61 Les méthodes de traçages pour étudier la migration des polluants dans les sols industriels, *par Véronique Barthès et Stéphanie Szenknect*
66 Mémo C Gaz à effet de serre et aérosols au cœur du débat sur le changement climatique
70 Radionucléides naturels et dynamique de l'environnement, *par Philippe Heinrich et Yves Grillon*
75 La pollution atmosphérique particulaire sous la surveillance du lidar, *par Patrick Chazette*
80 Les systèmes écologiques en tant que systèmes complexes, *par Marc A. Dubois*

III. LA TERRE EN MOUVEMENT

86 De l'observation sismologique à l'évaluation du risque sismique, *par Yves Cansi, Jocelyn Guilbert et Marc Nicolas*
90 Mémo D Tectonique des plaques et séismes
95 Mesures de déformation par GPS : une méthode d'investigation des mouvements tectoniques à grande échelle, *par Mireille Flouzat*
101 Comment prévenir et prévoir les tsunamis ?, *par Hélène Hébert, François Schindelé et Anne Loevenbruck*
105 Mémo E Comment naît et se propage un tsunami ?
106 Le radon, un traceur atmosphérique, *par Yves Balkanski*
110 Traceurs et jauges nucléoniques éclairent la dynamique sédimentaire en milieu fluvial et littoral, *par Patrick Brisset*
116 Glossaire

à ses partenaires de recherche et 28 laboratoires de recherche correspondants (LRC) lui sont associés.
Reconnu comme un expert dans ses domaines de compétence, le CEA, qui relève de la catégorie des Epic (établissements publics à caractère industriel et commercial) est pleinement inséré dans les nouveaux dispositifs du Système français de recherche et d'innovation : il participe à (ou anime) plus de 500 projets financés par l'Agence nationale de la recherche (ANR), participe à plusieurs projets de l'AII-OSEO, et plusieurs de ses laboratoires ont reçu le label Carnot. Le CEA est également un acteur majeur de l'Espace européen de la recherche (EER), impliqué au titre des 6e et 7e PCRD dans plus de 200 projets et en coordonnant plus de 40, ainsi que par une participation active aux plateformes technologiques européennes et aux Joint Technology Initiatives (JTI), accroissant sans cesse sa présence au niveau international, en particulier par le biais de partenariats avec les grands organismes de recherche.
Acteur majeur en matière de recherche, de développement et d'innovation, il est depuis 1985, date de mise en place d'une structure dédiée à l'essaimage, à l'origine de la création de plus d'une centaine de nouvelles entreprises dans le secteur des hautes technologies.

Éditorial

"Pour et par le nucléaire"

Cette maxime est volontiers utilisée pour affirmer – notamment dans les sciences du vivant – la légitimité de la présence au sein du CEA d'activités qui pourraient sembler *a priori* étrangères à sa vocation. Elle est particulièrement adaptée pour expliquer l'implication de l'organisme dans les sciences de la Terre et de l'environnement.
"Pour le nucléaire" : c'est dans le but de répondre aux besoins du pays, exploiter en toute sécurité ses installations, conduire ses propres expérimentations et surveiller celles des autres dans le cadre des traités internationaux, que la France a développé des compétences aussi bien dans la sismologie que dans la recherche des radionucléides dans l'atmosphère et les sols.
"Par le nucléaire" : c'est grâce aux techniques nucléaires nucléoniques et isotopiques que des progrès déterminants ont été réalisés dans de nombreux domaines, qu'il s'agisse de la reconstitution des climats du passé, de la modélisation de la circulation atmosphérique ou encore du suivi des dépôts sédimentaires dans les fleuves ou sur le littoral, pour ne prendre que quelques exemples.
Le premier chapitre de ce numéro est évidemment consacré au climat, "le" sujet de ce début de siècle. Le prix Nobel de la Paix 2007, décerné au Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (le GIEC) dans lequel les experts du CEA jouent un rôle éminent, est venu donner une crédibilité supplémentaire au travail que ce groupe a mené pour faire finalement apparaître l'impact des activités humaines dans le réchauffement du système climatique.
Le deuxième chapitre est dédié à la traque des polluants dans tous les compartiments du milieu terrestre, que ce soit le sol, l'air ou l'eau. Trois milieux que l'on retrouve dans le dernier chapitre, avec les tremblements du premier, les mouvements du deuxième et les déferlements du troisième.
Autant de sujets qui font que la publication de ce numéro s'inscrit tout naturellement dans le contexte de l'Année internationale de la planète Terre : il s'agit bien là de "géosciences au service de l'humanité".

> Bernard Bouquin

Institutions et **organismes :** qui fait quoi ?

Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) : agence intergouvernementale qui, sous l'égide des Nations unies, œuvre pour l'utilisation pacifique du nucléaire et le respect du traité de non-prolifération.

Airparif : réseau de surveillance de la qualité de l'air en Ile-de-France.

ANR (Agence nationale de la recherche) : établissement public administratif (créé en 2005 sous forme d'un groupement d'intérêt public) chargé de financer des projets de recherche sélectionnés sur des critères scientifiques et économiques.

Autorité de sûreté nucléaire (ASN) : autorité administrative indépendante créée pour contrôler les activités nucléaires civiles, en France, dans le cadre de la loi relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire du 13 juin 2006. L'ASN assure, au nom de l'État, le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, en France, pour protéger les travailleurs, les patients, le public et l'environnement des risques liés aux activités nucléaires.

BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) : établissement public à caractère industriel et commercial de référence dans le domaine des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol.

Centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF) : chargé, pour l'ensemble des services du ministère de l'Équipement, d'élaborer et de diffuser les techniques, de conduire les études et les recherches, d'exécuter des prestations d'ingénierie et des expertises dans les domaines des aménagements et des ouvrages maritimes et fluviaux, des phénomènes hydrauliques maritimes et fluviaux, des aides et dispositifs de sécurité intéressant la navigation maritime et fluviale, des transmissions, de la télématique et des techniques satellitaires.

Centre de surveillance de la qualité de l'air de Pékin (Environmental Monitoring Center) : établissement municipal dont la fonction équivaut à celle d'Airparif en France.

Cnes (Centre national d'études spatiales) : l'agence spatiale française est un établissement public à caractère industriel et commercial chargé de mettre en œuvre la politique spatiale de la France.

CNRS (Centre national de la recherche scientifique) : établissement public à caractère scientifique et technologique exerçant son activité dans tous les domaines de la recherche. L'**Institut national des sciences de l'Univers** (**Insu**) a pour mission d'élaborer, de développer et de coordonner les recherches d'ampleur nationale et internationale en astronomie, en sciences de la Terre, de l'océan et de l'espace qui sont menées au sein du CNRS et des établissements publics relevant de l'éducation nationale.

Commission européenne : un des organes clé de l'Union européenne, elle gère la mise en œuvre des règlements et directives adoptés par le Conseil et a le monopole de l'initiative législative. Elle dispose d'un large pouvoir de conduite des politiques communes. Dans le domaine de la recherche et de la technologie, elle a pour instrument le programme cadre de recherche et de développement (le **6e PCRD** couvrait la période 2002-2006 et le 7e PCRD couvre la période 2007-2013).

IGN (Institut géographique national) : établissement public à caractère administratif qui a pour vocation de décrire, d'un point de vue géométrique et physique, la surface du territoire national et l'occupation de son sol. Une de ses missions consiste à implanter et entretenir les réseaux géodésiques et de nivellement relatifs au système national de référence de coordonnées géographiques, planimétriques et altimétriques, et diffuser les informations correspondantes.

Institut de physique atmosphérique de Pékin : laboratoire de l'Académie des sciences chinoise dont les thématiques scientifiques sont en lien avec la physico-chimie de l'atmosphère terrestre.

Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) : organisme contribuant, par ses travaux et expertises, à la connaissance des océans et de leurs ressources, à la surveillance du milieu marin et littoral et au développement durable des activités maritimes. À ces fins, il conçoit et met en œuvre des outils d'observation, d'expérimentation et de surveillance, et gère la flotte océanographique française pour l'ensemble de la communauté scientifique ainsi que des bases de données océanographiques.

International Data Center (IDC) : organisme de centralisation des données provenant des stations du Traité international d'interdiction complète des essais nucléaires (Tice) et qui met à disposition ces données aux pays signataires du traité.

International Seismological Center (ISC) : organisation non gouvernementale chargée de recueillir, analyser et publier toutes les informations concernant les séismes qui se sont produits dans le monde.

International Water Management Institute : organisation non gouvernementale dont le siège social se situe à Colombo (Sri Lanka), spécialisée dans le soutien des politiques d'utilisation de l'eau en matière d'agriculture et des besoins en eau dans les pays en voie de développement.

IPGP (Institut de physique du globe de Paris) : établissement d'enseignement supérieur et de recherche qui a pour missions l'observation et l'étude des phénomènes naturels, la recherche, l'enseignement et la diffusion des connaissances dans le domaine des sciences physiques de la Terre. Il participe à la prévention et à la mitigation des risques sismiques et volcaniques.

IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) : établissement public à caractère industriel et commercial né en 2002 du rapprochement de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) et de l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (OPRI). Il exerce des missions d'expertise et de recherche sur les risques nucléaires et radiologiques. Fort de plus de trente ans d'expérience sur les séismes, l'IRSN effectue des recherches sur l'aléa sismique dans le cadre de la sûreté et de la protection des installations nucléaires.

Lamont-Doherty Earth Observatory : institut de recherche regroupant environ 200 scientifiques dont les activités tendent à documenter l'origine, l'évolution et le devenir des ressources naturelles de notre planète.

Leosphere : société fondée en 2004 et spécialisée dans les mesures dans l'atmosphère.

LI-COR (société) : société américaine spécialisée dans la fabrication d'instruments de mesure dans le secteur de l'environnement.

LSCE (Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement) : unité mixte de recherche CEA-**CNRS**-Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines créée en 1998 par la fusion du Centre des faibles radioactivités (CFR) et du Laboratoire de modélisation du climat et de l'environnement (LMCE). Au sein de l'**Institut Pierre-Simon Laplace** (**IPSL**), qui fédère plusieurs laboratoires travaillant dans les domaines de l'aéronomie, de la météorologie, de l'océanographie et des climats, le LSCE exerce son activité selon trois axes : compréhension des mécanismes de la variabilité du climat à différentes échelles de temps, étude des cycles biogéochimiques, géochronologie et analyse de géomarqueurs.

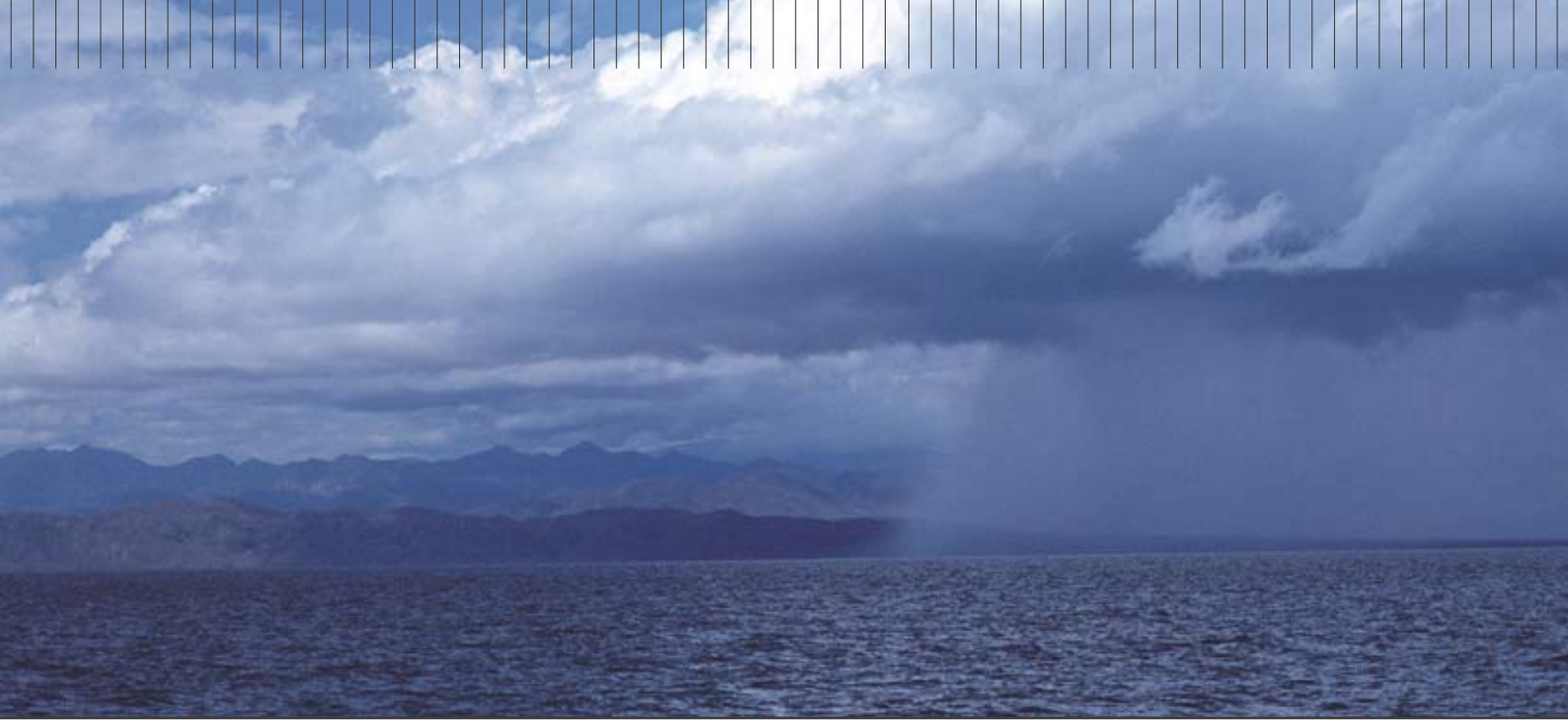
Météo France : établissement public français de météorologie chargé de la prévision et de l'étude des phénomènes météorologiques et de l'émission des alertes météorologiques.

Pacific Tsunami Warning System (PTWS) : système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique, coordonné par l'Unesco depuis 1968. Le centre régional pour le Pacifique (**Pacific Tsunami Warning Center**) est hébergé par les États-Unis à Ewa Beach à Hawaï. Il a été créé en 1949, suite au tsunami qui avait ravagé les baies d'Hawaï le 1er avril 1946. À la suite du tsunami généré par le séisme du Chili de 1960, le centre a été associé à un réseau international de mesure et d'alerte chargé de mesurer continuellement l'activité sismique et le niveau de la mer dans l'océan Pacifique, et d'informer la plupart des pays entourant cet océan, ainsi que Hawaï, l'Alaska et la côte ouest des États-Unis, pour prévenir et limiter les effets des tsunamis.

Université d'Hambourg : installée depuis 1919, elle est devenue la cinquième université allemande par la taille et regroupe 40 000 étudiants. Ses recherches s'étendent sur de nombreux domaines scientifiques et littéraires.

Université Harvard : université américaine, fondée en 1636 et considérée comme l'établissement d'enseignement supérieur le plus ancien des États-Unis. Elle a donné plus de quarante Prix Nobel et se situe en numéro un au classement académique des universités mondiales ; elle est également considérée comme l'université la plus riche du monde.

Université Columbia : université privée de New York fondée, en 1754, sous le nom de King's College, faisant partie du groupe des huit prestigieuses universités américaines de l'Ivy-League et qui arrive en tête au palmarès des universités américaines des Prix Nobel.



L. Hobbs/PhotoLink

Prévoir l'évolution future du climat passe par une meilleure compréhension des processus d'échange de matière et d'énergie entre l'atmosphère, l'océan et la biosphère continentale. Ces deux derniers jouent également un rôle essentiel dans le cycle du carbone en absorbant plus de la moitié du dioxyde de carbone émis par les activités humaines.

I. L'ÉTUDE DU CLIMAT, ENJEU MAJEUR

L'étude du climat est passée en moins de vingt ans du statut de discipline scientifique parmi d'autres à celui d'outil essentiel pour comprendre et peut-être infléchir l'avenir de la planète et de ses habitants. Ce qui n'était qu'une hypothèse fait aujourd'hui l'objet d'un consensus quasi général au sein de la communauté scientifique. Avec le GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, les décideurs disposent pour la première fois à cette échelle d'un organe qui transpose dans leur langage la synthèse des travaux réalisés et des résultats engrangés de par le monde.
Parmi ces travaux, la modélisation du climat, avec couplage de l'atmosphère, de l'océan et de la végétation, joue un rôle capital. Pour essayer de déterminer ce qu'il sera ou pourrait être dans le futur, les modélisateurs doivent adapter leurs outils à l'échelle de temps considérée. Et recaler les modèles obtenus sur ce qui est connu – et l'on en sait de plus en plus – des climats du passé.
La géochronologie et la géochimie isotopique viennent ici à la rescousse, pour mieux appréhender les différents mécanismes impliqués dans la variabilité climatique et replacer les événements dans un cadre chronologique unifié.
Le problème posé par les gaz à effet de serre, à commencer par le gaz carbonique ou dioxyde de carbone, constitue l'autre grand volet des préoccupations des chercheurs attachés à comprendre la machine climatique terrestre. Là aussi, les modèles ne valent que par la richesse des données qui permettent de les alimenter et d'en vérifier les prédictions.
Dans tous ces domaines, les chercheurs du CEA coopèrent avec leurs homologues des autres organismes de recherche, pour la plus large part au sein du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), commun avec le CNRS et l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, et dans une structure fédérative comme l'Institut Pierre-Simon Laplace des sciences de l'environnement. Un LSCE héritier d'un centre des faibles radioactivités dont le nom laisse deviner l'importance des techniques nucléaires dans l'étude du climat et de l'environnement, sans parler de la place que l'énergie nucléaire elle-même doit prendre comme source d'énergie n'émettant pratiquement pas de gaz à effet de serre.
Enjeu planétaire, l'étude du climat joue également son rôle au niveau régional et même local, notamment à l'échelle des grandes agglomérations qui rassemblent une part croissante de la population mondiale. D'où l'intérêt d'évaluer l'impact que les changements climatiques globaux et les émissions polluantes peuvent avoir localement sur la qualité de l'air.

Modéliser le climat, c'est **s'adapter** aux échelles de temps

La modélisation globale du climat terrestre, sur des échelles de temps pouvant atteindre plusieurs milliards d'années, exige des chercheurs un choix rigoureux des composantes et des processus qu'ils intègrent dans leurs modèles. Elle est le résultat d'un compromis constant entre complexité et durée afin de s'adapter aux possibilités des outils de calcul.

PhotoLink

Atmosphère, **hydrosphère**, biosphère et cryosphère interagissent sans cesse par des échanges de matière et d'énergie. Cependant, les phénomènes dont elles sont le siège ont des temps de réponse très différents. L'échelle de temps va conditionner le nombre de composantes à prendre en compte dans les modèles.

L'évolution du **climat** de la **Terre** (Mémo A, ***Voyage au centre de la Terre et aux confins de l'atmosphère***, p. 21) est attestée par différents types de données qui offrent la possibilité de remonter sur plusieurs milliards d'années. Néanmoins, les variations du climat sont connues depuis près de 4 milliards d'années à travers un ensemble de données relativement indirectes. En effet, il n'existe pas de véritable "**paléo**thermomètre" ni de "paléopluviomètre" qui renseigneraient sur les climats passés. C'est toute une chaîne de raisonnements et d'analyses qui permet aux scientifiques d'utiliser des propriétés physiques (**isotopes** de l'oxygène et du **carbone**, par exemple) des fonctions de transfert sur des distributions de la faune et de la flore, pour *in fine* attribuer une valeur climatique et une incertitude. Évidemment, plus on s'intéresse aux climats anciens, moins on dispose de données. Pour pallier ces problèmes de restitution de variables climatiques à partir d'indicateurs, et la distribution très peu homogène en temps et en espace de ces indicateurs, la **modélisation numérique** constitue un autre mode d'approche des variations climatiques. La compréhension de l'évolution climatique passe donc également par l'élaboration de modèles "globaux", car ils s'intéressent au climat de l'ensemble du globe terrestre. Aussi, *quelle composante et quels processus ces modèles doivent-ils prendre en compte ?* Répondre à cette question consiste avant tout à réfléchir aux échelles de temps et d'espace.

Un système aux multiples facettes

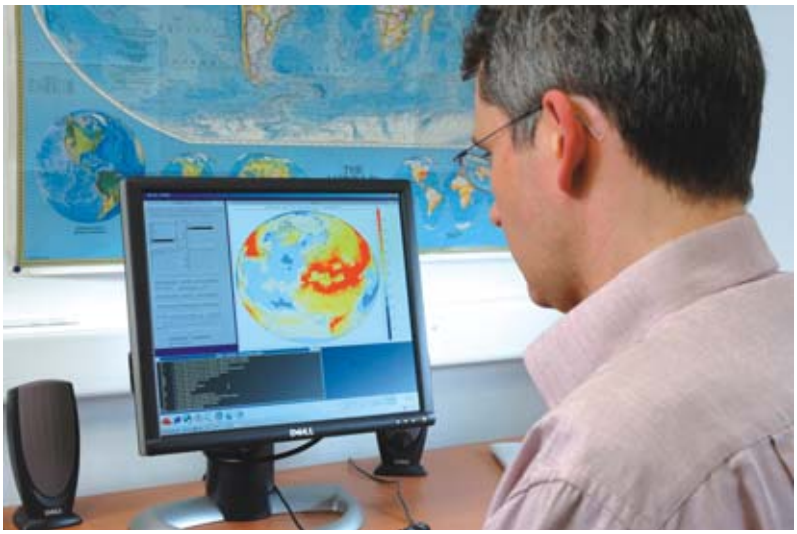
Le système climatique est constitué de diverses composantes qui interagissent entre elles. De plus, ces composantes présentent des temps de réponse très différents. Ce temps caractérise la durée de remise à l'équilibre d'une composante après une perturbation. La composante la plus rapide du système climatique est l'**atmosphère**, dont le temps de réponse varie de quelques minutes à quelques jours, mais le système climatique comporte des composantes beaucoup plus lentes, comme la **lithosphère** (Mémo A, ***Voyage au centre de la Terre et aux confins de l'atmosphère***, p. 21). Celle-ci a gardé la mémoire des **calottes glaciaires** qui recouvraient, voici plus de

20 000 ans, le nord de l'Europe et de l'Amérique. C'est pour cette raison qu'aujourd'hui encore, la **croûte terrestre** remonte en Norvège [1], par exemple, si on se limite aux courtes échelles de temps.

Du modèle atmosphérique au modèle climatique

La prévision du temps, au sens **météorologique**, nécessite de mettre au point de très bons **modèles** atmosphériques. C'est ce qui a été réalisé, dès les années 1960, par les centres météorologiques et les universités qui ont développé des modèles tridimensionnels de circulation générale de l'atmosphère (MCGA). Ces modèles permettent de prévoir l'évolution du temps sur quelques jours. Ces prévisions sont souvent excellentes pour l'évolution des températures de surface. Toutefois, elles peuvent être moins performantes pour la distribution locale des précipitations, entre autres parce que la **résolution spatiale** de ces modèles est plutôt de l'ordre de 100 km, ce qui ne donne qu'une idée très approximative de l'**orographie** dans les régions montagneuses, mais aussi parce que la **micro**physique des nuages est représentée très grossièrement.
Alors, comment pallier ces déficiences ? Ces modèles peuvent être utilisés à plus haute résolution en diminuant la **maille** du modèle sur l'ensemble du globe, par exemple en passant de 400 km à 50 km, mais malheureusement le temps de calcul devient vite prohibitif. Néanmoins, il est possible de "descendre" en résolution jusqu'à quelques dizaines de kilomètres. Au-delà, la physique de ces modèles n'est plus appropriée. Une méthode consiste également à "zoomer", c'est-à-dire réduire la maille dans une région d'intérêt et ainsi descendre jusqu'à 50 km – évidemment la maille du modèle augmentera d'autant dans la région antipodale – (encadré 1).

(1) Les continents s'enfoncent plus ou moins dans le **magma terrestre** en fonction de leur poids et remontent graduellement quand celui-ci diminue, que ce soit par érosion ou par fonte de grandes masses de glace. C'est l'équilibrage isostatique.



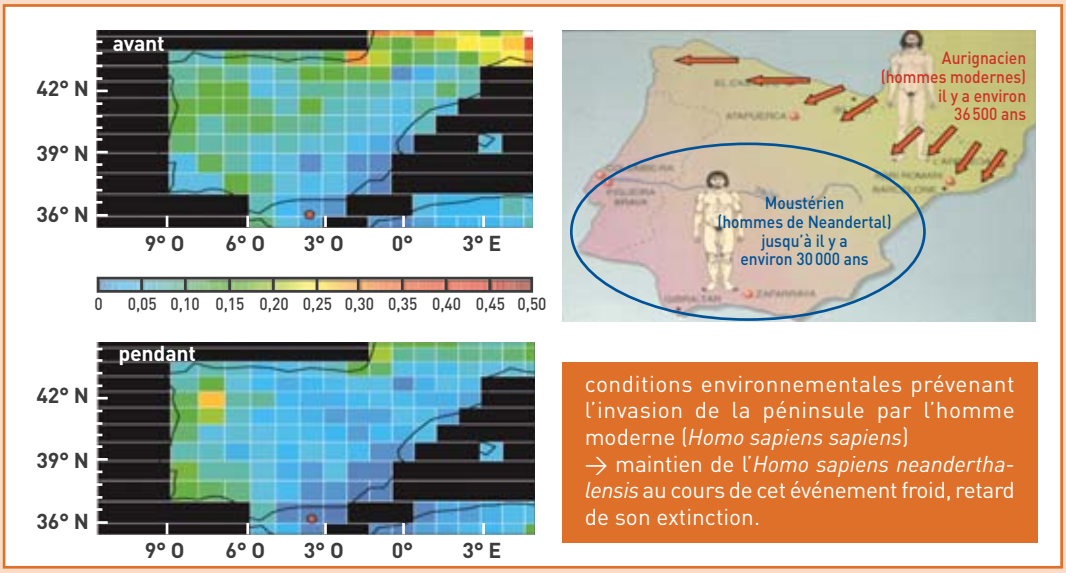
P. Bazoge/CEA

Pour estimer comment évoluera le climat au cours du XXIe siècle et au-delà, il n'est pas possible de simplement extrapoler à partir des climats passés. Il est nécessaire de faire appel à la modélisation. Un modèle de climat doit prendre en compte toutes les composantes du système climatique déterminées par l'échelle de temps, y ajouter les perturbations apportées par l'activité humaine et faire interagir tous ces éléments.

La modélisation "zoomée" au secours des paléontologues

1

En utilisant un **modèle** de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) zoomé sur l'Espagne, les modélisateurs ont pu montrer que, il y a 39 000 ans, lors d'un refroidissement brutal dans l'Atlantique Nord correspondant à une dislocation d'une partie de la **calotte** nord-américaine (**Laurentide**) qui couvrit le nord de l'Atlantique d'**icebergs** dérivant et fondant au large du Portugal, le climat du centre et du sud de l'Espagne s'est considérablement "aridifié". Ce changement de climat et d'environnement a empêché les *Homo sapiens sapiens*, installés au nord, de franchir l'Ebre. Cela explique pourquoi les campements de Néandertaliens *(Homo sapiens neanderthalensis)* ont perduré beaucoup plus longtemps au sud de l'Espagne que partout ailleurs en Europe de l'Ouest (figure).



LSCE

Figure.
À gauche, couvert arboré simulé avant et pendant le refroidissement rapide survenu il y a 39 000 ans (événement de Heinrich H4). Sa disparition au profit du couvert herbacé est cohérente avec l'arrêt de l'avancée des *Homo sapiens sapiens* vers le sud et le centre de l'Espagne et le maintien de campements de Néandertaliens *(Homo sapiens neanderthalensis)*.

Philippe Bigard/goodshoot.com

La végétation est une composante importante du système climatique. Elle a d'abord un rôle radiatif, puisqu'une surface recouverte de végétation absorbe beaucoup plus le rayonnement solaire qu'un sol nu, et joue un rôle essentiel dans le cycle de l'eau qu'elle absorbe pour sa croissance et rejette par évapotranspiration.

Pour répondre aux questions de l'impact du changement climatique dans une région donnée, et cette fois à des échelles de l'ordre du kilomètre, la stratégie est de coupler un modèle global à un modèle régional adapté aux échelles kilométriques mais nécessitant des conditions aux limites fournies par le modèle de circulation générale (MCG). Ces stratégies sont maintenant intensivement développées. En effet, décliner les scénarios des changements climatiques mis au point dans le cadre du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – voir l'encadré *Le GIEC. Pourquoi ? Comment ?* p. 10) au niveau des régions pour en mesurer l'impact est devenu une priorité. Ces régions peuvent être, par exemple, une zone montagneuse pour déterminer le niveau d'enneigement des stations, des zones littorales pour évaluer l'impact de la remontée du niveau marin…

L'échelle de temps détermine les processus impliqués

Si l'échelle de temps passe de l'ordre de *la semaine à l'année,* une seconde composante est nécessaire : l'océan. En effet, les deux fluides qui vont transporter de l'énergie et de l'humidité de l'équateur vers les pôles sont l'atmosphère et l'océan (figure 1). Dès les années 1980, des modèles de circulation générale de l'océan (MCGO) sont venus compléter les MCGA, et ces deux modèles ont été couplés (encadré 2). Toujours à cette échelle de temps, et jusqu'à des périodes de 100 ans, une troisième composante a dû également être prise en compte, la **biosphère**, qui interagit à la fois avec le rayonnement solaire (sa présence modifie l'**albédo**) et le cycle de l'eau. De tels modèles, très simplifiés ou incorporant de nombreux PFT *(Plant Functional Types)* (2), ont vu le jour et ont été couplés aux composantes atmosphère et océan.
Sur des échelles de temps plus longues encore, qui s'étendent du *millier d'années à la centaine de milliers d'années,* une composante essentielle à prendre en compte pour comprendre le climat du **Quaternaire** (environ les 2 derniers millions d'années) est la **cryosphère**. Des modèles tridimensionnels thermo-mécaniques avec des résolutions spatiales de 50 km ont été élaborés. Couplés à des modèles de climat, ils permettent, d'une part, de prédire l'évolution des calottes de glace et, d'autre part, d'évaluer les *feedbacks* (boucles de rétroaction) cryosphère-climat. En particulier, lorsqu'une calotte de glace fond, elle injecte de grandes quantités d'eau douce à la surface des océans, ce qui peut avoir pour effet, en diminuant la densité des eaux de surface, d'inhiber la plongée des eaux profondes. Depuis un million d'années, le climat oscille entre des courtes **périodes interglaciaires**

(2) Les caractéristiques des divers types de pollen sont beaucoup trop nombreuses pour que ceux-ci soient représentés individuellement dans les modèles. Aussi, les pollens ayant des caractéristiques communes sont regroupés dans différentes catégories appelées PFT *(Plant Functional Types)*. En général, le nombre de PFT dans les modèles varie de 5 à 15.

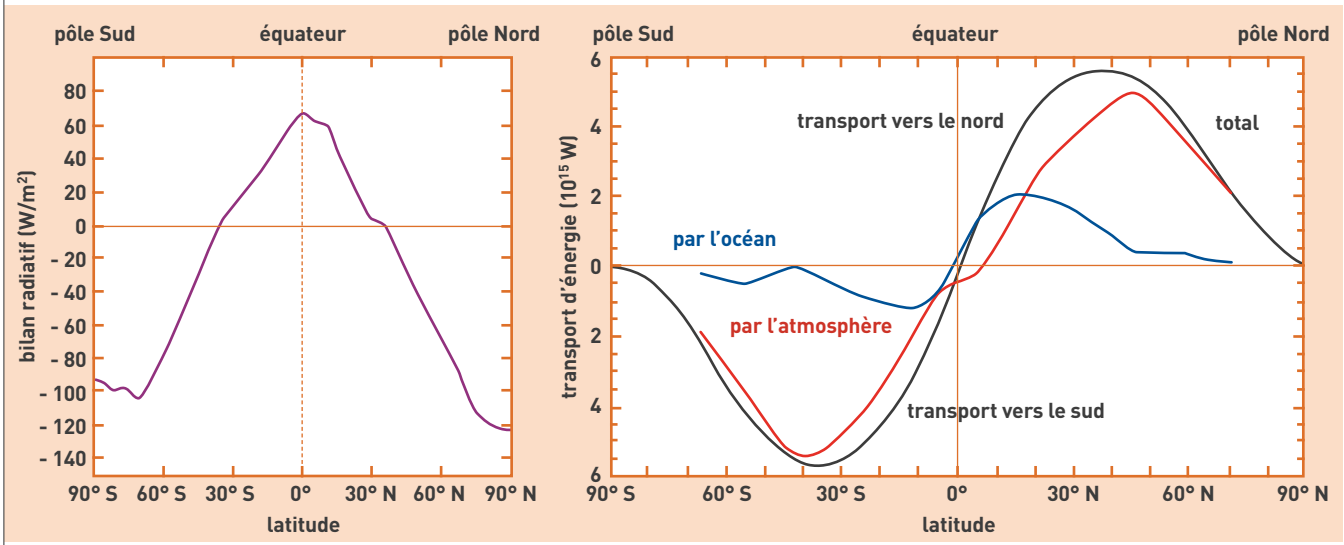


Figure 1.
À gauche, bilan radiatif, correspondant à la différence entre l'énergie reçue du Soleil et celle réémise vers l'espace, en fonction de la latitude. Cette courbe résulte des campagnes ERBE de mesures par satellite *(Earth Radiation Budget Experiment)*.
À droite, bilan du transport d'énergie par l'atmosphère et les océans. Le transport total est mesuré par satellite (campagnes ERBE). Le transport par l'océan est déduit de données météorologiques. Le transport par l'atmosphère est obtenu par différence. Ce transport d'énergie est considérable.

Un exemple de couplage océan-atmosphère : l'entrée en glaciation 2

Comprendre comment le climat a basculé d'une situation interglaciaire similaire à la nôtre à une situation glaciaire – où la neige s'accumule pour former à long terme d'immenses calottes – est un défi pour les modélisateurs du climat. Ils ont très tôt, dans les années 1980, essayé de reproduire cette transition due au fait que l'insolation d'été aux hautes altitudes de l'hémisphère Nord était plus basse (théorie astronomique du climat) et devait permettre à la neige, tombée en hiver, de se maintenir l'été. Ils le firent d'abord avec des modèles purement atmosphériques (MCGA), mais ce fut un échec. En effet, le forçage radiatif est si faible que l'atmosphère seule ne suffit pas à l'amplifier. De nouvelles simulations qui tiennent compte de l'océan et de la végétation (MCGAOV) ont réussi à reproduire cette transition, en simulant de la neige pérenne aux endroits où effectivement les calottes ont commencé à se développer (figure).

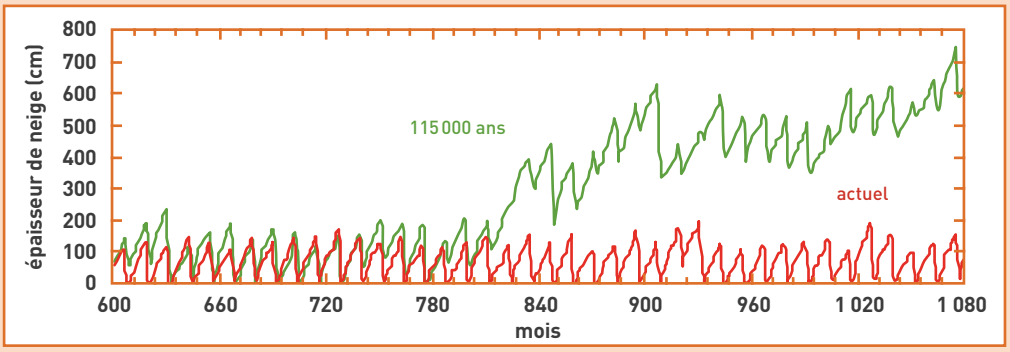


Figure.
En choisissant l'archipel arctique canadien comme zone d'étude qui correspond à l'origine de l'englacement, il faut noter que si à l'actuel (courbe rouge) la neige fond, ce n'est plus le cas lorsque l'entrée de la glaciation, il y a 115 000 ans, est simulée avec un modèle couplé (MCGOA).

et de longues **phases glaciaires**. Lors de ces phases froides, la Terre ne porte pas deux calottes de glace comme aujourd'hui (Antarctique, Groenland), mais quatre. Aux deux premières s'ajoutent la **Laurentide** sur le nord de l'Amérique et la **Fennoscandie** sur le nord de l'Europe. Très récemment, ces modèles couplés ont permis de reproduire le dernier cycle glaciaire-interglaciaire (figure 2), soit le climat de la Terre depuis 130 000 ans.

Encore plus loin, sur des échelles de l'ordre de *la dizaine de millions d'années*, le processus qui devient fondamental est la **tectonique des plaques** (Mémo D, ***Tectonique des plaques et séismes***, p. 90). La danse des continents sur la lithosphère va modifier le climat et le **cycle du carbone** (figure 3). La tectonique des plaques produit un effet climatique direct lié au déplacement des continents des zones tropicales aux zones tempérées. Cet impact fut perçu dès l'origine par le météorologue et astronome allemand Alfred Wegener dans son ouvrage de 1924 écrit avec le climatologue allemand Wladimir Köppen "*Die Klimate der Geologischen Vorzeit*". Un autre effet, mis en évidence par les équipes du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (**LSCE**) et du Laboratoire des mécanismes et transferts en géologie (LMTG) de Toulouse, est plus indirect et concerne le cycle du car-

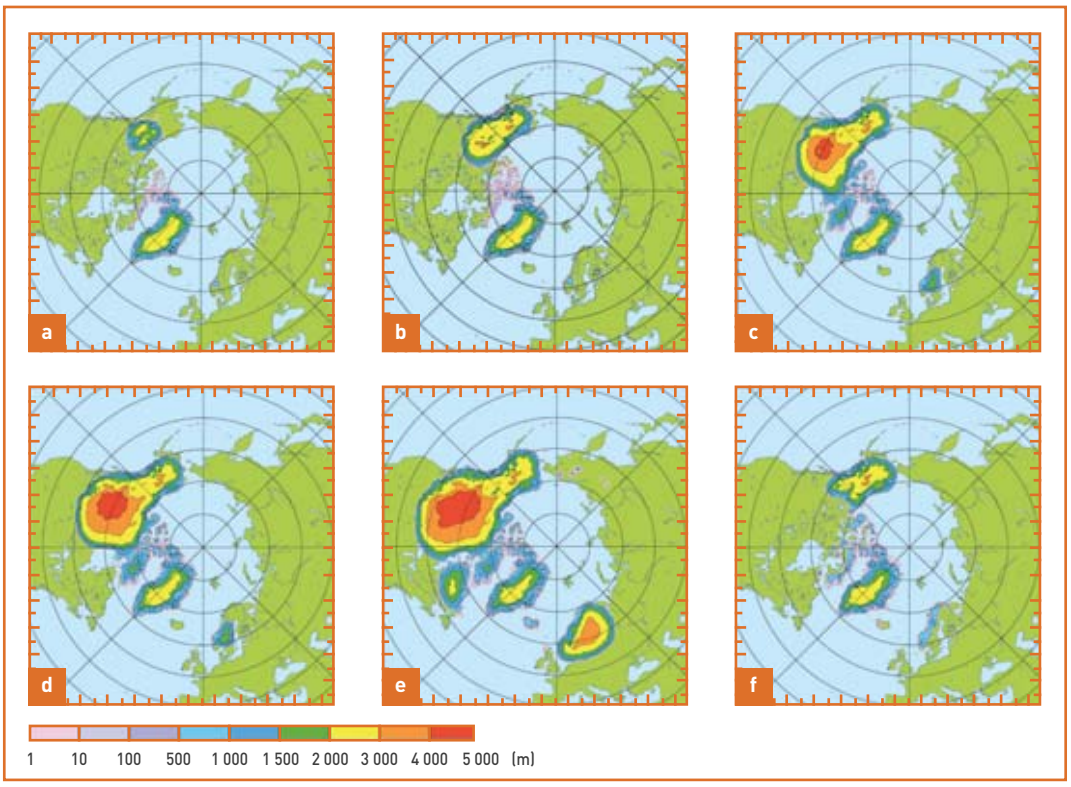


Figure 2.
Reconstruction de l'épaisseur (en m) et de l'étendue des principales calottes dans l'hémisphère Nord au cours du dernier cycle climatique. Six périodes-clés sont représentées :
a) 110 000 ans BP – *Before Present* ou avant le présent – (présence d'une première calotte significative sur l'Amérique du Nord) ;
b) 75 000 ans BP (avant la formation de la calotte Fennoscandienne) ;
c) 60 000 ans BP (après la formation d'une première calotte significative sur l'Europe du Nord) ;
d) 30 000 ans BP (avant une nouvelle poussée des calottes) ;
e) 20 000 ans BP (dernier maximum glaciaire) ;
f) 0 an (période actuelle – préindustrielle).

bone. En effet, lorsqu'une importante masse continentale se situe dans les régions tropicales, les précipitations sont intenses et l'altération maximale : de grandes quantités de **dioxyde de carbone** (CO_2) atmosphérique sont ainsi transportées jusqu'à l'océan. Les précipitations vont incorporer du CO_2 atmosphérique et devenir acides. Elles vont alors altérer les sols et, *via* les rivières, transporter ce carbone vers les océans où il va sédimenter sur les fonds marins. Par contre, si la masse des continents se situe à hautes latitudes, le CO_2 atmosphérique est moins pompé par précipitation et altération des sols, et donc se stabilise à des valeurs plus élevées. Ainsi, lorsque les continents sont à plus basse latitude, le CO_2 atmosphérique aura tendance à diminuer, et inversement. Le CO_2 se comporte alors comme un régulateur thermique. Un autre aspect de la tectonique des plaques n'est pas lié à la dérive horizontale des continents, mais aux déformations verticales (surrections – soulèvements lents – de chaînes de montagnes) qui modifient la circulation atmosphérique et le climat (encadré 3).

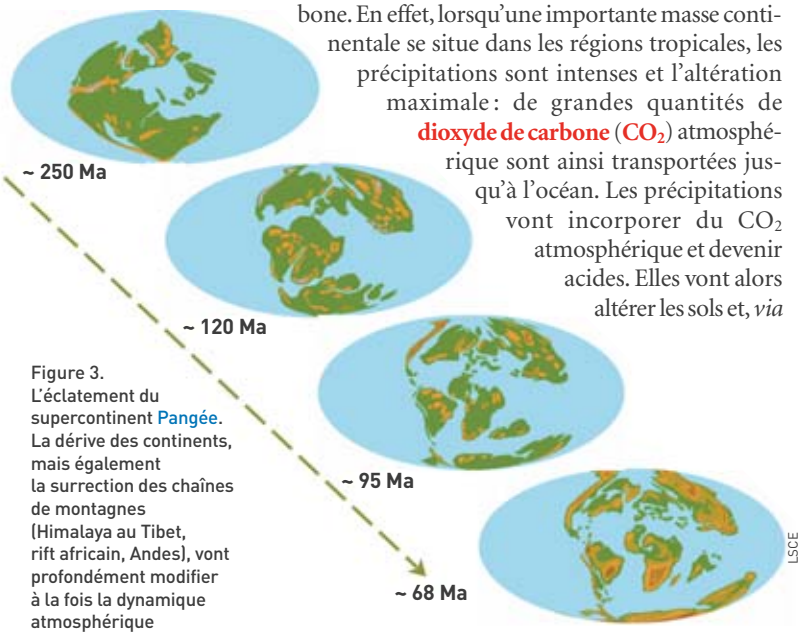


Figure 3.
L'éclatement du supercontinent Pangée.
La dérive des continents, mais également la surrection des chaînes de montagnes (Himalaya au Tibet, rift africain, Andes), vont profondément modifier à la fois la dynamique atmosphérique et océanique, et le cycle du carbone *via* les changements d'altération. Ces modifications à long terme du visage de la Terre sont les premiers facteurs à prendre en compte pour restituer le climat à l'échelle du million d'années (Ma).

Se doter d'une palette de modèles climatiques

Si l'échelle de temps conditionne le nombre de composantes à prendre en compte, un autre aspect concerne la complexité des modèles. En effet, un

Simuler le scénario *East Side Story* et surrection du rift africain

3

La belle histoire du paléontologiste et paléoanthropologue français Yves Coppens, qui explique le bipédisme et l'existence d'hominidés [1] seulement à l'est du rift africain [2] par le fait que cette surrection a asséché l'Est africain au point d'y faire disparaître les arbres, est battue en brèche par la découverte de Toumaï [3] à l'ouest du rift... Il n'empêche que la **modélisation** des **climats** permet de vérifier quel fut l'impact de la surrection du rift sur le climat. En couplant le modèle de climat à un modèle de végétation, il est ainsi possible d'évaluer les changements d'environnement. Un modèle zoomé sur l'Afrique a donc été utilisé (figure). Il montre, en effet, que la surrection du rift s'accompagne d'une aridification très importante de l'Afrique de l'Est et de la diminution des surfaces boisées.

(1) Les hominidés forment une famille d'espèces regroupant la plupart des grands primates tels que l'homme, le chimpanzé, le bonobo ou le gorille, ainsi qu'un certain nombre d'espèces éteintes, ancêtres ou non de la lignée humaine.

(2) La vallée du rift africain s'étend du sud de la mer Rouge (au nord) au Zambèze (au sud) sur plus de 9 500 km de longueur, 40 à 60 km de largeur et quelques centaines à plusieurs milliers de mètres de profondeur.

(3) Hominidé de 6 à 7 millions d'années, le plus ancien représentant connu de la lignée humaine et proche des derniers ancêtres communs aux chimpanzés et aux hommes.

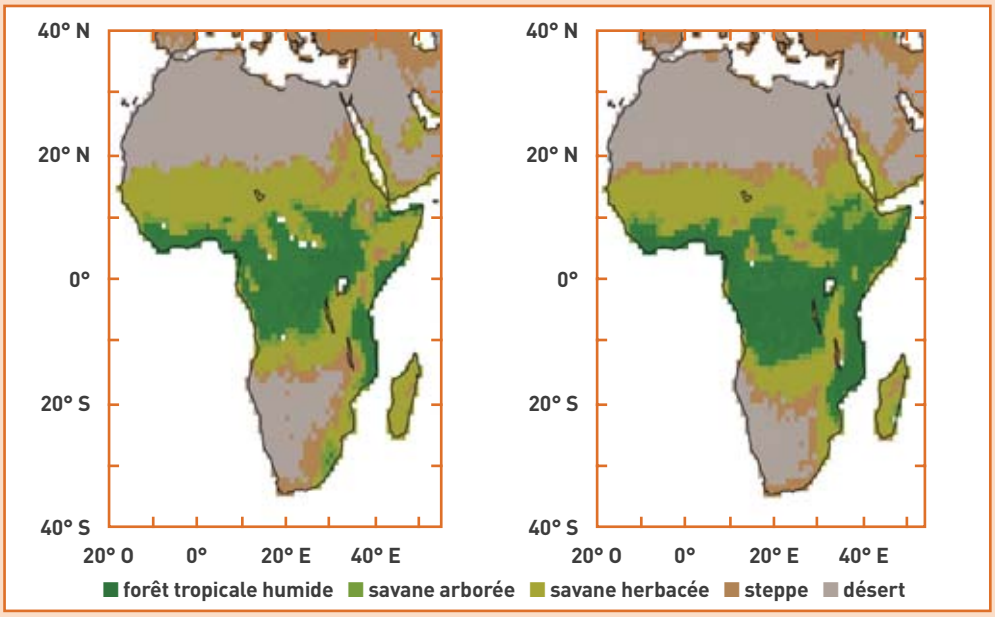


Figure.
Le modèle de climat est couplé à un modèle de biome (végétation). À gauche, la végétation actuelle ; à droite, la végétation sans le rift.

Le climat du prochain siècle

4

Quand il s'agit de **modéliser** le changement **climatique** à venir, par exemple celui du XXIe siècle, s'ajoute à l'incertitude du modèle lui-même celle des scénarios d'émissions de CO_2. Comme expliqué précédemment, les modèles de circulation générale (MCG) utilisés dans cet exercice sont d'une complexité telle et d'une **résolution spatiale** suffisamment fine, pour que seules un certain nombre de trajectoires (de scénarios) soient étudiées. Des intercomparaisons, où tous les modèles impliqués simulent le climat du XXIe siècle avec les mêmes scénarios, ont été conduites. La figure présente les résultats obtenus. Il s'agit du modèle couplé océan-atmosphère. Il n'y a pas de végétation dynamique, ni de chimie et d'**aérosols**, ni de modélisation de la **cryosphère**. Ces ingrédients seront inclus lors des prochains scénarios. Néanmoins, tous ces modèles, dans leur diversité, révèlent un accroissement de la température globale compris entre 2 et 6 °C. Or, ces augmentations sont considérables quand on sait qu'entre un état **glaciaire** et un état **interglaciaire** la différence n'est que de 4 °C.

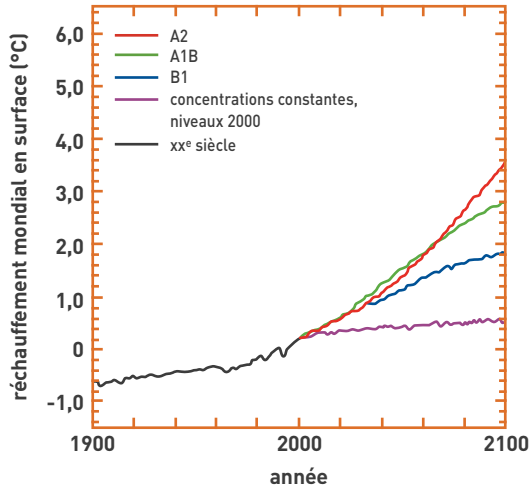


Figure. Moyennes mondiales multi-modèles du réchauffement en surface (par rapport à la période 1980-1999) pour les scénarios A2, A1B et B1 du Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (RSSE) du GIEC, dans la continuité des simulations relatives au XXe siècle. La courbe violette correspond au cas où les concentrations se maintiendraient aux niveaux de 2000.

A2 : monde très hétérogène, croissance démographique continue, croissance économique par habitant et développement technologique plus fragmentés et plus lents que dans les autres scénarios.

A1B : croissance économique rapide, pic démographique vers le milieu du siècle suivi d'un déclin, introduction rapide de nouvelles technologies plus efficaces et équilibre entre toutes les sources énergétiques.

B1 : monde convergent avec la population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, introduction de technologies propres utilisant les ressources avec efficacité et discernement.

(Voir http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm-fr.pdf, page 18).

GIEC

modèle tridimensionnel de circulation générale – incluant atmosphère, océan, végétation – ne peut, sur les calculateurs les plus puissants, être intégré plus de quelques centaines d'années. C'est ce qui est fait, par exemple, pour le climat du futur dans le cadre du GIEC (encadré 4). Les scénarios du GIEC permettent d'envisager plusieurs évolutions possibles pour les émissions de CO_2 avec des modèles très élaborés, qui intègrent non seulement océan-atmosphère-végétation mais également des processus plus rapides, comme la chimie et les **aérosols**. Le degré de complexité atteint est tel que seules quelques trajectoires (scénarios) de 100 ans (XXIe siècle) sont analysées. Par conséquent, pour explorer des échelles de temps plus longues, il va falloir renoncer à la complexité et faire appel à des modèles plus simples (Modèles de complexité intermédiaire EMIC, modèles en boîte…). La modélisation du climat doit donc également être "polymorphe". Suivant le type de problème posé, il est indispensable de disposer des outils appropriés. Ainsi, le développement d'un éventail de modèles et de couplages permet au LSCE de s'intéresser aussi bien aux premières glaciations de la Terre, il y a 2 milliards d'années, qu'au climat lors de l'émergence des hominidés il y a 7 millions d'années ou à la fonte irréversible du Groenland sous différents scénarios anthropiques.

> Gilles Ramstein
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement/Institut Pierre-Simon Laplace
Unité mixte de recherche CEA-CNRS-UVSQ
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

CEA-IPEV

Les calottes de glace actuelles, l'Antarctique et le Groenland, représentent environ 77 % du réservoir d'eau douce de la Terre, ce qui correspond à 70 m de niveau marin. L'Antarctique contient à elle seule 90 % de la glace sur Terre. Les modèles développés calculent les changements de géométrie des calottes en réponse à une variation climatique donnée et permettent d'évaluer la remontée du niveau des mers face à un réchauffement global. Couplés à des modèles de climat, ils offrent la possibilité d'étudier non seulement le rôle des calottes polaires dans le système climatique, mais de simuler également leurs interactions avec l'océan et l'atmosphère sur des échelles de temps de quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années. Ici, paysage antarctique.

Le GIEC. Pourquoi ? Comment ?

GIEC – photo de Jerry Meehl

Les résumés à l'intention des décideurs sont soumis à l'approbation des gouvernements en séance plénière. Les documents sont discutés ligne par ligne jusqu'à accord à l'unanimité.

Sa création et ses missions

En 1988, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) créent le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (le GIEC) avec comme mandat d'évaluer de façon impartiale les informations internationales scientifiques, techniques et socio-économiques sur l'évolution du climat [1]. Le GIEC a rendu son premier rapport en 1990. Depuis, de manière régulière, environ tous les 5-6 ans, le GIEC délivre des rapports d'évaluation qui tiennent lieu de référence pour les scientifiques et les décideurs du monde entier. Le dernier rapport du GIEC, le quatrième, est paru en 2007.

Le GIEC est organisé en trois groupes de travail, chacun mobilisant des centaines de spécialistes. Le *Groupe I* fait le point sur l'état de la recherche scientifique dans le domaine de l'évolution du climat. Pratiquement, le groupe I évalue l'ensemble des données de l'évolution observée du climat ainsi que sa modélisation pour le XXe et XXIe siècle. Le *Groupe II* traite des impacts des changements climatiques sur différents secteurs (eau, écosystèmes, agriculture, santé...) et des possibilités de s'y adapter. Enfin, le *Groupe III* examine les moyens de réduction des gaz à effet de serre et d'atténuation du changement climatique en général. À ces trois groupes principaux s'ajoutent des groupes de travail spécifiques, pour les inventaires nationaux d'émissions des gaz à effet de serre ou certains sujets techniques (séquestration du carbone, transport aérien, couche d'ozone...).

(1) Voir http://www.ipcc.ch/.

Un fonctionnement unique en son genre

Le fonctionnement du GIEC s'appuie sur une base scientifique, mais il passe également par une interaction entre scientifiques et responsables gouvernementaux. Typiquement, un cycle du GIEC se déroule comme suit. Les délégués gouvernementaux décident en séance plénière de la réalisation d'un rapport, de sa structure générale (nombre de groupes), des présidents du GIEC et de ses groupes, ainsi que de son échéance. Les présidents des groupes réunissent des experts lors de quelques réunions de réflexions *(scoping meetings)* afin de définir une trame générale du rapport. Des auteurs de chapitres sont alors choisis parmi la communauté scientifique internationale. Ces auteurs vont ensuite se réunir tous les six mois pendant deux ans afin de rédiger le rapport. Les versions intermédiaires du rapport *(drafts)* sont mises à la disposition de la communauté scientifique pour relecture. La dernière version du rapport ainsi que le résumé à l'intention des décideurs qui fait une quinzaine de pages sont relus par la communauté scientifique à nouveau, mais également par les représentants gouvernementaux des différents États membres de l'OMM ou du PNUE. Pour avoir un ordre de grandeur, pour la préparation du rapport du groupe I, pas moins de trente mille commentaires ont été soumis par les scientifiques et les gouvernements. Les auteurs du rapport se doivent de répondre à chacun de ces commentaires. Des "éditeurs" sont en charge de vérifier ce processus de relecture. Finalement, le résumé à l'intention des décideurs est soumis à l'approbation des gouvernements en séance plénière. Cette assemblée est composée des représentants des États, de représentants observateurs d'organisations non gouvernementales, et des deux scientifiques coprésidents du groupe de travail du GIEC, entourés de leurs auteurs principaux. Pendant une semaine, parfois jour et nuit, le document est discuté ligne par ligne jusqu'à accord à l'unanimité. C'est lors de cette épreuve que l'on parle de consensus entre les scientifiques et les gouvernements. Depuis la création du GIEC, tous les rapports ont été adoptés en séance plénière par l'ensemble des 192 pays représentés dans l'assemblée du GIEC.

Consensus et transparence

Cette approche par consensus a parfois été critiquée par les "climato-sceptiques", c'est-à-dire ceux qui mettent en doute la réalité du changement climatique ou de son origine, à savoir l'activité humaine. Leur argument est le suivant : en science, il n'y a pas de consensus, il n'y a pas de pensée unique ; au contraire, il y a un débat d'idées permanent et une perpétuelle remise en question des acquis. C'est tout à fait exact, et les travaux du GIEC s'inscrivent pleinement dans cette définition. Pendant deux ans, les coprésidents de chaque groupe, entourés de leurs auteurs, recensent l'ensemble de la connaissance dans

le domaine. Ils le font dans une transparence totale. Non seulement les textes sont mis sur le Web, mais également les remarques des nombreux rapporteurs et les réponses des auteurs à ces remarques. Les incertitudes et les controverses non résolues sont clairement présentées dans les volumineux rapports. Seul le *résumé pour les décideurs*, qui fait une quinzaine de pages, est discuté lors des assemblées plénières. L'objectif de cette séance plénière est de produire un document, le *résumé pour les décideurs*, qui ait à la fois l'aval des scientifiques qui l'ont préparé et celui des États membres qui vont le cosigner. Le texte se doit donc d'être dans un langage compréhensible et sans ambiguïté pour les non-scientifiques. Les États membres font des propositions de modifications de texte, essentiellement au niveau de la forme, le fond, c'est-à-dire le contenu scientifique, n'étant généralement pas remis en question par les représentants des gouvernements. De toute façon, les coprésidents du rapport recueillent l'aval des responsables du chapitre en lien avec le texte discuté avant d'entériner une modification du résumé.

Un cinquième rapport d'évaluation pour 2013-2014

La force du GIEC réside, d'une part, dans ses rapports longs qui sont une source précieuse d'informations pour la communauté scientifique et, d'autre part, dans le rapport pour les décideurs qui, de par son processus d'approbation en séance plénière, engage pleinement les États membres. Les gouvernements ne peuvent plus prétendre ne pas avoir l'information pertinente ; ils l'ont approuvée. L'action politique nécessaire à la limitation du changement climatique est donc entre leurs mains.
C'est cette double approche qui a valu aux membres du GIEC de se voir décerner le prix Nobel de la Paix en 2007 "pour leur effort pour rassembler et disséminer la connaissance du changement climatique anthropique et pour établir les fondations pour les mesures qui sont nécessaires pour le contrecarrer".

GIEC – photo de Odd-Steinar Tollefsen

Le GIEC et l'ancien vice-président américain Al Gore ont obtenu le prix Nobel de la Paix en 2007. Ce prix leur a été conjointement décerné pour leurs efforts de collecte et de diffusion des connaissances sur les changements climatiques provoqués par l'homme et pour avoir posé les fondements des mesures nécessaires à la lutte contre ces changements.

De fait, le *premier rapport*, publié en 1990, a conduit l'Assemblée générale des Nations unies à élaborer une convention-cadre sur les changements climatiques, entrée en vigueur en 1994. Le *deuxième rapport*, sorti en 1995, a fourni les éléments de base aux négociations du protocole de Kyoto [2], dans le cadre de la convention. Le *troisième rapport*, paru en 2001, a confirmé la responsabilité humaine dans le réchauffement constaté au cours de la seconde moitié du XXe siècle. Il prévoit notamment une aggravation du phénomène conduisant à un réchauffement moyen global de plusieurs degrés entre 1990 et 2100. Enfin, les conclusions du *quatrième rapport* ont été rendues publiques en 2007, avant la conférence des parties de Bali (Indonésie), et encadrent les négociations internationales en cours sur les suites à donner au protocole de Kyoto qui expire fin 2012.
Lors de la session du GIEC, qui s'est déroulée en Hongrie à Budapest en avril 2008, il a été décidé de préparer un *cinquième rapport*. Celui-ci sera publié dans 6 ans. En parallèle, des actions effectives devraient être mises en place au niveau international afin de s'adapter aux conséquences du changement climatique à venir, mais surtout d'œuvrer à la réduction des émissions des gaz à effet de serre : c'est le seul moyen pérenne pour limiter l'amplitude de ce changement climatique.

(2) Protocole de Kyoto : un des trois traités internationaux sur lesquels repose la gouvernance internationale sur le climat. Il propose un calendrier de réduction des émissions des six gaz à effet de serre considérés comme la principale cause du réchauffement climatique des cinquante dernières années. Il comporte des engagements absolus de réduction des émissions pour 38 pays industrialisés, avec une réduction globale de 5,2 % des émissions de **dioxyde de carbone** d'ici 2012 par rapport aux émissions de 1990.

> Pierre Friedlingstein
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement/
Institut Pierre-Simon Laplace
Unité mixte de recherche
CEA-CNRS-UVSQ
Direction des sciences de la matière
Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Les apports de la **géochronologie** à la connaissance du **climat**

Pour reconstruire l'évolution du climat d'une période donnée et replacer les événements dans un cadre chronologique global, l'exploitation des archives climatiques impose de jongler entre des méthodes de datation très variées. La mesure de la radioactivité par différentes techniques y joue souvent un rôle central.

P. Stroppa/CEA

Vue générale du spectromètre de masse par accélérateur Artémis, installé sur le Centre de Saclay, qui permet la datation par le carbone 14 d'échantillons jusqu'à environ 50 000 ans. Grâce aux diverses techniques de datation, toutes les informations issues des archives climatiques vont s'assembler, telles les pièces d'un puzzle, et se conforter pour reconstruire l'évolution climatique d'une période donnée.

Le **climat** de la **Terre** varie naturellement avec des constantes de temps allant de plusieurs centaines de millions d'années à la saison. Dès le XIXe siècle, les géologues avaient apporté la preuve de l'existence de **périodes glaciaires** et **interglaciaires** dans le passé, en identifiant de vastes dépôts morainiques (1) au nord des continents américain et européen. Il restait cependant à connaître l'âge de ces changements climatiques qui caractérisent le **Pléistocène**, époque du **Quaternaire** couvrant environ 1,8 million d'années. Ceci devint possible avec la découverte et la mise au point de méthodes de mesures précises de la **radioactivité**, et le développement des techniques de carottages **sédimentaires** toujours plus profonds, que ce soit sur le continent, dans l'océan ou dans les glaces pour "remonter" le temps.

La géochronologie a pour objectif essentiel de replacer l'évolution de la Terre, et donc du climat, dans un cadre spatio-temporel unitaire. Elle est aussi une aide précieuse à la prévision de l'évolution du climat, car elle rend possible de confronter les différentes théories émises sur les causes et les mécanismes de la variation des climats passés. La réalisation de ce cadre chronologique global n'est pas simple, car elle repose sur un large éventail de méthodes de datation et sur leur croisement, ce qui permet de tester la validité des âges obtenus pour un même événement. Une difficulté supplémentaire réside également dans la diversité des matériaux *datables*, qui vont des **cristaux** inorganiques, quartz, feldspath, calcite ou aragonite (2), aux restes **biogéniques**, tels les coquillages, les tests (ou squelettes) de **foraminifères** ou bien les végétaux.

(1) Moraine : amas de débris minéraux transportés par un glacier ou par une nappe de glace et qui, au moment de la fonte, sont déposés, généralement à la même altitude, formant un empilement rocheux.

(2) Le **carbonate de calcium** ($CaCO_3$), constituant majeur du calcaire, de la craie, du marbre mais également des coquilles d'animaux marins et des escargots, cristallise naturellement sous deux formes principales : l'aragonite et la calcite.

Aurélie Van Toer-LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Le carottier Calypso à bord du navire de recherche "Le Marion Dufresne". La mise au point de techniques de carottages sédimentaires toujours plus profonds permet de remonter l'échelle des temps.

Les techniques de datation appropriées au Pléistocène

Les méthodes de datation appliquées au **paléoclimat** du Pléistocène sont généralement subdivisées en deux groupes : les *méthodes de datations absolues*, incluant les mesures de la radioactivité *sensu lato*, et les *méthodes relatives*. Ces dernières sont basées sur la corrélation de signaux physico-chimiques ou biologiques qui sont caractéristiques à l'échelle globale ou régionale dans les archives sédimentaires. Dans les faits, elles bénéficient des avancées de chacune d'entre elles. Les méthodes s'appuyant sur la radioactivité s'adressent à la datation d'événements ponctuels mis en place dans des temps géologiquement courts, identifiables ou non à l'échelle du globe. Ces datations servent de cadre chronologique à l'élaboration des échelles de temps relatives.

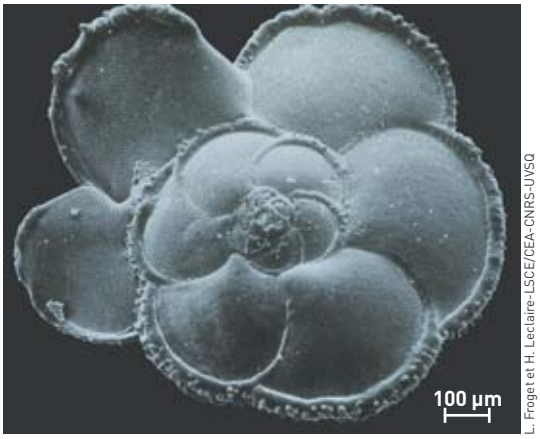
Compter avec la dendrochronologie

Les âges absolus ou *calendar ages* sont obtenus à partir du comptage direct de formations annuelles. Ce comptage est appliqué aux cernes de croissance annuelle des arbres par la *méthode de dendrochronologie*, aux dépôts annuels, bi-saisonniers, ou varves (3) dans les sédiments lacustres et marins, ou bien encore à ceux des couches de neige.

Mesurer la radioactivité naturelle

Avec le temps, les **atomes** radioactifs se **désintègrent** en formant des **nucléides** stables ou eux-mêmes radioactifs, lesquels se désintégreront à leur tour pour donner d'autres nucléides, et ainsi de suite. Les **périodes** de désintégration diffèrent selon les nucléides, ce qui permet d'appréhender la variabilité climatique sur plusieurs gammes de temps. Les nucléides radioactifs naturels sont présents sur la Terre depuis sa formation, tels l'**uranium 238** (^{238}**U**), l'**uranium 235** (^{235}**U**) et le **thorium 232** (^{232}**Th**), ou le potassium 40 (^{40}K), ou bien ils sont produits continuellement par l'action du **rayonnement cosmique** sur des **noyaux** dans la haute **atmosphère**, comme le **carbone 14** (^{14}**C**) et le béryllium 10 (^{10}Be), appelés pour cette raison *isotopes cosmogéniques*.

Les ***méthodes potassium-argon (K/Ar)*** et ***argon-argon (Ar/Ar)*** sont adaptées aux minéraux riches en potassium, notamment dans les roches volcaniques, et permettent de dater des événements avec des précisions de 0,5 % à 1 %. Les *techniques reposant sur les séries de l'uranium*, et ses descendants, impliquent un grand nombre de **radionucléides** de périodes différentes. Ces méthodes sont typiquement utilisées pour dater les matériaux du Pléistocène avec des précisions de l'ordre du pour cent. Elles sont appliquées aux coraux, qui enregistrent les varia-



L. Froget et H. Leclaire-LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Globorotalia menardii fimbriata, foraminifère planctonique évoluant dans les eaux superficielles des océans. Des foraminifères vivent et meurent dans les eaux océaniques. Leurs coquilles sont retrouvées dans les sédiments marins.

(3) Varve (du suédois *varvig* signifiant rayé) : sédiment lacustre fait de dépôts alternativement fins et grossiers, déposé en avant des glaciers.

LSCE

P. Stroppa/CEA

Le principe de la datation par le carbone 14 repose sur le fait que dans tout être vivant, le rapport de la concentration en ^{14}C à la concentration en ^{12}C est le même que dans le **dioxyde de carbone** atmosphérique. À sa mort, les échanges cessent. Le carbone 14 n'est plus renouvelé et sa radioactivité décroît avec une période de 5 730 ans. En mesurant l'**activité** en ^{14}C de l'échantillon, il est possible d'en déduire son âge. La méthode par spectrométrie de masse par accélérateur présente l'avantage de n'utiliser que quelques centaines de microgrammes de carbone pour une analyse. Les échantillons, par exemple des foraminifères, sont traités chimiquement pour en extraire le carbone qui sera purifié sous forme de CO_2. Le dioxyde de carbone sera ensuite réduit pour être transformé en graphite. Ici, mise en place des ampoules de CO_2 sur le banc de réduction de l'installation Artémis. En haut à gauche, cible de graphite (de diamètre 1 mm environ).

tions du niveau marin et les changements physico-chimiques des masses d'eau océanique, ainsi qu'aux stalagmites, qui archivent les conditions thermiques et pluviométriques. D'autres nucléides, comme le plomb 210 (^{210}Pb) ou le radium 226 (^{226}Ra), rendent possible de dater des événements plus récents, en raison de leur période respective de 22 ans et 1 600 ans. Ils sont adaptés aux minéraux inorganiques et biogènes ainsi qu'aux restes organiques. Ces techniques s'appuient sur la mesure des radionucléides initiaux et de leurs descendants, ce qui n'est pas envisageable pour la *méthode par le carbone 14*. En effet, ce nucléide se désintègre avec une période de 5 730 ans en azote 14 (^{14}N), et ce dernier ne peut être distingué de l'azote 14 de l'air ($^{14}N/N \sim 0{,}99$). De plus, la teneur en ^{14}C de l'atmosphère a varié au cours du temps, en raison des fluctuations de l'activité solaire, du champ magnétique terrestre, du temps de résidence et des échanges de carbone 14 entre les différents réservoirs de **carbone**. Les âges mesurés par datation par le carbone 14 présentent donc un écart avec les âges absolus. Le croisement des mesures ^{14}C avec les âges dendrochronologiques ou avec ceux obtenus à partir d'autres nucléides radioactifs, principalement le couple $^{230}Th/U$, donne accès à la quantification précise de cet écart, ou calibrage. Cette méthode, qui a valu le prix Nobel de Chimie à l'Américain Willard Frank Libby en 1960, permet de dater jusqu'à 50 000 ans environ, avec des précisions de l'ordre de 0,5 % à 2 % en fonction de l'âge, des échantillons provenant des milieux océaniques, tels les foraminifères, coraux, coquillages, et des milieux continentaux, avec les cristaux inorganiques et biogènes (aragonite, calcite) et les restes organiques (graines, bois, charbons, insectes).

Aux mesures d'âge basées sur la **radioactivité naturelle** se sont ajoutés des marqueurs temporels radioactifs. En effet, certains nucléides ont été injectés en grandes quantités dans l'atmosphère lors des essais nucléaires au début des années 1960, comme le ^{14}C, le césium 137 (^{137}Cs) – de période 30 ans –, ou le **tritium** – de période 12 ans –, ou bien encore lors de l'accident de Tchernobyl (Ukraine) en 1986 pour le ^{137}Cs.

Norbert Frank-LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Les coraux sont des archives climatiques précieuses car ils enregistrent les variations du niveau marin et les changements physico-chimiques des masses d'eau océanique. Ils peuvent être datés entre autres par les méthodes ^{14}C et $^{230}Th/U$.

Tirer profit de la désintégration de radionucléides

Les *méthodes radiogéniques* s'appuient sur les défauts physiques laissés dans les minéraux, comme les traces de **fission** engendrées par les noyaux de recul (4)

(4) La scission du noyau d'uranium 238 en deux fragments (fission) libère une énergie, qui s'exprime principalement sous forme d'énergie cinétique. Les fragments sont éjectés à travers le matériau en créant des zones de dommage intense, appelées traces.

lors de la désintégration de l'uranium 238. Cette technique renseigne essentiellement sur l'histoire thermique des roches, avec un domaine d'applicabilité sur les verres volcaniques qui constituent des marqueurs temporels régionaux uniques reliant les différentes archives sédimentaires. Elles concernent aussi les méthodes de **luminescence** stimulée optiquement (OSL) ou thermiquement (TL) qui consistent en une **dosimétrie** des radiations internes et externes subies naturellement par les cristaux en raison de la présence de nucléides radioactifs (^{238}U, ^{232}Th et ^{40}K) contenus dans un cristal et son environnement. Ces techniques de luminescence s'appliquent aux cristaux de quartz et feldspaths inclus dans les roches volcaniques, les sédiments marins, les formations dunaires et les formations glaciaires lœssiques (5). Elles sont théoriquement adaptées au Pléistocène avec des précisions de l'ordre de 5 % en moyenne.

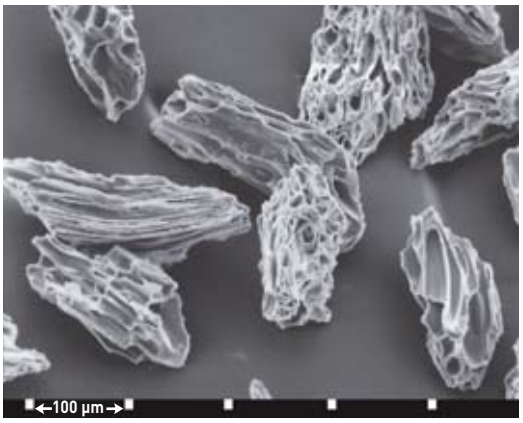
Corréler les signaux similaires

Les *méthodes de chronologie relative* sont basées sur la corrélation de séries sédimentaires qui présentent des caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques communes identifiables dans des contextes régionaux ou globaux. Ainsi, les variations de la composition isotopique de l'oxygène des carbonates d'origine marine et continentale ou celles du **CO_2** piégé dans les bulles d'air des glaces montrent à l'échelle du globe des oscillations quasi-périodiques, attribuées aux changements d'insolation de la Terre au cours du temps. Celle-ci est en effet modifiée en fonction des paramètres orbitaux de la Terre (6) dont l'orbite varie avec des cycles de 100 000 ans *(excentricité)*, ainsi que l'inclinaison de son axe de rotation avec l'*obliquité* (40 000 ans) et la *précession* (23 000 ans et 19 000 ans). Les variations d'insolation peuvent être calculées très précisément pour les temps passés, et les variations climatiques à long terme sont ainsi datées grâce à leur corrélation avec les cycles astronomiques de l'insolation. Cette méthode de corrélation ou *orbital tuning* a permis de dater les séries sédimentaires sur les derniers 25 millions d'années avec une précision de l'ordre de quelques pour cent.

De même, la polarité et l'intensité du champ magnétique terrestre ont varié au cours du temps. Leur étude à partir de roches volcaniques datées par les méthodes K/Ar et Ar/Ar a permis d'établir une chronologie de référence couvrant les derniers 100 millions d'années (*Geomagnetic Polarity Time Scale*, GPTS). Au cours du Pléistocène, se sont produites les inversions de polarité de Jaramillo (~ 1,8 million d'années) et Brunhes-Matuyama (760 000 ans) ainsi que les excursions – instabilités de plus courte durée – tels, par exemple, les événements du Blake (115 000 ans), Laschamp (41 000 ans) et Mono Lake (~ 30 000 ans). Les variations d'intensité du champ magnétique sont enregistrées en continu dans les sédiments marins, et la similitude de ces variations aux échelles globales ou régionales a permis d'établir des courbes **chronostratigraphiques** de référence s'étendant jusqu'à environ 800 000 ans, grâce à l'identification et à la datation des inversions et excursions du champ magnétique. De même, l'archéomagnétisme, qui mesure le magnétisme rémanent d'objets historiquement connus, propose une méthode de datation d'objets couvrant les derniers 2 000 ans. Les formations de sapropèles dans l'environnement méditerranéen, dépôts enrichis en matière organique, ainsi que les produits des éruptions volcaniques ou tephra constituent autant de marqueurs temporels visant à l'élaboration d'un cadre chronologique unifié.

P. Bazoge/CEA

Mesure de l'aimantation rémanente d'un échantillon de sédiments marins.
Les sédiments acquièrent une aimantation rémanente lorsque, au moment de leur dépôt, des microparticules dotées d'un moment magnétique s'orientent statistiquement dans le champ magnétique ambiant. Les sédiments peuvent donc renseigner sur la direction et l'intensité du champ magnétique terrestre passé.

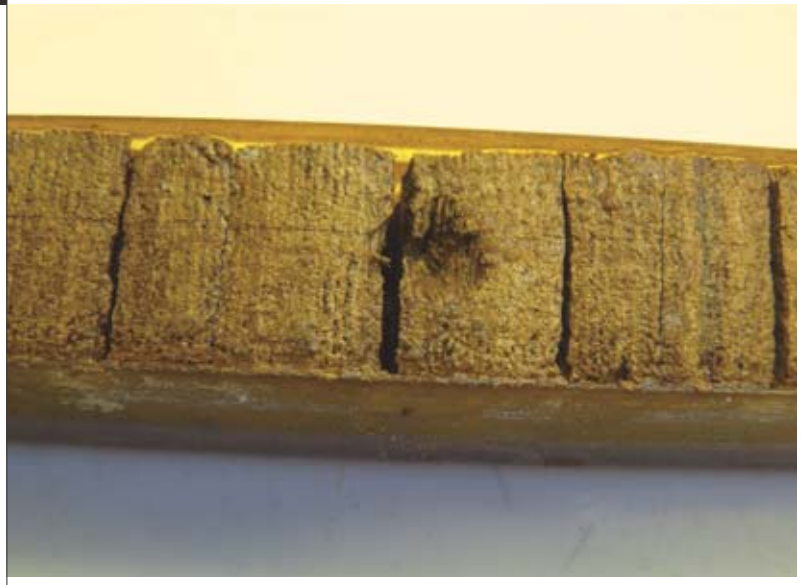


LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Image obtenue par microscopie électronique à balayage de verres volcaniques prélevés dans un tephra. Ces marqueurs temporels participent à l'élaboration d'un cadre chronologique global.

(5) Lœss : roche sédimentaire détritique meuble résultant, au cours du Pléistocène, de l'accumulation au sol, sous climat froid et sec, de limons transportés par le vent depuis des zones sources (alluvions, dépôts fluvio-glaciaires, sédiments côtiers et estuariens, zones arides) soumises à une érosion éolienne. Il est principalement formé de quartz détritique et de carbonate de calcium.

(6) Les paramètres orbitaux de la Terre définissent sa position dans l'espace par rapport au Soleil. La Terre est soumise à l'attraction du Soleil mais aussi des autres planètes du système solaire, ce qui a pour effet de perturber son mouvement. Trois types de modifications affectent la position de la Terre par rapport au Soleil : l'ellipse décrite par la Terre se déforme *(excentricité)* ; l'axe de rotation de la Terre observe une inclinaison par rapport à la normale au plan de l'écliptique (le plan qui contient l'orbite terrestre ainsi que le Soleil), selon un angle qui varie entre 22° et 25° *(obliquité)* ; cet axe de rotation subit de ce fait un lent mouvement de déplacement *(précession)*, décrivant un cône autour de la normale à l'écliptique, d'ouverture égale à l'obliquité (actuellement égale à 23° 27'), et dont le sommet est au centre de la Terre. Ce qui a pour conséquence que les positions des équinoxes et des solstices, sur l'orbite terrestre, se déplacent graduellement, par rapport au périhélie (qui est le point d'insolation maximale).



