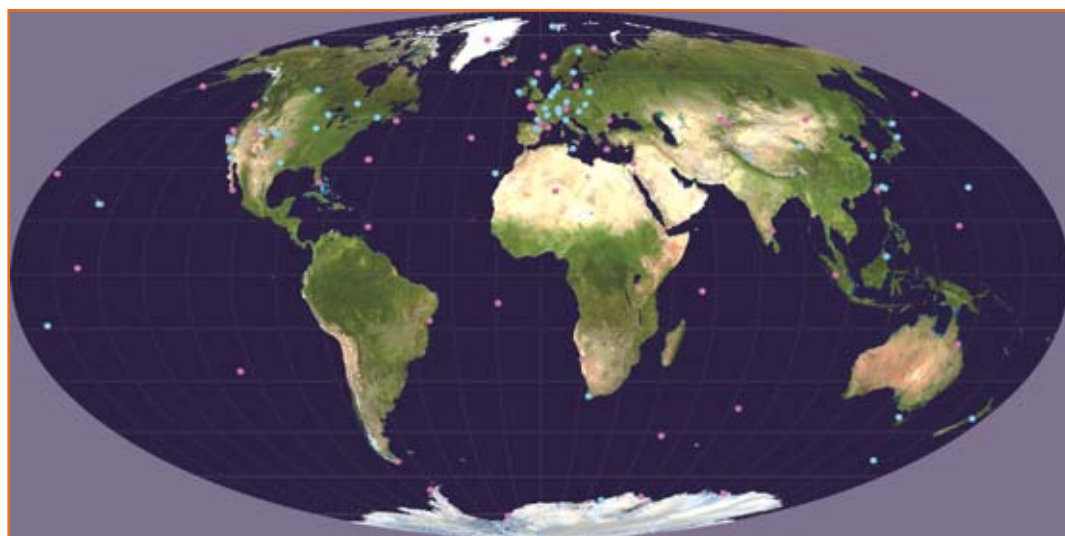


Figure 3. Réseau mondial du suivi du CO₂ atmosphérique. Les points bleus représentent les sites de mesure en continu et les rouges, les sites où s'effectuent les prélèvements d'air hebdomadaires.

