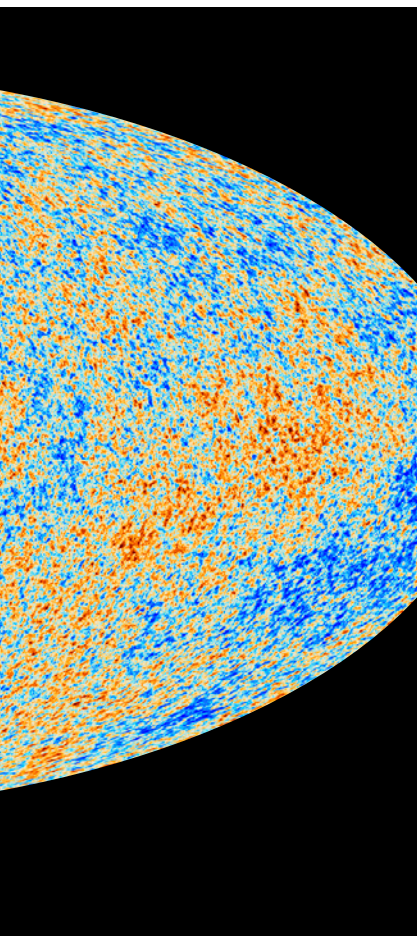




refroidissement continu du cosmos a toutefois fini par provoquer un changement de phase après 380 000 ans d'expansion, lorsque la température de l'Univers n'était plus que de 3 000 kelvins: les électrons furent capturés par les noyaux, formant ainsi des atomes électriquement neutres. Comme les photons interagissent peu avec les atomes, ils purent enfin se propager librement dans l'Univers, sans rencontrer d'obstacle à chacun de leurs pas.

C'est ce rayonnement qui s'est libéré de la matière qui constitue aujourd'hui le fond diffus cosmologique. S'il intéresse tant les cosmologistes, c'est parce qu'il contient une mine d'informations, sa structure ayant dû conserver la trace d'événements cosmiques antérieurs. Notamment, la température du fond diffus cosmologique n'est pas parfaitement homogène à travers le ciel: on observe d'infimes fluctuations (de l'ordre de 10^{-5} kelvin) autour d'une valeur moyenne (voir la figure ci-contre). Les informations statistiques de ces fluctuations révèlent de nombreuses informations sur l'Univers.

Du 10 au 14 janvier 2011, une conférence internationale s'est tenue à Paris pour présenter les premières mesures du satellite *Planck*. La mission et la prise de données se sont poursuivies jusqu'en 2013.

Les résultats de *Planck*, dûment analysés et rendus publics en mars 2013 et en décembre 2014, confirment ce que l'on savait

D'après les équations de la relativité générale d'Einstein, la courbure spatiale de l'Univers est déterminée par la densité de matière et d'énergie qu'il contient. Mais alors, comment se fait-il que la densité moyenne de l'Univers soit exactement celle qui correspond à une courbure globalement nulle de sa géométrie?

UN DÉBUT FULGURANT

Une hypothèse *ad hoc*, développée en 1981 par Alan Guth et Alexei Starobinsky, permet de résoudre ce problème. Selon eux, l'Univers primordial aurait connu une gigantesque «inflation», c'est-à-dire une phase d'expansion incroyablement accélérée lorsque sa densité était extrêmement élevée: les distances auraient été multipliées par un facteur énorme, de l'ordre de 10^{50} , en une durée très courte, de l'ordre de 10^{-32} seconde! Une telle inflation explique la platitude de l'Univers par un simple effet de perspective: le cosmos s'étant considérablement agrandi en une fraction de seconde, sa courbure paraît localement moins importante, de la même façon que la surface d'un ballon gonflé apparaît presque plate si on la regarde sur une toute petite portion. L'Univers observable ne serait qu'une toute petite partie de l'Univers réel...

