



HAL
open science

800 000 ans d'histoire du climat dans la glace

Valérie Masson-Delmotte, O. Cattani, G. Dreyfus, S. Falourd-Mederbel, J. Jouzel, A. Landais, B. Minster

► **To cite this version:**

Valérie Masson-Delmotte, O. Cattani, G. Dreyfus, S. Falourd-Mederbel, J. Jouzel, et al.. 800 000 ans d'histoire du climat dans la glace. Clefs CEA, 2006, 54, pp.33-39. hal-03326076

HAL Id: hal-03326076

<https://hal.science/hal-03326076v1>

Submitted on 25 Aug 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

800 000 ans d'histoire du climat lus dans la glace

Les glaces polaires constituent les seules archives qui, sur les mêmes échantillons, donnent accès à des informations à la fois sur la modification du climat de notre planète et sur celle de la composition de l'atmosphère. L'analyse des carottes de glace joue, en conséquence, un rôle essentiel dans la compréhension des différents mécanismes impliqués dans l'évolution naturelle du climat au cours des derniers grands cycles de périodes glaciaires et interglaciaires. Trois kilomètres de carottes de glace ont été extraits du site de Dôme C en Antarctique, ce qui a permis aux chercheurs de révéler les secrets du climat des 800 000 dernières années, représentant à ce jour la plus ancienne reconstitution climatique jamais obtenue.

Le consortium **EPICA** (encadré 1), fédérant les efforts de dix pays européens, vient de finaliser deux forages profonds dans la calotte de glace de l'Antarctique (figure 1). Le site de Dôme Concordia (Dôme C), placé sur le plateau central de l'Antarctique de l'Est à une altitude de plus de 3 230 m, est très froid, avec une température moyenne annuelle de -54,5°C, et très sec. La quantité de neige qui s'accumule en moyenne chaque année correspond à une épaisseur d'eau de 2,5 cm. L'objectif du forage à Dôme C est donc de tirer parti de cette faible quantité d'accumulation annuelle de neige, pour obtenir des enregistrements climatiques



CEA-IPEV

Carotte de glace extraite du site de Dôme C en Antarctique. Les forages dans les calottes polaires permettent d'accéder aux archives climatiques accumulées depuis des millénaires.

Le consortium EPICA, une participation française forte

1

Le consortium **EPICA** (*European Project for Ice Coring in Antarctica*) qui regroupe 10 nations, Allemagne, Belgique, Danemark, France, Italie, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède et Suisse, a été soutenu par la Fondation européenne de la science (ESF) et les 5^e et 6^e **PCRD** de la **Commission européenne**. La participation française est très forte, aussi bien du point de vue logistique que scientifique. L'Institut polaire français Paul-Émile Victor (IPEV) a, en particulier, réalisé les expéditions terrestres lourdes pour le transport du matériel vers le site de Dôme C. L'équipe technique du Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (**CNRS**-Université Joseph Fourier/**LGGE**), situé près de Grenoble, a joué un rôle essentiel dans le développement des carottiers. Sur le plan scienti-

fique, les équipes françaises sont impliquées sur l'ensemble des aspects liés à l'exploitation d'un carottage profond. Le LGGE intervient sur les volets de l'analyse de traces gazeuses et de la chimie, sur l'étude des propriétés mécaniques et physiques de la glace, et sur la **modélisation** des calottes. Le Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse (**IN2P3/CNRS/CSNSM**) à Orsay se consacre à la mesure des **isotopes cosmogéniques**, tandis que le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA-CNRS-Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines UVSQ/Institut Pierre Simon Laplace IPSL/**LSCE**) est impliqué dans la reconstruction des paramètres climatiques, essentiellement à partir de la mesure isotopique de la glace et des bulles d'air qu'elle contient.

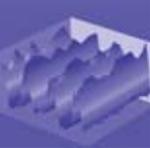
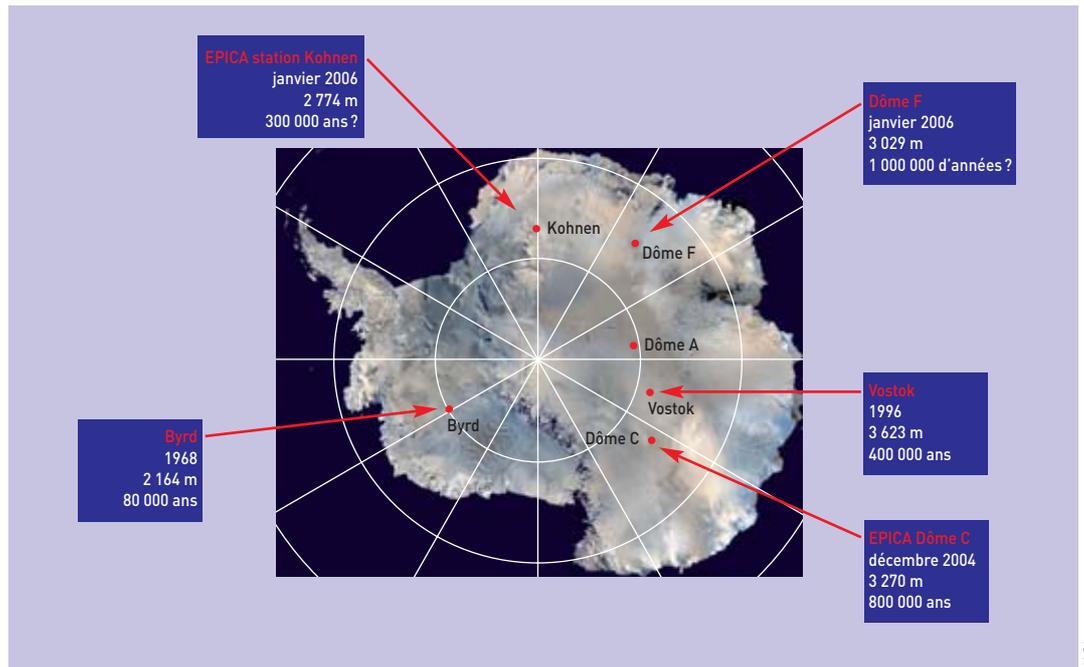


Figure 1. Carte des forages profonds réalisés en Antarctique. Pour chaque forage sont indiquées sa date d'achèvement, sa profondeur et la période d'histoire du climat qu'il couvre ou est susceptible de couvrir.



NASA

les plus anciens possible. Ce forage EPICA Dôme C a démarré en 1995 et s'est achevé en 2004 à une profondeur de 3 270 m au voisinage du socle rocheux, malgré de lourdes difficultés logistiques et techniques. Pour compléter le forage de Dôme C, le consortium EPICA a choisi de forer une seconde carotte de glace, mais cette fois dans le secteur atlantique de l'Antarctique, dans la région de la Terre de la Reine Maud (*Dronning Maud Land*). Sur ce second site, à la station Kohnen, les températures sont plus clémentes, avec seulement $-44,5^{\circ}\text{C}$ de moyenne annuelle, et l'enneigement plus abondant (6,4 cm par an d'eau). Ce second forage vient de livrer, en janvier 2006, 2 774 m de glace qui offriront l'enregistrement antarctique le plus fin des changements climatiques rapides de la dernière période glaciaire.

Des archives climatiques uniques

Les glaces très profondes issues du forage de Dôme C n'ont pas battu le record de profondeur atteint sur le site de Vostok (plus de 3 600 m!) mais, en revanche,

elles s'avèrent les archives climatiques les plus anciennes obtenues jusqu'à présent dans les calottes polaires. Ces archives climatiques sont particulièrement riches. D'une part, l'analyse de l'eau de cette glace permet de quantifier les variations passées de la température locale. D'autre part, la composition chimique et l'étude des particules emprisonnées dans la glace reflètent les variations des **aérosols** présents dans l'**atmosphère**, et provenant des continents ou des océans entourant l'Antarctique. Enfin, la composition de l'air piégé dans la glace apporte des informations globales.