Michel Fontugne-LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Les dépôts varvés sont préservés dans les sédiments en raison de la quasi-absence d'oxygène, et donc d'organismes fouisseurs au fond des lacs ou bassins océaniques dans lesquels ils sont observés. Chaque varve est constituée de deux lamines : une claire déposée l'été et une noirâtre l'hiver, le rythme de ces dépôts étant annuel. Les lamines de couleur claire se forment pendant l'été lorsque la sédimentation est la plus active du fait que l'alimentation par les eaux de fonte des glaciers est élevée. Le comptage de ces lamines dans les lacs proglaciaires (lacs au front d'un glacier en récession) permet de dater les sédiments jusqu'à 13 000 ans environ. En associant ces comptages à la datation par le carbone 14 des pollens, graines ou restes d'insectes inclus dans ces sédiments, il devient ainsi possible d'estimer la différence entre les âges carbone 14 et les âges absolus. Ici, une carotte de sédiments varvés extraite du lac Perespilno en Pologne.

Des mécanismes climatiques mieux compris

La théorie astronomique des climats, émise pendant le XIXe siècle par le mathématicien français Joseph-Alphonse Adhémar et développée par la suite en particulier grâce aux calculs d'insolation effectués par le mathématicien et astronome serbe Milutin Milankovitch entre 1920 et 1940, a longtemps été rejetée par la communauté scientifique. Les premières preuves en faveur de cette théorie proviennent de datations ^{230}Th/U de coraux récifaux, prélevés dans les terrasses coralliaires de l'île Barbade (Petites Antilles). Dès 1968, le paléo-océanographe américain Wallace Smith Broecker et ses collègues avaient démontré que les âges de trois épisodes de haut niveau marin, résultant de la fonte des glaces à 80 000 ans, 100 000 ans et 120 000 ans, correspondaient à ceux d'une insolation maximale dans l'hémisphère Nord. Cette théorie fut définitivement acceptée après que James D. Hays, John Imbrie et Nicholas John Shackleton eurent démontré, en 1976, l'existence de cycles astronomiques à partir des variations isotopiques de l'oxygène des foraminifères prélevés dans des carottages du Pacifique Sud avec les périodicités de 106 000 ans, 43 000 ans, 24 000 ans et 19 000 ans. La chronologie de ces variations reposait sur des âges obtenus par les méthodes carbone 14, Th/U et K/Ar, l'âge K/Ar datant le renversement de polarité du champ magnétique Brunhes-Matuyama à environ 700 000 ans.

La géochronologie a aussi contribué à modifier notre compréhension du fonctionnement de la boucle de circulation océanique globale, qui décrit la formation des eaux profondes dans l'océan Nord Atlantique, puis leur trajet vers l'océan Pacifique et enfin leur retour en surface vers l'océan Atlantique. Des fluctuations rapides du climat ponctuent la dernière période glaciaire et la **déglaciation**, avec les **événements** froids du **Dryas récent** et **de Heinrich** ou bien les alternances climatiques chaudes et froides des **événements de Dansgaard/Oeschger**. Elles étaient expliquées par un mode "on" ou "off" de la formation des eaux profondes dans l'océan Nord Atlantique, le mode "off" ayant pour effet de limiter les transferts de chaleur dans l'océan et les échanges entre l'océan et l'atmosphère aux hautes latitudes. Ce scénario a été infirmé, notamment grâce aux mesures précises de la teneur en ^{14}C de l'atmosphère, obtenue au cours de la déglaciation par le croisement des âges ^{14}C et des âges absolus déduits du comptage des varves sédimentaires déposées annuellement dans le bassin de Cariaco, Venezuela (7). Le CO_2 de l'atmosphère est transféré vers les couches profondes de l'océan *via* la circulation océanique et, en raison de la très faible abondance du ^{14}C ($^{14}C/C \sim 10^{-14}$), la teneur en $^{14}CO_2$ de l'atmosphère est très sensible au taux de formation des eaux profondes. Au cours de l'événement climatique froid du Dryas récent, dont la durée est d'environ 1 200 ans calendaires, la teneur en ^{14}C de l'atmosphère a d'abord augmenté pendant les premiers 200 ans en accord avec un schéma de réduction de la formation des eaux profondes dans l'océan Nord Atlantique. Par contre, ce schéma ne pouvait expliquer la diminution du ^{14}C notée au cours des 1 000 ans suivants dans un contexte de climat froid. La synchronisation des compositions isotopiques de l'oxygène par la mesure du **méthane** dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique (8) montrait que les changements climatiques abrupts observés à la fois au Nord et au Sud étaient en opposition de phase. Lorsque l'Antarctique était plus chaud, le Groenland était froid, et inversement. Analysant ces deux résultats, Wallace Smith Broecker proposa en 1998 un schéma de bascule du transfert Nord-Sud de chaleur ou *thermal bipolar see-saw*: les périodes chaudes en Antarctique étaient l'expression de la formation d'eaux profondes dans l'océan Austral, permettant ainsi une diminution de la teneur en ^{14}C de l'atmosphère. Dans l'hémisphère Nord, un climat froid, modulé par l'arrêt de la formation des eaux profondes dans l'océan Nord Atlantique prédominait pendant le même intervalle de temps.

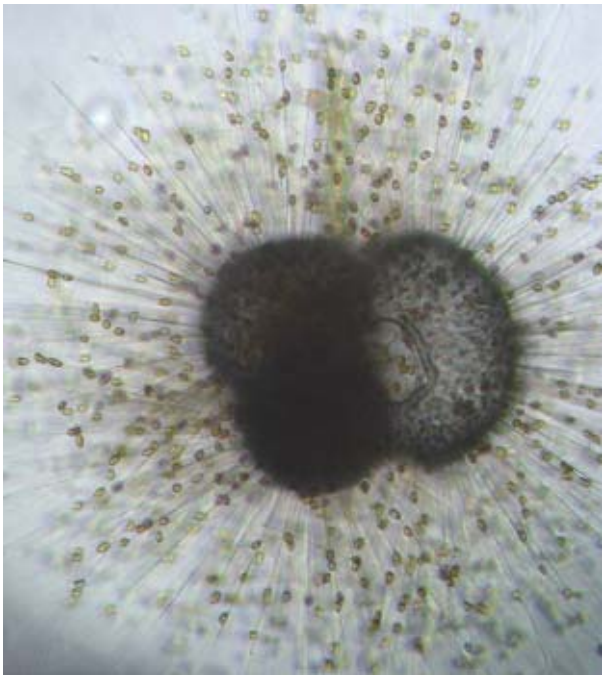
> Martine Paterne
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement/Institut Pierre-Simon Laplace
Unité mixte de recherche CEA-CNRS-UVSQ
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)

(7) K. A. Hughen, M. G. L. Baillie, E. Bard, J. W. Beck, C. J. H. Bertrand, P. G. Blackwell, C. E. Buck, G. S. Burr, K. B. Cutler, P. E. Damon, R. L. Edwards, R. G. Fairbanks, M. Friedrich, T. P. Guilderson, B. Kromer, F. G. McCormac, S. W. Manning, C. Bronk Ramsey, P. J. Reimer, R. W. Reimer, S. Remmele, J. R. Southon, M. Stuiver, S. Talamo, F. W. Taylor, J. van der Plicht and C. E. Weyhenmeyer, "Marine04 Marine radiocarbon age calibration, 0 - 26 cal kyr BP", *Radiocarbon*, 46, p. 1059-1086, 2004.

(8) T. Blunier, J. Chappellaz, J. Schwander, A. Dällenbach, B. Stauffer, T. F. Stocker, D. Raynaud, J. Jouzel, H. B. Clausen, C. U. Hammer and S. J. Johnsen, "Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period", *Nature*, 394, p. 739-743, 1998.

La **géochimie isotopique**, le thermomètre des **climats du passé**

Pour reconstruire les changements climatiques passés, l'analyse de la composition isotopique des glaces polaires et des sédiments marins, véritables archives naturelles, permet de recueillir des informations précieuses sur les variations de température et sur la circulation des océans au cours des temps géologiques. Outil incontournable, la géochimie isotopique joue un rôle majeur dans la compréhension des mécanismes climatiques.



F. Lombard-LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

L. Froget et H. Leclaire-LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Foraminifère vivant (à gauche) et coquilles de foraminifères (à droite). Lorsque le foraminifère meurt, seule la coquille carbonatée, ou test, sédimente et est préservée dans les sédiments marins. Ce sont ces tests de foraminifères qui sont triés et analysés en spectrométrie de masse pour reconstruire les variations de la composition isotopique de l'oxygène.

Les changements **climatiques** sont un sujet d'actualité depuis quelques années, les hivers sans neige succédant aux étés caniculaires, et les nombreux dérèglements climatiques suscitant des polémiques médiatiques. Pour comprendre quels sont les mécanismes gouvernant le climat de la **Terre** et replacer dans le temps les événements climatiques que nous vivons, les scientifiques analysent les enregistrements **météorologiques** obtenus par satellites ou par des mesures de terrain. Cependant, la période de temps couverte, de l'ordre de 150 ans pour les réseaux météorologiques, n'autorise pas l'étude des mécanismes dont les constantes de temps sont plus longues.

Dans ce contexte, la **paléoclimatologie** offre la possibilité de remonter sur plusieurs dizaines, centaines, milliers, voire millions, d'années. Ce sont ces études qui ont permis de mettre en évidence la forte variabilité temporelle du climat avec, en quelques milliers d'années, l'alternance entre des périodes chaudes, comparables à celle dans laquelle l'agriculture **néolithique** s'est développée, et des **périodes glaciaires**, au cours desquelles les hautes latitudes de l'hémisphère Nord étaient recouvertes d'épaisses **calottes de glace**. Mais comment reconstitue-t-on les climats du passé ? La géochimie des **isotopes stables** de l'oxygène et du carbone joue un rôle de tout premier plan. Les isotopes de l'oxygène seront ici plus spécifiquement examinés.

Les isotopes de l'oxygène, indicateurs climatiques

L'oxygène est présent dans l'air que nous respirons ou dans l'eau qui nous entoure sous la forme de plusieurs **isotopes** de masses respectives 16, 17 ou 18, selon le nombre de **neutrons** compris dans le **noyau**. Ces isotopes partagent les mêmes propriétés chimiques mais diffèrent par les propriétés physiques liées à leurs masses. Le rapport $^{18}O/^{16}O$ sur Terre de n'importe quel corps renfermant de l'oxygène va être proche de 0,2 %, mais il n'est pas rigoureusement constant. Par exemple, le rapport isotopique d'une masse d'eau donnée va dépendre des phénomènes d'*évaporation-précipitation*. En effet, l'isotope le plus léger s'évapore plus facilement que l'isotope le plus lourd qui, lui, se condense plus aisément dans les pluies. La composition isotopique de la glace dans les forages polaires ou tropicaux va permettre de suivre au cours du temps l'évolution des processus

C. Morel/Our Polar Heritage

Quand l'eau de l'océan s'évapore aux basses latitudes, un nuage peut se former. Les isotopes légers (molécule d'eau contenant ^{16}O) s'évaporent plus facilement que les isotopes lourds. Lorsque le nuage se déplace de l'équateur vers les pôles, il va pleuvoir à plusieurs reprises (précipitations). Les isotopes lourds ^{18}O se condensent plus aisément dans les pluies. Le nuage va donc s'appauvrir en isotopes lourds tout au long de son trajet. La neige qui tombera sur les pôles sera par conséquent très "légère" car appauvrie en ^{18}O. Cet isotope lourd se retrouvera en revanche dans les océans, particulièrement en période glaciaire. Ici, paysage du Groenland.

physiques qui ont affecté le cycle de l'eau. Autre exemple, un organisme avec une coquille en **carbonate de calcium** ($CaCO_3$) va puiser dans l'eau de mer les **ions bicarbonate** et les **ions calcium** nécessaires à la fabrication de sa coquille. Or, les **ions carbonate** contenant les **isotopes lourds** de l'oxygène (^{18}O) ne **précipitent** pas à la même vitesse que ceux comportant les isotopes légers (^{16}O), et la différence de vitesse de précipitation entre les isotopes lourds et légers est d'autant plus grande que la température de l'eau est basse. La composition isotopique d'un carbonate de calcium d'origine biologique constitue donc un thermomètre pour l'eau dans laquelle il s'est développé. Il faut toutefois souligner que cette composition isotopique dépend également de celle de l'eau dans laquelle le carbonate a précipité. La mesure physique consiste donc à transformer le carbonate de calcium en dioxyde de carbone (CO_2) sur lequel la composition isotopique de l'oxygène sera mesurée.

C'est grâce aux travaux pionniers du chimiste américain Harold Clayton Urey en 1947 que la paléoclimatologie isotopique a pu se développer. Cela a sans conteste joué un rôle majeur dans la compréhension des mécanismes climatiques naturels qui impliquent l'océan, l'**atmosphère**, la **cryosphère** et la **biosphère**. Deux exemples de résultats acquis au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (**LSCE**) sont détaillés ci-dessous.

P. Bazogé/CEA

Spectromètres de masse à source gazeuse pour la mesure de la composition isotopique de l'oxygène des foraminifères. Les coquilles des foraminifères en carbonate de calcium sont transformées en dioxyde de carbone sur lequel l'analyse isotopique est réalisée. Ici, gros plan sur les verreries dans lesquelles se produit la réaction entre le carbonate de calcium et l'acide.

Comprendre l'impact de débâcles d'icebergs sur la circulation océanique

Les études effectuées à partir de **sédiments** marins et de glaces polaires ont montré que le climat de la dernière période glaciaire, il y a entre 60 000 ans et 10 000 ans, était ponctué d'épisodes très froids, extrêmement rapides à l'échelle des temps géologiques, et d'impact au moins hémisphérique. De tels événements, appelés **événements de Heinrich**, sont dus à des débâcles massives d'**icebergs** dans l'océan Atlantique Nord, entre 40 et 60° N environ (figure 1). Leur enregistrement dans les sédiments marins se traduit par la présence de niveaux riches en cailloux de toutes tailles et de toutes natures **pétrographiques**, au milieu d'un sédiment généralement riche en micro-organismes carbonatés. Ces débâcles d'icebergs ont provoqué en fondant un énorme apport d'eau douce, un ralentissement du transport des eaux chaudes et salées des basses latitudes vers les hautes latitudes par la **dérive Nord Atlantique** et un refroidissement des eaux de surface de l'Atlantique Nord. Les carottes de sédiments marins ont permis de dresser une cartographie de l'impact isotopique d'un événement de Heinrich sur les eaux de surface et d'en quantifier l'influence en termes de température et de salinité. Les températures des eaux de surface ont diminué en moyenne de 2 à 4 °C pendant ces débâcles et leur salinité d'environ 0,5 ‰. Cette diminution conjuguée de la température et de la salinité a modifié la densité des eaux de surface, affectant ainsi la circulation océanique à une échelle bien plus large que le seul océan Atlantique Nord.

Si la géochimie isotopique a renseigné sur l'amplitude de la chute de salinité, la durée de ces événements et leur intensité en termes de volume de glace impliqué étaient toujours très mal estimées (de 0,1 à 10 millions de km^3, en 10 ans ou en plus de 1 000 ans). La **simulation numérique** du transport des isotopes de l'eau dans des expériences de débâcles d'icebergs a permis d'apporter des éléments de réponse aux questions relatives à la durée et à l'intensité de la débâcle. Or, ces deux paramètres sont fondamentaux pour quantifier les seuils de réponse de la circulation **thermohaline** dans une décharge d'eau douce. Pour cela, les chercheurs du LSCE ont utilisé un modèle de complexité intermédiaire

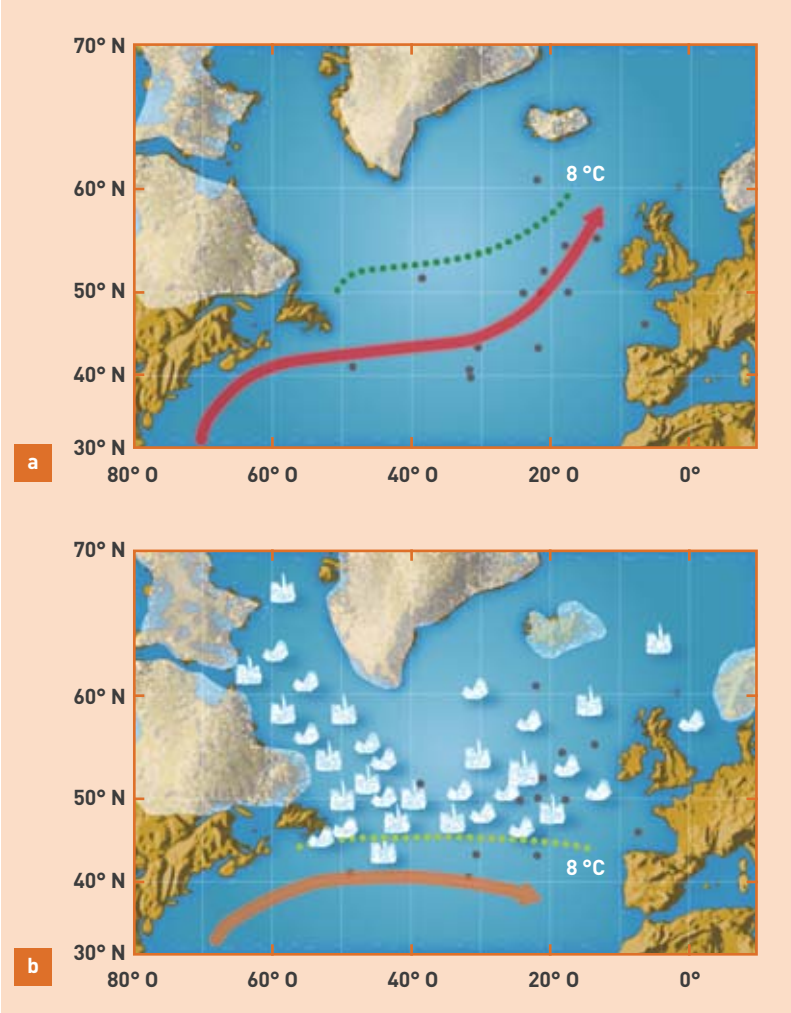
C. Morel/Our Polar Heritage

L'analyse de carottes de glaces polaires et de sédiments marins a mis en évidence des événements climatiques froids et extrêmement rapides survenus au cours de la dernière période glaciaire. Ils sont dus à des débâcles massives d'icebergs qui ont amené d'énormes quantités d'eau douce dans l'Atlantique Nord, perturbant fortement la circulation océanique.

(EMIC) pour reproduire une débâcle d'icebergs survenue il y a 40 000 ans, en modifiant sa durée et son intensité, et ont déterminé les simulations ressemblant le plus aux données mesurées dans les sédiments marins [1]. La meilleure analogie entre expériences numériques et données isotopiques est obtenue pour des durées de débâcle d'icebergs de 200 ± 100 ans et un flux d'eau douce de l'ordre de $0{,}25 \cdot 10^6$ m^3/s, soit un total de 1,5 million de km^3 de glace dont la fonte aura fait monter le niveau de la mer d'environ 3 m. L'extrême brièveté de cet événement était inattendue en raison de son énorme impact sur le climat global.

Appréhender les mécanismes possibles de déstabilisation des calottes glaciaires

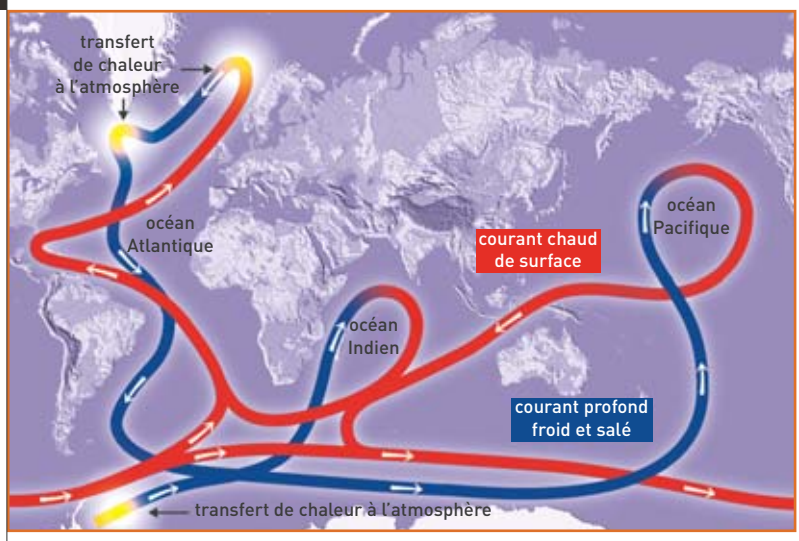
Plus proche du climat que nous connaissons actuellement, la dernière **période interglaciaire** précédant la nôtre, survenue il y a environ entre 129 000 ans et 118 000 ans, a été riche d'enseignement. Les archives géologiques, qu'elles soient marines, glaciaires ou continentales, ont permis de montrer que les températures de l'air et de l'océan de surface durant cette période étaient en moyenne de 2 à 5 °C plus chaudes que celles de notre interglaciaire, appelé **Holocène**. Le niveau marin était de l'ordre de 4 à 6 m plus haut que l'actuel, à cause en particulier de la fonte partielle des calottes de glace continentales présentes au Groenland et en Antarctique de l'Ouest. Les calottes de glace n'ont pas toutes la même sensibilité aux changements de température : en Arctique, la dernière période interglaciaire était assez chaude pour réduire d'environ 50 % la taille de la calotte groenlandaise. En revanche, en Antarctique, la température de l'air est très basse et la calotte Antarctique de l'Ouest, dont la



LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Figure 1.
Les mécanismes des événements de Heinrich. En a, température en période glaciaire, avant l'événement de débâcle. En b, impact d'une débâcle d'icebergs sur les températures des eaux de surface. Le retour à la normale est observé après la disparition des eaux de fonte d'icebergs. Les flèches correspondent à la dérive Nord Atlantique en mode non perturbé (en rouge) et en mode perturbé (en orange) et les lignes en pointillés à l'isotherme 8 °C.

(1) D. Roche, D. Paillard and E. Cortijo, "Constraints on the duration and freshwater release of Heinrich event 4 through isotope modelling", *Nature*, 432, p. 379-382, 2004.



Yuvanoé/CEA

Circulation profonde, appelée thermohaline, engendrée par les différences de densité entre les masses d'eau. Dans la mer de Norvège, mais aussi autour de l'Antarctique, les eaux deviennent très froides. Une partie de l'eau gèle (vers - 1,8 °C) pour donner la glace de mer (banquise) et expulse son sel, augmentant ainsi la salinité de l'eau liquide. Il en résulte une eau très salée et très froide, donc très dense, qui va plonger vers le fond de l'océan. Cette eau va ensuite parcourir un grand périple au fond de l'ensemble de l'océan mondial. À la faveur des remontées d'eau froide profonde, produites par la diffusion vers les masses plus chaudes ou causées par le vent sur certains bords de côtes ou dans la zone équatoriale, ces eaux vont remonter vers la surface où elles se réchaufferont. Elles seront prises par la circulation de surface et finalement ramenées dans les zones de formation d'eau profonde, après un périple pouvant durer 1 000 ans. (Rapport 2001 du GIEC).

base repose à 600 m sous le niveau de la mer, est bien plus sensible à la température de l'eau de mer qui vient la baigner qu'à la température de l'air. Connaître l'évolution de la température des eaux profondes au cours de la dernière période interglaciaire est donc une clé pour comprendre les mécanismes possibles de déstabilisation de la calotte Antarctique de l'Ouest [2]. Là encore, l'outil isotopique est de première importance. L'étude très précise des carottes de sédiments marins disponibles dans la totalité des océans du monde a permis de mettre en évidence une différence isotopique entre les coquilles d'animaux formées dans les eaux profondes modernes et celles de la dernière période interglaciaire. Cette différence est très faible puisque convertie en température, elle est de l'ordre de 0,3 à 0,5 °C selon les bassins océaniques. À nouveau, l'utilisation couplée de modèles de complexité intermédiaire et des données isotopiques a permis d'expliquer le réchauffement des eaux profondes atlantiques lors de la dernière période interglaciaire. En effet, les paramètres orbitaux qui régissent la quantité et la distribution d'énergie que la Terre reçoit du Soleil ne sont pas restés constants au cours du temps. Il y a 125 000 ans, les étés étaient plus chauds que les étés actuels, alors que la concentration en **gaz à effet de serre** était comparable aux valeurs préindustrielles de l'Holocène. Le modèle simule bien un océan globalement plus chaud, il y a 125 000 ans, qu'aujourd'hui. Les changements de température des eaux à 500 m de profondeur dans l'océan Austral simulés par le modèle indiquent un réchauffement de l'ordre de 0,1 à 0,5 °C. Celui-ci peut paraître modeste mais il ne faut pas en négliger les conséquences. En effet, les observations satellitaires indiquent que la vitesse de recul des glaciers émanant de la calotte Antarctique s'accroît de 1 m/an pour chaque augmentation de 0,1 °C de la température de l'eau de mer qui les baigne. La calotte Antarctique de l'Ouest est donc particulièrement vulnérable à de faibles changements de température.

(2) J.-C. Duplessy, D. Roche and M. Kageyama, "The deep ocean during the last interglacial period", *Science*, 316(5821), p. 89-91, 2007.

Un outil de plus en plus pointu

Grâce aux précisions accrues des appareils de mesure, il devient réalisable de mesurer de très faibles effets isotopiques qui affectent l'isotope ^{17}O de l'oxygène des bulles d'air piégées dans les carottes de glace et d'en déduire l'évolution de la biosphère dans le passé. Dans les carbonates, il est maintenant possible de mesurer des combinaisons isotopiques plus complexes : ainsi, la mesure des concentrations d'équilibre des espèces intervenant dans la réaction

$$^{13}C^{16}O_3^{2-} + {}^{12}C^{18}O^{16}O_2^{2-} \leftrightarrow {}^{13}C^{18}O^{16}O_2^{2-} + {}^{12}C^{16}O_3^{2-}$$

devrait permettre d'accéder directement à la température des eaux dans lesquelles ces carbonates ont précipité, alors que le rapport $^{18}O/^{16}O$ dépend aussi de la teneur en ^{18}O de l'eau. Tous ces développements en cours au LSCE ouvrent de nouvelles perspectives pour la compréhension des phénomènes climatiques. Au cours des cinquante dernières années, la géochimie isotopique a montré son potentiel pour identifier et quantifier les changements environnementaux, notamment pour l'étude des climats du passé. La géochimie isotopique n'a pas dit son dernier mot.

LSCE

P. Bazoge/CEA

La cave-carothèque, située à Gif-sur-Yvette, qui renferme la collection d'échantillons de sédiments marins prélevés dans tous les océans du monde. Ces sédiments contiennent de nombreux organismes qui ont enregistré les conditions régnant dans leur milieu pendant leur croissance. La composition isotopique des coquilles de foraminifères qui s'y trouvent renseigne sur le climat qui prévalait du vivant du foraminifère. En bas à gauche, carotte de sédiments marins extraits de l'Atlantique Nord. Elle a été découpée en tronçons de 1,50 m de long, dont l'empilement permet de remonter l'échelle des temps géologiques.

> **Elsa Cortijo**
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement/Institut Pierre-Simon Laplace
Unité mixte de recherche CEA-CNRS-UVSQ
Direction des sciences de la matière
CNRS (Gif-sur-Yvette)

MÉMO A

Voyage au centre de la Terre et aux confins de l'atmosphère

La Terre est une boule solide en rotation, d'un diamètre moyen de 12 750 km, entourée d'une enveloppe gazeuse, l'atmosphère. Environ 71 % de sa surface sont recouverts d'eau, le reste consistant en continents et îles de relief varié, très inégalement répartis.

La structure interne de la Terre

Formée il y a environ 4,57 milliards d'années par accrétion de météorites, la Terre est constituée d'enveloppes successives d'épaisseurs et de compositions variées, dont les principales sont, en allant de la surface vers le centre, la lithosphère, le manteau et le noyau (figure 1). Ces couches ont été repérées par l'étude de la propagation des ondes sismiques qui parcourent le globe terrestre dans toutes les directions, cette détermination étant fondée sur le fait que la vitesse d'une onde sismique se modifie brutalement et de façon importante lors d'un changement de milieu. Cette méthode a permis de déterminer l'état de la matière à des profondeurs que l'homme ne peut atteindre.

La lithosphère (0 à 100 km), partie superficielle du globe, est divisée en plusieurs segments rigides, ou plaques tectoniques, qui se déplacent sur la matière visqueuse de la zone supérieure du manteau supérieur ou asthénosphère et sont constamment en mouvement. Constituée de la croûte et d'une partie du manteau supérieur, sa profondeur varie de 100 km sous les océans à 300 km sous les continents. La croûte continentale solide, majoritairement granitique[1] et surmontée par endroits de roches sédimentaires[2], est d'une épaisseur égale en moyenne à 30 km sous les continents et qui peut atteindre 100 km sous les massifs montagneux. La croûte océanique solide, essentiellement

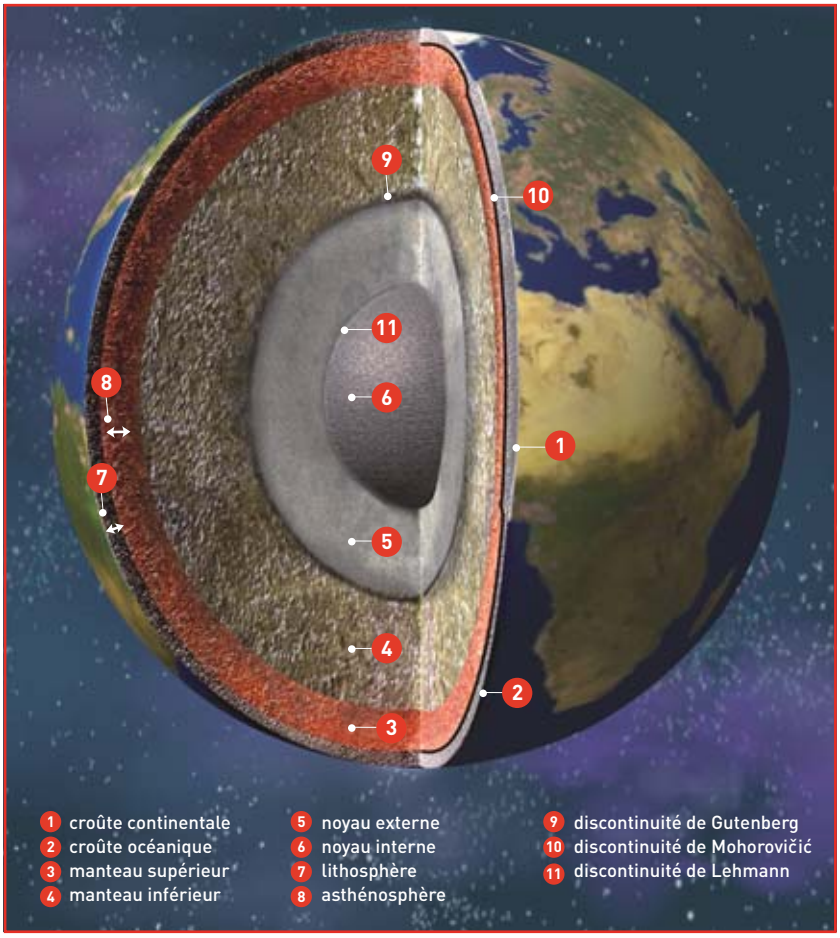
Suite page 22

(1) Granite : roche dense magmatique formée de cristaux visibles à l'œil nu, principalement du quartz (SiO_2 ou silice), des micas (minéraux formés essentiellement de silicate d'aluminium et de potassium), des feldspaths potassiques ($KAlSi_3O_8$) et des plagioclases sodiques ($NaAlSi_3O_8$).

(2) Roches sédimentaires : roches résultant de l'accumulation et du compactage de débris d'origine minérale (dégradation d'autres roches), organique (restes de végétaux ou d'animaux, fossiles), ou de précipitation chimique.

StockTrek

La Terre est recouverte d'eau sur environ 71 % de sa surface.



StockTrek

Figure 1.
Structure interne de la Terre.

MÉMO A

StockTrek

Coulée de lave à Hawaï. Le magma remonte des entrailles de la Terre et jaillit sous forme de lave.

Suite de la page 21

composée de roches **basaltiques**, est relativement fine (d'une épaisseur de l'ordre de 6 à 8 km). La croûte ou écorce représente environ 1,5 % du volume terrestre. La **partie supérieure** et solide **du manteau**, formée de péridotites [3], possède également une épaisseur variable selon qu'elle se trouve sous un océan ou un continent. La zone de transition entre la croûte et le manteau, découverte en 1909 par le géophysicien et sismologue croate Andrija Mohorovičić est appelée ***discontinuité de Mohorovičić*** ou ***Moho***.

Le **manteau supérieur** (100 à 670 km), composé principalement de péridotites, est plus visqueux que le **manteau inférieur** (670 à 2 900 km), formé essentiellement de pérovskites [4], car les contraintes physiques qui y règnent le rendent liquide en partie. Le manteau inférieur n'est pas liquide, comme pourraient le laisser supposer les coulées de **lave** de certaines **éruptions volcaniques**, mais il est moins "dur" que les autres couches. Il présente les propriétés d'un solide élastique. Le manteau, dont la température est supérieure à 1 200 °C, représente environ 84 % du volume terrestre. La zone de transition entre le manteau et le noyau a été localisée à 2 900 km de profondeur en 1912 par le sismologue allemand Beno Gutenberg, d'où le nom de ***discontinuité de Gutenberg***.

Le **noyau externe** (2 900 à 5 100 km) liquide est essentiellement composé de fer (environ 80 %), de nickel et de quelques **éléments** plus légers. Ce noyau métallique, dont la fluidité a été établie en 1926 par le géophysicien et astronome britannique Harold Jeffreys, présente une viscosité proche de celle de l'eau, une température moyenne de 4 000 °C et une densité de 10. Les mouvements de **convection** de cette énorme quantité de métal en fusion, liés à la rotation de la Terre, sont à l'origine du champ magnétique terrestre.

Le **noyau interne** – ou **graine** – (5 100 à 6 378 km) a été découvert en 1936 par la sismologue danoise Inge Lehmann. Essentiellement métallique, il est formé par **cristallisation** progressive du noyau externe. La pression le maintient dans un état solide et à une densité d'environ 13, malgré une température supérieure à 5 000 °C. La zone de transition entre le noyau externe et le noyau interne est appelée ***discontinuité de Lehmann***. Le noyau représente environ 15 % du volume terrestre.

Au cœur de la planète, des éléments **radioactifs** (potassium, **uranium**, **thorium**) se **désintègrent**, ce qui génère une chaleur importante. Celle-ci fournit aux différentes couches l'énergie nécessaire à leurs déplacements et permet à la roche en fusion (**magma**) de remonter de l'intérieur de la Terre. Une partie du magma se solidifie au contact plus froid de la croûte terrestre, alors qu'une partie jaillit à la surface sous forme de lave.

L'atmosphère terrestre

Enveloppe gazeuse entourant la Terre et maintenue près de la surface grâce à la force gravitationnelle, l'atmosphère est indispensable à la vie. Elle contient l'air que nous respirons, protège toutes les formes de vie contre les radiations dangereuses du Soleil grâce à sa couche d'**ozone**, est un élément majeur dans le

(3) Péridotite : roche issue d'un refroidissement lent du magma et formée de grains visibles à l'œil nu. Elle est principalement composée d'olivine, de pyroxène et d'amphibole (minéral hydraté caractérisé par l'**anion** $[Si_4O_{11}(OH)]^{7-}$).

(4) Pérovskite : du nom du minéralogiste russe L. A. Perowski, structure **cristalline** commune à de nombreux oxydes de formule générale ABO_3. Les pérovskites présentent des propriétés électriques et magnétiques variées en fonction de la nature de A et de B.

cycle de l'eau et contribue à adoucir de manière notable la température moyenne à la surface du globe grâce à l'effet de serre qu'elle génère (Mémo C, *Gaz à effet de serre et aérosols au cœur du débat sur le changement climatique*, p. 66). En effet, en l'absence d'atmosphère, la température avoisinerait - 18 °C au lieu des 15 °C observés.

L'air atmosphérique se compose d'un mélange de gaz (tableau) contenant des particules liquides (gouttelettes d'eau...) et solides (cristaux de glace, poussières, cristaux salins...) en suspension, la plus grande part de sa masse étant proche de la surface. Au niveau de la mer, la pression atmosphérique est de 1 013,25 hPa. Les molécules de gaz se raréfient en altitude et la pression diminue. L'atmosphère est donc de moins en moins dense quand l'altitude augmente, jusqu'à ce qu'elle se "mélange" avec l'espace lointain.

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches au sein desquelles la température évolue différemment en fonction de l'altitude : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère (figure 2).

Dans la troposphère (de la surface du globe à 8 km aux pôles et 15 km à l'équateur), la température décroît rapidement avec l'altitude, de l'ordre de 6,4 °C par km. Elle évolue en moyenne entre 20 °C au sol et - 60 °C au niveau de la limite supérieure de la zone. Cette couche contenant de 80 à 90 % de la masse totale de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau, la pression et la densité y sont maximales. C'est là que se produisent la plupart des phénomènes météorologiques (formation des nuages, pluies...) et les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux (convection thermique, vents). Dans la couche supérieure de la troposphère, appelée tropopause, la température se renverse et commence à augmenter. Sa hauteur varie des pôles jusqu'à l'équateur, mais aussi selon les saisons.

Dans la stratosphère (de 8-15 km à 50 km), la température, constante dans les premiers kilomètres, croît ensuite lentement puis beaucoup plus rapidement avec l'altitude jusqu'à 0 °C. Cette région abrite vers 25 km d'altitude une bonne partie de la couche d'ozone. L'ozone est fabriqué par l'action du rayonnement solaire sur les molécules d'oxygène. La couche d'ozone sert de bouclier protecteur en absorbant le rayonnement ultraviolet en provenance du Soleil, ce qui entraîne un réchauffement. C'est dans la stratosphère que se produit la diffraction

Suite page 24

gaz	volume (ppmv)	
azote (N_2)	780 840	(78,084 %)
oxygène (O_2)	209 460	(20,946 %)
argon (Ar)	9 340	(0,934 %)
dioxyde de carbone (CO_2)	382	(0,038 2 %)
néon (Ne)	18,18	
hélium (He)	5,24	
méthane (CH_4)	1,745	
krypton (Kr)	1,14	
hydrogène (H_2)	0,55	
oxyde nitreux (N_2O)	0,30	
ozone (O_3)	0,04	
vapeur d'eau (H_2O)	de 1 % (dans les régions polaires) à 4 % (dans les régions équatoriales) (très variable)	

Tableau. Composition de l'atmosphère au voisinage de la surface de la Terre. Du point de vue thermodynamique, l'air atmosphérique est considéré comme un mélange de deux gaz : l'air sec et la vapeur d'eau. Les gaz à effet de serre apparaissent en violet. Les concentrations en CO_2 s'élevaient à 280 ppmv en 1800 et à 345 ppmv en 1998.

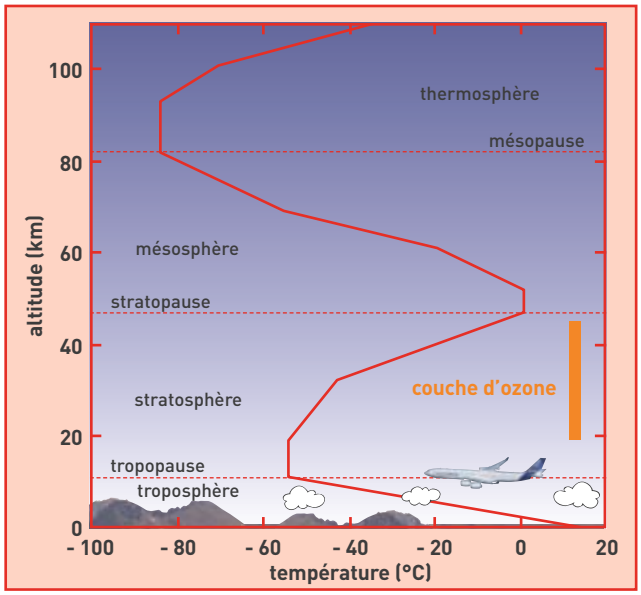
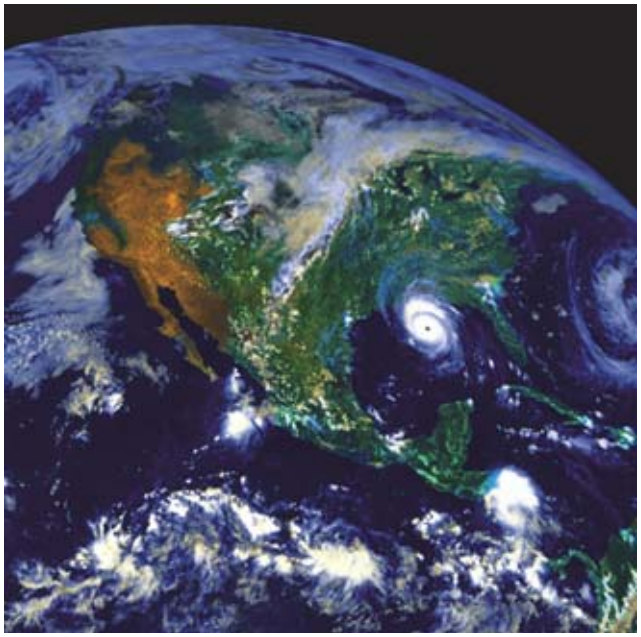


Figure 2. Les couches de l'atmosphère. Leurs limites ont été fixées selon les discontinuités dans les variations de la température, en fonction de l'altitude.



StockTrek

L'essentiel des phénomènes météorologiques ont lieu dans la troposphère, zone où la pression et la densité sont maximales.

MÉMO A

StockTrek

La stratosphère abrite une bonne partie de la couche d'ozone qui sert de bouclier protecteur contre les rayons nocifs du Soleil.

C. Morel/Our Polar Heritage

Les aurores polaires, ici une boréale, résultent de l'interaction entre les particules du vent solaire et la haute atmosphère. Elles se produisent dans l'ionosphère, région caractérisée par une concentration importante de particules chargées électriquement.

Suite de la page 23

des rayons lumineux de courtes longueurs d'ondes par les molécules d'air – d'où la couleur bleue du ciel diurne – et que sont observés des vents violents atteignant des vitesses de 200 à 300 km/h. Dans la couche supérieure de la stratosphère, appelée **stratopause**, la température commence à redescendre.

Dans la **mésosphère** (de 50 km à 80 km), la température chute rapidement avec l'altitude jusqu'à - 80 °C. Couche la plus froide de l'atmosphère, c'est généralement dans cette zone que les météorites se consument lorsqu'elles entrent dans l'atmosphère. Dans la couche supérieure de la mésosphère, appelée **mésopause**, la température recommence à augmenter.

Dans la **thermosphère** (de 80 km à 350-800 km), la température croît de nouveau avec l'altitude, bien au-delà de 1 000 °C. Ce réchauffement résulte de la forte absorption par l'oxygène du rayonnement ultraviolet en provenance du Soleil. Dans cette zone, les températures sont élevées mais la densité est extrêmement faible et il y règne une pression très faible. Les molécules d'oxygène se divisent en deux **atomes** d'oxygène. La limite supérieure de cette couche est nommée **thermopause**.

Outre la température, d'autres critères peuvent être utilisés pour définir différentes couches dans l'atmosphère.

L'**ionosphère**, qui occupe la même région que la thermosphère, est caractérisée par une concentration importante de particules chargées électriquement. Dans cette zone, l'énergie solaire est si forte qu'elle "casse" les molécules d'air, donnant des **ions** et des **électrons libres**. Cette couche présente la propriété de réfléchir les **ondes radio**. Une partie de l'énergie émise par un émetteur radio est absorbée par l'air ionisé et l'autre est réfléchie vers le bas, permettant ainsi l'établissement de communications entre différents points du globe parfois très éloignés les uns des autres. C'est dans l'ionosphère que les **aurores** se produisent. Située vers 60-70 km d'altitude, la **neutropause** sépare l'ionosphère de la **neutrosphère**, région inférieure de l'atmosphère où la concentration des électrons est insignifiante.

Dans l'**exosphère** (de 350-800 km à 50 000 km), région au-delà de l'ionosphère, les lois de la physique des gaz ne s'appliquent plus. Les molécules se dispersent et se raréfient avec l'altitude. Les plus légères et les plus agitées d'entre elles peuvent alors échapper à l'attraction terrestre et disparaître à jamais dans l'espace interstellaire. C'est dans cette couche que la plupart des satellites sont placés en orbite.

Vers 2 000 km d'altitude, les ions constituent la majorité des particules présentes. Ils sont dans la **magnétosphère** où le magnétisme terrestre supplante la gravitation. Cette région, composée principalement de **protons**, est également appelée **protosphère**. La magnétosphère agit comme un écran et protège la surface terrestre des effets nocifs du vent solaire.

De même, en prenant pour critère les changements de composition de l'air suivant la verticale, l'atmosphère peut être divisée en deux zones : l'**homosphère** (de la surface du globe à 80 km d'altitude), où la composition de l'air sec varie très peu, et l'**hétérosphère** située au-dessus. Le niveau à partir duquel la composition de l'air change de manière significative est appelé **homopause**.

> Nous remercions Yannick Donnadieu du LSCE pour sa relecture attentive de ce texte.

Le suivi à long terme du CO_2 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 1er août 2007 et le 20 septembre 2007, était l'installation de deux instruments automatiques de mesure en continu : l'un pour le CO_2 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 CO_2 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 CO_2 au sud du Groenland. À cette occasion, nous pouvons nous poser une série de questions : comment s'est développé le réseau de mesure du CO_2 au cours de ce demi-siècle ? Qu'avons-nous appris sur le cycle du CO_2 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 CO_2 atmosphérique.

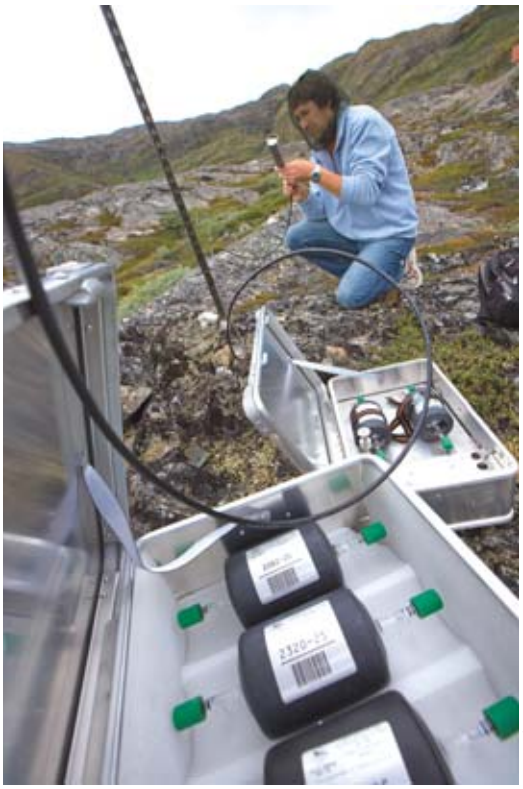
(1) Keeling (Charles-David), scientifique américain (1928-2005) dont les mesures du **dioxyde de carbone** au Mauna Loa Observatory ont alerté le monde sur la contribution anthropogénique à l'**effet de serre** et au réchauffement climatique.

(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.

Les premiers pas de l'observation systématique du CO_2 atmosphérique

En 1957, Charles-David Keeling se fixe comme objectif de déterminer la concentration moyenne de CO_2 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 estimèrent alors impossible d'arriver à une évaluation fiable du contenu en CO_2 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.



C. Morel/Our Polar Heritage

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.

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 (±0,3 **ppm**). La seconde raison découle de sa décision d'installer ses stations sur des sites éloignés de sources d'émission de CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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** $^{13}CO_2$. La concentration atmosphérique de CO_2 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 CO_2 atmosphérique en automne et en hiver. Pour un cycle du carbone à l'état d'équilibre, les deux mécanismes se compensent et la concentration du CO_2 reste stable sur le long terme. Pourtant, dès la fin de l'année 1958, le suivi à haute précision du CO_2 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 CO_2 atmosphérique démarre en 1981, sur l'îlot Amsterdam (à peine 58 km^2), situé au milieu de l'océan Indien et faisant partie des Terres australes et antarctiques françaises. À cette époque, le réseau

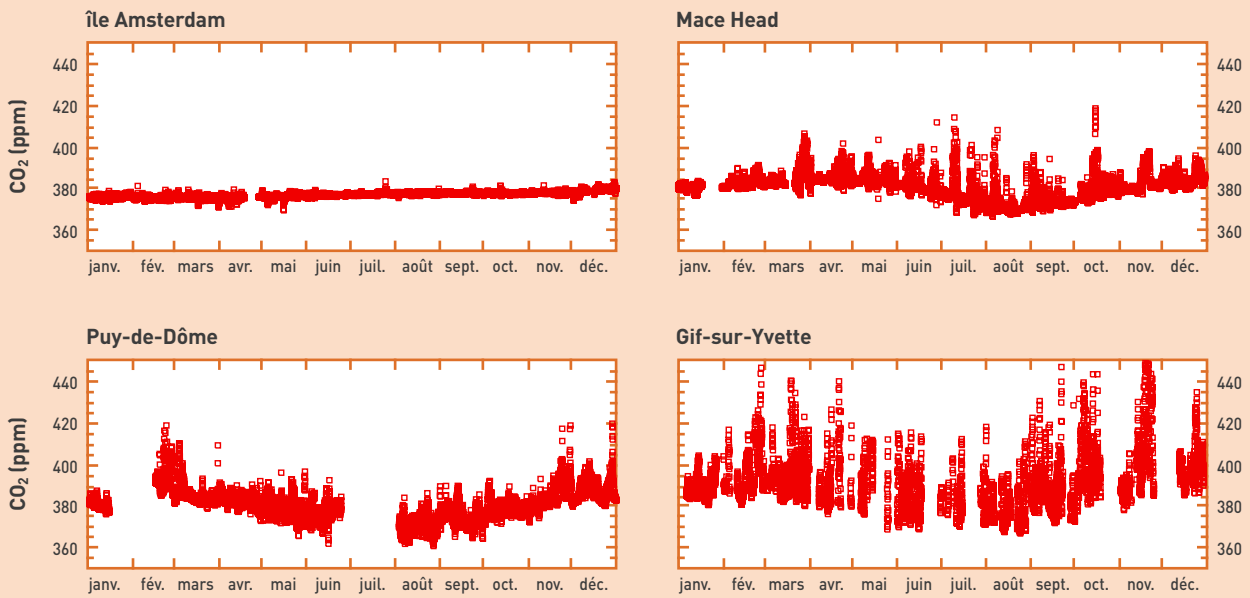


Figure 1.
Moyennes journalières de CO_2 mesurées, en 2005, dans quatre observatoires Ramces, localisés dans des environnements très différents : un site de fond éloigné de toute source de pollution (l'île Amsterdam), un site côtier en Irlande (Mace Head), un site en milieu rural au sommet du puy-de-Dôme et un site périurbain à Gif-sur-Yvette.

international se compose de 10 observatoires effectuant des mesures en continu de CO_2 auxquels s'ajoute une quinzaine de sites de prélèvements hebdomadaires d'échantillons de l'air. Ce second dispositif permet un suivi des tendances du CO_2 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 CO_2 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 CO_2, 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 devraient avoisiner aujourd'hui les 450 ppm. Or, la teneur moyenne en CO_2 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 CO_2 émis par les activités humaines.
En moyenne, seulement 45 % des émissions de CO_2 s'accumulent dans l'atmosphère. Cette valeur, appelée fraction atmosphérique, varie fortement d'une année sur l'autre bien que les émissions anthropogéniques de CO_2 augmentent régulièrement sans à-coup très marqué. La forte variabilité interannuelle du taux de croissance de CO_2 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.

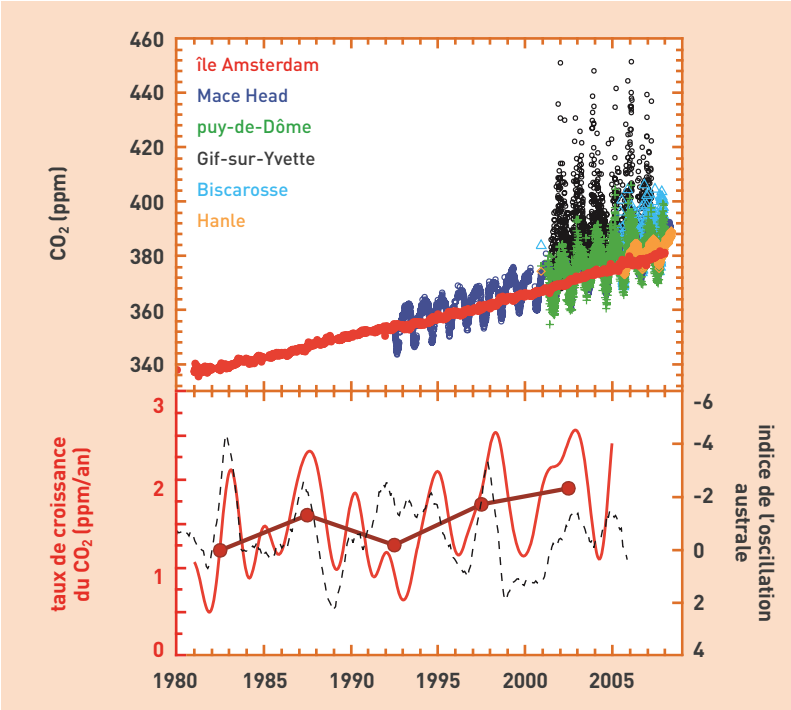


Figure 2.
Haut : Suivi du CO_2 atmosphérique dans les observatoires Ramces.
Bas : Taux de croissance du CO_2 à l'île Amsterdam (rouge) et indice de l'oscillation australe (pointillés noirs) qui est une mesure de la variation mensuelle de la différence de pression de surface normalisée entre Tahiti et 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 CO_2 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, **O_2**, **H_2**…) ainsi que les différents rapports isotopiques du CO_2 ($^{13}C/^{12}C$, $^{14}C/^{12}C$, $^{16}O/^{18}O$). Ces différents traceurs suivront les échanges de CO_2, dans des proportions différentes suivant le processus. Par exemple, une source de CO_2 par combustion (feux, chauffage, transport…) s'accompagnera d'une émission de CO alors que la respiration de CO_2 par les plantes n'émet pas de CO. Pareillement, un puits de carbone continental va augmenter le rapport $^{13}C/^{12}C$ dans l'atmosphère (car la végétation absorbe préférentiellement le ^{12}C) alors qu'un puits de carbone océanique ne modifiera quasiment pas le rapport $^{13}C/^{12}C$. 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 atmosphérique

À ce jour, le réseau de suivi du CO_2 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 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.

C. Morel/Our Polar Heritage

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

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

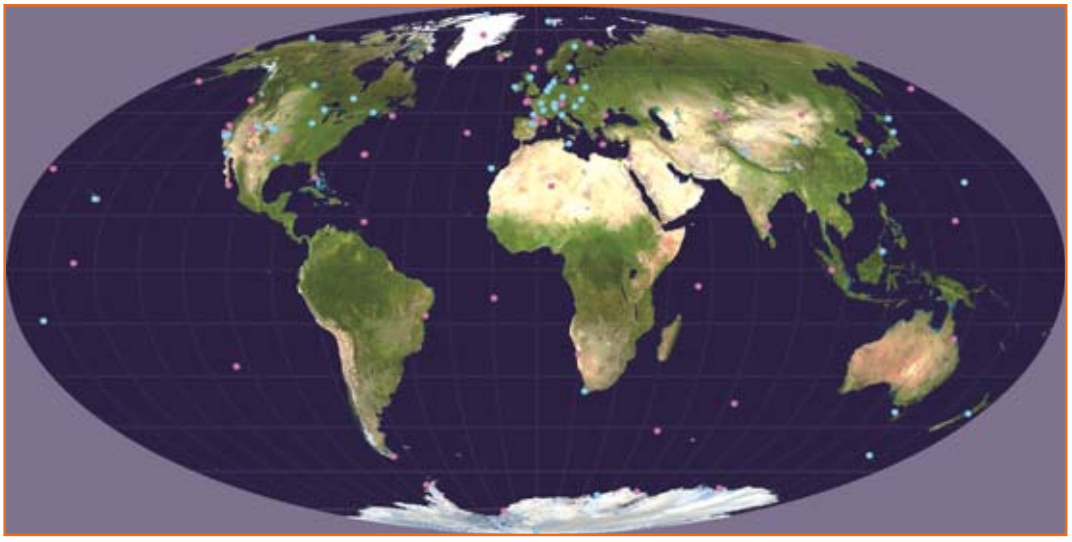
(4) L'Earth System Research Laboratory (ESRL) est un laboratoire américain, basé à Boulder (Colorado) travaillant sur la compréhension du climat de la Terre et de son évolution au sein de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), l'agence américaine responsable de l'étude de l'océan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

(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.



A.C. Manning, University of East Anglia

Figure 3. Réseau mondial du suivi du CO_2 atmosphérique. Les points bleus représentent les sites de mesure en continu et les rouges, les sites où s'effectuent les prélèvements d'air hebdomadaires.

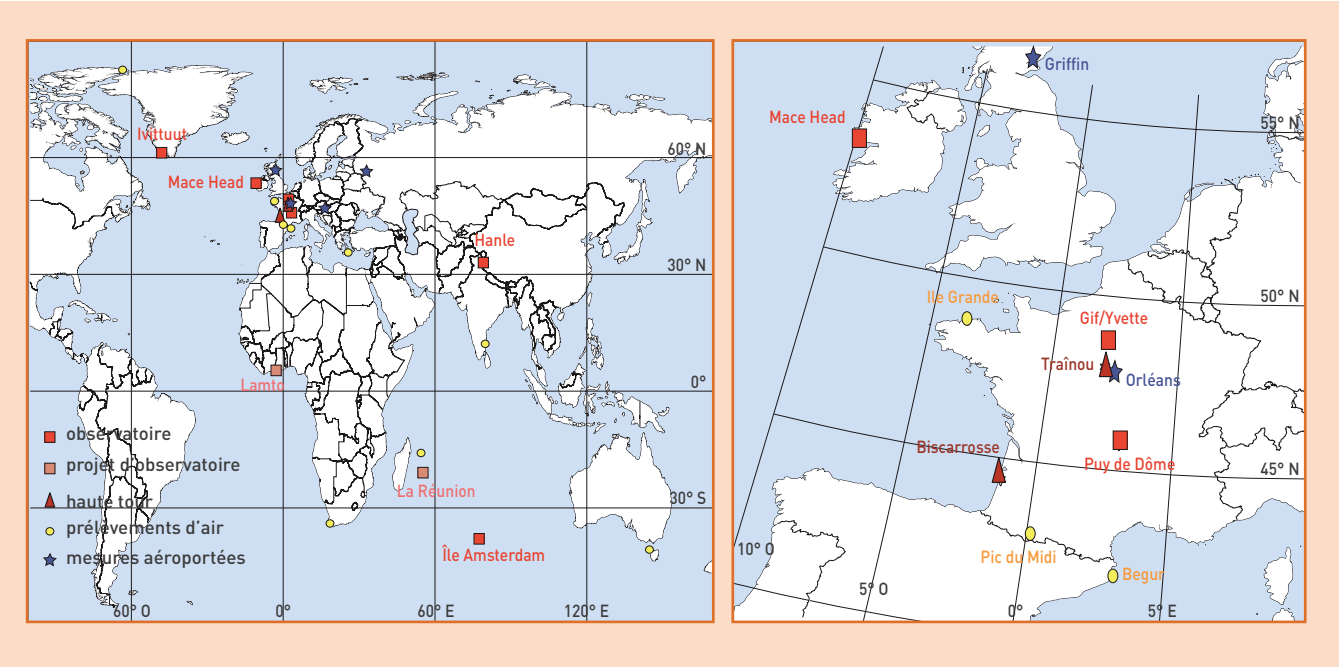


Figure 4.
Réseau atmosphérique de mesure des composés à effet de serre (Ramces).

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 CO_2 baptisé Caribou [9]. Avec son analyseur à absorption infrarouge commercialisé par la société **Li-COR**, cet instrument peut mesurer en continu la concentration du CO_2 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 Traînou 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 CO_2 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-

(9) Caribou est un instrument de mesure du CO_2, 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.

O. Claué

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

CEA/DR

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

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 CO_2 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 CO_2, intégrées sur la verticale (moyenne de CO_2 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 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 CO_2 et autres gaz à effet de serre (**CH_4**, **N_2O**).

(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 CO_2 sur une vingtaine de sites en Europe.

CEA/DR

L'instrument de mesure du CO_2 baptisé Caribou.

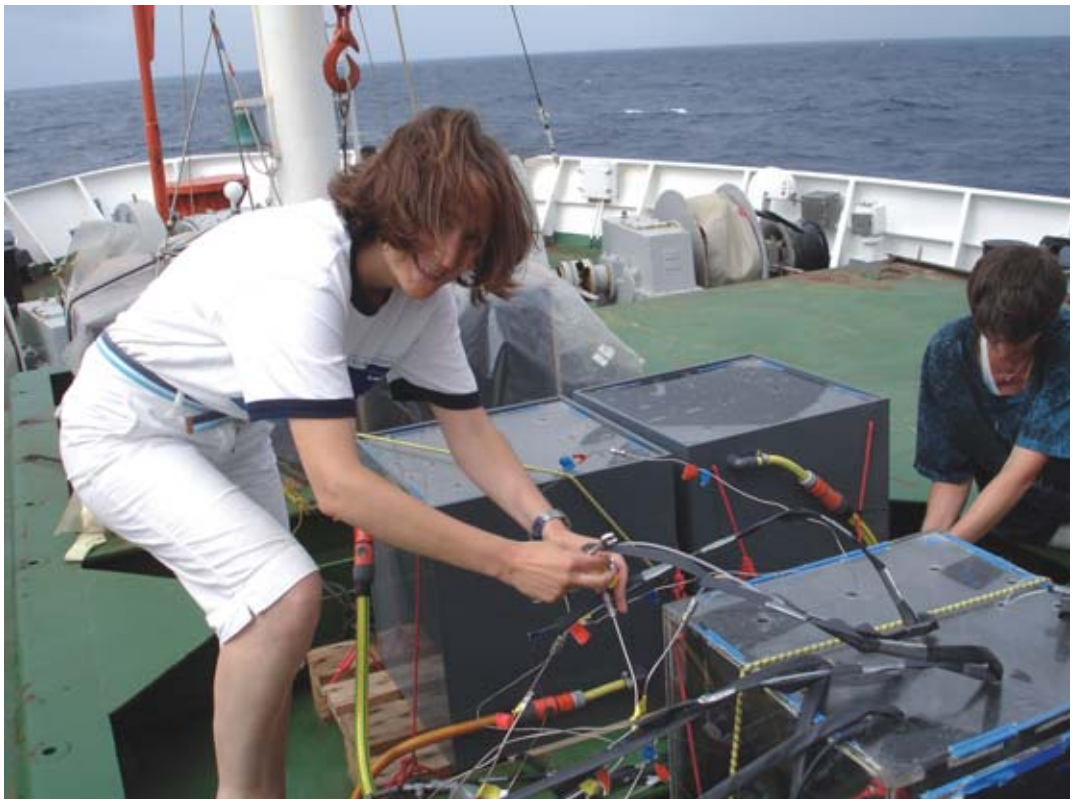
C. Morel/Our Polar Heritage

Connexion des dernières lignes (air et standard de calibration) sur le Caribou, instrument de mesure en continu du CO_2.

> 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

L'évolution de la **qualité de l'air** sous l'influence des **changements globaux**

Si les gaz à effet de serre émis par les activités humaines exercent une influence déterminante sur les changements climatiques globaux, en revanche, d'autres gaz comme les polluants et les aérosols déterminent la qualité de l'air et affectent la santé. De l'échelle planétaire à l'échelle régionale ou locale, l'évolution des émissions polluantes et du climat modifiera fortement l'air que nous respirons.



CEA/DR

Campagne dans l'océan Atlantique équatorial, à bord du navire de recherche *Meteor*, pour mesurer les émissions de gaz en **trace** (CO, composés organiques volatils) par l'océan.

Conséquence du développement technologique spatial des années 1960, l'observation de la **Terre** depuis l'espace a permis une réelle prise de conscience de l'environnement global et de sa fragilité. En effet, polluants, gaz et **aérosols** émis depuis le début de l'ère industrielle par les activités humaines, perturbent la composition d'une couche de fluide **atmosphérique** très mince à l'échelle du globe (10 à 100 kilomètres), chacun de ces constituants suivant ensuite sa propre évolution. Par exemple, la concentration du **dioxyde de carbone**, chimiquement inerte, a progressé de 30 % en 150 ans bien que la végétation et l'océan réabsorbent près de la moitié des émissions. Le **protoxyde** d'**azote**, provenant des activités agricoles, enregistre une augmentation analogue. Dans le même temps, la concentration de **méthane** a triplé. Il est vrai qu'il ne s'agit pas d'un gaz chimiquement inerte, étant **oxydé**, comme tous les **composés organiques** volatils, par le **radical hydroxyle** (**OH**) provenant essentiellement de l'interaction de l'**ozone** avec la vapeur d'eau en présence de **rayonnement ultraviolet**.

Du fait de leur présence, ces principaux **gaz à effet de serre** perturbent le **climat** en piégeant l'énergie rayonnant depuis la Terre. Aucun d'entre eux n'a d'effet direct sur la santé ou l'environnement terrestre. En revanche, de nombreux autres gaz ou aérosols, émis par les activités humaines ou résultant de leur transformation chimique, influent sur la santé et les **écosystèmes** vivant à la surface du globe : il s'agit des polluants qui déterminent la qualité de l'air. Entrent dans cette catégorie les aérosols de petite taille (de taille inférieure à 10 **microns**, appelés PM 10) qui peuvent être primaires (c'est-à-dire directement émis comme, par exemple, la suie) ou secondaires comme les **nitrates**

ou les **sulfates**. Cette catégorie comprend également les polluants oxydants issus de la **photochimie**, l'ozone par exemple.
Toute politique de contrôle et de réduction d'émissions polluantes doit donc faire face à de multiples contraintes dont la prise en compte ne peut se faire que de façon intégrée. Le défi sera de ne pas entraver le développement économique tout en préservant le climat et la qualité de l'air au mieux.

Les facteurs d'évolution de la qualité de l'air

Deux facteurs contribueront, dans les décennies à venir, à modifier la qualité de l'air dans un lieu donné : l'évolution des émissions polluantes et celle du climat. Concernant les émissions polluantes et l'environnement proche, leur impact s'évalue à court terme. Par exemple, la qualité de l'air à proximité d'une voie de circulation se modifie très rapidement en fonction du trafic. Selon une enquête d'**Airparif**, son influence opère sur quelques centaines de mètres [1]. Au-delà, les concentrations deviennent plus homogènes et principalement influencées par les émissions régionales. Les concentrations dépendent, dans ce cas, de la proximité d'une grande ville, de grands pôles industriels et de la densité de population. En Europe, les régions les plus émettrices sont le Benelux et la plaine du Pô en raison de la densité de population. L'évolution de la qualité de l'air régionale dépend alors des politiques régionales, nationales ou européennes pour réduire les émissions polluantes. Bien plus lente, l'échelle de temps de ces évolutions varie de quelques années à la décennie. Les réductions d'émissions associées à une innovation technologique, par exemple le catalyseur d'oxydation posé sur certains véhicules, ne peuvent pleinement se faire sentir que sur une vingtaine d'années, période correspondant au renouvellement du

(1) Les résultats complets de cette enquête, réalisée par Airparif, sont disponibles sur le site : http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/Rapbagn.pdf.

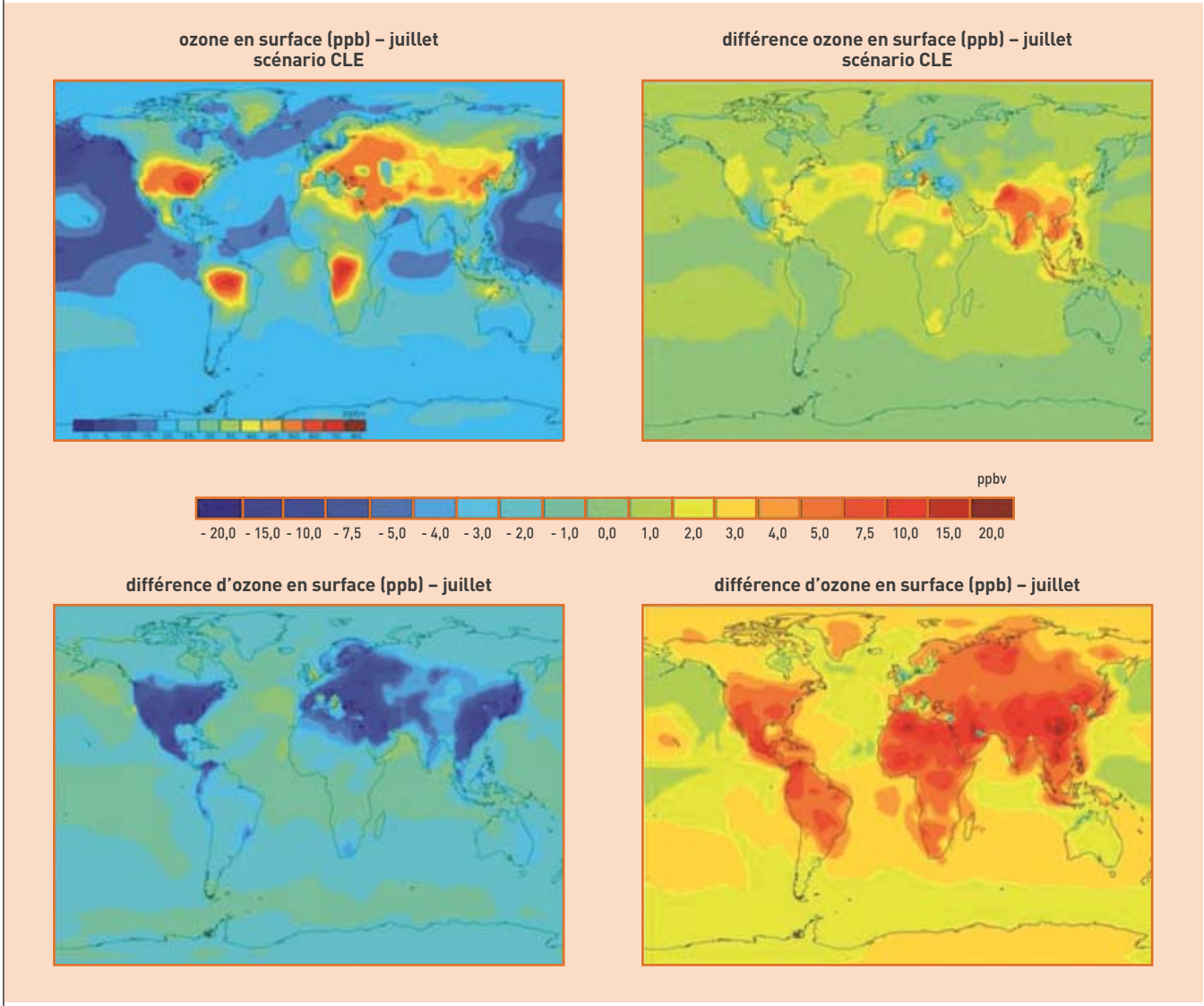


Figure 1.
En haut à gauche : concentration moyenne de l'ozone (en ppb), en surface, sur le globe, en 2001, simulée par le modèle LMDz-INCA développé à l'Institut Pierre-Simon Laplace. En haut à droite : différence entre les concentrations moyennes prévues pour l'année 2030, à météorologie constante, si les émissions globales suivent un scénario régi par l'application stricte de la législation actuelle. En bas à gauche : différence obtenue avec le scénario le plus optimiste de réduction des émissions tenant compte des technologies disponibles. En bas à droite : différence obtenue en supposant le scénario pessimiste A2 du GIEC (d'après Szopa *et al.*, 2006).

parc automobile. Ainsi, grâce à ces premières mesures, les émissions d'**oxyde d'azote** dues au trafic routier français enregistrent une baisse de moitié depuis 1990. Il n'en va pas de même d'autres secteurs d'activité.
Un autre facteur d'aggravation vient s'ajouter à cette situation. Il peut arriver que les polluants soient transportés, d'un continent à l'autre. En effet, il arrive fréquemment de retrouver dans l'**atmosphère** européenne des couches d'aérosols produits par des incendies en Amérique du Nord ou en Russie après un voyage autour de la Terre. Ceux-ci viennent s'ajouter aux polluants émis en proximité locale ou régionale. Si, jusqu'à présent, la qualité de l'air a principalement évolué en fonction des différentes émissions, dans le futur, elle sera influencée aussi par le changement climatique.

Évolution de la qualité de l'air globale

La composition de l'atmosphère globale en gaz réactifs et en aérosols susceptibles d'influencer la qualité de l'air a beaucoup évolué depuis un siècle, principalement sous l'effet de l'augmentation d'émissions polluantes. Au niveau mondial, les émissions d'oxydes d'azote, de composés organiques volatils (COV) ont augmenté depuis le début de l'ère industrielle jusque dans les années 1980, en commençant d'abord dans les régions développées. Ainsi, la concentration globale d'ozone **troposphérique** a plus que triplé depuis le XIXe siècle. Bien que l'évolution des émissions d'aérosols au cours du XXe siècle soit encore mal connue, il paraît fort probable que les émissions industrielles et l'utilisation du charbon comme source d'énergie aient généré, jusque vers la fin du XXe siècle, des concentrations importantes d'aérosols dans l'atmosphère. Aujourd'hui, ces émissions ont baissé ou baissent en Europe et en Amérique du Nord ; en revanche, elles augmentent fortement dans les pays émergents, notamment en Asie.

L'évolution future des émissions globales et l'évolution associée de la qualité de l'air globale demeurent très incertaines. Une étude, réalisée au **Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement** (**LSCE**), a mis en évidence plusieurs estimations des différences de concentrations entre 2001 et 2030 (figure 1). Ces résultats ont été obtenus grâce à l'utilisation du **modèle de simulation** développé par l'**Institut Pierre-Simon Laplace** (LMDz-INCA)(2) qui permet de calculer, en même temps, la chimie oxydante et le transport des polluants à l'échelle globale. Ce modèle sera utilisé lors des prochaines simulations qui seront réalisées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour la prévision des scénarios climatiques futurs. Dans le scénario le plus probable, appelé *Current legislation* (CLE), les concentrations d'ozone augmentent nettement avec les émissions produites par l'Asie (notamment en Inde et Chine) tandis que les tendances demeurent contrastées sur l'Europe. Ces résultats ne prennent pas en compte les effets liés au changement du climat puisque, dans ces simulations, les mêmes valeurs des variables **météorologiques** (celles de l'année 2001) sont utilisées pour simuler les concentrations d'ozone en 2030 et en 2001. Or, le changement climatique induit de multiples effets, parfois contradictoires, rendant très difficile une prédiction pour la fin du XXIe siècle. L'augmentation de la température s'accompagnera vraisemblablement d'une augmentation de la concentration de vapeur d'eau atmosphérique occasionnant une baisse des concentrations d'ozone. Cette baisse devrait être significative dans les régions tropicales et équatoriales. En revanche, dans la partie Sud des régions tempérées, à la faveur d'émissions de gaz polluants, une plus grande sécheresse et une stagnation **anticyclonique** permettront un accroissement photochimique de la teneur en ozone en surface.
Des températures plus fortes devraient également augmenter sur les émissions naturelles de certains **composés chimiques**. Par exemple, l'**isoprène**, un **hydrocarbure** réactif produit par certains arbres dont les chênes blancs d'Europe du Nord, augmente sensi-

(2) Interactions avec la chimie et les aérosols (INCA) est un modèle de chimie – aérosols et émissions. Il est couplé au modèle de circulation générale LMDz permettant de simuler interactivement les gaz à effet de serre de longue durée de vie (CO_2, CH_4, N_2O).

CEA/DR

Transport des polluants à l'échelle d'une région, d'un continent ou à l'échelle globale, étudié grâce à des modèles numériques intégrant chimie et transport. Ces modèles permettent notamment de donner une prévision de l'évolution de la composition atmosphérique sous l'influence des changements d'émissions et du changement climatique.

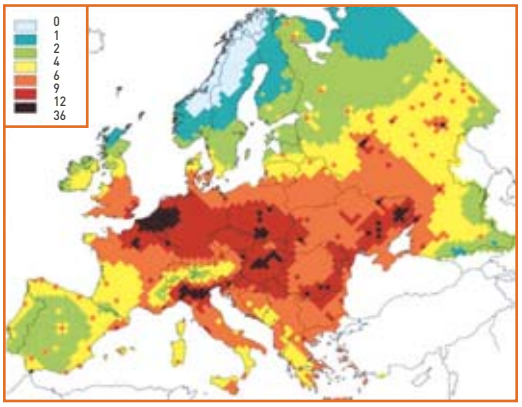


Figure 2.
Carte de la diminution de l'espérance de vie, en mois, estimée par l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), due à la pollution atmosphérique par les particules fines (taille inférieure à 2,5 microns).
La moyenne européenne de cette estimation de la diminution de l'espérance de vie est supérieure à 8 mois. La figure est tirée du rapport du programme *Clean Air For Europe* (CAFE) de la **Commission européenne** (Amann *et al.*, 2005 ; *CAFE Report N° 6 : Analysis for the final CAFE scenario* ; disponible sur http://www.iiasa.ac.at/rains/cafe.html).

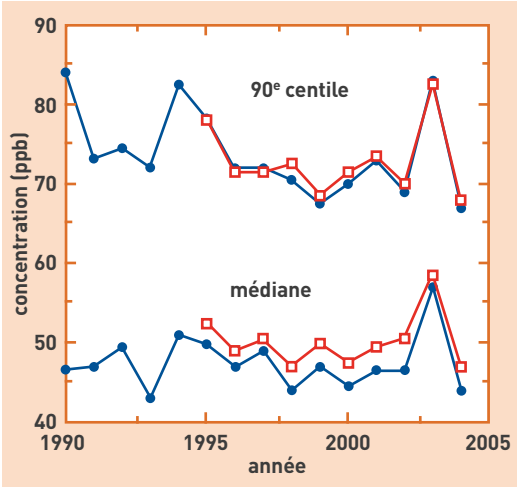


Figure 3.
Médiane et 90e centile des maxima journaliers de l'ozone (ppb), pour chaque été, calculés sur un ensemble de 34 stations avec données homogènes (pas de grande période manquante), depuis 1990 jusqu'à 2004 (carrés pleins) et pour un autre ensemble (61 stations) avec données homogènes de 1995 à 2004 (cercles ouverts). D'après Vautard *et al.* (2007).

blement avec la température, favorisant ainsi la formation photochimique d'ozone. Les oxydes d'azote provenant de la combustion mais aussi des éclairs progresseront également dans les régions tropicales avec une augmentation de la **convection**. L'assèchement de régions comme la Méditerranée devrait favoriser l'érosion éolienne et, en conséquence, la partie minérale des particules d'aérosols dans l'atmosphère (notamment, le soulèvement de poussières ou sable). Une autre conséquence de cet assèchement réside dans la vulnérabilité des forêts aux feux dont la plus grande fréquence alimenterait l'atmosphère en dioxyde, monoxyde de carbone, particules carbonées (suie), occasionnant une dégradation de la qualité de l'air. Bien que mal connu, le changement de la fréquence des intrusions d'ozone depuis la **stratosphère** vers la troposphère pourrait également figurer comme facteur d'évolution de la qualité de l'air. Enfin, le changement anthropique de l'usage des sols influe également sur les émissions liées à l'agriculture et sur le dépôt de composés comme l'ozone à la surface des plantes : un affaiblissement du dépôt d'ozone provoque une augmentation de sa concentration dans l'atmosphère.

Aujourd'hui encore, il s'avère bien difficile de quantifier l'effet net de tous ces phénomènes dont notre connaissance demeure lacunaire. Les difficultés à prédire l'évolution de la composition atmosphérique globale ne se limitent pas à la connaissance. En effet, la puissance de calcul nécessaire à intégrer ces phénomènes de façon suffisamment détaillée dans les modèles de prévision du climat reste largement inférieure aux besoins.