Les résultats de *Planck* précisent également les proportions des composants actuels de l'Univers: 4,9% de matière ordinaire, 26,6% de matière noire, 68,6% d'énergie sombre. Mais de quoi cette matière noire et cette énergie sombre, qui impriment leur marque sur la dynamique de l'Univers, sont-elles faites? Maintes hypothèses sont proposées, qui devront être testées. Ce travail constitue l'enjeu combiné de la cosmologie, de l'astrophysique et de la physique des particules.

En fait, nous sommes en présence d'une alternative. Soit nous postulons que les lois de la gravitation telles que nous les connaissons sont les bonnes, et dans ce cas il reste à identifier la nature de la matière noire et celle de l'énergie sombre. Soit nous acceptons de remettre en cause les lois de la gravitation pour éviter d'avoir à peupler l'Univers d'objets inconnus, de mystérieux fantômes. Dans ce cas, il faut modifier ces lois de façon à rendre compte des observations sans qu'il soit nécessaire d'invoquer l'existence de ces composantes hypothétiques.

Laquelle de ces deux voies finira par s'imposer? Nul ne sait encore dire si les problèmes de la matière noire et de l'énergie sombre constituent, pour la physique, une crise législative (de l'exactitude ou de l'universalité des lois) ou une crise ontologique (de la complétude de son mobilier actuel). Mais dans les deux cas, son *corpus* théorique ne devrait pas en sortir indemne. Les aventures de Monsieur Tompkins sont bien loin d'être terminées... ■



Contenu de l'Univers: 68,6 % d'énergie sombre, 26,6 % de matière noire, et près de 4,9 % de matière ordinaire



déjà, à savoir que la géométrie de l'Univers observable est euclidienne, c'est-à-dire plate comme une limande. *A priori*, sa courbure pouvait être positive, négative, ou rigoureusement nulle. Or c'est cette dernière situation, la plus singulière qui soit, qui avait été constatée: dans l'Univers, deux parallèles ne se rencontrent jamais. Quelle étrange coïncidence...

2012

Le boson de Higgs

Aux origines de la masse des particules

Le 4 juillet 2012, les porte-parole des expériences du Cern annonçaient la découverte exceptionnelle – et longtemps espérée – d'une particule, le boson de Higgs, un acteur crucial dans la théorie des interactions fondamentales.

Ou plutôt, le boson de Brout-Englert-Higgs, devrait-on dire... La particule devenue célèbre sous le nom de « boson de Higgs » a été mise en évidence au Cern, près de Genève, au terme de plusieurs dizaines d'années d'une quête menée par de nombreux physiciens. On dit souvent que ce boson est à l'origine de la masse, au moins en partie, mais de quoi s'agit-il plus précisément ?

Les physiciens des particules cherchent à identifier les constituants fondamentaux de la matière, et aussi à comprendre les forces qui agissent sur eux, les lois qui les gouvernent et les régularités – des symétries – caractérisant ces lois. Aujourd'hui, le modèle standard de la physique des particules rassemble ces éléments dans un cadre théorique dont la cohérence nécessite le boson de Higgs. Ce modèle décrit comment un petit nombre de particules élémentaires (quarks, électron, neutrinos...) sont soumises à trois interactions fondamentales. L'interaction électromagnétique de deux particules chargées s'interprète comme le résultat de l'échange d'un autre type de particules, les photons. L'« interaction forte » lie les quarks très solidement pour former les protons et les neutrons, et maintient ceux-ci dans les noyaux atomiques. L'« interaction faible » est capable de changer la nature

d'une particule et est responsable, par exemple, de la désintégration du neutron en un proton (avec l'émission d'un électron et d'un antineutrino). À l'échelle subatomique, la quatrième force fondamentale, la gravitation, est extrêmement faible par rapport aux autres interactions, et le modèle standard ne la prend pas en compte.