Déchiffrer les variations passées de température

La mesure de l'abondance des différentes formes **isotopiques** des **molécules** d'eau donne les moyens de quantifier les variations passées de la température (encadré 2). Le savoir-faire expérimental du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA-CNRS-UVSQ/**LSCE**) repose sur un grand nombre d'analyses conduites à très haute précision sur des **spectromètres de masse**, qui se combinent aux mesures menées

La station scientifique permanente Concordia est située au sommet du Dôme C, l'un des trois dômes majeurs du plateau central de l'Antarctique de l'Est, sur une épaisseur de glace de plus de 3 km. Vue des différentes installations du camp EPICA Dôme C.



CEA-IFEV

Le thermomètre isotopique

en parallèle dans les laboratoires des universités de Trieste (Italie) et de Copenhague (Danemark), entre lesquels transitent régulièrement des caisses d'échantillons d'EPICA. Une première série d'études a donné une idée des variations de température, et donc de la succession des glaciations détectées comme des périodes "froides" dans des échantillons de glace particulièrement appauvris en **isotopes lourds**, et séparées par des périodes interglaciaires, comme celle que nous connaissons depuis plus de 11 000 ans. En 2006, l'examen des échantillons de glace, prélevés tous les 55 cm (*bag samples*), a été finalisé pour tout le forage EPICA Dôme C, et des analyses de séries encore plus fines ont démarré pour déchiffrer les variations climatiques à haute **résolution**, à l'échelle de quelques dizaines d'années, dans le cadre du projet ANR PICC (intégration des contraintes Paléoclimatiques pour réduire les Incertitudes sur l'évolution du Climat pendant les périodes Chaudes). Il reste des dizaines de milliers d'échantillons de glace à étudier pour exploiter totalement la richesse de ces nouvelles carottes antarctiques.

Détecter les subtiles variations de composition de l'oxygène de l'air

Les scientifiques mesurent la composition isotopique non seulement de l'eau mais également celle de l'air piégé dans la glace. En particulier, l'abondance des **atomes** d'oxygène 18 et 16, présents dans l'oxygène de l'air piégé dans des glaces de Dôme C, est déterminée. Ce paramètre permet de relier les changements climatiques enregistrés en région polaire aux variations globales du niveau des mers, reconstruites à partir des sédiments marins, et aussi de détecter les changements de productivité continentale; celle-ci joue sur la signature isotopique de l'oxygène de l'air *via* les mécanismes de respiration et de **photosynthèse**. Certains paramètres de l'orbite terrestre contrôlent l'intensité des moussons et la productivité continentale. Il est ensuite possible d'exploiter la mesure isotopique de l'oxygène pour identifier l'empreinte de ces paramètres orbitaux et améliorer la datation de la glace. Ces analyses utilisent une quantité de glace relativement importante et sont lourdes à mener, car la méthodologie inclut une phase délicate d'extraction de l'air piégé dans la glace par fusion et regel progressif des échantillons dans une cellule à vide.

La glace du forage EPICA Dôme C a livré ses premiers secrets

Les premières analyses conduites sur le forage EPICA Dôme C révèlent des informations essentielles.

Les méthodes de datation des glaces très anciennes

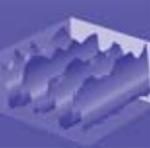
Il n'existe pas à ce jour de méthode de datation absolue de ces glaces très anciennes. Pour certains sites où l'abondance du dépôt de neige l'autorise, il est possible de compter les couches annuelles et ainsi de construire, année après année, une datation très précise de la glace. Pour les sites du plateau central Antarctique, il faut faire appel à des méthodes de **modélisation**. La démarche consiste tout d'abord à modéliser la relation entre la composition isotopique de la neige et la température locale, puis à établir la relation entre la température locale et la quantité d'accumulation de neige,

L'eau n'est pas composée uniquement d'**hydrogène** "normal" (de masse 1) et d'oxygène "normal" (de masse 16). Ces deux **atomes** ont l'un et l'autre des **isotopes**, le **deutérium** D (hydrogène de masse 2) et l'oxygène 18, en particulier. Leur existence conduit à des formes "isotopiques" de la **molécule** d'eau, HDO et H₂¹⁸O, qui accompagnent H₂¹⁶O dans tous les réservoirs où elle est présente. Les propriétés physiques de ces trois molécules sont légèrement différentes. Les molécules lourdes ont, ce qui est intuitif, tendance à aller préférentiellement vers la phase condensée (pluie ou neige) plutôt que vers la vapeur. Ainsi, à chaque changement de phase de l'eau, la phase condensée est plus riche en **isotopes lourds** que la phase vapeur qui lui donne naissance. Il y a donc un appauvrissement progressif des teneurs isotopiques de la vapeur et des précipitations à mesure que la masse d'air se refroidit. Cela se traduit dans les régions polaires par une relation linéaire entre la température moyenne annuelle du site et l'abondance isotopique, aussi bien pour le deutérium que pour l'oxygène 18. Cette linéarité s'explique bien à partir d'un **modèle** isotopique dans lequel est traduite cette description simplifiée de la vie d'une masse d'air. Elle est à la base de ce que les climatologues appellent le *thermomètre isotopique*. Plus il fait froid, plus l'abondance isotopique est faible et inversement. Appliquée en un site donné, cette correspondance permet de reconstruire les variations du climat à partir d'un enregistrement des variations des teneurs soit en deutérium, soit en oxygène 18.



La station Concordia est le fruit d'une collaboration franco-italienne entre l'Institut polaire Paul-Émile Victor (IPEV) et le Programme national de recherche en Antarctique (PNRA-Italie), comme en témoignent ces panneaux indicateurs.

en tirant parti de la thermodynamique de l'air humide, et enfin, à modéliser le tassement des couches de neige au cours de leur enfouissement dans la calotte antarctique. Ces efforts de modélisation sont en partie mis au point par rapport aux observations actuelles (observations spatiales) et exploitent des points de calage obtenus en synchronisant les différents forages entre eux, grâce à certains horizons de référence (pics de flux d'isotopes **cosmogéniques**, détection d'éruptions volcaniques, signaux communs de variations de la concentration de **gaz à effet de serre** bien mélangés au niveau global, comme le **dioxyde de carbone** CO₂ ou le **méthane** CH₄).



Le matériel et le ravitaillement sont amenés par convois depuis la côte vers la station scientifique Concordia localisée à plus de 1 000 km à l'intérieur du continent antarctique.