Évolution de la qualité de l'air en Europe

En Europe, nous savons désormais que la qualité de l'air provoque un impact sur la santé. Selon les estimations, les particules fines contribuent à diminuer l'espérance de vie de plus de 8 mois en moyenne, voire 15 mois dans certaines régions comme le Benelux (figure 2). Sur la base de ce constat, des objectifs de réduction des émissions polluantes ont été établis et traduits en directives. Par exemple, la France envisage de réduire d'environ 40 % ses émissions d'oxydes d'azote entre 2000 et 2010. Les objectifs des autres pays européens étant similaires, les concentrations de polluants tendent généralement à la baisse en Europe. Des baisses assez spectaculaires de concentration de composés primaires ont même été observées à Paris qui a enregistré une chute de 40 % d'oxydes d'azote entre 1990 et 2007. L'évolution des maxima de concentration d'ozone sur l'Europe (figure 3), caractérisés par le 90e **centile** annuel de la concentration observée sur plusieurs dizaines de sites est à la baisse : environ 5 **ppb** (7 %) entre 1990 et 2005, avec toutefois un "accident" en 2003, dû à l'exceptionnelle vague de chaleur. Pourtant, malgré le caractère hors norme des conditions rencontrées au cours de cet été, les concentrations maximales d'ozone demeuraient inférieures ou comparables à celles des étés 1990 et 1994. Cela s'explique par le fait que les concentrations d'ozone subissent des influences contradictoires. En effet, sous l'influence des réductions d'émissions en Europe, les fortes valeurs baissent. Mais l'augmentation des émissions globales de précurseurs d'ozone tend à accroître les concentrations "de fond" présentes dans l'atmosphère. Ainsi, plusieurs sites européens montrent simultanément une baisse des maxima et une hausse des minima ; les valeurs médianes représentées (figure 3) n'ayant pas de tendance particulière. Le

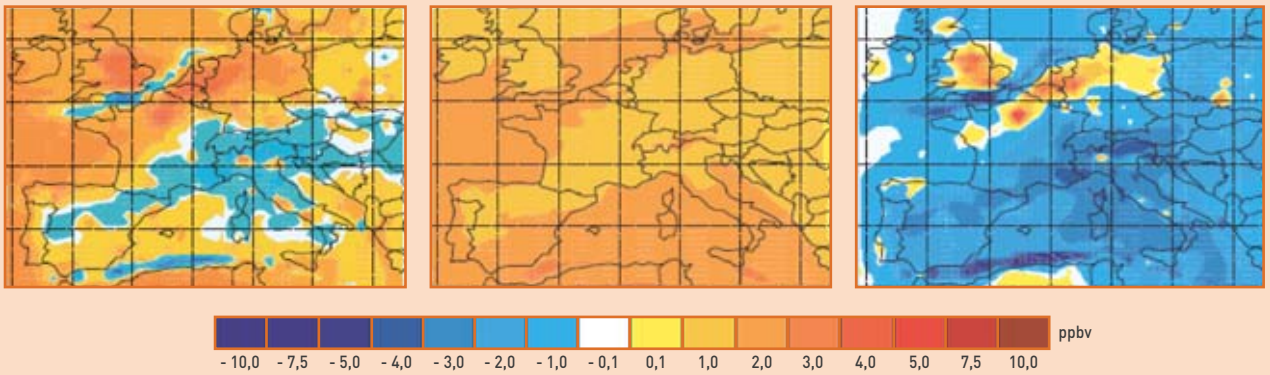


Figure 4.
À gauche, différence des concentrations d'ozone entre 2030 et 2001 estimée selon un scénario d'application de la législation en vigueur, à l'échelle globale comme à l'échelle européenne. Au milieu, les émissions globales sont modifiées mais pas les émissions européennes. À droite, seules les émissions européennes sont modifiées. D'après Szopa *et al.*, 2006.

LSCE a réalisé une estimation de l'évolution des concentrations d'ozone, sous ce double effet, en simulant séparément et simultanément les différences d'émissions globales et européennes prévues entre 2001 et 2030, mais aussi en utilisant les conditions météorologiques de l'année 2001 dans tous les cas de figure. Le résultat montre des différences très contrastées entre 2001 et 2030 (figure 4).
Comme pour l'échelle globale, le changement climatique affectera également la qualité de l'air en Europe où la température moyenne augmente, depuis plusieurs décennies, à un rythme au moins aussi soutenu que l'évolution prévue par les modèles du GIEC. La

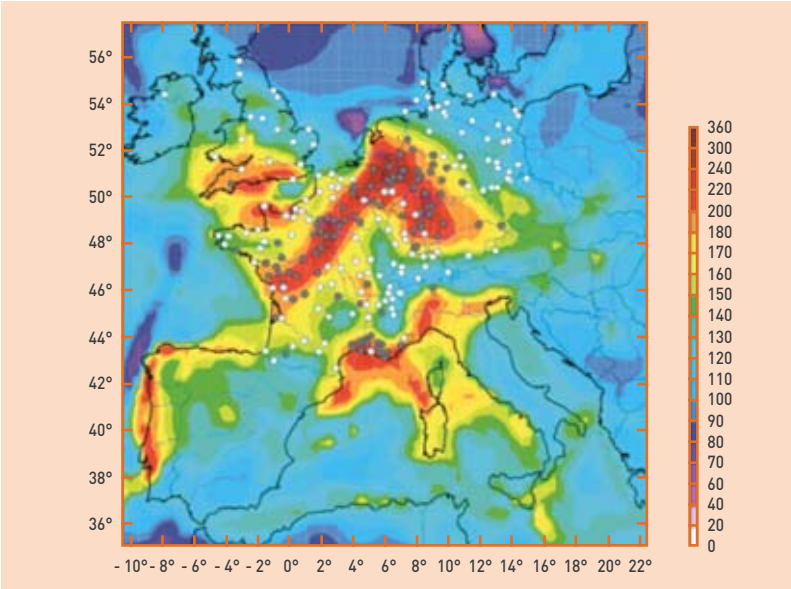


Figure 5.
Concentrations d'ozone en surface (en µg·m^{-3}, diviser par 2 pour obtenir des ppb), simulées par le modèle, pour le 8 août 2003, à 14 h UTC, avec les stations marquées par des cercles vides si la concentration ne dépasse pas 180 µg·m^{-3}, et en cercles pleins si elle dépasse 180 µg·m^{-3}. D'après Vautard *et al.* (2005).

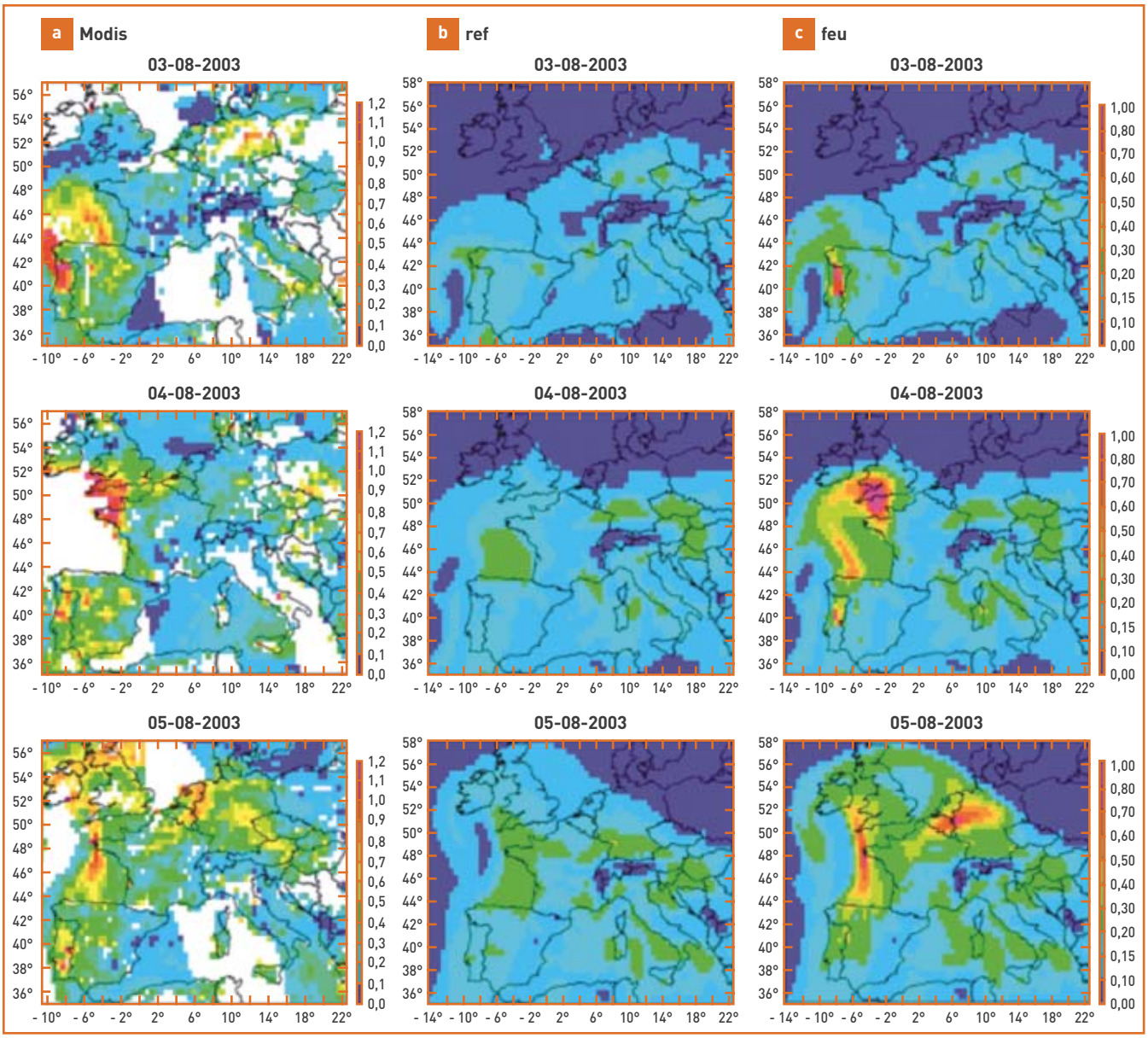


Figure 6.
Distribution géographique des épaisseurs optiques d'aérosols à 550 nm sur l'Europe, du 3 au 5 août 2003 ; *A (colonne de gauche)* établie à partir de MODIS et simulée par le modèle Chimere ; *B (colonne du milieu)* sans et *C (colonne de droite)* avec les émissions dues aux feux. D'après Vautard *et al.* (2007).

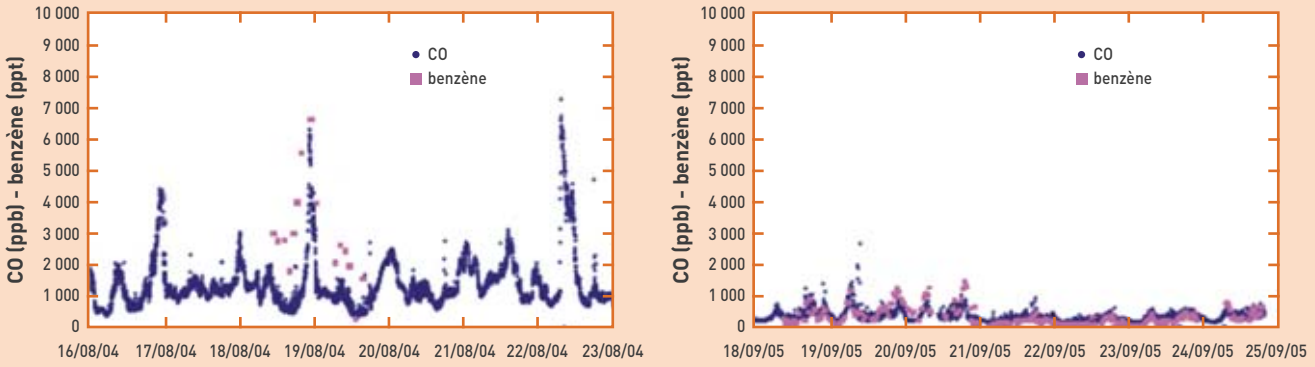


Figure 7. Évolution, sur une semaine, des concentrations de benzène et de monoxyde de carbone, au centre de Pékin (à gauche) et au centre de Paris (à droite). D'après Gros *et al.* (2007).

dernière décennie se caractérise par l'occurrence de plusieurs étés très chauds. En 2003, une vague de chaleur sans précédent a touché toute l'Europe, notamment la France. En 2006, ce fut le tour de l'Europe centrale et, en 2007, de l'Europe du Sud-Est. L'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur fait partie du tableau des conséquences du changement climatique en Europe. Aussi, l'été 2003 est-il désormais considéré comme le prototype des étés que vivront les Européens dans la deuxième moitié du XXIe siècle. Il s'avère donc particulièrement instructif d'étudier les conséquences de la vague de chaleur de 2003 sur la qualité de l'air.

Une des premières caractéristiques des concentrations d'ozone observées lors de la première moitié du mois d'août 2003 se situe dans l'extension spatiale et temporelle des fortes valeurs. La stagnation des masses d'air en Europe a permis l'accumulation, jour après jour, de polluants photochimiques. Pour le 8 août 2003, la simulation opérée par le modèle de qualité de l'air (Chimere) de l'Institut Pierre-Simon Laplace, montre les concentrations d'ozone avec une représentation des concentrations observées sur plusieurs stations en Europe (figure 5). La taille du nuage de pollution dépasse largement le cadre des frontières nationales et seules des réductions d'émissions, à l'échelle européennes et anticipées de plusieurs jours, auraient permis de réduire ces concentrations de façon significative.

La conséquence des vagues de chaleur attendues dans le cadre du changement climatique en Europe ne se limite pas à la pollution photochimique à grande échelle. En 2003, les feux de forêt d'Europe du Sud ont ravagé une surface importante, émettant dans l'atmosphère une grande quantité de polluants, notamment des aérosols carbonés qui se sont ensuite dispersés sur le continent. Le panache des feux, au Portugal, a été retrouvé en Europe du Nord, comme le confirment les observations du satellite Modis et les **simulations numériques** (figure 6).

Les émissions, l'usage des sols et bien d'autres facteurs évolueront probablement dans plusieurs décennies. Néanmoins, l'analyse des conséquences de la vague de chaleur de 2003 a permis de montrer que, lors d'événements extrêmes de ce type, nous pouvons attendre des épisodes de stagnation atmosphérique conduisant à une forte dégradation, à grande échelle, de la qualité de l'air.

La qualité de l'air dans les mégapoles émergentes

Les problèmes les plus sérieux de santé publique liés à la pollution atmosphérique ne surviendront probablement pas en Europe. En effet, la part de population urbaine mondiale ne cesse de s'accroître notamment dans les pays émergents. Elle concentre les émissions polluantes dans un nombre de mégalopoles en proportion. Ces agglomérations urbaines de plus de 10 millions d'habitants, au nombre de 8 en 1950, de 41 en 2000, pourraient atteindre les 59 en 2015. D'où l'importance de déterminer les niveaux de concentration et la composition chimique rencontrés dans ces centres urbains émergents très différents des villes occidentales. Pour cette raison, une équipe du LSCE dédie une part de ses activités à des campagnes de terrain afin de déterminer ces propriétés. Par exemple, le centre urbain de Pékin se trouve soumis à des concentrations en **benzène** et monoxyde de carbone 5 à 10 fois plus élevées que le centre urbain parisien (figure 7). Des impacts majeurs de la pollution atmosphérique sur la santé ne devraient pas manquer de se produire dans ces nouvelles mégapoles.

> Robert Vautard
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)

POUR EN SAVOIR PLUS

V. Gros, J. Sciare and T. Yu, "Air quality measurements in megacities : focus on gaseous organic and particulate pollutants and comparison between two contrasted cities, Paris and Beijing", *C. R. Geosciences*, 339, 764-774, 2007.

S. Szopa, D. A. Hauglustaine, L. Menut, R. Vautard, "Future global tropospheric ozone changes and impact on European air quality", *Geophys, Res. Lett.*, 33, L14805, doi:10.1029/2006GL025860, 2006.

M. Beekmann, J. Desplats, A. Hodzic, S. Morel, R. Vautard, "Air quality in Europe during the summer of 2003 as prototype of air quality in a warmer climate", *C. R. Geoscience*, 339, 747-763, 2007.

Emma Lee/Life File

Les incendies produisent des aérosols qui peuvent voyager autour de la Terre et venir s'ajouter aux polluants émis aux échelles locale ou régionale. Ils ont néanmoins un rôle fondamental dans la biodiversité quand ils ne sont pas déclenchés par l'homme.

II. SOL, AIR ET EAU SOUS SURVEILLANCE

À côté des facteurs qui, comme le gaz carbonique, exercent leur influence à l'échelle de la planète entière, il existe quantité de polluants de natures diverses qui se concentrent ici ou se retrouvent là, voire pourraient apparaître sur des territoires plus ou moins étendus ou en des endroits précis, par exemple à la suite d'une contamination au long cours ou lors d'un événement accidentel. Leur "traque" pose trois séries de problèmes. La première tient à la variété et à la multiplicité des polluants eux-mêmes et à leurs formes. La deuxième découle de la complexité des caractéristiques propres des milieux en cause (les sols, l'air, les eaux) qui requièrent des modèles de transfert ainsi que des techniques d'analyse adaptés. Enfin, la troisième, qui lance nombre de défis aux chercheurs, réside très souvent dans le très bas niveau de concentration des polluants à déceler. Si les scientifiques cherchent des traces, ce sont parfois des ultra-traces (un centième de millionième de gramme, par exemple) qu'ils sont tenus de détecter au moyen d'appareillages de plus en plus sensibles et sophistiqués. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit pour eux de pister des actinides, radionucléides rencontrés dans le cycle du combustible nucléaire, que les exploitants du nucléaire se doivent d'être en mesure de déceler, ces éléments venant à se trouver, en infimes quantités, dans l'environnement.
Bien sûr, certaines situations, comme celles de sites industriels abandonnés ou des accidents de grande ampleur, peuvent présenter des tableaux de pollution beaucoup plus problématiques. La traçabilité des activités et des produits en cause, hydrocarbures et métaux lourds, voire radionucléides, en complique souvent l'estimation. D'où le nécessaire développement de techniques variées. Certaines relèvent désormais des nanosciences, concernées d'ailleurs à la fois en tant qu'outil et source potentielle de pollution. D'autres poussent des méthodes plus classiques au bout de leurs potentialités. Ainsi, un instrument de pointe basé sur la technique du lidar a été conçu conjointement par le CEA et le CNRS pour contrôler la qualité de l'air. L'évolution de certains polluants pourra être suivie à l'échelle planétaire avec l'arrivée d'une nouvelle génération d'instruments spatiaux couplant des mesures actives (lidar, radar) à des mesures passives (radiomètre, spectromètre). Le CEA collabore avec le Cnes sur ce sujet.
Dans cette traque aux pollutions, le CEA apporte donc des contributions multiples, nucléaires ou non. Il s'impose également dans certains secteurs où il était moins attendu, notamment dans l'étude des systèmes écologiques considérés comme des systèmes complexes, au sens où les physiciens l'entendent. De même que ces derniers ont fait de fructueuses incursions dans les sciences du vivant, leur apport à l'écologie peut se révéler extrêmement fécond et donner un nouvel éclairage à l'étude des comportements humains et de leurs conséquences.

Détection d'**indices chimiques** et **radioactifs** dans l'environnement

Conformément à la réglementation environnementale, le CEA évalue l'impact écologique de ses centres et inscrit sa politique de gestion dans une démarche de développement durable. Le travail du chimiste-analyste constitue la base de ces évaluations. Cette mission les a amenés à développer des méthodes d'analyses spécifiques et à rendre leurs instruments de mesure toujours plus performants avec un objectif à la clef : accroître la diversité des substances détectables mais aussi améliorer les limites de détection pour déceler traces et ultra-traces (quantités inférieures à un centième de millionième de gramme) dans l'environnement. Aujourd'hui, les efforts de R&D se concentrent sur des systèmes autonomes, miniaturisés, plus sensibles, plus réactifs, plus sélectifs, automatisables. Cette expertise acquise par le CEA, si elle permet de vérifier que les activités industrielles, notamment nucléaires, ne nuisent ni à l'environnement ni aux populations, sert également les programmes nationaux et internationaux de lutte contre la prolifération nucléaire.

© 1999 EyeWire, Inc.

L'analyse de traces dans l'environnement connaît de nouvelles avancées

Surveiller et contrôler l'impact des activités industrielles sur l'environnement, voilà le nouveau défi lancé aux analystes. La variabilité et l'hétérogénéité des milieux, le fait que l'environnement soit un système très dispersif, les multiples formes physico-chimiques que peuvent y prendre les éléments-traces figurent comme autant de facteurs à considérer pour améliorer les techniques, parfois issues du secteur nucléaire.

La chimie analytique environnementale fait l'objet, depuis quelques années, d'un enjeu sociétal de première importance. En effet, la volonté de s'inscrire dans une logique de développement durable a entraîné un renforcement de la législation sur le contrôle et sur la réduction de l'impact environnemental des activités industrielles, notamment avec le règlement européen Reach (1). Néanmoins, deux grands défis restent à relever pour les analystes en charge du développement et de l'application des techniques analytiques destinées à identifier et quantifier, de façon fiable et représentative, les espèces organiques et minérales ainsi qu'à mesurer les paramètres physico-chimiques et biochimiques dans les sols, l'eau et l'air.

Le premier de ces défis concerne la variabilité et l'hétérogénéité intrinsèque du milieu environnemental, notamment des sols et des matrices solides (particules, **sédiments**…). En la matière, la question se pose de la représentativité et donc de la validité d'une mesure réalisée dans ces conditions. Des avancées s'annoncent dans les domaines de l'acquisition des données et de la multiplicité des mesures pour jouer sur la statistique (systèmes miniaturisés à bas coût, appareils portables de terrain, capteurs à reconnaissance spécifique…). Le deuxième défi découle du caractère ouvert et fortement dispersif de l'environnement. Les espèces (les **analytes**) d'intérêt s'y retrouvent à l'état de **traces** voire d'**ultra-traces** et nécessitent donc des techniques de plus en plus sensibles. Relever ces deux défis corrélatifs suppose de pouvoir mesurer des espèces à l'état de traces dans des systèmes très hétérogènes et en présence de nombreux autres composés. Dans ce contexte, les avancées récentes se développent selon deux axes : celui des mesures de terrain au moyen d'appareils portables, de capteurs… et celui des mesures réalisées en différé après prélèvements, en cherchant à perfectionner les étapes de la chimie analytique et de l'instrumentation. Dans ce dernier cas, l'analyse des échantillons environnementaux nécessite une succession d'étapes, toutes essentielles à l'obtention d'un résultat juste et précis (figure 1).

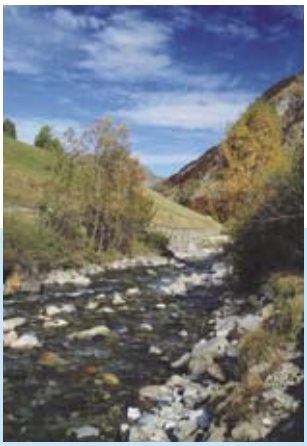
(1) Règlement européen Reach (enregistrement, évaluation, autorisation des substances chimiques) : règlement européen (1er juin 2007) visant à la protection de la santé humaine et de l'environnement par une meilleure connaissance des propriétés des substances chimiques fabriquées, importées et utilisées dans l'Union européenne ainsi qu'à une maîtrise accrue des risques liés à leur utilisation.

CEA/DR

Couplage électrophorèse capillaire/ICPMS utilisé pour les études de spéciation de l'**uranium** dans l'environnement.

Préparation et pré-concentration de l'échantillon

La première difficulté concerne le prélèvement des échantillons naturels. Il doit s'effectuer de manière à représenter les variations spatiales et temporelles des concentrations ainsi que les formes chimiques des espèces à caractériser. Viennent ensuite les contraintes de transport et de stockage de ces échantillons : n'engendrer ni contamination, ni perte, ni transformation des analytes.



Phovoir

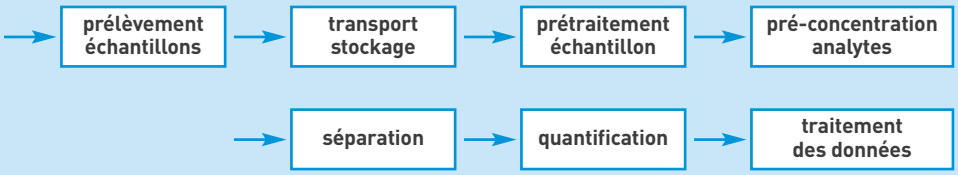
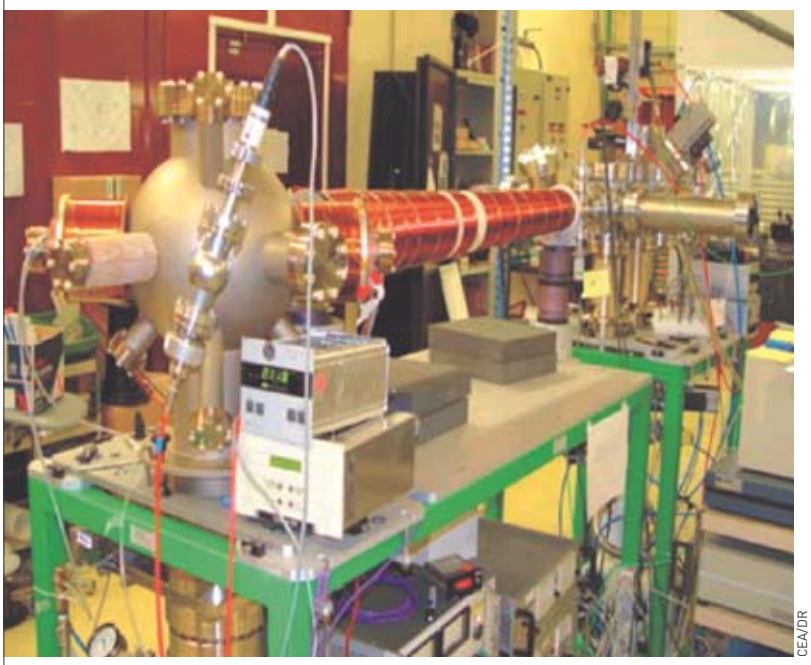


Figure 1. Exemple de succession des étapes analytiques nécessaires pour caractériser un échantillon environnemental.

Le choix des techniques de préparation des échantillons et de l'analyse proprement dite dépend de la nature de l'échantillon (solide, poudre, liquide, gaz…), de la nature des analytes (**élément**, **molécule**, **radio-isotope**…), de leur quantité ainsi que de l'information désirée (identification, quantification, forme chimique…). Les premières étapes du traitement de l'échantillon consistent généralement à extraire les analytes pour éliminer la matrice environnementale puis à les pré-concentrer. Ces étapes, souvent longues et sujettes à contamination ou perte d'analytes, demeurent néanmoins indispensables pour rendre les échantillons compatibles avec les techniques d'analyses des éléments et/ou des molécules. Des développements sont en cours pour améliorer la sensibilité et la sélectivité des techniques de mesure. Ils permettront de simplifier, voire de supprimer dans certains cas, ces étapes de traitement. Par exemple, si les éléments recherchés concernent des échantillons solides, ils seront généralement mis en solution. En revanche, s'il s'agit de polluants organiques, la préférence ira vers des méthodes d'extraction plus douces. Pour les échantillons liquides, deux méthodes prévalent pour isoler et pré-concentrer les espèces d'intérêt : les **techniques d'extraction**, notamment utilisées en phase solide, et le passage sur des **échangeurs d'ions** (2). Cet échange permet de concentrer et de séparer l'espèce d'intérêt sur le support échangeur avant de l'**éluer** pour l'analyser *(voir L'analyse environnementale des composés organiques,* p. 43*)*.
Parmi les principaux développements en cours pour obtenir des techniques d'extraction et de pré-concentration encore plus rapides et plus sélectives, figurent d'abord ceux à base d'immuno-**adsorbants** c'est-à-dire des supports solides greffés chimiquement par certains anticorps spécifiques des polluants d'intérêt. Ces anticorps sont produits à partir d'un composé, l'**antigène**, pris comme modèle représentatif de la famille des polluants ciblée. Les molécules, retenues sélectivement par les anticorps, sont ensuite "désorbées" par un éluant adéquat. Appelé immuno-extraction, ce protocole d'extraction sur immuno-absorbants est similaire à celui utilisé sur des supports classiques d'extraction. Ces systèmes s'avèrent particulièrement efficaces pour détecter de petites molécules comme par exemple les pesticides. D'autres développements utilisent les **polymères à empreintes moléculaires**. Il s'agit de polymères synthétisés autour d'une molécule modèle appelée aussi empreinte. Après la polymérisation, l'élimination de la molécule empreinte donne un polymère poreux possédant des cavités capables de reconnaître la molécule modèle avec une sélectivité liée à la structure et aux fonctions chimiques. Les immuno-adsorbants et parfois certains polymères à empreintes moléculaires peuvent se conditionner sous forme de cartouches (l'extraction étant alors dissociée de la séparation) ou de pré-colonnes (l'extraction étant alors couplée, en ligne, avec la séparation). Ils s'utilisent, sur le terrain, pour l'extraction de familles de polluants à partir d'échantillons aqueux ou pour la purification d'extraits issus du traitement d'échantillons solides.

(2) Les échangeurs d'ions sont généralement des **polymères** organiques portant des groupements ionisables qui ont la propriété d'échanger, de façon réversible, certains de leurs ions au contact d'autres ions provenant de l'échantillon liquide.



CEA/DR

Mesures d'ultra-traces isotopiques par piégeage d'atomes (ATTA).

Les techniques récentes d'analyse de traces dans l'environnement

Après l'élimination de la matrice puis, éventuellement, la pré-concentration des analytes pour adapter l'échantillon à la technique d'analyse, le processus se termine par une mesure de la concentration du polluant. La technique utilisée dépend de la nature organique ou inorganique de celui-ci. Quand le traitement ne s'est pas avéré suffisamment sélectif, cette mesure de concentration nécessite parfois une étape supplémentaire de séparation des éléments et/ou des molécules.
Parmi les **techniques séparatives** les plus utilisées figurent la **chromatographie en phase liquide** et l'**électrophorèse capillaire** pour les échantillons liquides et la **chromatographie en phase gazeuse**. Ces techniques regroupent de nombreux modes de séparation des mélanges complexes en fonction de la nature et des propriétés des composés à séparer. Elles s'utilisent directement pour l'analyse qualitative et quantitative des composés après leur séparation mais sont, le plus souvent, couplées à différentes techniques de **spectrométrie de masse** pour augmenter la sensibilité de détection. Dans ce cadre, des interfaces sont spécialement développées en fonction des sources d'**ionisation** des spectromètres de masse, depuis les plus "douces" pour l'analyse moléculaire telles que l'**électrospray**, l'**ionisation chimique à pression atmosphérique**, la **photo ionisation à pression atmosphérique** jusqu'aux plus énergétiques comme le **plasma à couplage inductif** pour l'analyse élémentaire.
Le choix du spectromètre de masse dépend de l'objectif visé. Pour les **composés organiques**, la **trappe ionique** ou le nouveau spectromètre "**Orbi trappe**" dont la résolution atteint 10^5 et la précision sur les mesures de masse 1 à 2 **ppm**, permettent la détermination de la structure. Le **triple quadripôle** permet

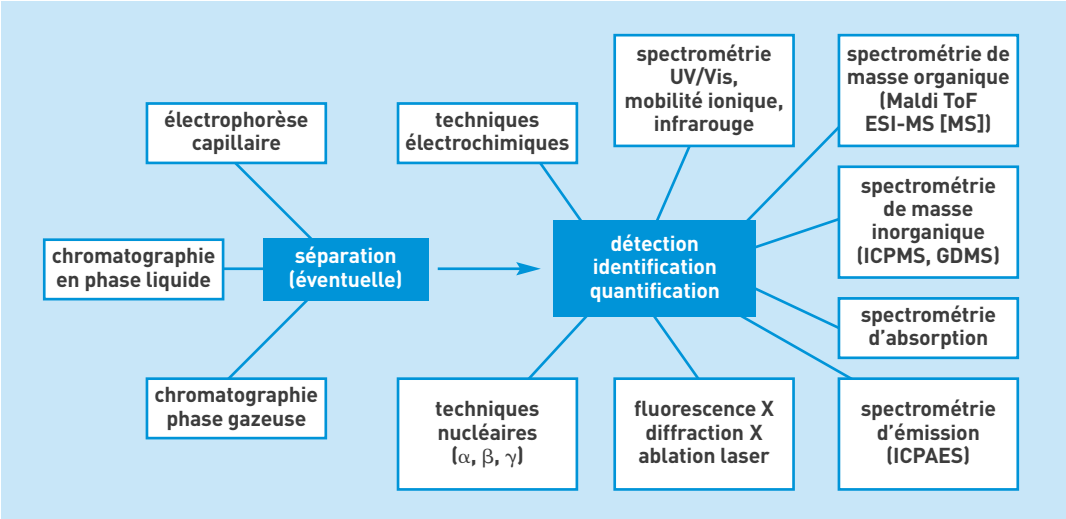


Figure 2.
Principales techniques analytiques d'identification et de quantification des éléments et des molécules.

l'analyse qualitative et quantitative et le **spectromètre de masse à temps de vol**, basé sur la différence de temps de parcours des **ions** en fonction de leur masse, les formules moléculaires. Pour les éléments, en association avec une source **ICP**, le quadripôle et le **secteur magnétique** permettent les analyses qualitatives et quantitatives alors que le secteur magnétique associé à une multicollection, c'est-à-dire une détection simultanée de tous les **isotopes** d'un élément, permet les analyses isotopiques de grande précision.
Les développements les plus récents tendent au couplage de la chromatographie liquide, par exemple, avec les **spectrométries de masse organique et inorganique** afin d'obtenir simultanément les deux types d'information. D'autres techniques analytiques sont utilisées, avec ou sans séparation préalable, comme les techniques de **spectrométrie atomique** (émission, absorption) pour les analyses élémentaires ou les **spectrométries IR**, **UV/Vis**, **Raman**… pour les analyses moléculaires. Dans certains cas particuliers, l'utilisation de techniques d'analyse directe de solides comme la **spectrométrie de masse à décharge luminescente**, la **fluorescence X**, l'**ablation laser** ou la toute récente **spectrométrie de masse à désorption/ionisation par électrospray** seront utilisées. Quant aux techniques électrochimiques basées sur les phénomènes d'**oxydo-réduction** se produisant aux **électrodes** (**polarographie**, **voltampérométrie de redissolution anodique**…) elles permettent de déterminer la biodisponibilité des éléments et d'étudier leurs **complexes** avec des **ligands** organiques ou inorganiques. En ce qui concerne le cas particulier des éléments ou isotopes **radioactifs** à l'état de traces (voir *Recherche d'ultra-traces d'actinides dans des échantillons de l'environnement*, p. 48), le CEA a développé de nombreuses techniques dans le cadre de la surveillance de l'environnement de ses sites (par l'intermédiaire des Services de protection contre les rayonnements), de la non-prolifération et des études liées au stockage des déchets. Outre les techniques **radiométriques** permettant de détecter des isotopes grâce à l'émission de leur rayonnement (alpha, bêta, gamma), les techniques de **spectrométrie de masse à source plasma à couplage inductif** (**ICPMS**), **thermo-ionisation** (**TIMS**), **ionisation résonante** (**RIMS**)… permettent de mesurer jusqu'à quelques dizaines de **femtogrammes** pour certains éléments. Des techniques comme l'**Atom Trap Trace Analysis** (**ATTA**) basée sur le piégeage magnéto-optique d'**atomes** refroidis par **laser** permettent même de quantifier des rapports isotopiques du **césium** sur quelques milliers d'atomes (Figure 2).

La spéciation, un cas particulier d'analyse de traces dans l'environnement

À l'inverse des composés organiques, les éléments traces ne se transforment pas en d'autres composés, néanmoins, ils peuvent se présenter sous différentes formes physico-chimiques dans l'environnement. Appelée **spéciation**, la détermination de ces éléments, sous ses différentes espèces, permet d'évaluer leur mobilité et leur bio-accumulation, c'est-à-dire, au final, leur toxicité. Par exemple, dans l'eau, les formes **trivalentes** Cr (III) et **hexavalentes** Cr (VI) du **chrome** coexistent à une concentration comprise entre 1 et 10 µg/L. L'expérimentation a mis en évidence le caractère très toxique du Cr VI, comparativement au chrome élémentaire et à ses composés trivalents (Cr^{3+}).
Les études de spéciation bénéficient de l'aide des **codes de calcul** pour déterminer la répartition des formes chimiques à partir de la connaissance de la composition du milieu et des équilibres physico-chimiques mis en jeu avec les constantes thermodynamiques associées et/ou par des techniques d'analyse directes ou indirectes. Parmi les techniques d'analyse directes, la **spectrofluorimétrie laser à résolution temporelle** (**SLRT**) et la **spectrométrie de masse à source électrospray** (**ESMS**) s'utilisent notamment pour caractériser les espèces et déterminer des constantes de **complexation**. Les techniques indirectes comprennent essentiellement le couplage entre les techniques séparatives (des différents complexes) et les techniques de détection des éléments.

L'analyse *in situ*

Le CEA a développé de nombreux systèmes innovants dédiés aux analyses, *in situ* et en temps réel, pour s'affranchir des étapes de prélèvement, de conservation et de traitement des échantillons – ces étapes étant longues, coûteuses et susceptibles d'être à l'origine d'artéfacts de mesure. Les systèmes développés au CEA reposent sur la **spectroscopie** et l'utilisation

de lasers. Ils permettent de concevoir et de mettre en œuvre des équipements robustes et transportables, avec des performances proches de celles obtenues en laboratoire.
Parmi les développements les plus récents consacrés à la caractérisation des polluants dans l'air figure le *Light Detection And Ranging* (lidar/voir *La pollution atmosphérique particulaire sous la surveillance du lidar*, p. 75), une technique dédiée à la mesure de polluants à distance et en temps réel. Son principe consiste à émettre une impulsion laser vers la zone d'intérêt puis à collecter et analyser la rétrodiffusion du faisceau par les molécules et les particules rencontrées dans l'**atmosphère**. L'intensité du signal informe sur la densité de particules et le retard par rapport à l'émission, la localisation (de quelques dizaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres). En utilisant plusieurs longueurs d'onde, il devient alors possible d'obtenir des informations complémentaires sur la nature des molécules ou sur la géométrie, la taille et le rapport d'aspect des particules.
Quant à la détection des polluants atmosphériques, la technique utilisée est celle de la *Cavity Ring Down Spectroscopy* (CRDS) qui permet la mesure des traces de gaz par **spectroscopie d'absorption**. Le principe consiste d'abord à mesurer la constante de temps de décroissance d'une impulsion laser injectée dans une cavité optique résonante(3) contenant le gaz à analyser, et de cette mesure en déduire la concentration. S'appuyant sur l'utilisation de **diodes lasers**, cette méthode présente un double avantage : d'abord, celui d'être compacte et robuste ; ensuite, celui de pouvoir mesurer, sélectivement, en temps réel, des traces de petites molécules gazeuses telles que CO, **H_2S**, **CH_4**, **NH_3**, HCl… sur des volumes de l'ordre de 10 cm^3, et cela, avec des limites de détection de l'ordre de la partie par milliard (**ppb**). Cette grande sensibilité résulte de la longueur du chemin effectif d'absorption (plusieurs km) parcourue par les **photons** piégés dans la cavité (figure 3).

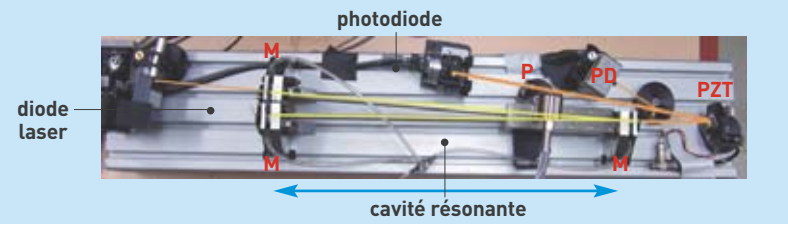


Figure 3. Schéma de principe de la CRDS utilisée pour l'analyse de gaz *in situ*.

D'autres techniques, initialement développées pour réaliser des analyses en milieu hostile, comme l'analyse à distance de matériaux radioactifs, font aujourd'hui l'objet de nouvelles applications. Par exemple, les chercheurs du Département de physico-chimie du centre de Saclay les utilisent pour réaliser leurs mesures *in situ* dans l'environnement. Parmi ces techniques, la **spectroscopie d'émission sur plasma** produite par laser, ou *Laser Induced Breakdown Spectroscopy* (**LIBS**), permet de réaliser l'analyse muti-élémentaire de tout type de matériau (Figure 4). Son principe consiste à focaliser un rayonnement laser pulsé sur l'échantillon

(3) Cette cavité entre en résonance avec l'**onde électromagnétique** (dans la mesure où celle-ci possède une fréquence particulière due à la géométrie de la cavité) à l'image d'une caisse de résonance acoustique.

CEA/DR

Pistol LIBS : prototype développé au Département de physico-chimie et utilisé pour les applications environnementales.

d'intérêt afin de vaporiser une faible quantité de matière sous forme de **plasma**. Grâce à l'analyse de l'émission spectrale de ce plasma, il devient alors possible d'identifier et de quantifier tous les éléments présents de façon simultanée. La mesure, entièrement fondée sur l'utilisation de rayonnements optiques, peut s'effectuer sans contact, éventuellement à distance et sur tout type de matériau, qu'il s'agisse d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz. De plus, la quasi-totalité des éléments chimiques, même les plus légers, deviennent détectables simultanément, en temps réel, cela jusqu'à des concentrations de l'ordre de la partie par million (ppm) pour les éléments les plus sensibles.
À l'heure actuelle, les développements les plus récents portent sur l'instrumentation ou la méthodologie d'analyse et de traitement des spectres. Il s'agit d'améliorer la sensibilité de la technique mais aussi de l'affranchir des effets de matrice, autrement dit d'une dépendance de l'intensité d'émission avec la nature de l'échantillon.

Miniaturisation des techniques

Aujourd'hui, une autre approche de caractérisation des espèces chimiques sur site se développe, celle des "laboratoires sur puce" ou *Lab-on-chip*. Il s'agit de microsystèmes analytiques de faibles dimensions (à peine quelques cm), capables d'intégrer, dans des micro-canaux de quelques dizaines de **µm**, les différentes étapes de préparation (micro-extraction par exemple) et de séparation (comme l'**électrochromatographie** ou l'électrophorèse capillaire) des constituants. La détection s'appuie souvent sur les techniques spectrométriques (fluorescence, chimiluminescence, absorption UV/Vis…) ou électrochimiques. Ces microsystèmes concernent essentiellement l'analyse de traces métalliques et de polluants organiques.
Les méthodes bio-électrochimiques se développent également pour détecter certains polluants en utilisant des **enzymes** fixés sur des électrodes. La question de la représentativité des échantillons y est contournée par l'utilisation de réseaux de microsystèmes dont l'avantage majeur réside dans la rapidité d'analyse. Dans le domaine de la détection des gaz sur site, des capteurs chimiques miniaturisés sont également développés pour contrôler la pollution des villes ou la surveillance de zones sensibles. De faible

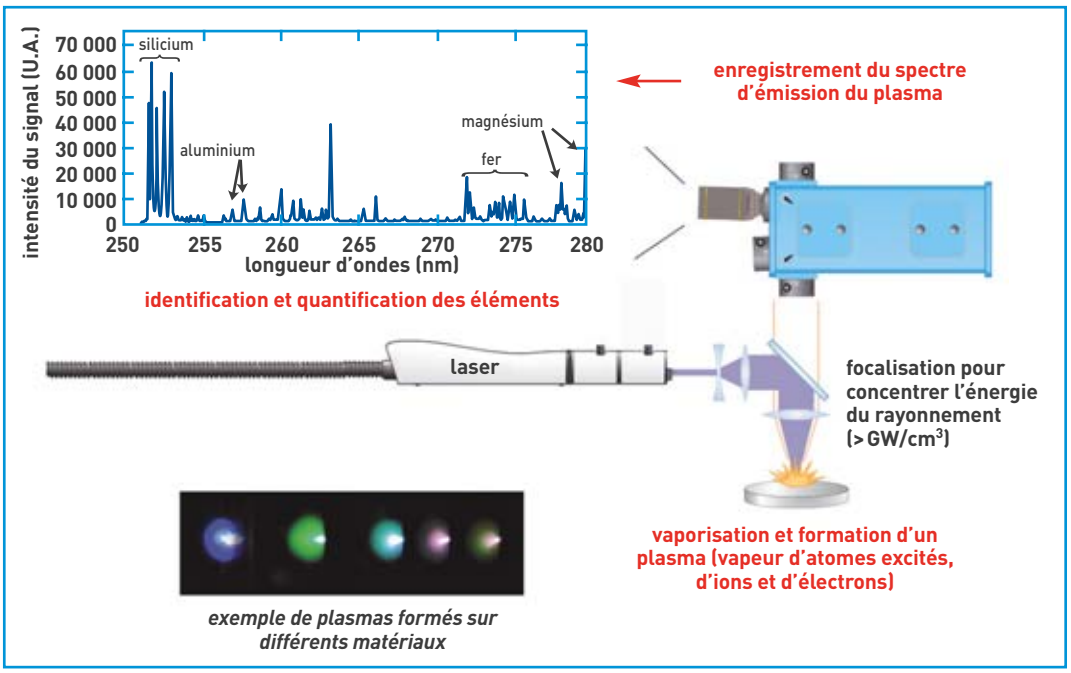


Figure 4.
Principe de la technique LIBS d'analyse élémentaire.

encombrement et de coût modéré, ces capteurs se composent d'une couche sensible **semi-conductrice** (de type **oxyde métallique** ou organique) dont la **conductivité** dépend de la composition de l'atmosphère qui l'entoure. Ils s'avèrent très sensibles aux gaz toxiques comme CO, NH_3, Cl_2, NO_2, O_3… Néanmoins, l'analyse de mélanges complexes nécessite actuellement différents capteurs, chacun étant sensible à une espèce donnée.

Ces différentes méthodes analytiques sur site annoncent, vraisemblablement, de quoi sera fait le futur en matière de contrôle et de surveillance de l'environnement. En effet, les efforts de R&D se concentrent sur des systèmes autonomes, miniaturisés, plus rapides, plus sensibles et plus sélectifs, permettant de réaliser des mesures, aussi bien absolues que relatives, en matière de suivi des variations spatio-temporelles. Par ailleurs, les capteurs (chimiques, optiques…) automatisables, destinés aux analyses rapides en cas de pollution accidentelle, connaissent un plein essor, même si des développements s'avèrent encore nécessaires pour avoir accès directement à l'analyse de traces dans un milieu aussi complexe que celui de l'environnement.

> Frédéric Chartier
Département de physico-chimie
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay

L'analyse environnementale des composés organiques

Les chercheurs du CEA mettent à profit leurs instrumentations les plus modernes pour rechercher les substances polluantes présentes à l'état de traces dans l'environnement.

Conformément à la réglementation environnementale, le CEA évalue l'impact écologique de ses centres et inscrit sa politique de gestion dans une démarche de développement durable. De longue date, des équipes surveillent l'impact radiologique des centres en réalisant des mesures régulières de **radioactivité** aux alentours des installations. De plus, certains services utilisant des substances telles que des carburants, des solvants et divers réactifs organiques, le CEA prend également en compte l'évaluation de l'impact chimique organique, même s'il s'avère très limité.
Le travail du chimiste-analyste constitue la base de ces évaluations et son expertise permet de dresser un tableau objectif de la situation environnementale dans les sols, l'eau et l'air. Dans le cadre de cette mission, les chi-

F.Rhodes/CEA

Spectromètre de masse pour l'analyse des échantillons.

mistes du CEA développent des méthodes d'analyses spécifiques et cherchent à rendre leurs instruments de mesure toujours plus performants. Parvenir à cet objectif suppose d'accroître la diversité des substances détectables mais également d'améliorer les limites de détection afin de pouvoir déceler les **traces** infimes de polluants dilués dans des matrices complexes.

Origine des substances retrouvées dans l'environnement

Innombrables, les **composés organiques** détectables dans les prélèvements naturels proviennent d'origines diverses, tant naturelles qu'anthropiques. Ainsi, la présence dans l'environnement d'un solvant organochloré comme le **chloroforme** s'explique, à plus de 90 %, par les émissions naturelles comme la synthèse opérée par les micro-organismes ou les champignons. Par ailleurs, le **Centre interprofessionnel technique d'étude de la pollution atmosphérique** (**CITEPA**) estimait également qu'en 2005, près de 49 % des composés organiques volatils (tableau 1), dispersés dans l'**atmosphère** de la France métropolitaine provenaient de sources naturelles (figure 1). En revanche, l'origine d'autres substances organiques découle des activités humaines, notamment industrielles. Leur présence dans l'environnement constitue donc la marque indubitable d'apports anthropiques. C'est notamment le cas des polychlorobiphényles (PCB) et polychloroterphényles (PCT), des pesticides organochlorés ou encore des **dioxines**.

famille de composés organiques	molécules types (exemple)	usages principaux
hydrocarbures ou huiles minérales	alcanes (hexane) cyclanes (cyclohexane) hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (naphtalène, anthracène)	carburants, solvants divers
composés organiques volatils	cétones (acétone) chlorofluorocarbone (CFC) composés aromatiques monocycliques (benzène, toluène, xylènes, etc.) composés halogénés (chloroforme, trichloroéthane, etc.) composés phénoliques	chimie de synthèse
polychlorobiphényles (PCB)	Arochlore, Pyralène	fluides diélectriques
extractants hydrométallurgiques	tributylphosphate (TBP) cyanex 301	hydrométallurgie du cycle du combustible nucléaire
explosifs	TNT, HMX RDX, TATB	explosifs
agents phytosanitaires	fongicides insecticides, etc.	lutte contre les insectes et les moisissures

Tableau 1.
Contaminants organiques présentés par famille de produits.

Méthodologie et technologies de l'analyse environnementale organique

Les progrès réalisés en matière d'analyse organique environnementale ont entraîné une réduction du nombre des techniques de laboratoire. Aujourd'hui, seules les méthodes reposant sur des instrumentations physiques offrent une polyvalence (détection et identification de composés multiples) et une sensibilité suffisantes. Pour affiner ses expertises, l'analyste doit néanmoins suivre, avec méthode, certaines étapes et protocoles (tableau 2).
L'extraction et la purification, destinée à séparer les **analytes** du milieu expertisé, se justifie en raison de la fréquente incompatibilité des milieux (sols, eaux, air) avec les méthodes instrumentales de quantification. Pour les sols, les analytes sont, le plus souvent, libérés de leur gangue minérale au moyen d'une **extraction par solvants**, laquelle s'opère à haute température (100 à 150 °C) et sous pression (près de 100 fois la pression atmosphérique). Il s'agit d'une des techniques parmi les plus modernes. Quant aux échantillons liquides ou gazeux, le développement de **phases solides absorbantes** pour prélever directement les analytes dans le milieu ou pour traiter les

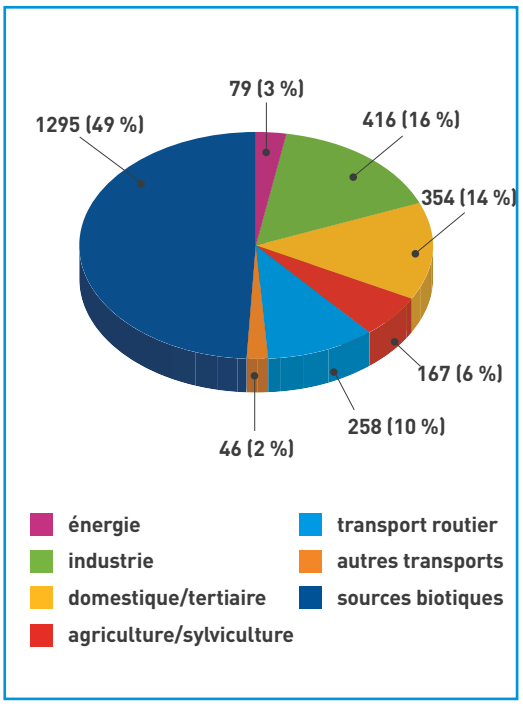
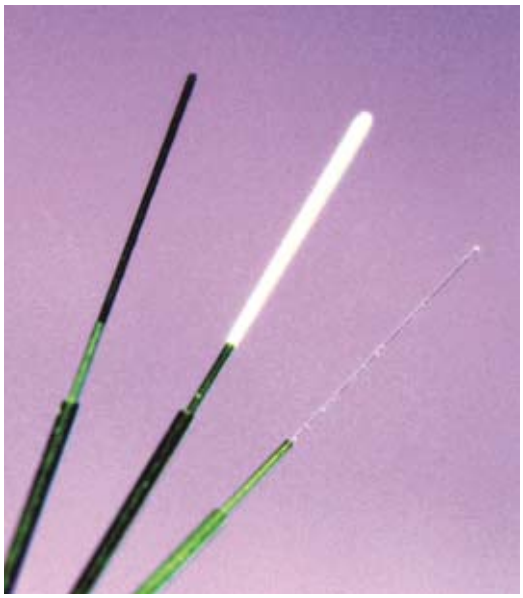


Figure 1.
Émission de composés organiques volatils dans l'air en France métropolitaine (milliers de tonnes) et répartition suivant leurs sources (2005).

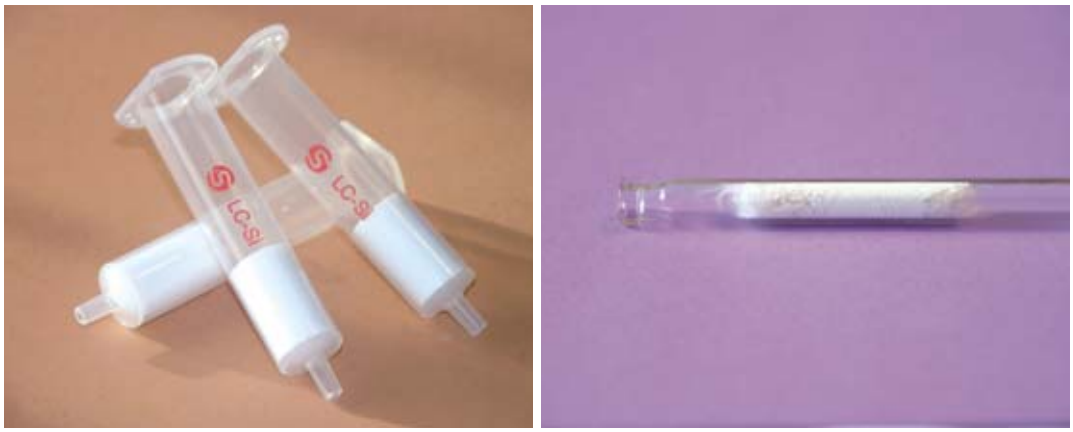


CEA/DR

Fibre de micro-extraction en phase solide permettant l'absorption directe des substances présentes dans l'eau ou dans l'air avant leur analyse chimique, notamment par chromatographie en phase liquide ou gazeuse.

étape du protocole analytique	procédé usuel en analyse organique
prélèvement (garantit la représentativité du prélèvement et de l'analyse)	prélèvement de terrain (air, eau, sol) ; l'air peut être prélevé en bonbonnes ou sac adaptés, ou échantillonné par pompage et concentration des analytes à travers des médias absorbants.
préservation (permet la conservation des analytes labiles)	acidification des solutions (acide sulfurique, pH=2), réfrigération (4 °C), ou congélation conservation à l'obscurité en flacons hermétiques en verre fumé ou en Téflon
extraction, concentration, purification (conduit à l'élimination de la matrice environnementale et à la concentration des analytes)	extraction liquide-liquide, liquide-solide (SPE, SPME, SBSE), ou solide-gaz (tubes remplis d'absorbants : Tenax, etc.)
analyse (se décompose souvent en deux étapes : séparation et détection)	
séparation (permet l'identification et la quantification des analytes lors de l'étape ultérieure)	chromatographie gazeuse ou liquide
détection, identification, quantification	détecteurs réfractométriques, thermiques, à ionisation de flamme, à capture d'électrons, etc. ; spectromètres divers (émission de flamme, spectrométrie UV-visible ou infrarouge, spectrométrie de masse, etc.)

Tableau 2.
Étapes et procédés usuels en analyse organique environnementale.



CEA/DR

Cartouches absorbantes pour le traitement d'échantillons aqueux (a) ou d'air (b).

échantillons a constitué un progrès majeur à l'origine de nouvelles technologies, appliquées sur le terrain ou au laboratoire. Ces phases solides (**polymères**, **silice greffée**, **carbone graphitisé**, **polymères à empreintes moléculaires**) présentent des affinités fortes pour les analytes. Conditionnées sous forme de cartouches pré-remplies, elles permettent de "filtrer" le prélèvement par percolation et d'y retenir les analytes plus ou moins spécifiquement (figure 2). Une variante consiste à déposer les phases absorbantes sur un support rigide (fibre de verre, barreau agitateur), directement placé dans le milieu analysé, et y prélever les analytes. Cette technologie fait partie des méthodes modernes largement employées par les laboratoires spécialisés. Une fois extraites et purifiées de leur matrice d'origine, les substances d'intérêt sont reprises chimiquement par un solvant ou relarguées thermiquement pour être injectées dans l'instrumentation analytique proprement dite.

À l'heure actuelle, les détecteurs modernes ne pouvant pas offrir, en même temps, une polyvalence, une sélectivité et une sensibilité suffisantes, l'introduction de mélanges d'analytes dans ces instruments requiert toujours le passage par une étape séparative, souvent réalisée par un processus **chromatographique**. L'identification et la quantification des analytes s'effectuent par couplage de ces **techniques séparatives** avec des détecteurs judicieusement choisis suivant les substances d'intérêt (tableau 3). Les laboratoires environnementaux, qui doivent analyser une

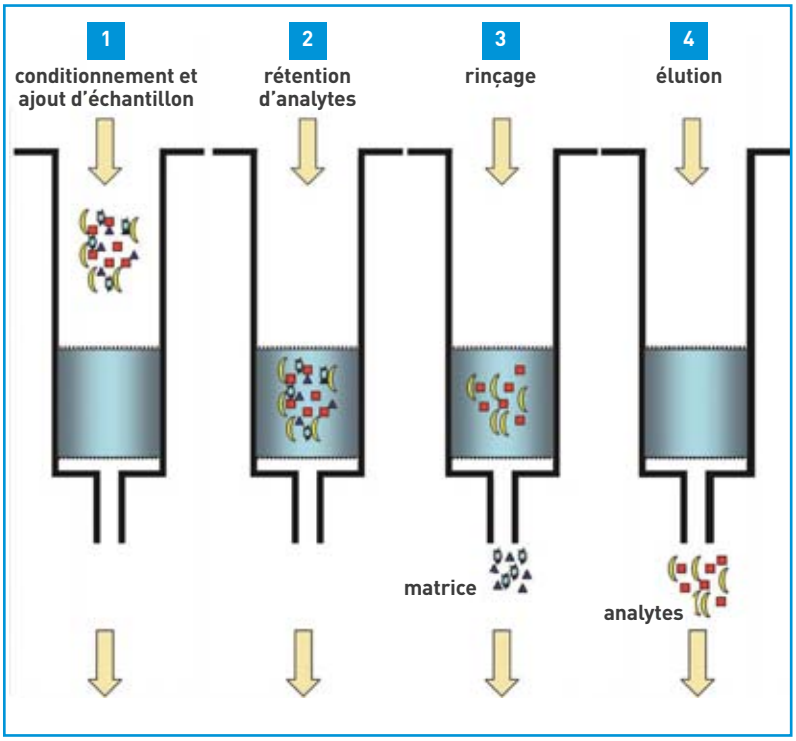


Figure 2.
Principe de l'extraction sélective d'analytes par cartouche d'extraction en phase solide. Séquences opératoires montrant l'introduction de l'échantillon liquide dans une cartouche d'extraction (1), la rétention sélective des analytes par rapport à la matrice (2 et 3), puis la récupération des analytes (4) avant injection dans l'instrumentation analytique.

atome (isotope) (ou espèce moléculaire)	masse (unité atomique)
hydrogène (^{1}H)	1,007825
deutérium (^{2}H)	2,0140
oxygène 16 (^{16}O)	15,994915
carbone 12 (^{12}C)	12,000000
azote 14 (^{14}N)	14,003074
monoxyde de carbone ($^{12}C^{16}O$)	27,994915
azote ($^{14}N_2$)	28,006148
éthylène ($^{12}C_2{}^{1}H_4$)	28,03130

Tableau 3.
Masses atomiques précises permettant l'identification univoque de formules chimiques brutes.

grande diversité de substances, s'orientent nécessairement vers la **spectrométrie de masse**. Cette technique offre de nombreux avantages car elle associe une très bonne sensibilité et une grande polyvalence. Il existe deux grandes catégories de techniques chromatographiques, couplées à la spectrométrie de masse, à savoir la **chromatographie en phase gazeuse** (**GC-MS**) et la **chromatographie en phase liquide** (**LC-MS**). L'une et l'autre reposent sur la séparation des analytes introduits, sous forme d'un mélange, en tête d'une colonne. Ces analytes subissent d'une part l'effet d'une force d'**élution** due à l'éluant gazeux ou liquide percolant dans la colonne et, d'autre part, l'effet de

L'analyse des molécules organiques par spectrométrie de masse haute résolution : vers une identification absolue en environnement complexe

L'amélioration des **techniques instrumentales d'analyse** offre désormais au chimiste la possibilité de réduire la complexité de la préparation des échantillons, alors qu'elle était incontournable dans le passé. Outre la réduction des risques de pollution et d'erreur d'analyse induits par tout traitement d'échantillon, les progrès technologiques des **analyseurs** offrent désormais une fiabilité accrue pour l'identification précise des substances détectées. Pour se placer au niveau le plus haut des performances techniques du moment, le CEA s'équipe d'instrumentations modernes et pertinentes pour répondre à ses missions. Les **spectromètres de masse** à très haute résolution font partie de ces instrumentations. Pour effectuer ses analyses avec un haut souci de fiabilité, le Département analyse, surveillance, environnement (Dase) s'équipera, en 2009, d'un **spectromètre de masse haute résolution de type "orbitrappe"** (illustration), le premier à la Direction des applications militaires. Le principe de l'identification **moléculaire** par spectrométrie de masse haute résolution repose sur la mesure précise des masses **ioniques** (figure 1). Chaque **atome** ayant une masse que l'on connaît avec précision (tableau 3 ci-dessus), les combinaisons d'atomes que constituent les molécules conduisent à des édifices dont la masse précise (si elle peut être mesurée avec près de 5 décimales) permet de connaître la formulation. L'identification chimique ne repose donc plus sur la mise en évidence de propriétés chimiques des molécules mais sur la mesure ultra-précise de leur masse.
Sur ce principe, l'identification moléculaire impose d'introduire les substances dans le spectromètre sans les endommager, sans créer de dégradation moléculaire. Les **sources d'ionisation** classiquement employées en spectrométrie de masse avaient tendance à provoquer une fragmentation moléculaire. Dans le cas présent, le couplage du spectromètre avec une source d'ionisation telle que la **source par électrospray** (**ESI**), est donc impératif car cette source permet d'obtenir une **ionisation** douce des substances moléculaires et leur introduction directe dans le spectromètre. Certaines variantes telles que les sources **DESI** (associant ionisation par électrospray et **désorption** surfacique) permettent d'expertiser directement des surfaces solides ou tout autre matériau solide pouvant constituer un support de prélèvement. En 2002, ces techniques valurent le prix Nobel de chimie à leurs inventeurs : John B. Fenn (USA) et Koichi Tanaka (Japon).

Thermoélectron

Spectromètre Orbitrappe (Marque Thermo Electron).

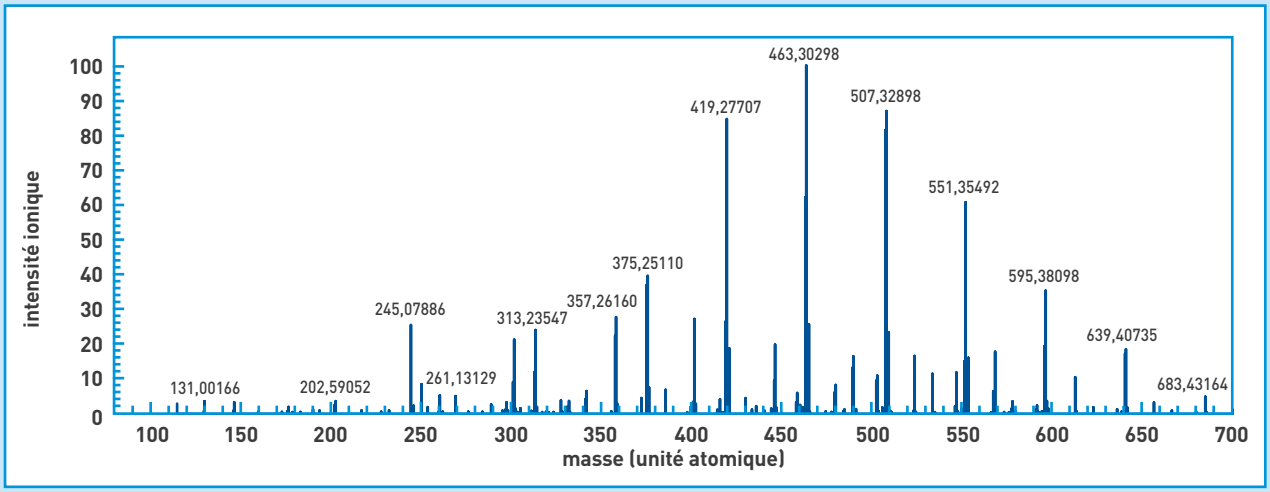


Figure 1.
Spectre de masse complet en haute résolution. Chaque pic correspond à un produit chimique unique, parfaitement caractérisé (identifié) par la mesure très précise de la masse moléculaire.

forces de rétention dues aux interactions entre analyte et phase stationnaire de la colonne. Les propriétés physico-chimiques distinguant les analytes entre eux induisent des vitesses d'élution différentes à travers les colonnes aboutissant à la séparation physique de ces analytes selon leur nature chimique (figure 3). À l'issue de leur séparation chromatographique, les **molécules** sont transférées dans le spectromètre de masse où elles subissent une **ionisation**, puis une analyse spectrale. Cette analyse permet d'identifier leur nature chimique (figure 4).

Les mélanges complexes de composés organiques, notamment de composés organiques volatils, relèvent souvent de l'analyse par chromatographie en phase gazeuse. En effet, l'utilisation de colonnes **chromatographiques capillaires** (1) permet d'accéder à un pouvoir séparateur très élevé (grande résolution) de plus d'une centaine de substances (figure 3). Comme indiqué précédemment, leur identification et leur quantification s'effectuent en utilisant un **détecteur spectrométrique** (figure 4).

À l'heure actuelle, hormis pour le cas spécifique de la technique récente de chromatographie liquide ultra-rapide, la **chromatographie en phase liquide** offre un pouvoir séparateur inférieur à celui de la **chromatographie capillaire en phase gazeuse**. En conséquence, elle convient davantage à l'analyse d'échantillons peu complexes, c'est-à-dire ne contenant seulement que quelques composés. En revanche, elle permet l'analyse de composés lourds ou thermolabiles en évitant des étapes d'extractions. Ici encore, l'analyse qualitative et quantitative des substances d'intérêt s'effectue, de plus en plus fréquemment, par spectrométrie de masse.

L'analyse organique environnementale figure comme l'un des éléments importants pour évaluer l'impact des installations du CEA. Pour mener à bien cette démarche, les chimistes disposent de technologies modernes reposant sur des principes physico-chimiques sophistiqués : par exemple, les procédés d'extraction multiples et les différents types de spectrométries. Ces instruments et ces méthodes permettent de détecter les substances à des niveaux avoisinant quelques picogrammes (10^{-12} g). Elles permettent également de suivre l'évolution de la réglementation environnementale exigeant de réduire, toujours plus, les concentrations limites de polluants dans l'environnement. Au-delà du respect normal des réglementations environnementales générales, la spécificité des activités du CEA a conduit ses chimistes à développer ou améliorer les instrumentations et les méthodes analytiques nécessaires à ses besoins spécifiques.

(1) Typiquement, il s'agit de tubes de silice de 30 à 100 m de longueur et de 100 à 500 **µm** de diamètre interne.

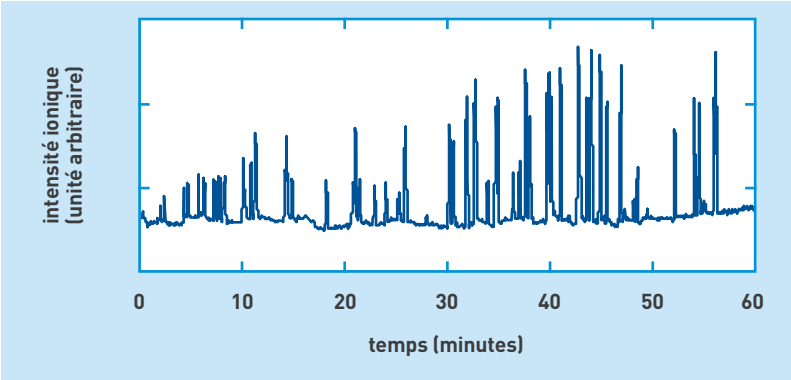


Figure 3.
Séparation de 54 composés organiques volatils par chromatographie en phase gazeuse. Chaque pic correspond à l'isolement d'un composé présent dans l'échantillon.

> Xavier Machuron-Mandard
Département analyse, surveillance, environnement (Dase)
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France.

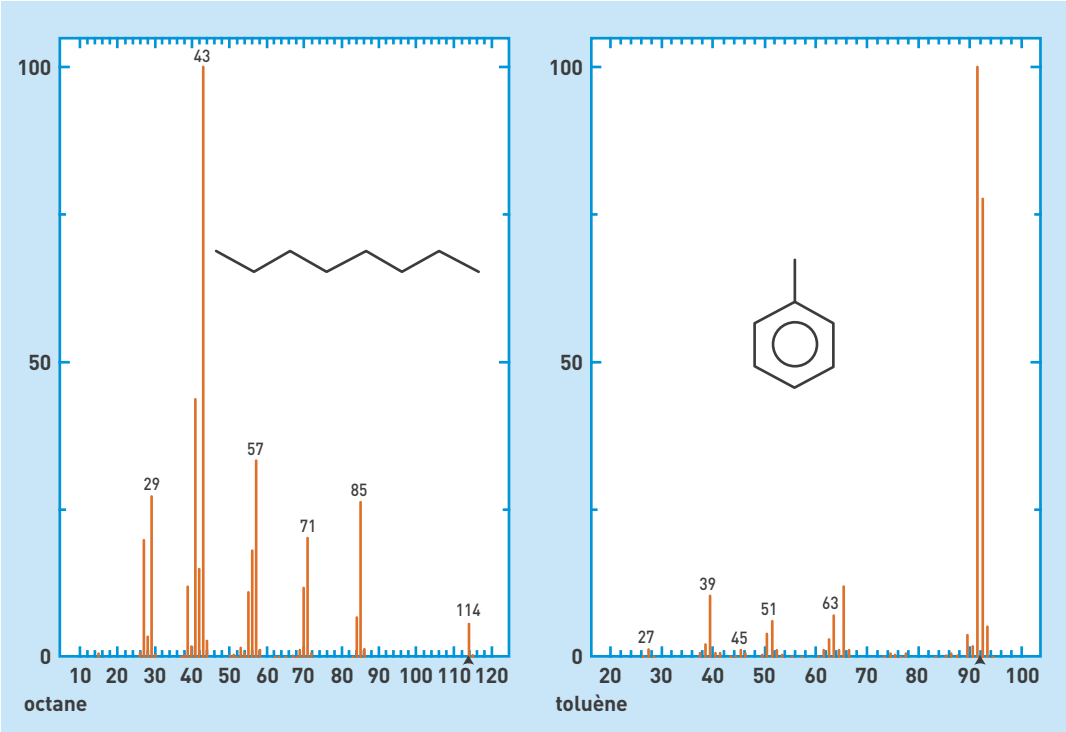


Figure 4.
Spectres de masse du n-octane et du toluène. Le spectre de masse obtenu par impact électronique, dans des conditions énergétiques standard (énergie incidente des **électrons** : 70 eV), conduit, par fragmentation moléculaire, à l'enregistrement d'une "empreinte spectrale" qui, comparée à une spectrothèque, permet d'identifier l'analyte.

Recherche d'ultra-traces d'actinides dans des échantillons de l'environnement

Le CEA a été amené à réaliser des analyses d'ultra-traces d'uranium et de plutonium dans le cadre de ses programmes de surveillance de l'environnement dédiés à ses centres et de sa mission de détection de la prolifération nucléaire. Le procédé de ces analyses combine une purification chimique poussée et des mesures isotopiques effectuées à l'aide de spectromètres de masse très performants.

Préparation d'échantillons en vue d'une analyse radiologique. Passage sur résine échangeuse d'ions d'un échantillon après mise en solution.

C. Dupont/CEA

"Toujours plus justes et plus sensibles" pourrait devenir la devise des analystes du Département analyse, surveillance, environnement (Dase) à la Direction des applications militaires. Il faut dire qu'aujourd'hui, l'analyse des **traces** est devenue un besoin visant non seulement à vérifier que les activités industrielles, notamment nucléaires, ne nuisent ni à l'environnement ni aux populations, mais aussi à empêcher toute utilisation clandestine de technologies nucléaires à des fins militaires. L'analyse des traces répond donc pleinement aux préoccupations de notre époque.

En effet, l'industrie nucléaire utilise des quantités appréciables d'**actinides**, principalement de l'**uranium** et du **plutonium**. En dépit des précautions drastiques prises par les exploitants, une fraction infime de ces **éléments** peut se retrouver dans l'environnement des installations. La première et principale mission du Dase consiste donc à déterminer, aussi précisément que possible, l'ampleur et l'étendue de ces marquages environnementaux puis d'en **modéliser** l'évolution future. Il s'agit de démontrer que l'impact radiologique et chimique sur les populations locales s'avère négligeable par rapport aux limites réglementaires et le restera toujours pour les générations futures qui vivront sur ou à proximité du site, bien après sa fermeture. Par ailleurs, les moyens d'analyse développés par le Dase ont également trouvé de nouvelles applications, largement utilisées dans le cadre du programme de lutte contre la prolifération nucléaire (encadré 1).

Ces études reposent sur la capacité des laboratoires d'analyse à doser précisément des **ultra-traces** d'actinides dans des échantillons de différentes natures (eaux, sols, biologiques) prélevés au voisinage des installations. Ces mesures s'avèrent particulièrement

La détection de la prolifération nucléaire 1

Les compétences et méthodologies d'analyse de **traces** développées servent également aux programmes nationaux et internationaux de lutte contre la prolifération nucléaire. Le Laboratoire de mesures de traces du Dase fait ainsi partie du cercle très fermé (seulement une douzaine de membres) des laboratoires supports de l'**Agence internationale de l'énergie atomique** (**AIEA**), l'instance internationale chargée de faire respecter le Traité de non-prolifération des armes nucléaires (TNP). En effet, la découverte du programme nucléaire irakien, en 1991, a conduit l'AIEA à solliciter des laboratoires supports capables d'analyser de très faibles quantités de matière nucléaire présentes dans des "échantillons environnementaux". Généralement, il s'agit de carrés de coton, frottés sur des surfaces lisses à l'intérieur des installations nucléaires, afin de récupérer des poussières **micrométriques** issues de matières nucléaires cachées aux inspecteurs. En effet, il a été démontré que tout traitement chimique ou mécanique, effectué sur un matériau, émet des poussières micrométriques qui se répandent inéluctablement dans toute l'installation ou dans ses abords immédiats. Les techniques utilisées par les laboratoires supports de l'AIEA permettent, à partir de l'analyse de ces poussières, de détecter une activité non déclarée par l'exploitant et d'en déterminer la finalité.

délicates, car les analystes se confrontent à deux difficultés majeures. D'abord, en raison des quantités très faibles de matière à analyser, souvent dans la gamme du **femtogramme** (10^{-15} g) au **microgramme** (10^{-6} g), il faut pouvoir disposer de techniques de mesure d'une extrême sensibilité offrant des limites de détection suffisamment basses. Ensuite, il faut savoir que les éléments à analyser se trouvent également présents à l'état naturel dans l'échantillon mais, fort heureusement, avec des isotopies différentes de celles des éléments issus d'une installation nucléaire. Ainsi, il convient souvent de recourir à la détermination des abondances **isotopiques** qui permet d'évaluer la part de l'élément apporté par les activités humaines. Les sensibilités et précisions sur la mesure des rapports isotopiques visés ne peuvent s'obtenir qu'en utilisant certaines techniques de **spectrométrie de masse**. Néanmoins, l'élément d'intérêt étant très faiblement concentré dans sa matrice naturelle, celui-ci ne peut être analysé directement. En conséquence, un certain nombre d'**opérations de chimie séparative** s'imposent pour extraire sélectivement l'élément de la matrice et pour le concentrer dans un faible volume de solution. Lors de ces opérations, il importe de minimiser les contaminations causées par la présence naturelle de l'élément d'intérêt dans les matériaux et réactifs utilisés pour la purification chimique.

La préparation chimique

La préparation chimique constitue l'une des étapes cruciales de l'analyse de traces. Elle vise à **extraire** sélectivement l'uranium et le plutonium de l'échantillon en les séparant de la quasi-totalité des autres éléments chimiques constituant la matrice de l'échantillon. La méthode utilisée doit permettre d'assurer la meilleure séparation possible, avec un rendement élevé pour l'extraction des éléments d'intérêt tout en limitant, au maximum, la quantité d'**uranium naturel** apporté par le matériel et les réactifs utilisés. Un savoir-faire très spécifique a ainsi été développé.

La technique d'extraction la plus performante est la **chromatographie d'échange d'ions**. Elle consiste à mettre les échantillons en solution puis à les introduire dans une colonne contenant une **résine échangeuse d'ions**, préalablement rincée et conditionnée dans le milieu chimique optimal, cela pour fixer sélectivement l'uranium et/ou le plutonium. Quant aux autres éléments chimiques, ils sont tout au contraire séparés des corps absorbés puis éliminés par lavages successifs de la colonne avec des réactifs appropriés. Enfin, les actinides sont extraits, séparément, grâce à un réactif judicieusement choisi qui les dissocie de la résine. Plusieurs étapes de passage sur colonnes ainsi que l'utilisation de différentes résines s'avèrent presque toujours nécessaires pour obtenir un niveau de purification suffisant.

Tout au long de ce processus, un soin tout particulier est apporté pour limiter les contaminations en uranium naturel par l'atmosphère du laboratoire. La verrerie et les réactifs chimiques (acides, résines de chromatographie) font l'objet d'une attention spécifique : par exemple, les réactifs (acides, eau, oxydants…) ne s'utilisent qu'ultrapropres et donc ne contenant que très peu d'impuretés ; ou encore, la verrerie ne s'emploie que neuve, systématiquement rincée à l'aide de solutions acides très pures et à usage unique, par crainte des effets mémoires résultant de l'**adsorption** d'une faible proportion des actinides sur les parois. Enfin, les étapes pendant lesquelles les échantillons restent exposés à l'atmosphère du laboratoire (calcinations, évaporations) doivent être aussi brèves que possible. C'est seulement au prix de toutes ces précautions que la masse d'uranium naturel, ajoutée à l'échantillon par la préparation chimique, se limitera à quelques centaines de picogrammes (10^{-12} g). Toutefois, dans l'hypothèse d'échantillons de très petites tailles ou ne contenant qu'excessivement peu d'actinides, il faut encore abaisser l'apport d'uranium naturel en opérant en salle propre ou avec des quantités réduites de réactifs.

