

VRAI OU FAUX

Les enfants apprennent-ils plus facilement les langues ?

Oui. Leur cerveau, plus flexible, serait mieux adapté à cet apprentissage.

Ranka BIJELJAC-BABIC



Lorsqu'une famille s'expatrie dans un pays où une autre langue est parlée, les jeunes enfants semblent l'acquérir vite et sans effort. Les adultes, en revanche, paraissent peiner pendant des années pour la maîtriser. Cette impression correspond-elle à une réalité mesurable ?

De nombreuses études montrent que c'est le cas. Dans l'une d'elles, parue en 1999, James Flege, de l'Université de l'Alabama, et ses collègues ont évalué les performances en anglais de 240 immigrés coréens, en fonction de leur âge d'arrivée aux États-Unis (pour des durées de résidence équivalentes, d'environ 15 ans en moyenne). Leur accent était d'autant meilleur qu'ils étaient arrivés jeunes. La grammaire aussi serait mieux maîtrisée quand elle est apprise jeune, mais dans une moindre mesure.

Comment un cerveau en développement surpasse-t-il celui de l'adulte lors de l'acquisition d'une nouvelle langue ? Plusieurs hypothèses ont été émises. La première, proposée notamment par le neuropsychologue canadien Wilder Penfield dès la fin des années 1950, tient à la plus grande plasticité du cerveau de l'enfant. En effet, l'apprentissage d'une seconde langue suppose une certaine restructuration des réseaux cérébraux, qui seraient particulièrement modulables jusqu'à trois ou quatre ans. Par la suite, le traitement cérébral des perceptions et les gestes articulatoires s'automatisent, ce

qui accroît progressivement les difficultés à acquérir une langue.

Selon une autre hypothèse classique, l'accumulation de connaissances à mesure que l'on grandit créerait de plus en plus de connexions neuronales et rendrait le cerveau moins flexible. L'apprentissage des langues deviendrait alors plus difficile – mais pas impossible !

Plusieurs explications possibles

En 1992, J. Flege a proposé une troisième explication : il serait plus difficile d'acquérir un accent parfait après sept ou huit ans, car les catégories phonétiques (la perception et la prononciation des consonnes et des voyelles) se sont stabilisées dans la langue natale ; et l'apprentissage de la lecture renforcerait ce phénomène. Dès lors, les sons de nouvelles langues apprises plus tardivement auraient tendance à être assimilés à ceux de la première langue.

Une quatrième hypothèse, avancée en 2004 par Michel Paradis, de l'Université McGill, se réfère aux notions d'apprentissage implicite et explicite. L'apprentissage d'une langue se fonderait en partie sur l'acquisition inconsciente de règles grammaticales (concernant par exemple l'ordre des mots). Elles seraient automatiquement enregistrées dans la mémoire dite procédurale, où sont stockées les compétences (faire du vélo, jouer d'un instrument, etc.). Or

la capacité d'incorporer à cette mémoire de nouvelles connaissances diminuerait avec l'âge. L'apprentissage tardif d'une seconde langue mobiliserait alors davantage la mémoire dite déclarative (qui utilise le langage), où sont stockées des connaissances explicites, conscientes.

De même, les mouvements articulatoires sont en partie sous la responsabilité de la mémoire procédurale : la baisse d'efficacité de cette mémoire expliquerait ainsi la difficulté à parler avec un parfait accent dans une langue apprise tardivement. En revanche, l'acquisition de nouveaux mots et de connaissances sémantiques, liée à la mémoire déclarative, resterait stable.