CEA-IPEV

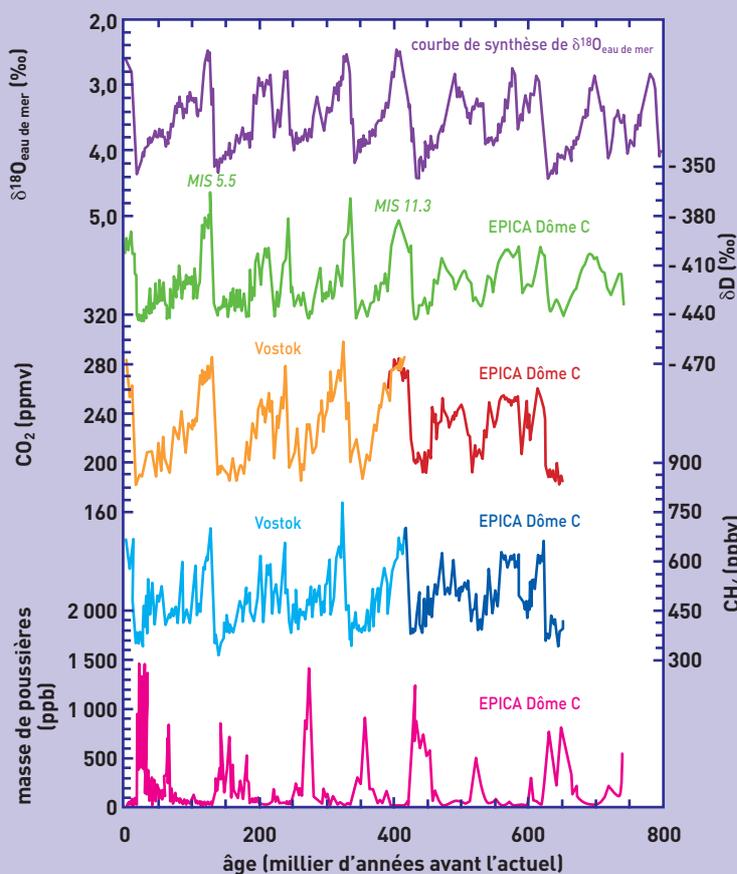


Figure 2. Variations du niveau des mers (courbe violette, à partir de l'analyse des sédiments marins), des températures en Antarctique (courbe verte, à partir de la mesure de la composition isotopique de la glace de Dôme C), des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone CO₂ (courbes orange et rouge, à partir de l'analyse de l'air des glaces de Vostok et de Dôme C) et en méthane CH₄ (courbes bleues), et concentrations des poussières mesurées dans la glace de Dôme C (courbe rose). L'échelle de temps va de la période actuelle (0) vers 800 000 ans. (MIS signifie *Marine Isotope Stage*.)

La première datation publiée en 2004 par les membres de la communauté EPICA⁽¹⁾ a été contestée pour les périodes les plus anciennes, par comparaison à la datation des variations du niveau des mers, issue de l'analyse des sédiments marins, et par rapport à la différence d'âge entre l'air et la glace pour ces mêmes périodes anciennes. Une méthode inverse de datation glaciologique, tirant parti de ces contraintes, a été développée par Frédéric Parrenin, un ancien doctorant du LSCE maintenant chercheur au Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE) près de Grenoble. Une nouvelle datation du forage EPICA Dôme C est en cours de finalisation. L'histoire des variations de température au site de Dôme C, déduites de la composition isotopique de la glace, en fonction de l'échelle de temps s'étendant de 2004 jusqu'à 740 000 ans vers le passé, est décrite sur la figure 2. Les dernières mesures effectuées sur le forage de Dôme C montrent que le forage complet couvre 800 000 ans et que l'enregistrement climatique fiable s'interrompt environ 60 m avant le fond du forage. Ceux-ci correspondent à de la glace qui a pu subir un écoulement complexe au voisinage du socle rocheux, et les analyses suggèrent un mélange de couches de glace d'âges différents.

Glaciations et périodes interglaciaires

L'enregistrement climatique de Dôme C révèle déjà des informations cruciales vis-à-vis de l'évolution du climat. Tout d'abord, il confirme les éléments sur l'histoire des températures antarctiques dont les scientifiques disposent sur deux autres sites: Vostok pour de l'ordre de 400 000 ans et Dôme Fuji pour à peu près 300 000 ans. Typiquement, l'amplitude des changements de température entre la dernière glaciation, il y a environ 20 000 ans, et la période actuelle est de

■ (1) *Nature*, p. 2981, 2004.

$9 \pm 2^\circ\text{C}$. Ces reconstructions de température sont essentielles pour tester le réalisme des **modèles** de climat, utilisés également pour prévoir son évolution future. À ce jour, il semble que les modèles de climat aient tendance à sous-estimer les changements passés de température dans les régions polaires.

Le forage de Dôme C couvre 800 000 ans, ce qui autorise l'étude de plusieurs glaciations. Ces périodes se succèdent à un rythme de l'ordre de 100 000 ans, comme l'étude des sédiments marins l'avait déjà dévoilé. Étant donné que le climat est majoritairement en condition glaciaire au cours de cette période, un enregistrement long permet de caractériser finement les subtiles différences entre les périodes interglaciaires "chaudes" qui se produisent entre deux glaciations. Les glaces de Dôme C révèlent ainsi que les périodes chaudes les plus chaudes atteignent des températures supérieures à environ 5°C , au maximum, par rapport à aujourd'hui. Elles indiquent également que les périodes chaudes présentent une grande variété de durée et d'intensité.

La période chaude la plus longue est survenue il y a environ 400 000 ans (MIS 11), avec une durée de près de 28 000 ans. Cette longue période chaude contraste avec les périodes interglaciaires les plus récentes qui ont été relativement brèves, de l'ordre de 10 000 ans. Comprendre les mécanismes qui produisent la fin d'une période chaude est essentiel vis-à-vis de l'évolution du climat actuel et de la capacité des climatologues à prévoir quand aura lieu la prochaine glaciation.

L'influence des paramètres de l'orbite terrestre sur la dynamique du climat

Le moteur des grandes variations climatiques est la distribution de l'ensoleillement en fonction de la latitude et des saisons. La théorie formulée en 1941 par le géophysicien serbe Milutin Milankovitch attribue les modifications du climat aux variations pseudo-périodiques des paramètres de l'orbite que décrit la Terre autour du Soleil. L'*excentricité* de l'orbite, qui détermine la distance entre la Terre et le Soleil, varie tous les 100 000 à 400 000 ans, l'*obliquité* ou *inclinaison* de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite tous les 40 000 ans environ, et la position des saisons sur l'orbite de la Terre tous les 19 000 à 23 000 ans, à cause du phénomène de *précession des équinoxes* ⁽²⁾. Ces paramètres modulent la distribution de l'ensoleillement selon la latitude et la saison. Dans l'état actuel des connaissances, les scientifiques identifient l'empreinte des fréquences orbitales dans les enregistrements cli-

(2) Équinoxes : moments de l'année caractérisés par une durée égale du jour et de la nuit en tout point de la surface terrestre et qui marquent le début du printemps et de l'automne.

La précession des équinoxes correspond au lent changement de direction de l'axe de rotation de la Terre, provoqué par le couple qu'exercent les forces de marées de la Lune et du Soleil sur le renflement équatorial de la Terre. Ces forces tendent à amener l'excès de masse présent à l'équateur vers le plan de l'écliptique (plan géométrique qui contient l'orbite terrestre). La Terre étant en rotation, ces forces ne peuvent changer l'angle entre l'équateur et l'écliptique mais entraînent un déplacement de l'axe de rotation de la Terre dans une direction perpendiculaire à cet axe et au couple. Ce déplacement appelé *précession* a pour résultat que l'axe de rotation de la Terre décrit un cône.

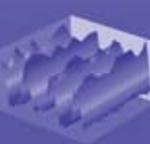
(3) Albédo : pouvoir réfléchissant d'une surface ou d'un milieu (ici des sols) mesuré par le rapport de l'énergie solaire réfléchi à l'énergie solaire incidente.



Après extraction des carottes de glace, des échantillons sont découpés et préparés pour des analyses ultérieures en Europe. De nombreuses analyses sont également réalisées en continu sur le terrain.

matiques, et les modèles de climat permettent de tester les relations entre ces paramètres orbitaux et la dynamique du climat. La théorie de Milutin Milankovitch relie l'occurrence d'un minimum d'ensoleillement d'été dans l'hémisphère Nord à la persistance de la couche de neige, puis l'accumulation progressive de cette neige pour construire les calottes de glace qui couvraient le nord de l'Europe et de l'Amérique lors des glaciations.

Il est acquis que des processus amplificateurs au sein de la machine climatique jouent un rôle clé. Parmi eux figurent la variation d'albédo ⁽³⁾ liée à la présence de neige ou de glace, ou aux changements de couverture végétale, et les modifications du cycle du carbone. Si le climat est considéré comme un système à seuil, il est possible de déterminer, à partir des entrées en glaciation passées, les seuils d'ensoleillement requis pour faire basculer le climat d'une période interglaciaire à une période glaciaire. Ainsi, la variation de la position des équinoxes sur l'orbite de la Terre est particulièrement atténuée lorsque l'excentricité de l'orbite est faible. C'est le cas actuellement, et il en était de même il y a environ 400 000 ans. Les données du forage EPICA suggèrent ainsi que la configuration actuelle et à venir de l'orbite de la Terre, relativement semblable à celle



P. Bazoge/CEA

Salle des congélateurs où sont entreposés les échantillons de glaces polaires provenant des diverses campagnes. Leur analyse fournit des informations essentielles sur l'évolution passée du climat et le fonctionnement de la machine climatique.

de la période chaude très longue d'il y a 400 000 ans, ne devrait pas entraîner de glaciation au cours des prochaines dizaines de milliers d'années. Nous nous situons donc dans une période très particulière vis-à-vis de l'évolution "naturelle" du climat, où il ne faut pas compter sur les paramètres de l'orbite de la Terre pour compenser l'augmentation de l'effet de serre d'origine anthropique.