LES SYMÉTRIES, LE LANGAGE DES PARTICULES

Dans les années 1940, la reformulation de l'électromagnétisme dans un cadre quantique, l'électrodynamique quantique (QED), a préfiguré les principes qui régissent le modèle standard. Les équations décrivant cette interaction obéissent à certaines symétries, et on peut y procéder à des transformations mathématiques particulières, des « transformations de jauge », sans modifier les grandeurs observables telles que le champ électrique et le champ magnétique. L'invariance vis-à-vis des transformations de jauge est essentielle pour la cohérence de la théorie électromagnétique au niveau quantique, notamment pour tenir compte des échanges de plusieurs photons entre particules chargées. Elle est reliée par des théorèmes généraux à la loi de conservation de la charge électrique, et au fait que le photon est de masse nulle, dont il résulte que la force électromagnétique est de longue portée.

L'AUTEUR



PIERRE FAYET
directeur
de recherche
au CNRS, Laboratoire
de physique théorique
de l'École normale
supérieure, à Paris

BIBLIOGRAPHIE

Collaboration ATLAS,
**Observation of a new
particle in the search for
the Standard Model Higgs
boson [...]**, *Phys. Lett. B*,
vol. 716, pp. 1-29, 2012.

Collaboration CMS,
**Observation of a new
boson at a mass of 125 GeV
[...]**, *Phys. Lett. B*, vol. 716,
pp. 30-61, 2012.

Le succès de la description de la QED a conduit les physiciens à rechercher une théorie analogue pour les interactions faible et forte. C'est ainsi que s'est construit, dans la période 1960-1973, le modèle standard de la physique des particules. Celui-ci repose notamment sur une symétrie de jauge dite électrofaible, qui relie les interactions faible et électromagnétique. L'interaction forte, elle, repose sur une autre symétrie de jauge et est décrite par l'échange de gluons entre les quarks.

L'interaction faible a une portée très courte, de l'ordre de 10^{-18} mètre, mille fois moins que la taille d'un proton. Les lois de la physique quantique imposent alors que les particules médiatrices de cette force, les bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z prédits par le modèle, aient une masse importante. Le premier signe de l'existence du boson Z a été la mise en évidence du courant neutre faible associé par l'expérience *Gargamelle* au Cern, en 1973. La présence des bosons intermédiaires W et Z a ensuite été confirmée de façon spectaculaire en 1983 (voir l'article Les bosons w et Z mis en évidence, page 34). Ces succès ont donné aux physiciens une grande confiance dans la pertinence du modèle standard, au moins dans ses aspects essentiels.

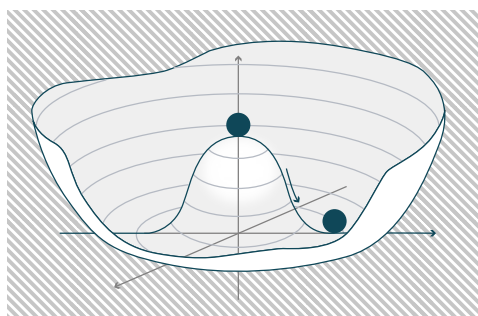
LE DILEMME DES BOSONS MASSIFS

Il restait cependant en suspens une question centrale. Les symétries de jauge assurant la cohérence de la théorie auraient dû exiger que les bosons W et Z soient de masse nulle, ce qui ne pouvait pas être le cas. Pour résoudre cette contradiction, Steven Weinberg, en 1967, a fait appel à un mécanisme imaginé trois ans plus tôt par Robert Brout, François Englert et Peter Higgs. Cette idée repose sur un champ dit scalaire, le champ de Higgs, dont les quatre composantes sont reliées par la symétrie électrofaible. Ce champ induit une brisure spontanée de la symétrie électrofaible (voir l'encadré ci-contre), qui permet à l'interaction faible de se différencier de l'interaction électromagnétique et de devenir une force à très courte portée. Trois des composantes du champ de Higgs se métamorphosent alors : elles disparaissent tout en conférant une masse aux bosons W^+ , W^- et Z . Chaque particule en interaction avec le champ de Higgs acquiert aussi une masse, d'autant plus élevée qu'elle interagit fortement avec ce champ.