A.C. Manning, University of East Anglia

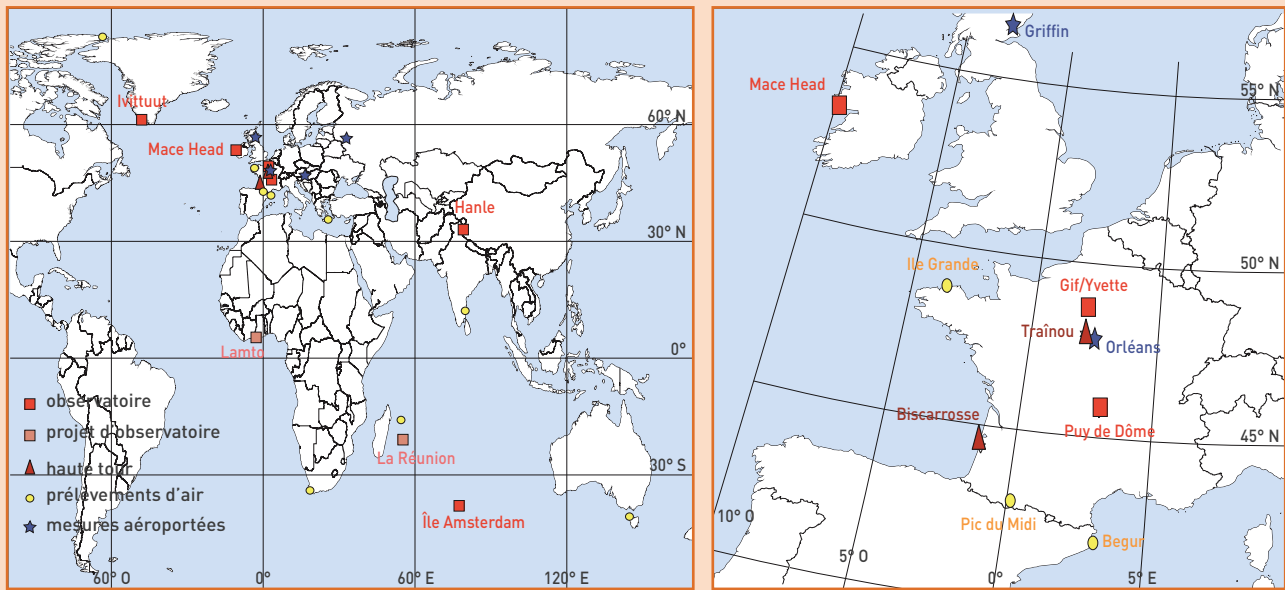
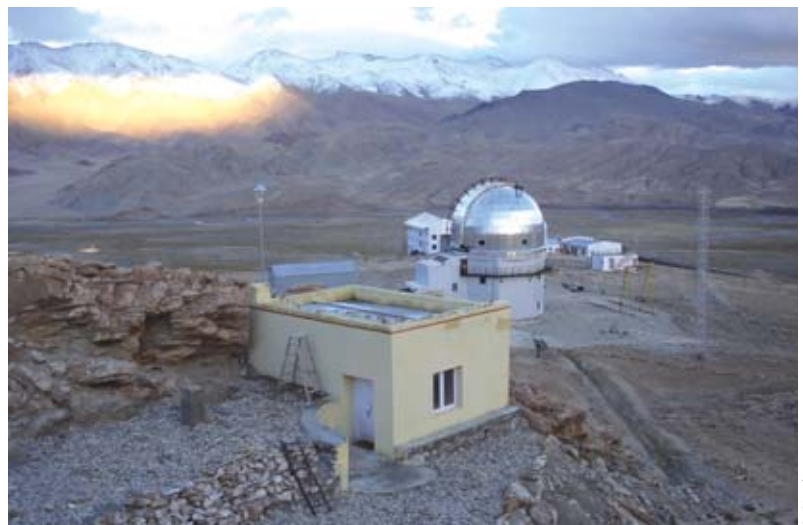


Figure 4. Réseau atmosphérique de mesure des composés à effet de serre (Ramces).

le fit Charles-David Keeling à Mauna Loa. Quelques sites sont équipés avec des **chromatographes en phase gazeuse**. Aujourd'hui, aucun instrument de mesure commercialisé ne garantit la précision requise de 0,1 ppm. Aussi, tous les analyseurs déployés sur les sites sont-ils basés sur des capteurs commerciaux mais optimisés dans les laboratoires de recherche. Ainsi, le LSCE, en collaboration avec l'Irfu, a-t-il développé un instrument de mesure du CO₂ baptisé Caribou⁽⁹⁾. Avec son analyseur à absorption infrarouge commercialisé par la société **LI-COR**, cet instrument peut mesurer en continu la concentration du CO₂ dans l'air avec une reproductibilité de l'ordre de 0,01 ppm. En améliorer les performances, de plus d'un facteur 10, a nécessité de stabiliser très précisément la pression absolue (à mieux que 0,05 mbar) ainsi que la température (à mieux que 0,01 °C) du gaz à analyser. Entre 2005 et 2007, quatre stations Caribou, automatiques et pilotables à distance, ont été construites et déployées : en France (à Trainou et Biscarrosse), dans l'Himalaya (à Hanle) ainsi qu'au Groenland (à Ivittuut).

Les deux stations françaises illustrent l'évolution récente du réseau d'observation des gaz à effet de serre désormais tourné aussi vers les surfaces continentales. Il s'agit là d'un développement indispensable pour comprendre et quantifier le rôle de la biosphère continentale mais aussi d'un développement qui induit une analyse des signaux fortement perturbée par des sources de CO₂ localisées dans un rayon de quelques kilomètres autour des instruments – ce qui pose problème, l'objectif étant d'obtenir des signaux représentatifs d'une échelle spatiale grande comme au moins une région française. Pour y par-



O. Cloué



Site de mesure Ramces, à Hanle (Ladakh en Inde) où sont déployés les instruments Caribou.