Une forte corrélation entre les changements climatiques et les gaz à effet de serre

L'accroissement de l'effet de serre peut être caractérisé par rapport à la variabilité naturelle des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, déduite de l'analyse des gaz piégés dans la glace de Dôme C. Réalisées à l'université de Berne en Suisse et au LGGE, ces mesures viennent d'être publiées pour les derniers 650 000 ans. Les résultats confir-

ment l'analyse de l'air de la glace de Vostok et révèlent que les niveaux actuels de dioxyde de carbone et de méthane dans l'atmosphère, actuellement à 380 ppm et 1 700 ppbv, sont sans précédent en termes de niveaux atteints et de rythme d'augmentation, sur l'ensemble de cette période.

La publication des enregistrements de gaz à effet de serre dans la glace a également donné confiance aux climatologues dans l'exploitation des mesures isotopiques dans la glace de Dôme C. En effet, ce sont des paramètres complètement indépendants, avec des processus d'archivage différents, dans la phase eau et air de la glace. Les mécanismes, qui sont à l'origine des variations des composés à effet de serre, se situent, pour le dioxyde de carbone, dans le cycle du carbone marin et continental, et, pour le méthane, essentiellement sur les zones humides des continents, donc dans l'hémisphère Nord. Ces données indiquent que l'histoire du climat antarctique a une pertinence pour l'ensemble de notre planète à l'échelle glaciaire-interglaciaire, ce que confirment les modèles de climat, qui montrent que le changement de température au centre de l'Antarctique est proportionnel à celui qui affecte la moyenne globale des températures.

Or, les enregistrements des températures antarctiques et ceux des concentrations en gaz à effet de serre révèlent tous deux une modification très importante dans l'intensité des changements climatiques pour la partie la plus ancienne, avant 400 000 ans. Pour ces périodes anciennes, les paléoclimatologues observent des périodes interglaciaires "tièdes", d'une intensité bien plus faible que les périodes interglaciaires les plus récentes. Pour l'instant, ils élaborent des hypothèses pour expliquer ce changement profond dans l'intensité des périodes chaudes. Il semble que de faibles variations à long terme des amplitudes

(4) Combustibles fossiles : combustibles issus de la Terre, comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel.



Les échantillons de glace sont découpés en chambre froide (-20 °C) avant de procéder à l'analyse des bulles d'air qui y sont piégées.

F. Vigouroux/CEA

maximales et minimales de l'obliquité de la Terre puissent être à l'origine de ces changements importants dans le rythme du climat et du cycle du carbone. Si cette hypothèse est avérée, cela signifie que le climat global est beaucoup plus sensible à de faibles variations de son bilan radiatif que les scientifiques ne le pensaient jusqu'à présent.

Enfin, la corrélation étroite entre les variations passées de température en Antarctique et la concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone et méthane montre qu'il existe un couplage fort entre l'évolution du climat, pilotée par les paramètres de l'orbite de la Terre, et les rétroactions entre le climat et le cycle du carbone. En d'autres termes, quand le climat se modifie, les puits et sources naturels de carbone se réorganisent, ce qui peut amplifier les changements climatiques. Les mêmes processus sont en jeu actuellement. L'utilisation massive de combustibles fossiles⁽⁴⁾, la déforestation et l'agriculture intensive rejettent des composés à effet de serre, qui modifient le bilan radiatif de la Terre et provoquent un réchauffement. Les changements climatiques entraînent des réorganisations des puits et sources de carbone, à travers des évolutions dans la circulation océanique et dans l'apport de précipitations favorables à la croissance de la végétation. Les études de modélisation conduites au LSCE suggèrent que l'effet du changement climatique à venir sur les puits et sources de carbone pourrait accroître de manière significative l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et ainsi amplifier les bouleversements climatiques.

Un réchauffement cinq fois plus rapide prévu par les modèles

Pour finir, l'analyse, à partir de l'histoire des températures antarctiques, du rythme "naturel" des changements de température à Dôme C a été réalisée. Le réchauffement le plus abrupt détecté s'est produit lors de la dernière déglaciation, il y a environ 14 000 ans, avec une cadence de 0,4 °C par siècle. Si les rejets de gaz à effet de serre se poursuivent avec un rythme d'accroissement des concentrations en dioxyde de carbone de 1 % par an, alors les modèles de climat prévoient un réchauffement à Dôme C de 2,6 (en cas de doublement de la concentration de dioxyde de carbone) à 5,7 °C (en cas de quadruplement), avec une cadence de réchauffement moyen de 1,5 à 2,4 °C par siècle, ce qui est 4 à 5 fois plus rapide que les changements "naturels" les plus rapides. C'est un changement abrupt, à l'échelle des variations climatiques passées.

Les nouveaux projets de forages profonds au long des côtes de l'Antarctique et du Groenland (encadré 3), développés dans le cadre du programme IPICS (*International Partnership for Ice Core Science*), permettront de compléter les informations déjà rassemblées et de progresser encore dans la compréhension des changements climatiques.

➤ **Valérie Masson-Delmotte, Olivier Cattani, Gabrielle Dreyfus, Sonia Falourd-Mederbel, Jean Jouzel, Amaëlle Landais et Bénédicte Minster**

LSCE/IPSL
Unité mixte de recherche CEA-CNRS-UVSQ
Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay (Orme des Merisiers)



A. Comin/CEA

Analyse d'une carotte de glace par un spectromètre de masse. Les mesures de la teneur en deutérium et en oxygène 18 de la glace permettent de reconstruire quantitativement les variations passées de température.

Quelles perspectives pour les forages polaires profonds ? 3

Le programme IPICS (*International Partnership for Ice Core Science*), soutenu par le SCAR (*Scientific Committee on Antarctic Research*) et IGBP/PAGES (*International Geosphere Biosphere Programme/PAST Global changES*), vise à coordonner les efforts internationaux dans quatre axes essentiels pour progresser dans la compréhension des changements climatiques passés. Le premier objectif est d'obtenir le forage antarctique le plus ancien possible, remontant au-delà du dernier million d'années, pour étudier les interactions entre le climat et le cycle du carbone lors de la transition majeure de la durée des cycles climatiques entre 40 000 et 100 000 ans. Ce projet requiert des efforts intensifs pour déterminer les sites de forage potentiels en Antarctique, en particulier *via* des expéditions de terrain qui seront organisées au cours de l'Année polaire internationale (2007-2009). La deuxième orientation consiste à acquérir un forage profond au nord-ouest du Groenland, couvrant l'intégralité de la période chaude jusqu'à l'avant-dernière glaciation, et à caractériser l'intensité du réchauffement, la stabilité du climat et celle de la calotte groenlandaise. La troisième direction a pour but de définir les structures spatiales et temporelles de la séquence des changements climatiques abrupts au cours des derniers 40 000 ans, à partir de matrices de forages à haute **résolution** aux deux pôles. Le nouveau forage franco-italien de Talos Dôme entre dans ce cadre. Le quatrième objectif vise à caractériser l'histoire des forçages climatiques et du climat, à partir de matrices de forages à très haute résolution couvrant dans les régions polaires et les glaciers de montagne les derniers 2 000 ans.