Mais quid de la quatrième composante ? Si elle est bien présente, elle doit décrire une nouvelle sorte de particules, le boson de Brout-Englert-Higgs, un peu comme le champ électromagnétique décrit le photon. C'est cette particule essentielle à la cohérence du modèle

LE MÉCANISME DE HIGGS POUR BRISER LA SYMÉTRIE

L'ingrédient fondamental du mécanisme de Brout-Englert-Higgs, qui donne leur masse aux bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z , est un champ scalaire : le champ de Higgs. Un champ scalaire est un objet mathématique qui associe une valeur à tout point de l'espace et à chaque instant, à l'instar d'une carte des températures. Le champ de Higgs est universel, présent partout dans l'Univers.



standard que les expériences *Atlas* et *CMS* ont détectée en 2012, au grand collisionneur LHC du Cern. L'existence de cette particule de 125 gigaélectronvolts (plus de 100 fois la masse d'un proton) a ainsi confirmé la pertinence du mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible utilisé dans le modèle standard.

Tous les problèmes ne sont pas résolus pour autant. Notamment, l'origine des très petites masses des neutrinos, la nature de la matière noire et celle de l'énergie sombre (qui représentent 95 % du contenu de l'Univers) restent à élucider. L'existence du champ de Higgs, et de son boson associé, s'accompagne aussi de nombreuses questions. De fait, c'est seulement dans le cadre des théories supersymétriques que l'introduction de champs scalaires fondamentaux devient naturelle. Ces théories d'extension du modèle standard, développées à partir des années 1970, prévoient que toutes les particules connues soient associées à des « superpartenaires » plus lourds, actuellement inconnus, qui font l'objet de recherches intenses au LHC. ■

Les équations de la théorie présentent certaines symétries. C'est notamment le cas du potentiel scalaire qui indique l'énergie potentielle du champ de Higgs en fonction de la valeur de ce champ. La forme du potentiel, souvent qualifiée de chapeau mexicain (ci-dessous), fait que la position centrale, pour laquelle la valeur du champ est nulle (correspondant au sommet du chapeau) est une position d'équilibre instable, car l'énergie n'y est pas minimale. Le champ évolue donc spontanément vers une valeur d'équilibre non nulle, qui correspond à une valeur minimale du potentiel. Si l'expression du potentiel est symétrique, ce n'est pas le cas des positions d'équilibre possibles du champ ; toutes sont équivalentes, mais aucune ne présente la symétrie initiale du potentiel. On parle de brisure spontanée de symétrie.

Cette brisure a d'importantes conséquences. L'interaction électrofaible se transforme en deux forces distinctes : l'interaction électromagnétique et l'interaction faible. La première est véhiculée par le photon, de masse nulle, et la seconde est transmise par les bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z , qui acquièrent une masse. Les particules qui composent la matière (quarks, électron, etc.) acquièrent aussi une masse en interagissant avec le champ de Higgs : plus le couplage est élevé, plus la masse est importante.