Les mesures isotopiques par spectrométrie de masse

Pour mener à bien ces analyses particulièrement délicates, le Dase utilise deux techniques performantes : d'abord, la **spectrométrie de masse à source plasma générée par couplage inductif** (*Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry/* **ICP-MS**) qui se caractérise par une excellente sensibilité analytique ; ensuite, la **spectrométrie de masse à thermo-ionisation** (*Thermo-Ionisation Mass Spectrometry/***TIMS**) permettant de mesurer très précisément les rapports isotopiques.

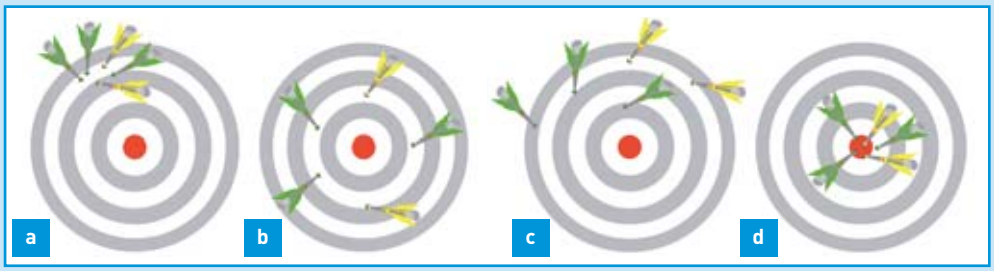
Grâce à un certain nombre de modifications instrumentales ainsi qu'à des efforts constants pour optimiser les performances et maintenir les instruments dans un grand état de propreté, les ICP-MS atteignent des limites de détection de l'ordre du femtogramme (10^{-15} g) soit à peine deux millions d'**atomes** pour les isotopes du plutonium. Pour juger de ces performances, il faut savoir qu'un femtogramme est à un gramme ce qu'un mètre est à la distance parcourue par la lumière pendant 100 ans. Afin d'évaluer la qualité de leurs mesures isotopiques, les

C. Dupont/CEA

La spectrométrie de masse à source plasma générée par un couplage inductif (ICP-MS) permet de doser des ultra-traces d'isotopes.

Justesse et reproductibilité 2

La justesse exprime l'écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie, tandis que la reproductibilité exprime l'aptitude de la méthode d'analyse à reproduire un résultat. Ces notions sont illustrées par les figures ci-dessous dans le cas d'un lancé de fléchettes.



Dans le cas de la figure **a**, les lancés sont reproductibles car très proches les uns des autres, mais pas justes puisqu'ils sont éloignés du centre de la cible. Dans la figure **b**, les lancés sont justes – ils encadrent bien le centre de la cible – mais peu reproductibles. Le cas **c** est le plus mauvais : les résultats obtenus n'étant ni justes ni reproductibles. Enfin, le cas **d** s'avère idéal pour l'analyste puisque les lancés sont à la fois justes et reproductibles.

analystes utilisent deux grandeurs statistiques fondamentales : la justesse et la reproductibilité (encadré 2). Leur détermination nécessite le recours à des étalons dont les rapports isotopiques sont certifiés, puis pris en compte dans la détermination de l'incertitude sur le résultat final.

Pour obtenir des résultats justes et reproductibles, un aspect fondamental du travail de l'analyste consiste à identifier et à corriger les nombreux biais et artéfacts affectant les mesures. Parmi les plus connus figurent notamment le **fractionnement isotopique**, un effet qui se produit lors du processus d'**ionisation** (les isotopes les plus légers étant généralement mieux ionisés), et le biais en masse, dû au fait que les efficacités de transport et de détection par le spectromètre dépendent des masses ioniques. Il existe encore d'autres artéfacts, plus subtils, qu'il importe également de corriger : par exemple, les impuretés isotopiques du traceur, les effets mémoire (persistance d'une fraction des signaux caractéristiques d'un échantillon lors des mesures suivantes) et de pied de pic (traînée de la base d'un pic très intense sur les masses adjacentes) ou encore le temps mort et les défauts de linéarité du détecteur d'**ions**. En corrigeant au mieux tous ces effets, la technique TIMS obtient des reproductibilités d'environ 0,1 % sur les rapports des deux isotopes principaux de l'uranium naturel ($^{235}U/^{238}U$). Quant à la technique de l'ICP-MS, elle nécessite également de tenir compte d'un phénomène particulièrement retors, celui de la formation des interférences constituées par des espèces polyatomiques (voir encadré 3).

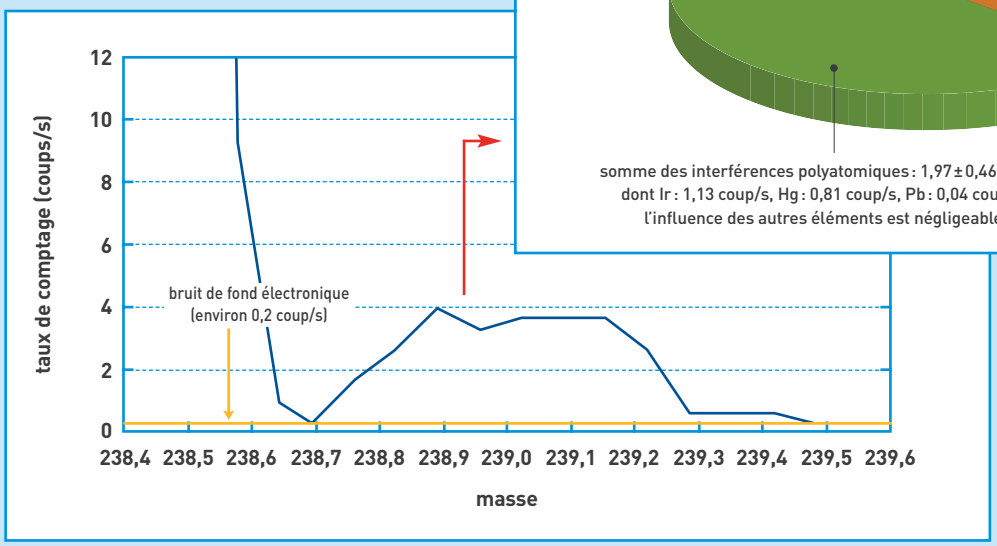
En conséquence de quoi, nous sommes bien loin de l'analyse de routine et de l'image d'Épinal de l'ana-

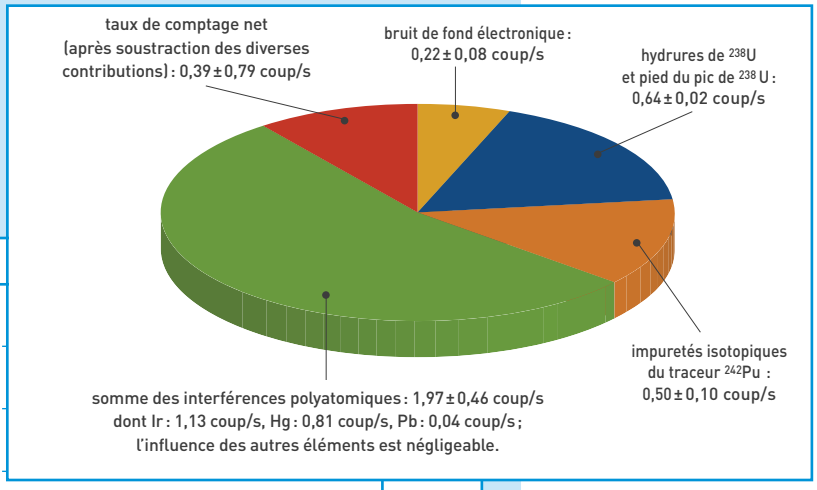
C. Dupont/CEA

Le spectromètre de masse à thermo-ionisation (TIMS) permet l'analyse des isotopes de l'uranium et du plutonium avec une très grande précision. Afin de détecter la production clandestine et les trafics illicites de matière nucléaire, les équipes du CEA ont mis au point des moyens de mesure des traces d'éléments **radioactifs**. Ces moyens développés pour la Défense nationale sont mis à disposition des organismes internationaux afin d'effectuer la vérification des accords internationaux comme le Traité de non-prolifération (TNP).

Les interférences polyatomiques 3

Une interférence isobarique se produit lorsque deux espèces **ionisées**, mono ou poly**atomiques**, possèdent des masses suffisamment proches pour que les pics formés par les taux de comptage des deux espèces se confondent. Ce phénomène s'avère surtout gênant pour la technique **ICP-MS** en raison de la présence de nombreuses espèces dans le milieu d'**ionisation** (**plasma**) lesquelles peuvent se recombiner pour donner naissance à des espèces polyatomiques. Celles-ci se composent d'un **atome lourd** (**Pb**, W, **Ir**, Hg, etc.), présent dans l'échantillon, et d'un ou plusieurs atomes présents dans le milieu d'ionisation (Ar, **N**, O, **Cl**, etc.). Bien que leurs probabilités de formation demeurent très faibles, ces interférences peuvent, dans certains cas, engendrer un signal considérable à certaines masses des **actinides**. Dans l'exemple donné ci-dessous, un signal significatif de 3,65 ± 0,71 coups/s^{-1}, est mesuré par ICP-MS à la masse 239. Néanmoins, après correction des interférences et artéfacts divers, le signal corrigé n'est plus que de 0,39 ± 0,79 coups/s^{-1}, soit largement inférieur à la limite de détection. Nous pouvons conclure que l'échantillon ne contient pas de **^{239}Pu**. La principale contribution au signal provient des espèces polyatomiques $^{191}Ir^{16}O_3^+$, $^{199}Hg^{40}Ar^+$, et $^{207}Pb^{16}O_2^+$.





lyste "presse-bouton" qui extrait directement le résultat de l'instrument pour le transmettre sans plus de formalité. L'analyse de traces d'actinides s'apparente plutôt à une enquête policière, au cours de laquelle il faudrait faire preuve de soin et de rigueur, découvrir des indices ténus tout en écartant des fausses pistes.

Dans certains cas, les performances de ces instruments restent malgré tout insuffisantes pour détecter un très faible marquage environnemental issu d'une installation nucléaire. Aussi, les analystes cherchent-ils à améliorer continuellement les techniques et les méthodes existantes. Pour eux, il s'agit notamment d'accroître le rendement d'ionisation(1) grâce à des **sources d'ions** plus efficaces et d'utiliser des dispositifs de multidétection des ions permettant d'obtenir d'excellentes reproductibilités. Ainsi, grâce à la combinaison d'une purification chimique très poussée, et de mesures isotopiques réalisées avec des spectromètres de masse optimisés pour les mesures de traces, les analystes du Dase dosent les actinides jusqu'au femtogramme (10^{-15} g). Ils en mesurent également les rapports isotopiques avec des incertitudes relatives inférieures au pour-cent. Parvenir à de tels résultats nécessite de minimiser les risques de contamination, d'optimiser les performances instrumentales mais aussi d'identifier et de corriger les nombreux pièges, artéfacts et autres biais affectant les mesures.

Les progrès notables réalisés au cours de ces dernières années ont permis de tirer le meilleur parti possible des techniques disponibles au laboratoire et d'en améliorer les performances grâce à la modification des instruments eux-mêmes et aux méthodologies d'analyse. Mais la quête de précision, de justesse et de sensibilité analytique ne s'y limite pas. La spectrométrie de masse demeure une technique en pleine évolution où les concepteurs d'instruments jouent un rôle majeur en proposant de nombreuses innovations.

> Fabien Pointurier
Département analyse, surveillance, environnement (Dase)
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France

(1) Le rendement d'ionisation correspond au rapport du nombre d'ions détectés au nombre d'atomes présents dans l'échantillon.

MÉMO B

Les principales techniques d'extraction, de séparation et d'analyse

D'origine naturelle ou anthropique, les substances trouvées dans l'environnement requièrent l'usage de méthodes d'analyse polyvalentes – il s'agit à la fois de détecter et d'identifier des composés extrêmement diversifiés – et de grande sensibilité. Elles supposent également l'application de procédures rigoureuses opérant par étapes.

Préparer rigoureusement les échantillons

Étape fondamentale du processus analytique, le prétraitement des échantillons consiste soit à pré-concentrer des substances en teneur trop faible pour pouvoir être détectées directement, soit à les séparer d'une matrice excessivement complexe. Si les chercheurs consacrent près de 60 % du temps requis pour réaliser une analyse globale à cette étape préliminaire, c'est parce que, selon plusieurs études, elle représente près de 30 % des erreurs dans les résultats. Aujourd'hui, ces chercheurs ont développé une palette de techniques rapides, économiques, automatisées et fiables pour traiter leurs échantillons selon leur nature ou le niveau de concentration recherché :

• L'extraction en phase solide (*Solid Phase Extraction* / SPE) permet d'isoler des substances chimiques présentes dans un liquide (l'eau, par exemple) grâce à l'utilisation d'un polymère absorbant conditionné généralement sous forme de cartouches filtrantes. Elle s'avère très efficace en matière de pré-concentration des traces dans des milieux très dilués ou pour la purification des échantillons.

• La micro-extraction en phase solide sur fibre (*Solid Phase Micro-Extraction* / SPME) s'utilise pour extraire des substances chimiques présentes dans un gaz ou un liquide (par exemple, l'air ou l'eau) et opère au moyen d'un polymère absorbant recouvrant une fibre de verre de quelques millimètres de long et mise en contact de l'échantillon. La SPME ne nécessitant ni solvants ni appareils spécifiques, elle s'avère donc simple à mettre en œuvre. Il s'agit d'une technique novatrice utilisée de plus en plus pour la surveillance de la qualité de l'air ou l'analyse de micropolluants organiques dans les eaux.

• L'extraction en phase solide déposée sur barreau d'agitation magnétique (*Stirr Bar Sorptive Extraction* / SBSE) s'applique plus généralement à l'extraction des substances chimiques présentes dans un liquide (l'eau). Cette extraction s'effectue au moyen d'un polymère absorbant, recouvrant un barreau d'agitation (magnétique) mis en mouvement dans l'échantillon. Basée sur le même principe que la SPME, elle permet d'extraire de plus grandes quantités d'analytes et donc de gagner en sensibilité.

• L'extraction par solvant, généralement un solvant volatil peu soluble dans l'eau (alcane léger, acétate d'éthyle...) permet d'extraire des molécules à partir de milieux aqueux. La séparation solvant/eau s'effectue par simple décantation.

• La chromatographie ionique préparative, qui repose sur l'interaction d'espèces ioniques en milieu aqueux avec des résines échangeuses d'ions, permet d'extraire des substances inorganiques (ions) présentes à l'état de traces à partir d'une matrice environnementale complexe.

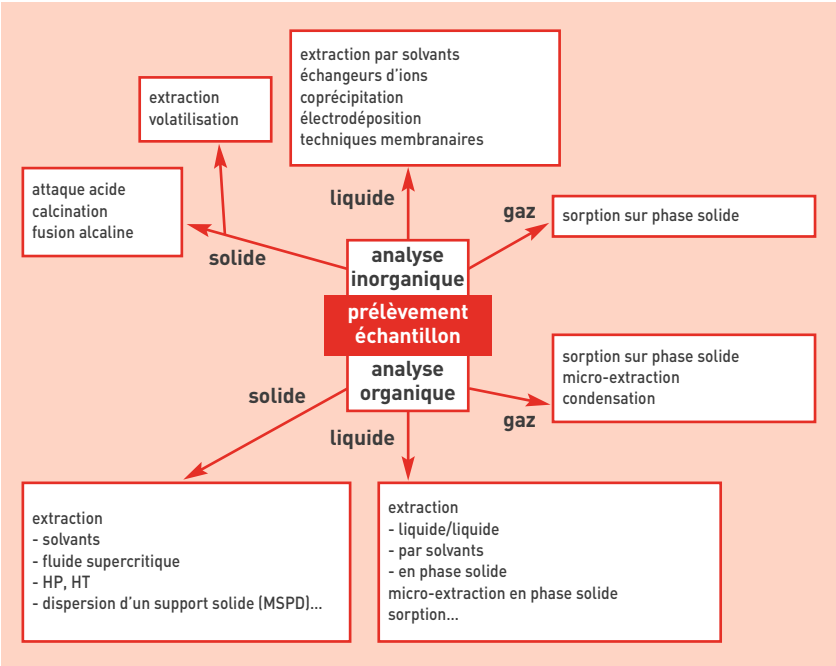
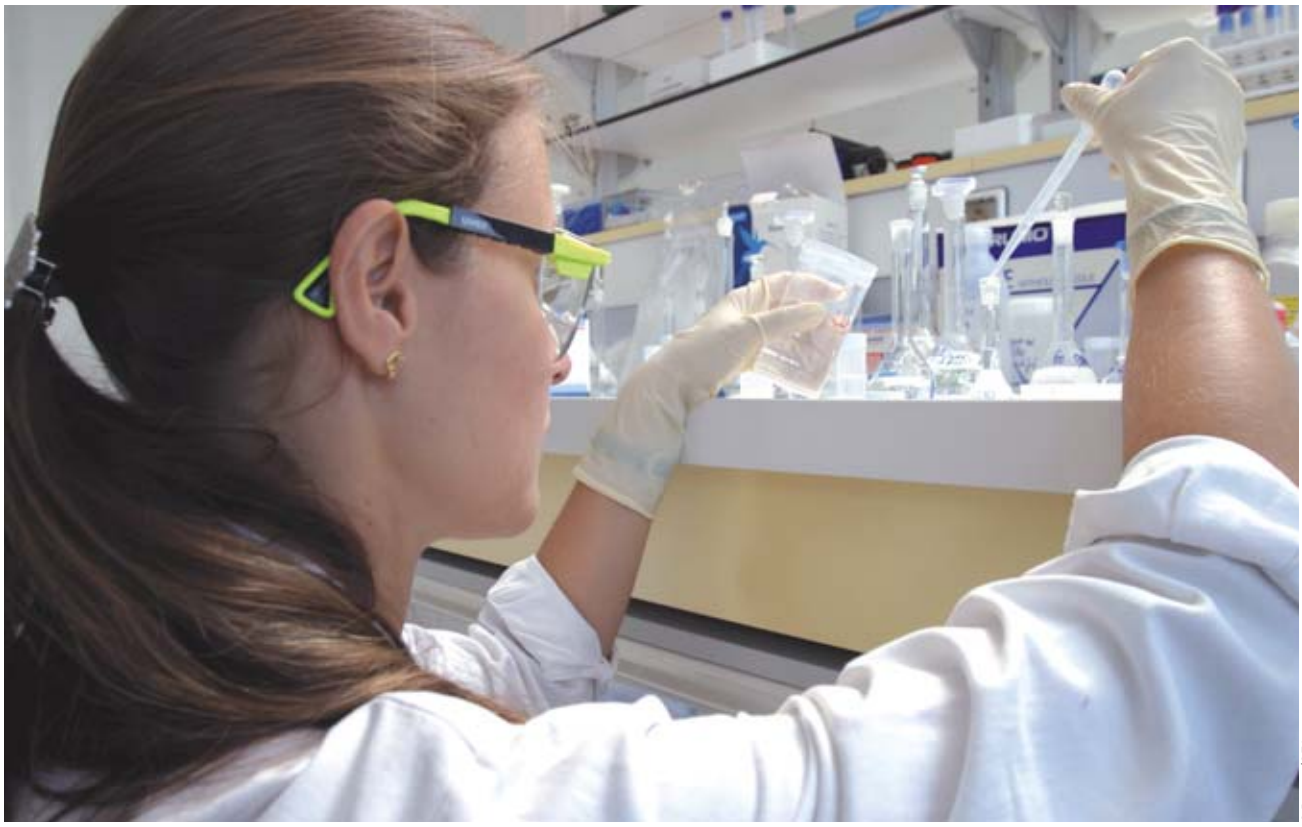


Figure 1.
Exemples de techniques de prétraitement des échantillons environnementaux.

Séparer pour sélectionner

Actuellement utilisée pour identifier ou doser les composés chimiques d'un mélange et déterminer leur concentration, la chromatographie fut inventée, en 1906, par le botaniste russe Mikhail Tswett (1872-1919) qui cherchait à séparer différents pigments de plantes. Aujourd'hui, la technique consiste à laisser percoler une solution de la substance étudiée dans une colonne d'adsorbants : les composants, progressant chacun à des vitesses différentes, se répartissent en zones distinctes qu'il suffit de fractionner pour les analyser.

• La chromatographie en phase liquide (CPL ou HPLC) repose sur la séparation des substances présentes dans un mélange, par leur introduction, puis leur migration différentielle dans une colonne séparative (colonne chromatographique) parcourue par un liquide d'élution (par exemple, un mélange d'eau et de méthanol). Ensuite, une série d'interactions physico-chimiques entre les substances analysées et les deux phases séparatives (phase stationnaire et phase d'élution) permettra la séparation des composés. Le couplage du module de séparation chromatographique avec des détecteurs spécifiques (spectromètre de masse, spectromètre d'absorption UV-Visible...) conduit à des instrumentations analytiques diverses (HPLC-MS, HPLC-UV...).



C. Dupont/CEA

Laboratoire de chimie analytique. Séparation et purification de traces d'actinides dans des échantillons environnementaux, étapes préalables aux mesures de spectrométrie de masse.

• L'électrophorèse capillaire (EC), comme toutes méthodes séparatives électrophorétiques, s'utilise pour séparer des particules (ions) chargées électriquement par migration différentielle sous l'action d'un champ électrique. Chaque espèce migre à une vitesse qui lui est propre, fonction de son rapport charge sur la taille. Concernant plus particulièrement l'électrophorèse capillaire, comme son nom le laisse supposer, le support de séparation est un capillaire rempli d'un milieu liquide (électrolyte) spécifique, dont les extrémités plongent dans des réservoirs d'électrolytes reliés entre eux par un générateur haute tension. L'échantillon s'intercale dans le flux d'électrolyte et les espèces constitutives de l'échantillon migrent à leur vitesse propre, laquelle dépend à la fois de la distance entre les points d'injection et de détection, et du temps de migration.

• La chromatographie en phase gazeuse (CPG ou GC) permet de séparer des substances volatiles ou semi-volatiles issues d'un mélange complexe. Elle repose sur l'introduction du mélange par vaporisation dans une colonne séparative (colonne chromatographique), puis sur la migration différentielle (élution) des substances sous l'effet d'entraînement d'un gaz vecteur (par exemple, de l'hélium). Les colonnes chromatographiques sont de nos jours principalement constituées de tubes capillaires de 30 à 100 m de longueur, recouvertes intérieurement d'un polymère adapté aux substances analysées. Un système de détection positionné en sortie de colonne mesure les signaux émis par les différents composants, ce qui permet de les identifier et de les quantifier (par exemple GC-MS).

• La chromatographie ionique (CI) repose sur l'application des différentes méthodes de chromatographie en phase liquide à l'analyse des ions (anions ou cations) organiques ou inorganiques.

Analyser pour savoir

Pour déterminer la composition d'un échantillon, les chercheurs disposent de la palette des différentes méthodes spectrométriques, c'est-à-dire de méthodes d'analyse spectrale permettant d'accéder à la composition et à la structure de la matière. Ces méthodes peuvent s'ordonner en deux catégories : la spectrométrie des rayonnements et la spectrométrie de masse au sein desquelles on distingue généralement la spectrométrie atomique et la spectrométrie moléculaire.

La spectrométrie des rayonnements

La spectrométrie des rayonnements se base sur l'interaction de rayonnements électromagnétiques avec la matière. Elle utilise des processus aussi variés que l'émission, l'absorption, la fluorescence et la diffusion de rayonnements visibles ou invisibles. Qu'elle soit à l'état atomique ou moléculaire, chaque substance présente un spectre caractéristique, tant en émission qu'en absorption (ou éventuellement en diffusion ou en fluorescence) ; il suffit donc de reconnaître la présence de ce spectre pour avoir la preuve de la présence de la substance correspondante.

• La spectrométrie d'absorption atomique repose sur le principe selon lequel des atomes peuvent absorber des photons d'une certaine longueur d'onde (caractéristique de l'élément analysé). Le nombre de photons absorbés étant relié au nombre d'atomes qui les absorbent, on peut ainsi en déduire la concentration de l'élément.

• La spectrométrie d'émission est basée sur l'émission de photons caractéristiques émis par les atomes excités par apport d'énergie. Cette énergie peut être apportée, par exemple, au moyen d'une source à plasma

Suite page 54

MÉMO B

Suite de la page 53

d'argon généré par couplage inductif ; cela permet la mesure de teneurs en éléments (cuivre, plomb, étain, arsenic, nickel...) mais ne renseigne pas sur la forme chimique sous laquelle se trouvent ces éléments dans l'échantillon.

• La spectrométrie à décharge luminescente (SDL) fait intervenir le phénomène de pulvérisation cathodique de l'échantillon à analyser, celui-ci étant placé dans une source fonctionnant sur le principe d'un tube cathodique. Les éléments pulvérisés dans la lampe à décharge se trouvent alors identifiés par leur spectre d'émission lumineuse. La source à décharge luminescente peut également s'associer à un spectromètre de masse.

• La spectroscopie d'émission optique sur plasma produit par ablation laser (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*/LIBS) utilise l'interaction d'un faisceau laser pulsé avec un matériau, ce qui provoque sa vaporisation sous forme d'un plasma. Les atomes et les ions éjectés émettent, en se désexcitant, un spectre UV et visible constitué de raies dont la longueur d'onde permet d'identifier et de quantifier les éléments présents dans l'échantillon.

• La spectrométrie de fluorescence X consiste à bombarder la matière avec ces rayons, laquelle réémet de l'énergie, entre autres, sous forme de rayons X ; en analysant le spectre, on peut déduire, qualitativement et quantitativement, la composition élémentaire de l'échantillon.

• La spectrométrie d'absorption UV-Visible repose sur l'absorption des radiations lumineuses par la matière. Cette technique permet principalement de mesurer des concentrations d'espèces chimiques en solution aqueuse ou autres.

• La spectrométrie infrarouge (IR) permet, par absorption moléculaire de rayonnement IR, de déterminer la nature des liaisons chimiques composant une molécule et donc d'échafauder des hypothèses structurales. Un spectre IR s'avérant parfois très complexe, il peut ainsi constituer une véritable carte d'identité moléculaire.

• La spectrofluorimétrie laser à résolution temporelle (SLRT) est une technique analytique ultrasensible utilisée pour la détermination de certains actinides et lanthanides fluorescents en solution. Son principe repose sur une excitation réalisée par un laser pulsé suivie de la résolution temporelle (positionnement d'une porte de mesure quelques µs après l'impulsion laser) du signal de fluorescence permettant l'élimination des fluorescences parasites à temps de vie courts. Les développements actuels de cette technique portent sur la spéciation (détermination des espèces chimiques) et sur l'analyse déportée *via* fibres optiques dans le nucléaire et dans l'environnement.

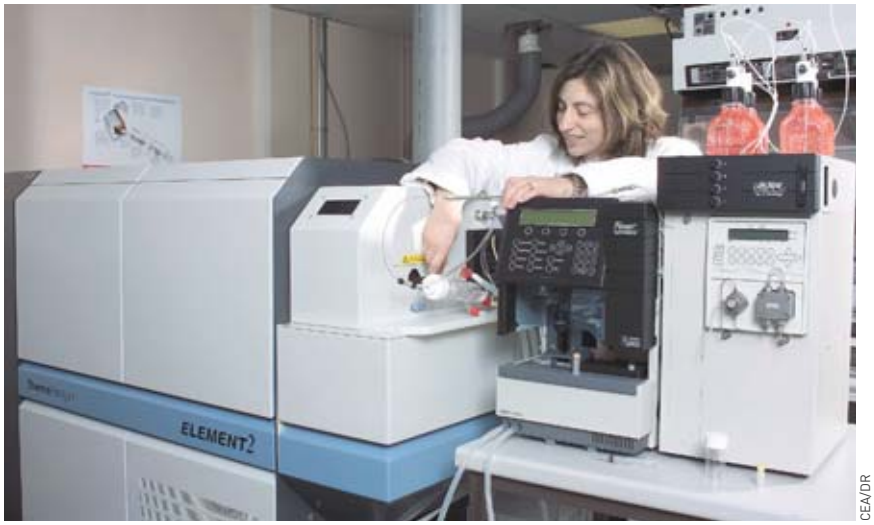
• La spectrométrie de diffusion Raman se pratique pour connaître la structure chimique et la composition moléculaire d'un échantillon en le soumettant à un rayonnement laser et en analysant la lumière diffusée. Il s'agit d'une méthode non-destructive complémentaire de la spectroscopie infrarouge. La spectroscopie Raman est une technique de mesure locale : en focalisant le faisceau laser sur une petite partie du milieu, on peut sonder les propriétés de ce milieu sur un volume de quelques microns cube. On parle alors de micro-Raman.

• La spectrométrie de résonance magnétique nucléaire (RMN) base son principe sur l'orientation des spins de certains noyaux d'atomes sous l'effet d'un champ magnétique intense. Ceux-ci peuvent alors interagir avec des ondes radio pour émettre des signaux qui permettront d'identifier la structure moléculaire des composés présents.

• L'analyseur de traces par piégeage "d'atomes froids" (*Atom Trap Trace Analysis*/ATTA) est une technique exploitant le piégeage magnéto-optique d'atomes

C.Dupont/CEA

Préparation d'échantillons pour une analyse radiologique. Traitement d'échantillons environnementaux : chromatographie en vue de l'extraction de radionucléides.



CEA/DR

Couplage chromatographie liquide – spectromètre de masse à source plasma à couplage inductif (ICP-MS).

froids permettant d'atteindre la détection d'atomes uniques et de quantifier des rapports isotopiques sur quelques milliers d'atomes. Complexe, l'ATTA figure actuellement parmi les techniques les plus sensibles et les plus sélectives existantes.

La spectrométrie de masse

La spectrométrie de masse et la spectrométrie de mobilité ionique constituent un ensemble de techniques d'analyse permettant de détecter, mais aussi d'identifier finement, soit les éléments (spectrométrie de masse inorganique) soit différentes molécules (spectrométrie de masse organique ou moléculaire). Dans ce dernier cas il est possible de caractériser la structure chimique des molécules en les fragmentant ou en mesurant, avec une extrême précision, leur masse moléculaire. Pour ce faire, un spectromètre de masse comprend d'abord un système d'introduction d'échantillon, soit direct (échantillon solide, liquide ou gazeux), soit indirect (couplage avec une technique séparative comme la chromatographie ou l'électrophorèse capillaire). Il comprend également une source d'ionisation pour atomiser et ioniser les éléments (ou vaporiser et ioniser les molécules), un analyseur de masse qui va séparer les ions en fonction de leur rapport masse sur charge (m/z) et enfin, un ou plusieurs détecteurs.
De nombreuses méthodes existent pour ioniser les atomes ou les molécules.

La spectrométrie de masse organique présente de nombreuses combinaisons entre les différentes sources d'ionisation et les différents analyseurs. Certaines sources sont plus fréquentes.

• La source par impact électronique reposant sur le bombardement des molécules par un faisceau d'électrons (généralement d'une énergie de 70 eV) et sur la formation d'ion chargé positivement.

• La source par ionisation chimique s'appuie sur l'ionisation négative des molécules par capture d'électrons de faible énergie (1 à 2 eV) issus de l'ionisation primaire d'un gaz réactant (méthane, ammoniac...) soumis préalablement à un bombardement électronique.

• L'ionisation chimique à pression atmosphérique (APCI) où les échantillons liquides sont d'abord nébulisés (formation d'un nuage de gouttelettes) à l'aide d'un jet d'air ou d'azote. Un chauffage assure ensuite la désolvatation des composés. Ces derniers sont ensuite ionisés chimiquement à pression atmosphérique : en général, la phase mobile vaporisée joue le rôle de gaz d'ionisation et les électrons sont obtenus à partir de décharges d'électrode couronne. L'APCI est une technique analogue à l'ionisation chimique (CI) : elle fait appel à des réactions ions-molécules en phase gazeuse, mais à pression atmosphérique.

• La source électrospray (*Electro Spray Ionization* / ESI) est une source de formation d'ions issus d'une solution liquide, par vaporisation et nébulisation de cette solution, en présence d'un champ électrostatique intense. Comme pour l'APCI, l'avantage de cette méthode d'ionisation réside dans l'obtention d'ions multichargés, particulièrement intéressants pour caractériser les macromolécules. Cette méthode permet également de générer une ionisation "douce" qui forme majoritairement des ions moléculaires.

• La désorption ionisation par électrospray (*Desorption Electrospray Ionization*/DESI) repose sur l'utilisation d'un solvant nébulisé, contenant des molécules dans un état électronique excité qui transfèrent leur énergie aux substances recherchées puis conduisent à leur ionisation et à leur désorption à partir d'un échantillon solide ou liquide déposé sur un substrat.

En ce qui concerne la spectrométrie de masse inorganique, de nombreuses combinaisons existent également, mais les sources d'ionisation s'avèrent plus énergétiques qu'en spectrométrie de masse organique afin d'assurer une atomisation complète des échantillons.

• Le plasma à couplage inductif est une source d'atomisation et d'ionisation extrêmement énergétique qui, associée à un spectromètre de masse (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*/ICP-MS), constitue une technique d'analyse des éléments parmi les plus sensibles. Elle permet notamment de mesurer le plutonium à des niveaux inférieurs au femtogramme.

• La spectrométrie de masse d'ions secondaires (*Secondary Ions Mass Spectrometry* / SIMS), en bombardant un échantillon solide par un faisceau d'ions, pourra caractériser finement sa surface, d'où la possibilité d'analyser, par exemple, des particules micrométriques contenant des quantités infimes d'un élément.

• La spectrométrie de masse à thermo-ionisation (*Thermal Ionization Mass Spectrometry* / TIMS) consiste à coupler une source d'atomisation et d'ionisation des éléments déposés sur une surface, portée à très haute température avec un spectromètre de masse. Cette technique permet de mesurer, avec une excellente précision, les rapports isotopiques des éléments ainsi que leur concentration en utilisant des traceurs.

• La spectrométrie de mobilité ionique (*Ion Mobility Spectrometry* / IMS), technique d'analyse chimique en phase gazeuse, consiste à soumettre des molécules à un champ électrique dans un courant de gaz. L'ionisation se trouve généralement produite par une source lumineuse (ultraviolets) ou radioactive (émetteurs alpha ou bêta).

• la spectrométrie de masse à ionisation résonante (*Resonance Ionization Mass*

Suite page 56

MÉMO B

Suite de la page 55

C.Dupont/CEA

Spectromètre de masse à thermo-ionisation, qui permet l'analyse des isotopes de l'uranium et du plutonium avec une très grande précision.

Spectroscopy/RIMS), technique d'analyse élémentaire extrêmement sélective (grâce à la possibilité d'opérer une sélectivité élémentaire parfaite au niveau de l'ionisation), vise à éviter de nombreuses séparations chimiques. Le principe consiste à "irradier" un mélange d'atomes en phase vapeur par un rayonnement laser pour exciter, puis ioniser sélectivement, les seuls atomes dont la transition électronique correspond à la longueur d'onde laser. L'utilisation d'un système dispersif en masse (analyseur magnétique, spectromètre à temps de vol) permet d'obtenir une double sélectivité, élémentaire et isotopique.

La séparation des ions s'opère au moyen d'analyseurs qui se différencient par leur technologie et peuvent être couplés entre eux pour déterminer la structure des molécules.

- L'analyseur quadripolaire consiste à forcer les ions à circuler dans un champ électrostatique complexe le long de barreaux métalliques et à traverser, ou non, cette zone d'espace selon la valeur de leur rapport masse sur charge.
- Le piège ionique quadripolaire repose sur le piégeage des ions dans une zone d'espace définie, sous l'effet d'un champ électrostatique complexe, et l'envoi séquentiel de ces ions vers un détecteur, suivant leur rapport masse sur charge.
- Le spectromètre à temps de vol vise à mesurer la vitesse des ions introduits, de manière contrôlée, dans une zone d'espace soumise à un champ électrique, le temps nécessaire aux ions pour parcourir une distance donnée étant relié à leur rapport masse sur charge.
- L'analyseur à secteur magnétique consiste à contraindre les ions à suivre une trajectoire spécifique (dépendant de leur rapport masse sur charge), principalement sous l'effet d'un champ magnétique parfaitement contrôlé, avant d'atteindre un détecteur qui en assure la détection et la quantification.
- La résonance cyclotronique ionique (ICR) permet de maintenir des ions dans une zone d'espace où siège un champ magnétique intense et où chaque ion décrit des trajectoires circulaires dont les caractéristiques (rayon) dépendent de leur rapport masse sur charge. La fréquence de rotation de chacun de ces ions se mesure par une interrogation électromagnétique et permet, par transformée de Fourier, de déterminer très précisément la valeur du rapport masse sur charge de chaque ion.
- L'orbitrap consiste à faire tourner et osciller des ions, sous l'action d'un champ électrique complexe, autour d'une électrode en forme de fuseau musculaire. Les fréquences de rotation et d'oscillation de chacun de ces ions sont mesurées par une interrogation électromagnétique et permettent, par transformée de Fourier, de déterminer très précisément la valeur du rapport masse sur charge de chaque ion.
- Le spectromètre de mobilité d'ions repose sur la mesure de la vitesse de déplacement des ions soumis à l'action accélératrice d'un champ électrique et à l'effet freinant d'un gaz à pression atmosphérique. La mesure du temps de transit des ions entre la zone d'introduction et le détecteur d'ions permet de déterminer leur nature chimique (avec plus ou moins de justesse selon la précision des mesures de temps).

Dans chacun des cas présentés précédemment, un détecteur transformera *in fine* les ions en signal électrique, lequel sera amplifié avant d'être traité par informatique.

Comprendre les **transferts de contaminants** dans le sol et protéger nos **ressources en eau**

L'eau de boisson ou d'irrigation ouvre une voie privilégiée par laquelle les contaminants, issus de certaines activités industrielles, peuvent atteindre l'homme. Les scientifiques, cherchant à maîtriser les risques engendrés par ces activités, se sont donnés comme mission prioritaire de comprendre et de simuler les transferts de métaux lourds, radionucléides et autres composés organiques toxiques dans les sols.

CEA/DR

Prélèvement d'échantillons d'eau dans la Durance pour analyses.

La maîtrise des risques sanitaires et environnementaux liés aux activités industrielles ou nucléaires passe par la maîtrise de la chaîne "Source de danger – Transfert – Cible" (figure 1). Dans l'hypothèse d'une contamination des sols par des **métaux lourds**, des **radionucléides** ou encore des **composés organiques**, la principale voie d'atteinte potentielle des populations passe par le transfert **hydrogéologique** vers les ressources en eau de boisson ou d'irrigation. L'eau prime sur le sol car, si l'on peut interdire l'accès d'un terrain à des usagers, les ressources en eau, comme l'air que nous respirons, demeurent communes. Évaluer ce risque suppose de quantifier la migration des contaminants à travers le sol et les roches sous-jacentes, cela jusqu'aux nappes d'eau souterraines. Pour y parvenir, il s'avère nécessaire d'adopter une approche intégrée allant des opérations de terrain jusqu'à la **modélisation**, alliant des mesures et des **simulations** chimiques comme physiques. Cette approche repose sur la connaissance de l'écoulement des eaux dans les systèmes naturels mais aussi du transport des contaminants par ces eaux. Même pour des contaminations

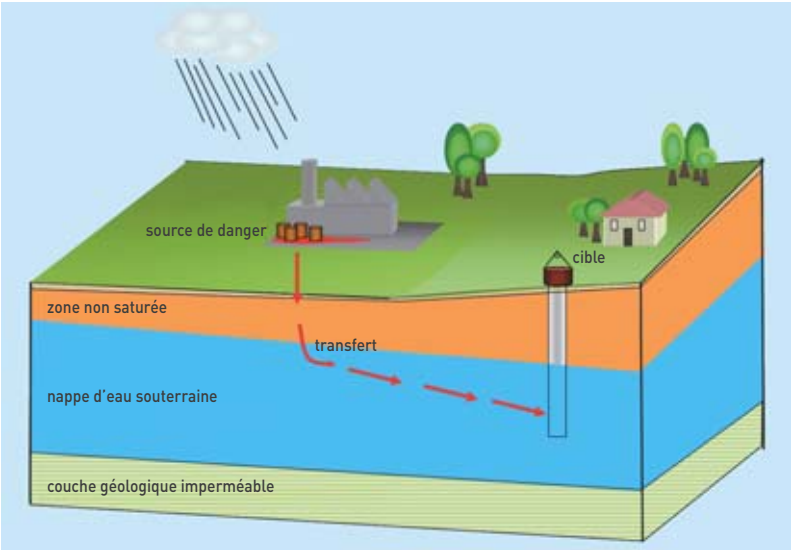


Figure 1.
Schéma conceptuel des transferts hydrogéologiques dans l'environnement résultant de la contamination d'un sol (modifié d'après Marjorie Miltenberger).

de sol avérées, les évaluations de risques sur les ressources en eau sont préventives dans la plupart des cas et demandent des projections dans le futur. La difficulté réside donc dans la validation des simulations et l'analyse des incertitudes associées.

Le cadre des transferts

Lorsque des contaminants se déposent sur un sol, ils se dissolvent partiellement et progressivement dans l'eau de pluie qui les transporte verticalement à travers le sol, puis le sous-sol, lors de son processus d'infiltration. Après avoir traversé la **zone non saturée** (figure 1), ces **éléments** ou ces composés chimiques peuvent ainsi parvenir jusqu'à la nappe d'eau souterraine, à plusieurs mètres ou plusieurs dizaines de mètres sous la surface du sol. Là, ces différentes substances se trouvent une nouvelle fois diluées puis transportées sub-horizontalement selon l'écoulement général des eaux souterraines dans la nappe. Celle-ci a pour exutoires naturels les rivières, quand elle n'est pas prélevée à l'aide de puits ou forages pour des usages d'alimentation en eau potable, domestique, agricole ou industrielle.

L'identification des contaminants

Pour identifier la présence d'un contaminant dans l'un des compartiments de l'environnement (sol, zone non saturée, nappe), il faut pouvoir comparer la quantité mesurée à un référentiel. On a recours à des méthodes d'analyses performantes capables de mesurer ces substances à l'état de **traces**. En effet, les contaminations étant très rarement massives, il est nécessaire de caractériser leur étendue jusqu'aux concentrations nulles. La plupart des substances se trouvent déjà dans l'environnement, y compris celles d'origine artificielle. Ces substances proviennent de contaminations antérieures à l'activité d'intérêt sur le site étudié ou bien de contaminations diffuses, telle l'émission de **plomb** par le trafic routier, les retombées des essais nucléaires aériens mondiaux ou la catastrophe de Tchernobyl.
Concernant la très grande part d'éléments et composés chimiques existant aussi à l'état naturel, il faut distinguer la part provenant naturellement du terrain (appelée aussi fond **géochimique**) de celle apportée par l'activité contaminante. Un des moyens d'y parvenir consiste à mesurer l'abondance des différents **isotopes** constituant l'élément chimique recherché. Cette signature isotopique peut différer entre le fond géochimique et le contaminant, notamment pour l'**uranium appauvri**. Dans la majorité des cas, seule la comparaison entre les concentrations mesurées sur le site étudié et les concentrations du fond géochimique local permet de mettre en évidence une contamination. La détermination fine du fond géochimique, qui dépend de la nature et de l'histoire des sols et des roches, figure donc comme une étape majeure dans l'expertise environnementale d'un site.

Le comportement des contaminants

La solubilité des contaminants déposés au sol permet de contrôler la quantité potentiellement disponible pour la migration en solution aqueuse. À cet équilibre **thermodynamique** viennent souvent s'ajouter des effets **cinétiques**. Selon l'affinité des contaminants avec la matrice minérale ou organique des sols et des roches traversées par l'eau, leur transport s'effectue plus ou moins rapidement par rapport à l'écoulement de l'eau. De nombreux éléments chimiques et composés naturels, (en plus du **pH** et des conditions d'**oxydo-réduction**) contribuent également à modifier la quantité d'espèces chimiques sous

CEA/DR

Dispositif de prélèvement des eaux souterraines dans un puits sur la station expérimentale de Roselend (Savoie), avec suivi en continu des paramètres physico-chimiques, des volumes pompés et du niveau piézométrique.

lesquelles un même contaminant existe en solution, et par là, ses propriétés d'interaction et de transport. La maîtrise des risques suppose donc de comprendre, modéliser et simuler ces phénomènes physico-chimiques.

Simulation de la migration des contaminants

Simuler la migration des contaminants suppose l'association de deux facteurs : l'écoulement des eaux et le transport des substances d'intérêt, depuis le sol jusqu'à la nappe, puis au sein de la nappe vers les exutoires.

- Pour simuler la migration verticale en zone non saturée, il est indispensable de connaître la teneur en eau à chaque niveau de profondeur et cela en fonction de l'intensité de l'infiltration. La teneur en eau, variable en zone non saturée, contrôle la perméabilité. Ce comportement se décrit au moyen de formulations mathématiques dont les paramètres proviennent de la mesure des propriétés de rétention d'eau par capillarité des roches en laboratoire. La simulation du transport de soluté, en zone non saturée, permet d'estimer le flux de contaminant arrivant dans la nappe, en fonction du temps, et pour chaque point d'un **maillage** représentant la zone contaminée. Ce flux constitue l'entrée du modèle de transport dans la nappe, appelée aussi **zone saturée**.
- Préalablement à la simulation du transport en zone saturée, il faut simuler l'écoulement des eaux dans la nappe. Ce premier volet de modélisation hydrogéologique repose sur la détermination du champ d'écoulement de la nappe souterraine, vecteur potentiel des contaminants en solution. Le modèle d'écoulement s'appuie sur la **loi de Darcy**. *Via* un coefficient de perméabilité servant de paramètre au modèle, cette loi consiste à relier la vitesse de l'eau au gradient de charge hydraulique, c'est-à-dire à la variation dans l'espace du niveau d'eau (dit niveau **piézométrique**) qui serait mesuré dans un puits. Mais la perméabilité s'avérant généralement mal connue et seulement de manière ponctuelle par le biais de pompages d'essais dans un petit nombre de forages dimensionnés dans ce dessein, c'est le niveau piézométrique qui permet d'arriver au résultat par simple mesure du niveau d'eau dans tous les types de forages. Il s'agit donc, le plus souvent, de résoudre un problème inverse, autrement dit de déterminer le champ de perméabilité qui produit, *via* un code d'écoulement, un champ piézométrique donné. Ce champ piézométrique peut se définir précisément à partir des mesures disponibles et à l'aide de techniques géostatistiques pouvant inclure une information auxiliaire. Par exemple, il s'avère que le niveau piézométrique se trouve parfois corrélé à l'altitude topographique, paramètre beaucoup plus facilement mesurable que le niveau d'eau dans les nappes. Il devient alors possible de construire un champ piézométrique par **krigeage avec dérive externe** (figure 2). Ce champ piézométrique sera ensuite utilisé, en entrée du problème inverse, pour estimer un champ de perméabilité.
- Le calcul du transport du soluté en zone saturée constitue le deuxième volet de la modélisation hydrogéologique. L'interaction entre le soluté et la roche joue ici un rôle fondamental. Cette interaction, pour le transport en zone saturée comme en zone non saturée, est le plus souvent représentée par un terme de retard. Celui-ci se fonde sur l'hypothèse, très simplificatrice, d'une **adsorption** proportionnelle à la concentration en solution, et réversible, du soluté sur la roche. Une modélisation plus complète de cette interaction peut être réalisée à l'aide de **codes de calcul** couplant les réactions chimiques et le transport. Dans ce cas, la complexité devient alors très supérieure et requiert une connaissance fine de la **géochimie**, difficile à atteindre dans une modélisation à l'échelle d'une région de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres carrés. Une autre simplification consiste à décomposer le transport en deux étapes bidimensionnelles, correspondant à une migration verticale en zone non saturée, suivie d'une migration sub-horizontale en zone saturée. Cette méthode évite de recourir à une modélisation en trois dimensions, toujours difficile à mettre en œuvre et à maîtriser. Le modèle de transport en zone saturée permet d'estimer les concentrations en contaminant, au cours du temps, sur l'ensemble du domaine modélisé. Aux points d'usage des eaux souterraines répertoriés dans l'environnement

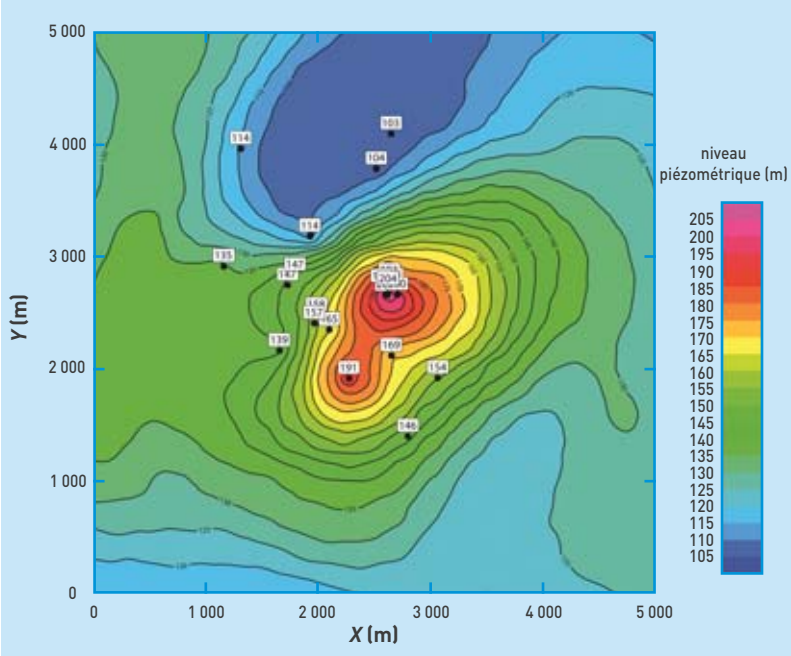


Figure 2.
Exemple de champ piézométrique obtenu par krigeage de données piézométriques et utilisant l'information topographique en dérive externe.

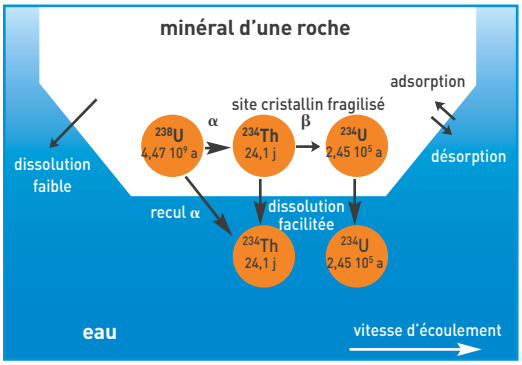


Figure 3.
Schéma illustrant les fractionnements entre les isotopes 234 et 238 de l'uranium au cours des processus de **désintégration radioactive**, notamment le recul alpha, et de la dissolution facilitée par la fragilisation des sites **cristallins** qui en découle (modifié d'après Amélie Hubert). La quantification de ces processus, qui s'ajoutent à ceux plus classiquement connus de dissolution et d'adsorption-désorption, permet le recalage des simulations numériques du transport de l'uranium sur des temps très longs. Les **périodes** de désintégration radioactive des différents isotopes sont mentionnées (j : jours ; a : années).

du site contaminé, ces concentrations simulées sont comparées à celles du fond géochimique et, si elles les dépassent, aux limites ou références de qualité, dont un bon nombre ont été définies selon les nombreux usages possibles de l'eau.

Validation des simulations par comparaison avec les mesures et analogues naturels

La validité des simulations repose, notamment, sur leur capacité à reproduire les concentrations mesurées dans les eaux souterraines, dans les cas où les contaminants, initialement présents dans le sol, auraient en partie atteint la nappe. Néanmoins, le nombre de points de comparaison possible s'avère généralement très limité : rarement plus d'un ou deux puits d'observation montrent des eaux de nappe contaminées, les autres constituent un réseau de surveillance préventive. De plus, le retour d'expérience ne dépasse pas les 50 ans. Cette durée est très courte au regard des centaines, milliers, voire dizaines de milliers d'années qui seraient nécessaires pour que la migration des contaminants (notamment les métaux lourds et les principaux radionucléides) arrive par les eaux souterraines jusqu'aux exutoires de la ressource. D'où la nécessité d'utiliser des **systèmes analogues** à ceux étudiés mais dont la durée de fonctionnement a été déjà bien supérieure. C'est le cas de la migration de l'**uranium** naturellement présent dans les roches. En plus des phénomènes bien connus de dissolution et d'**adsorption-désorption**, il a pu également être démontré, qu'à l'échelle du millier, voire de la dizaine de milliers d'années, d'infimes **fractionnements** entre les différents isotopes de l'uranium et de ses descendants (figure 3) se produisent au cours des processus naturels de dissolution et de transport : cela, depuis les sols vers la nappe, et au sein de celle-ci. Ces fractionnements dépendent de la durée d'interaction, de la vitesse de l'eau, de la solubilité des roches renfermant l'uranium ainsi que des propriétés chimiques de celui-ci. Ces fractionnements peuvent se reproduire à l'aide de codes de calcul et permettre ainsi de déterminer les paramètres manquants et de valider les modèles sur le long terme.

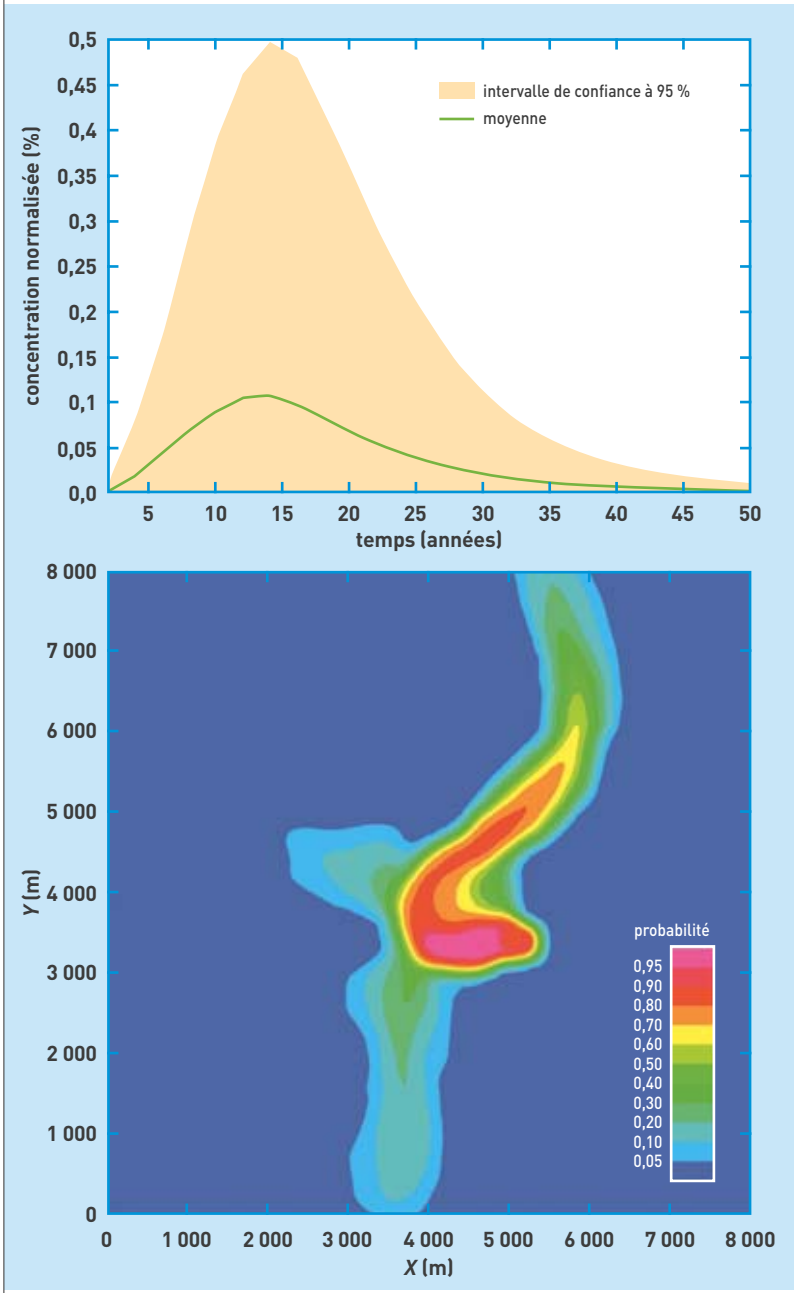


Figure 4.
(a) Exemple de calcul de concentration en contaminant en fonction du temps faisant apparaître l'intervalle de confiance et la moyenne dérivés de l'analyse d'incertitude.
(b) Exemple de carte de probabilité de dépassement d'un seuil de décision donné.

Estimation de robustesse, analyse de sensibilité, calcul des incertitudes

La complexité de l'ensemble de la modélisation induit des incertitudes. Celles-ci proviennent, en majeure partie, de la méconnaissance des **paramètres scalaires** : infiltration, porosité, dispersivité, paramètres de la rétention d'eau par capillarité, coefficient de retard… Ce type d'incertitude se traite aisément à l'aide de **calculs de Monte-Carlo**. En revanche, la méconnaissance du champ de perméabilité nécessite un traitement spécifique. Des simulations géostatistiques permettent de simuler un ensemble de champ de perméabilités proches du champ de perméabilité de référence issu du problème inverse. Les zones où l'écoulement s'avère particulièrement incertain peuvent ainsi être mises en évidence. Ceci permettra d'influer sur le choix de l'emplacement de futurs forages où le niveau piézométrique et la perméabilité pourront être mesurés. Il est également possible d'accéder aux incertitudes globales sur les concentrations de contaminants au cours du temps et sur l'ensemble du domaine modélisé. S'en déduisent les probabilités de dépassement de limites ou références de qualité (figure 4a et 4b).

La compréhension et la simulation des transferts, depuis les sols contaminés vers les ressources en eau, figure comme un élément clef de la maîtrise des risques. Celle-ci nécessite une approche multidisciplinaire traitant des couplages physiques et chimiques des systèmes, dont les finalités, applicative et fondamentale, constituent la clef d'une grande variété de problématiques sociétales touchant à la sécurité et à l'environnement : préservation des ressources en eau, lutte contre le réchauffement **climatique** et prévention des risques naturels.

> **Éric Pili** et **François Renard**
Département analyse, surveillance, environnement (Dase)
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France

Les **méthodes de traçages** pour étudier la migration des **polluants** dans les **sols industriels**

La base de données BASOL a recensé 4 000 sites et sols pollués par les activités industrielles en France, un inventaire qui appelle l'intervention des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif. Élaborer des études de risque, définir des objectifs de réhabilitation, effectuer des choix techniques, suppose de connaître préalablement les mécanismes de propagation des polluants dans les sols.

Parmi les sites recensés par BASOL [1], dont certains "orphelins" c'est-à-dire à l'abandon, la pollution des sols s'origine dans des contaminations anciennes et de toutes natures : **métaux lourds**, **hydrocarbures**, **solvants halogénés**… Intervenir suppose donc de connaître préalablement les mécanismes de propagation de ces polluants dans les sols afin d'élaborer des études de risques, de définir des objectifs de réhabilitation et des choix techniques mais aussi d'améliorer les méthodes de dépollution. Dans le contexte d'un site industriel toujours en activité, celui des centrales nucléaires en particulier, un enjeu environnemental important consiste à pouvoir répondre à une série de questions rapidement et avec précision : quand, où et dans quelle proportion, une contamination répandue accidentellement à la surface d'un sol peut-elle atteindre la nappe aquifère ? Il s'agit là d'un point clé des études d'impact.

De plus, la prise de conscience des risques industriels par la société civile et les pouvoirs publics conduit également à se préoccuper préventivement de l'impact des produits issus des technologies émergentes sur la santé et sur l'environnement. Il s'agit notamment des nanomatériaux manufacturés (**nanotubes de carbone**, nanoparticules d'**argent** ou de titane, etc.) dont la production connaît aujourd'hui d'importants développements. Par exemple, l'étude du transport des nanomatériaux par l'eau de ruissellement et par l'infiltration d'eau dans les sols permet de savoir si cette voie de transfert conduit à la contamination des eaux de surface ou des eaux souterraines et donc, si les études de risques doivent prendre en compte cette voie d'exposition.

CEA/DR

Les traceurs fluorescents utilisés en hydrologie (rhodamine, fluorescéine, amino-G acide) sont présents au cœur des nanotraceurs.

La zone non saturée (ZNS) au cœur de la problématique des pollutions industrielles

Exposée en première ligne aux pollutions d'origine industrielle, urbaine ou agricole, la zone superficielle du sol joue un rôle central dans leur redistribution vers la **biosphère**, l'**atmosphère** et l'**hydrosphère**. Dans le cadre d'études de risques ou d'actions de remédiation, il demeure donc d'un intérêt majeur de disposer d'une méthodologie d'identification des mécanismes de transfert de polluants dans cette partie du sol située entre la surface et la nappe aquifère que l'on nomme **Zone non saturée** (**ZNS**). Celle-ci se définit schématiquement comme un système triphasique. La phase solide, constituée de matériaux minéraux et organiques naturels, s'assimile à un milieu poreux. Dans cette zone, les pores étant remplis d'eau et d'air, les polluants migrent dans le réseau poral, entraînés par les phases liquide et gazeuse mobiles. En réalité, la migration des contaminants dans cette zone procède de mécanismes physiques, chimiques et biologiques interdépendants

(1) Actualisé en continu, BASOL est consultable sur le site du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire : http://basol.environnement.gouv.fr/faq.htm.

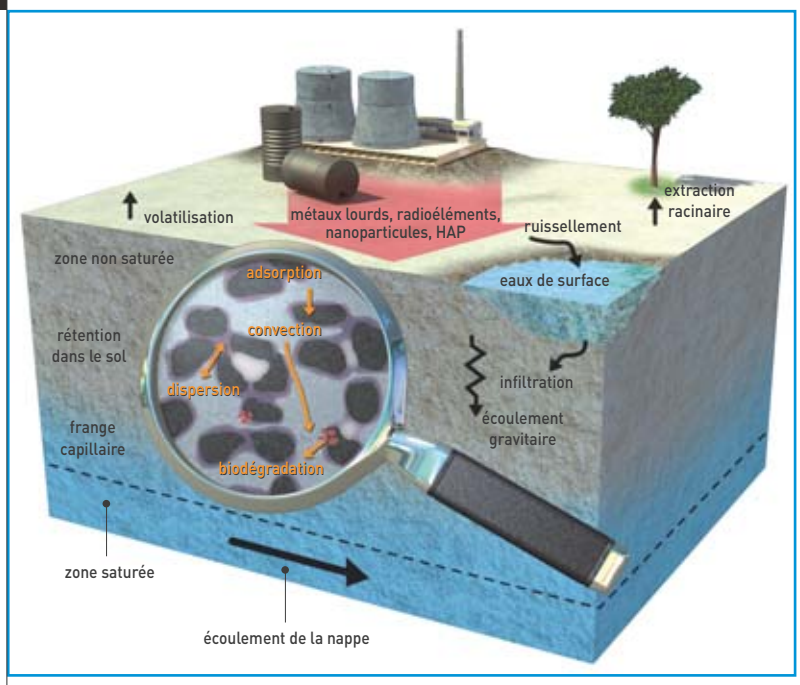


Figure 1. Dynamique des polluants dans les sols.

CEA/DR

Mise en œuvre de traçage sur le terrain : enregistrement du signal de fluorescence dans les piézomètres.

(figure 1) : il s'agit de la diffusion, de la **convection** due à l'écoulement de l'eau, de la **sorption** sur phase solide, de la volatilisation, de la biodégradation, de la bio-assimilation. Ces différents mécanismes dépendent non seulement de la nature des contaminants et de leur forme chimique mais aussi, en grande partie, des caractéristiques hydrodynamiques et **géochimiques** du sous-sol. La ZNS s'avère donc une zone de nature et de structure très hétérogènes, soumise à des conditions aux limites non stationnaires du fait des variations quotidiennes des conditions atmosphériques. Ces caractéristiques dépendent, non linéairement, de l'état hydrique, tout en étant spatialement et temporellement variables, ce qui complique considérablement les tentatives de description mathématique des mécanismes de transfert.

Une démarche expérimentale à échelle d'observation variable

Quand la description exhaustive des mécanismes de transport de contaminants à l'échelle de la ZNS toute entière est impossible, une approche phénoménologique globale la remplace, s'appuyant expérimentalement sur les méthodes de traçages (voir encadré). En effet, les expériences de traçages, mises en œuvre dans les dispositifs expérimentaux dédiés, permettent d'étudier séparément les mécanismes, de les hiérarchiser, de se rapprocher progressivement des conditions de terrain et ainsi d'obtenir des lois de passage d'une échelle d'observation à une autre. Cette démarche vise à minimiser les difficultés d'expérimentation tout en conservant un caractère prédictif satisfaisant sur le devenir d'une éventuelle pollution à l'échelle de la ZNS (figure 2). Il s'agit d'une approche née de la confrontation avec l'expérimentation de terrain : les conditions aux limites ne sont pas maîtrisées et les sols en place présentent une hétérogénéité compliquant l'acquisition de paramètres pertinents ainsi que l'interprétation des résultats.

Par ailleurs, les temps de transfert des contaminants retenus par la phase solide du sol s'avèrent parfois incompatibles avec les contraintes d'une étude, à court terme. Une partie de l'étude du transfert des contaminants réactifs s'effectue alors en laboratoire, ce qui assure une maîtrise supérieure des conditions expérimentales tout en limitant les échelles temporelles et spatiales d'investigation. Reste alors à choisir une ou plusieurs échelles d'investigation réduites en laboratoire et à tester l'extrapolation des résultats par la **modélisation** numérique. Néanmoins, l'expérimentation de terrain demeure incontournable pour la détermination de certains paramètres dépendants de l'échelle de mesure comme le coefficient de dispersion hydrodynamique ou la **conductivité hydraulique** du sol en place.

Caractérisation, à grande échelle, des spécificités hydrodynamiques du sol

Sous forme dissoute ou particulaire, tous les contaminants sont transportés dans le réseau poral par l'eau. D'où l'importance de comprendre et de décrire l'écoulement de l'eau dans le sol à l'échelle du problème. En effet, même si les mesures sur échantillons de sol, en conditions statiques, restent indispensables notamment pour quantifier la rétention des polluants sur les phases solides, la validité des résultats obtenus peut se trouver mise en question sur le terrain, en conditions hydrodynamiques transitoires et non uniformes. C'est notamment le cas lorsque des écoulements préférentiels existent créant, dans le sol ou la nappe aquifère, des chenaux de circulation rapide. Localement, l'hypothèse d'équilibre **thermo-**

Qu'est ce qu'un traceur ?

Un traceur se définit comme étant un élément représentatif d'une population (un gaz, une **molécule** en solution, une particule...) dont une propriété se trouve quantitativement détectable (**radioactivité**, **conductivité**, **fluorescence**...). Présent en très faible proportion dans la population à suivre, il ne perturbe pas le mouvement de la matière. Dans l'environnement, les concentrations de traceurs se mesurent à l'entrée (fonction d'entrée) et à la sortie (courbes de percée) d'un système constitué, par exemple, d'une portion d'aquifère, de sol, d'atmosphère ou un plan d'eau. Elles permettent de quantifier le comportement de ce système en termes de bilan de masse, temps de séjour et dispersion de la matière transportée (eau, polluant, gaz, particules). On obtient ainsi la fonction de transfert du système.

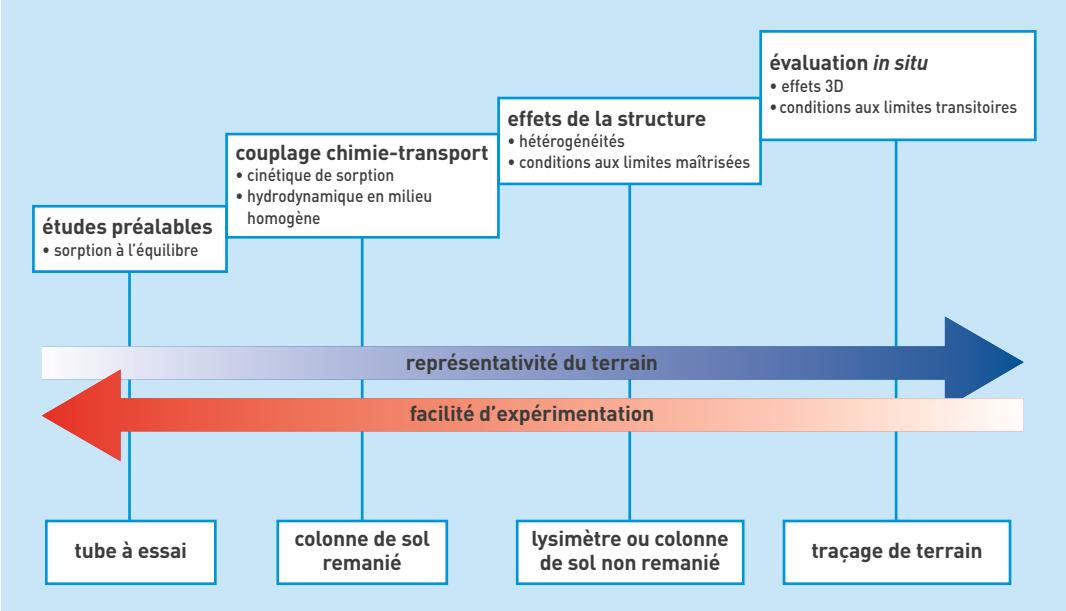


Figure 2.
Les différentes échelles d'observation et les dispositifs expérimentaux correspondants, en relation avec les phénomènes qu'ils permettent d'étudier.

Mise en œuvre de l'infiltromètre Transat sur le site du CEA M27.

dynamique ne se vérifie pas et la réactivité du sol apparaît plus faible.
Par ailleurs, en raison de la structure hétérogène du sol, les paramètres qui permettent de décrire l'écoulement d'eau dans la ZNS dépendent de l'échelle de mesure. Par exemple, les mesures de conductivité hydraulique, réalisées sur site à petite échelle (quelques cm), montrent une très grande variabilité spatiale de ce paramètre. Il arrive donc de mettre en évidence des variations d'un ordre de grandeur pour des points de mesure distants de moins d'un mètre. Or, cette variabilité ne se détecte pas nécessairement à l'échelle supérieure. À l'échelle des problèmes de pollutions industrielles abordés ici (typiquement de l'ordre de la dizaine de m^3), cette hétérogénéité marquée de la ZNS se traduit, dans les modélisations, par une large disparité des temps d'apparition des polluants et des concentrations maximales atteintes dans la nappe. Afin d'affiner le caractère prédictif des modélisations, il faut donc impérativement mesurer les caractéristiques hydrodynamiques de la ZNS à une échelle pertinente. La méthode développée à cet effet dans le cadre d'un projet de l'**Agence nationale de la recherche** (**ANR**/Transat) permet de déterminer le temps d'arrivée et la dispersion d'une pollution ponctuelle, répandue en surface jusqu'à l'aquifère sous-jacent. Son principe repose sur l'injection d'un traceur **fluorescent** ou chimique de l'eau infiltrée dans le sol sous une charge constante, à l'aide d'un **infiltromètre**, simple anneau de grande dimension (figure 3). Il s'agit là d'une méthode opérationnelle susceptible d'être mise en œuvre par des bureaux d'études.
Les caractéristiques et la fonction de transfert du milieu poreux insaturé s'obtiennent, pour un volume de sol concerné par le traçage de l'ordre de plusieurs m^3, en s'affranchissant de la variabilité spatiale détectée à petite échelle. L'utilisation de l'infiltromètre permet d'obtenir une mesure directe et simple du temps de séjour de l'eau dans la ZNS, de fournir des résultats à l'échelle du problème mais aussi d'ajuster les paramètres des **modèles** numériques décrivant le comportement des polluants entre la surface du sol et la nappe.

Interaction des polluants entre eux : le cas des pollutions mixtes

Dans un contexte industriel, les sols pollués présentent généralement des contaminations couplant à la fois des métaux lourds et des **composés organiques**

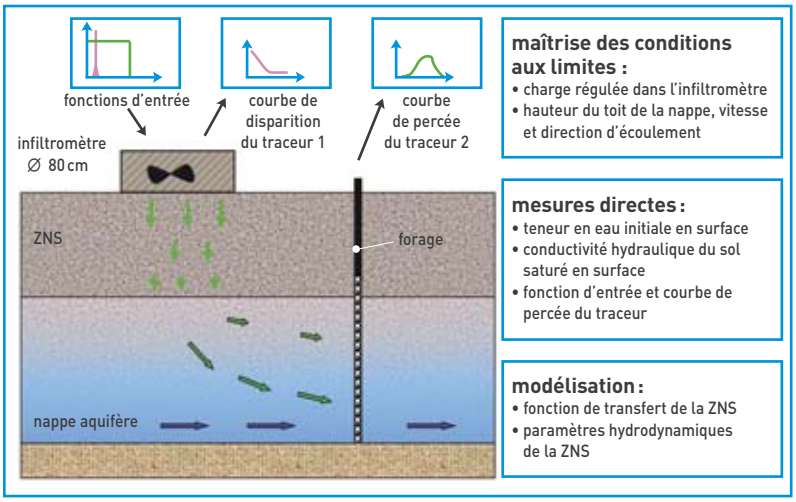


Figure 3.
Principe du dispositif expérimental Transat. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques de la ZNS.

Injection de nanotraceurs fluorescents dans une colonne de sol.

CEA/DR

(solvants, hydrocarbures, tensioactifs, détergents…). Ces polluants réagissent non seulement avec le milieu hôte mais également entre eux et peuvent se comporter différemment en présence les uns des autres. Par exemple, l'influence du **catéchol**, un produit de dégradation des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) très soluble dans l'eau, a été mise en évidence sur le transport du **cobalt** en colonne de laboratoire. Des expériences de sorption du cobalt ont été réalisées sur des échantillons de sols industriels pollués, ou non, par du catéchol, ainsi que des essais de percolation en colonne de sol. Les profils de répartition du cobalt **adsorbé** sur le sol de la colonne ont ensuite été mesurés à l'aide d'un **banc gammamétrique** capable de détecter, à distance, la présence de **^{57}Co** utilisé comme traceur **radioactif** dans le sol (figure 4). Le cobalt, jusqu'alors pratiquement immobilisé dans ce sol, va se déplacer sous l'effet de l'injection de catéchol dissous, prouvant que ce composé peut remobiliser partiellement le cobalt fixé sur les phases solides en le **complexant**.

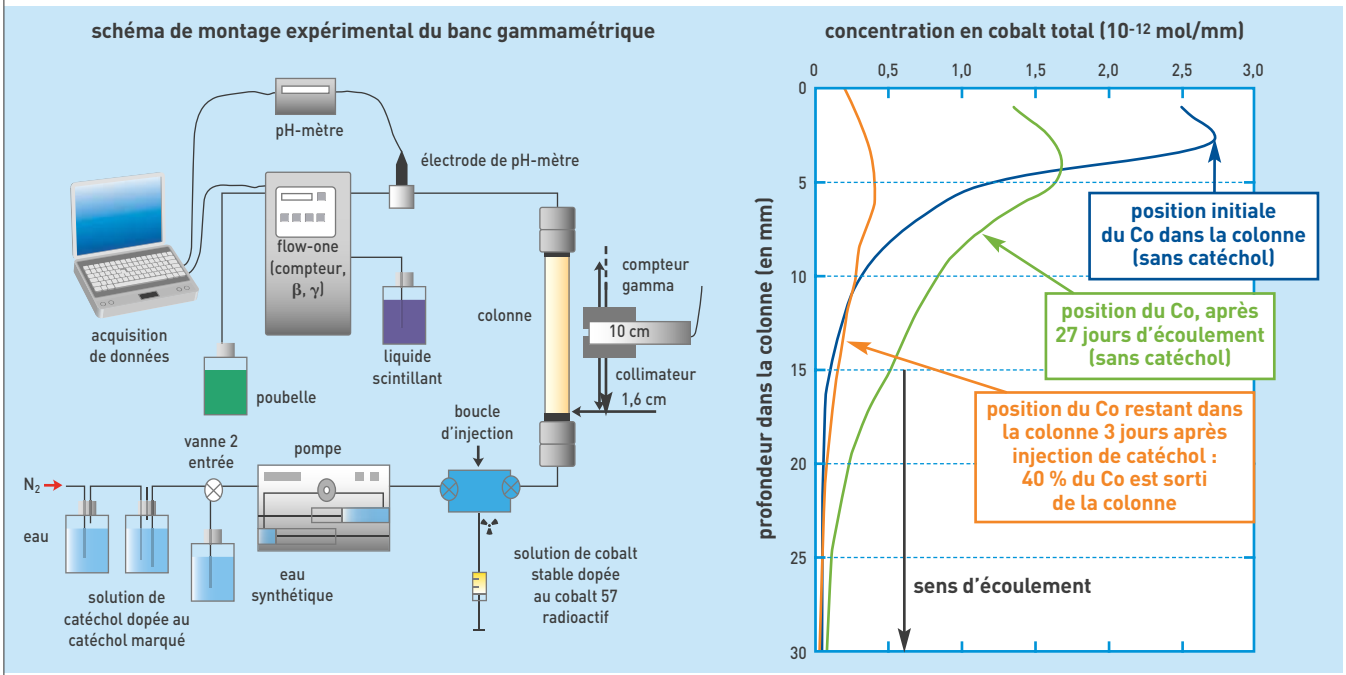
Cette étude se poursuit actuellement sur d'autres composés organiques comme le **naphtalène**. Elle vise la prise en compte de l'impact d'une pollution organique, simultanée ou décalée dans le temps, sur la mobilité des métaux dans le contexte de l'évaluation opérationnelle des risques. En effet, jusqu'à présent, les études de risques n'étaient réalisées que pour les polluants pris individuellement. La question sous-jacente reste donc de savoir si cette approche s'avère, *a priori*, la plus pénalisante vis-à-vis du transfert des polluants.

Des nanotraceurs pour l'étude du transport colloïdal

Les milieux poreux naturels, comme les sols ou les aquifères, contiennent des particules **colloïdales** naturelles (< 1 **µm**). Selon les conditions hydriques et géochimiques, celles-ci peuvent être transportées par l'eau. Du fait de leur surface spécifique élevée et de leur petite taille, ces colloïdes naturels développent une forte réactivité et une mobilité supposée importante, dans le réseau poral ; ils peuvent agir comme des vecteurs de dispersion d'éventuelles substances polluantes fixées à leur surface. Certaines particules colloïdales comme les virus, les bactéries pathogènes ou certaines **macromolécules** organiques (pesticides, herbicides) sont également susceptibles de présenter, en elles-mêmes, un risque pour l'environnement et la santé. Le transport colloïdal peut donc contribuer à la dissémination rapide de polluants dans les sols et les eaux souterraines.

Toutefois, les processus de dépôt et d'agrégation limitent fortement la mobilité des colloïdes dans les milieux poreux. L'existence d'un transport par l'eau de colloïdes dans les milieux poreux naturels dépend de différents facteurs comme la géométrie de l'espace poral, la dynamique de l'écoulement, la composition chimique des phases minérales constitutives du sol,

Figure 4. Évolution des profils de concentration de cobalt dans une colonne de sol pollué avant et après injection de catéchol dans la solution de percolation.



