

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.

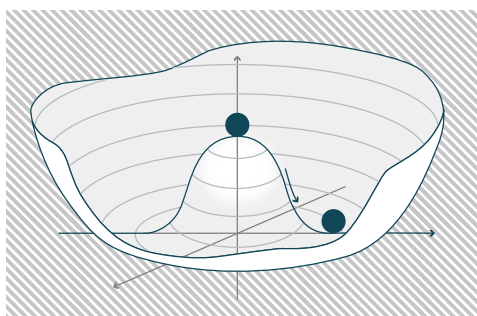
LE DILEMME DES BOSONS MASSIFS

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

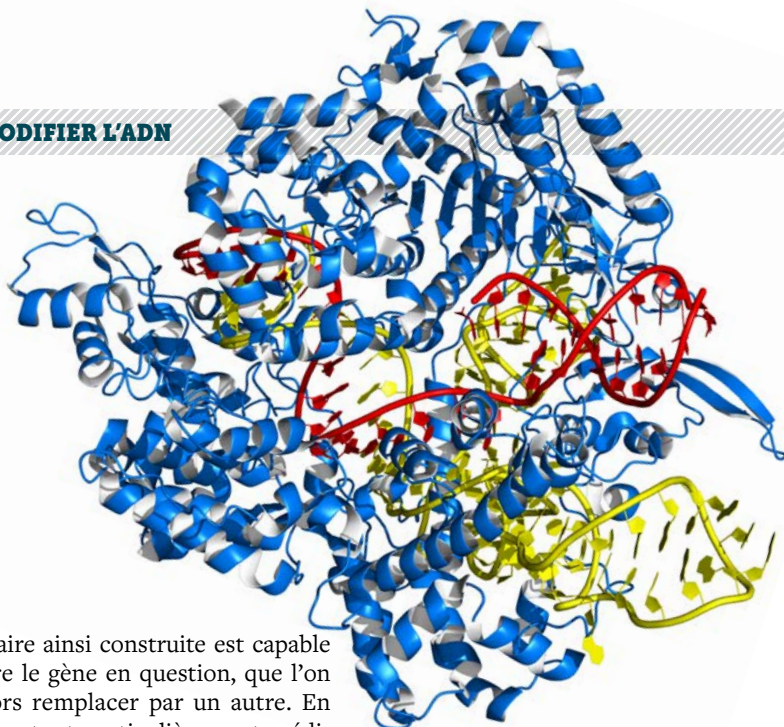
En 2007, on a découvert que les streptocoques et d'autres bactéries ont dans leur arsenal immunitaire une arme particulière: CRISPR. Cet acronyme anglais pour *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*, c'est-à-dire «courtes répétitions palindromiques regroupées et régulièrement espacées» (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