2012 DES CISEAUX DE PRÉCISION POUR MODIFIER L'ADN

CRISPR-CAS9

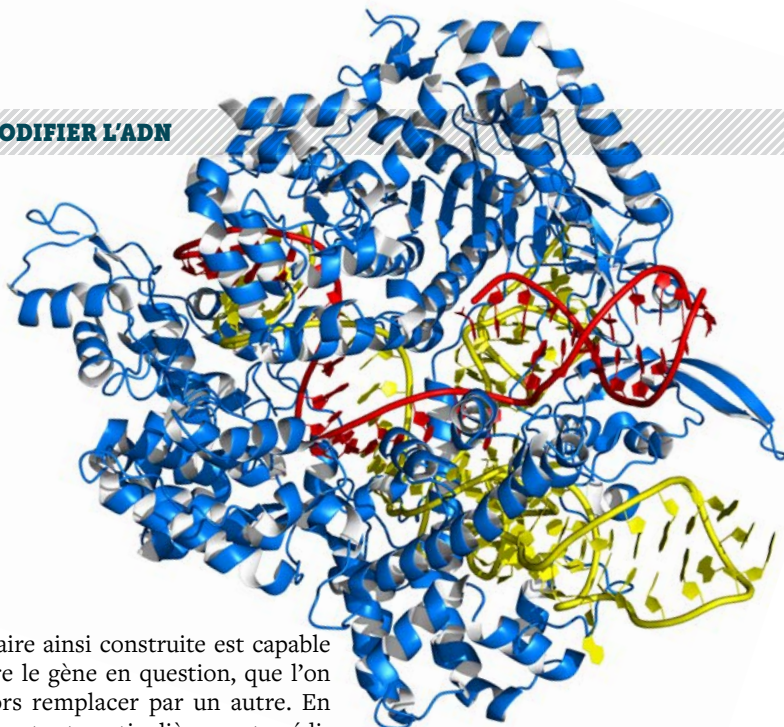
En 2007, on a découvert que les streptocoques et d'autres bactéries ont dans leur arsenal immunitaire une arme particulière: CRISPR. Cet acronyme anglais pour *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*, c'est-à-dire «courtes répétitions palindromiques regroupées et régulièrement espacées» (une séquence de nucléotides est dite palindromique quand elle est identique à sa séquence complémentaire lorsqu'on la lit à l'envers), désigne un système qui permet à la bactérie de repérer les gènes parasites insérés dans son génome par un virus bactériophage. La neuvième enzyme associée au système CRISPR, notée Cas9, agit comme une paire de ciseaux moléculaires capable de couper l'ADN et d'en extraire des morceaux indésirables.

En 2012, Emmanuelle Charpentier, alors à l'École médicale de Hanovre, et Jennifer Doudna, de l'université de Berkeley en Californie, ont inventé une méthode pour attacher à Cas9 un «ARN guide», c'est-à-dire une sorte de négatif d'un certain gène, qu'il prend pour cible et sur lequel il va se coller. La petite machine

moléculaire ainsi construite est capable d'extraire le gène en question, que l'on peut alors remplacer par un autre. En génétique, tout particulièrement médicale, un tel outil pouvant agir sur n'importe quel gène apporte une véritable révolution. Des essais d'édition du génome humain avec CRISPR-Cas9 à visée thérapeutique sont d'ores et déjà en cours aux États-Unis et en Chine. Outre d'immenses espoirs thérapeutiques, le système CRISPR-Cas9 permet d'explorer directement le fonctionnement du génome. ■

R. C.

M. Jinek *et al.*, A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity, *Science*, vol. 337, pp. 816-821, 2012



La structure 3D de l'enzyme Cas9 (en bleu) couplée à son ARN guide (en jaune) et son ADN cible (en rouge), établie en 2014, visualise les régions de l'enzyme impliquées dans son activité au sein du complexe CRISPR-Cas9.

2013 SUR LES TRACES DE L'HYBRIDATION SAPIENS-NEANDERTHALENSIS

LE GÉNOME NÉANDERTALIEN SE RÉVÈLE



Le génome nucléaire (c'est-à-dire provenant du noyau cellulaire, et non des mitochondries) néandertalien qui a été séquencé en 2013 appartenait à une femme.

Nous autres *Homo sapiens* avons longtemps partagé la moitié occidentale de l'Eurasie avec *Homo neanderthalensis*, le premier Européen. Depuis le séquençage de fragments d'ADN mitochondrial extrait d'un os attribué à un Néandertalien en 1997, la question de notre lien de parenté avec ces hommes disparus fait rage.