D Spectroscopie et spectrométrie

Les méthodes spectrométriques se décomposent globalement en deux grandes catégories, la spectrométrie des rayonnements – qui elle-même regroupe la spectrométrie d'absorption, la spectrométrie d'émission, la spectrométrie de diffusion Raman et la spectrométrie de résonance magnétique nucléaire – et la spectrométrie de masse.

La **spectroscopie** et la **spectrométrie**⁽¹⁾ **des rayonnements** regroupent un ensemble de méthodes d'analyse permettant d'accéder à la composition et à la structure de la matière fondées sur l'étude des spectres fournis par l'interaction des **atomes** et des **molécules** avec divers **rayonnements électromagnétiques** qu'ils émettent, **absorbent** ou **diffusent**.

Selon leur énergie, les **photons** interagissent sélectivement avec les différents niveaux électroniques qui composent la structure électronique atomique ou moléculaire. Ce sont les **électrons de cœur** (proches du noyau atomique) pour les rayons X⁽²⁾, les **électrons périphériques** (éloignés des noyaux et impliqués dans les liaisons chimiques) pour la lumière absorbée ou émise dans le **proche ultraviolet** et dans le **visible**. Dans le domaine des rayonnements **infrarouge**, c'est le saut entre niveaux de **vibration moléculaire** qui intervient, le saut entre niveau de **rotation** des molécules pour les micro-ondes et le **spin** du **noyau atomique** pour la RMN.

Spectrométrie d'absorption

Celles des méthodes de spectroscopie qui sont fondées sur l'**absorption** utilisent la loi de Beer-Lambert, indiquant la proportionnalité entre l'intensité lumineuse absorbée et la quantité de matière absorbante :

$$A = \log(I_0/I) = \epsilon \cdot C \cdot L$$

où A est l'**absorbance** du milieu traversé par le rayonnement, I₀ l'intensité lumineuse incidente, I l'intensité lumineuse transmise, ϵ le coefficient d'extinction **molaire** caractéristique de la substance étudiée à une longueur d'onde donnée en L mol⁻¹ cm⁻¹, L l'épaisseur traversée en cm et C la concentration en mole par litre.

(1) Le terme de spectrométrie, initialement réservé à l'enregistrement et à la mesure, tend à devenir synonyme de spectroscopie, l'œil étant remplacé dans l'observation par d'autres récepteurs et instruments, et le domaine visible ne constituant qu'un domaine particulier d'analyse.

(2) À noter par ailleurs que la cristallographie à rayons X n'est pas considérée comme une méthode spectroscopique à proprement parler.

En mesurant l'absorbance du milieu à une longueur d'onde donnée, il est donc possible de déterminer la concentration d'une substance dans un échantillon.

Dans un **spectre d'absorption** enregistré au moyen d'un **spectromètre**, les **pics d'absorption** correspondent aux longueurs d'onde que le milieu peut absorber. De même que le spectre de la lumière solaire est obtenu en la faisant passer par un prisme qui la décompose, les spectromètres analysent la répartition spectrale de l'ensemble des rayonnements électromagnétiques en les séparant par longueur d'onde au moyen d'un réseau de diffraction par réflexion. Les spectres font apparaître des pics correspondant chacun à une longueur d'onde particulière.

Selon le type d'échantillon à analyser et le niveau de performances recherché, on utilise en laboratoire la **spectrométrie d'absorption** soit sur molécules en phase liquide ou gazeuse, soit sur vapeur atomique obtenue en décomposant thermiquement les échantillons liquides ou solides.

La spectroscopie d'absorption moléculaire dans le domaine UV-visible est simple d'emploi mais ne s'applique qu'à des échantillons peu complexes car, du fait de la largeur des **bandes d'absorption moléculaires**, les spectres d'absorption ne permettent généralement pas de distinguer spécifiquement tous les composants d'un mélange complexe.

En **spectrométrie infrarouge (IR)**, l'absorption résulte des phénomènes de vibration et rotation des molécules. Les spectres d'absorption infrarouge permettent donc de déterminer la nature des liaisons chimiques composant une molécule en accédant à la constante de rappel (comme un ressort remonte un poids) de la liaison et donc de confirmer des hypothèses structurales.

Lorsque le nombre d'atomes croît, le spectre devient rapidement complexe et l'interprétation devient très délicate, en particulier, pour les composés organiques.

La spectrométrie d'**absorption atomique** est de ce point de vue plus performante car les atomes absorbent avec des **raies d'absorption** très fines. Des mesures précises sont donc réalisables même lorsque l'échantillon est constitué d'un assemblage complexe d'éléments chimiques. L'absorption atomique est une technique de référence pour l'analyse des éléments à l'état de traces dans une très grande variété d'échantillons, notamment biologiques.

Spectrométrie d'émission

Les atomes ou molécules portés dans un état excité peuvent se désexciter en émettant un rayonnement appelé **rayonnement d'émission**. Lorsque l'excitation résulte de l'absorption sélective, par les atomes ou les molécules à analyser, d'un rayonnement électromagnétique, il s'agit d'émission de **fluorescence** (ou de phosphorescence selon l'état d'excitation électronique mis en jeu).

Comme pour l'absorption, la fluorescence peut être appliquée dans le domaine des rayonnements UV-visible aux molécules ou aux atomes. La **spectrométrie de fluorescence X** désigne quant à elle le **rayonnement X** émis par les atomes, excités par absorption d'un rayonnement X. Les techniques de fluorescence sont plus complexes à mettre en œuvre que les techniques d'absorption car elles nécessitent que la particule à analyser soit excitée sélectivement par un rayonnement monochromatique. En revanche, comme le rayonnement émis est également spécifique de la particule, la spectrométrie de fluorescence présente une double sélectivité qui lui confère un très faible bruit de fond et la rend ainsi particulièrement bien adaptée à la mesure des très faibles concentrations.

L'émission de rayonnement peut également apparaître lorsque des atomes sont excités thermiquement dans un milieu porté à haute température. La **spectroscopie d'émission** est fondée sur le fait que les atomes ou les molécules excités à de hauts niveaux d'énergie se désexcitent vers des niveaux plus bas en émettant des radiations (émission ou luminescence). Elle se distingue de la spectrométrie de fluorescence par le fait que l'excitation n'est pas apportée de manière sélective, mais au contraire concerne indistinctement toutes les particules qui composent le milieu. Les **raies d'émission** correspondent donc à des rayonnements émis directement par un corps porté à haute température et le **spectre d'émission** permet de déceler et de quantifier tous les atomes ou les molécules présents dans la source d'émission.

Spectrométrie de diffusion Raman

Les interactions entre la matière et les radiations électromagnétiques conduisent également à des phénomènes de diffusion comme la **diffusion élastique** et la **diffusion inélastique**. La diffusion peut avoir lieu à la rencontre d'une interface entre deux milieux ou à la traversée d'un milieu.

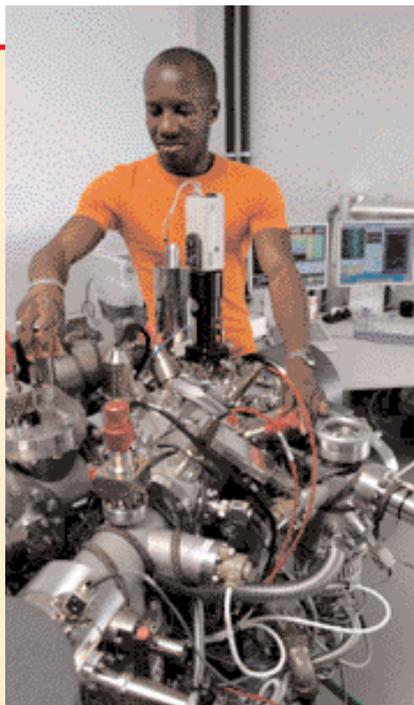
D (suite)

Ce processus est le plus souvent "élastique", c'est-à-dire qu'il a lieu sans changement de fréquence des rayonnements composant le faisceau. La diffusion élastique du rayonnement solaire par l'atmosphère est, par exemple, responsable de la couleur bleue du ciel qui apparaît lorsque le regard n'est pas dirigé vers le soleil (*effet Tyndall*). L'intensité diffusée est, en effet, d'autant plus forte que la longueur d'onde du rayonnement est courte ce qui, dans le spectre solaire, correspond au bleu.