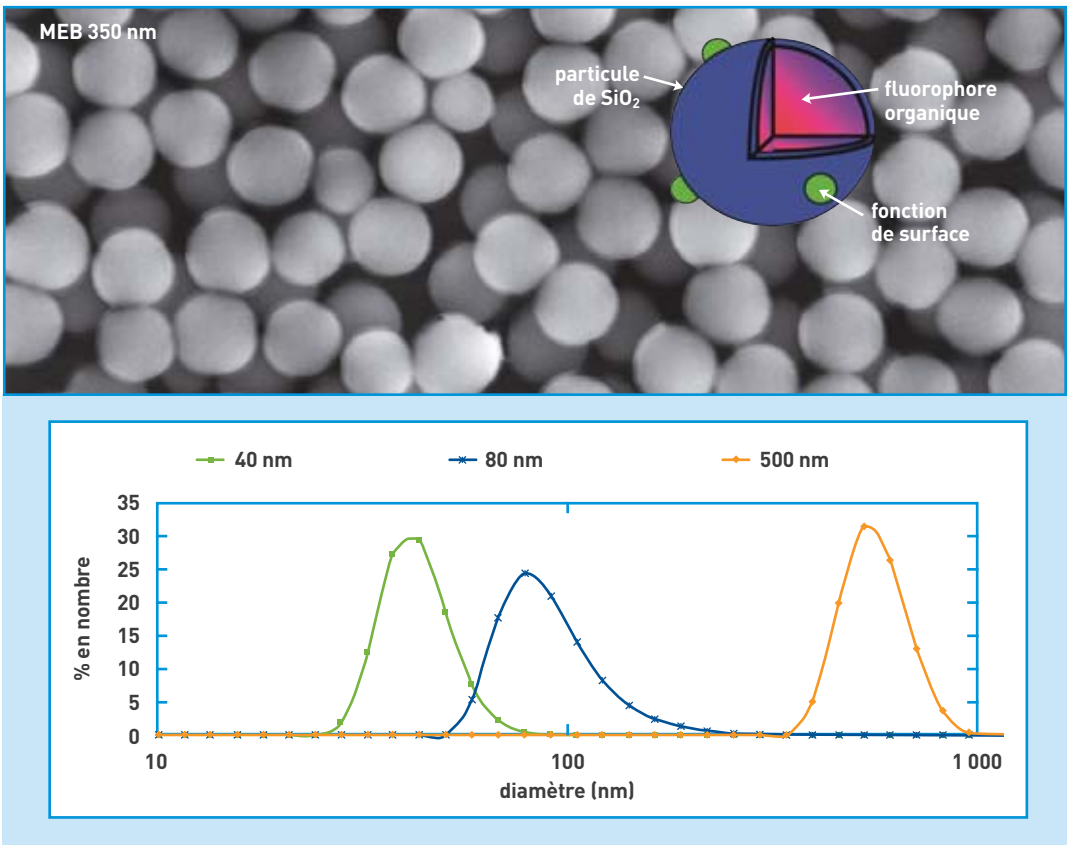


Figure 5.
Synthèse de nanotraceurs de SiO_2 marqués RBITC (Rhodamine B Isothiocyanate) ou FITC (Fluorescéine Isothiocyanate).
Distributions de tailles des nanotraceurs obtenues par DLS (dynamic light scattering).

la composition de la solution du sol, la nature et de la taille des particules colloïdales. Ces mécanismes valent également pour les nanoparticules manufacturées (nanotubes de carbone, **oxydes métalliques**, nano**cristaux**…) dont on se demande si le transport par l'eau dans les sols et les aquifères ne constituerait pas une voie d'exposition devant être prise en compte dans les études de risques.

Comme souvent dans l'étude de mécanismes multifactoriels, le recours aux traceurs permet d'apporter des réponses rapides aux questions posées tout en faisant progresser la connaissance. Ainsi, l'utilisation de nanoparticules fluorescentes, baptisées nanotraceurs, permet d'étudier sélectivement l'influence des propriétés des colloïdes sur leur mobilité dans les milieux poreux naturels (figure 5). Il s'agit de nanoparticules de **SiO_2** fabriquées à partir d'un **procédé sol-gel** contenant un **fluorophore** organique et dont on peut moduler la taille (de 20 à 1 000 **nm** environ) ainsi que les propriétés de surface par le **greffage** de groupes fonctionnels. Ces nanotraceurs s'utilisent en laboratoire pour des expériences de traçages en colonnes de sol avec différentes conditions d'écoulement.

La mise en œuvre de nanotraceurs de tailles différentes a permis de fournir, pour l'aquifère d'un site test, les paramètres clefs du modèle de transport de colloïdes, comme le taux de dépôt irréversible. Il apparaît qu'au-delà de 300 nm, le taux de dépôt irréversible devient indépendant de la taille de la particule colloïdale. En deçà de 100 nm, dans les conditions expérimentales testées, les particules ne se déposent pas dans le milieu poreux et se déplacent à la même vitesse que l'eau. Par ailleurs, la comparaison entre les taux de dépôts irréversibles mesurés, et ceux prévus par les théories classiques de la filtration, montre que ces théories ne présentent aucun caractère prédictif dans les milieux naturels : ce qui justifie d'autant plus le recours aux traceurs.

Des radionucléides aux nanoparticules

La problématique du transport colloïdal concerne aussi bien le transport facilité de **radionucléides** ou de métaux lourds adsorbés sur les colloïdes naturels du sol que la migration des nanoparticules manufacturées. Dans ce contexte, l'utilisation des nanotraceurs paraît donc prometteuse. Elle permettrait, à la fois, d'apporter des réponses rapides sur le risque de transport des nanoparticules dans les eaux souterraines mais aussi de progresser dans la connaissance des mécanismes multifactoriels parfois mal décrits.

Aujourd'hui, la communauté scientifique, et notamment les biologistes, souhaitent disposer de traceurs représentatifs capables de quantifier les interactions entre les nanoparticules et le vivant. Il s'agirait de répondre aux nombreuses questions soulevées à propos de l'étanchéité des barrières cellulaires vis-à-vis des nanoparticules. Dans un proche avenir, l'enjeu sera de développer des outils de traçage fiables, permettant de distinguer les différentes voies de transfert des nanoparticules. Il s'agit d'un enjeu propre à prendre la relève, dans la continuité, de tout ce qui a été fait dans le domaine des méthodes de traçages.

> **Véronique Barthès** et **Stéphanie Szenknect**
Laboratoire d'innovation pour
les technologies des énergies nouvelles
et des nanomatériaux (Liten)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

MÉMO C

Gaz à effet de serre et aérosols au cœur du débat sur le changement climatique

Photolink

Le rayonnement solaire se trouve réfléchi vers l'espace par l'air, les nuages blancs, la surface terrestre, notamment les régions arctique et antarctique.

En 1824, Joseph Fourier pressent déjà que les gaz présents dans l'**atmosphère** terrestre contribuent au réchauffement planétaire. On doit ainsi à ce mathématicien la première ébauche de la théorie sur l'**effet de serre**. Néanmoins, il faudra attendre 1860 pour que le physicien irlandais John Tyndall désigne la **vapeur d'eau** et le **dioxyde de carbone** (CO_2) comme principaux responsables de ce phénomène atmosphérique et 1896 pour que le physicochimiste suédois, Svante Arrhénius, lui donne la description que nous lui connaissons aujourd'hui.

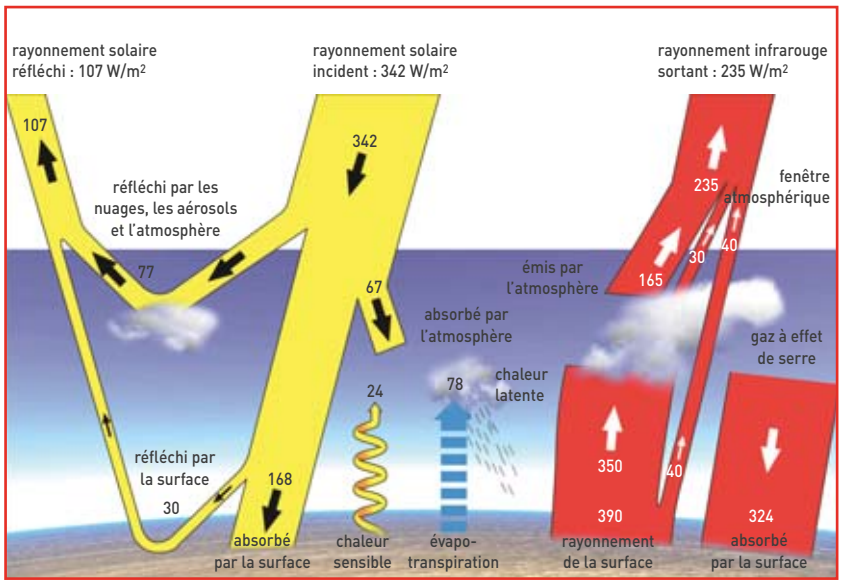


Figure 1.
Flux d'énergie au sein du système climatique.

L'effet de serre, un phénomène naturel

C'est du vocabulaire des jardiniers que le phénomène d'effet de serre tire son appellation – les serres étant ces espaces clos aux parois transparentes pour laisser passer et retenir le rayonnement solaire afin d'augmenter la température indispensable aux semis. Dans l'espace, l'essentiel du rayonnement solaire (60 % environ) traverse directement l'atmosphère, transparente malgré la présence de nuages, et vient réchauffer la surface du globe. Ensuite, 28 % de ce rayonnement se trouve réfléchi vers l'espace par l'air, les nuages blancs, la surface terrestre, notamment par ses parties les plus blanches comme les régions arctique et antarctique. Ce phénomène porte un nom, il s'agit de l'**albédo**. Quant aux rayons n'ayant pas été réfléchis, environ 20 % d'entre eux seront absorbés par l'atmosphère et 51 % par la surface terrestre qu'ils contribuent à réchauffer. Cette chaleur, la **Terre** ne la conserve pas entièrement. Elle en restitue une partie à l'atmosphère où la vapeur d'eau, différents gaz, dont le **gaz carbonique**, vont absorber ce rayonnement et former une barrière pour empêcher l'énergie de passer directement de la surface du globe vers l'espace avec deux conséquences. S'en suivra un net réchauffement de l'atmosphère et une

réémission du rayonnement, tous azimuts, et notamment une nouvelle fois vers la Terre (figure 1). Sans ce supplément de chaleur la température planétaire descendrait à – 18 °C. C'est ce flux d'énergie au sein du système climatique que l'on nomme effet de serre. Il s'agit d'un mécanisme naturel et bien réglé puisque l'énergie reçue par la Terre de l'espace équivaut approximativement à celle émise par la Terre vers l'espace. Mais qu'un déséquilibre intervienne et la planète procède à un stockage ou à un déstockage d'énergie source d'un changement de température (figure 2).

Dérèglement artificiel d'un phénomène naturel

La plupart des gaz à effet de serre existent à l'état naturel. C'est notamment le cas de la vapeur d'eau, produite par l'évaporation s'effectuant tout au long du cycle de l'eau. Elle entre pour environ 0,4 % dans la composition de l'atmosphère terrestre (avec 0,1 % en Sibérie mais 5 % dans les zones maritimes équatoriales) et se trouve responsable d'approximativement 60 % de l'effet de serre naturel et le CO_2 d'environ 35 %.
Si la plupart des gaz à effet de serre s'avèrent d'origine naturelle, en revanche, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) montrait, dès 1995, que la progression de leurs émissions découlait d'activités à caractère anthropique. En effet, une croissance démographique sans précédent (la population planétaire est passée de 1,7 milliard à 6 milliards de personnes en 100 ans) doublée par les activités générées par la révolution industrielle, a entraîné un accroissement de la production et de la consommation s'accompagnant forcément de rejets et de pollutions à fort impact sur l'environnement. L'augmentation de la teneur des gaz à effet de serre dans l'atmosphère due à ces rejets figure désormais comme la principale cause du dérèglement contemporain des échanges d'énergie entre la planète et l'espace.
Parmi les gaz contribuant notoirement à l'augmentation de l'effet de serre se trouvent :

Le *dioxyde de carbone*, ou *gaz carbonique (CO_2)*

Sa concentration dans l'atmosphère a progressé de 31 % entre 1750 et 2006, passant de 280 ppm à 381 ppm, et s'accroît au rythme de 0,4 % par an soit une augmentation annuelle moyenne de 1,5 ppm. Les dernières années indiquent une accélération de l'augmentation de CO_2 avec un taux de croissance de 1,9 ppm par an depuis 2000.

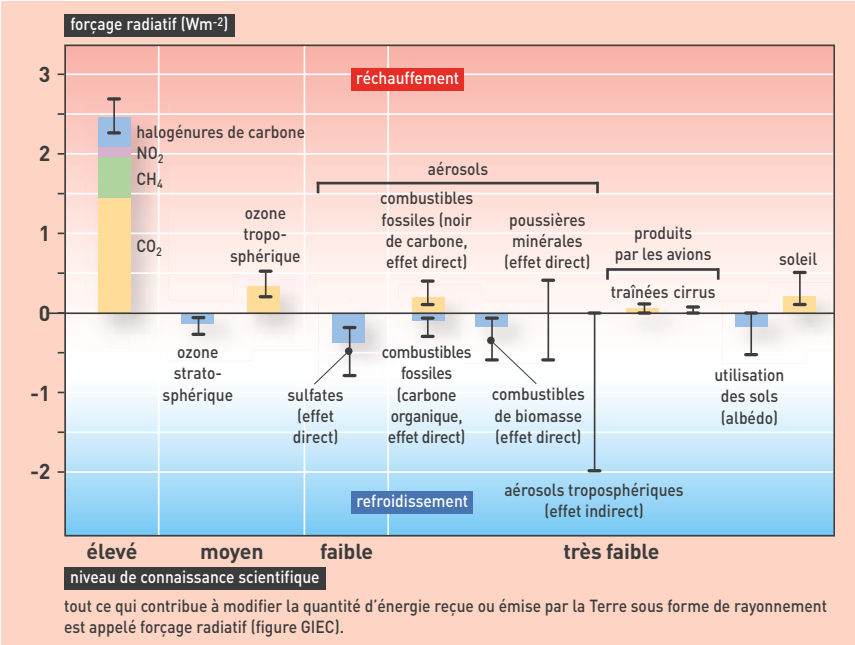


Figure 2.
Modifications du forçage radiatif entre 1750 et 2000.

Le CO_2 est responsable d'environ 39 % de l'élévation de la température moyenne de la Terre et de 60 % de l'accroissement de l'effet de serre total au cours du dernier siècle. Ces résultats inquiétants s'expliquent par l'incapacité de la photosynthèse et des océans à compenser, désormais, les rejets imputables aux activités humaines.

Le *méthane (CH_4)*

Responsable de 1 % de l'élévation de la température terrestre et de 20 % de l'accroissement de l'effet de serre total, sa concentration atmosphérique est passée de 750 ppb en 1 750 à 1 745 ppb en 1998, soit une augmentation de 150 %. Si environ la moitié des émissions de méthane provient du milieu naturel (les marécages, estuaires par exemple), l'autre moitié découle d'activités humaines (culture en rizières, décharges à l'air libre, digestion des animaux et des humains, extraction des combustibles fossiles...).

L'*oxyde nitreux (N_2O)*

D'origine naturelle (sols et océans) ou anthropique (engrais azotés, combustion de la biomasse, élevage, industrie...), il contribue à augmenter de 17 % l'effet de serre. Sa concentration dans l'atmosphère est passée de 270 ppb en 1 750 à 314 ppb en 1998.

L'*ozone (O_3)*

Produit pour l'essentiel au-dessus de l'équateur, l'ozone diffuse vers les pôles où il s'accumule en proportion variée selon les saisons (les concentrations minimales se situant à la fin de l'hiver) ou les moments de la journée (nuit/jour). Dans l'atmosphère, on retrouve l'ozone à deux niveaux :

- d'abord, dans la stratosphère où il forme autour de la Terre une couche protectrice qui filtre une partie des rayons ultraviolets émis par le Soleil et ainsi protège la vie sur terre, aussi bien celle des hommes que celle des micro-organismes ou du phytoplancton marin. Cette couche protectrice se trouve aujourd'hui menacée de pollution par les émissions de chlorofluorocarbone (CFC), un gaz très nocif présent dans les pesticides, les cosmétiques, les aérosols... à l'origine du "trou" dans la couche d'ozone. En 1998, la production mondiale de CFC s'établissait à 800 000 tonnes, soit une centaine de grammes par habitants. Le "trou" dans la couche d'ozone découle de réactions complexes des rayons ultraviolets sur les CFC ayant pour résultat la formation de chlore qui catalyse la destruction de l'ozone avec formation d'oxygène. À titre indicatif, la taille du "trou" dans la couche d'ozone peut atteindre la superficie de l'Amérique du Nord et une profondeur égale à l'altitude de l'Everest ;
- ensuite, on trouve l'ozone dans la troposphère, c'est-à-dire dans un air proche du sol, et donc respiré par les êtres vivants. Au-delà de certaines concentrations, ce gaz joue le rôle d'un polluant dangereux. Dans les grandes agglomérations, l'ozone provient de la réaction entre des oxydes d'azote émis

Suite page 68

MÉMO C

Suite de la page 67

© 1999 EyeWire, Inc.

Les activités générées par la révolution industrielle ont entraîné un accroissement de la production s'accompagnant de rejets et de pollutions à fort impact sur l'environnement.

par les gaz d'échappement des véhicules automobiles ou les **hydrocarbures** imbrûlés avec l'oxygène de l'air. Si les conditions **météorologiques** s'y prêtent (c'est le cas dans les situations **anticycloniques**), l'évacuation de l'ozone se trouve freinée, entraînant des pathologies respiratoires chez les personnes fragiles, d'où les dispositifs de surveillance de l'air.

En résumé, l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre peut se comparer à celle provoquée par la pose d'un double vitrage dans une serre : si les apports de rayonnements solaires demeurent constants à l'intérieur de la serre, la température s'élève forcément. Bien sûr, tous ces gaz ne possèdent pas le même pouvoir de réchauffement. Ainsi, l'effet d'un kilogramme de méthane sur l'effet de serre s'avère 23 fois supérieur à celui d'un kilogramme de CO_2. L'écart se calcule au moyen du **Potentiel de réchauffement global** (**PRG**) auquel le dioxyde de carbone sert de référence (le PRG est le facteur par lequel il faut multiplier la masse d'un gaz pour obtenir une masse de CO_2 produisant un impact équivalent sur l'effet de serre). La durée de vie des gaz à effet de serre dans l'atmosphère varie également : de 12 ans pour le méthane à 100 ans pour le dioxyde de carbone. Parmi les activités anthropiques responsables des concentrations de gaz à effet de serre figurent notamment l'utilisation massive de combustibles fossiles (charbon, produits pétroliers, gaz naturel), la déforestation réalisée au profit des cultures et des pâturages qui ne peuvent absorber autant de carbone qu'une forêt mature, les rejets croissants de chlorofluorocarbures...

Le cas particulier des aérosols

Il s'agit de fines particules en suspension dans l'atmosphère. D'origine naturelle, elles proviennent de l'océan (sels de mer produits par l'évaporation des embruns, **sulfates** issus de l'**oxydation** de composés soufrés émis par le plancton...) ou des continents (érosion éolienne, suies issues des feux de forêt ou de savane, poussières et sulfates volcaniques...). Facilement transportables par les courants aériens, les **aérosols** peuvent se retrouver à de grande distance de leur lieu de production – c'est le cas de particules de sable saharien venues recouvrir des voitures en Europe. Ils peuvent même atteindre la stratosphère, comme ce fut le cas après l'éruption du Pinatubo (Indonésie), où des poussières volcaniques ont séjourné près de trois ans, provoquant une chute de la température planétaire d'un demi-degré pendant deux ans. Mais l'homme, par ses activités, contribue aussi à générer des aérosols. Transports, déboisements, constructions, industrie, agriculture engendrent des poussières. Néanmoins, l'essentiel de la production des aérosols anthropiques provient de l'utilisation des combustibles fossiles et de la biomasse. Leur combustion, en produisant du **gaz sulfureux** (**SO_2**), se trouve donc à l'origine des retombées acides et des aérosols de sulfates.

Les effets de ces aérosols agissent à l'opposé de ceux des gaz à effet de serre en arrêtant une partie de l'énergie solaire arrivant sur Terre. S'y ajoutent les incidences indirectes des aérosols sur le **climat**. Ainsi, peuvent-ils servir de noyaux de condensation de la vapeur d'eau dans la formation des nuages avec, à la clef, une concentration qui influera sur la taille des gouttes conditionnant le temps de résidence dans les nuages. Il arrive aussi que, absorbant le rayonnement tellurique, les aérosols échauffent localement l'atmosphère modifiant sa stabilité verticale ou que, par des réactions chimiques complexes, ils influencent la concentration

C. Sherburne/PhotoLink

Les aérosols, fines particules en suspension dans l'atmosphère, proviennent notamment de l'océan, des feux de forêts ou de savane mais aussi des éruptions volcaniques.

de composés à effet de serre. Parfois encore agissent-ils sur la photosynthèse constituant un apport de nutriments essentiels pour le phytoplancton en océan ouvert ou pour la forêt amazonienne.

Les incidences du dérèglement

Selon les **modèles** élaborés par les **climatologues**, la température moyenne de la planète devrait augmenter de 2 °C, au cours du prochain siècle, dans l'hypothèse d'un doublement de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ce réchauffement climatique ne demeurera pas sans incidences pour la planète puisque les études des **paléoclimatologues** démontrent que, dans le passé, une variation de seulement quelques degrés a suffi pour modifier profondément la physionomie terrestre.

Parmi les principales conséquences du réchauffement de la planète, il faudra notamment compter sur une élévation du niveau des mers que les hypothèses moyennes évaluent à 50 cm pour le prochain centenaire. Due à la fonte d'une partie des glaces polaires et au réchauffement des océans, la perte terrestre pourrait atteindre 6 % aux Pays-Bas et 17 % au Bangladesh, menaçant ainsi près de 92 millions de personnes vivant sur les zones côtières. En France, des espaces comme le delta du Rhône en seraient sûrement affectés. À côté de ce changement dans les paysages s'ajoute une sérieuse menace de disette, notamment en Asie du Sud, de l'Est et du Sud-Est, ainsi que dans les régions tropicales d'Amérique latine. Avec des vagues de chaleur plus intenses et plus longues les risques liés à la santé des populations se développeront avec un accroissement prévisible des pathologies cardio-vasculaires ou une transmission accélérée de maladies comme le paludisme, la fièvre jaune, les encéphalites. Quant aux modifications climatiques, les experts penchent pour une forte augmentation des fréquences et de la durée des crues et des sécheresses. Par exemple, en France, en cas d'augmentation de 2 °C de la température moyenne, les précipitations d'hiver progresseraient de 20 % et celles d'été diminueraient de 15 %. La modification des courants marins devrait également jouer un rôle majeur. Ainsi, un ralentissement du *Gulf Stream* dans la zone Nord de l'océan Atlantique pourrait entraîner un fort refroidissement de la température en Europe occidentale alors que la température s'élèverait dans le reste du globe.

Digital Vision Ltd.

Parmi les principales conséquences du réchauffement planétaire, il faudra compter sur une élévation du niveau des mers (estimé à 50 cm) due à la fonte d'une partie des glaces polaires et au réchauffement des océans.

L'action internationale de prévention du changement climatique

L'évolution du climat et de l'environnement global a suscité une réaction internationale et l'organisation de plusieurs conférences. En 1992, la **Convention de Rio de Janeiro**, signée dans le cadre des Nations unies par 183 États et l'Union européenne, a défini une série d'objectifs visant à *"stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique"* (article 2). En parallèle, cette convention demandait aux pays développés d'adopter des politiques et des mesures pour ramener, individuellement ou conjointement, à leur niveau de 1990, leurs émissions de gaz carboniques et autres gaz à effet de serre.

Mais, en 1997, les États estimeront que les engagements pris à Rio de Janeiro ne s'avéraient pas adéquats. Réunis cette fois à Kyoto, ils décident, non plus de s'engager sur une stabilisation des émissions, mais plutôt sur des objectifs quantifiés et des calendriers de réduction d'émission de gaz à effet de serre : moins 10 % d'ici 2012 soit, pour les pays riches, une réduction de 5,2 % de leurs émissions. Ce résultat a été rendu possible grâce à l'attitude positive de l'Union européenne et à sa volonté d'aboutir à des résultats significatifs. Néanmoins, il s'agit là d'un pourcentage encore bien faible au regard des 25 % d'augmentation des rejets enregistrés depuis 1999, d'autant que les États-Unis n'ont pas ratifié le **protocole de Kyoto** et que des pays en voie de développement, comme la Chine ou l'Inde, augmentent leurs rejets polluants. Depuis, une autre **conférence** s'est tenue à **Buenos Aires** en 1998. Elle a permis de préciser les règles et des lignes directrices ainsi que les dispositions générales prévues par le protocole de Kyoto : mécanismes d'échange, sanctions, élaboration de meilleures pratiques... En parallèle, une **Conférence des parties** (**COP**) se tient chaque année sur le climat. Celle de 2009 sera organisée à Copenhague. Il s'agit d'une étape importante visant à atteindre un accord mondial sur la réduction du CO_2 pour 2012, date d'expiration du Protocole de Kyoto.

L'exception française

En s'établissant à 1,7 tonne de carbone par an et par habitant, en 1995, la France figure comme l'un des pays développés qui participent le moins à l'effet de serre. Ce résultat tient d'abord à la politique d'économie d'énergie mise en place après le premier choc pétrolier ainsi qu'à l'utilisation du nucléaire pour la production d'électricité. Elle tient également à l'adoption d'un programme national de prévention du changement de climat. Ce programme a prévu une série de mesures tendant à réduire les émissions de gaz carbonique, de méthane et de **protoxyde d'azote** dans des secteurs comme le bâtiment (renforcement de la réglementation thermique), l'industrie (incitations fiscales aux économies d'énergie), transport (disposition pour réduire la consommation énergétique des véhicules).

Radionucléides naturels et dynamique **de l'environnement**

L'engagement du Département analyse, surveillance, environnement (Dase) dans la détection de tirs nucléaires s'inscrit dans le cadre du Traité international d'interdiction complète des essais nucléaires (Tice) signé en 1996. Ce traité s'appuie sur un réseau international de détection des ondes sismiques, hydro-acoustiques, infrasonores mais également sur des radionucléides significatifs d'une explosion nucléaire.

CEA/DR

Les stations radionucléides de Tahiti et de Mongolie.

Depuis 2008, une technologie mesurant ces **radionucléides** se trouve déjà à l'œuvre dans cinquante-deux stations réparties sur l'ensemble du globe. Ces implantations permettent de mesurer les concentrations quotidiennes de différents radionucléides, émis sous forme de particules, avec un seuil de détection très bas et un taux de disponibilité supérieur à 95 %. Sous peu, le nombre de ces stations passera à quatre-vingt (figure 1). *Via* l'**International Data Center** (**IDC**), situé à Vienne, ces stations fournissent les concentrations volumiques d'une vingtaine de **radioéléments** choisis dans le cadre du traité, dont trois radionucléides naturels (**^{212}Pb**, **^{210}Pb** et **^{7}Be**). Les mesures continues et globales de ces trois radio-

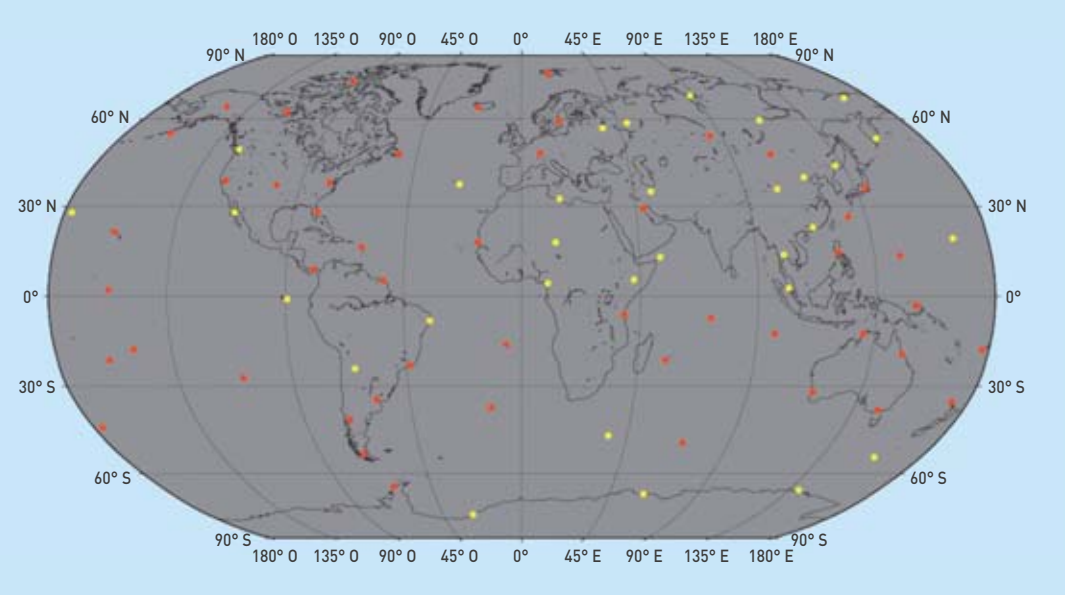


Figure 1. Implantation des stations radionucléides du Tice avec les stations actives en 2008 (en rouge) et les stations à venir (en jaune).

Lessivage des particules

Dans un nuage, les **aérosols** servent de noyaux de condensation et sont incorporés à la phase liquide (processus de nucléation). Ils peuvent aussi être collectés au cours de chocs mais alors, ce mécanisme ne contribue que pour une petite fraction à l'incorporation des particules dans les gouttelettes (de 10 à 15 %). En cas de déclenchement d'une précipitation, les aérosols sont éliminés du nuage. Sous ce nuage, les gouttelettes collectent également des particules lors de leur chute. Dans le cas d'une ré-évaporation, une fraction des particules lessivées sera réinjectée dans l'**atmosphère**. Ces deux derniers processus jouent, en général, un rôle mineur dans le dépôt humide.

nucléides, dont la source est connue, offrent la possibilité de mieux appréhender la dynamique de l'**atmosphère** et donc de la **modéliser** avec un modèle 3D de circulation générale.

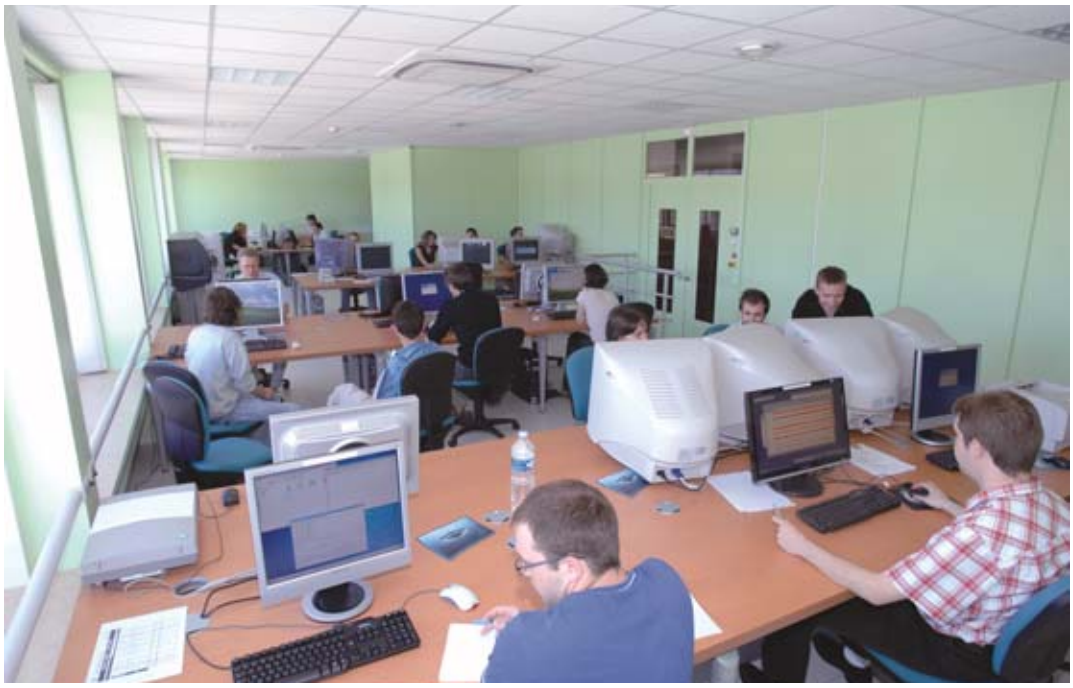
Les trois radionucléides naturels choisis par le Tice

Les radionucléides ^{210}Pb et ^{212}Pb, dont les **périodes radioactives** s'établissent respectivement à 22,3 ans et 10 heures, résultent de la **décroissance radioactive** des **isotopes** 220 et 222 du **radon**, gaz produit dans le sol. En raison de sa période relativement courte, le ^{212}Pb permet d'analyser des phénomènes atmosphériques locaux qui, sans lui, ne seraient pas modélisés à l'échelle globale. Par ailleurs, le ^{7}Be, dont la période radioactive s'établit à 53 jours, provient de la **stratosphère** et de la haute **troposphère** où il se produit par **réactions de spallation** entre les particules énergétiques du **rayonnement cosmique** et l'**azote** ou encore l'oxygène de l'air. Compte tenu de leurs sources contrastées (à haute et basse altitude), le couple formé par le ^{7}Be et le ^{210}Pb figure comme un excellent indicateur du mélange vertical dans la troposphère.
Dès leur formation, ces trois radionucléides s'**adsorbent** à des **aérosols** ambiants sub**microniques** avant de se trouver transportés avec eux. En plus du phénomène de décroissance radioactive, les radionucléides subissent différents phénomènes de transport et de mécanismes d'élimination des aérosols :

- le transport **advectif** à grande échelle par circulation générale ;
- le mélange vertical par **convection** ;
- le mélange par diffusion turbulente dans la couche limite atmosphérique (couche sous l'influence directe des processus **terrestres**) ;
- le dépôt sec par gravité (avec éventuelle remise en suspension) ;
- le dépôt humide, appelé aussi lessivage (voir encadré), par incorporation des aérosols dans les gouttelettes d'eau nuageuse. Les modèles numériques 3D de circulation générale, où le transport de ces radionucléides a été introduit, montrent que le dépôt humide élimine 90 % du ^{210}Pb ainsi que 75 % du ^{7}Be produit dans la troposphère. En conséquence, les temps moyens de résidence troposphérique du ^{7}Be et du ^{210}Pb s'évaluent respectivement à 20 et 10 jours.

Modélisation du transport

À l'échelle globale, les chercheurs du Dase ont choisi de modéliser le transport atmosphérique des radionucléides avec le **code LMDZ**. Développé par le Laboratoire de météorologie dynamique de l'université de Paris VI/Pierre et Marie Curie, ce code permet



J.F. Peiou/CEA

Salle informatique du Laboratoire de détection et de géophysique (LDG).

également aux chercheurs du **Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement** (**LSCE**) de modéliser le transport des **gaz à effet de serre**, notamment dans le cadre des études sur le changement **climatique**.

Modèle 3D de circulation générale, le code LMDZ résout les équations primitives **de météorologie** qui sont des **équations** simplifiées **de Navier-Stokes**. La **résolution** choisie par le Dase pour ses **simulations** s'établit à 1,875° en longitude, 1,25° en latitude et 19 couches dans la direction verticale de la surface à 3 **hPa**. La source de ^{210}Pb s'introduit à partir d'un réservoir de sol produisant le **^{222}Rn** au taux fixe de 1 **atome**/cm^2/s sur la terre dans la bande de latitude située entre 60° Nord et 60° Sud et à un taux de 0 au-dessus de l'océan. L'échange de gaz ^{222}Rn entre le sol et la première couche du modèle y sera contrôlé par la turbulence atmosphérique de surface. Quant à la source de ^{7}Be, elle dépend de l'altitude et de la latitude. La quantité totale introduite dans l'atmosphère s'établit à $2{,}3 \cdot 10^{14}$ **Bq**/h dont les deux tiers dans la stratosphère et un dernier tiers dans la haute troposphère.

Pour chacun des aérosols, il faut résoudre une équation de transport. Celle-ci prend en compte les termes de source (incluant la décroissance radioactive), le dépôt (sec et humide), le mélange turbulent dans la couche limite modélisé par une approche de diffusion turbulente. La modélisation du mélange turbulent s'opère ensuite dans la couche limite par une approche de diffusion turbulente. Le dépôt humide introduit dans le modèle se décompose en trois phénomènes :

- le lessivage par des précipitations stratiformes et convectives (responsable pour environ 85 % du dépôt total) ;
- le lessivage dans les mouvements ascendants convectifs ;
- le lessivage sous le nuage et la ré-évaporation.

Le lessivage dans les colonnes ascendantes convectives, où 50 % des aérosols sont éliminés, bien que très efficace, entraîne la sous-estimation globale des concentrations de ^{210}Pb : d'où son absence dans les résultats présentés ici.

Performance du modèle global

Les cartes de concentrations de ^{210}Pb et de ^{7}Be montrent que ces deux radionucléides couvrent l'ensemble de la planète, ce qui justifie leur transport à l'échelle globale dans un **modèle eulérien** défini par un **maillage** fixe. Les concentrations de ces deux radionucléides, en surface, ont été calculées pendant les mois de janvier et juillet 2004 (figures 2a et 2b). Les plus faibles concentrations de ^{210}Pb se situent sur les océans de l'hémisphère Sud et les plus fortes sur les continents, les régions arides notamment. En janvier, le modèle parvient à reproduire les concentrations élevées de ^{210}Pb transporté d'Asie vers les régions polaires. Ce phénomène, produit par le déplacement vers le sud du front polaire, permet aux aérosols eurasiens d'atteindre l'Arctique

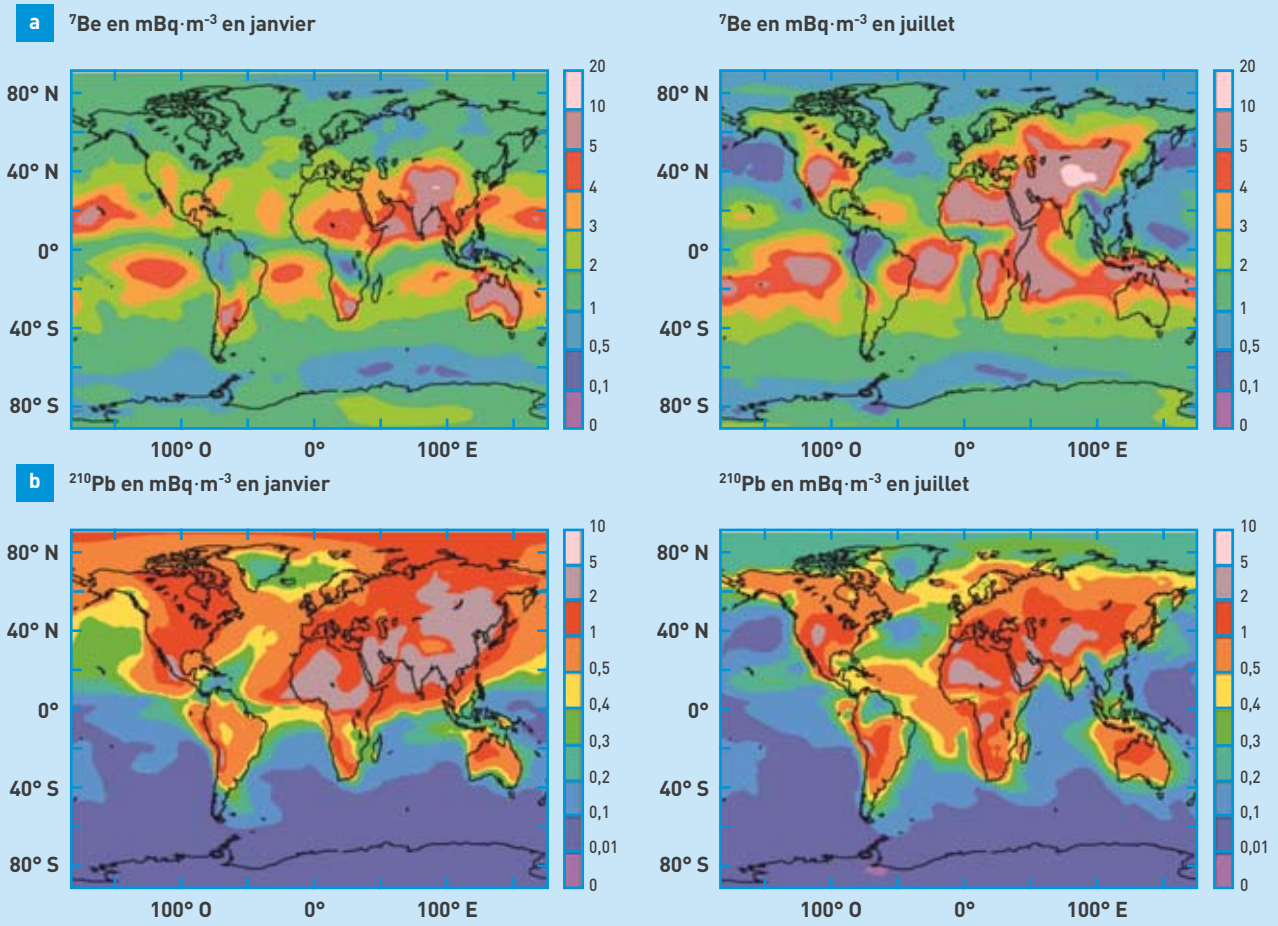


Figure 2. Simulation des concentrations moyennes (en mBq·m^{-3}), en surface, de ^{7}Be et ^{210}Pb, sur un mois.

puis le nord de l'Amérique au cours d'un trajet dans la couche limite où ne se produisent que peu de précipitations. En été, sur l'Asie du Sud-Est, le phénomène de **mousson** donne des concentrations beaucoup plus faibles qu'en hiver.
Les plus fortes concentrations de ^{7}Be s'observent dans les régions sèches subtropicales de subsidence ainsi que sur des hauts plateaux (Tibet, Groenland, Antarctique). Les plus faibles se situent aux latitudes moyennes soumises aux pluies stratiformes, particulièrement dans l'hémisphère Sud. Sur les quatre cartes, apparaît également la **zone de convergence intertropicale** (**ZCIT**) au niveau de l'Équateur (figure 2). Il s'agit de la région où les alizés des deux hémisphères, chargés en humidité, convergent et soulèvent l'air équatorial par convection humide jusqu'à des altitudes très élevées. La zone de convergence intertropicale (ZCIT), fortement déficitaire en ^{7}Be, en raison du lessivage par des cumulonimbus, se déplace vers le nord, en été, ce que le modèle reproduit. De part et d'autre de cet "équateur météorologique", les concentrations de ^{210}Pb s'avèrent plus élevées. Ainsi, comme pour les particules minérales du Sahara, les alizés transportent le nuage de ^{210}Pb issu de l'Afrique du Nord jusqu'en mer des Caraïbes en été.

Analyse des concentrations pour trois stations du réseau

Les concentrations des radionucléides et leur modélisation permettent d'étudier des phénomènes atmosphériques propres à chacune des stations. Trois stations du réseau, celles de Tahiti, Perth et Oulan-Bator présentent des régimes très contrastés.

Analyse des signaux à l'échelle du mois

Située en Mongolie, à une altitude de 1 700 m, la station continentale d'Oulan-Bator enregistre des concentrations élevées de ^{210}Pb, comprises entre 0,5 mBq/m^3, en été, et 1,5 mBq/m^3, en hiver. En revanche, la station maritime de Tahiti, isolée de tout continent, mesure de faibles concentrations de ^{210}Pb : autour de 0,1 mBq/m^3. Enfin, la station côtière de Perth, au sud-ouest de l'Australie, relève des niveaux intermédiaires variant de 0,1 à 0,75 mBq/m^3. En raison de leur origine, les concentrations de ^{7}Be mesurées aux trois stations demeurent proches les unes des autres avec des valeurs moyennes annuelles de 5, de 2,7 et de 3,4 mBq/m^3. La concentration élevée notée en Mongolie procède à la fois de son altitude et de la convection sèche au-dessus des continents.
Les variations saisonnières s'avèrent particulièrement visibles à la station de Mongolie, caractéristique des stations continentales aux latitudes moyennes. En été, le mélange convectif conduit à des concentrations faibles de ^{210}Pb et à des concentrations fortes de ^{7}Be. En revanche, en hiver, la stratification de la basse troposphère produit inversement des concentrations fortes de ^{210}Pb. À Tahiti, on observe une légère hausse des concentrations pendant l'hiver austral, liée au déplacement de la ZCIT vers le nord ainsi qu'à une baisse des précipitations dans l'hémisphère Sud. À Perth, la saisonnalité des précipitations conduit à des fortes concentrations de ^{210}Pb et de ^{7}Be pour l'été et à des basses valeurs lors de l'hiver austral.
Le modèle reproduit approximativement la saisonnalité à Perth et Tahiti pour les deux radionucléides et à Oulan-Bator pour le ^{7}Be. Dans cette station, les concentrations calculées de ^{210}Pb ont été surestimées d'un facteur 2, en été (figure 3a). Au cours de cette période, la comparaison des rapports calculés et mesurés ^{7}Be/^{210}Pb montre un mélange vertical insuffisamment développé dans le modèle. Ce biais, que l'on retrouve pour les stations en montagne, vient également des précipitations **orographiques** non reproduites à l'échelle du modèle.

Analyse des signaux à l'échelle de la journée

Pour les trois stations, les périodes de signaux temporels varient entre cinq et dix jours. Les variations journalières sont reproduites par le modèle de façon satisfaisante à Perth, dans une moindre mesure à Oulan-Bator et médiocrement à Tahiti (figure 3). Malgré la différence d'origine du ^{210}Pb et du ^{7}Be, on observe une corrélation dans les mesures, comme dans les calculs, entre les signaux journaliers des deux radionucléides : la plupart des pics de ^{7}Be et ^{210}Pb se produisent simultanément. Confirmée par l'analyse des mesures de ^{212}Pb, cette corrélation a pu s'observer dans la plupart des stations. Elle s'explique par l'importance de phénomènes locaux à l'origine de la faible corrélation des signaux avec la direction ou l'intensité des vents zonaux, mais aussi de la forte corrélation avec la température, l'humidité ou les variations de pression.

- La station d'Oulan-Bator

Une étude de sensibilité montre que l'ajout du lessivage dans les mouvements ascendants convectifs réduit significativement les concentrations de ^{210}Pb en été, lesquelles deviennent très proches de celles observées. Néanmoins, cette "paramétrisation" conduit à sous-estimer le niveau moyen annuel de ^{210}Pb et de ^{7}Be, confirmant ainsi l'aspect local des précipitations liées à l'orographie.

- La station de Tahiti

En raison de la résolution grossière du modèle, la cellule incluant l'île de Tahiti est considérée comme appartenant à l'océan et les variations diurnes de la hauteur de couche limite (autour de 1 000 m) sont négligées. Cette approximation explique en partie les différences de phase observées. Les cartes de concentration dans le Pacifique Sud montrent que le ^{210}Pb se trouve arraché au continent Sud-américain par l'**anticyclone** de l'île de Pâques qui transporte une partie du ^{210}Pb dans le Sud du Pacifique, le reste étant lessivé par la ZCIT. À Tahiti, les pics de concentrations de ^{210}Pb se produisent par des vents de Nord générés par le repli de l'anticyclone.

- La station de Perth

Comme pour toutes les stations côtières, les résultats obtenus sont généralement plus favorables. Les pics de ^{210}Pb se corrèlent aux changements de direction des vents lorsque ces derniers de maritimes, deviennent continentaux. Le biais entre les amplitudes mesurées et calculées provient du calcul des hauteurs de couche limite dans laquelle s'effectue un mélange très efficace.
Les concentrations des trois radionucléides naturels sont calculées, quotidiennement, par le modèle de circulation générale LMDZ, ce qui permet d'évaluer

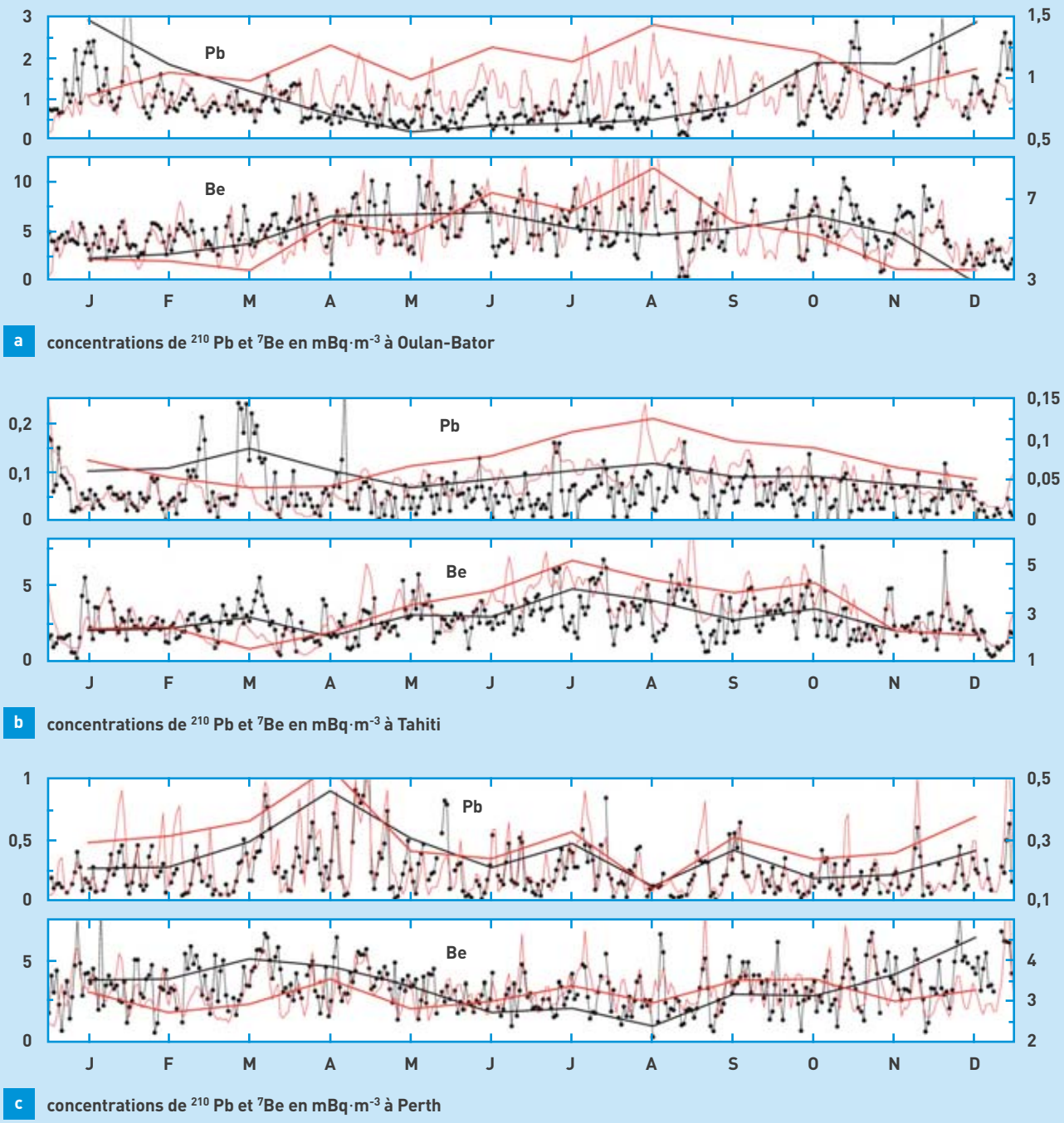


Figure 3.
Concentrations (en mBq·m^{-3}) journalières pour l'année 2004, mesurées (en noir avec points) et simulées (en rouge) de ^{210}Pb et ^{7}Be pour trois sites : Oulan-Bator (a), Tahiti (b) et Perth (c). Les signaux moyennés sur un mois sont également représentés (lignes noires pour les mesures et rouges pour les simulations) avec une échelle différente à droite en mBq·m^{-3}.

le couplage des stations avec la circulation générale. Les résultats obtenus contribuent également à une meilleure "paramétrisation" de la physique du modèle. Pour certaines stations, des études de sensibilité montrent des résultats fortement liés aux coefficients empiriques de lessivage pour lesquels les mesures de particules sont pertinentes. La principale limitation du modèle concerne la résolution horizontale, limitée aujourd'hui à un "pas de grille" de 100 km. L'étape suivante consiste à simuler les phénomènes atmosphériques locaux, par l'intermédiaire de modèles à **méso-échelle** dont la résolution avoisine le kilomètre. À cette échelle, le transport atmosphérique se valide notamment par les mesures de concentrations de ^{212}Pb, dont la source ne peut être que locale. Au niveau des stations du Tice, une modélisation précise du transport s'avère également utile dans l'autre cadre des mesures de flux des gaz à effet de serre. À long terme, le réseau de stations "radionucléides" pourrait être équipé de capteurs CO_2.

> **Philippe Heinrich** et **Yves Grillon**
Département analyse, surveillance, environnement (Dase)
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France

La **pollution** atmosphérique particulaire sous la **surveillance du lidar**

La technique du lidar, telle qu'elle a été adaptée par des chercheurs du CEA et du CNRS, constitue un outil de choix pour le contrôle de la pollution de l'atmosphère par des particules. L'émission d'un faisceau laser vers la zone à étudier puis l'analyse de sa rétrodiffusion par les molécules et les particules permet d'en déterminer la densité, la localisation et même la nature ou la géométrie.

CEA/DR

Survol de Niamey en ULM.

Le lidar **aérosol ultraviolet** aéroporté (Lauva) désigne un système *Light Detection and Ranging* (lidar) conçu conjointement par le **CNRS** et le CEA. Finalisé, en 2004, cet instrument a pour mission d'étudier et de suivre l'évolution de la qualité de l'air. Le terme "aéroporté" a été ajouté au sigle, en raison de la compacité du système et donc de son adaptation à l'embarquement à bord de petits aéronefs. La société **Leosphere** (1) en assure la commercialisation sous le nom d'Ez-lidar® avec une licence du CEA et du CNRS. Conforme aux normes de sécurité oculaire, il peut s'utiliser sans risque dans les régions habitées.

Contexte sociétal

Le système lidar Lauva a été initialement développé pour répondre à des problématiques scientifiques d'actualité liées à l'impact environnemental des particules émises dans l'**atmosphère** du fait des activités humaines.

En effet, les particules anthropiques peuvent polluer notre environnement de trois manières différentes. D'abord par leur action sur la santé des populations en induisant des insuffisances respiratoires voire des pathologies cardiovasculaires. Parmi les groupes de population les plus sensibles et donc les plus menacés figurent les jeunes enfants, les personnes asthmatiques et naturellement les personnes âgées. Ensuite, les particules anthropiques interagissent avec le rayonnement solaire en diminuant la visibilité et en modifiant l'équilibre énergétique du système couplé **Terre**-atmosphère. Cette interaction, si elle conduit à un refroidissement de la surface et va dans le sens inverse de l'impact **climatique** des **gaz à effet de serre**, induit aussi et simultanément un réchauffement de la couche d'atmosphère où nous vivons. Le refroidissement de la surface se trouve accentué par le rôle que les particules anthropiques jouent dans la formation

(1) Pour en savoir plus sur cette société : www.leosphere.com

des nuages. En provoquant une diminution de la taille des gouttelettes d'eau, ces particules accentuent l'efficacité avec laquelle les nuages vont renvoyer la lumière du Soleil vers l'espace ainsi que la durée de vie des nuages dans l'atmosphère. Enfin, les particules anthropiques entraînent également une modification du cycle de l'eau et des ressources en eau potable de certaines régions du globe, notamment les régions sahéliennes. Elles proviennent alors de la destruction intensive de la savane et de la forêt tropicale par le feu (par exemple, pour l'écobuage).
Pour comprendre et prévoir toutes les implications environnementales des particules anthropiques, les mesures en surface demeurent insuffisantes. D'où l'impératif de connaître leur répartition verticale ainsi que l'évolution temporelle de cette dernière. Par exemple, les concentrations rencontrées en un lieu donné d'une ville ne se trouvent pas seulement dépendantes des émissions locales car les polluants peuvent être transportés en altitude et redistribués en surface.

CEA/DR

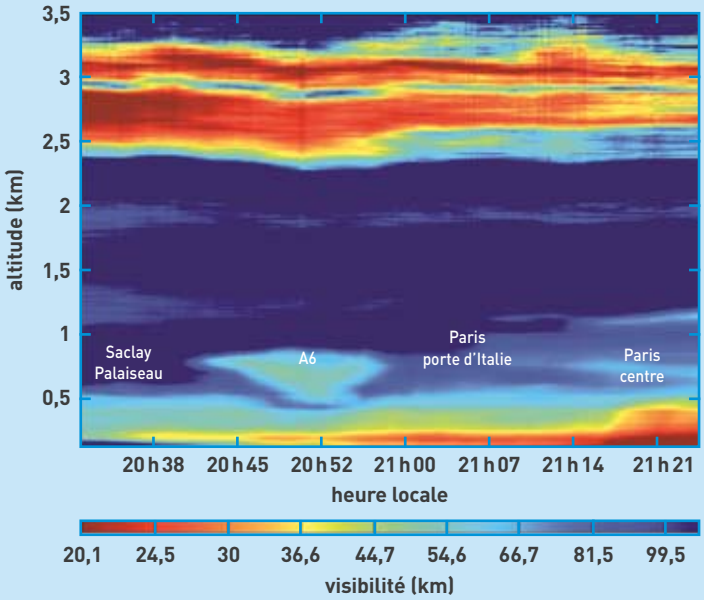


Figure 1.
Système lidar prototype développé par le CEA et le CNRS embarqué dans une voiture de service du CEA pour l'étude de la qualité de l'air sur Paris. Des mesures ont été effectuées entre la banlieue Sud (Saclay) et le centre de Paris. Un exemple est donné ici pour la visibilité déduite de l'observation lidar.

Dans les agglomérations occidentales, la norme sanitaire pour la pollution particulaire s'établit à partir des mesures, effectuées en surface, de la concentration massique (dite PM10) pour les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 **µm**. Ces particules sont susceptibles de pénétrer dans notre système respiratoire, et cela plus profondément pour celles inférieures à 2,5 µm (PM2,5) et même 1 µm (PM1). Depuis 1999, une directive européenne (2) a fixé les seuils de polluants particulaires présents à la surface : elle a été renforcée depuis les récents événements de pollution particulaire associés aux périodes de canicule. Ceci a conduit la France à élaborer une circulaire, en date du 12 octobre 2007, relative à l'information du public sur les particules en suspension dans l'air ambiant. Cette information intervient dès le dépassement, en moyenne journalière, du seuil de 80 **µg**/m^3.
Le système lidar, développé par le CEA et le CNRS, permet de connaître la répartition verticale des polluants particulaires avec une **résolution** de 1,5 m entre la surface et la **tropopause** (vers 10-12 km d'altitude). La longueur d'onde utilisée, de 355 **nm**, est sensible aux particules sub**micronniques** (PM1) qui composent pour plus de 99 % les aérosols de pollution.

La surveillance de la qualité de l'air des mégalopoles

En mai 2005, les premiers tests du système ont été effectués à l'occasion du programme lidar pour la surveillance de l'air (Lisair) soutenu par la mairie de Paris. Deux systèmes lidar, couplés à l'observation *in situ*, furent utilisés pour cette étude : le premier situé sur l'esplanade de l'Hôtel de Ville en station fixe et le

(2) Directive n° 1999/30/CE du 22 avril 1999.

CEA/DR

Système Lauva au sol installé sur le parvis de l'hôtel de ville de Paris.

CEA/DR

Pollution sur Paris.

second embarqué à bord d'une voiture de service du CEA (figure 1). Cette approche expérimentale a permis de caractériser les particules de pollution émises par la circulation automobile, *via* leur taille, leur composition chimique et leurs propriétés optiques. Leur évolution dans la colonne d'air a été suivie à la fois dans l'espace et le temps. Ce fut le cas, notamment, le 26 mai 2005, avec des mesures réalisées au centre de Paris et dans la banlieue Sud (Saclay). La capitale se trouvait alors exposée à des masses d'air chargées en particules provenant des feux de forêts sévissant en Espagne et au Portugal et dont le panache s'éleva jusqu'à 2,5 et même 3,5 km d'altitude. En dessous de 1 km, la pollution locale est apparue avec des visibilités plus faibles vers le centre de Paris. Des mesures ayant été effectuées en soirée, la création d'une couche réservoir de polluants fut mise en évidence au-dessus de l'autoroute A6, entre 0,5 et 1 km. Cette couche réservoir aurait pu être transportée au-dessus d'autres régions ou se déverser le matin sur Paris en cas de vent faible, comme cela a été le cas. Plus tard dans la soirée, la qualité de l'air sur Paris fut influencée par les particules de feux dont certaines atteindront la rue.

Suite à la campagne Lisair, la société Leosphere et le CEA ont initié leurs premiers contacts avec la Chine pour valoriser le système lidar à l'international. Une première démonstration a été réalisée sur le toit de l'**Institut de physique atmosphérique de Pékin** (figure 2). En surface, la visibilité y est, en moyenne,

CEA/DR

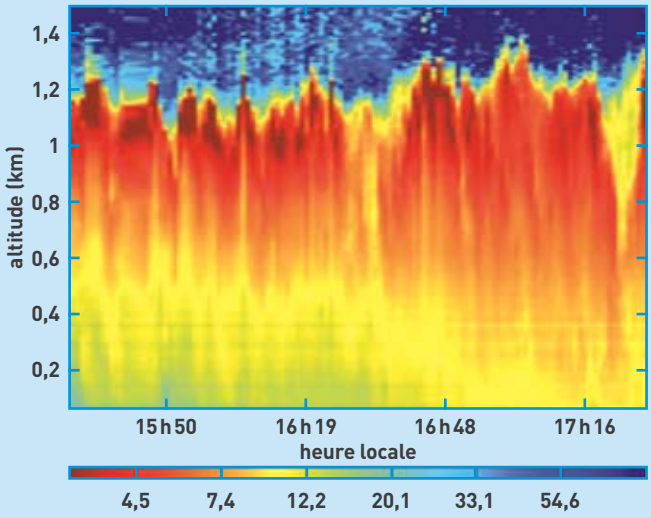


Figure 2.
Système lidar sur le toit de l'École polytechnique de Pékin. Les mesures de visibilité déduite de l'observation lidar sont données à droite.

CEA/DR

Système lidar embarqué sur un ULM durant la campagne internationale nommée Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine (AMMA).

deux fois plus faible qu'à Paris. Celle-ci diminue avec l'altitude jusqu'au sommet de la couche limite planétaire. Cette diminution ne provient pas de la présence plus importante de polluants en altitude. Elle découle de la propriété des particules de pollutions qui peuvent permettre la condensation de vapeur d'eau quand les masses d'air sont humides, un cas fréquent à Pékin. La prudence exige donc de prendre garde aux impressions visuelles pour juger de la pollution car, un ciel "laiteux" ne signifie pas forcément une pollution accrue. Néanmoins, il demeure possible d'affirmer, sans risque, que l'air de Pékin s'avère plus pollué que celui de Paris. À ceci près que Paris et sa banlieue ne comptent qu'environ 12 millions d'habitants contre 17 millions pour la grande mégapole chinoise.

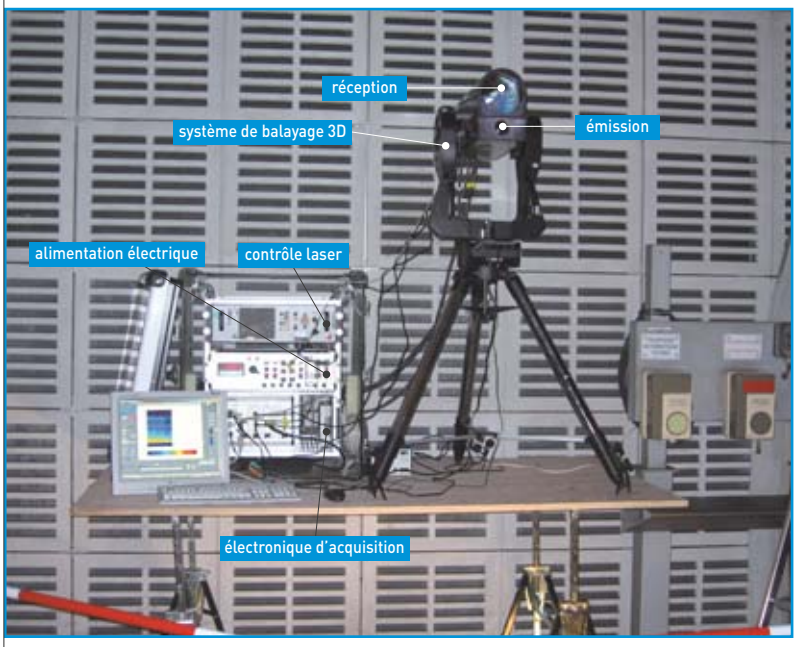


Figure 3.
Système lidar en fonctionnement pour des études sur la pollution particulaire en gare souterraine avec la SNCF et la RATP.

Le lidar pour surveiller l'air intérieur

Le système lidar développé par le CEA et le CNRS permet également de surveiller la répartition spatiotemporelle des aérosols dans des milieux confinés comme les gares souterraines de la RATP ou de la SNCF. Une expérience conduite gare du Nord, à Paris, a démontré l'intérêt d'un tel instrument de mesure pour évaluer l'influence du passage des trains et des différents types de trafic sur la qualité de l'air intérieur des gares souterraines (figure 3). Depuis, des développements instrumentaux spécifiques sont envisagés, toujours basés sur la technologie lidar.

Un système embarqué pour la surveillance du climat

En janvier 2006, le système lidar a été embarqué à bord d'un ULM pour survoler la région sahélienne, entre Niamey (Niger) et la frontière du Bénin, afin de mesurer la répartition verticale des particules

CEA/DR

Lancement du prototype ballon du lidar développé par le CEA et le CNRS sur la base Cnes d'Aire-sur-l'Adour, en mai 2007.

désertiques et des feux de **biomasse**. En effet, la superposition de ces différentes couches influence fortement l'équilibre énergétique de cette région et donc le cycle de l'eau et les mécanismes de la **mousson**. Grâce au système lidar embarqué, le transport en altitude des aérosols de feux de biomasse au-dessus du Niger a pu être mis en évidence. Associés aux aérosols désertiques, leur forte capacité à absorber le rayonnement du Soleil et donc à réchauffer l'atmosphère (~ 2 K/jour) tout en créant un déficit énergétique à la surface (~ -20 $W \cdot m^{-2}$) a été démontrée.

Une application pour l'échelle globale

Des applications pionnières sont nées avec l'arrivé de la nouvelle génération d'instruments spatiaux en orbite autour de la Terre. Il sera désormais possible de suivre l'évolution de certains polluants à l'échelle de la planète grâce à l'observation spatiale. Par exemple, le contenu en **ozone** de la **troposphère** est accessible à partir de l'espace. Néanmoins, il demeure difficile d'accéder aux basses couches, "celles où nous vivons". D'où, l'idée de coupler un système lidar à de nouveaux instruments d'observation comme l'Interféromètre atmosphérique de sondage infrarouge (IASI), actuellement en orbite à bord du **satellite européen MetOp**. Avec le soutien du **Centre national d'études spatiales** (**Cnes**), un nouveau prototype lidar a été développé. Il peut voler jusqu'à 35 km d'altitude pour étudier la faisabilité de cette nouvelle configuration instrumentale. Effectués, en mai 2007, sur la base d'Aire-sur-l'Adour du Cnes, les premiers essais ont été un succès.

La qualité de l'air durant les Jeux olympiques 2008

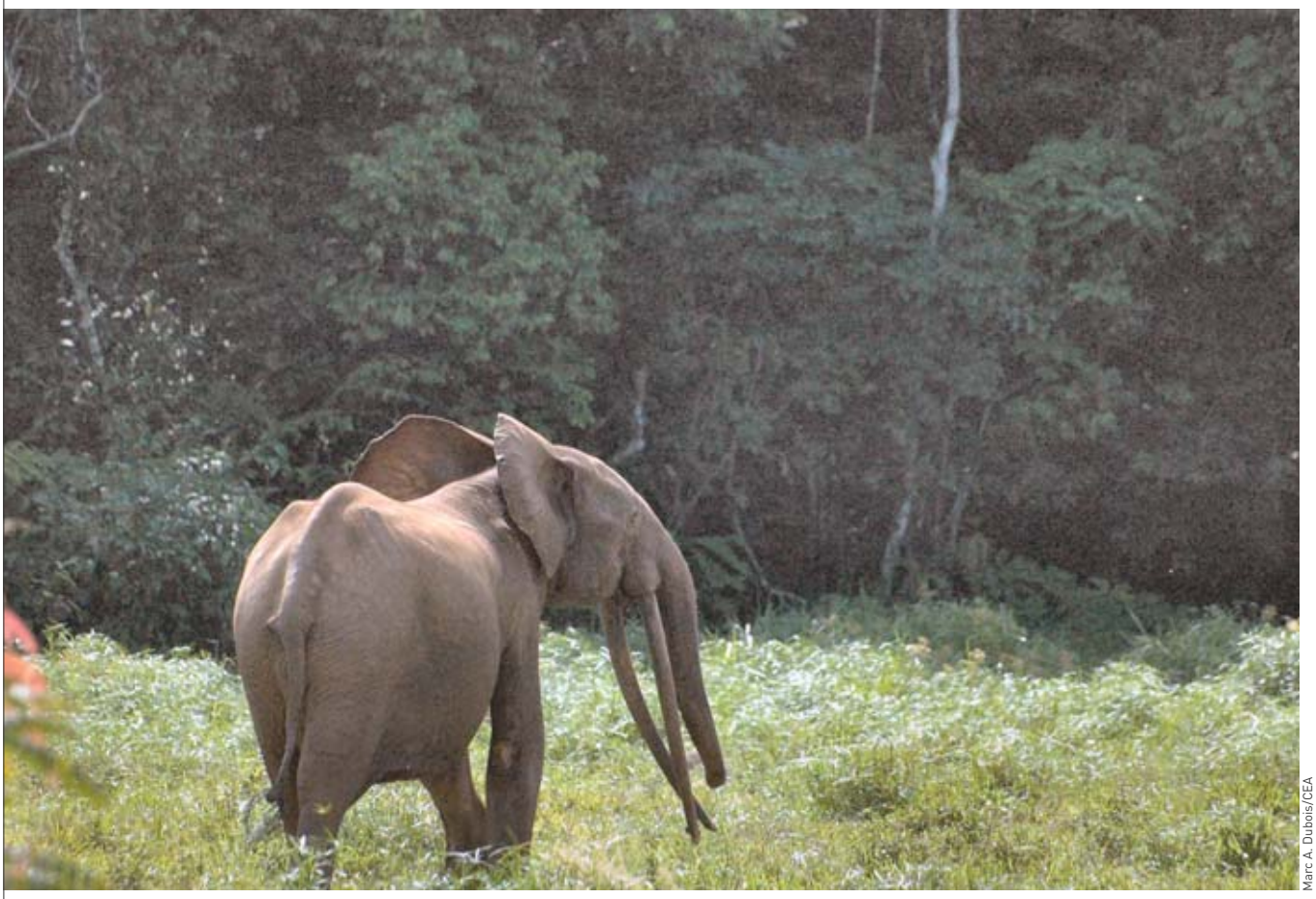
Après la démonstration réalisée à Pékin, la société Leosphere a développé une collaboration plus approfondie avec la Chine. Celle-ci s'est d'abord concrétisée par la vente de deux systèmes commerciaux du lidar. Ces instruments ont été implantés dans la capitale chinoise pour surveiller la qualité de l'air durant les Jeux olympiques de 2008. Ensuite, une coopération a été instaurée avec l'**Institut de physique atmosphérique de Pékin** et le **Centre de surveillance de la qualité de l'air** de cette ville. À la suite de quoi, il a été procédé à l'intégration des données lidar dans le système de **modélisation** de la qualité de l'air, opérationnel pendant les Jeux olympiques. Avec trois cents associations spécialisées dans la qualité de l'air, la Chine offre un vrai potentiel pour le système lidar développé par le CEA et le CNRS. C'est la société Leosphere qui a su conduire cette valorisation au niveau international. D'ores et déjà, des systèmes lidar ont été commercialisés en Angleterre, aux États-Unis, aux Pays-Bas, en Chine, au Japon et bien sûr en France pour équiper **Météo France**.

> Patrick Chazette
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)

Cet article est dédié à Pierre Couvert qui a joué un rôle majeur dans la mise en opération du système Lauva par ses qualités scientifiques et humaines. Aujourd'hui disparu, la photo de la page 76 le montrant entouré de ses étudiants le rappelle à notre souvenir.

Les **systèmes écologiques** en tant que **systèmes complexes**

La physique, notamment la physique statistique et la physique de la complexité, offre désormais les outils indispensables pour comprendre les phénomènes en jeu sur la planète et, à terme, pour aider à mieux la gérer. Cette démarche explique l'implication de chercheurs du CEA dans l'étude de problématiques écologiques et épidémiologiques.



Marc A. Dubois/CEA

Éléphant de forêt (sous-espèce de l'éléphant d'Afrique) en lisière de forêt-savane (République centrafricaine).

On pense souvent que la physique ne s'intéresse qu'à l'inanimé : de l'infiniment petit de la physique des particules à l'infiniment grand de l'astronomie et de la **cosmologie**, en passant par les **nanotechnologies**, le magnétisme et la **thermodynamique**… Pourtant, à son commencement, la physique englobait dans son étude l'ensemble du réel, autrement dit la nature. En effet, le terme français "physique" nous vient du grec φύομαι que l'on peut traduire par l'expression : "j'apparais et grandis spontanément", sous-entendu comme une cellule ou une plante et donc comme un organisme vivant. Ainsi, à l'origine, la physique (φυσικη επιστημη) est bien la science de la nature et porte sur l'ensemble du réel… Au-delà, commence le domaine de la **métaphysique**. Ce n'est que parce que la méthode réductionniste a permis en premier aux sciences dites "dures" d'obtenir des résultats sous forme de lois et d'équations que les sciences du vivant ont quitté le champ de la physique dans son acception actuelle. Aujourd'hui, le mouvement tend à s'inverser.

La physique et le vivant

Les progrès récents des outils théoriques et des méthodes de mesure dans les sciences du vivant font qu'elles se trouvent à nouveau à l'étude dans le champ de la physique. Friedrich Hayek(1), fut l'un des premiers à introduire le concept de complexité dans les sciences. Véritable pionnier, il a distingué la possibilité de prévoir le comportement de systèmes simples avec des lois de celle de prévoir le compor-

(1) Hayek (Friedrich-August von), philosophe et économiste de l'École autrichienne (1899-1992). Promoteur du libéralisme, il s'est intéressé à divers champs de la connaissance humaine comme l'économie, le droit, la psychologie, la philosophie ou les sciences politiques. En 1974, il a reçu le prix Nobel d'économie pour ses travaux sur la théorie de la conjoncture.

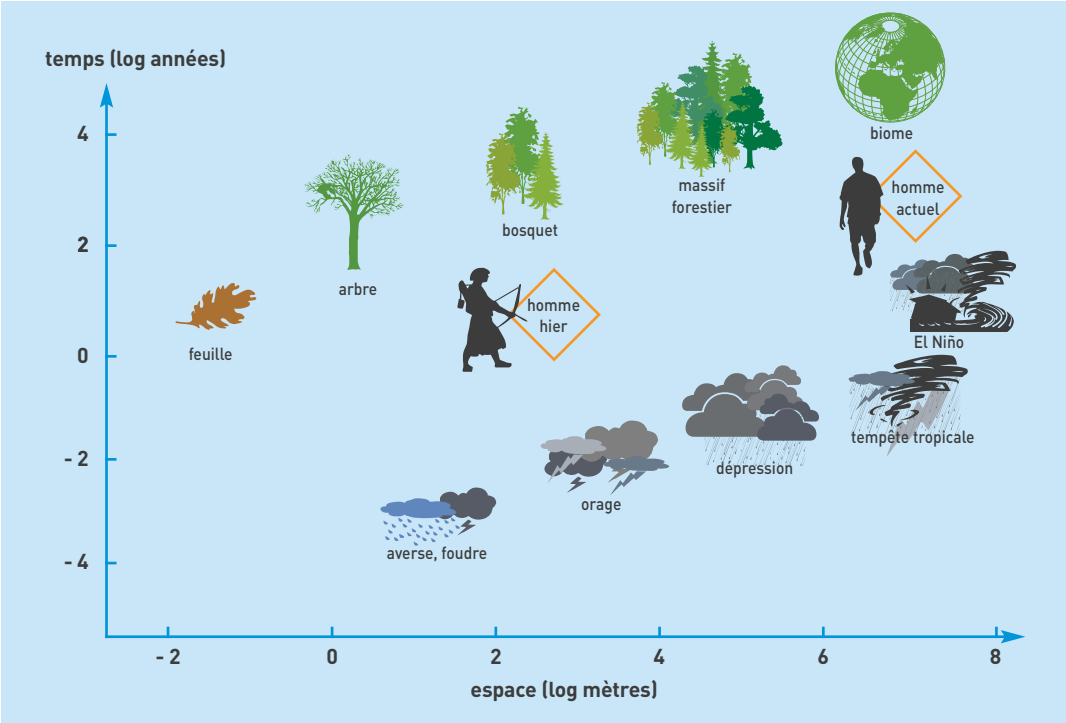


Figure 1.
Quelques échelles spatio-temporelles caractéristiques de systèmes vivants (ici : forêt) et de perturbations climatiques : les deux losanges indiquant les emprises spatiales et temporelles de l'homme préindustriel et de l'homme actuel respectivement.

tement de **systèmes complexes** avec des **modèles**, et cela pour l'économie, la biologie, la psychologie… En effet, ces systèmes font intervenir trop d'acteurs et de relations pour qu'il soit aisé de trouver une loi, c'est-à-dire une équation capable de relier un petit nombre de variables : il faut utiliser un grand nombre d'équations pour former un modèle. Ces équations, constitutives du modèle, ne peuvent évidemment pas se résoudre "à la main". L'arrivée des ordinateurs, puis des supercalculateurs actuels, a permis de calculer l'évolution temporelle de ces systèmes d'équations, sans lesquels il n'y aurait jamais eu de **climatologie** prédictive ; et il en va de même pour les **systèmes écologiques**. Cette approche "systèmes complexes" concerne maintenant l'écologie, les neurosciences, les sciences sociales, la **météorologie** et la climatologie, la chimie, l'informatique, la psychologie, la science de l'évolution, l'économie, la prédiction des tremblements de terre, l'**épidémiologie**, les systèmes de **réaction-diffusion**, la **biologie moléculaire**, la régulation du trafic…

L'homme et l'environnement

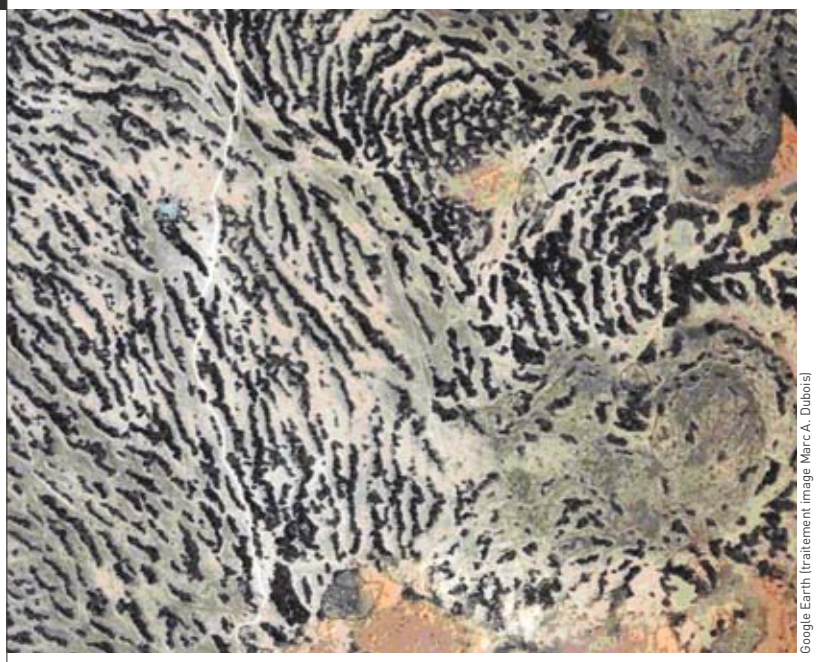
Mais alors que l'homme peut enfin commencer à étudier les **écosystèmes** et le **climat** avec les outils de la physique, l'impact de ses activités sur la planète vient lui poser, simultanément et avec vigueur (est-ce une coïncidence ?) des problèmes de survie à moyen terme. Nous ne nous trouvons donc plus dans la situation où découvrir et cataloguer suffisent puisque aujourd'hui, les espèces animales et végétales disparaissent à un rythme effroyable. Les raisons en sont l'emprise croissante de l'homme sur les écosystèmes ainsi que les changements climatiques d'origine anthropique. Le devoir des scientifiques consiste donc, non seulement à comprendre le fonctionnement des écosystèmes mais aussi – grâce à cette compréhension – à chercher à mieux les gérer (en les conservant ou en les adaptant) afin de maintenir l'équilibre d'une planète supportant de plus en plus mal l'empreinte écologique de la population humaine.