Site de mesure Ramces de Biscarrosse où sont déployés les instruments Caribou.

(9) Caribou est un instrument de mesure du CO₂, autonome et pilotable à distance, construit autour d'un catalyseur du commerce dont la précision est améliorée grâce au contrôle précis des paramètres physiques tels que la température et la pression.

CEA/DR



venir, les chercheurs ont choisi d'installer leurs instruments sur des sommets comme le puy-de-Dôme ou sur des tours de télécommunication, par exemple celle de Trainou, haute de 180 m. Dans cette dernière hypothèse, les instruments prennent place aux pieds de ces tours tandis que les prises d'air s'effectuent à partir de leurs sommets pour minimiser l'influence des sources locales confinée à la surface. Afin de caractériser la manière dont le CO₂ se trouve transporté à plus longue distance, des mesures aéroportées régulières complètent les résultats de ce réseau de surface.

Les perspectives du réseau d'observation

D'ici deux ans, deux satellites devraient survoler la **Terre** pour réaliser des mesures de concentration de CO₂, intégrées sur la verticale (moyenne de CO₂ entre la surface et la haute atmosphère) avec une précision de l'ordre de 1 %.

Pourtant, aussi importante soit-elle, la contribution de ces satellites ne suffira pas à la régionalisation des flux de carbone. En effet, à l'échelle d'un pays comme la France, la réalisation de bilans de carbone ne peut s'envisager qu'en associant mesures spatiales, mesures aéroportées et mesures de surface. L'installation d'un réseau de surface à haute précision s'impose donc, ne serait-ce que pour valider les mesures des satellites et garantir l'intégrité du suivi à long terme.

Dans ce contexte, l'infrastructure européenne Integrated Carbon Observation System (ICOS)⁽¹⁰⁾, coordonnée par le LSCE, sera forcément amenée à jouer un rôle essentiel. Démarré en avril 2008, ce

(10) L'Integrated Carbon Observation System (ICOS) est une infrastructure de recherche européenne déployant un réseau de mesure des concentrations de gaz à effet de serre et des flux biosphériques du CO₂ sur une vingtaine de sites en Europe.



L'instrument de mesure du CO₂ baptisé Caribou.

projet vise à développer et à coordonner le réseau de mesure des gaz à effet de serre en Europe. À terme, ICOS comptera une trentaine de stations équipées d'instruments capables de mesurer à la fois les gaz à effet de serre et les paramètres **météorologiques**. Toutes ces stations seront connectées d'abord à un centre d'étalonnage européen afin d'assurer un lien direct avec les programmes de mesure internationaux, puis à un centre de données destiné à la diffusion des mesures en temps quasi-réel, après un contrôle qualité standardisé. Les instruments ICOS équiperont également des stations dans des zones sous-échantillonnées telles l'Afrique, la Sibérie ou encore l'Inde. Ainsi, il n'existe, à ce jour, qu'une seule station de mesure en Inde, qui a été installée, en 2005, à Hanle, dans le cadre d'un projet de recherche franco-indien. D'ici à la fin 2008, le LSCE construira un nouveau site à Lamto, en Côte d'Ivoire. Grâce au projet ICOS, se met en place un réseau d'observation des gaz à effet de serre, unique au monde par sa densité, par sa cohérence en termes de métrologie et de contrôle qualité de mesures. Le jeu de données qu'il fournira devrait placer le LSCE et la communauté européenne à la pointe de la recherche sur la régionalisation des flux de CO₂ et autres gaz à effet de serre (**CH₄, N₂O**).

> Michel Ramonet

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)
Institut Pierre-Simon Laplace
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

> Olivier Cloué

Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay



Connexion des dernières lignes (air et standard de calibration) sur le Caribou, instrument de mesure en continu du CO₂.

C. Morel/Our Polar Heritage