En spectrométrie, la principale utilisation de la diffusion concerne la *spectrométrie Raman*. Il s'agit de la diffusion inélastique d'un rayonnement incident par les molécules qui composent l'échantillon. L'écart entre la fréquence du rayonnement diffusé et la fréquence du rayonnement incident permet d'identifier les liaisons chimiques mises en jeu. La spectrométrie Raman est une technique très utilisée pour l'analyse structurale en complément de la spectrométrie infrarouge et de la spectrométrie de masse.

Spectrométrie de résonance magnétique nucléaire

Le principe de la **résonance magnétique nucléaire (RMN)** est basé sur le fait qu'un atome possède un *moment magnétique*, comme une charge qui tourne et agit comme un petit aimant, gouverné par la mécanique quantique, qui s'aligne dans un champ magnétique comme une boussole dans le champ terrestre. Le principe de la RMN consiste à induire et détecter la transition entre le moment magnétique nucléaire du niveau de plus basse énergie à celui de plus grande énergie par absorption d'un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde se situe dans le domaine des radiofréquences : lorsque l'énergie du photon correspond exactement à la différence d'énergie entre les deux niveaux, il y a absorption. Les noyaux dont le nombre de **neutrons** et de **protons** sont tous les deux pairs possèdent un spin nul. Les atomes de carbone 12 et d'oxygène 16 qui sont très répandus dans la nature ont ainsi un spin nucléaire nul. Par contre, l'hydrogène ne possède qu'un seul proton et son moment magnétique nucléaire est égal à 1/2 : il a donc deux états énergétiques possibles correspondant aux deux orientations possibles du spin par rapport au champ magnétique. La mesure de la fréquence de résonance du champ électromagnétique qui permet le passage de l'un à l'autre des états d'énergie permet de faire l'analyse des molécules.



Spectromètre de masse d'ions secondaires utilisé au CEA pour réaliser des mesures isotopiques rapides sur un échantillon par exemple prélevé sur une installation aux activités nucléaires suspectes.

Cette fréquence est fixe mais les différents noyaux d'une molécule ne résonnent pas tous à la même fréquence car leur environnement magnétique est modifié par leur environnement chimique (électronique). De nombreux spectres contiennent plus de pics que la molécule ne contient de protons en raison des interactions de ceux-ci avec leurs voisins. Deux noyaux peuvent interagir au travers de la molécule, éloignés de plusieurs liaisons chimiques, c'est ce qu'on appelle le couplage entre atomes. Cette interaction donne une structure fine au spectre RMN.

Spectrométrie de masse

La **spectrométrie de masse** est une technique de *détection* et d'*identification* extrêmement sensible qui permet de déterminer les structures moléculaires et donc la composition de l'échantillon. Il ne s'agit pas d'une spectroscopie *stricto sensu*, car elle ne fait pas appel à des niveaux d'énergie discrets. Son principe ? Un composé introduit dans l'appareil est vaporisé puis **ionisé** par une *source* de bombardement électronique (à 70 eV). L'ion ainsi obtenu, appelé ion moléculaire, permet la détermination de la masse molaire du composé. Des ruptures des liaisons chimiques peuvent y former des ions fragments caractéristiques. Ceux-ci sont ensuite triés en fonction de leur rapport masse/charge dans un *analyseur* par

l'application d'un champ magnétique et/ou électrique, puis collectés par un *détecteur* qui amplifie le signal associé aux ions qui arrivent en des temps différents. Un système de traitement des données transforme les informations du détecteur en un **spectre de masse** dont la lecture, par comparaison avec des spectres références, permet d'établir la carte d'identité de la molécule. En utilisant un spectromètre de masse haute résolution, il est possible de déterminer la masse exacte du composé et les pourcentages isotopiques de chaque atome.

Le choix de la méthode d'ionisation est directement lié à la nature de l'échantillon et au type d'analyse. Si la spectrométrie de masse s'est progressivement adaptée aux exigences croissantes des chimistes et des biologistes (séparation de mélanges de plus en plus complexes et de forte polarité et détermination de masses moléculaires de plus en plus élevées sur des échantillons de plus en plus limités), c'est essentiellement grâce aux progrès des *techniques d'ionisation* dont l'émission ionique secondaire sur surface (SIMS), l'ionisation chimique, le thermospray et la source à bombardement d'atomes rapides (FAB), jusqu'à, dans les années 80, la désorption laser assistée par matrice (MALDI, pour *Matrix Assisted Laser Desorption Ionisation*) et l'électrospray (ESI, pour *ElectroSpray Ionisation*), ainsi qu'à ceux des *techniques de détection*, de la mesure du temps de vol (TOF) à la "trappe ionique" (IT) en passant par les quadripôles (MS ou Q). En protéomique, par exemple, seules la MALDI, l'ESI et la SELDI (*Surface Enhanced Laser Desorption/Ionisation*) sont utilisées.

La **spectrométrie de mobilité ionique IMS** (*ion mobility spectrometry*) est une technique d'analyse chimique en phase gazeuse qui consiste à soumettre un gaz à un champ électrique. Les molécules ionisées acquièrent une vitesse caractéristique de l'ion car dépendant de la masse et de la charge. L'arrivée des ions sur une des plaques produisant le champ provoque un courant qui est enregistré. Il est possible de relier le temps au bout duquel un pic se produit avec la nature de l'ion l'ayant provoqué.

Les scientifiques font souvent appel au couplage d'appareils appartenant aux deux grandes familles de techniques d'analyse (encadré E, **Qu'est-ce que la chromatographie ?**), par exemple, d'un chromatographe et d'un spectromètre de masse (ou d'un détecteur à capture d'électrons ECD), notamment pour étudier des mélanges complexes à l'état de traces.

B Interactions fondamentales et particules élémentaires

Le **modèle standard** de la physique des particules est le cadre théorique de référence qui décrit toutes les **particules élémentaires** connues (tableau 1) et les **interactions** fondamentales auxquelles ces particules participent (tableau 2). Les constituants élémentaires de la matière, appelés **fermions**, se partagent en deux grandes catégories déterminées par leur participation aux interactions ou forces fondamentales (**gravitationnelle**, **électromagnétique**, **faible** et **forte**) par l'intermédiaire de **bosons vecteurs**, particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature⁽¹⁾ (tableau 2). L'appartenance d'une particule à la catégorie des fermions ou à celle des bosons est liée à son **spin** (moment angulaire ou moment de rotation interne intrinsèque), suivant qu'il est de valeur demi-entière (fermion) ou entière (**boson**). À chaque constituant de la matière est par ailleurs associée son **antiparticule**, une particule de même masse mais de charge opposée. Le **positon** est ainsi l'antiparticule de charge positive de l'**électron**, dont la charge est négative.

Leptons et quarks

Les fermions comportent, d'une part les **leptons**, qui peuvent se déplacer librement et ne participent pas à l'**interaction forte** qui assure la cohésion des **noyaux** atomiques (elle est pour cette raison qualifiée de **nucléaire**), et d'autre part les **quarks**, qui participent à toutes les interactions mais ne sont pas observés individuellement, imbriqués qu'ils sont au sein des **hadrons**, les particules sensibles à l'interaction forte dont ils sont les constituants⁽²⁾.

Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** participent à l'**interaction électromagnétique** (qui assure la cohésion des **atomes** et des **molécules**) et à l'**interaction faible** (à la base de phénomènes de désintégration et en particulier de la **radioactivité β**). Les **leptons neutres** ou **neutrinos**, pour leur part, ne participent qu'à l'interaction faible. De masse très réduite, il en existe un type pour chaque type de lepton chargé.