En s'inspirant du type de représentation introduit par Crawford S. Holling, en 1986 (2), on peut montrer quelques éléments écologiques et climatiques dans un diagramme temps-espace : de la feuille au **biome** et de l'averse aux changements climatiques de grande période (figure 1). Mais il faut également imaginer l'emprise de l'homme dans ce diagramme car, il y a 10 000 ans, vivaient environ 6 à 7 millions d'êtres humains contre 6 ou 7 milliards aujourd'hui, soit mille fois plus. À cette époque reculée les hommes étaient chasseurs-cueilleurs et leur action se situait au niveau de la feuille, tout au plus de l'arbre. À l'heure actuelle, les humains défrichent environ 300 km^2 de forêt tropicale chaque jour. Plus grave encore, les bouleversements apportés par l'homme au climat dépasseront, en moins de 100 ans, ce qui mettait des millénaires à se produire. Si, autrefois, la **biosphère** a pu réagir aux changements climatiques du passé grâce à l'évolution génétique, désormais, la rapidité des mutations s'avère telle que, ni les adaptations naturelles ni les migrations d'écosystèmes végétaux dans les gradients de température et d'**hygrométrie**, ne disposeront d'assez de temps pour se produire.

"Top-down" et "bottom-up"

En matière d'écologie, de nombreux exemples montrent qu'idées et modèles théoriques furent souvent élaborés avant même qu'une application soit envisagée. C'est notamment le cas avec plusieurs problèmes de **morphogenèse** pour lesquels les

(2) Holling (Crawford S.), 1986 : "The resilience of terrestrial ecosystems ; local surprise and global change", in W. C. Clark and R.E. Munn (eds.), *Sustainable Development of the Biosphere*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. Chap. 10 : 292-317.



Google Earth (traitement image Marc A. Dubois)

Brousse tigrée.

équations de réaction-diffusion et les automates cellulaires [3] furent utilisés pour expliquer les motifs du pelage des animaux, des coquillages ou bien encore des "brousses tigrées" au Niger et ailleurs. C'est aussi le cas des travaux sur les comportements collectifs où l'application aux vols d'étourneaux ou aux bancs de poissons s'avère postérieure aux travaux théoriques. Dans cette hypothèse, les chercheurs parlent d'une approche *top-down*, allant de l'abstrait vers le concret. Mais le plus souvent, la question se pose préalablement car il n'existe pas de théorie ni de modèle tout prêt pour y répondre : il faut cerner précisément la problématique avant de procéder au choix des outils de **modélisation**. L'approche s'opère alors *bottom-up* autrement dit du concret vers la formalisation abstraite. Bien entendu, une fois le but atteint, le physicien ayant bâti le modèle demeure en droit d'y chercher des régularités et des généralisations qui pourront rapprocher le système complexe écologique étudié de systèmes physiques plus traditionnels (voir encadré).

Bien poser une question

Le but visé ne consiste pas à chercher un modèle global des écosystèmes, les questions à résoudre étant pratiques et urgentes : comment comprendre et préserver tel type d'écosystème ? Comment sauver ce qui peut encore l'être ? Comment utiliser l'espace disponible et le vivant qui y subsiste au mieux, dans un endroit et un contexte précis ? Quand la demande a été bien définie, il faut alors rassembler des spécialistes de disciplines différentes (écologistes, botanistes, géologues, géographes, sociologues…) pour animer une discussion où seront définis les acteurs essentiels et les relations qu'ils ont entre eux. Par exemple, cette demande peut porter sur la gestion du stock piscicole dans un bassin versant où l'on construit un barrage, sur la lutte contre la désertification dans une zone aride sur-pâturée, sur la lutte contre l'érosion dans des zones déboisées, sur la définition des règles de chasse pour maintenir la ressource dans des pays où la "viande de brousse" figure parmi les éléments économiques cruciaux…
Devant ce système souvent très complexe, le modélisateur doit donc chercher, avec les autres scientifiques, à cerner les composantes essentielles et les relations qui les unissent. À ce moment seulement, le choix des outils de modélisation pourra être abordé. Mieux vaut privilégier un modèle, aussi minimaliste que possible, puis comparer ses "sorties" avec les données réelles, et seulement en cas de désaccord, rajouter des composantes au modèle. L'exploration de l'espace des paramètres du modèle va donner une compréhension du fonctionnement de l'écosystème étudié et il sera alors possible de tester des politiques de gestion pour atteindre les objectifs recherchés.

(3) Il s'agit d'une grille régulière de cellules pouvant prendre, à un moment donné, un état parmi un ensemble fini ; c'est un modèle de système dynamique discret mais aussi un modèle de calcul étudié en mathématiques et en informatique théorique.

Les modèles

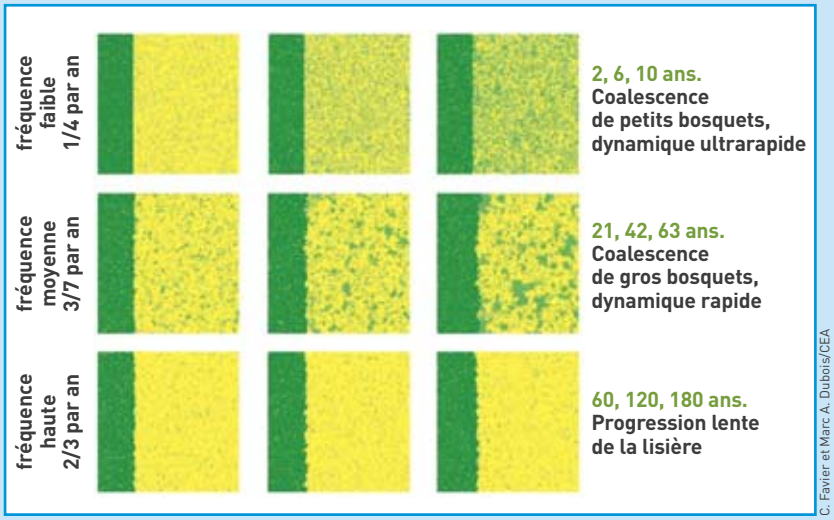
Il n'existe pas d'outil universel capable de modéliser des systèmes complexes en écologie. Seule la problématique posée conduit au choix de la méthode. Par exemple, une **analyse statistique en composantes principales** (**ACP**), prise isolément, est un modèle descriptif, qui peut suggérer des mécanismes sous-jacents. En combinant une analyse en composantes principales avec des méthodes de **régression** (linéaire ou non, simple ou multiple), on peut alors construire des modèles prédictifs opérationnels, du moins tant que le champ des paramètres s'avère bien couvert par les données acquises.
Les fourchettes larges – avec plus de trois ordres de grandeur entre les prédictions initiales "haute" et "basse" des victimes de la maladie dite de "la vache folle" – ont montré les limites de ces méthodes. Les modèles à base de réseaux de neurones artificiels sont naturellement à visée prédictive. Leur capacité de prédiction tient à l'intégration d'un nombre élevé d'observations : ils s'avèrent donc proches des méthodes statistiques traditionnelles. Néanmoins, si les performances de ces modèles dépassent généralement celles-ci, on leur reproche souvent leur côté "boîte noire", autrement dit de ne pas aider à comprendre, même si, de plus en plus, les chercheurs développent des méthodes pour "ouvrir la boîte" et en tirer des suggestions de mécanismes.
Entrent également dans les modèles prédictifs les modèles matriciels élaborés à partir de bases de données en suivi temporel. Là encore, si la base de données s'avère suffisamment complète et si les paramètres extérieurs ne sortent pas trop du champ dans lequel celle-ci a été acquise, leur fonction prédictive est utilisable. Pourtant, les chercheurs ne disposent toujours pas d'explication des phénomènes étudiés. L'approche dite "systèmes complexes" est non seulement prédictive mais également explicative. Elle vise un double objectif : comprendre le phénomène étudié et simuler un système réel en rassemblant des hypothèses sur ses mécanismes élémentaires (le verbe comprendre découlant du terme latin *cum-prehendere* qui signifie "prendre ensemble").
Le choix des outils s'opère dans une vaste panoplie. Ainsi, peut-on décrire la mécanique classique par des

La mosaïque forêt-savane

Il y a environ 6000 ans, une longue période de sécheresse dans le centre-ouest de l'Afrique ouvrait de grandes brèches dans la forêt équatoriale attirant des migrations bantoues dans ces régions où vivaient jusque-là les seules populations pygmées. Bien que cet épisode sec soit achevé depuis fort longtemps, des savanes persistent néanmoins sur de larges régions où le climat humide favoriserait nettement la forêt (voir page suivante : la mosaïque forêt-savane au Cameroun). Contrairement aux régions sub-sahéliennes plus arides et où l'on observe une transition continue entre le désert, la savane et la forêt, les zones plus humides présentent une savane arborée et une forêt claire : la transition forêt-savane est abrupte et avec une lisière bien marquée (voir ci-contre : une lisière au Congo). La persistance de cette mosaïque forêt-savane a longtemps intrigué les naturalistes. Dans un effort conjoint, le programme pluri-institutionnel Ecofit et le Groupement de recherche 489 du **CNRS**, impliquant des écologistes, des botanistes, des **paléo**-écologistes (**palynologues**, **algologues**...), des **pédologues**, des sociologues, des anthropologues et des physiciens du CEA, a permis d'avoir une vue et une compréhension globale de ce phénomène. Il a fallu pour cela un dialogue suivi entre les spécialistes des différentes disciplines pour identifier les facteurs importants, au premier rang desquels figurent la pluviométrie annuelle et la fréquence des feux naturels ou allumés par l'homme ; l'importance des sciences humaines est ici évidente. Il a aussi fallu prendre en compte les différents modes de dispersion des graines, les vents dominants, les hétérogénéités éventuelles du sol... Les deux processus essentiels sont d'abord le cycle herbe/arbres pionniers/forêt jeune/forêt mature puis les incendies de savane ; ils ont alors été implémentés sur un réseau spatialisé avec des **mailles** de 5x5 m, sorte d'"automate cellulaire" généralisé. Pour une pluviométrie donnée, différents modes de conquête de la savane par la forêt en fonction de la fréquence des feux ont été mis en évidence (figure 2). L'exploration de l'espace des paramètres a permis de comprendre l'ensemble des observations et en particulier pourquoi, en zone sèche et en l'absence de feu, on peut avoir une transition continue entre savane et forêt alors qu'en zone humide, ces phases se trouvent disjointes (figure 3). Pour traduire ces connaissances en termes de conseils de gestion du paysage dans les villages, des coopérations ont été établies entre les scientifiques et les responsables locaux. Il s'agit d'une étape cruciale pour que la recherche ne reste pas stérile, mais aussi d'une étape très délicate à mettre en place et à pérenniser. Elle nécessite notamment d'expliquer aux nomades peuls que la pratique consistant à entailler et rabattre les acacias pour faire paître leurs troupeaux aboutira à une désertification des zones qu'ils fréquentent.

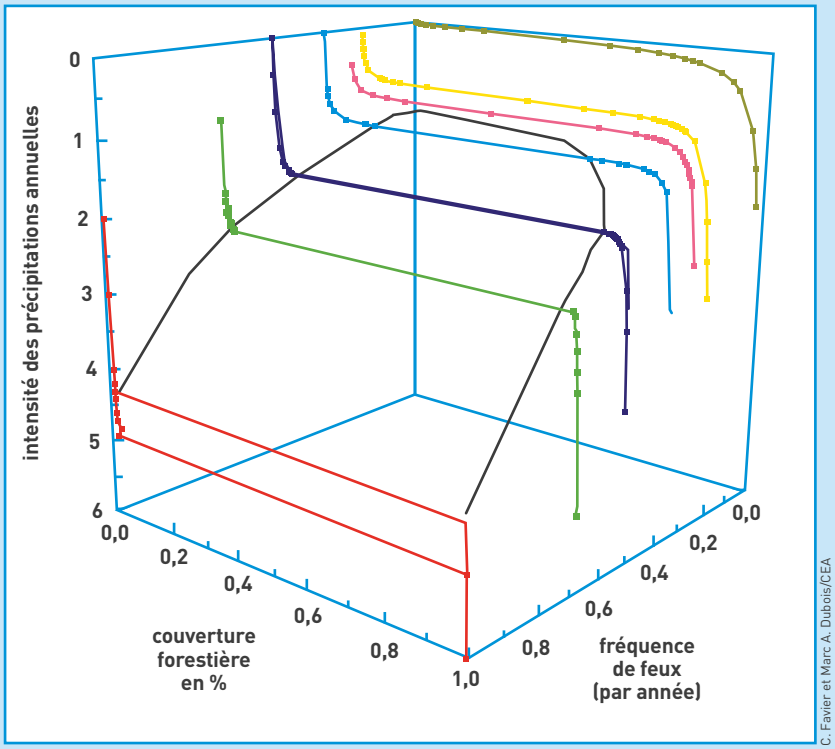
Marc A. Dubois/CEA

Une lisière au Congo.



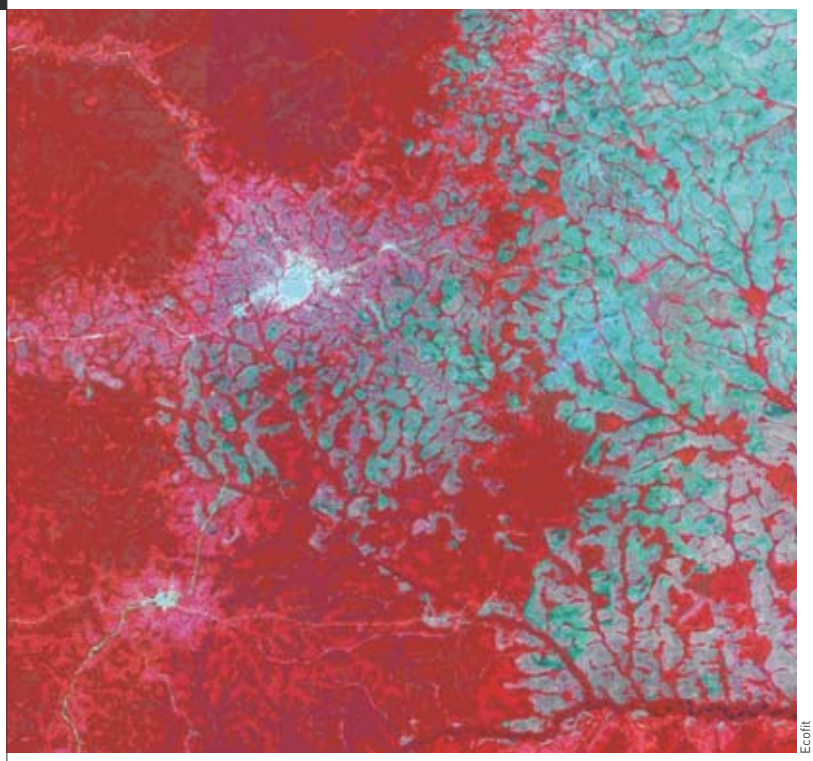
C. Favier et Marc A. Dubois/CEA

Figure 2.
Les sorties d'un **modèle**.



C. Favier et Marc A. Dubois/CEA

Figure 3.
Transition de phases.



Ecofit

La mosaïque forêt-savane au Cameroun.

équations différentielles dans un espace continu et avec des vitesses ainsi qu'un temps continu (systèmes dynamiques totalement continus). À l'opposé, il est possible de définir un système avec des variables d'état entières et un temps discret. Ces deux exemples entrent dans la catégorie des systèmes dynamiques totalement discrets (FDDS). Chacun connaît également les "automates cellulaires" (CA) dans lesquels chaque maille *M* d'un réseau, à une ou plusieurs dimensions, prend un état déterminé par l'état des mailles au voisinage de *M* au temps *t*-1, choisi parmi un nombre fini d'états (par exemple 0 ou 1), à tout instant *t* (le temps étant lui aussi discret, c'est-à-dire qu'il progresse par sauts d'égale durée).

La question pourrait alors se poser de savoir quelle est la « meilleure » méthode. Il s'agit d'une interrogation peu pertinente parce qu'il n'y a pas de réponse unique, la méthode devant s'adapter au problème posé. Ainsi, choisir la bonne méthode de **modélisation mécaniste** pour comprendre un phénomène réel nécessite, au préalable, de bien définir la ou les questions à se poser et seulement ensuite dresser la liste des données accessibles à la connaissance et à la mesure (par exemple, si un modélisateur demande, pour construire son modèle, les valeurs de milliers de paramètres inaccessibles, il ne parviendra jamais à son but). Enfin, il faut rassembler les observations suggérant des mécanismes du système étudié. Alors, et alors seulement, il devient possible d'opter pour un cadre de formalisation mathématique. Encore une fois, le processus de modélisation s'inscrit dans une démarche d'équipe et dans un cadre pluridisciplinaire. La règle à garder à l'esprit est qu'un modèle mécaniste doit être le plus simple possible : *small is beautiful* (que l'on pourrait traduire par "c'est dans les petits pots que l'on met les bons onguents !"). Compliquer un modèle ne vaut que lorsque la version minimaliste se trouve impuissante à expliquer les phénomènes observés.

Ecosystèmes, complexité et auto-organisation

Le troisième point caractéristique d'un système complexe concerne l'émergence d'une auto-organisation. Il s'agit d'un point fondamental car à la source même de la vie. En effet, l'auto-organisation intervient à toutes les échelles, depuis la cellule jusqu'à la planète, comme l'a montré James Lovelock (4) avec sa théorie *Gaïa*. Sans doute est-ce parce que nous percevons inconsciemment cette auto-organisation que tous les paysages naturels prennent, à nos yeux, une certaine forme de beauté. Et si tous les systèmes vivants montrent une grande capacité à retrouver un équilibre après une agression ou une perturbation – propriété nommée **résilience** –, c'est également grâce à ses propriétés d'auto-organisation. Mais il y a toujours une limite au-delà de laquelle la réparation devient impossible, entraînant, par exemple, la mort d'un organisme voire, à plus large échelle, d'un écosystème tout entier.

Comprendre est un but noble, mais d'autres enjeux entrent également en ligne de compte. Ainsi, il importe de conserver des zones où les écosystèmes demeureront aussi "vierges" que possible : d'abord, pour préserver la biodiversité, ensuite pour conserver des témoins d'une planète où l'homme était moins omniprésent, enfin pour chercher à utiliser, au mieux, les ressources nécessaires à la nourriture de ses habitants. Ce travail de compréhension en profondeur de la complexité d'un système écologique permet d'en discerner les propriétés d'auto-organisation et de cerner sa résilience à des perturbations. Il permet également d'apporter aux décideurs des outils d'aide à la gestion beaucoup plus performants que les outils purement prédictifs, parfois impuissants à opérer hors des régimes de fonctionnement sur lesquels ils ont été construits. Ainsi, comme a pu l'écrire Tom Stoppard dans son ouvrage *Arcadia* (traduction personnelle) : *"Cela me donne tant de joie. Être à nouveau au commencement, en ignorant presque tout. Tout le monde parlait de la fin de la Physique. Il semblait qu'à elles deux, la relativité et la mécanique quantique allaient tout résoudre. Une Théorie du Tout. Mais elles n'expliquaient que le très grand et le tout petit. Le cosmos, les particules élémentaires. Les choses à notre échelle, celles sur lesquelles on écrit des poèmes – les nuages, les jonquilles, les cascades… tout ça, c'est encore pour nous aussi plein de mystère que les Cieux l'étaient pour les Grecs."*

(4) Lovelock (James), spécialiste des sciences de l'atmosphère, il est l'auteur de l'hypothèse dite Gaïa (du nom de la déesse grecque primordiale représentant la Terre-Mère) annoncée par les travaux de Johannes Kepler, selon laquelle l'ensemble des êtres vivants évoluant sur terre constitueraient un vaste organisme autorégulant ses divers éléments de manière à favoriser les meilleures conditions de vie.

> Marc A. Dubois
Institut de rayonnement de la matière (Iramis)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

CEA/DAM

Zone de collision entre les plaques tectoniques indienne et eurasienne, l'Himalaya est une région de déformation, dont les mouvements sont mesurés par GPS et par une station DORIS.

III. LA TERRE EN MOUVEMENT

Que ce soit à l'échelle des temps géologiques ou sur des durées plus courtes, voire par à-coups, la Terre bouge et change. Les manifestations de cette incessante activité planétaire peuvent s'avérer brutales et plus ou moins dévastatrices, tels les séismes, les tsunamis et autres éruptions volcaniques. Elles peuvent aussi être quasi imperceptibles, comme le recul du littoral ou l'envasement des estuaires. Et plus encore les mouvements des plaques tectoniques, eux-mêmes causes profondes des phénomènes brutaux évoqués.

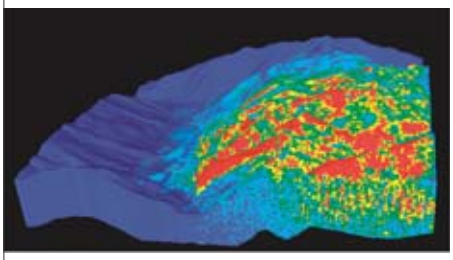
Les chercheurs du CEA s'intéressent de longue date à ces phénomènes avec des motivations différentes. Ceux qui étaient en charge des expérimentations nucléaires avaient besoin de mieux connaître les milieux dans lesquels ils les effectuaient pour en maîtriser les effets et en estimer les résultats. Cette mission les a amenés à se doter des moyens de déceler les expérimentations des autres puissances nucléaires, déclarées ou non, moyens qui prendront toute leur importance dans le cadre du contrôle international de la prolifération nucléaire. Les essais nucléaires souterrains engendrant des ondes sismiques semblables à celles des séismes, c'est tout naturellement que cette activité de surveillance s'est élargie à la sismologie. Ainsi, l'objectif est de détecter et d'identifier en temps réel tout événement sismique, quelle que soit son origine, d'estimer si cet événement a pu générer un tsunami et, dans ce cas, de pouvoir alerter les zones littorales exposées, et de progresser toujours dans la connaissance des mouvements de la Terre.

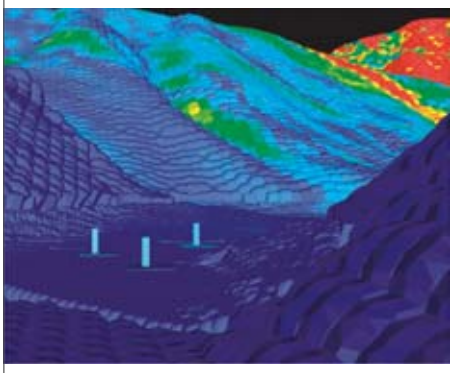
Dans ces divers domaines, les scientifiques ont à la fois déployé des instruments classiques et mis au point de nouvelles techniques, mais également tiré parti de techniques développées initialement dans d'autres buts, comme le positionnement par satellite. Aussi, des réseaux de stations GPS permanentes mesurent avec une précision millimétrique les mouvements et les déformations des plaques tectoniques.

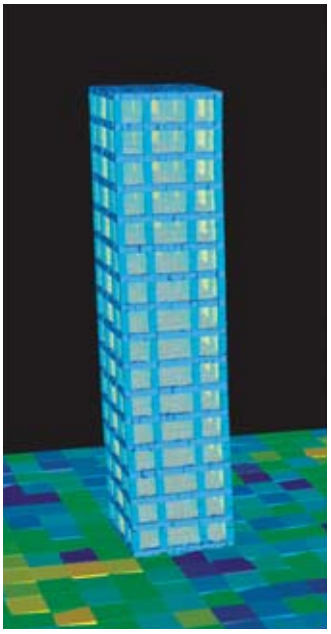
Pour d'autres chercheurs de l'organisme, il s'agit de mettre en œuvre les multiples applications pratiques des méthodes nucléoniques pour étudier la dynamique sédimentaire en milieu fluvial et littoral. Ces méthodes s'articulent autour de trois types de radionucléides. Certains sont introduits artificiellement, mais ne sont actifs que sur de très courtes durées afin de ne pas affecter l'environnement. D'autres, traces d'événements révolus comme les essais nucléaires dans l'atmosphère, apportent finalement une contribution positive aux sciences de la Terre et de l'environnement. D'autres enfin, d'origine parfaitement naturelle comme le radon produit dans la croûte terrestre, jouent un rôle irremplaçable dans le traçage atmosphérique. Y compris pour mieux appréhender le transport des gaz à effet de serre et en particulier le gaz carbonique ou dioxyde de carbone, nous ramenant aux préoccupations qui constituent la trame du premier chapitre de ce numéro.

De l'**observation** sismologique à l'**évaluation du risque** sismique

S'il reste illusoire d'espérer disposer rapidement d'une méthode fiable de prévision de l'occurrence imminente d'un séisme, l'évaluation du risque de sa survenue réalise de réels progrès auxquels contribue le pôle aléa sismique du CEA.







Simulations CEA

Simulation numérique Grand Challenge réalisée sur le supercalculateur Tera-10 du CEA. En haut, début de la propagation des ondes à partir de la faille située en bas à droite de l'image. La couleur rouge correspond aux ondes les plus fortes. Les variations locales des amplitudes sont dues en particulier aux variations de topographie. En bas, le même instant vu du fond de la vallée, là où sont placés les *buildings*. À droite, un instantané sur un *building* au moment du passage des ondes sismiques : la tour se déforme.

La **tectonique des plaques** est la théorie qui explique actuellement au mieux les diverses observations des phénomènes mécaniques qui affectent les couches superficielles de notre planète. Établie dans les années 1960, elle résulte de la synthèse d'observations et de mesures effectuées systématiquement par de nombreux observatoires. Les deux grands domaines couverts par ces observations ont été, d'une part, l'exploration du fond des océans – qui a permis de découvrir une structure ordonnée des roches, mettant ainsi en évidence l'**expansion des fonds océaniques** – et, d'autre part, l'analyse systématique et de plus en plus détaillée des **ondes sismiques** – qui a conduit à révéler la structure en plaques de la surface de la Terre et à préciser les mouvements relatifs de ces plaques – (Mémo A, ***Voyage au centre de la Terre et aux confins de l'atmosphère***, p. 21 et Mémo D, ***Tectonique des plaques et séismes***, p. 90).

Détecter et analyser finement les événements sismiques

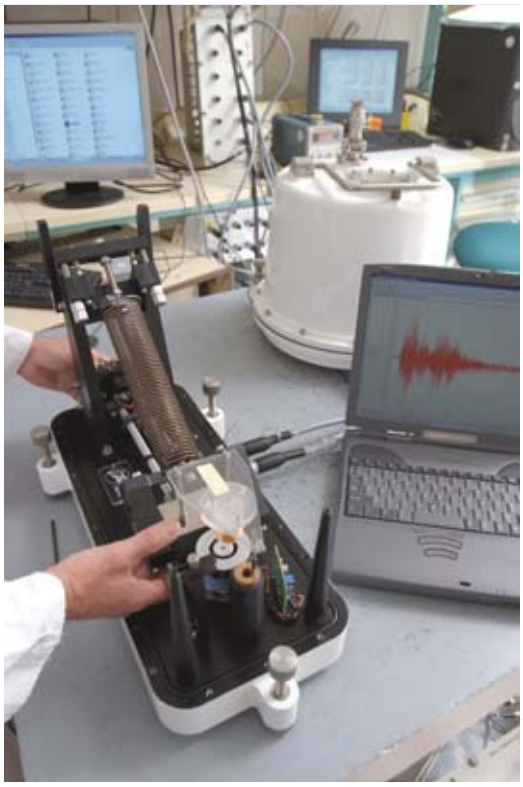
Dès la fin des années 1950, le CEA est présent dans cette thématique, en particulier par le biais de sa mission de détection des expérimentations nucléaires. En effet, une explosion de ce type, effectuée en souterrain, est aussi génératrice d'ondes sismiques. Compte tenu de la diversité des milieux traversés par celles-ci, c'est bien souvent à l'issue d'une analyse complexe que sera réalisé le diagnostic sur l'origine – naturelle (**séisme**) ou artificielle (explosion) – de ces ondes. C'est pour ces raisons que, dès l'installation des premières **stations sismiques** en métropole, le Laboratoire de détection et de géophysique du Département analyse, surveillance, environnement (Dase/LDG [1]) s'est intéressé à l'ensemble des **événements** qu'il détectait sur ce réseau de surveillance et a publié ainsi un bulletin d'activité sismique (figure 1). Ce travail n'a jamais été interrompu depuis cette date, et les stations de Lormes (dans la Nièvre) ou de Flers (dans l'Orne) sont en France parmi les plus performantes statistiquement au vu du nombre de mesures répertoriées dans le catalogue mondial de l'***International Seismological Center***. La base de données constituée au LDG, riche de plus de 140 000 événements et s'enrichissant annuellement d'environ 7 000 nouveaux, a permis de connaître avec précision la sismicité métropolitaine, ce qui est un élément essentiel à la définition du risque sismique.

Le travail d'analyse des enregistrements sismiques consiste principalement à mesurer deux paramètres caractéristiques des ondes sismiques : l'heure d'arrivée et l'amplitude. La combinaison de ces informations obtenues sur plusieurs stations, complétée par un **modèle** de propagation à l'intérieur de la **Terre**, offre alors la possibilité de localiser l'événement qui les a engendrées, et d'en donner une estimation de sa **magnitude** (Mémo D, ***Tectonique des plaques et séismes***, p. 90).

Cette activité de surveillance a conduit le LDG à être en charge de l'alerte aux séismes forts pour le compte de la sécurité civile. Dans le cadre de cette mission d'alerte, le sismologue d'astreinte doit fournir les caractéristiques préliminaires (localisation et magnitude) de tout événement sismique susceptible d'être ressenti sur le territoire métropolitain, dans l'heure qui suit l'événement.

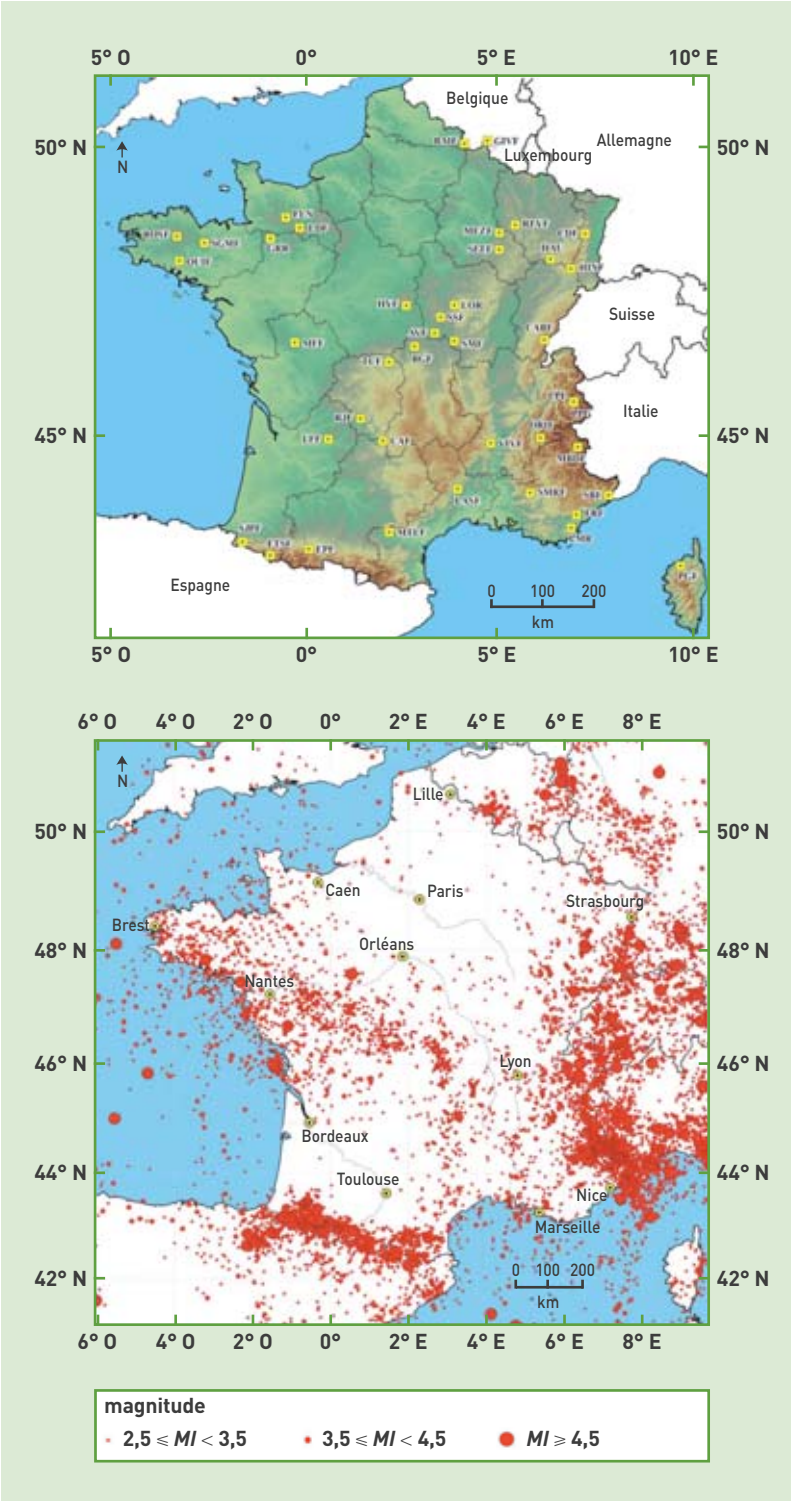
Pour les grands séismes, cette description sous forme de coordonnées et de magnitude n'est pas suffisante. Pour mieux en estimer les effets – en particulier pour évaluer le risque de **tsunami** (voir *Comment prévenir et prévoir les tsunamis ?* p. 101 et Mémo E, ***Comment naît et se propage un tsunami ?*** p. 105) – il est indispensable de connaître les caractéristiques de la rupture, telles que la position et l'extension de la **faille** qui a rompu, le mode, la vitesse et la durée de rupture, la chute de contrainte provoquée par le séisme. De même, lorsque l'événement détecté est susceptible d'être une expérimentation nucléaire, il est nécessaire de poursuivre son analyse. Les

(1) Site Web : http://www-dase.cea.fr/



C. Dupont/CEA

Le capteur sismique longue période permet de mesurer les mouvements du sol dont la période est supérieure à 1 seconde. Il est particulièrement adapté à l'étude des ondes de surface et de volume générées par les séismes, la marée terrestre et les oscillations propres de la Terre.



CEA/DAM

Figure 1.
En haut, réseau de surveillance sismique du Dase (carrés jaunes) en France métropolitaine. Les 40 capteurs répartis sur le territoire français permettent de recueillir près de 200 000 mesures par an. En bas, sismicité mesurée par ce réseau depuis 1962 (limitée aux événements de magnitude supérieure à 2,5).

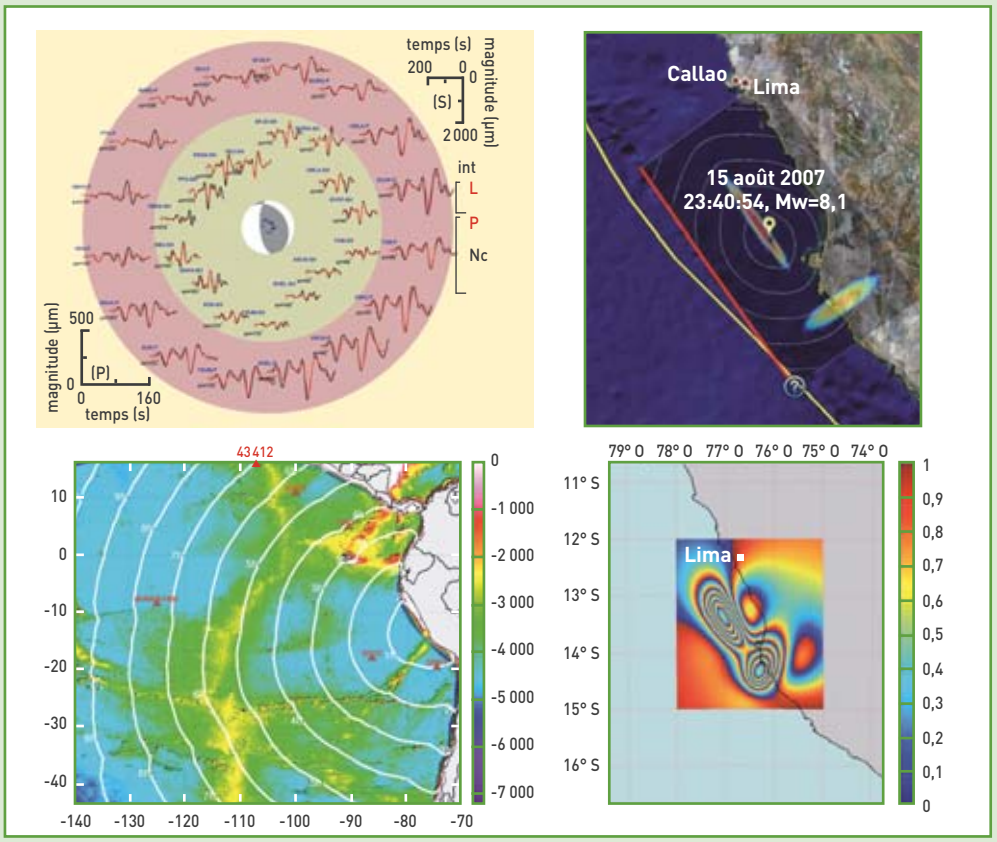
sismologues recherchent alors des éléments particuliers, comme la mise en évidence d'une profondeur de quelques centaines de mètres seulement (les séismes pouvant avoir lieu jusqu'à 700 km de profondeur), ou bien une distribution **isotrope** de l'amplitude des **ondes P** de compression et la faible amplitude des **ondes S** de cisaillement, éléments qui sont typiques d'une source explosive. Ce travail d'analyse détaillée fait appel à des techniques variées qui procurent à l'analyste les outils les plus performants pour l'aider dans son interprétation (encadré 1). Le traitement du signal est utilisé pour rechercher certains éléments caractéristiques des enregistrements. La **simulation numérique** donne les moyens de tester une hypothèse (source explosive ou source sismique, par exemple) en confrontant les résultats des simulations aux enregistrements sismiques. Enfin, les méthodes modernes d'analyse de données, comme les **techniques d'inversion** non linéaire, les réseaux de neurones, la logique floue, sont employées pour comparer l'ensemble des paramètres obtenus sur un événement aux mêmes paramètres caractérisant des événements similaires de la base de données.

La sismicité et l'aléa sismique

Il est encore illusoire d'espérer disposer d'une méthode de prévision fiable de l'occurrence imminente d'un séisme ; c'est la raison pour laquelle l'évaluation du risque d'apparition d'un séisme en un lieu donné ne peut se faire que d'un point de vue statistique. La méthode utilisée est fondée sur la notion d'événement sismique de référence pour une région donnée, qui est à la base des études de risque sismique. En France, la réglementation impose que les installations soient construites de façon à résister aux plus forts mouvements sismiques qui pourraient les solliciter. C'est pourquoi la définition, pour chaque site, de l'événement de référence est complétée par l'étude des effets de site qui peuvent, selon

L'analyse détaillée d'un fort séisme

1



CEA/DAM

Cette fiche de synthèse détaillée de l'analyse du **séisme** de **magnitude** 8,1, qui a eu lieu au large du Pérou le 15 août 2007, révèle les différentes étapes de traitement, depuis l'analyse des formes d'**ondes**, la description de la rupture, obtenue par **inversion** des formes d'ondes, et les conséquences attendues de cet **événement** en termes de **tsunami** et de déplacement du sol en surface.
En haut à gauche apparaissent les enregistrements (en noir) et les signaux synthétiques (en rouge) calculés pour la source sismique issue de l'inversion et représentée sur la carte en haut à droite. La **faille** s'étend sur une longueur de 200 km et est composée de 2 "patches" (ellipses colorées) sur lesquels le mouvement le plus fort a atteint 8 m de glissement pour une durée totale de rupture de 100 s environ. À partir de ces résultats d'inversion, il est possible de calculer les effets engendrés par le séisme. L'image en bas à gauche montre les temps de propagation du tsunami (courbes blanches) et celle en bas à droite indique le déplacement du sol sous la forme de l'**interférogramme** simulé tel qu'il pourrait être obtenu par l'exploitation des images satellites avant et après le séisme.

la nature des terrains, amplifier ou atténuer de façon notable l'amplitude des ondes sismiques engendrées. La définition des événements de référence s'appuie d'abord sur une analyse détaillée des catalogues de sismicité. Toutefois, ceux-ci ne représentent qu'une petite partie du cycle qui gouverne à grande échelle les mouvements des plaques. Il est alors nécessaire de les compléter par la recherche des événements qui ont affecté une région à l'échelle humaine (sismicité historique) mais aussi dans un passé plus lointain (**paléo**sismicité). En France, ces effets sont difficiles à identifier compte tenu de la faible sismicité. Il est par conséquent indispensable d'étudier des régions plus actives, comme le Népal et la Mongolie (voir *Mesures de déformation par GPS : une méthode d'investigation des mouvements tectoniques à grande échelle*, p. 95).
Les effets de site, mis en évidence par de nombreux exemples de séismes dévastateurs, comme le séisme survenu en Chine en mai 2008, sont étudiés aussi bien d'un point de vue théorique, en particulier à l'aide de simulations numériques (encadré 2), que par des expérimentations sur le terrain. C'est pourquoi le Dase exploite un réseau d'**accéléromètres**, situés soit près des sites sensibles, soit près des zones sismiquement actives, pour disposer d'enregistrements détaillés de mouvements forts. À ce titre, il

CEA/DAM

Cette station sismique à Madagascar fonctionne de façon autonome grâce à des panneaux solaires et une antenne parabolique VSAT.

participe aussi au **Réseau accélérométrique permanent** (**RAP**) à l'échelle nationale.
Tous ces travaux permettent au LDG – pôle de compétence aléa sismique du CEA depuis 1996 – de réaliser pour le compte des autorités de sûreté les études de site nécessaires dans le cadre de la législation en vigueur.

L'apport de la simulation numérique

Dès que les principaux types d'ondes ont pu être identifiés, les sismologues se sont attachés à en donner une formulation théorique, qui a ensuite servi à calculer les formes d'ondes. Depuis les années 1960 jusqu'aux années 1980, de nombreux **algorithmes** ont été publiés permettant, pour les différents types d'ondes sismiques, de fournir des **sismogrammes** synthétiques de plus en plus réalistes, en incluant des modèles des structures internes de la Terre de plus en plus précis. Néanmoins, toutes ces méthodes supposent une structure stratifiée et régulière des couches de terrains. Pour une approche plus réaliste, intégrant par exemple un modèle tridimensionnel de propagation, il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodes discrètes – c'est-à-dire basées sur un maillage de l'espace et du temps – calculant l'évolution des ondes sismiques de proche en proche en tout point du maillage. Récemment, un nouveau **code de calcul**, développé au Dase et dénommé Mka3D, permet d'utiliser ce formalisme pour traiter simultanément les problèmes de rupture – par exemple au niveau de la faille ou bien de la chute de blocs instables sollicités par la propagation des ondes sismiques – et de mécanique élastique – comme la propagation des ondes dans les terrains ou bien dans les structures des bâtiments – (encadré 2).

CEA/DAM

Entrée d'une cave sismique en Mongolie.

Une synergie de compétences

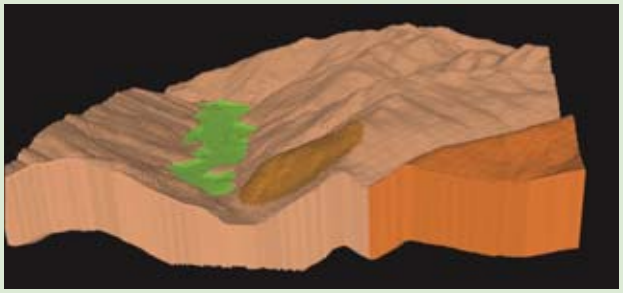
Les missions confiées au CEA permettent au Dase d'être présent dans un large spectre d'activités relevant du domaine des sciences de la Terre. Celles-ci mettent en jeu des compétences dans des domaines variés, dépassant le cadre strict des sciences de la Terre. Cette synergie de compétences, regroupées dans une même unité, offre à chaque chercheur ou ingénieur la possibilité de disposer des outils les mieux adaptés aux problèmes qu'il se pose, ou en tout cas de participer à leur élaboration avec une grande garantie d'efficacité.

> **Yves Cansi, Jocelyn Guilbert** et **Marc Nicolas**
Département analyse, surveillance, environnement
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France

Grand Challenge : des simulations très réalistes

2

La propagation des mouvements élastiques, la rupture des milieux continus, les mouvements de blocs... tous ces phénomènes sont du ressort de la mécanique des milieux continus. Cependant, selon ces divers domaines d'application, les développements théoriques complémentaires et les solutions des équations associées diffèrent et finalement ne relèvent plus du même formalisme. Dans le cas du **risque sismique**, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des phénomènes, depuis la rupture jusqu'à la sollicitation des bâtiments, en passant par la propagation des **ondes** élastiques dans un milieu géologique complexe. C'est ce qui a été réalisé dans le **code** Mka3D, basé sur une approche de la **modélisation** fine de l'ensemble des phénomènes, et qui permet donc de les appliquer dans un milieu réaliste.
Dans l'exemple présenté, qui a nécessité l'utilisation de 500 processeurs pendant 40 heures sur les supercalculateurs Tera du CEA (soit un total de 20 000 heures de calcul), une **faille** génère un **séisme** d'une **magnitude** de 5,5 sur l'**échelle de Richter**. Les ondes sismiques vont alors se propager dans un milieu tridimensionnel, complexe à la fois par sa forme (topographie) et par sa composition (nature des milieux géologiques). Le domaine étudié est ici à l'échelle d'une ville (11 x 11 km^2 sur 2 km d'épaisseur). Les ondes sismiques arrivent au pied des bâtiments, également modélisés dans le même calcul, ce qui permet l'interaction directe du sol avec la structure. Une des originalités du logiciel réside justement en sa capacité à gérer un changement d'échelle très important, entre celle des bâtiments et celle du domaine de propagation des ondes sismiques. L'approche numérique du code Mka3D rend par ailleurs possible la prise en compte d'une physique complexe afin, par exemple, de prévoir les ruptures éventuelles et de suivre l'effondrement d'une structure ou la formation d'un glissement de terrain.



CEA/DAM

Simulation Grand Challenge. L'image représente simplement le milieu de propagation, incluant la faille (séparant les zones orange et brun clair en bas à droite), une topographie détaillée, la présence d'un bassin sédimentaire (en vert) et d'une zone superficielle (en marron au centre) dont les caractéristiques mécaniques sont telles que sa sollicitation par des ondes élastiques est susceptible de provoquer un glissement de terrain. Enfin, des bâtiments sont positionnés au loin, sur la zone sédimentaire.

MÉMO D

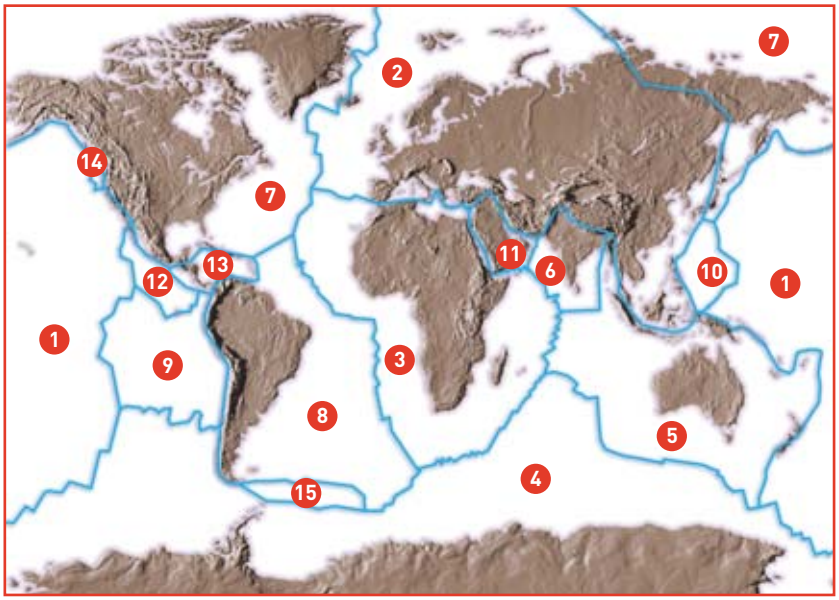
Tectonique des plaques et séismes

L'écorce (ou croûte) terrestre, partie superficielle de notre planète, entoure les couches plus profondes que sont le manteau et le noyau (Mémo A, *Voyage au centre de la Terre et aux confins de l'atmosphère*, p. 21). Complétée en épaisseur par la partie superficielle du manteau, elle forme la lithosphère, mosaïque d'une douzaine de plaques rigides (dites lithosphériques), dont sept principales et cinq secondaires (figure 1). Épaisses d'une dizaine à une centaine de kilomètres, elles se déplacent sur la partie plus plastique du manteau : l'asthénosphère.

En 1915, le météorologue et astronome allemand Alfred Wegener publie son hypothèse sur la dérive des continents. Il faudra attendre 1967 pour que celle-ci soit formalisée. La théorie est tout d'abord appelée expansion des fonds océaniques, puis tectonique des plaques. Elle décrit le mouvement de ces plaques qui se déplacent, s'éloignant (l'Arabie se sépare ainsi de l'Afrique) ou se rapprochant, de quelques centimètres par an. L'origine de la force qui met les plaques en mouvement reste discutée : s'agit-il d'un mouvement de subduction amorcé à l'extrémité (froide) d'une plaque qui entraîne une remontée (chaude) du manteau à l'autre extrémité ? Ou à l'inverse, d'une remontée chaude du manteau qui "pousse" contre la surface et fait plonger l'autre extrémité, froide, de la plaque ? Ou de l'effet d'une contrainte plus mécanique comme le poids de la croûte *subductante* entraînant la plaque, ou bien encore le poids de la jeune croûte poussant cette plaque ?

Ces mouvements traduisent en tout cas, en surface, le phénomène de convection qui se déroule dans le manteau. Ce phénomène est alimenté par la chaleur (1 300 °C environ à 100 km de profondeur) fournie par la désintégration radioactive des roches au cœur de la Terre, plus précisément celle du potassium, de l'uranium et du thorium. La convection est un des trois mécanismes par lesquels la Terre se refroidit en évacuant la chaleur à sa surface, à côté de la conduction thermique et du transfert radiatif. Certaines zones du manteau deviennent ainsi chaudes, donc moins denses, et montent sous l'effet de la poussée d'Archimède. La matière refroidit en surface (évacuant de cette manière la chaleur produite à l'intérieur de la planète), devenant plus froide, donc plus dense (et par ailleurs plus "cassante"), ce qui la fait "replonger". Ce processus de "tapis roulant" fait apparaître des zones relativement stables à des endroits où la matière monte (les dorsales) et redescend (zones de subduction), la matière se translatant en surface des premières vers les secondes. La Terre produit du magma à la montée comme à la descente de ces courants.

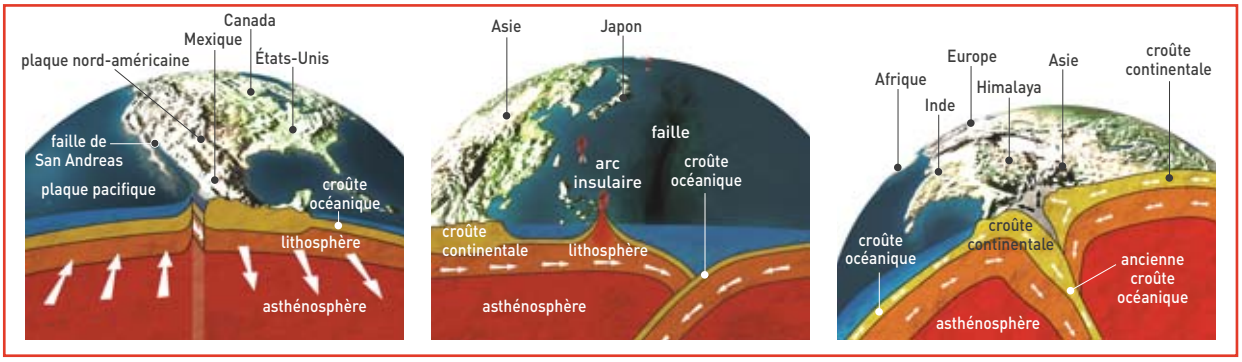
Les mouvements à l'origine des déplacements des plaques tectoniques sont de plusieurs types. La divergence (ou écartement) de deux plaques qui s'éloignent l'une de l'autre laisse le manteau remontant entre elles alimenter la lithosphère océanique. Leur frontière divergente correspond à une dorsale, par ailleurs siège d'un volcanisme intense. La convergence voit deux plaques se rapprocher l'une de l'autre, selon trois types de frontière. Dans la subduction, l'une d'entre elles (en général la plus dense, souvent la croûte océanique) plonge sous la croûte continentale. La région de l'île de Sumatra, par exemple, est ainsi une zone de subduction où la plaque dense indo-australienne s'enfonce sous la plaque eurasienne, moins dense, à une vitesse moyenne d'environ 5 cm par



Yuvanoé/CEA

Figure 1.
La couche terrestre externe est divisée en plusieurs plaques rigides qui se déplacent lentement sur la matière visqueuse de l'asthénosphère en se frottant les unes contre les autres. Certaines plaques peuvent être subdivisées en plusieurs plaques qui ont des mouvements relatifs entre elles plus petits.

	plaque	vitesse moyenne
1	plaque pacifique	10 cm/an vers le nord-ouest
2	plaque eurasienne	1 cm/an vers l'est
3	plaque africaine	2 cm/an vers le nord
4	plaque antarctique	tourne sur elle-même
5	plaque australienne	6 cm/an vers le nord-est
6	plaque indienne	6 cm/an vers le nord
7	plaque nord-américaine	1 cm/an vers l'ouest
8	plaque sud-américaine	1 cm/an vers le nord
9	plaque de Nazca	7 cm/an vers l'est
10	plaque philippine	8 cm/an vers l'ouest
11	plaque arabique	3 cm/an vers le nord-est
12	plaque des Cocos	5 cm/an vers le nord-est
13	plaque caraïbe	1 cm/an vers le nord-est
14	plaque Juan de Fuca	2,8 cm/an vers le nord-est
15	plaque Scotia	3,6 cm/an vers l'ouest



Yuvanoé/CEA

Figure 2.
À gauche, un exemple de décrochement. La plaque pacifique coulisse le long de la plaque nord-américaine de chaque côté de la faille de San Andreas, à l'origine des séismes californiens. Au milieu, un exemple de subduction. La création des arcs insulaires volcaniques du Japon aux îles Kouriles et Aléoutiennes est provoquée par le fait que la plaque pacifique plonge sous la plaque eurasienne. À droite, un exemple de collision. La formation de l'Himalaya est la conséquence de la confrontation de la plaque indienne et de la plaque eurasienne qui se chevauchent et se soulèvent.

an. La **collision** de plaques continentales est, quant à elle, à l'origine de la formation des chaînes de montagnes, par exemple celle de l'Himalaya à la frontière entre la plaque indienne et la plaque eurasienne (figure 2). Enfin l'**obduction** se traduit par le transport d'une lithosphère océanique sur un continent (aucun rapprochement de ce type n'est actuellement actif). Il existe également des frottements entre plaques : le **décrochement** ou **transcurrence** est le glissement horizontal de deux plaques, l'une le long de l'autre (figure 2).
Sont en fait associées à ces différents types d'interaction les trois grandes familles de **failles** : normale (divergente et extensive) ; inverse (convergente et compressive) et décrochement (transcurrent : les axes d'extension et de compression sont dans le plan horizontal). Les mouvements des plaques, suivis par des instruments classiques (théodolites, distancemètres), le sont de plus en plus par le recours au GPS satellitaire *(Global Positioning System)* particulièrement bien adapté aux mesures de déformations dans une zone donnée (voir *Mesures de déformation par GPS : une méthode d'investigation des mouvements tectoniques à grande échelle*, p. 95).
C'est le long des bordures entre plaques que se produisent la plupart des **séismes** et **volcans**, conséquences des mêmes phénomènes profonds. Un certain nombre de volcans se trouvent toutefois en plein milieu des plaques (ils sont appelés **points chauds**). Ils seraient la manifestation en surface de bulles de convection de matière moins dense que le manteau remontant directement à travers lui. Ces points chauds, dont les plus importants se situent sous les îles d'Hawaï et de La Réunion, ne bougent que très faiblement les uns par rapport aux autres, les plaques "défilant" au-dessus d'eux.

Les volcans et les séismes, marqueurs des mouvements profonds de la planète

Les volcans sont de type *effusif*, *explosif* ou une combinaison des deux. Les premiers voient la roche en fusion s'écouler par leur(s) cratère(s) et forment souvent des chapelets, surtout sous la mer. Les

Suite page 92

StockTrek

La plaque pacifique est ponctuée d'îles volcaniques, comme Hawaï, où se trouvent des volcans parmi les plus actifs au monde.

CNRS Photothèque/Hervé Philip

**Destructions provoquées par le séisme de Spitak (Arménie), le 7 décembre 1988.
Ce tremblement de terre, de magnitude 6,2, à fait environ 25 000 morts. La libération brutale des contraintes accumulées lors des déplacements des plaques se frottant les unes contre les autres s'accompagne d'un mouvement plus ou moins violent du sol.**

MÉMO D

Suite de la page 91

seconds, qui contiennent la pression des gaz emprisonnés jusqu'à ce que celle-ci fasse "sauter le bouchon", forment des alignements sur les îles et les continents. Des bruits sismiques de haute fréquence et de faible amplitude (**trémors**) précèdent une éruption. Quelque 3 500 volcans se sont manifestés ces 10 000 dernières années.

Les déplacements des plaques se frottant les unes contre les autres provoquent la déformation de la croûte terrestre et l'accumulation de tension. Quand ces contraintes deviennent supérieures à la résistance de la croûte, les zones les plus fragiles rompent. Un séisme (tremblement de terre) est la libération brutale de ces contraintes accumulées, en un mouvement plus ou moins violent du terrain (de quelques millimètres à plusieurs dizaines de mètres) le long des failles.

Les séismes sont pour la plupart d'origine naturelle – la Terre connaît plus d'un million de secousses par an, dont quelque 140 000 de **magnitude** supérieure à 3 [1], certaines pouvant avoir pour cause des mouvements volcaniques – mais les **événements sismiques** peuvent également être induits par des activités humaines comme la mise en eau de barrages, l'exploitation de gisements d'**hydrocarbures**. De plus, des événements comme des tirs de mines ou de carrières, ou des essais nucléaires, en particulier souterrains, engendrent aussi des ondes sismiques très similaires à celles générées par les événements naturels.

Les zones d'intense activité sismique sont les *dorsales médio-océaniques*, les zones de subduction, les zones de failles le long desquelles les plaques coulissent (comme celle de San Andreas en Californie) ainsi que les zones de collision entre continents.

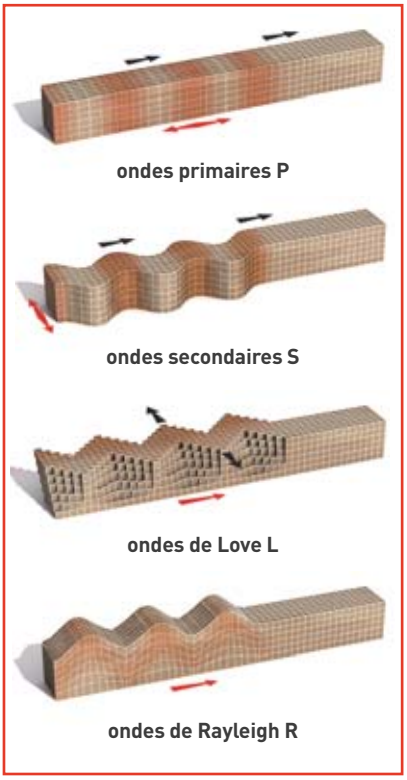
La libération des contraintes au moment du séisme donne naissance à des vibrations élastiques, appelées **ondes sismiques**, qui se propagent dans toutes les directions, à travers la terre comme à travers l'eau, à partir du point d'origine de la rupture de l'écorce terrestre, le **foyer** (ou **hypocentre**), situé entre la surface et une profondeur d'environ 700 km. L'**épicentre** est le point de la surface situé à la verticale du foyer du séisme : c'est en général celui où la secousse en surface est maximale. Les ondes sismiques se propagent à des vitesses comprises entre 2 et 14 km/s, longitudinalement (**ondes P**, pour pression ou **primaires** ou **premières**) et transversalement (**ondes S**, pour *shear* - cisailler, en anglais - ou **secondaires** ou **secondes**). Les ondes P (6 à 14 km/s) agissent en *compression*, comme dans un ressort, les particules se déplaçant dans le sens de propagation de l'onde dans les solides, les liquides et les gaz. Les ondes S (3 à 7 km/s) sont des ondes de *cisaillement* dans lesquelles les particules se déplacent perpendiculairement au sens de propagation : elles ne se propagent que dans les solides (figure 3).

La vitesse des deux types d'ondes varie en fonction de la densité du milieu traversé. Plus ce dernier est "mou", moins les ondes se propagent rapidement. Ces phénomènes ondulatoires sont soumis à des lois physiques telles que la réflexion ou la réfraction. De plus, ces ondes ne se déplacent pas toutes à la même vitesse, suivant le milieu qu'elles traversent. En outre, lorsqu'une onde P arrive sur une zone de transition comme l'interface manteau-noyau, une petite partie de son énergie est convertie en onde S, ce qui complique l'interprétation des relevés sismographiques. Les sismologues désignent donc les ondes par des lettres différentes selon leur origine (tableau).

	onde P	onde S
manteau	P	S
noyau externe	K	
noyau interne	I	J

Tableau.
Une onde PKP, par exemple, est une onde P qui réapparaît à la surface où elle sera détectée après avoir traversé le noyau externe, liquide.

En complément de ces ondes dites de volume, les ondes de surface – L (*ondes de Love*, qui provoquent un ébranlement horizontal) et R (*ondes de Rayleigh*, plus lentes, qui génèrent un mouvement à la fois horizontal et vertical) – d'une amplitude beaucoup plus grande ne se propagent que dans la croûte, milieu moins homogène que le manteau (figure 3).



Yuvanoé/CEA

Figure 3.
Les différents types d'ondes sismiques.
La propagation de l'onde P est parallèle au déplacement du sol qui est successivement dilaté et comprimé. Pour l'onde S, les roches sont cisaillées et travaillent en distorsion, entraînant des vibrations perpendiculaires au sens de propagation de l'onde. Les ondes L et R se propagent à la surface de la Terre et sont les plus destructrices.

C'est grâce au travail assidu initié au siècle dernier dans les observatoires de sismologie qu'ont pu être réalisées des tables reliant le temps de propagation à la distance parcourue. Ce travail a ainsi contribué à mieux connaître la **structure interne de la Terre** et permet à l'heure actuelle de bien **modéliser** le trajet des ondes. Aujourd'hui, des méthodes comme la **tomographie sismique** aident à améliorer encore les modèles, en particulier en prenant en compte des structures en trois dimensions.

La surveillance sismique : localisation, magnitude, intensité, moment sismique...

Détecter un événement sismique consiste à détecter les ondes qu'il engendre grâce à deux types d'installations adaptées au milieu de propagation. Les mouvements du sol, même de très faible amplitude, sont détectés à proche comme à longue distance par des **stations sismiques** équipées

(1) Aujourd'hui, les sismologues utilisent des magnitudes comme la **magnitude de moment** pour estimer l'ampleur des très forts séismes. La magnitude **Mw**, introduite en 1977 par Hiroo Kanamori du *California Institute of technology*, est ainsi définie par la relation log Mo = 1,5 Mw + 9,1 (où Mo est le moment sismique exprimé en newton·mètre). L'information du grand public se réfère en général à la **magnitude de Richter** (échelle ouverte), établie par Charles Francis Richter en Californie en 1935, définie initialement pour quantifier la taille des séismes locaux.

de **sismographes**, dispositifs qui permettent de mesurer les mouvements les plus infimes du sol dans les trois dimensions, et les caractérisant en déplacement, vitesse ou accélération.

Les ondes hydroacoustiques générées par des explosions sous-marines ou souterraines effectuées à proximité d'une mer ou d'un océan sont détectées par des **stations hydroacoustiques** constituées de récepteurs immergés et de stations sismiques côtières. La mise en réseau de telles stations sur l'ensemble du globe terrestre (et en particulier dans et autour d'une zone à surveiller) permet de déterminer exactement la position géographique du foyer du séisme et de donner si besoin l'alerte. Car bien qu'il existe des signes avant-coureurs (variation du champ magnétique local, augmentation de la circulation des eaux souterraines, diminution de la **résistivité** des roches et légères déformations de la surface du sol), la prévision des séismes est impossible.

Les premières méthodes utilisées pour localiser les événements sismiques à partir de la mesure des temps d'arrivée des divers paquets d'ondes étaient basées sur des principes géométriques. À une distance inférieure à 1 200 km, les temps de propagation des ondes P et S sont, en première approximation, proportionnels à la distance parcourue par les ondes. L'écart entre les deux temps d'arrivée est donc lui aussi proportionnel à la distance, ce qui permet de situer la source sur un cercle centré sur la station. En répétant cette analyse pour plusieurs stations, il est possible de situer géométriquement la position de l'épicentre à l'intersection des cercles (figure 4). Les méthodes numériques actuelles traitent le problème dans sa globalité, en le considérant comme un problème inverse dont les inconnues sont regroupées dans un vecteur $\boldsymbol{x}$ à 4 dimensions (latitude, longitude, profondeur et heure origine de l'événement) et dont les données sont rassemblées dans un vecteur $\boldsymbol{t}$ incluant les diverses mesures (par exemple, les temps d'arrivée des ondes). Le problème direct, représenté par le vecteur $\boldsymbol{t(x)}$ est le calcul à partir de $\boldsymbol{x}$ des valeurs théoriques associées aux données. Résoudre le **problème inverse** consiste à trouver le vecteur $\boldsymbol{x_0}$ qui minimise les écarts entre $\boldsymbol{t}$ et $\boldsymbol{t(x_0)}$.

La caractérisation d'un séisme ne se limite pas à sa position géographique. La description de la source est un problème plus complexe.

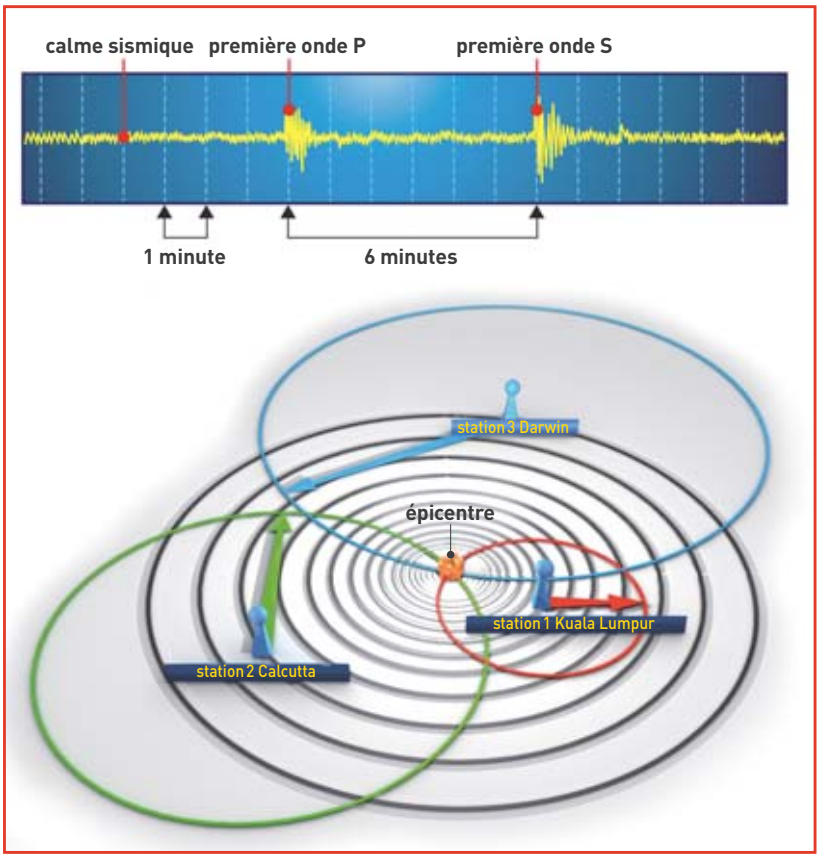
La **magnitude** est une représentation de l'énergie élastique libérée par le séisme. Historiquement, elle était basée sur la mesure – dans un cadre bien précis – de l'amplitude des ondes, corrigée des effets d'atténuation dus à la traversée des terrains. C'est une échelle logarithmique, multipliant l'énergie d'un facteur 30 pour chaque augmentation d'une unité ! Au fil du temps, cette définition s'est avérée incomplète, entraînant plusieurs autres définitions [1].

La magnitude ne doit pas être confondue avec l'**intensité** d'un séisme qui caractérise, quant à elle, les *effets ressentis* par les personnes ainsi que l'*ampleur des*

Suite page 94

C. Dupont/CEA

Le capteur sismique courte période permet de mesurer les mouvements du sol dont la période est inférieure à 2 secondes. Il est particulièrement adapté à l'étude des ondes de volume générées par des séismes proches.



Yuvanoé/CEA

Figure 4.
La méthode de triangulation a longtemps été utilisée pour localiser un événement sismique. L'écart de temps entre les arrivées des ondes P et S permet de déduire la distance du capteur à l'épicentre. À partir de plusieurs stations sismiques donnant une valeur de la distance, l'épicentre sera positionné à l'intersection des cercles ayant pour centre les stations et pour rayon les distances trouvées à chaque station.

MÉMO D

Suite de la page 93

dégâts observés en un lieu donné suite à l'événement [2]. Le plus gros séisme survenu depuis 1900 s'est produit au Chili en 1960 avec une magnitude de 9,5. Mais le plus meurtrier (environ 250 000 victimes) depuis cette date a été celui de Tangshan, en Chine, en 1976, d'une magnitude de 7,5. Celui qui a touché le Sichuan (sud-ouest du pays) le 12 mai 2008, d'une magnitude de 7,9, a fait au moins 90 000 victimes. Un même séisme, d'une magnitude donnée, définie par l'énergie libérée au foyer, sera ressenti avec des intensités différentes selon la profondeur du foyer, la distance par rapport à l'épicentre et les caractéristiques locales du lieu d'observation.

Ce n'est que relativement récemment qu'a été introduit le concept de **moment sismique** qui cherche à décrire de façon mécanique un tremblement de terre : la valeur du moment est obtenue en multipliant une constante élastique par le glissement moyen produit sur une faille et la superficie de celle-ci. Elle est complétée par la description du mécanisme de la rupture, précisant les paramètres de la faille sur laquelle elle s'est propagée (orientation, longueur, profondeur...), les parties qui ont cédé, leur déplacement et leur vitesse de rupture, en utilisant les enregistrements des ondes effectués par plusieurs capteurs.

Aujourd'hui, les données des stations sont transmises directement par satellite à un centre d'analyse où chaque événement est étudié. Les réseaux à couverture mondiale comme le **WWSSN** *(World-Wide Standardized Seismograph Network)* ou **IRIS** *(Incorporated Research Institutions for Seismology)* américains ou le **Géoscope** français sont principalement constitués d'appareils enregistrant toutes les composantes du mouvement du sol, dans une large bande de fréquences. À l'échelle européenne, le **CSEM** (Centre sismologique Euro-Méditerranéen) fédère l'ensemble des résultats de plus de 80 instituts dans une soixantaine de pays (de l'Islande à la péninsule arabique et du Maroc à la Russie). En France, à côté du réseau **RéNaSS** (Réseau national de surveillance sismique) dont le site central est à Strasbourg et qui couvre l'hexagone, la mission de surveillance à l'échelle mondiale incombe au CEA, plus précisément au Laboratoire de détection et de géophysique (LDG) du Département analyse, surveillance, environnement (Dase) de sa Direction des applications militaires (DAM). Le LDG, installé à Bruyères-le-Châtel (Essonne), cherche à détecter et identifier en temps réel chaque événement sismique tout en progressant dans la connaissance des mouvements terrestres. L'ensemble des données collectées permet l'établissement d'un catalogue de la sismicité, référence qui a servi de base au zonage sismique de la France métropolitaine, révisé en 2007 pour l'application de la norme parasismique européenne Eurocode 8 (EC8) qui se substituera aux règles parasismiques françaises actuelles (PS92 et PSMI) à partir de 2010.

Enfin, le **Réseau accélérométrique permanent** (**RAP**, qui comprend plus d'une centaine de stations pour le compte d'un groupement d'intérêt scientifique associant le **CNRS**/**Insu**, le CEA, le **BRGM**, l'**IRSN**, l'**IPGP**, le Laboratoire central des ponts et chaussées LCPC et des universités) a pour missions de fournir à la communauté scientifique et technique les données permettant de comprendre les phénomènes relatifs au mouvement du sol lors de séismes et d'estimer celui-ci pour les séismes futurs. La grande sensibilité rend possible d'étudier les lois d'échelle et les phénomènes de non-linéarité. Le RAP doit ainsi aider à la détermination des spectres de référence permettant le dimensionnement des structures.

C. Dupont/CEA

Salle d'analyse des signaux géophysiques du Dase. Dans cette salle converge l'ensemble des signaux captés par les stations de surveillance installées dans le monde entier. L'analyse de ces signaux permet de prévenir immédiatement les autorités en cas de fort séisme, d'essai nucléaire ou d'événement exceptionnel.

S. Poupin/CEA

Les essais sur les tables vibrantes du laboratoire Tamaris du CEA, ici test réalisé sur une structure d'environ 20 tonnes, ont contribué à l'élaboration des normes européennes de résistance des bâtiments aux séismes.

(2) En France et dans la plupart des pays européens, l'échelle d'intensité utilisée est l'échelle EMS 98 (*European Macroseismic Scale*, établie en 1998), qui comporte 12 degrés.

Mesures de **déformation** par **GPS** : une méthode d'investigation des **mouvements tectoniques** à grande échelle

Le système GPS de positionnement par satellites s'est imposé en une décennie pour suivre avec une précision millimétrique les mouvements et les déformations des plaques tectoniques à grande échelle. Le CEA participe à l'acquisition de nouvelles données dans le cadre d'une collaboration internationale.

L. Bollinger-CEA/DAM

Le Langtang Lirung (altitude 7 227 m), sommet situé au front de la haute chaîne himalayenne au Népal central. Zone de collision entre les plaques indienne et eurasienne, l'Himalaya est une région de déformation largement étudiée.

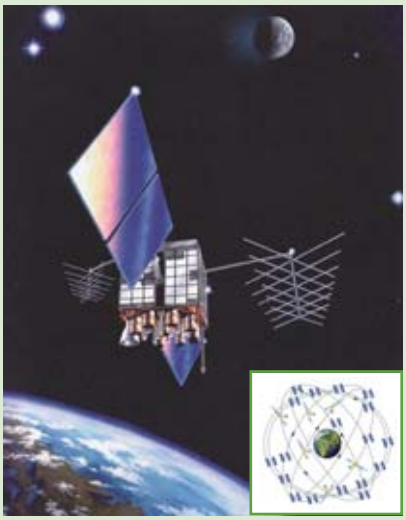
Au cours de ses missions de surveillance de sites, le Département analyse, surveillance, environnement du CEA (Dase) utilise le système satellitaire GPS *(Global Positioning System)* depuis sa mise en service (encadré). Permettant d'atteindre depuis une dizaine d'années des précisions millimétriques, le système GPS est devenu de nos jours un outil incontournable, aussi bien pour la mesure du mouvement des **plaques tectoniques** à grande échelle que pour la détection des mouvements parfois plus faibles dans les zones de déformation intraplaque.

Dans le cadre des études conduites par le Laboratoire de détection et de géophysique (Dase/LDG) – pôle de compétence aléa sismique –, il s'agit d'évaluer le potentiel sismogénique de la région étudiée, en particulier celui des **failles** actives (Mémo D, ***Tectonique des plaques et séismes***, p. 90). Cependant, à l'échelle du territoire métropolitain, les déformations sont faibles et difficiles à mesurer. Aussi, le Dase mène-t-il des travaux de fond concernant l'étude du cycle sismique. Une des régions propice à ces investigations est la zone de **collision** continentale entre les plaques indienne et eurasienne, où les mouvements sont environ quatre fois plus rapides que dans les Alpes. Un réseau GPS a été installé au Népal. Sur le territoire métropolitain, le Dase participe par ailleurs au projet national de réseau GPS RENAG [1] dont l'un des objectifs est de mesurer la déformation de la **croûte terrestre** en France et dans les régions frontalières (Mémo A, ***Voyage au centre de la Terre et aux confins de l'atmosphère***, p. 21).

(1) RENAG (Réseau national GPS permanent) : ensemble de stations GPS permanentes, gérées par des laboratoires de recherche français, qui a pour vocation la recherche scientifique et l'observation de la Terre en géophysique interne, externe et en géodésie. À ce titre, ce réseau bénéficie du soutien financier du CNRS/Insu, du ministère de l'Enseignement supérieur ainsi que de l'aide matérielle de plusieurs établissements publics tels que l'IGN, le CEA, l'IRSN, le Cnes. Les données recueillies sont d'un accès public et gratuit.

Sur quel principe fonctionne le GPS ?

Le système GPS a été conçu à l'origine par le Département de la Défense américain (*Department of Defense* DoD) afin de doter les forces armées d'un système de radionavigation à couverture mondiale. Le système est pleinement opérationnel depuis avril 1995 et a été ouvert à la communauté civile. Il permet à quiconque muni du système, d'accéder à sa position, par tous les temps, de nuit comme de jour, en tout point du globe, sur la terre, sur mer et dans l'espace. La constellation comprend plus de 24 satellites évoluant sur une orbite quasi circulaire à environ 20 200 km d'altitude. Ces satellites sont déployés sur 6 plans inclinés par rapport à l'équateur à raison de 4 satellites par plan. Leur période de rotation autour de la Terre est approximativement de 11 h 58 min.



National Executive Committee for Space-Based PNT

Constellation de satellites GPS Navstar et image d'un satellite.