Transmis uniquement par la mère, l'ADN mitochondrial suggérait l'absence de métissage entre les deux groupes. Cette impression s'est nuancée en 2013, quand l'équipe de Svante Pääbo de l'institut Max-Planck, à Leipzig, annonce le séquençage presque complet du génome (nucléaire cette fois) d'un spécimen féminin âgé de plus de 50 000 ans. L'année suivante, une étude comparative du même institut portant sur 1004 individus actuels confirme ce que d'autres travaux avaient suggéré: il y a bien eu hybridation entre *H. sapiens* et *H. neanderthalensis*.

Les Eurasiens actuels ont entre 1 et 3% de gènes issus des Néandertaliens (la proportion est quasiment nulle en Afrique). Selon le modèle qui domine actuellement parmi les paléanthropologues, un métissage unique au Moyen-Orient il y a plus de 2500 générations, aurait favorisé l'adaptation de nos ancêtres sortis d'Afrique à l'environnement eurasiatique (mais aurait aussi favorisé des maladies comme le diabète).

Il apparaît aussi qu'une mutation dans le chromosome Y néandertalien rendait les hybrides mâles peu fertiles. L'hybridation était possible mais compliquée... Le débat sur l'identité ou non de nos deux espèces peut donc continuer. ■

R. C.

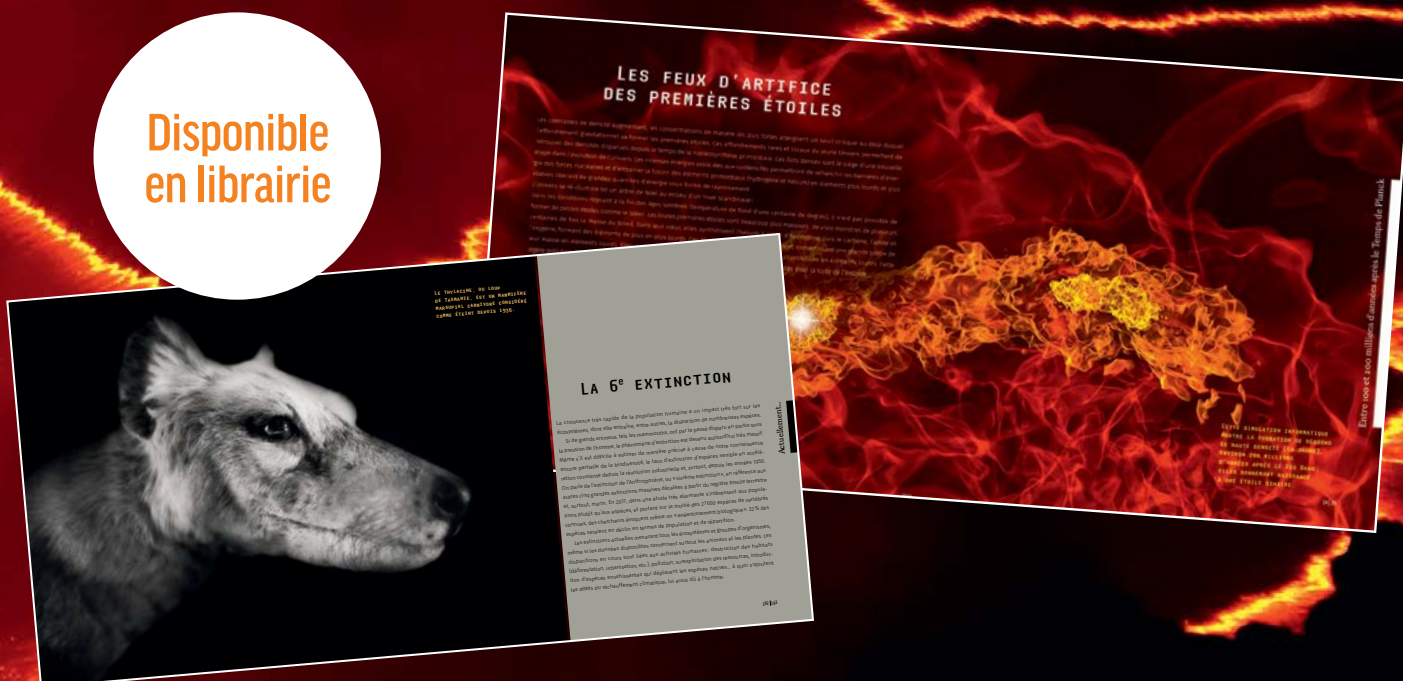
K. Prüfer *et al.*, The complete genome sequence of a Neanderthal from the Altai Mountains, *Nature*, vol. 505, pp. 43-49, 2013