Indépendamment de leur participation aux interactions, les constituants élémentaires de la matière sont classés en trois **générations** ou **familles** de particu-

les. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses, chaque famille étant plus lourde que la précédente.

L'**électron**, le quark haut (u pour *up*) et le quark bas (d pour *down*), qui appartiennent à la première génération, sont les particules massives les plus légères et sont stables. Ce sont les constituants exclusifs de la **matière ordinaire**, dite **baryonique** (un **baryon** est un assemblage de quarks) faite de **protons** et de **neutrons** qui ne représente pourtant qu'environ 4 % du contenu énergétique de l'Univers!

Les particules des deux autres familles sont plus lourdes et instables, à l'exception des neutrinos, qui ont cependant une masse non nulle mais qui sont stables. Elles ne peuvent être observées ou détectées que dans les états finals des collisions produites dans les **accélérateurs** ou dans le **rayonnement cosmique** et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille.

D'après la **mécanique quantique**, pour qu'il y ait une interaction entre particules de matière ordinaire, il faut qu'au moins une particule élémentaire (un boson) soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le boson **intermédiaire** (ou **vecteur**) de l'interaction électromagnétique, les **W^+** , **W^-** et **Z** sont les bosons intermédiaires de l'interaction faible, et les **gluons** sont ceux de l'interaction forte au niveau des quarks. Quant au **graviton**, vecteur supposé de l'interaction gravitationnelle, il n'a pas été découvert expérimentalement. La **force gravitationnelle**, qui s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse, n'est pas incluse dans le modèle standard, d'autant que la théorie des champs quantiques appliquée à la gravitation n'est pas viable en l'état. Si les effets gravitationnels sont négligeables dans les mesures de physique des particules, ils deviennent dominants aux échelles astronomiques.

La portée des interactions

Les quarks et les leptons chargés échangent des photons. Le photon ayant une charge électrique nulle, ces particules conservent leur charge électrique après

l'échange. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique.

Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés**, où les vecteurs de l'interaction sont **W^+** et **W^-** , et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est **Z^0** . Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (environ 80 GeV/c² pour **W^\pm** et 91 GeV/c² pour **Z^0**), la portée de l'interaction faible est donc infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ m. Les bosons **W^\pm** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent changent de charge électrique et également de nature (saveur). En revanche, le boson **Z^0** étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changeront pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont capables aussi d'échanger un **Z^0** . De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z^0** avec une autre particule, mais pas un photon.

Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur⁽¹⁾ échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes

(1) La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur) ou "nombres quantiques conservés". La charge de couleur, nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes, peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue" (ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles). Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

(2) Exemple des **nucléons** : le proton contient deux quarks haut et un quark bas, le neutron deux quarks bas et un quark haut. Un **méson** n'est composé que de deux quarks (un quark et un antiquark).

B (suite)

une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluons entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais puisqu'ils sont dotés d'une charge

de couleur, ils peuvent interagir entre eux, ce qui complique grandement le traitement théorique de cette interaction. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10^{-15} m.

La quête de l'unification

Le cadre théorique du modèle standard est la **théorie quantique des champs** qui permet de décrire quantitativement les interactions fondamentales des parti-

		leptons peuvent se déplacer librement		quarks s'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe. Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	première famille	électron (e) responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c ²	neutrino électronique (ν_e) sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas (d) sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 4 - 8 MeV/c ²	haut (u) sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 - 4 MeV/c ²
	deuxième famille	muon (μ) un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c ²	neutrino muonique (ν_μ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange (s) un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 - 130 MeV/c ²	charmé (c) un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1,15 - 1,35 GeV/c ²
	troisième famille	tau (τ) encore plus lourd masse : 1776,99 ± 0,29 MeV/c ²	neutrino tauique (ν_τ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté (b) encore plus lourd masse : 4,1 - 4,4 GeV/c ²	top (t) le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 171,4 ± 2,1 GeV/c ²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	photon grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique		gluon porteur de la force forte entre quarks		W[±], Z⁰ porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive
Boson de Higgs?		responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"			

Tableau 1.

Table des douze constituants élémentaires de matière dont le modèle standard décrit les interactions. Les trois leptons chargés (électron, e⁻, muon, μ⁻, tau, τ⁻) sont sensibles aux interactions électromagnétique et faible, les neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) ne sont sensibles qu'à l'interaction faible et les six quarks (up, charm et top - ou u, c, t - de charge 2/3 et down, strange, bottom - ou d, s, b - de charge -1/3) sont sensibles aux trois interactions. Chaque constituant élémentaire possède son antiparticule, de même masse et de nombres quantiques algébriques (comme la charge électrique) de signe inversé.

B (suite)

cules élémentaires en respectant les principes de la *relativité restreinte* et ceux de la mécanique quantique. D'après cette dernière, pour observer une structure microscopique à haute résolution temporelle et spatiale, il est nécessaire de lui transférer une énergie-impulsion d'autant plus élevée que la résolution souhaitée est fine. Mais d'après la théorie de la relativité, ce transfert d'énergie-impulsion peut se transformer en apparition de particules qui n'étaient pas présentes dans l'état initial : les fermions peuvent être produits ou annihilés par paires particule/antiparticule, les bosons peuvent l'être en nombre arbitraire.

Tous les processus relevant d'une même interaction fondamentale sont reliés les uns aux autres. La démarche de la théorie quantique des champs, dans laquelle les propriétés de **symétrie** jouent un rôle fondamental, vise à décrire l'ensemble des processus relatifs à chaque interaction fondamentale au sein de grandes synthèses théoriques.

L'interaction forte et l'interaction électromagnétique sont respectivement formalisées dans les théories de la **chromodynamique quantique** et de l'**électrodynamique quantique**. L'interaction faible, quant à elle, n'est pas décrite isolément, mais en conjonction avec l'interaction électromagnétique dans le formalisme unifié de la **théorie électrofaible**. Des théories de grande *unification* de toutes les interactions fondamentales existent, mais n'ont pas encore reçu de validation expérimentale.

Toutes les prédictions du modèle standard ont été confirmées par l'expérience, à l'exception jusqu'à présent d'une seule, à l'existence du (des ?) **boson(s) de Higgs**, particule(s) que l'on espère bien découvrir au LHC. Le **mécanisme de Higgs** serait responsable de la masse des particules élémentaires, le boson éponyme permettant de donner une masse aux fermions de masse nulle interagissant avec lui. Il permettrait l'unification, à haute énergie, des interactions électromagnétique et faible au sein de la théorie électrofaible et expliquerait efficacement la **brisure de cette symétrie électrofaible** à basse énergie, qui se traduit par deux interactions qu'on peut distinguer à ce niveau d'énergie (voir

L'interaction électrofaible d'un accélérateur à l'autre : la feuille de route du LHC à l'aune des mesures du LEP, p.23).

Dépasser ou compléter le modèle standard ?

Le modèle standard comporte une série de paramètres (tels que les masses des particules ou les intensités des forces fondamentales) qui sont "calés" sur les résultats expérimentaux. C'est, en tout état de cause, une théorie susceptible d'être améliorée ou approfondie, voire dépassée. Il ne fournit pas d'explication à la classification des constituants de la matière en trois générations de particules, alors que c'est précisément l'existence de ces trois générations qui permet de rendre compte de la **violation de l'invariance CP** charge/parité (qui fait qu'un processus physique impliquant l'interaction faible n'est pas équivalent à son image dans un miroir), violation qui est vraisemblablement à l'origine du déséquilibre matière/**antimatière** au profit de la première dans l'univers primordial. Il ne permet ni le traitement quantique de la gravitation ni ne fournit d'explication complète à la propriété fondamentale du **confinement** qui interdit aux quarks de se propager à l'état libre hors des hadrons.