Le système GPS est constitué de 3 segments : le segment spatial (les satellites), le segment utilisateur (l'ensemble des récepteurs) et le segment de contrôle. Ce dernier consiste en 5 stations de suivi qui "traquent" les satellites en permanence puis transmettent leurs informations à une station maître qui recalcule les orbites précises des satellites.

Les signaux émis

Chaque satellite est équipé de plusieurs horloges atomiques au rubidium ou au césium [1]. Les satellites émettent simultanément en bande radio L [2] deux fréquences de longueur d'onde respective 19 et 24 cm modulées par deux codes, le code C/A *(Coarse Acquisition)* et le code P (*Precise*, environ 10 fois plus précis que le premier), ainsi qu'un message de navigation contenant différentes informations comme les éléments orbitaux, les paramètres d'horloge, le temps et des messages de santé.

Mode opératoire et traitement des données

L'antenne GPS doit être fixée sur un support stable (pilier, trépied, bâtiment) et ancrée au sol afin d'être parfaitement solidaire des mouvements de la croûte terrestre. Elle est reliée à un récepteur ultra-précis (permettant notamment des mesures sur la phase du signal). Les récepteurs effectuent des mesures de temps de propagation du signal électromagnétique satellite-récepteur, converties en pseudo-distances (mesures de distances aux erreurs d'horloge près), ainsi que des mesures consistant à compter le nombre de fractions de cycles sur le signal sinusoïdal (porteuse). Ce sont ces dernières mesures, très précises, qui sont utilisées pour la géodésie. Un premier traitement vise à éliminer une grande partie des erreurs (en particulier d'horloge et de modélisation) par une technique différentielle où sont combinés simultanément, à un instant donné, l'ensemble des satellites et des récepteurs. Après quoi, une procédure d'inversion dite par moindres carrés – qui consiste à ajuster les coordonnées initiales afin de minimiser au mieux les écarts entre les différences obtenues entre trajets observés et théoriques en tenant compte de divers paramètres de correction (ionosphère, troposphère, gradients horizontaux, marées terrestres et lunaires, pression de radiation solaire, correction relativiste) et des orbites précises – permet de déterminer les coordonnées relatives très précises entre stations. Étant donné les nombreuses sources d'erreur possibles, la redondance des informations fournies par les stations permanentes conduit à un gain de précision notable par rapport à des données de campagne (erreurs dues au repositionnement, points aberrants, variations saisonnières). Pour rattacher les coordonnées absolues du réseau au système géodésique mondial, il faut intégrer dans le calcul les données de stations IGS *(International Global Navigation Satellite System Service)* dont les positions sont connues avec une très grande précision. Le futur système européen Galileo, prévu pour être opérationnel vers 2010-2013, devrait apporter des performances encore améliorées avec le nombre supplémentaire de satellites disponibles. Il faudra alors remplacer les récepteurs GPS pour recevoir les données issues de ce nouveau système ainsi que du système russe Glonass (Système global de navigation par satellite).

(1) Horloge atomique : elle utilise comme référence (l'équivalent du mouvement de balancier d'une pendule traditionnelle) la fréquence du rayonnement émis lors de la transition atomique entre deux niveaux d'énergie particuliers de l'atome de césium 133 ou de l'atome de rubidium 87.

(2) Bande radio L : partie du spectre électromagnétique définie par les fréquences de 1,4 à 1,5 GHz environ. Des segments de cette bande sont attribués au service de radioastronomie à des fins de recherches spatiales et scientifiques. Elle est notamment utilisée en France pour la Radio numérique terrestre en DMB *(Digital Multimedia Broadcasting)*.

CEA/DAM

Système d'acquisition et de transmission des données à la station GPS permanente DAMAN installée au Népal.

Des réseaux denses de stations permanentes

Le développement des techniques de géodésie spatiale constitue une véritable révolution pour la mesure des déformations de la croûte terrestre, non seulement par leur précision mais aussi par leur capacité à offrir des systèmes de référence unifiés à l'échelle de la planète, tâche pratiquement impossible auparavant. De par sa relative facilité de mise en œuvre, combinée à une diminution des coûts, le système GPS, devenu pleinement opérationnel depuis 1995, est largement utilisé par la communauté scientifique et généralement associé à des approches pluridisciplinaires complémentaires (sismologie, tectonique, géologie, géodésie terrestre, interférométrie radar, DORIS [2]). Il a permis en une dizaine

(2) DORIS *(Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)* : système proposé, en 1982, par le Cnes, le Groupe de recherches de géodésie spatiale (GRGS) et l'IGN, en support de l'expérience d'altimétrie océanographique POSEIDON. Un tel système est dit "ascendant". Le signal est émis par les stations au sol comprenant une balise émettrice et une antenne, et reçu par les satellites, à l'inverse du GPS pour lequel les émetteurs sont à bord des satellites. Le récepteur embarqué effectue des mesures de décalage Doppler sur les deux fréquences – environ 400 MHz et 2 GHz – émises par les stations au sol.

d'années de nombreuses avancées scientifiques sur la connaissance du mode de déformation de la croûte terrestre à toutes les échelles spatiales ainsi qu'à toutes les étapes du cycle sismique, c'est-à-dire avant, pendant et après un séisme. Parmi les régions les plus actives du monde, la faille de San Andreas en Californie a été l'une des premières à être instrumentée. Les mouvements produits lors du séisme de Landers (1992, **magnitude** 7,4) ont ainsi été mesurés directement. Le développement des stations permanentes, avec notamment le réseau IGS *(International Global Navigation Satellite System Service)* – consortium mondial universitaire qui comporte environ 350 stations –, permet d'accéder à des précisions millimétriques. Les données obtenues participent avec d'autres à la détermination du Repère international de référence terrestre [3] (ITRF) et au calcul des vitesses des stations participantes. La densification des réseaux permanents ne cesse de s'accroître au niveau régional, prioritairement dans les zones à forte déformation qui existent généralement en bordure de plaques (Californie, Japon, Taïwan, Sumatra, Chili, Mexique… pour n'en citer que quelques-unes) et dans les zones de déformation intraplaque parfois de plus faible amplitude (Mongolie, Alpes, Jura…). Des phénomènes qui passaient totalement inaperçus auparavant sont alors mis en évidence. Des déformations transitoires, interprétées comme de possibles glissements asismiques (séismes lents) – par exemple dans les régions des Cascades (Canada) et de Guerrero (sud du Mexique) – ou encore comme de possibles précurseurs de séismes – par exemple au Chili –, sont observées.

Les méthodes d'investigation à grande échelle

Parmi les confirmations les plus spectaculaires de la tectonique des plaques, théorie d'abord appelée **expansion des fonds océaniques** (Mémo D, ***Tectonique des plaques et séismes***, p. 90), les anomalies magnétiques fournissent les premières estimations quantitatives du mouvement des plaques. Les matériaux **basaltiques** remontés du **manteau** au niveau de la **dorsale océanique** et épanchés de part et d'autre de son axe s'aimantent, lors de leur refroidissement, selon la direction du champ magnétique terrestre présent à l'époque, et en figent la mémoire lors de la solidification. Or, la direction de ce champ subit des inversions au cours du temps, à intervalles plus ou moins réguliers. En s'éloignant de la dorsale, les roches du plancher océanique conservent cette empreinte, produisant une alternance d'anomalies de largeurs variables, positives ou négatives selon que le champ terrestre était normal ou inverse par rapport au champ actuel. Le phénomène est symétrique de part et d'autre de la dorsale. Ces sortes de codes-barres fournissent ainsi une échelle datée permettant de déterminer le taux d'expansion des océans.
Un grand nombre d'observations proviennent également de la **géomorphologie** et de la sismicité. Les déplacements horizontaux des plaques tectoniques ont longtemps été décrits par des **modèles** établis uniquement à partir d'observations géologiques et géophysiques sur les frontières de plaques. L'un de ces modèles cinématiques de référence est le NUVEL-1. Il suppose que les plaques tectoniques sont rigides et que leurs vitesses de déplacement restent constantes sur 3-4 millions d'années. Parmi les autres méthodes, les mesures géodésiques **VLBI** *(Very Long Baseline Interferometry)* ont permis, par exemple, de mesurer la vitesse d'ouverture de l'Atlantique à 2 cm/an. Il existe maintenant de nouveaux modèles géodésiques, combinant des données géodésiques spatiales, indépendants des modèles géologiques.

Étude de la déformation à travers l'Himalaya du Népal

Poursuivant depuis de nombreuses années une collaboration scientifique au Népal, le Dase et le laboratoire népalais DMG *(Department of Mines and Geology)* ont installé, en 1997, un réseau de 3 stations GPS permanentes et télémétrées [4], en supplément du réseau sismique existant. Ce réseau a été complété de campagnes ponctuelles fournissant des mesures d'une plus grande densité spatiale. La vitesse de **convergence** intersismique au travers de l'Himalaya du Népal, paramètre essentiel dans l'étude du cycle sismique, est débattue depuis plusieurs années. L'analyse de données géodésiques combinées a permis d'apporter des contraintes sur le taux de raccourcissement au travers du Népal central, ainsi que sur la vitesse du mouvement de l'Inde. L'étude des séries temporelles GPS révèle, par ailleurs, des variations saisonnières significatives.

(3) Repère international de référence terrestre (ITRF) : système permettant de se positionner sur Terre mais aussi de positionner tout objet céleste par rapport à la Terre (étoile, Lune, planète, satellite artificiel orbitant autour de notre planète).

(4) M. Flouzat, J.-P. Avouac, B. Durette, L. Bollinger, T. Héritier, F. Jouanne, M. R. Pandey, "Interseismic deformation across the Himalaya of Central Nepal from GPS measurement, 1997-2001", *AGU Fall Meeting*, 2002.

CEA/DAM

Station GPS permanente DAMAN installée en 1997 au Népal à une altitude de 2 150 m.

Après la fermeture de l'**océan Téthys**, l'Inde entre en collision avec l'Eurasie vers une époque estimée entre 60 et 45 millions d'années (Ma), collision qui se poursuit aujourd'hui. Depuis cette période, l'Inde a pénétré l'Asie sur plus de 2 500 km, engendrant les plus hautes topographies présentes sur Terre, tandis que le bloc indochinois est chassé vers l'est. La contribution respective de ces deux mécanismes de la déformation globale reste une question discutée, cruciale vis-à-vis du risque sismique, particulièrement élevé au Népal. Plusieurs **séismes** destructeurs ont frappé la région depuis la fin du XIXe siècle, le dernier en 1934 de magnitude **Mw** 8,4. La connaissance du mode de déformation et ses relations avec la sismicité sont donc indispensables pour l'évaluation du risque sismique.

Dans la continuité des collaborations [5] et travaux menés au Dase sur le cycle sismique [6], au travers d'approches en géomorphologie, géologie et **sismotectonique**, une étude combinant des données géodésiques a été conduite récemment. Cette analyse inclut des données de déplacements verticaux, des données de la station Everest du système DORIS, des données de campagnes GPS de 1995 à 2001, et enfin les stations GPS continues mises en œuvre par le DMG et le Dase, sur une section nord-sud à la longitude de Katmandou [7] (figure 1).

Les données GPS ont été traitées au LDG/Dase dans le référentiel ITRF 2000, en intégrant les données de 20 stations du réseau mondial IGS. Il en ressort que l'Inde se déplace d'environ 35 mm/an [7] (figure 2), taux significativement moins rapide que celui déduit des modèles globaux de la tectonique des plaques (48 mm/an). Cette différence est probablement liée à la difficulté, dans les modèles géologiques globaux, de résoudre les mouvements respectifs des plaques indienne, arabe et eurasienne. La déformation interne à l'Inde, quant à elle, est très faible (inférieure à 1,8 mm/an).

Le raccourcissement au travers de l'Himalaya du Népal central est absorbé sur un chevauchement majeur, le *Main Himalayen Thrust* (MHT), tandis que la déformation est asismique en profondeur. La surface de glissement est bloquée pendant la période intersismique et l'énergie élastique emmagasinée durant la compression est relâchée brutalement lors de séismes de forte magnitude. L'étude a permis de contraindre la zone bloquée sur une distance de 115 km, de la surface jusqu'à une profondeur de 20 km sous la haute chaîne, et la vitesse de raccourcissement dans la région centre-est du Népal à 19 ± 2,5 mm/an [7] (figure 3).

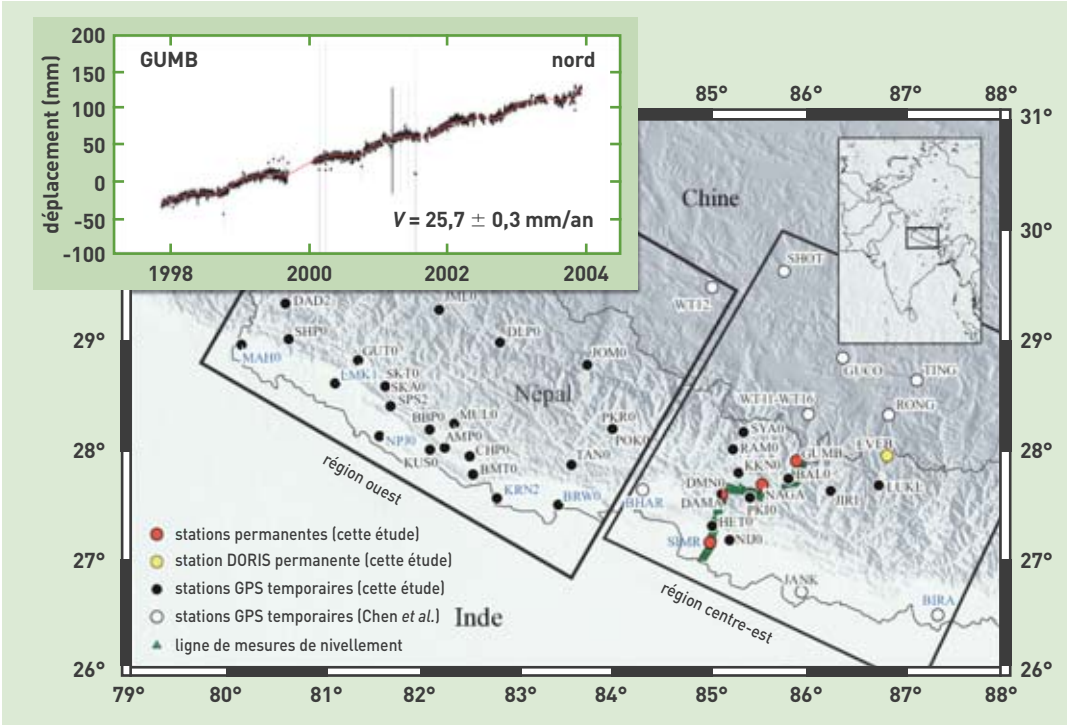
Les séries temporelles GPS révèlent, par ailleurs, des variations saisonnières, notamment sur la composante horizontale perpendiculaire à la chaîne himalayenne (figure 1). Il a pu être établi que celles-ci étaient liées au chargement hydraulique dans la plaine du Gange [8].

(5) F. Jouanne, J.-L. Mugnier, J.-F. Gamond, P. Le Fort, M. R. Pandey, L. Bollinger, M. Flouzat and J.-P. Avouac, "Current shortening across the Himalayas of Nepal", *Geophysical Journal International*, 157, p. 1-14, 2004, 10.1111/j.1365-246X.2004.02180.x.

(6) J.-P. Avouac, L. Bollinger, J. Lavé, R. Cattin et M. Flouzat, *Comptes-rendus de l'Académie des sciences Paris* (section Sciences de la Terre et des planètes/Earth and Planetary sciences) 333, p. 513-529, 2001.
L. Bollinger, J.-P. Avouac, R. Cattin and M. R. Pandey, "Stress buildup in the Himalaya", *Journal of Geophysical Research*, 109, B11405, 2004, DOI: 10.1029/2003JB002911.

(7) P. Bettinelli, J.- P. Avouac, M. Flouzat, F. Jouanne, L. Bollinger, P. Willis and G. R. Chitrakar, "Plate motion of India and interseismic strain in the Nepal Himalaya from GPS and DORIS measurements", *Journal of Geodesy*, 80, p. 567-589, 2006.

(8) P. Bettinelli, J.-P. Avouac, M. Flouzat, L. Bollinger, G. Ramillien, S. Rajaure and S. Sapkota, "Seasonal variations of seismicity and geodetic strain in the Himalaya induced by surface hydrology", *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 266, issues 3-4, p. 332-344, 2008, DOI: 10.1016/J.epsl.2007.11.021.



(D'après Bettinelli *et al.*[7])

Figure 1. Ensemble des données géodésiques utilisées pour le traitement, fournies par les stations GPS permanentes (points rouges), DORIS (point jaune), campagnes GPS (points noirs et blancs). Les noms des stations employées pour la détermination du mouvement de la plaque indienne apparaissent en bleu. En encart à gauche, évolution de la position vers le nord de la station permanente GUMBA et sa vitesse dans le système de référence mondial ITRF 2000. Des variations saisonnières sont visibles. La ligne continue représente le meilleur ajustement théorique aux données tenant compte de deux variations périodiques annuelle et bi-annuelle.

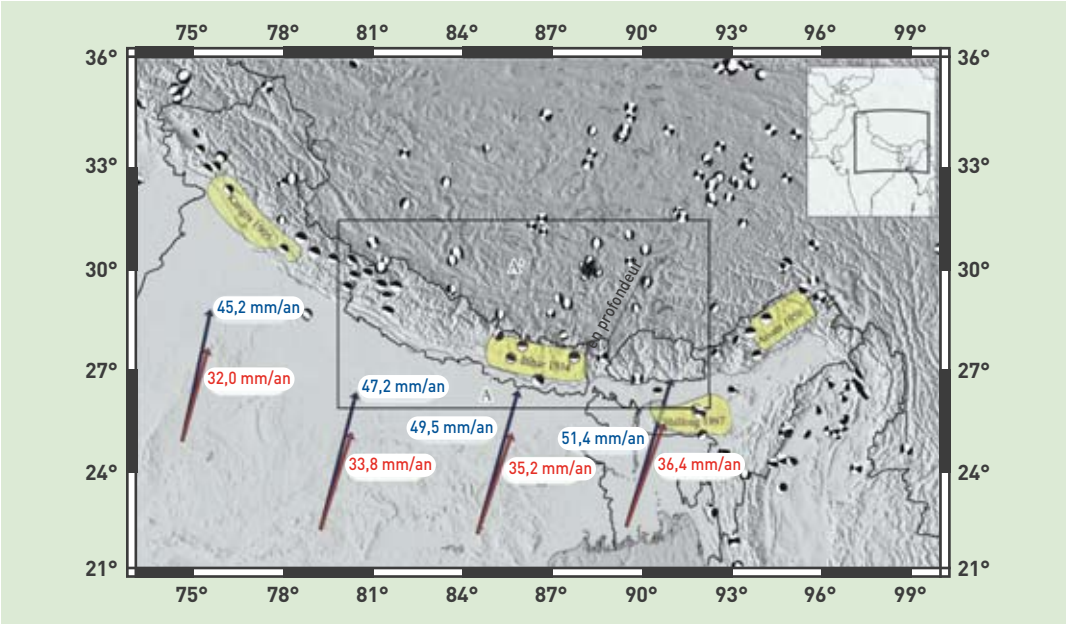
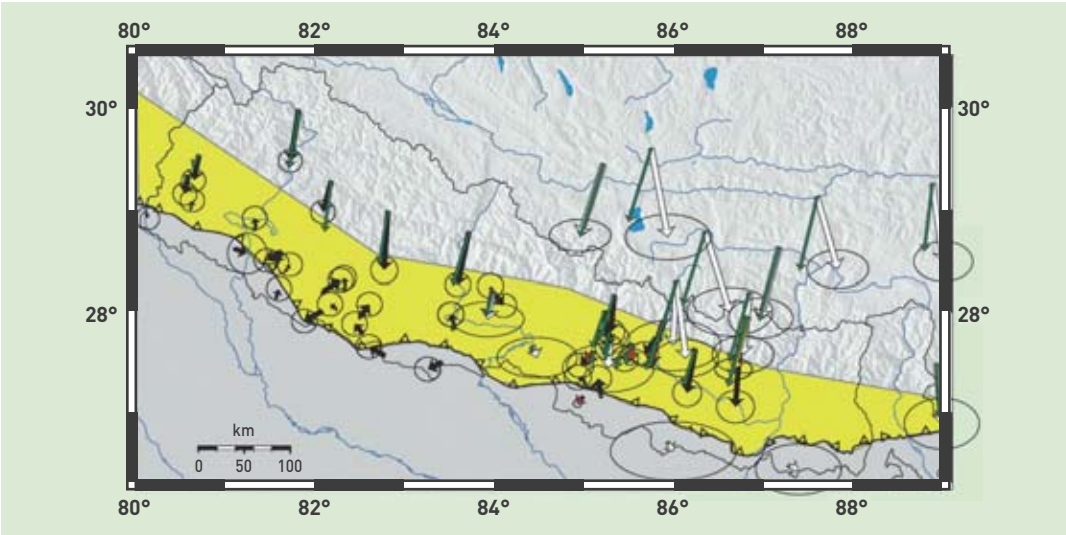


Figure 2.
Carte sismotectonique centrée sur le Népal.
Les zones de rupture des séismes historiques majeurs apparaissent en jaune.
Les flèches bleues représentent le mouvement de l'Inde par rapport à l'Eurasie à partir du modèle global NUVEL-1A.
Les flèches rouges indiquent le mouvement de l'Inde par rapport à l'Eurasie déterminé par Bettinelli *et al.*[7].



(D'après Bettinelli *et al.*[7])

Figure 3.
Vitesses observées des stations GPS par rapport à l'Inde. Les flèches rouges correspondent au réseau GPS permanent, la flèche jaune au système DORIS, les noires aux campagnes GPS, les blanches à d'autres réseaux et les vertes aux vitesses modélisées. La zone jaune représente la géométrie de la zone bloquée du MHT.

Étude du mouvement Afrique-Europe

L'évaluation du risque sismique requiert la prise en compte des failles actives et sismogènes dans la région d'étude. À l'échelle du territoire français, ces failles sont encore assez mal connues et leur vitesse, inférieure ou égale à 1 mm/an, est difficile à apprécier en raison du manque de données et de la faiblesse des signaux. Toutefois, un taux faible de déformation accumulé pendant de longues années peut conduire à un ensemble de contraintes élastiques suffisantes pour produire des séismes modérés à importants sur des failles fonctionnant avec une longue période de récurrence.
La sismicité de la France est généralement attribuée à la convergence des plaques africaine et eurasienne qui se rapprochent à une vitesse d'environ 5 mm/an à la longitude de la France. Cependant, le mode de raccourcissement entre ces deux plaques tectoniques reste mal connu. Dans le cadre des études d'aléa sismique à l'échelle du territoire métropolitain, le CEA collabore depuis l'année 2000 au projet REGAL (Réseau GPS dans les Alpes) créé en 1997, devenu

CNRS Photothèque/Michel Faure

Panorama des Alpes franco-italiennes. La convergence des plaques africaine et eurasienne est le moteur des déformations à l'origine de la formation de la chaîne alpine.
Mesurer la déformation actuelle et en comprendre les mécanismes et ses articulations par rapport aux grandes structures géologiques majeures font l'objet de recherches qui s'appuient notamment sur les mesures GPS acquises par le réseau RENAG.

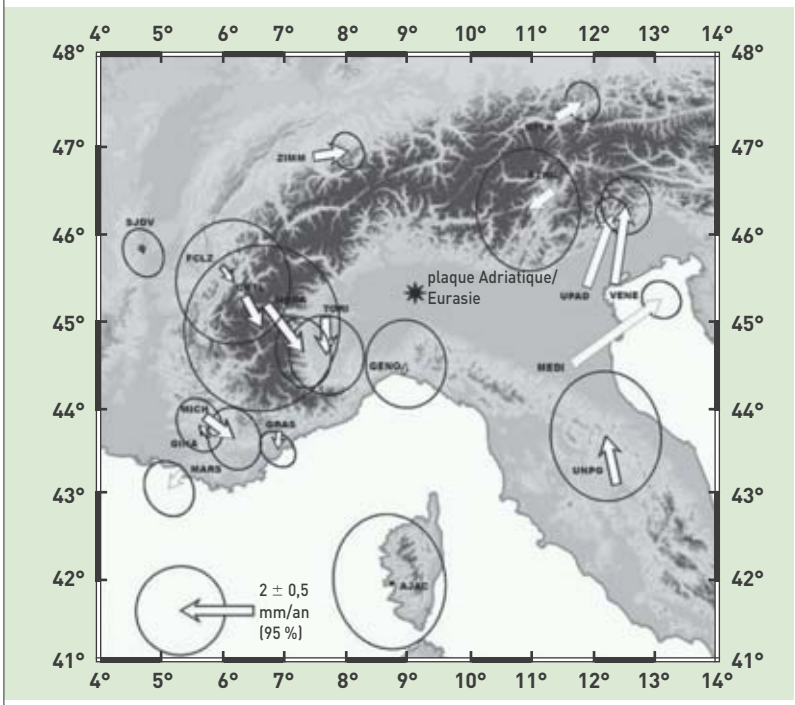
Station GPS permanente TENC (Tence, Auvergne) installée par le Dase pour la surveillance de la faille des Cévennes.

CEA/DAM

RENAG (voir la note (1) p. 95). L'un des premiers objectifs du projet était d'étudier la déformation tectonique dans les Alpes.
Deux stations GPS permanentes ont été installées par le Dase dans la région provençale pour la surveillance des failles de Nîmes (CHRN) et des Cévennes (TENC). Les premiers résultats issus des campagnes GPS, menées dans les Alpes par la communauté scientifique française, et du réseau REGAL [9, 10] apportent déjà des éléments nouveaux. Le champ de déformation dans les Alpes occidentales montre une combinaison d'extension est-ouest et de **décrochement** dextre. L'hypothèse d'une microplaque Adriatique indépendante, qui tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre par rapport à l'Europe, se confirme (figure 4). Elle contrôlerait le régime de déformation à ses limites dans le Frioul, les Alpes et les Apennins. Le mouvement relatif de la plaque Afrique-Europe, dans la Méditerranée occidentale, serait de 40 à 50 % plus faible que les prédictions des modèles géologiques, et d'orientation oblique (de 20° à 30° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre). L'essentiel de la convergence Afrique-Europe semble être à l'heure actuelle absorbée en Afrique du Nord et au sud de la péninsule ibérique, et très peu de déformation serait transférée dans les Alpes.

(9) C. Vigny *et al.*, "GPS network monitors the western Alps' deformation over a five-year period: 1993-1998", *Journal of Geodesy*, 76, p. 63-76, 2002.
J.-M. Nocquet and E. Calais, "Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996-2001", *Geophysical Journal International*, 154, p. 72-88, 2003.

(10) J.-M. Nocquet and E. Calais, "Geodetic measurements of crustal deformation in the western Mediterranean and Europe", *Pure and Applied Geophysics*, 161, p. 661-681, 2004, DOI: 10.1007/s00024-003-2468-z.



(D'après J.-M. Nocquet et E. Calais[10])

Figure 4.
Vecteurs vitesses de déformation sur les Alpes et la partie nord des Apennins, et de la plaque Adriatique par rapport à l'Eurasie, à partir des réseaux GPS permanents RENAG et européens. Compte tenu des incertitudes, la pointe de chaque flèche est située à l'intérieur d'une ellipse noire avec un intervalle de confiance à 95 %.

Des collaborations fructueuses

Les mesures GPS directes s'avèrent indispensables et informatives pour l'étude des déformations de la croûte terrestre dans le cadre de l'évaluation du risque sismique et de la compréhension des relations entre déformation et sismicité. L'acquisition de données nouvelles se poursuit au Népal au travers d'une collaboration tripartite entre le Dase, le DMG et l'Université de Caltech *(California Institute of technology)*, et de collaborations nationales sur le territoire métropolitain, région à plus faible déformation. Les résultats obtenus à partir de données de géodésie spatiale GPS à court terme sur environ 20 ans et ceux provenant de modèles géodynamiques issus de données à long terme restent à discuter.

> Mireille Flouzat
Département analyse, surveillance, environnement
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France

Comment **prévenir** et **prévoir** les **tsunamis** ?

La catastrophe survenue le 26 décembre 2004 dans l'océan Indien a donné une nouvelle dimension aux programmes d'étude et de prévention des tsunamis. Avec le CEA, la France joue dans ce domaine un rôle éminent sur le plan international.

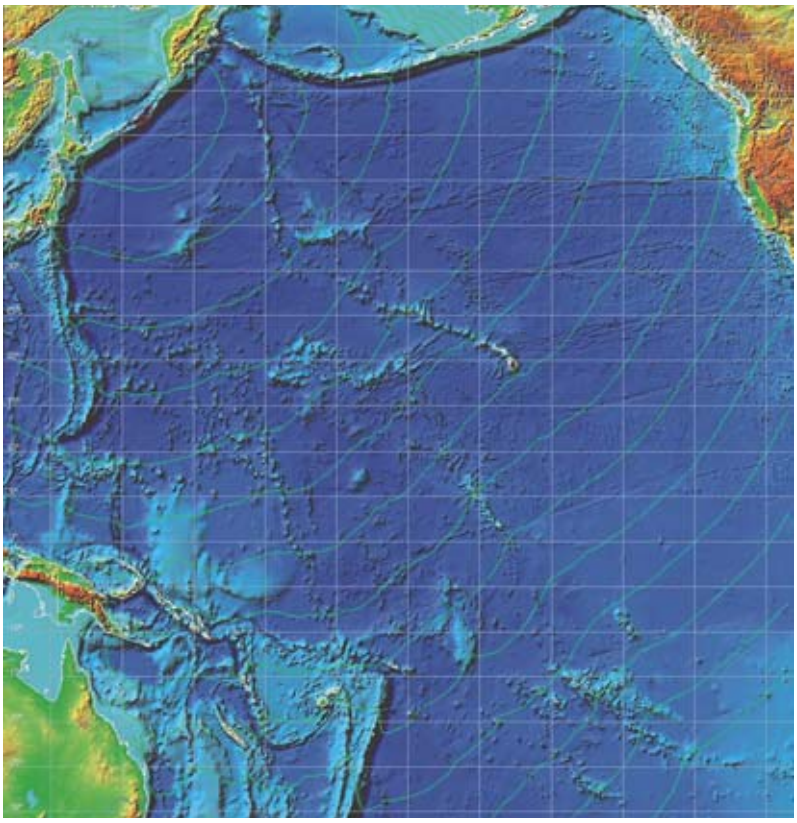
Depuis le 26 décembre 2004, la prise de conscience du phénomène **tsunami** s'est considérablement accrue. Le CEA a pris part à plusieurs projets de recherche qui ont été lancés à la suite de cet événement, ce qui a permis de dynamiser ses activités dans le domaine de la **simulation numérique** et de l'alerte aux tsunamis. Tous ces domaines étaient déjà bien abordés à travers la participation du CEA dans le Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique *(**Pacific Tsunami Warning System**)*, et s'en trouvent confortés pour relever les nouveaux défis en matière de prévention et de prévision.

Les tsunamis existaient-ils avant 2004 ?

La catastrophe du 26 décembre 2004 dans l'océan Indien a suscité une émotion mondiale, relayée par une couverture médiatique sans précédent, et s'est doublée, pour nombre d'entre nous, de la découverte de ce phénomène exceptionnel qu'est un grand tsunami transocéanique. Les géophysiciens connaissaient depuis longtemps les caractéristiques des tsunamis (Mémo E, ***Comment naît et se propage un tsunami ?*** p. 105) et se souvenaient ainsi d'événements récents, capables de provoquer des dégâts importants et des centaines de victimes suite à un **séisme** ou un effondrement sous-marin (1998, Papouasie-Nouvelle-Guinée, environ 2 000 victimes parmi des villages de pêcheurs), mais également d'affecter modérément une mer apparemment peu concernée, au moins à l'échelle d'une vie humaine (2003, suite au séisme de Boumerdès en Algérie, de nombreux dégâts dans les ports et quelques inondations ponctuelles aux Baléares et remous dans certains ports de la côte d'Azur).

Cet événement de l'océan Indien a totalement modifié la perception du phénomène et a sensibilisé toute une population de scientifiques et de décideurs. De très nombreux chercheurs et instituts ont commencé à s'intéresser à ce phénomène, auparavant largement ignoré.

Au CEA, le sujet était d'intérêt depuis les années 1960. À cette époque, sous l'égide internationale de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'Unesco (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture), le premier système d'alerte aux tsunamis se déployait dans le Pacifique, avec son centre opérationnel à Hawaï, durement touchée par plusieurs grands tsunamis transocéaniques dans les années 1940 à 1960.



CEA/DAM

Calcul des temps d'arrivée dans le Pacifique du tsunami déclenché suite au fort séisme de magnitude 8,3 qui s'est produit aux îles Kouriles au nord de l'océan Pacifique le 15 novembre 2006. Il montre que la Polynésie française est touchée environ 11 heures après le séisme, 1 heure séparant chaque courbe.

La présence française du CEA dans le Pacifique conduisit le laboratoire du CEA de Tahiti (archipel de la Société, Polynésie française) à prendre part à ce système d'alerte dès les premières années de sa mise en place, et de cette contribution résulte aujourd'hui le seul centre d'alerte aux tsunamis en fonctionnement, qui soit géré par la France : le Centre polynésien de prévention des tsunamis, basé à Tahiti.

Connaissance et prévention du risque tsunami

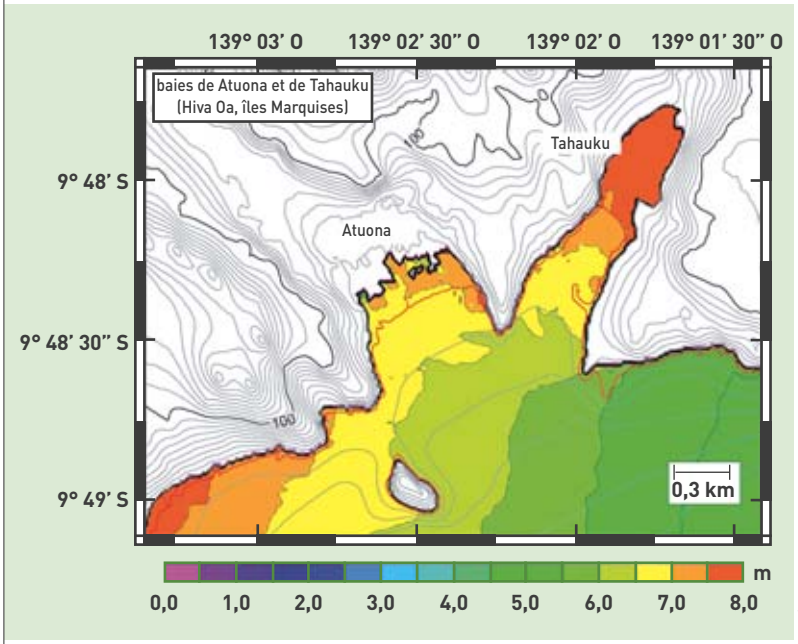
Depuis 1960, le CEA a largement contribué à la connaissance, la prévention et l'alerte des tsunamis, dans deux directions complémentaires. Le premier domaine est l'utilisation de méthodes de simulation numérique afin d'évaluer l'aléa, en validant les **codes de calcul** à partir d'observations d'événements récents

CNRS Photothèque/Franck Lavigne

Plage de Lhok Nga, en janvier 2005, dévastée lors du tsunami de Sumatra du 26 décembre 2004 avec, au fond à droite, les traces hautes de 15 m laissées par les déferlantes sur les pentes de la colline.

CEA/DAM

Les effets de tsunamis dans la baie de Tahauku, près de Atuona, sur l'île de Hiva Oa (îles Marquises). Ces tsunamis provenaient du Chili (30 juillet 1995, magnitude 8,0 ; photographies à gauche et au milieu) ou du Pérou (21 février 1996, magnitude 7,5 ; photographie à droite) et n'ont provoqué que des dégâts matériels.
Par contre, la gêne a été considérable pour les embarcations et les rivages proches ; il y a eu des inondations assez importantes près de ce petit port. De nombreux tourbillons et courants forts ont ainsi rejeté des bateaux à l'extérieur du port, et ces phénomènes peuvent durer plusieurs heures.



CEA/DAM

Figure 1.
Hauteurs maximales d'inondation pour deux baies marquisiennes, calculées pour 5 scénarios de tsunami trans-Pacifique maximisants. Le trait de côte initiale est la ligne rouge, montrant des inondations horizontales pouvant atteindre 300 m (Atuona), voire 600 m (Tahauku).
De telles inondations se sont produites au XXe siècle 3 à 4 fois dans ces baies.

et en simulant des scénarios potentiels pour proposer des actions de *prévention du risque*. Le deuxième axe concerne la mise au point de méthodes de *surveillance et d'alerte en temps réel* à partir des enregistrements sismiques afin de prévenir au plus vite, et seulement en cas de danger, les services de protection civile.

Sur le premier point, les travaux du CEA ont longtemps concerné l'océan Pacifique. Les statistiques disponibles et les événements connus montrent que c'est le bassin le plus touché, et les territoires polynésiens localisés au centre de cet océan sont potentiellement exposés à tous les grands tsunamis provenant des **zones de subduction** entourant la région, ce qui a lieu 5 à 7 fois par siècle. Les études des événements passés avaient révélé que certaines îles polynésiennes étaient systématiquement plus touchées que les autres : les îles Marquises (Polynésie française). Dans cet archipel, les larges baies sont ouvertes directement sur l'océan, sans récif corallien protecteur, et des inondations s'y sont produites plusieurs fois par siècle. Localement, la langue marquisienne possède d'ailleurs un vocable particulier pour ce phénomène remarqué de débordement anormal de la mer, le *Tai Toko*.

Des études ont été menées à l'aide de la simulation numérique, notamment dans le cadre du projet récent ARAI (*protéger* en polynésien), pour lequel le CEA a réalisé les études d'aléa sismique et tsunami. Les résultats ont confirmé la vulnérabilité de ces baies, principalement pour les tsunamis originaires d'Amérique du Sud, mais également des Aléoutiennes, Kouriles, ou Tonga. La probabilité d'inondations atteignant plus de 3 m d'altitude peut y être estimée supérieure à 4 fois par siècle (figure 1). Les autres archipels polynésiens sont moins sensibles, certains tels que la Société et les Australes pouvant cependant être affectés par des vagues montant jusqu'à 3 m, 2 fois par siècle. Ces travaux permettent de contribuer à l'élaboration des Plans de prévention des risques (PPR) en cartographiant les zones inondables.

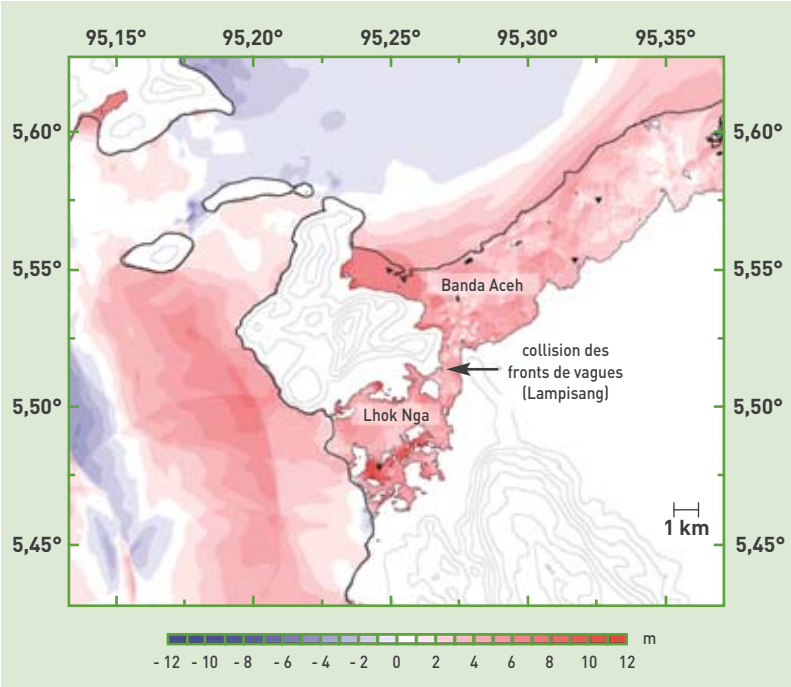
Depuis 2004, le CEA a participé à plusieurs projets de recherche, initiés à la suite de la catastrophe de l'océan Indien. Dans le projet français TSUMOD, financé par l'**ANR** (**Agence nationale de la recherche**) et coordonné par le CEA, les outils de simulation numérique ont été confrontés à la fois à la base de données exceptionnelle de l'événement de 2004 recueillie sur les rivages de l'océan Indien, mais également à d'autres outils de simulation existants. Les résultats obtenus montrent que des simulations s'appuyant sur une connaissance précise de la topographie locale permettent de très bien reproduire le film des inondations catastrophiques à Banda Aceh sur l'île indonésienne de Sumatra (figure 2), et soulignent à nouveau que ces simulations devraient pouvoir être réalisées sur des sites exposés, bien avant qu'un tel événement ne survienne. Simultanément, les outils de simulation sont affinés pour prendre en compte le plus de détails possibles sur la source, le calcul des amplifications locales et l'estimation de marégrammes synthétiques (c'est-à-dire la modélisation de l'évolution du niveau de l'eau dans un port ou une baie, à comparer avec les **marégrammes** réels qui enregistrent notamment les marées hautes et basses, mais aussi les arrivées de tsunamis).

Le CEA avait déjà participé à des projets de recherche européens GITEC *(Genesis and Impact of Tsunamis on European Coasts)* et GITEC-TWO dans les années 1990, pour étudier notamment les tsunamis européens survenus au Portugal (1755, 1969). Le projet TRANSFER (2006-2009) – *Tsunami Risk ANd Strategies For the European Region* – a été soutenu par la **Commission européenne**, dans le cadre du **6e PCRD** (Programme cadre de recherche et de développement). Il visait à réviser les catalogues historiques de tsunamis, à établir des cartes d'inondation sur des sites tests et à proposer des outils pour mettre en place un futur système d'alerte. Dans TRANSFER, le CEA a mené des travaux sur l'impact des tsunamis sur les Baléares et en mer de Marmara (entre les parties européenne et asiatique de la Turquie), reconsidérant l'aléa tsunami en Méditerranée occidentale, qui est méconnu.

Vers les systèmes d'alerte aux tsunamis dans tous les océans

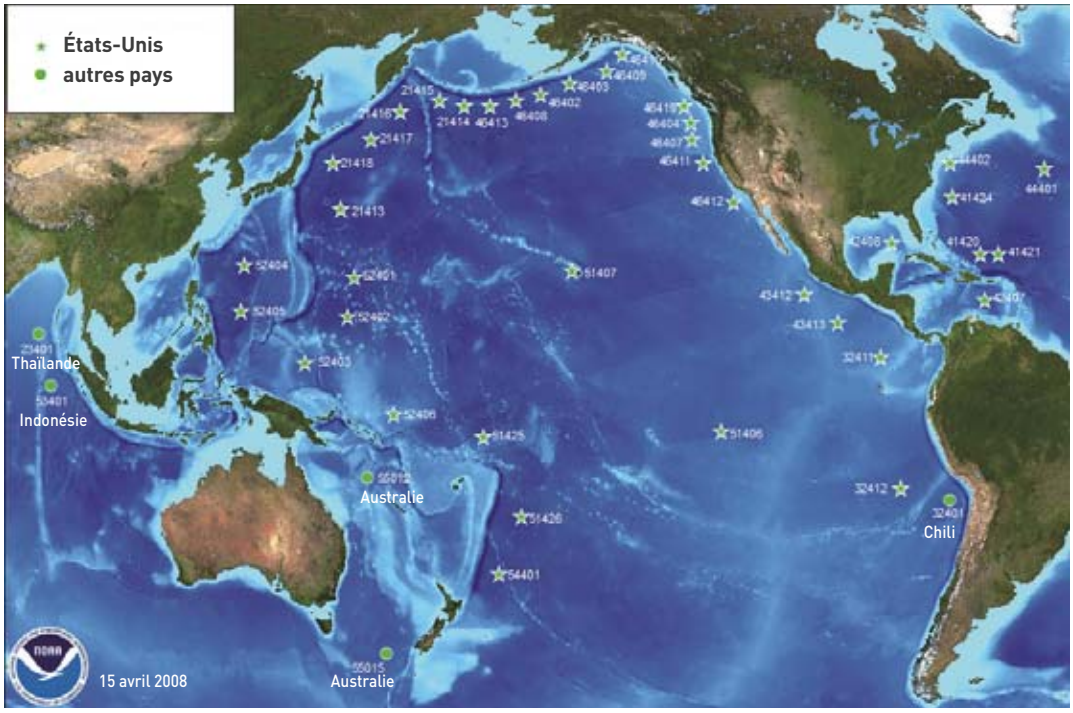
Depuis 2004, la communauté internationale, toujours sous l'égide de l'Unesco, a initié des systèmes d'alerte pour l'ensemble des bassins exposés. Le CEA participe notamment à la construction du futur Système d'alerte aux tsunamis pour l'Atlantique nord-est et la Méditerranée (SATANEM). L'ensemble des études réalisées dans le domaine de la prévention appuie et nourrit les réflexions pour la mise en place de ces systèmes, en permettant de préciser les critères d'alerte. En effet, un système d'alerte efficace ne doit être déclenché qu'en cas d'événement potentiellement dangereux, et est surtout tenu d'éviter des fausses évacuations qui le discréditeraient. Soulignons que la plupart des tsunamis ne sont dangereux que localement, à moins d'une centaine de kilomètres de la source, ou régionalement (< 1 000 km). Seuls quelques événements présentent un potentiel destructeur à plus de 1 000 km de la source, pouvant produire des inondations catastrophiques en de nombreux sites.

Prévoir un tsunami revient essentiellement à deux démarches et résultats complémentaires. La première exploite les résultats des études de prévention évoquées plus haut, sous la forme de bases de données de tsunamis passés, complétés par des simulations de scénarios probables. Les résultats de ces études contribuent non seulement à établir les PPR, mais sont utilisés en cas d'alerte pour connaître les zones potentiellement exposées.



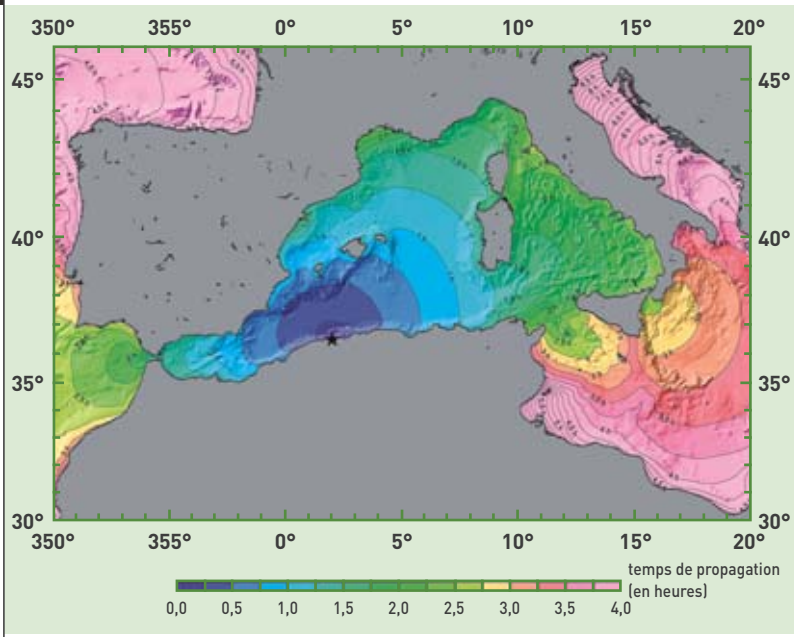
CEA/DAM

Figure 2.
Inondation de la région de Banda Aceh (pointe nord de Sumatra), simulée à partir d'un modèle numérique de terrain précis, et à l'aide des caractéristiques du séisme du 26 décembre 2004. Le trait de côte initiale est le trait noir épais. Cette simulation reproduit l'extension des inondations et la rencontre des flots.



NOAA Center for Tsunami Research

Le réseau de bouées DART *(Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)* installées dans le Pacifique pour suivre en temps réel l'évolution des tsunamis, en mesurant les hauteurs de vagues, et pour alerter les rivages distants exposés.



CEA/DAM

Figure 3.
Simulation des temps d'arrivée du tsunami pour une source localisée sur un **épicentre** hypothétique dans l'ouest de l'Algérie. Les côtes de la Méditerranée occidentale sont potentiellement atteintes entre 15 et plus de 120 minutes après le séisme.

CEA/DAM

Vue du marégraphe de Rikitea (îles Gambier, Polynésie française), appareil servant à enregistrer les variations du niveau de l'océan. Le dispositif d'acquisition et de transmission est placé suffisamment haut par rapport à l'océan, en cas de vagues très élevées.

La deuxième démarche est la prévision en temps réel d'un tsunami, lorsqu'un séisme se produit. Le point de départ est la détection la plus rapide possible de l'événement source pour en caractériser la **magnitude** et la localisation : c'est un défi que peuvent actuellement relever les sismologues en moins de 15 minutes. Simultanément, il faut pouvoir prédire avec le maximum de précision quelles sont les zones potentiellement menacées par un tsunami, où il va être nécessaire de procéder à des mises à l'abri des populations. Ceci est primordial pour des régions telles que la Méditerranée où le délai entre le séisme et l'arrivée de la première vague est extrêmement court, de quelques dizaines de minutes (figure 3). Il convient pour cela d'utiliser les résultats de centaines de scénarios déjà effectués, et comparer les signaux simulés avec les enregistrements réels des stations de mesure du niveau de la mer, et enfin tenir compte des rapports entre ces deux signaux pour recalculer le long du littoral l'inondation du tsunami. Cette méthode est en cours de test dans le ***Pacific Tsunami Warning Center*** à Hawaï et devrait équiper les centres d'alerte du Pacifique dans les prochaines années.

Une contribution active

Le CEA est le représentant de la France au Groupe intergouvernemental de coordination du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique (GIC/SATP) depuis les années 1960. Il contribue aux différentes composantes scientifiques sous-jacentes : l'évaluation de l'aléa et l'amélioration des systèmes de détection et d'alerte. Il a d'ailleurs été sollicité dans ce sens par le Secrétariat d'État à l'Outre-Mer pour définir l'architecture du réseau de surveillance du niveau de la mer adapté pour les régions de Nouvelle-Calédonie, des Loyauté et de Wallis-et-Futuna, ainsi que les critères d'alerte pour ces différentes îles et pour La Réunion, en vue de l'élaboration du Plan d'alerte et de secours spécifique tsunami. Aujourd'hui, le CEA a été désigné par la France pour coordonner le Centre d'alerte aux tsunamis pour la Méditerranée et l'Atlantique nord-est. Le futur centre, fonctionnel en 2012, sera hébergé sur le site de Bruyères-le-Châtel (Essonne), et sera responsable de l'alerte spécifiquement pour la Méditerranée occidentale dans le cadre du système international en construction. À ce titre il est le "point focal" tsunami dans le Groupe de la Méditerranée et de l'Atlantique nord-est et participe aux groupes de travail visant à établir le futur Système d'alerte pour l'Atlantique nord-est et la Méditerranée.

> **Hélène Hébert, François Schindelé** et **Anne Loevenbruck**
Département analyse, surveillance, environnement
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France

POUR EN SAVOIR PLUS

H. Hébert et F. Schindelé, "Peut-on prévoir les tsunamis ?", Collection *Les Petites Pommes du Savoir*, Le Pommier, 2006.

F. Schindelé et H. Hébert, "La surveillance des tsunamis transocéaniques", *Pour la Science*, dossier n° 51 "Les éléments en furie", p. 64-67, 2006.

F. Schindelé et H. Hébert, "À quand la prévision des tsunamis ?", *Geosciences*, 2006.

F. Schindelé, D. Reymond, H. Hébert, P. Heinrich, "Les risques naturels d'origine géophysique aux îles Marquises (Polynésie française)", *Géologie de la France*, 2, p. 37-50, 2002. http://geolfrance.brgm.fr/article.asp?annee=2002&revue=2&article=2.

Conférence à l'IPGP, "Tsunami de l'océan Indien", disponible sur www.ipgp.jussieu.fr/pages/040805.php?name=20050203, février 2005.

Conférence et conférence de presse de la Cité des sciences et de l'industrie, Exposition "Risque sismique", décembre 2005, http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/college/v2/html/2005_2006/conferences/conference_153.htm.

Conférence à l'École normale supérieure de Paris, "Le Tsunami, un an après", janvier 2006, http://www.diffusion.ens.fr/index.php?res=conf&idconf=1059.

MÉMO E

Comment naît et se propage un tsunami ?

À l'origine d'un **tsunami** se trouve un événement géologique soudain (**séisme** sous-marin, **éruption volcanique**, effondrement de falaise...) qui perturbe l'océan initialement au repos (figure). Le phénomène est distinct des raz-de-marée imputables à des causes météorologiques. Près de la source, l'océan commence à osciller pour revenir à l'équilibre sous l'effet de la gravité, ce qui produit une série de vagues dont la longueur d'onde peut atteindre de 40 à 300 km et qui se propagent dans toutes les directions. Imperceptibles au large (quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres d'amplitude), elles s'amplifient lorsque les fonds sous-marins remontent, donc près des côtes, où la vitesse du tsunami décroît pour atteindre quelques dizaines de km/h contre 500 à 1 000 km/h en haute mer. L'énergie se conservant et la longueur des vagues diminuant, leur amplitude augmente : une vague de moins d'un mètre de hauteur dans l'océan peut dépasser plusieurs dizaines de mètres sur la ligne du rivage. C'est là que le tsunami fait déborder la mer et provoque des inondations parfois loin à l'intérieur des terres.

Pour qu'un séisme sous-marin entraîne un tsunami, il doit se produire à faible profondeur (moins de 50 km) et présenter une **magnitude** d'au moins 6,5. À partir de la magnitude 8, un séisme peut générer un tsunami potentiellement dévastateur au niveau d'un océan. Avec cinq tsunamis majeurs au XXe siècle, la zone Pacifique était bien identifiée comme zone à risque, avant qu'intervienne, le 26 décembre 2004 au large de la pointe nord-ouest de l'île indonésienne de Sumatra dans l'océan Indien, l'événement le plus important dans cette région depuis l'installation de réseaux sismiques mondiaux, avec une magnitude estimée à 9,2. La **faille** en cause s'est rompue sur près de 1 500 km. Sa rupture a duré plus de 9 minutes, occasionnant des déplacements atteignant 15 m. Plus de 500 répliques[1] ont été détectées dans les heures qui ont suivi. Le tsunami a inondé les côtes sur plusieurs kilomètres, sur une topographie majoritairement très plate, jusqu'à une altitude de 20 à 30 m ; il a fait environ 280 000 victimes. En Méditerranée, les tsunamis sont plus rares. Il n'y en a pas eu de dévastateurs depuis celui de 1956 en mer Égée qui a vu des vagues monter à 10 m d'altitude sur les côtes grecques. Dans l'océan Atlantique, le dernier grand tsunami est celui qui a ravagé Lisbonne en 1755.

En dehors des moyens de détection proprement sismiques, des moyens spécifiques sont mis en œuvre pour caractériser les tsunamis. Des stations de mesure donnent en temps réel des mesures du niveau de la mer (**marégraphes** en bord de côtes, qui suivent le niveau de la mer et fournissent des **marégrammes**, ou bien **tsunamimètres** au large, qui sont reliés à des capteurs de pression disposés au fond de la mer) et permettent de suivre l'évolution temporelle de la hauteur des océans. Les satellites, dont par exemple les satellites franco-américains Jason, mesurent aussi avec précision la hauteur des océans, mais ne sont pas utiles pour les alertes tsunamis. Pour les tsunamis majeurs, comme en 2004, l'**inversion des données** altimétriques ainsi obtenues permet de décrire la source des tsunamis. L'ensemble des données marégraphiques et satellitaires peut ainsi être inversé pour déterminer la source du tsunami, selon une approche comparable à celle utilisée par les sismologues pour déterminer celle des séismes à partir des **sismogrammes**.

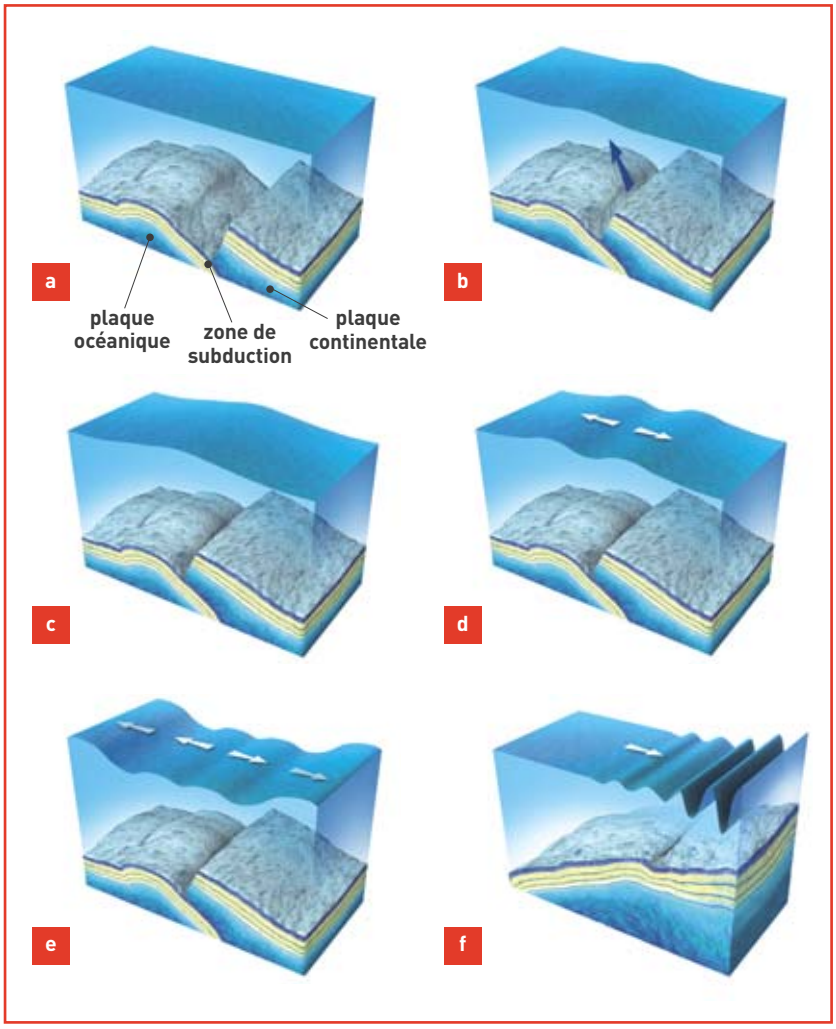


Figure.
Contexte d'une zone de subduction où une plaque océanique glisse sous une plaque continentale (a). Lors d'un fort séisme, la plaque continentale chevauchante est soudainement soulevée de plusieurs mètres, repoussant vers le haut le volume d'eau la surplombant (b). La surélévation à la surface (c) commence à se propager dans toutes les directions (d). Puis, le train de vagues s'intensifie (e). Lorsque le fond sous-marin remonte, à l'approche des côtes, les vagues ralentissent en s'amplifiant (f). Elles peuvent toucher des rivages éloignés de milliers de kilomètres, où les inondations atteindront des points à plusieurs mètres d'altitude dans les cas extrêmes.

(1) Séismes de moindre importance succédant au plus grand (dit séisme principal) d'une série de séismes situés dans une zone proche.

Le radon, **un traceur** atmosphérique

Grâce à sa radioactivité d'origine naturelle, le radon produit dans la croûte terrestre apporte déjà des informations essentielles sur le transport atmosphérique. Désormais, il permet également de suivre les flux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les chercheurs espèrent que ce gaz noble, en tant que traceur de masses d'air, permettra également une meilleure quantification des rejets et des flux de gaz à effet de serre tels que le CO_2.

CEA/DR

Observatoire de Mace Head (Irlande).

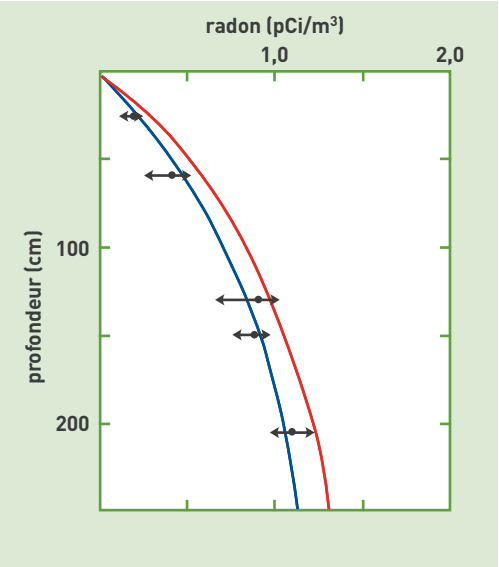


Figure 1.
Variation typique des concentrations de ^{222}Rn en fonction de la profondeur du sol. L'axe des abscisses indique la concentration de ^{222}Rn (pCi/cm³) mesuré dans le sol (1 pCi = 0,037 Bq) tandis que l'axe des ordonnées indique la profondeur du sol (cm). Notez la décroissance des concentrations à proximité de la surface.

Le **radon** se distingue des autres gaz présents dans l'**atmosphère** par sa **radioactivité** naturelle. Il s'agit d'un **gaz rare**. L'**atome** de radon 222 provient de la décomposition du **radium 226**, l'un des descendants de la chaîne de l'**uranium 238**, le plus important de cette catégorie de minerais. Présent dans presque toutes les roches en quantité minuscule (entre 1 à 10 parties par million), l'uranium se trouve en équilibre radioactif avec tous ses descendants, jusqu'au radium. Les taux de formation et de **décroissance** des **radionucléides** sont alors sensiblement les mêmes et ils correspondent à une production de 0,7 à 7 atomes de radon (radon 222) par minute et par gramme de matériau. Une infime partie de ce radon produit par les roches parvient à s'échapper dans l'atmosphère, et quand il n'y parvient pas, l'atome de radon en contact avec la surface terrestre se transforme en suivant la chaîne de l'uranium. Des mesures, réalisées à la surface de la **Terre** et sur de larges étendues, ont montré que le flux de radon s'établit en moyenne à 1 atome/cm²/s (figure 1). Tandis que les chercheurs du CEA, emmenés par Jacques Labeyrie et Gérard Lambert, procédaient à des mesures de flux de radon provenant des sols puis de ses concentrations présentes dans l'atmosphère, l'équipe de Wally Broecker du **Lamont Doherty Earth Laboratory**, de l'**Université de Columbia** (New York), relevait des quantités encore plus petites de radon dans l'eau de mer. Des calculs, prenant en compte les échanges gazeux entre océan et atmosphère, ont également montré que le flux de radon provenant de l'océan s'avérait 100 fois inférieur à celui résultant des surfaces continentales. Cette

différence, observée entre les flux océaniques et terrestres, a permis aux chercheurs d'éclaircir plusieurs aspects de la dynamique et du transport atmosphérique jusqu'alors incompris. Ainsi, sans les études menées sur le radon, de précieux renseignements n'auraient jamais pu être collectés. Les découvertes réalisées depuis ces trois dernières décennies ont donc permis de résoudre une série d'interrogations.

Masses d'air dans les océans : temps de transit et périodes d'échanges actifs

Concernant les océans Atlantique, Pacifique, Indien et circumpolaire Antartique, il faut savoir qu'en raison de la répartition des masses terrestres à la surface du globe mais aussi des flux de radon se situant autour d'un atome/cm^2/s au-dessus des terres émergées, les concentrations de radon y varient, en moyenne, entre 35 et 70 m**Bq**/m^3 (figure 2). Ensuite, il faut également prendre en compte la **période radioactive** du radon, laquelle s'établit à 3,8 jours. L'ensemble de ces données permettent de comprendre que la concentration d'une masse d'air, en quittant un continent avec une concentration de 50 mBq/m^3, puis en transitant 10 jours au-dessus des océans sans jamais rencontrer de continent, décroît à 8,1 mBq/m^3. Ces résultats illustrent comment, en l'absence de toute dilution, la concentration en radon de cet air permet de dater sa dernière rencontre avec un continent. Cette propriété essentielle du radon a permis de démontrer que certaines masses d'air traversent l'océan Pacifique, en moins de cinq jours, c'est-à-dire trois fois plus rapidement que n'importe quel autre moyen de navigation maritime. Pour expliquer ces temps de transit record, les chercheurs ont réalisé des mesures à partir d'avions spécialement équipés pour collecter l'air en hautes altitudes. Leurs résultats établissent, qu'au printemps et en été, l'air situé à la surface du continent asiatique se trouve d'abord très rapidement transporté en altitude, puis projeté, par **jet d'altitude** (vers 10 km), au travers du Pacifique nord. Repris par des courants descendants, cet air atteindra ensuite les couches basses atmosphériques situées au-dessus du continent Nord-américain. Ainsi, grâce à l'introduction des mesures et à la **modélisation** du radon dans des modèles tridimensionnels de l'atmosphère, les chercheurs ont pu mettre en évidence le mécanisme majeur des échanges de polluants inter-continents.

			période T
	$^{238}_{92}U$		
élément gazeux	$^{222}_{86}Rn$		3,825 jours
descendants à vie courte du radon 222	$^{218}_{84}Po$	(RaA)	3 minutes
	$^{214}_{82}Pb$	(RaB)	26,8 minutes
	$^{214}_{83}Bi$	(RaC)	19,7 minutes
	$^{214}_{84}Po$	(RaC')	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$ s
premier élément de la chaîne à vie longue émetteur ß de 0,017 MeV	$^{210}_{82}Pb$	(RaD)	20,4 ans
émetteur ß de 1,17 MeV	$^{210}_{83}Bi$	(RaE)	5,02 jours
émetteur α de 5,30 MeV	$^{210}_{84}Po$	(RaF)	138,3 jours
	$^{206}_{82}Pb$		stable

Tableau.
Chaîne des descendants du radon 222.

Temps d'échange entre les basses et les plus hautes couches de l'atmosphère

Plusieurs **profils verticaux** de concentrations de radon, mesurés au-dessus des continents, témoignent que le nombre d'atomes décroît d'un facteur 10 à 100 en moyenne, au fur et à mesure que l'on s'élève

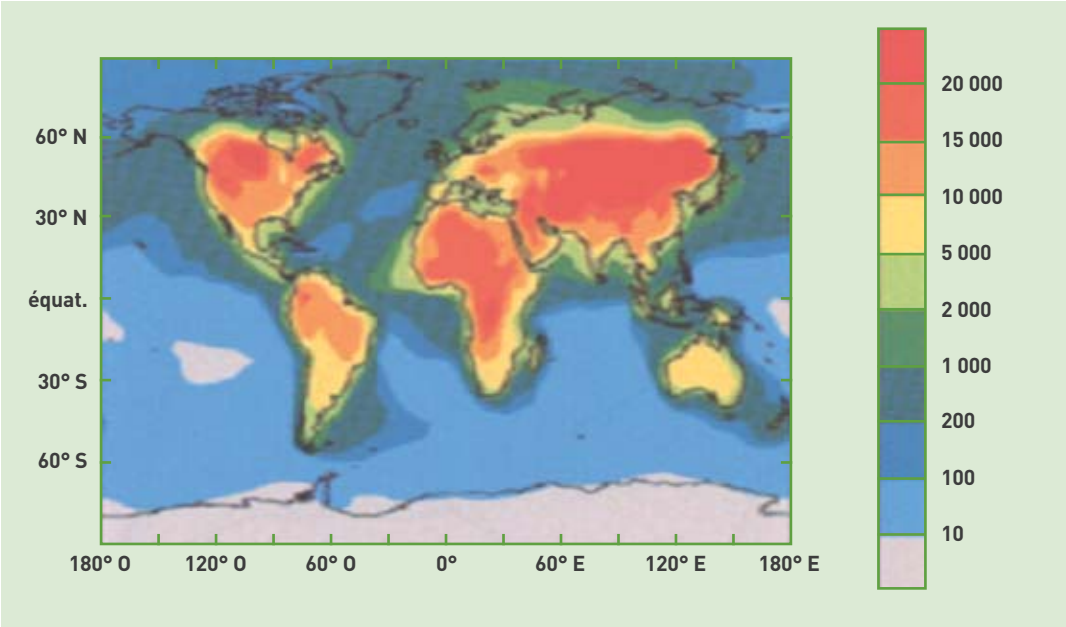


Figure 2.
Concentration de radon dans l'air à la surface de l'atmosphère (mBq · m^{-3}). Il existe de fort gradients de concentration entre les continents et les océans.

CEA/DR

La tour du Traînou, dans la forêt d'Orléans, à partir de laquelle les équipes du LSCE mesurent le CO_2. Son sommet s'élève à 180 mètres.

au-dessus de la surface de la Terre, et cela jusqu'à une altitude de 12 kilomètres. Le regroupement de ces profits verticaux ainsi que les moyennes établies pour les deux saisons d'été et d'hiver ont laissé apparaître une image contrastée : de 0 à 12 kilomètres, la décroissance en radon s'avère de l'ordre de 100, en hiver, contre seulement 10 en été. C'est grâce à la modélisation des processus atmosphériques qu'il a été permis de comprendre cette différence saisonnière puis de démontrer sa liaison étroite avec le phénomène de **convection** se produisant au-dessus des continents. Ainsi, en été, au moment où s'échangent d'importantes quantités de chaleur sensible avec l'atmosphère, l'air passe rapidement de la surface vers les couches les plus hautes : par exemple, une parcelle d'air ayant été en contact récent avec la surface peut se trouver échangée dans des **courants convectifs** ascendants, et cela jusqu'à 10 kilomètres d'altitude. En raison de ce contact rapide avec la surface, l'air d'altitude s'enrichira plus fortement en radon l'été que l'hiver. En altitude la différence de concentration de radon observée entre ces deux saisons, découle donc de phénomènes convectifs.

"Orages radoniques" sur l'océan Indien

C'est en mesurant le radon de manière routinière dans les îles australes (Crozet, Kerguelen, Amsterdam) et à Dumont d'Urville (côte Antarctique) que Georges Polian, ingénieur de recherche au **CNRS**, observa des épisodes, d'une dizaine d'heures environ, pendant lesquelles les concentrations de radon devenaient tout à fait inhabituelles puisqu'elles dépassaient de 10 à 30 fois le bruit de fond régulier mesuré tout au long de l'année. Ce chercheur donna à ces épisodes le nom singulier d' "orages radoniques". Ensuite, il avança que le radon mesuré ne provenait pas du sol des îles Australes en utilisant l'**isotope** 220 de ce gaz.
Restait alors à découvrir l'origine de ces fortes augmentations observées dans les phénomènes de transport à longue distance. Ce sont deux équipes des **universités d'Harvard** et d'**Hambourg** qui expliqueront, indépendamment, la cause de ces "orages radoniques" en recourant à des modèles de transport atmosphérique. C'est ainsi que ces chercheurs ont pu établir que la formation de ce phénomène s'effectuait à partir de masses d'air ayant été en contact récent avec le continent africain avant de se trouver rapidement transportées vers les îles de Crozet, Kerguelen et Amsterdam par **advection**. À ce moment-là, l'air se trouve expulsé du continent en raison du passage d'une basse pression localisée au sud de l'Afrique du Sud, créée au voisinage de la haute pression du **Mascarène** située près de Madagascar. S'ensuit un très fort appel d'air opérant vers le large avant de transiter de l'Afrique aux îles subantarctiques en quelques jours.

Variation des concentrations de radon entre hiver et été

En général, les mesures de radon effectuées au-dessus des sites continentaux montrent des concentrations nettement plus élevées en hiver qu'en été. *A priori*, cette différence ne proviendrait pas des variations de flux saisonnières mais plutôt de la ventilation opérant entre les basses couches atmosphériques (inférieures à 2 km) et les couches plus hautes (entre 2 et 12 km). En effet, l'hiver, les échanges entre les niveaux bas et la **troposphère** libre s'avèrent peu importants, tandis que l'été, ces échanges deviennent beaucoup plus intenses. En conséquence, le radon tend alors à se confiner dans les plus basses couches atmosphériques faisant que les concentrations proches du sol s'élèvent. En revanche, l'été, les échanges entre la surface et la troposphère amènent, des hautes altitudes à la surface, un air pauvre en radon qui provoque une dilution des concentrations et explique l'observation de concentrations plus basses.

Le radon pour mieux quantifier les flux de CO_2 provenant des sols

La capacité des chercheurs à pouvoir mesurer les flux de **gaz à effet de serre** avec précision figure comme l'un des grands enjeux du futur pour mieux appréhender les changements **climatiques**. Mais, bien cerner les flux émis par l'homme suppose préalablement de quantifier les flux naturels de gaz tels que le **CO_2** et le **méthane**. Parmi les techniques existantes, celle de l'**Eddy-corrélation** consiste à mesurer très précisément les concentrations des gaz à deux niveaux d'altitude différents : les différences enregistrées entre ces deux niveaux permettent ensuite de déduire un flux instantané. Pour illustrer simplement la manière de déduire ce flux à partir de concentrations, il suffit de supposer que *h* soit la hauteur de

P. Bazoge/CEA

Prélèvements d'air au-dessus de la forêt d'Orléans.

la couche limite atmosphérique, découplée des couches atmosphériques supérieures et située près de la surface dans laquelle ces gaz sont émis (typiquement entre 0,5 et 2 km) ; la variation de la concentration au temps *t*, *C(t)*, d'un traceur atmosphérique bien mélangé dans cette couche atmosphérique dépend alors seulement de la hauteur, *h*, et peut s'exprimer comme :

$$\Delta C(t) = \frac{F}{h}\, t,$$

où $\Delta C(t)$ représente la variation de concentration observée entre l'instant 0 et l'instant *t*. *F*, le flux du gaz étudié, est supposé constant sur l'intervalle de temps mesuré. La même hypothèse vaut pour la hauteur *h* de la couche limite atmosphérique. Enfin, le flux d'échanges entre les couches atmosphériques basses (jusqu'à 2,5 km) et plus hautes (troposphère libre, entre 2,5 et 10 km environ) est supposé nul. Malheureusement, le flux mesuré par cette technique n'est calculé que pour une superficie faible autour du point de la mesure (typiquement 1 km^2 pour des conditions atmosphériques instables). Le flux à quelques kilomètres du lieu de mesure peut être très différent. Assez tôt, l'idée a donc émergé que des mesures précises de concentrations pourraient permettre de quantifier les flux de gaz tels que le CO_2, le **CH_4** et le **N_2O** grâce à une assez bonne connaissance du flux de ^{222}Rn sur de larges échelles (de l'ordre de 100 km^2). Supposons donc que le flux de radon au-dessus de la région considérée soit connu avec une bonne précision (supérieure à 30 %, par exemple), on peut alors exprimer le rapport des fluctuations des concentrations entre les deux gaz, le CO_2 et le radon, comme :

$$F_{CO_2} = F_{^{222}Rn}\, \frac{\Delta C_{CO_2}}{\Delta C_{^{222}Rn}}$$

Une correction permet de prendre en compte le fait que les océans n'émettent pas de radon. L'exactitude de cette méthode suppose la réunion de plusieurs conditions :

- un flux de radon presque constant au-dessus de toute la surface considérée ;
- des sources de radon et de CO_2 variant spatialement de manière identique ;
- la connaissance du temps passé par le radon au-dessus des océans ;
- des propriétés identiques pour les deux gaz vis-à-vis de leur destruction ou de leur production dans l'atmosphère.

Bien que les deuxième et quatrième conditions ne s'avèrent pas complètement satisfaites, plusieurs équipes du CEA et d'autres instituts ont pu tirer profit de cette méthode pour mesurer les gaz à effet de serre.

Michel Ramonet->LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Système de mesure aéroporté du CO_2 atmosphérique.
En haut, la mallette de prélèvement de flacons ; au centre, l'instrument de mesure du CO_2 en continu, baptisé Condor ; en bas, les bouteilles d'air comprimé utilisées comme référence par l'instrument.

En conclusion, le radon apporte des informations essentielles à la compréhension du transport atmosphérique. **Gaz noble**, il s'utilise aussi bien pour l'étude des processus dynamiques de l'atmosphère que pour la compréhension de transports à longue distance. Plus récemment, une nouvelle voie très prometteuse s'est ouverte qui permettra, sans doute, de quantifier les rejets de gaz à effet de serre et de mieux mettre en œuvre les actions susceptibles d'endiguer le changement climatique.

> Yves Balkanski
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement/Institut Pierre-Simon Laplace
Unité mixte de recherche CEA-CNRS-UVSQ
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

POUR EN SAVOIR PLUS

Y. Balkanski, D. Jacob, R. Arimoto and M. Kritz, "Distribution of Rn-222 Over the North Pacific: Implications for Continental Influences", *J. Atmosph. Chem*, 14, pp. 353-374, 1992.

S. Biraud, P. Ciais, M. Ramonet, P. Simmonds, V. Kazan, P. Monfray, S. O'Doherty, T-G. Spain and S-G Jennings, "European greenhouse gas emissions estimated from continuous atmospheric measurements and radon 222 at Mace Head, Ireland", *J. Geophys. Res.*, 105(D1), 1351–1366, 2000.

A. Gaudry, G. Polian, B. Ardouin, G. Lambert, "Radon-calibrated emissions of CO_2 from South Africa", *Tellus 42B*, 9–19, 1990.

M. Heimann, P. Monfray, G. Polian, "Modeling the long-range transport of ^{222}Rn to subantarctic and Antarctic areas", *Tellus 42B*, 83-99, 1990.

W. Zahorowski, S.-D. Chambers and A. Henderson-Sellers, "Ground based radon-222 observations and their application to atmospheric studies", *J. Environ. Radioactivity*, 76, 3–33, 2004.

Traceurs et jauges nucléoniques éclairent la **dynamique sédimentaire** en milieu **fluvial** et **littoral**

La mécanique des fluides ne pouvant décrire les phénomènes liés aux transports de sédiments par ses seules équations, l'apport des techniques nucléoniques va contribuer à éclaircir des problèmes sédimentaires posés par l'action des courants et des houles.

CEA/DR

Le navire océanographique *Hermano Ginez* en opération de détection de traceurs pour la mesure des coefficients de dispersion sur le fleuve Rio Orinoco (Venezuela).

Les transports **sédimentaires** induits par l'action des courants et des houles demeurent encore mal connus malgré le poids économique des ouvrages et des travaux rendus indispensables pour en contrecarrer les nuisances. Au rang de celles-ci figurent notamment le comblement des retenues, les difficultés de fonctionnement des dispositifs évacuateurs, l'impact des opérations de vidange, l'érosion du littoral, les travaux de dragage, les rejets de toutes sortes dans le milieu aquatique de polluants particuliers… Même en faisant appel aux théories les plus élaborées, la mécanique des fluides demeure encore impuissante à résoudre les problèmes posés au moyen des seules équations. En conséquence, expérimentations et mesures demeurent incontournables aussi bien en milieu naturel qu'en **modèle physique**. Or, le manque de moyens pour réaliser ces mesures entrave la réflexion sur les processus physiques des transports solides et, *a fortiori*, sur l'estimation de leur intensité. Ceci explique le développement des **techniques nucléoniques** (traceurs et **jauges**) utilisant l'interaction **rayonnement ionisant**/matière et leur perfectionnement. Ces techniques offrent, en effet, de précieux avantages en raison de leurs propriétés spécifiques permettant notamment d'opérer :

- des mesures directes de traceurs en nature et en modèle physique ;
- des **mesures lagrangiennes** des déplacements avec observation d'image de la répartition spatiale du traceur à un instant donné ;
- des mesures avec suivi, sur une faible proportion (traceurs), du contenu sédimentaire assurant la rapidité d'auscultation des phénomènes ;
- des mesures en continu des **turbidités**, même au travers d'une paroi opaque…

Ces techniques se sont développées, de manière pragmatique, au cours de tentatives pour anticiper et satisfaire les demandes d'utilisateurs comme certains ports français ou étrangers, des laboratoires d'hydraulique, les directions départementales de l'équipement, les universités, le Centre d'études techniques maritimes et fluviales, l'**Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer** (**Ifremer**), ou encore des organismes internationaux comme l'**Agence internationale de l'énergie atomique** (**AIEA**) et l'**International Water Management Institute**. Aujourd'hui, à côté des

CEA/DR

Mise à l'eau d'un traîneau de détection de radiotraceurs pour la mesure du charriage de sable en zone littorale.

traceurs **radioactifs**, se développent des techniques de traçage non radioactifs (**fluorescents**, radioactivables, magnétiques…). Leurs performances, très variées, permettent de répondre à des problématiques où les traceurs radioactifs ne peuvent s'envisager.