25 x 25 cm cm - 224 pages + 224 pages cahier photo - 28 €

Un voyage unique dans l'histoire de l'Univers, de la Terre et du vivant

Disponible
en librairie



Belin:
ÉDITEUR

Suivez-nous et abonnez-vous à notre newsletter sur www.belin-editeur.com

[f/EditionsBelin](https://www.facebook.com/EditionsBelin) • [@editions_belin](https://www.instagram.com/editions_belin)

2013 L'humanité modifie le climat

Depuis plusieurs décennies, les climatologues affinent leur analyse de l'influence des émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines. Le constat est sans équivoque : nous sommes bel et bien responsables d'un réchauffement mondial.

En 2013, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec) fait connaître une conclusion scientifique on ne peut plus claire. Son cinquième rapport de synthèse stipule que l'influence des activités humaines est désormais détectable à la fois dans les réchauffements de l'atmosphère et de l'océan, dans l'élévation du niveau marin, dans l'évolution du cycle global de l'eau, dans le recul des neiges et des glaces et dans l'intensification des extrêmes climatiques. Pour le Giec, l'influence de l'homme sur le climat est clairement établie du fait des observations et de la compréhension du fonctionnement du système climatique : l'augmentation des concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone et autres gaz accroît l'effet de serre, ce qui explique le réchauffement observé depuis 1950.

Cette conclusion forte a été endossée par tous les gouvernements de la planète, dont les délégués ont approuvé le cinquième rapport du Giec en 2013 à Stockholm. Que l'humanité altère involontairement le climat par ses rejets de gaz à effet de serre est un fait établi scientifiquement. Mais cette réalité dérange, parce qu'elle annonce des risques futurs pour les écosystèmes et pour le développement humain, parce qu'il est difficile de reconnaître ses propres responsabilités, parce

qu'y remédier implique des réglementations environnementales perçues comme contraignantes, parce que l'économie de marché se révèle défailante face au phénomène, parce que la reconnaissance risque de dévaluer des actifs financiers (investissements dans le secteur des énergies fossiles, patrimoines immobiliers en zone de submersion côtière...), etc.

LES TRAVAUX PIONNIERS

Comment la communauté scientifique est-elle parvenue à la conclusion incontournable que le climat est en train d'être modifié par les activités humaines ?

Au XIX^e siècle, on a commencé à comprendre le transfert du rayonnement dans l'atmosphère, d'où les premiers calculs concernant l'effet des variations de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO₂) sur le climat planétaire. En 1896, le Suédois Svante Arrhenius fut le premier à estimer – de façon simpliste – qu'un doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ entraînerait un réchauffement planétaire de plusieurs degrés.

Or, dès les années 1930, les données météorologiques ont montré une tendance au réchauffement, en particulier autour de l'Atlantique Nord. Le Britannique Guy Stewart Callendar établit que cette tendance était planétaire, et affirma, sans le démontrer, qu'elle était liée à

L'AUTEURE



VALÉRIE MASSON-DELMOTTE
directrice
de recherche au CEA,
Laboratoire des
sciences du climat et
de l'environnement,
à Saclay (CEA/IPSL,
université
de Versailles
Saint-Quentin-
en-Yvelines
et université
de Paris-Saclay)