Pour dépasser ou compléter le modèle standard, les chercheurs explorent principalement deux voies :

– la **supersymétrie** (communément

appelée SUSY) associerait à chaque particule (boson ou fermion) du modèle standard un partenaire, respectivement fermion ou boson. Ces partenaires seraient *a priori* très massifs, le plus léger d'entre eux serait une particule n'interagissant que très faiblement. Elle serait un candidat idéal pour expliquer la **masse cachée** (ou **matière noire**) de l'Univers qui représente quelque 21 % du contenu énergétique de l'univers, le reste (près de 75 %) étant constitué d'une **énergie noire** dont la nature reste également à déterminer. Ces WIMPs (acronyme anglais de Weakly Interacting Massive Particles) sont activement recherchés (voir *Edelweiss II, à la recherche des particules de matière noire*).

– la voie de la **sous-structure** présume qu'il existerait un nouveau niveau d'élémentarité sous-jacent aux particules du modèle standard (ou à certaines d'entre elles). Elle déboucherait sur toute une floraison de nouvelles particules composites, analogues aux hadrons, mais de masses deux à trois mille fois plus élevées.

À noter que si les théories supersymétriques donnent des prédictions en accord avec les mesures de précision faites au LEP, les théories qui proposent des sous-structures (du moins leurs versions les plus simples) n'y parviennent pas. Quant aux versions les plus complexes, elles rencontrent des problèmes au niveau théorique.

interaction fondamentale	particules associées (messagers)	actions
gravitation	graviton ?	de portée infinie, elle est responsable de la force d'attraction de deux masses entre elles et de la chute des corps
interaction électromagnétique	photon	de portée infinie, elle est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
interaction faible	W^+ , W^- , Z^0	elle est responsable des radioactivités β^- et β^+ et de réactions impliquant des particules comme le neutrino
interaction forte	gluons (il en existe 8)	elle assure la cohésion du noyau atomique

Tableau 2. Les interactions fondamentales, leurs vecteurs et leurs effets.

E Qu'est-ce que la chromatographie ?

La chromatographie et les différentes formes de spectroscopie et de spectrométrie (encadré D, *Spectroscopie et spectrométrie*) constituent les deux grandes techniques de base d'analyse, l'une séparative, l'autre *identificatrice* des composants d'un corps.

La **chromatographie** (du grec *chrôma*, couleur et *graphein*, écrire) permet la *séparation* des constituants d'un mélange en phase homogène liquide ou gazeuse, comme un buvard réparti en auréoles concentriques un liquide répandu à sa surface. Un chromatographe est constitué d'un dispositif d'injection de l'échantillon, d'une colonne, d'un détecteur et d'un système d'enregistrement et d'analyse. Son principe repose sur l'équilibre de concentrations des composés entre deux phases en contact : la *phase stationnaire*, dans la colonne, et la *phase mobile*, qui se déplace. La séparation est basée sur l'entraînement différentiel des constituants dans la colonne, qu'ils parcourent en des temps proportionnels à leur taille ou leur structure, ou selon leur affinité avec la phase stationnaire (polarité...). À leur arrivée en bout de colonne, un *détecteur* mesure en continu la quantité de chacun.

La chromatographie la plus courante se fait en **phase gazeuse** sur des échantillons gazeux ou susceptibles d'être vaporisés sans décomposition. La phase mobile est un gaz (**hélium**, azote, argon ou **hydrogène**) qui balaie en permanence la colonne placée dans un four à thermostat. Les détecteurs permettent l'analyse sélective et l'identification de mélanges très complexes.

Si la phase stationnaire est un liquide non ou peu volatil possédant des propriétés de solvant des composés à séparer, il s'agit de **chromatographie gaz-liquide** ou *chromatographie de partage*.

Si la phase stationnaire est un solide adsorbant (silice, alumine, zéolites ou **polymères**), c'est de la **chromatographie gaz-solide**. Dans cette même famille des chromatographies d'**adsorption**, la **chromatographie liquide-solide** se caractérise par sa phase stationnaire qui est un adsorbant solide polaire.

Dans la **chromatographie liquide haute performance (CLHP)**, l'échantillon doit être totalement soluble dans la phase mobile (solvant d'éluion). Celui-ci doit être poussé à haute pression (d'où la dénomination alternative de chromatographie liquide *haute pression*) afin d'assurer un débit constant dans la colonne et éviter toute perte de charge. La CLHP fait intervenir des mécanismes d'échange soluté/phase mobile/phase stationnaire, basés sur les coefficients de partage ou d'adsorption selon la nature des phases en présence ⁽¹⁾.

Une analyse chromatographique donne un **chromatogramme**, représentation graphique de l'évolution d'un paramètre (intensité du signal du détecteur) lié à la concentration instantanée du soluté en fonction du temps. Il fait apparaître des *pics* émergeant de la *ligne de base*, obtenue en l'absence de composés (figure).

(1) Il existe deux autres types de chromatographie liquide, *ionique* et *d'exclusion*.

N.B. Cet encadré reprend certains passages d'un texte de Pascale Richardin, responsable du groupe Datation au Centre de recherche et de restauration des Musées de France, extrait des pages sur les méthodes d'analyse du site <http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/biblioth/biblioth.htm>.

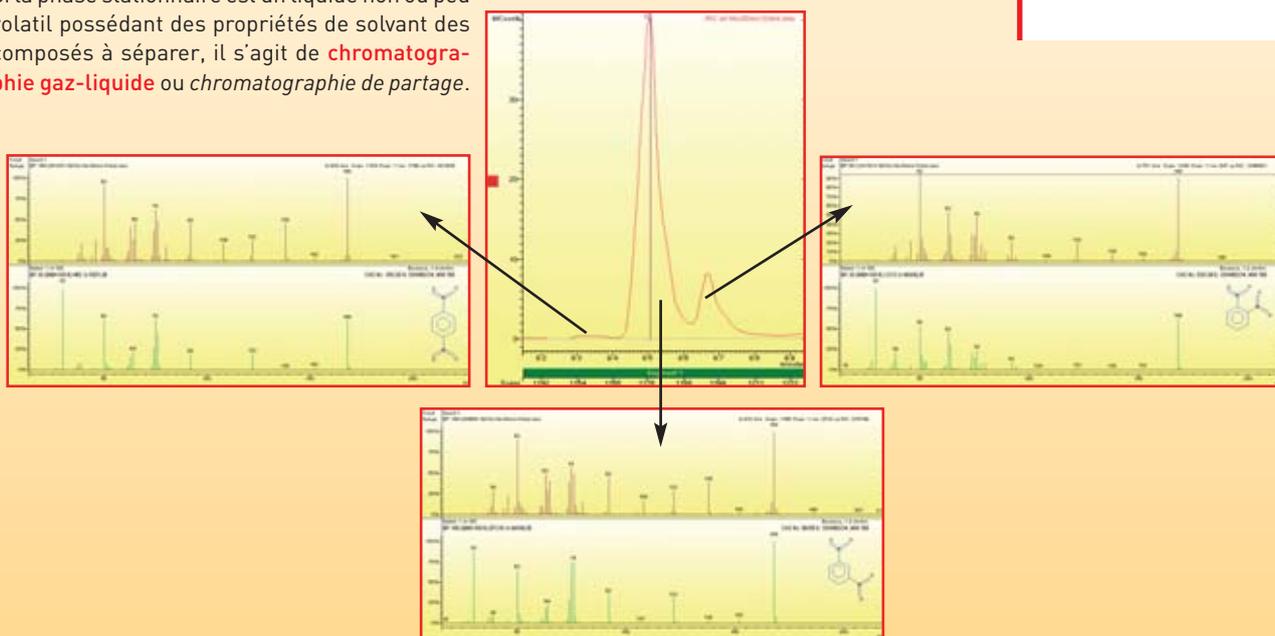


Figure.

Exemple d'utilisation combinée de la spectrométrie de masse et de la chromatographie : séparation des isomères ("molécules sœurs") d'une molécule explosive (le dinitrobenzène DNB) après prélèvements par micro-extraction en phase solide par chromatographie en phase gazeuse et détection par spectrométrie de masse (SPME-GC-MS).