Les traceurs

L'utilisation des traceurs est désormais bien connue. La première étape consiste à introduire un sédiment marqué par un **élément** doté d'une propriété particulière mesurable dans la zone à étudier. La suivante vise à suivre les déplacements du nuage formé par les particules marquées, en fonction de l'espace et du temps, ce qui nécessite l'utilisation de détecteurs appropriés ou de prélèvements. Le cycle s'achève par l'interprétation des résultats quantitatifs en fonction des paramètres hydrométéorologiques enregistrés par ailleurs. Les informations recueillies étant globales, la méthode est dite intégratrice. En fait, il n'apparaît pas possible de déterminer les paramètres fondamentaux tels que la vitesse critique d'entraînement ou la rugosité des fonds. Pour ces expérimentations, les chercheurs utilisent deux sortes de traceurs.

Les traceurs radioactifs

Aujourd'hui, les spécialistes disposent d'un grand nombre de **radionucléides** (tableau) leur permettant d'aborder, en nature ou en laboratoire, les différents problèmes "sédimentologiques" relatifs à une très large gamme de particules allant de la vase aux galets.

- Pour les galets (d'un diamètre supérieur à 5 cm), le marquage s'effectue individuellement avec une source radioactive formée d'un fil métallique d'**iridium 192**, de **tantale 182** ou d'**argent 110** ;
- Pour les sables (de diamètre entre 0,040 à 2,5 mm), choisis en raison de leur distribution **granulométrique** identique à celle des sédiments naturels du site ou comme fraction représentative de ceux-ci, il faut procéder par simulation au moyen de verres spéciaux d'une densité de 2,65 ; ces verres sont ensuite rendus radioactifs après un court séjour dans un réacteur nucléaire.
- Les vases ou sédiments cohésifs (de diamètre inférieur à 40 **µm**) se marquent directement par **chimisorption** avec des solutions radioactives ; les réactions physico-chimiques sont sélectionnées et conduites de telle sorte que le comportement hydrodynamique des sédiments marqués reste identique à celui des sédiments naturels.

L'usage des générateurs d'**isotopes** radioactifs a trouvé d'importants développements dans les expérimentations en laboratoire, notamment en médecine nucléaire, avec une utilisation quotidienne. Systèmes automatiques et protégés, ils permettent d'obtenir aisément une solution radioactive au moment de l'emploi. Les quantités nécessaires au bon déroulement d'une expérience de traceurs sont faibles : 200 galets par site, 0,25 à 1 kg de verre radioactif ou encore 5 à 15 litres de suspension de vase à 200 g/L suffisent généralement, ce qui facilite la manipulation des produits sur le site, leur immersion et surtout leur intégration rapide au milieu. L'introduction de sédiments-traceurs peut alors s'effectuer soit par un dépôt sur les fonds, soit encore par la création d'un nuage de particules en suspension en simulant un rejet, soit enfin par un mélange avec des sédiments fins, dans un puits de drague, avant de procéder aux opérations de rejet. Aux **détecteurs** de rayonnement **à scintillation** de type océanographique, à la fois sensibles et résistants, s'ajoute une électronique de mesure embarquée portative et autonome. En les associant, il s'avère possible d'entreprendre des expériences dans des pays lointains avec des moyens nautiques limités. Il s'agit donc d'une méthode particulièrement robuste et compatible avec des applications de terrain. En effet, les capteurs peuvent trouver leur place soit à la remorque d'une embarcation de dimensions modestes (10 à 20 m de longueur), soit sur le fond pour les mesures de charriage, soit en suspension pour l'étude des rejets (figure 1). Dans ce dernier cas, l'association des détecteurs avec des capteurs de pression permet de donner la profondeur d'immersion. La position du bateau fait également l'objet d'un relevé en continu par un système de radiolocalisation.

isotope	période	forme	domaine d'emploi
In 113m	100 min	dépôt	modèle physique étude de dispersion
Tc 99m	6 h	dépôt	station d'épuration étude de dispersion modèle physique
Au 198	3,7 j	dépôt verre broyé	étude de dispersion rejet de produits de dragage
Hf 181	45 j	dépôt	sédimentologie station d'épuration
Hf 175	70 j	dépôt	sédimentologie station d'épuration
Tb 160	60 j	dépôt	sédimentologie
Ir 192	74 j	verre broyé	sédimentologie
Ta 182	115 j	source	sédimentologie
La 140	40 h	activation	idem Au 198

Tableau.
Exemple de radionucléides utilisés comme traceur pour l'étude de la dynamique sédimentaire.

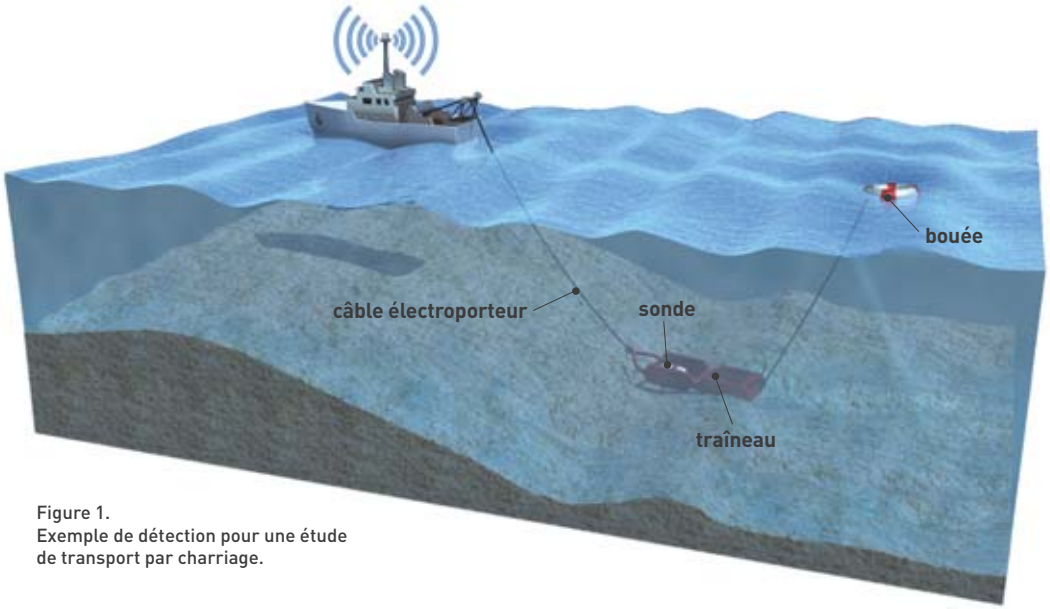


Figure 1.
Exemple de détection pour une étude de transport par charriage.

CEA/DR

Détection de traceurs sur le fond. Étude du charriage des sédiments sableux du Rio Orinoco (Venezuela).

L'opération terminée et les résultats de mesures rassemblés, leur interprétation va apporter un lot de conclusions qualitatives et quantitatives. Pour les déplacements sédimentaires sur les fonds, il s'agit de la ou des directions du mouvement, des vitesses maximales et moyennes pour les déplacements horizontaux, de la quantité de sédiments transférés par charriage, de la remise en suspension ou le recouvrement éventuel… En revanche, pour les déplacements sédimentaires de suspensions, artificiellement rejetés dans le milieu (par exemple, les rejets industriels et urbains ou les produits de dragage) les renseignements apportés concernent l'excursion et la dérive (direction, vitesse horizontale), des coefficients de dispersion longitudinaux et transversaux, de taux de dilution en fonction du temps et de la distance parcourue par le nuage, de la vitesse moyenne de sédimentation des particules, la quantité de matière déposée sur les fonds…

L'utilisation des traceurs dans la nature a donné lieu à toute une série de travaux :

- des études systématiques de sites, comme celles réalisées dans le port et sur le littoral de Zeebrugge (Belgique), dans la baie de Seine, au Cap Breton ou à Honfleur… Dans ce cadre, une équipe du CEA, conduite par Charles Beck, a notamment réalisé une recherche très complète sur le littoral de la mer du Nord, région maritime se caractérisant par une succession de sites avec des fonds sableux sous forme de dunes hydrauliques, de mégarides et de rubans. La technique utilisée est celle du sonar latéral assorti de prélèvements ponctuels mais nombreux. L'immersion de traceurs radioactifs (iridium 192), en huit points situés sur trois zones différentes, à des profondeurs comprises entre - 4,5 m et - 20 m, a permis d'établir des cartes **bathymétriques** précises. Le large éventail des résultats obtenus met en évidence une très grande diversité de la dynamique sédimentaire de part et d'autre du cap Gris-Nez. Ce résultat explique, en partie, la très forte érosion des plages situées au nord-est de Wissant et le transit sédimentaire, intense mais très variable selon la profondeur, produit par l'action des houles et des courants de marées. Ce transit demeure faible (environ 0,03 $m^3/m/j$) si la profondeur dépasse -15 m mais atteint 0,2 $m^3/m/j$ si la hauteur de l'eau, à basse mer, reste inférieure à - 5 m. Il convient de noter que des calculs théoriques conduisent à une estimation moyenne de 0,4 $m^3/m/j$, à une profondeur de - 18 m, pour des courants de 0,5 m/s à 1 m des fonds : des valeurs calculées non encore confirmées par les mesures ;
- des études pour connaître le rejet des produits de dragage, par exemple, celles effectuées dans les ports du Havre, d'Antifer, de Lorient, de Singapour…
- des études sur le recyclage des produits de dragage opéré dans les ports de Lorient et notamment de Zeebrugge où il a été observé que plus des 2/3 des matériaux rejetés à 18 km au large de la côte, par des fonds de - 15 m, reviennent rapidement (moins de 100 jours) vers la côte sous l'action des courants de marée. Ces matériaux participent donc au transit littoral avant de se redéposer dans les eaux calmes des bassins portuaires. Ce recyclage, sur une zone longue de plus de 60 km, a été mis en évidence grâce à des éléments radioactifs (le **hafnium** et le **terbium**) inexistants dans la nature. Réalisées par des laboratoires spécialisés, certaines mesures ont nécessité une dilution de 10^{-14} ;
- des études à caractère général sur le mécanisme de formation du "bouchon vaseux/crème de vase" dans un estuaire ou encore l'action de la houle sur les transports sédimentaires ;
- des études sur les transports solides en régime torrentiel dont la complexité fait intervenir trop de para-

mètres pour un traitement par les seuls **modèles** mathématiques. D'où, le grand nombre d'expériences réalisées notamment dans les Pyrénées orientales (Verdouble, Cady, Têt, Lentilla, Agly), dans les Vosges (Bruche, Mossig, Doller), en Corse (dans le Fium'Orbo) mais aussi, et avec beaucoup de succès, sur les cordons littoraux de galets ;

- des études de rejets sous forme particulaire (matières organiques et argileuses). Celles-ci aboutiront d'abord à l'analyse systématique des rejets urbains en mer contaminés par des polluants chimiques et biologiques ; mais aussi au traitement de la pollution mécanique des rivières (Doubs) par les fines particules remises en suspension par le dragage. Les résultats de ces études ont donné lieu à l'élaboration de recommandations sur les conditions d'extractions des sables et graviers ;
- des études sur les **modèles physiques** et **canal de laboratoire** avec, à la clé, les premières théories et techniques expérimentales d'estimation du transport solide dans les écoulements à surface libre. Ces travaux s'appuient sur la **méthode d'Euler** consistant à mesurer une quantité, en un point fixe et en fonction du temps. Or le transport permanent de la couche supérieure du lit sédimentaire résulte d'une série alternée de sauts et de périodes de repos des grains de sable dépendant des forces hydrodynamiques instantanées et imprévisibles, caractéristiques d'un processus aléatoire. Les traceurs radioactifs, en permettant des mesures lagrangiennes, se révèlent donc très utiles pour déterminer les trajectoires des particules isolées et des groupes de particules tout au long d'un canal. D'autres travaux, également réalisés en canal de laboratoire, établissaient simultanément le débit solide par charriage et le débit solide en suspension. Récemment, des traceurs ont également été utilisés pour l'étude des mécanismes de rejets de produits de dragage en canal. Dans toutes ces hypothèses, les traceurs radioactifs démontraient leur rôle prépondérant et, semble-t-il, irremplaçable en raison de leur grande sensibilité de mesure.

CEA/DR

Détection de radiotraceurs sur grand estran découvrant sur la côte ouest du Cotentin.

Ces nombreuses études plaident en faveur de l'utilisation des traceurs dans la nature, notamment en raison de leurs larges potentialités et de leur souplesse d'utilisation. En effet, l'expérience acquise montre que les différents procédés fournissent une bonne estimation des quantités de sédiments transportés avec, dans le pire des cas, une incertitude se situant entre 50 à 100 %. Pour des mesures en nature, il s'agit d'un bon résultat sachant qu'entre les diverses formules empiriques d'estimation du débit solide à l'équilibre se produit souvent un facteur 10 d'écart et parfois plus ! Néanmoins, la

CEA/DR

Immersion de radiotraceurs pour l'étude de rejets de produits de dragage.

CEA/DR

Exemple de clapage réalisé par une drague de type Splic-hull dredger.

technique des traceurs reste encore limitée dans l'espace (1 km^2) et dans le temps (au plus, six mois) mais aussi par l'impossibilité physique de détecter les radionucléides utilisés au-delà d'une profondeur d'enfouissement de 0,8 m. Récemment, à l'occasion d'une étude des rejets de produits de dragages réalisée pour le port de Zeebrugge (Belgique), ces limites ont été largement repoussées à quelques dizaines de km en milieu marin. Naturellement, l'ensemble de ces manipulations demeurent soumises à autorisation de l'**Autorité de sûreté nucléaire** (**ASN**).

Les traceurs non radioactifs

Tandis que certains d'entre eux existent depuis plusieurs années, certains autres se trouvent en cours de développement :

- les traceurs fluorescents, essentiellement destinés aux particules sableuses, peuvent se détecter sur **estran**, *in situ* ou par prélèvements suivis de mesures en laboratoire ;
- les traceurs radioactivables marquent les sédiments (vases ou sables) au moyen d'un élément activé en réacteur, choisi en fonction des éléments-traces présents, naturellement, sur le site d'étude ; les mesures s'opèrent par prélèvement, puis par activation en réacteur et enfin, par analyse de la teneur en élément-traceur dans l'échantillon, selon la méthode de **spectrométrie gamma** bas bruit de fond ;
- les traceurs magnétiques, en cours de développement, tant au niveau des traceurs eux-mêmes que des moyens de détection, permettent d'envisager plusieurs principes : la résonance paramagnétique électronique (RPE), la **susceptibilité magnétique**, le magnétisme total…
- les traceurs marqués par une étiquette **radio-fréquence passive** (**RFID**) de quelques mm de diamètre concernent uniquement les galets dont la mesure s'effectue directement sur le site (bancs découvrants) au moyen d'une antenne portative.

Les traceurs fluorescents et activables ont été récemment utilisés, conjointement, pour la réalisation d'une étude sur les transferts de solides dans les grands réseaux d'irrigation (Jamrao canal system) au Pakistan (province du Sindh).

Les capteurs radiométriques ou jauges nucléoniques

Leur efficacité réside dans l'association optimale d'une source de rayonnement ionisant et d'un détecteur adapté. L'interaction rayonnement/matière examinée permet alors de mesurer, en continu, la concentration ou la densité de sédiments en suspension ou déposés. Cette opération rend possible des mesures non destructives, sans faire de prélèvements, et cela, même à travers une paroi opaque ou directement dans l'eau. Ces informations, traitées en temps réel grâce à un calculateur, offrent une aide à la décision ou encore à la gestion d'ouvrages et d'une installation.

Les spécialistes distinguent deux types de dispositifs (figure 2). D'abord, les **jauges à transmission** où la source et le détecteur prennent place de part et d'autre de l'échantillon à mesurer ce qui permet d'apprécier le rayonnement ayant traversé la matière. Ensuite, les **jauges à diffusion** où la source et le détecteur se situent du même côté de l'échantillon ; dans ce cas, on s'intéresse au rayonnement ayant diffusé dans la matière. Parmi les différents types de jauges figurent notamment :

- les appareils de terrain plus particulièrement adaptés :
  – aux mesures de turbidité directement *in situ* ou à travers une canalisation ;

CEA/DR

Jauge à transmission JTD3 (à gauche) et jauge à diffusion JTT4 (à droite).

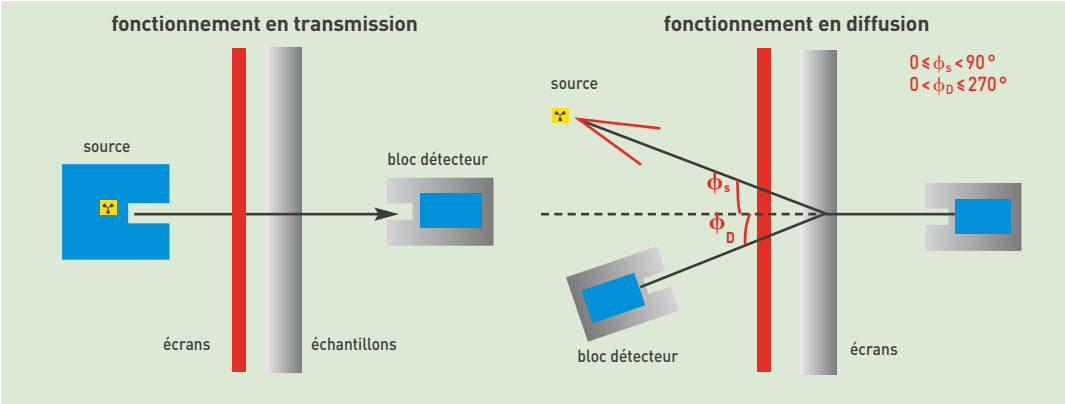
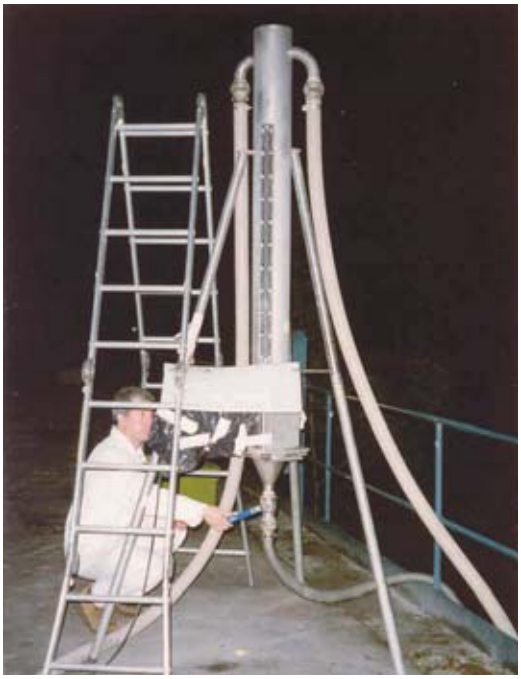


Figure 2.
Les deux dispositifs de jauge.

– aux mesures du **profil vertical de densité** des matériaux déposés dans les chenaux envasés, puits de drague et retenues de barrage. Les informations obtenues, complémentaires de celles fournies par les sondeurs à **ultrasons** ne localisant que l'interface eau/vase liquide, permettent de repousser la limite des profondeurs navigables. Pour un chenal classique de navigation, il s'agit d'une économie de plusieurs M€ par an ;
– au pilotage des vidanges de retenues de barrages ;
– aux mesures des variations de hauteur des formes sédimentaires et de la direction du transport.

- les appareils de laboratoires spécialisés, d'une part dans les mesures non invasives et non destructives du profil de densité d'une carotte sédimentaire ; d'autre part, dans la mesure du gradient de tassement des sédiments fins en fonction du temps, de la hauteur du culot, de la concentration initiale de la suspension, de la hauteur du volume de sédimentation.

Tous ces dispositifs respectent les normes d'irradiation au contact et leur mise en place requiert une autorisation de l'ASN. Leur conception les rend utilisables par des personnels n'étant pas directement affectés au travail sous rayonnement ionisant. Le plus souvent, la précision de ces appareils s'établit à 1 % avec un degré de confiance de 68 %. Ils s'avèrent d'autant plus performants et sans concurrents que la concentration devient élevée. Toutefois, en dessous de 1 g/L, d'autres procédés s'imposent.


CEA/DR

Jauge SERES en position de mesure sur le barrage de Genissiat.

En conclusion, force est de constater que l'industrie, la navigation, le tourisme tendent parfois à exploiter et à domestiquer, avec plus ou moins de brutalité, les fleuves, les estuaires et le littoral. Le recul des côtes, l'extraction des granulats, les rejets des eaux usées et des produits de dragage, les vidanges de retenues de barrages… figurent au rang de problèmes d'actualité. Leur résolution passe par une connaissance précise des mécanismes de transport, de dilution, de sédimentation, de mesure des paramètres qui régissent ces processus afin de définir la meilleure gestion possible des milieux fluviaux, estuariens et côtiers. Confortés par les résultats de nombreuses études, les traceurs et les jauges nucléoniques demeurent, actuellement, l'un des rares moyens permettant aux ingénieurs, aux hydrauliciens et aux chercheurs de disposer des informations et des mesures indispensables à leurs missions.

Parmi les domaines à fort impact économique et écologique, six d'entre eux devraient voir leur développement se confirmer voire s'intensifier. Il s'agit de :

- la gestion des travaux de dragage dus au rejet des produits de dragage-navigabilité dans les chenaux envasés ;
- la stabilité du littoral confronté à l'action de la houle et des courants sur les transports sédimentaires ainsi que l'extraction en mer de granulats ;
- les rejets urbains et industriels sous forme particulaire dans les estuaires et en mer ;
- les mesures en continu des matières en suspension (MES) ;
- les études pour la gestion des vidanges de retenues de barrage.

Avec l'ouverture des frontières européennes, ces techniques devraient permettre aux ingénieurs français du génie civil en charge des problèmes posés par les transports solides, de pouvoir proposer des procédés originaux, performants et d'avant-garde, comparés à ceux de leurs concurrents dont la plupart ne disposent pas de cet atout complémentaire que sont les traceurs et les jauges nucléoniques.

> Patrick Brisset
Laboratoire d'intégration des systèmes
et des technologies (List)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Saclay

Glossaire

accéléromètre : dispositif de mesure de l'accélération.

actinides : radioéléments naturels et/ou artificiels de **numéro atomique** (nombre de **protons** du **noyau**) compris entre 89 (actinium) et 103 (lawrencium).

activité : nombre de **désintégrations** par unité de temps au sein d'un **radionucléide** ou d'un mélange de radionucléides, exprimé en **becquerel (Bq)**.

advection : transfert d'une propriété par le mouvement d'un fluide (par exemple le mouvement naturel horizontal d'une masse d'air).

albédo : capacité d'une surface à réfléchir la lumière. L'albédo de la Terre est de 0,3, celui d'une surface enneigée peut être de 0,6 à 0,8.

algologie : science traitant des algues microscopiques (diatomées) qui permet, à l'instar de la **palynologie**, de reconstituer, à partir de **sédiments** lacustres, des données climatiques du passé.

algorithme : enchaînement des opérations logico-mathématiques et règles opératoires nécessaires à l'accomplissement d'un calcul.

ammoniac (NH_3) : molécule pyramidale, à base triangulaire, comprenant de l'**azote** (N) qui est au centre tandis que l'**hydrogène** (H) occupe trois des quatre sommets, le quatrième étant occupé par 2 **électrons**.

analyse statistique en composantes principales (ACP) : méthode mathématique d'analyse des données consistant à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre n variables aléatoires.

analyte : substance chimique détectée et mesurée en laboratoire.

anode : électrode où a lieu une réaction électrochimique d'**oxydation** (menant à la production d'**électrons**) par opposition à la **cathode** où se produit une réaction électrochimique de réduction (menant à la consommation d'électrons).

anticyclone : masse d'air de haute pression **atmosphérique** tournant dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord et en sens inverse dans l'hémisphère Sud ; il se caractérise par un air ascendant qui empêche la formation de nuage et se trouve associé au temps sec et clair.

antigène : molécule capable de provoquer une réponse immunitaire (induction d'anticorps).

argent (Ag) : élément chimique de **numéro atomique** 47 qui fait partie des métaux de transition.

atome : constituant de base de la matière ordinaire, composé d'un **noyau** (constitué de **neutrons** et de **protons**) autour duquel gravitent des **électrons**.

azote : élément chimique de symbole N et de **numéro atomique** 7.

banc gammamétrique : dispositif d'auscultation mesurant l'émission de particules gamma en continu le long d'un échantillon (une colonne de sol) ; il peut avoir deux utilisations : soit la détermination de la densité, de la porosité ou de la teneur en eau, en mesurant les capacités d'absorption de l'échantillon placé entre une source émettrice de **rayons gamma** et le détecteur ; soit encore, le suivi de la migration d'un traceur **radioactif** à l'intérieur de l'échantillon au cours d'une expérience de traçage.

basalte : roche **volcanique** noire, issue d'un **magma** refroidi au contact de l'eau ou de l'air, constituant principal de la couche supérieure de la **croûte océanique**. Voir **Mémo A**.

bathymétrie : science de la mesure des profondeurs de l'océan pour déterminer la topographie du fond de la mer.

becquerel (Bq) : du nom du physicien français Henri Becquerel. Unité de mesure de l'**activité** nucléaire (1 Bq = 1 désintégration de **noyau atomique** par seconde). Le becquerel est une unité très petite ! L'activité nucléaire était précédemment mesurée en curies : 1 **Ci** = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq.

benzène : hydrocarbure monocyclique (C_6H_6, également noté Ph-H, ϕ-H ou encore Ar-H) ; constituant naturel du pétrole brut, il s'agit d'un solvant liquide cancérigène très utilisé dans l'industrie chimique.

béryllium (Be) : premier représentant des métaux alcalino-terreux, de **numéro atomique** 4, dont le ^{7}Be, l'un de ses **radio-isotopes**, a une **période** de 53,12 jours.

bilan radiatif : différence entre l'énergie reçue du Soleil et celle réémise vers l'espace. On parle d'**équilibre radiatif** lorsque la quantité d'énergie reçue est égale à la quantité d'énergie réémise.

biogène : facteur indispensable à la constitution de la matière vivante ; élaboré par et dans un organisme vivant, comme par exemple le squelette calcaire du corail, la nacre...

biologie moléculaire : discipline scientifique au croisement de la génétique, de la biochimie et de la physique dont l'objet est la compréhension des mécanismes de fonctionnement de la cellule au niveau **moléculaire** ; désigne également l'ensemble des techniques de manipulation des acides nucléiques (ADN, ARN) appelées aussi techniques de génie génétique.

biomasse : quantité totale de matière (masse) de toutes les espèces vivantes présentes dans un milieu naturel donné.

biome : chacun des grands milieux du globe terrestre (océan, forêt tropicale, désert, toundra, savane, prairie...).

biosphère : ensemble des **écosystèmes** de la planète, comprenant tous les êtres vivants et les milieux où ils vivent.

brome (Br) : élément chimique de la famille des halogènes de **numéro atomique** 35.

calculs de Monte-Carlo : méthode de résolution approchée d'équation utilisant des valeurs de paramètres tirés au hasard dans certains intervalles.

calotte glaciaire : étendue de glace recouvrant une grande surface continentale sur plusieurs milliers de kilomètres, située au voisinage des pôles. L'épaisseur de la calotte varie de 1 à plusieurs km.

calottes Laurentide et **Fennoscandienne : calottes de glace** qui recouvraient une partie de l'Amérique du Nord (**Laurentide**) et une partie de l'Europe du Nord (**Fennoscandie**) durant les **époques glaciaires**. Leur existence entraînait un abaissement du niveau des océans au paroxysme glaciaire, il y a 21 000 ans, d'environ 110 m par rapport au niveau actuel (la contribution de l'Antarctique étant de 10 m supplémentaires). Les dernières traces de ces calottes disparaissaient il y a 7 000 ans.

canal de laboratoire : cas particulier de **modèle** physique simple en raison d'un écoulement monodimensionnel permettant de s'intéresser à des phénomènes plus fondamentaux.

carbonate de calcium : de formule brute **$CaCO_3$**, il est composé d'un **ion carbonate CO_3^{2-}** et d'un **ion calcium Ca^{2+}**. Il est fabriqué à partir d'**ions bicarbonate HCO_3^-** et d'ions calcium :

$Ca^{2+} + 2\ HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + H_2CO_3$ (acide carbonique).

carbone (C) : élément chimique du groupe des cristallogènes, de symbole C, de **numéro atomique** 6 et de masse atomique 12,0107. Il possède deux **isotopes** stables dans la nature (^{12}C et ^{13}C), le ^{14}C a une **période** de 5 730 ans.

carbone graphitisé : phase **adsorbante** constituée de feuillets de **graphites** utilisée en **chromatographie liquide** comme substrat de séparation.

Carboxen : nom commercial d'un **polymère** absorbant utilisé pour l'extraction de **composés organiques** volatils.

catéchol (pyrocatéchol) : s'utilise comme antioxygène car il inhibe les réactions en chaîne d'**oxydation** en captant les radicaux ; de même, il empêche la **polymérisation** spontanée de certains composés éthyléniques comme le styrène. Produit de dégradation du **naphtalène**.

cathode : pôle positif d'une pile électrique, ou négatif pour une électrolyse.

centile : terme de statistique descriptive désignant chacune des 99 valeurs qui divisent les données triées en 100 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/100 de l'échantillon de population.

césium : élément chimique de symbole Cs et de **numéro atomique** 55.

chimiluminescence : phénomène de réaction chimique ayant pour conséquence la production de lumière.

chimisorption : adsorption d'une **molécule** sur une surface avec création d'un lien chimique.

chlore (Cl) : élément chimique de **numéro atomique** 17 qui fait partie des halogènes. **Dichlore (Cl_2)** : **molécule** formée de deux **atomes** de chlore ; il s'agit d'un gaz dans les conditions normales de pression et de température.

chloroforme (trichlorométhane) : composé chimique organochloré de formule $CHCl_3$.

chrome : élément chimique métallique de symbole Cr et de **numéro atomique** 24.

chronostratigraphie : branche de la stratigraphie (discipline qui étudie la succession des différentes couches géologiques ou strates) dont l'objet est l'étude de l'âge des couches de roches en relation avec l'échelle de temps et qui a pour but de classer les différentes séquences et époques des dépôts de roches en fonction de la région géologique pour établir un registre géologique complet de la Terre.

cinétique : lié à la vitesse des réactions chimiques.

climat : la notion la plus classique résulte d'une approche spatiale où la Terre est découpée en zones climatiques en fonction des conditions **météorologiques** qui y règnent aux différentes saisons. L'autre notion correspond à une approche temporelle globale où les climatologues s'intéressent aux modifications des conditions météorologiques intégrées sur l'ensemble du globe.

climatologie : étude des familles de conditions **météorologiques** susceptibles d'affecter les différentes régions sur des périodes de temps longues. Elle fait appel aux diverses sciences de la nature, telles que la géographie, la géologie, la physique, la chimie...

cobalt (Co) : métal de transition, de **numéro atomique** 27 et de masse atomique 59. Le ^{60}Co (**période** de 5,27 ans) est un **isotope radioactif**, émetteur gamma, utilisé en radiothérapie et un produit d'activation présent dans les déchets de centrales nucléaires. Le ^{57}Co, isotope à vie courte (271,79 jours) est utilisé comme traceur radioactif.

code (ou logiciel) de calcul : rassemblement dans un logiciel informatique, sous forme d'expressions mathématiques codées, de la représentation simplifiée sous forme **numérique** (**modèle**) d'un système ou d'un processus, afin de le simuler.

code LMDZ : modèle 3D de circulation générale, développé au LMD, avec possibilité de "zoomer" sur une région, c'est-à-dire de mailler plus finement une région donnée.

colloïdes : particules naturelles, de tailles **nanométriques** à **micrométriques**, de nature très variée (argile, matière organique, quartz, bactéries, **macromolécules** organiques) présentes en grande quantité dans les sols. **Colloïdal** : système dans lequel des particules très fines se trouvent en suspension dans un liquide, un solide ou un gaz avec un rapport surface/volume très grand.

compartiment : dans un organisme vivant ou un **écosystème**, il s'agit de l'espace biologique, le plus souvent de nature virtuelle mais de volume mesurable, occupé de manière homogène (concentration) par une substance ou une population **moléculaire** ayant un comportement donné et une forme physico-chimique unique.

complexation : formation d'un édifice (ou **complexe**), neutre ou chargé, constitué par un **ion** central auquel sont liés chimiquement des **molécules** ou des ions.

composé chimique : substance formée de l'assemblage de plusieurs types d'**atomes** issus d'**éléments** chimiques différents dans des proportions définies. Cette loi a été énoncée en 1794 par le chimiste français Joseph Proust.

composé organique : un **composé chimique** est dit organique lorsqu'il renferme au minimum un **atome** de **carbone** lié, au moins, à un atome d'**hydrogène**.

conduction thermique : phénomène par lequel la chaleur s'écoule dans un milieu d'une région à haute température vers une autre à plus basse température, ou entre deux milieux en contact.

conductivité : propriété des matériaux à propager la chaleur ou l'électricité et qui s'exprime dans ce dernier cas en siemens par unité de longueur ; la semi-conductivité est intermédiaire entre celle des matériaux et des isolants.

conductivité hydraulique : caractérise la capacité d'un milieu poreux à laisser s'écouler un flux sous l'action d'un gradient de pression (voir **loi de Darcy**).

convection : ensemble des mouvements d'un fluide sous l'effet de gradients de densité, de température ou de pression. Contribue au transport de la chaleur.

cosmologie : branche de l'astrophysique qui étudie l'Univers en tant que système physique.

courant convectif : mouvement vertical ascendant des masses d'air dont l'origine est l'échauffement des basses couches de l'**atmosphère**.

cristal : assemblage d'**atomes**, d'**ions** ou de **molécules** régulièrement répartis de façon périodique dans les trois directions.

cryosphère (du grec *kryos* signifiant froid, glace) **:** terme désignant collectivement les portions de la surface de la Terre où l'eau est présente à l'état solide (banquises, lacs et rivières gelés, régions couvertes de neige, glaciers, inlandsis et sols gelés, de façon temporaire ou permanente [**pergélisol**]).

cycle du carbone : échange de **carbone** sous diverses formes (**dioxyde de carbone**, **méthane**, matière organique...) entre l'atmosphère, les océans, la **biosphère** terrestre et marine, et la **lithosphère**. La durée de vie du méthane dans l'atmosphère est courte (10 ans) ; il n'en est pas de même du dioxyde de carbone (plusieurs milliers d'années). Voir **Mémos A** et **C**.

cycles glaciaires : succession d'états **glaciaires** et **interglaciaires**. Depuis 800 000 ans, les cycles ont une période de 100 000 ans, alors qu'avant leur période était de 40 000 ans.

datation potassium-argon et argon-argon : la méthode de datation potassium-argon (K/Ar) et sa dérivée argon-argon ($^{39}Ar/^{40}Ar$) sont basées sur la **décroissance radioactive** naturelle du ^{40}K en $^{40}Ar^*$. Dans un système **cristallin** clos, tels les roches ou minéraux volcaniques, la teneur en **isotope** parent (^{40}K) diminue. Inversement, celle en isotope fils ($^{40}Ar^*$) croît au cours du temps. Un âge K/Ar et Ar/Ar est donc obtenu en mesurant le nombre de parents restants et de fils formés et accumulés dans le système. Les gammes d'âges accessibles par ces méthodes sont comprises entre quelques milliers et le milliard d'années.

décalage Doppler (ou **effet Doppler) :** décalage de fréquence d'une onde acoustique ou **électromagnétique** entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

décroissance radioactive : diminution au cours du temps de l'**activité** d'une substance **radioactive** par **désintégration radioactive** de ses **noyaux** constituants.

déglaciation : réduction importante et générale de l'espace occupé par les glaciers à la suite des variations **climatiques**.

dérive Nord Atlantique : courant océanique chaud et puissant qui prolonge vers le Nord-Est le Gulf Stream (lequel prend sa source entre la Floride et les Bahamas et se dilue dans l'océan Atlantique vers la longitude du Groenland). Elle se sépare en deux à l'ouest de l'Irlande.

désintégration radioactive : processus par lequel un **noyau** ou une particule se décompose en plusieurs fragments (particules et noyaux, qui constituent les *produits de désintégration*, **photons**) pour atteindre un état de plus basse énergie, donc plus stable, les caractéristiques de cette transformation ne dépendant que de l'état du noyau (de la particule) de départ et non du processus qui l'a produit.

détecteur à scintillation : dans ce type de détecteur de rayonnement, la partie sensible est constituée d'un **cristal** dans lequel les **rayonnements ionisants** interagissent pour créer de la lumière ; cette lumière est ensuite captée sur une photo**cathode**, transformée en **électrons** qui sont amplifiés dans un tube photomultiplicateur ; on obtient ainsi un signal électrique proportionnel à la quantité de rayonnement reçu.

diagramme de transition de phase : représentation classique, en physique statistique, montrant les différents états (phases) que peut prendre un système en fonction de plusieurs paramètres. Un exemple bien connu est le diagramme des états de l'eau (glace, liquide, vapeur) en fonction de la pression et de la température.

dihydrogène (H_2) : composé **moléculaire** à l'état gazeux aux conditions normales de pression et de température dont les molécules comportent deux **atomes** d'**hydrogène** ; présent sous forme de **traces** (0,5 **ppmv**) dans l'air.

diode laser : composant opto-électronique constituant une source de lumière cohérente dont l'intensité du faisceau peut varier par application d'une tension variable.

dioxine (polychlorodibenzo-p-dioxines ou PCDD) : appellation comprenant également d'autres familles de **molécules** ayant des propriétés communes avec les PCDD.

dioxyde d'azote (NO_2) : se forme dans l'**atmosphère** à partir du **monoxyde d'azote** (**NO**) qui se dégage essentiellement lors de la combustion de combustibles fossiles, dans la circulation routière, par exemple. Le dioxyde d'azote se transforme dans l'atmosphère en **acide nitrique**, qui retombe au sol et sur la végétation. Cet acide contribue, en association avec d'autres polluants, à l'acidification des milieux naturels.

dioxygène (O_2) : molécule composée de deux **atomes** d'oxygène, à l'état de gaz aux conditions normales de pression et de température.

dorsale océanique : chaîne **volcanique** sous-marine continue sur plus de 60 000 km et culminant à une profondeur moyenne de –2500 m, correspondant à la frontière de deux **plaques tectoniques divergentes** entre lesquelles le **magma** remonte et s'épanche pour donner la **croûte océanique**. Voir **Mémos A** et **D**.

dosimétrie : détermination, par mesure ou à l'aide d'un calcul approprié, de la quantité d'énergie absorbée dans une masse donnée de matière.

Dryas récent : brève période **climatique** (entre 12 700 et 11 500 ans avant le présent) très froide et sèche, d'une durée approximative de 1 200 ans calendaires, précédée par l'*interstade de Bølling-Allerød* à la fin du **Pléistocène** et suivie du *Préboréal* qui marque l'entrée dans l'**Holocène**. Elle tire son nom de la dryade à huit pétales *(Dryas octopetala)* dont les pollens firent, à cette époque, leur dernière apparition dans les plaines et les vallées.

écosystème : groupe de communautés biologiques se partageant un milieu physique ; l'air, la Terre, l'eau et les organismes vivants, y compris les êtres humains, interagissent pour former un écosystème.

eddy-corrélation : technique de mesure de flux **atmosphériques** consistant à analyser statistiquement des séries haute-fréquence de vents ainsi que de concentration de **gaz carbonique** ; les corrélations (respectivement anti-corrélation) permettent de déterminer quantitativement un flux positif (respectivement négatif) de concentration de gaz carbonique.

électrode : conducteur **électronique** (métal ou **carbone**) ou **ionique** (verre), soit relié à une borne d'un générateur électrique, soit constituant une pile.

électromagnétique (rayonnement ou onde) **:** rayonnement (ou onde) qui se propage dans le vide à la vitesse de la lumière par l'interaction de champs électrique et magnétique oscillants et qui transporte de l'énergie (**photons**).

électron : particule élémentaire chargée négativement. L'un des constituants de l'**atome**, gravitant autour du **noyau**.

électron libre : électron, normalement lié à distance au **noyau** d'un **atome**, qui a rompu sa liaison avec cet atome.

élément (chimique) **:** ensemble des **atomes** de même **numéro atomique** (atomes dont les **noyaux** comportent exactement le même nombre de **protons**, quel que soit le nombre de **neutrons**). On parle d'**éléments légers** (**hydrogène**, hélium, lithium, **béryllium**, bore) et d'**éléments lourds** (les autres, du **carbone** à l'**uranium** pour ce qui est des éléments naturels, mais plus spécifiquement ceux dont le numéro atomique est égal ou supérieur à 80).

***El-Niño* :** courant marin chaud qui se forme près de l'Équateur, à l'Est de l'océan Pacifique, juste après Noël, en raison du temps très chaud pendant cette période de l'année, d'où le nom d'*El Niño* qui signifie "enfant Jésus".

élution : terme utilisé en **chromatographie** désignant la migration d'une substance à travers un milieu solide poreux sous l'effet drainant d'un solvant. **Éluant** : solvant utilisé pour la séparation de substances **adsorbées** sur un support dans la **chromatographie en phase liquide** ou sur couche mince.

énergies fossiles : énergie produite à partir de minéraux issus de la fossilisation des êtres vivants : pétrole, gaz naturel et houille (charbon) ; elles sont présentes en quantité limitée et non renouvelable, leur combustion entraîne la formation de **gaz à effet de serre**.

enzyme : macromolécule de nature protéique qui catalyse une réaction biochimique.

épidémiologie : science étudiant les rapports entre les pathologies et divers facteurs susceptibles d'exercer une influence sur leur fréquence, leur distribution et leur évolution.

équation différentielle : terme mathématique pour définir la relation entre une ou plusieurs fonctions inconnues et leurs dérivées ; l'ordre d'une équation différentielle correspond au degré maximal de différentiation auquel une fonction inconnue a été soumise ; les équations différentielles sont utilisées pour construire des **modèles** mathématiques de phénomènes physiques et biologiques, par exemple pour l'étude de la **radioactivité** ou de la mécanique céleste.

équations de Navier-Stokes : du nom de deux physiciens du XIXe siècle, Claude Navier et George Stokes ; utilisées en mécanique des fluides, ce sont des équations aux dérivées partielles non-linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Elles gouvernent, par exemple, les mouvements de l'air de l'**atmosphère**, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides.

équations de réaction-diffusion : équations représentant des mécanismes de diffusion et de réaction entre les composantes d'un système ; elles exhibent des comportements complexes (chaos, auto-organisation...) et s'appliquent à des phénomènes très variés : dynamique des populations, ondes chimiques, écologie, **épidémiologie**...

estran : bande de terre couverte à marée haute et découverte à marée basse.

Euler (méthode d') : ainsi nommée en l'honneur du mathématicien Leonhard Euler, il s'agit d'une procédure pour résoudre, par approximation, des **équations différentielles** du premier ordre avec une condition initiale. C'est la plus basique des méthodes de résolution numérique des équations différentielles.

événement de Dansgaard/Oeschger : il correspond à un réchauffement important et rapide suivi d'un retour plus lent aux conditions glaciaires. Des études des variations de la composition **isotopique** de la glace ont permis aux chercheurs danois Willi Dansgaard et suisse Hans Oeschger d'identifier en 1984 des changements très rapides de la température locale au cours de la dernière **période glaciaire**. La présence de 24 événements de Dansgaard/Oeschger (D/O) a été confirmée dans les années 1990 et 2000.

événement de Heinrich : il correspond à la libération d'une grande quantité d'eau douce et d'**icebergs** dans l'Atlantique Nord, due à la fonte de glaciers. En 1988, par l'étude des **sédiments** marins de l'Atlantique Nord, le géologue allemand Hartmut Heinrich a trouvé des rochers érodés par des glaciers. Ceux-ci ont été relâchés par les icebergs au milieu de la mer au fur et à mesure de leur fonte. Ces événements, qui se seraient déroulés six fois au cours de la dernière **période glaciaire**, sont notés de H1 (le plus récent, 16 800 ans) à H6 (le plus ancien, environ 60 000 ans). Ils sont associés à des changements **climatiques** globaux à l'échelle mondiale. Des millions de kilomètres cubes d'eau douce ont dû être déversés dans l'Atlantique Nord, modifiant considérablement la circulation des eaux océaniques, en surface et en profondeur.

femtogramme : (10^{-15} g).

fission : éclatement d'un **noyau lourd** en deux morceaux, accompagné d'émission de **neutrons**, de rayonnements et d'un important dégagement de chaleur.

fluide supercritique : l'adjectif supercritique s'applique à l'état de la matière soumise à une forte pression ou une forte température ; un fluide est donc supercritique quand il est porté au-delà de sa température critique et de sa pression critique ; les propriétés physiques d'un fluide supercritique (densité, **viscosité**, diffusivité) sont intermédiaires entre celles des liquides et celles des gaz.

fluor (F) : élément chimique de la famille des halogènes de **numéro atomique** 9.

fluorescence : émission de lumière provoquée par l'absorption d'un flux incident (de lumière, d'un **rayonnement électromagnétique X** ou d'**électrons**) puis la désexcitation rapide des électrons des couches **atomiques** externes du corps **luminescent**, cette perte d'énergie se traduisant par l'émission d'une nouvelle radiation électromagnétique ; si sa longueur d'onde se situe dans la partie visible du spectre, il y a luminescence.

fluorophore (ou **fluorochrome) :** substance chimique capable d'émettre de la lumière de **fluorescence** après excitation.

foraminifères : organismes unicellulaires apparus il y a environ 540 millions d'années (au Cambrien) dont le test ou squelette, comprenant une ou plusieurs chambres, est muni d'un ou plusieurs foramen (orifice). Leur mode de vie est soit benthique (sur et dans le **sédiment**), soit planctonique (en suspension dans l'eau). Leur taille varie généralement de 38 **µm** à 1 mm, mais certains peuvent atteindre plus de 10 cm.

forçage radiatif : variation d'énergie, exprimée en **W**/m², par suite d'une modification de l'**équilibre radiatif** ; tout ce qui contribue à modifier la quantité d'énergie reçue ou émise par la Terre sous forme de rayonnement. Par exemple, doubler le **dioxyde de carbone** préindustriel (280 → 560 **ppm**) correspond à un forçage radiatif supplémentaire de 4 W/m².

fractionnement isotopique : répartition des **isotopes** d'un **élément**.

gaz nobles (gaz rares ou inertes) **:** appartiennent à une série chimique comprenant les **éléments** chimiques du groupe 18 du tableau périodique des éléments. Il s'agit de l'hélium, du néon, de l'argon, du krypton, du xénon, et du **radon**. L'ununoctium, élément artificiel récemment synthétisé ferait aussi partie de la série. La famille des gaz nobles présente une particularité : ils sont des éléments très peu réactifs car ils possèdent une couche électronique externe (couche de valence) complète. Cette couche saturée en **électrons** est très stable et donc l'**atome** ne cède ni n'accepte d'autres électrons. Les liaisons chimiques sont donc quasi impossibles pour les gaz nobles, ce qui fait que, contrairement à la plupart des autres gaz, ils sont monoatomiques.

géochimie : discipline qui met en œuvre des outils et des concepts de la chimie pour réaliser une étude scientifique exhaustive des processus naturels ou anthropiques dans le système Terre.

géodésie spatiale : science de la mesure de la Terre à partir de systèmes situés sur terre et dans l'espace (par exemple, utilisant les satellites artificiels tels que GPS, DORIS).

géodésie terrestre : science qui mesure et représente la surface de la Terre.

géomorphologie : étude des caractéristiques topographiques qui sont à l'origine de la forme et de la formation du relief terrestre.

glaciaire (période) : à la fois phase **paléoclimatique** froide et période géologique de la Terre durant laquelle une part importante des continents est englacée.

glaciations : retour plus ou moins régulier de **périodes glaciaires** constituant l'une des caractéristiques principales de l'histoire de la Terre. La plus récente a eu lieu il y a 21 000 ans (époque du **Pléistocène**) et la plus ancienne connue remonte au Précambrien (environ entre 2,3 milliards d'années et 2,7 milliards d'années).

granulométrie : mesure la taille des particules élémentaires qui constituent les ensembles de grains (poudres, sables, farines...) et la définition des fréquences statistiques des différentes tailles de grains dans l'ensemble étudié.

hafnium (Hf) : élément chimique de **numéro atomique** 72 qui suit la série des **lanthanides**.

hertz : unité de fréquence **(Hz)**, égale à un cycle par seconde, d'un phénomène alternatif. Parmi les principaux multiples, le **mégahertz** (1 **MHz** = 10^6 Hz) et le **gigahertz** (1 **GHz** = 10^9 Hz).

Holocène : deuxième époque du **Quaternaire** s'étendant sur les 11 400 dernières années. Cette **période interglaciaire** suit la dernière **phase glaciaire** du **Pléistocène**.

hydrocarbure : molécule composée uniquement de **carbone** et d'**hydrogène**.

hydrogène : élément chimique (H) à trois **isotopes** dont l'un est un **atome** simplement formé d'un **proton** et d'un **électron**, les autres étant le **deutérium** et le **tritium**.

hydrogéologie : discipline des sciences de la Terre qui étudie l'eau souterraine et, en particulier, la quantité et la qualité des ressources en eau.

hydrosphère : totalité des eaux de la planète, comprenant les océans, les mers, les lacs, les cours d'eau et les eaux souterraines.

hygrométrie : mesure de la proportion de vapeur d'eau contenue dans l'air.

iceberg : bloc de glace d'eau douce qui s'est détaché d'une **calotte glaciaire** ou d'un glacier et dérivant sur l'océan. Près de 90 % de son volume se trouve sous l'eau. Les icebergs peuvent flotter dans l'océan pendant plusieurs mois et années, leur épaisseur atteignant parfois plusieurs centaines de mètres.

infiltromètre : dispositif expérimental composé d'un réservoir sans fond cylindrique ou annulaire ; placé à la surface du sol, il mesure l'évolution, au cours du temps, du débit d'infiltration sous une charge constante (hauteur d'eau) entre un état hydrique initial et un état final saturé où s'établit le régime permanent correspondant à la **conductivité hydraulique** à saturation.

interférométrie : technique de mesure ou d'observation utilisant des interférences permettant d'imager les déformations de la **croûte terrestre** entre deux passages d'un satellite **radar**. À partir de deux images acquises par des satellites radar, est calculée une image de franges (aussi appelée **interférogramme**), depuis laquelle il est possible de reconstruire les variations d'altitude. Voir **Mémos A** et **D**.

interglaciaire (période) : période séparant deux **glaciations** et durant laquelle les températures moyennes sont relativement élevées. La période interglaciaire actuelle est l'**Holocène** commencée il y a environ 11 400 ans. Ces périodes sont courtes, 10 000 à 40 000 ans, par rapport aux **périodes glaciaires** qui sont de l'ordre de 100 000 ans.

ion : atome ou **molécule** qui a perdu ou gagné un ou plusieurs **électrons** et se trouve ainsi électriquement chargé (**cation** : ion positif ; **anion** : ion négatif).

ion halogénure : ion négatif (anion) formé à partir d'un **élément** chimique de la famille des halogènes qui a gagné un **électron**.

ionisation : action consistant à enlever ou ajouter des charges à un **atome** ou une **molécule** qui, en perdant ou gagnant des charges, n'est plus électriquement neutre. Il est alors appelé **ion**.

iridium (Ir) : élément chimique de **numéro atomique** 77, métal de transition de la famille du platine qui se présente sous la forme d'un métal dur et cassant, très résistant à la corrosion et qui possède des propriétés de catalyseur d'hydrogénation et de réactions de synthèse.

isoprène : liquide incolore volatil et odorant, facilement inflammable, susceptible de former des mélanges explosifs avec l'air ; soluble dans l'alcool, l'acétone, le **benzène**, il se **polymérise** en caoutchouc naturel et peut devenir un **polluant** toxique s'il est présent en grandes quantités.

isotopes : formes d'un même **élément** chimique dont les **noyaux** possèdent un nombre de **protons** identique (ainsi qu'un nombre identique d'**électrons** gravitant autour du noyau) mais un nombre de **neutrons** différent. Les **isotopes lourds** ont un **numéro atomique** élevé.

isotopes stables : isotopes présents dans une proportion constante et connue à l'état naturel. Par exemple, l'oxygène en possède trois (^{16}O, ^{17}O et ^{18}O), le carbone deux (^{12}C, ^{13}C) et l'hydrogène deux (^{1}H, ^{2}H).

isotrope : qui présente les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions (ant. **anisotrope**).

jauge nucléonique : appareil de mesure (de paramètre physique) basé sur l'interaction rayonnement/matière.

jauge à diffusion : cas particulier de **jauge nucléonique** où détecteur et source de rayonnement sont placés du même côté de l'objet à mesurer ; le détecteur mesure le rayonnement diffusé dans la matière.

jauge à transmission : cas particulier de **jauge nucléonique** où le détecteur est placé d'un côté de la matière à mesurer et la source de rayonnement, du côté opposé ; le détecteur mesure le rayonnement transmis au travers de l'objet.

jet d'altitude : sous nos latitudes, la circulation générale de l'**atmosphère** est caractérisée par des vents d'Ouest d'altitude qui constituent un régime permanent. Ceux-ci sont communément appelés Jet d'Ouest.

krigeage avec dérive externe : du nom de l'ingénieur minier sud-africain Daniel-Gerhardus Krige, le krigeage est une technique d'interpolation spatiale issue de la géostatistique, intégrant une règle de pondération entre les variables à cartographier, directement déduite de la répartition spatiale de leurs valeurs. Le krigeage avec dérive externe intègre, en outre, la corrélation pouvant exister entre les variables à cartographier et une valeur auxiliaire externe.

lanthanides : série chimique composée par les métaux de transition (entre les **éléments** de **numéros atomiques** 57 à 71).

laser : source lumineuse fournissant des ondes monochromatiques (d'une seule longueur d'onde), spatialement et temporellement cohérentes (toujours en phase).

ligand : atome, **molécule** ou **ion** portant des fonctions chimiques lui permettant de se lier à un ou plusieurs atomes ou ions centraux d'un **complexe**.

loi de Darcy : loi expérimentale qui permet de relier le débit d'un fluide qui s'écoule à travers un milieu poreux à sa perméabilité et au gradient hydraulique.

luminescence : processus par lequel certaines substances, soumises à un rayonnement, émettent un rayonnement lumineux dont la longueur d'onde, différente de celle du rayonnement incident, les caractérise. Il existe plusieurs types de luminescence, prompte (**fluorescence**) ou retardée (**phosphorescence**).

macromolécule : très grande **molécule** constituée de l'enchaînement répété d'un grand nombre de groupements chimiques, semblables ou différents (appelés motifs de répétition) et reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes.

Mascarène (ou **Mascareignes) :** écorégion de l'archipel du Sud-ouest de l'océan Indien.

méso-échelle : en **météorologie** et en océanographie désigne une échelle intermédiaire entre la circulation planétaire (dépressions et **anticyclones** sur tout un continent, courants marins, etc.) et les systèmes à très petites échelles de moins de 2 km de diamètre.

mesures lagrangiennes : le principe de ces mesures est de réaliser une "photographie" d'un phénomène à un instant donné.

métaphysique : branche de la philosophie qui étudie les principes de la réalité au-delà de toute science particulière ; elle a également pour objet d'expliquer la nature ultime de l'être, du monde, de l'Univers et de notre interaction avec cet Univers.

métaux lourds : métaux dont la densité est supérieure à 4,5 g/cm^3, par exemple, le zinc (7,14), le cadmium (8,6), le **plomb** (11,35).

météorologie : étude et prévision des phénomènes atmosphériques sur des périodes courtes et pour des espaces géographiques précis. Les informations traitées sont donc ponctuelles. Ce qui différencie le **climat** de la météorologie, c'est que les **simulations** climatiques nécessitent des intégrations longues afin d'extraire un climat moyen.

méthane : hydrocarbure de formule brute CH_4, le méthane est le composant principal du gaz naturel et du biogaz issu de la fermentation de matières organiques animales ou végétales. Il se dégage naturellement des zones humides peu oxygénées comme les marais et les terres inondées. Il se forme aussi dans les panses des ruminants. C'est un des principaux **gaz à effet de serre**. Voir **Mémo C**.

MetOp : premier satellite météorologique européen placé en orbite polaire à faible altitude (837 km) au-dessus de la Terre. Il transporte 11 instruments qui permettront de disposer d'une vue détaillée de l'**atmosphère** changeante enveloppant la Terre. Il est destiné à l'étude de la **météorologie** opérationnelle, du **climat** global et des modifications climatiques, à la facilitation des opérations de recherche et de sauvetage et à la surveillance des particules chargées présentes dans l'atmosphère terrestre.

micro : préfixe **µ** du millionième (10^{-6}). 1 **micromètre (µm)** ou **micron** = 10^{-6} m ; 1 **microgramme (µg)** = 10^{-6} g.

modèle eulérien : consiste à se placer dans un repère fixe et à observer les déformations du milieu.

modèle physique : modèle réduit d'un site représentant les caractéristiques physiques de ce site, à l'échelle, y compris les **sédiments** susceptibles d'être transportés.

modélisation : représentation simplifiée (**modèle**) d'un système ou d'un processus afin de le simuler, rassemblée dans un logiciel de calcul (souvent appelé **code**), sous forme d'expressions mathématiques. La taille de **maille**, dans l'espace et dans le temps, donne la **résolution** du modèle.

modélisation mécaniste : modèle qui incorpore les lois ou mécanismes régissant l'évolution d'un **système complexe**, par opposition à des modèles descriptifs ou statistiques.

molécule : groupe d'**atomes** liés par des liaisons chimiques.

monoxyde d'azote (NO) : composé chimique formé d'un **atome** d'oxygène et d'un atome d'**azote** ; il s'agit d'un gaz dans des conditions normales de pression et de température et l'un des rares neurotransmetteurs gazeux chez les mammifères.

morphogenèse : processus de formation du relief de l'écorce terrestre qui permet de comprendre l'origine et le façonnement des formes du relief.

mousson : phénomène météorologique de la zone intertropicale qui affecte en priorité l'Inde et l'Indonésie, mais également l'Afrique et qui se caractérise par des températures élevées, et surtout des pluies très abondantes qui surviennent brutalement après une saison sèche.

nano : préfixe **n** du milliardième (10^{-9}). Le **nanomètre (nm)** : 1 nm = 10^{-9} mètre. Les **nanotechnologies** sont l'ensemble des procédés de fabrication et de manipulation de structures, de dispositifs et de systèmes matériels à l'échelle du nanomètre.

nanotubes de carbone : structure **cristalline** constituée d'un ou plusieurs feuillets de graphène (monoplan de **carbone** dont l'empilement constitue le graphite) enroulés sur eux-mêmes, d'un diamètre **nanométrique** mais dont la longueur peut atteindre plusieurs, voire plusieurs centaines de **micromètres**. Selon l'orientation de l'enroulement, il peut être soit métallique, soit **semi-conducteur**.

naphtalène (naphtaline) : hydrocarbure aromatique à deux cycles, de formule $C_{10}H_8$.

néolithique (du grec *neos* signifiant nouveau et *lithos* signifiant pierre, littéralement *Âge de la pierre nouvelle*) **:** période de mutations majeures dans l'évolution des sociétés humaines, correspondant à la domestication des plantes et des animaux, à la sédentarisation, à la généralisation de l'outillage en pierre polie et de la poterie en céramique.

neutron : particule électriquement neutre, 1 839 fois plus lourde qu'un **électron**. Les neutrons sont, avec les **protons**, les constituants des **noyaux atomiques**.

nitrates (autrefois nommés nitres, souvent synonyme de salpêtre) **:** ce sont les sels de l'acide nitrique ; la formule chimique de l'**ion** nitrate est NO_3^-.

noyau (atomique) **:** constituant essentiel d'un **atome**, chargé positivement et composé de **protons** et de **neutrons** (sauf pour l'**hydrogène**) autour duquel tournent des **électrons**.

nucléide : espèce nucléaire caractérisée par son nombre de **protons** Z (**numéro atomique**), son nombre de **neutrons** N et par son nombre de masse A, égal à la somme du nombre de protons et du nombre de neutrons ($A = Z + N$).

numéro atomique : nombre de **protons** du **noyau** d'un **élément**.

océan Téthys : paléo-océan qui s'est ouvert d'est en ouest du Permien supérieur au Jurassique moyen. Il s'est formé à travers la **Pangée**, séparant les continents Gondwana au sud, et Laurasia au nord. La terminaison occidentale de cet océan était l'actuelle Europe du Sud et l'actuelle Afrique du Nord.

onde électromagnétique : onde correspondant à la propagation en ligne droite d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculairement entre eux ; la lumière est une onde électromagnétique caractérisée par sa longueur d'onde ; l'œil humain ne perçoit qu'un domaine restreint du spectre des ondes électromagnétiques appelé lumière visible (à chaque longueur d'onde l'œil associe une couleur).

onde radio (ou **onde radioélectrique) : onde électromagnétique** dont la fréquence est inférieure à 3 000 **GHz**, soit une longueur d'onde supérieure à 0,1 mm.

orographie : partie de la géographie physique qui traite de l'agencement des reliefs terrestres.

oxydation : réaction chimique dans laquelle l'élément oxydé perd un ou plusieurs **électrons**.

oxyde d'azote (NO_x) : famille comprenant le **monoxyde d'azote** (**NO**), le **dioxyde d'azote** (**NO_2**), le **protoxyde d'azote** (**N_2O**), le tétraoxyde de diazote (N_2O_4), le trioxyde d'azote (N_2O_3).

oxydes métalliques : oxydes à la base des colorants céramiques (oxyde de **cobalt** pour le bleu, oxyde de **chrome** pour le vert...).

oxyde de silicium (SiO_2) : matériau isolant utilisé dans les **semi-conducteurs**.

oxydo-réduction : processus de transfert d'**électrons** d'une espèce à une autre ; on appelle "oxydant" l'espèce qui capte les électrons et "réducteur" l'espèce qui les cède au cours de cette réaction chimique.

paléo- : du grec *palaios* signifiant ancien. Relatif aux époques géologiques passées.

paléoclimatologie : science qui étudie la **climatologie** des ères passées, sur des milliers ou millions d'années. En fournissant des indicateurs globaux ou locaux du climat passé, la paléoclimatologie alimente le débat sur divers thèmes actuels, tel le réchauffement planétaire.

palynologie : étude des pollens et des spores qui permet de reconstruire, à partir de "carottes" dans des **sédiments**, des données sur la végétation et les **climats** du passé ; l'analyse des charbons végétaux dans des sédiments s'appelle "anthracologie".

Pangée (du grec *gê* signifiant la Terre et *pan* signifiant tout, littéralement *toutes les terres*) **:** supercontinent rassemblant la quasi-totalité des continents actuels et qui s'est formé, il y a environ entre 360 et 250 millions d'années (Ma), suite à la collision du *Protogondwana* avec le *Laurussia*. Le vaste océan entourant la Pangée, le *Panthalassa*, est l'ancêtre de l'océan Pacifique et le vaste océan situé à l'Est de ce supercontinent est l'**océan Téthys**. La Pangée a commencé à se fracturer il y a environ 200 millions d'années pour former deux nouveaux supercontinents : le *Gondwana* (regroupant l'Amérique du Sud, l'Antarctique, l'Afrique, l'Inde et l'Australie) et la *Laurasia* (contenant l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie sans l'Inde).

paramètre scalaire : quantité pouvant être décrite par un seul nombre et son unité en un point de l'espace.

pascal : unité légale de pression **(Pa)**. Parmi ses multiples, l'hectopascal (1 **hPa** = 100 Pa).

pédologie : branche de la science des sols, de leur formation et de leur évolution.

période (radioactive) : durée nécessaire à la **désintégration** de la moitié des **noyaux** d'**atomes** d'un **nucléide radioactif**.

pétrographie : science ayant pour objet la description des roches et l'analyse de leurs caractères structuraux, minéralogiques et chimiques.

pH (potentiel hydrogène) : mesure l'acidité ou la basicité d'une solution.

photochimie : étude des effets chimiques produits par les rayons lumineux.

photon : *quantum* d'énergie d'un **rayonnement électromagnétique**. Particule élémentaire, sans masse ni charge électrique, associée à un tel rayonnement.

photosynthèse : processus par lequel les plantes et certaines bactéries utilisent l'énergie solaire pour effectuer la synthèse de **molécules** organiques à partir de **gaz carbonique** et d'eau.

piézométrique : qui se rapporte à un niveau d'eau mesuré dans un puits ; en un point d'un milieu poreux, c'est le niveau supérieur de la colonne liquide statique qui équilibre la pression hydrostatique en ce point.

plasma : état de la matière constitué de particules chargées (d'**ions** et d'**électrons**).

Pléistocène : époque du **Quaternaire** qui a débuté il y a 1,806 million d'années pour se terminer vers 11 400 ans. Elle couvre la plupart des récentes **glaciations**. La fin du Pléistocène correspond à celle du Paléolithique utilisé en archéologie.

plomb : élément chimique du groupe des cristallogènes, de **numéro atomique** 82, possédant des **isotopes** naturels dont le ^{212}Pb et le ^{210}Pb.

plutonium : élément de **numéro atomique** 94 et de symbole Pu possédant des **isotopes**, de ^{232}Pu à ^{247}Pu. Cinq sont importants, du ^{238}Pu au ^{242}Pu, surtout le ^{239}Pu, élément **fissile** produit en réacteur nucléaire à partir d'**uranium** 238.

polarographie : forme particulière de la **voltampérométrie** qui utilise comme **électrode** de travail une électrode à gouttes tombantes de mercure ; méthode d'analyse des **oxydations** et des réductions en solution, elle appartient donc au domaine de l'électrochimie, la science qui décrit les réactions chimiques dans lesquelles se produisent des transferts d'**électrons**.

polyacrylate : phase **polymérique** absorbante couramment utilisée pour l'extraction de **composés organiques**.

polymère : macromolécule répétant un même motif structural appelé monomère (du grec *monos* pour "seul" et *meros* pour "partie").

polymère à empreinte moléculaire : polymère absorbant structuré de manière spécifique autour d'une **molécule** ou d'une famille de molécules donnée, qui possède une capacité d'**adsorption** sélective pour cette molécule ou cette famille de produits par reconnaissance d'empreinte moléculaire.

ppm : partie par million ; **ppmv** : partie par million en volume (mesure de concentration) ; **ppb** : partie par milliard (américain *billion* 10^9).

précipitation : formation dans une solution d'une substance solide insoluble par réaction entre deux liquides ou deux gaz.

procédé sol-gel : procédé de synthèse chimique utilisant une solution contenant des précurseurs réactifs tels que les alcoxydes ou les sels métalliques et se décomposant en deux étapes : hydrolyse et condensation (formulation d'un réseau covalent) ; la suspension **colloïdale** *(sol)* est constituée d'une phase solide de **granulométrie** comprise entre un **nm** et un **µm** dispersée dans un liquide ; après condensation, la solution évolue vers la formation d'un système de plus grande complexité moléculaire emprisonnant le solvant, le *gel*.

profil vertical : les variations des concentrations d'un constituant **atmosphérique** en fonction de l'altitude constituent son profil vertical.

profil vertical de densité : courbe représentant la densité du mélange eau/vase en fonction de la profondeur.

proton : particule constitutive du **noyau atomique** portant une charge électrique positive égale et opposée à celle de l'**électron**. Un proton est 1 836 fois plus lourd qu'un électron.

protoxyde d'azote (N_2O) : également appelé gaz hilarant, cet oxyde nitreux trouve de nombreuses utilisations en anesthésie, comme oxydant dans certains moteurs-fusées et même dans les bonbonnes de crème chantilly.

puits de carbone : désigne le processus qui extrait les **gaz à effet de serre** de l'**atmosphère**, soit en les détruisant par des procédés chimiques, soit en les stockant sous une autre forme ; exemple : le **dioxyde de carbone** est souvent stocké dans l'eau des océans, les végétaux ou les sous-sols. Les forêts et les océans absorbent environ la moitié des émissions de **carbone**.

Quaternaire : période géologique récente, qui a débuté il y a environ entre 2,4 et 1,5 millions d'années et qui se poursuit actuellement, caractérisée par le retour de **cycles glaciaires**. Le Quaternaire se compose des époques du **Pléistocène** et de l'**Holocène**. En paléontologie, il est marqué par l'évolution du genre *Homo*, dont font partie les humains.

radical hydroxyle (OH) : radical composé d'un **atome** d'oxygène et d'un atome d'**hydrogène**.

radioactivité : propriété d'un **nucléide** de se transformer spontanément en un autre nucléide, avec émission d'un rayonnement (particules, **rayons X**, **rayons gamma**...), ou d'être le siège d'une **fission** spontanée accompagnée d'une émission de particules et de rayons gamma.

Radio Frequency Identification (RFID) : la radio-identification est une méthode pour stocker et récupérer des données à distance en utilisant des marqueurs appelés "radio-étiquettes".

radiométrie : action de mesurer le flux d'énergie associé aux **rayonnements électromagnétiques** ; les radiomètres permettent d'effectuer ces mesures.

radionucléide : nucléide radioactif. Les différents radionucléides d'un même **élément** sont des **radio-isotopes** de cet élément.

radium : métal blanc et brillant appartenant à la famille des alcalino-terreux. **^{226}Ra** : un des 25 **isotopes radioactifs** du radium, il résulte de la chaîne de **désintégration** de l'**uranium** 238. Par émission, il se désintègre en **^{222}Rn** qui a une **période** de 3,8 jours.

radon : élément radioactif naturel (^{220}Rn et surtout **^{222}Rn**) généré sous forme gazeuse au sein des roches et matériaux de construction par **désintégration** de l'**uranium** et du **radium** de la croûte terrestre. ^{222}Rn : **isotope** le plus stable du radon.

rayonnement cosmique : flux de particules chargées (**protons**, **noyaux** d'hélium et d'**éléments lourds**) traversant l'espace interstellaire à des vitesses relativistes. Certaines viennent de l'extérieur du système solaire, d'autres du Soleil en passant par des trous de sa couronne, interagissant avec les **atomes** de la haute atmosphère avant d'atteindre la surface de la Terre.

rayonnement ionisant : rayonnement capable de produire directement ou indirectement des **ions** lors de son passage à travers la matière.

rayonnement ultraviolet (UV) : région du spectre électromagnétique couvrant les rayonnements dont les longueurs d'onde se situent entre 400 et 10 nm (1 nanomètre = 10^{-9} mètre). Une grande partie du rayonnement UV est absorbée par l'**atmosphère terrestre**. Voir **Mémo A**.

réaction de spallation : réaction nucléaire où les **noyaux** sont éclatés en particules.

régression : outil statistique permettant de dégager une tendance dans un groupe de données expérimentales.

résilience : capacité d'un **écosystème** ou d'une espèce à récupérer un fonctionnement ou un développement normal après avoir subi un traumatisme.

résine échangeuse d'ions : un échangeur d'**ions** est un solide capable d'échanger les ions qu'il contient avec d'autres provenant d'une solution, par déplacement d'équilibre ; pour accélérer les échanges et atteindre cet état d'équilibre, le solide doit présenter une surface de contact maximale avec la solution ; à l'origine, les premiers échangeurs d'ions étaient des zéolites (composés naturels minéraux) ; aujourd'hui, ce sont des **composés organiques** de synthèse ; une résine échangeuse d'ions est constituée d'un réseau tridimensionnel de **polymère** de haute masse, le plus souvent du polystyrène, sur lequel sont greffés des groupements fonctionnels ionisés ou ionisables qui lui confèrent la propriété d'échangeur d'ions.

résistivité : résistance spécifique d'un matériau au mouvement des **électrons**.

résolution spatiale : plus petite séparation angulaire ou linéaire entre deux objets, qui caractérise en particulier l'aptitude d'un système optique à distinguer ou à reproduire les détails d'une scène ou de son image.

sédiment : dépôt meuble laissé par les eaux, le vent et les autres agents d'érosion, et qui, selon son origine, peut être marin, fluviatile, lacustre ou glaciaire.

semi-conducteur : solide dont la **conductivité** à température ambiante est intermédiaire entre celle des isolants et celle des conducteurs et donc la conductivité augmente avec la température ; selon les dopants utilisés, un semi-conducteur sera de type "p" (la conductivité se fait par l'intermédiaire de trous) ou de type "n" (l'**atome** dopant apporte des **électrons** participant à la conduction).

silice greffée : silice (SiO_2) modifiée chimiquement et recouverte de groupements fonctionnels généralement hydrocarbonés.

simulation numérique : méthode qui consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système décrit par un **modèle** ou un ensemble de modèles.

sismotectonique : branche de la **géodésie** et de la géophysique qui étudie les structures et les mouvements **tectoniques** grâce aux **séismes** ainsi que les rapports entre les séismes et la tectonique. Voir **Mémo D**.

solvants halogénés : il s'agit principalement de produits **chlorés** (trichloréthylène, perchloréthylène, dichlorométhane) utilisés pour le nettoyage et la dilution dans la chimie de base et le traitement des métaux ; ils permettent de dissoudre, extraire, mettre en suspension des substances sans les altérer chimiquement ; leur caractère est généralement dangereux (explosivité, toxicité, inflammabilité) pour l'homme et l'environnement.

sorption : processus d'interaction entre une surface solide et un **atome** (**ionisé** ou non) ou une **molécule** ; en général caractérisée par la capacité du matériau solide à établir des liaisons chimiques de surface avec le composé. L'**adsorption** fixe les molécules, selon diverses méthodes, sur une surface solide par un processus généralement passif et non spécifique (par exemple, par effet électrostatique en milieux gazeux ou liquide). La **désorption** est le phénomène inverse.

spéciation : action de déterminer les différentes formes sous lesquelles une espèce chimique est présente dans un milieu donné.

spectrométrie gamma : mesure des énergies du **rayonnement gamma** en vue de l'analyse d'un mélange de corps **radioactifs**.

spin : moment angulaire (ou moment de rotation propre) d'une particule.

subduction : processus d'enfoncement d'une plaque tectonique sous une autre plaque de densité plus faible.

sulfate : sel de l'acide sulfurique.

sulfure d'hydrogène (H_2S) : gaz composé d'**hydrogène** et de soufre émis lors de la fermentation anaérobie (en absence d'oxygène) de matière organique.

susceptibilité magnétique : faculté d'un matériau à s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique.

système analogue : système ressemblant à un autre, l'un étant plus simple à étudier que l'autre.

systèmes complexes : sans qu'il y ait un consensus absolu sur la définition, un système sera dit complexe, d'abord s'il est formé de nombreux éléments, si son comportement n'est pas prévisible de façon triviale, si des propriétés d'auto-organisation en émergent ; mais un même objet pourra être vu comme un système complexe dans certains problèmes et pas dans d'autres : par exemple, pour la mécanique céleste, "terre" est un point, alors que si l'on considère la seule **biosphère**, la Terre est un système extrêmement complexe.

tantale (Ta) : élément chimique de **numéro atomique** 73 qui fait partie des métaux de transition.

techniques nucléoniques : techniques de mesures basées sur l'interaction **rayonnement ionisant**/matière ; la mesure du rayonnement, après interaction dans la matière à étudier, permet d'obtenir des informations sur la matière.

terbium (Tb) : élément chimique de **numéro atomique** 65 qui fait partie des **lanthanides** et des terres rares.

thermodynamique : branche de la physique et de la chimie liée à l'étude du comportement thermique des corps, à l'étude de l'énergie et de ses transformations (en particulier de l'énergie interne).

thermohalin (du grec *thermos* signifiant chaud et *hals* signifiant sel) **:** la circulation thermohaline est la circulation océanique profonde et de surface engendrée par les écarts de température et de salinité d'une masse d'eau à une autre.

thorium : élément chimique de **numéro atomique** 90 et de symbole Th, assez abondant dans la nature, possédant des **isotopes** de ^{223}Th à ^{235}Th. **^{232}Th** est un isotope naturel.

traces et **ultra-traces :** une **trace** est un **élément** présent à une faible concentration ; il n'y a pas de règle précise définissant une concentration seuil à partir de laquelle l'appellation trace doit être utilisée ; cette notion de trace varie avec l'évolution de la sensibilité des techniques et n'a pas la même signification pour un géochimiste, un biologiste, un métallurgiste... Pratiquement, l'analyste parlera de trace lorsque l'élément à doser sera présent à des concentrations variant de quelques dizaines de mg/kg à quelques dizaines de **µg**/kg et d'**ultra-trace** pour des concentrations inférieures.

transformée de Fourier : formule mathématique complexe qui consiste à "peser" le poids relatif de chaque fréquence dans un signal temporel afin d'en donner une représentation spectrale.

tritium : isotope le plus lourd de l'**hydrogène**, le seul **radioactif**. Son **noyau** est formé d'un **proton** et de deux **neutrons**.

turbidité : teneur d'un liquide en matières qui le troublent ; elle est causée par des particules en suspension qui absorbent, diffusent et/ou réfléchissent la lumière.

ultrason : son dont la fréquence est supérieure à 20 000 **Hz**.

uranium : élément chimique de **numéro atomique** 92 et de symbole U, qui existe à l'état naturel (**uranium naturel**) sous forme d'un mélange de trois **isotopes** : **^{238}U** fertile (99,28 %), **^{235}U fissile** (0,71 %) et ^{234}U (traces).

uranium appauvri : uranium dont la teneur en **isotope** 235, le seul **fissile**, est inférieure à son niveau naturel (0,71% en masse) ; il est principalement obtenu, d'une part en tant que co-produit d'une opération d'enrichissement (autour de 0,3 % de ^{235}U), d'autre part en tant que sous-produit (1 % de ^{235}U) d'un traitement de combustible usé après passage en réacteur.

valence : nombre de liaisons potentielles qu'un **atome** peut former.

viscosité : capacité d'un fluide à s'écouler.

VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*, interférométrie à très grande base) : procédé d'interférométrie qui consiste à enregistrer puis analyser en temps différé les signaux recueillis par des antennes parfois séparées de plusieurs milliers de kilomètres. Le VLBI utilise des sources radioélectriques extra-galactiques comme les quasars.

voltampérométrie : la connaissance des caractéristiques fondamentales d'une réaction électrochimique se fait au moyen de la mesure des variations du courant en fonction du potentiel appliqué aux bornes d'une cellule d'électrolyse ; le principe général de la voltampérométrie est donc l'obtention d'une réponse (le courant) du système étudié à l'excitation (le potentiel) responsable de la réaction chimique désirée.

watt : unité de puissance **(W)** correspondant à la consommation d'un joule par seconde.

zone de convergence intertropicale (ZCIT) : zone des régions équatoriales où se rencontrent les alizés de l'hémisphère Nord, qui soufflent vers le Sud-Ouest, et ceux de l'hémisphère Sud, orientés vers le Nord-Ouest.

zone non saturée (ZNS) : compartiment de l'environnement situé entre la surface du sol et une nappe d'eau souterraine ; la porosité des roches en zone non saturée est remplie d'eau et d'air alors qu'elle est totalement remplie d'eau en **zone saturée**.