Même si aucune des explications proposées n'a été démontrée, le cerveau des enfants semble particulièrement adapté à l'apprentissage des langues. Ainsi, les enfants maîtriseraient mieux et plus vite la grammaire et la prononciation d'une seconde langue. En contrepartie, ils l'oublient plus vite s'ils ne la pratiquent pas : Christophe Pallier, de l'INSERM, et ses collègues ont ainsi montré que des adultes d'origine coréenne arrivés en France alors qu'ils étaient âgés de trois à huit ans ne se souvenaient plus de leur langue maternelle, dont ils ne distinguaient même plus les sons spécifiques. ■

Ranka BIJELJAC-BABIC est maître de conférences à l'Université de Poitiers et chercheuse au Laboratoire Psychologie de la perception (CNRS UMR 8158), à l'Université Paris Descartes.

Au cœur

The background features several yellow spheres of varying sizes, some with soft shadows, floating in a light grey space. In the lower half, a large, vibrant red sphere is shown in a state of fragmentation, with a jagged crack revealing a bright, glowing yellow-orange interior. The overall composition is abstract and evokes a sense of cosmic or subatomic exploration.

des

QUARKS

L'électron, les quarks et d'autres particules sont considérés comme des objets élémentaires et ponctuels. Mais ces particules pourraient cacher une structure interne constituée d'éléments hypothétiques, les préons.

Don Lincoln

L'ESSENTIEL

- Dans les 12 particules élémentaires connues, certaines propriétés se répètent. Ce schéma suggère l'existence possible d'une structure interne de ces objets.
- Ces particules pourraient être composées d'entités plus petites, que les physiciens désignent sous le terme générique de « préons ».
- Aucune donnée expérimentale ne confirme aujourd'hui cette hypothèse. Mais la question pourrait être tranchée par le collisionneur LHC du CERN et par d'autres expériences.

Craig Cutler

L'Univers est, à première vue, d'une immense complexité. Nous y observons des phénomènes physiques très divers. Il semble *a priori* difficile de voir le lien entre les émissions radio, qui nous permettent de communiquer, et les rayons gamma, qui peuvent irrémédiablement endommager les molécules d'ADN. Nous pouvons nous déplacer librement dans l'air, alors que nous sommes incapables de traverser un mur. De l'énergie est produite au cœur du Soleil mais aussi dans les centrales nucléaires.

En apparence, ces divers phénomènes n'ont aucun rapport les uns avec les autres, mais les physiciens ont découvert quelques principes qui les rassemblent en une seule théorie, expliquant tout cela et bien d'autres choses encore. Cette théorie, le « modèle standard de la physique des particules », décrit à la fois les forces électromagnétiques, qui font qu'un mur est solide, et les forces nucléaires, qui gouvernent les réactions de fusion dans le Soleil et de fission dans les centrales nucléaires.

Le modèle standard est l'une des théories les plus efficaces jamais développées.

Pour l'essentiel, elle postule qu'il existe deux groupes de particules de matière : les quarks et les leptons. L'association de certains quarks constitue les protons et les neutrons des noyaux atomiques. Le lepton le plus familier est l'électron. N'importe quel atome est une combinaison de protons, de neutrons et d'électrons. Ces constituants sont liés par quatre interactions fondamentales, dont deux nous sont familières, la gravité et l'électromagnétisme ; les deux autres, les interactions forte et faible, le sont moins. Le modèle standard décrit les trois dernières interactions, qui sont communiquées entre les particules de matière par l'échange d'une ou plusieurs autres particules de la classe des bosons. En revanche, toutes les tentatives d'incorporer la gravité au monde microscopique se sont soldées par un échec.

Malgré ses nombreux succès – des prédictions de nouvelles particules confirmées par l'expérience et l'accord entre calculs théoriques et mesures –, le modèle standard laisse de nombreuses questions sans réponses. Par exemple, pourquoi existe-t-il quatre interactions, ni plus ni moins ? Et pourquoi y a-t-il

L'AUTEUR



Don LINCOLN est directeur de recherche au Fermilab, près de Chicago [États-Unis].

Il a travaillé sur les expériences des collisionneurs *Tevatron* au Fermilab, et LHC, au CERN.

deux sortes de particules fondamentales de matière – les quarks et les leptons – plutôt qu'une seule ?

C'est une autre énigme qui a, depuis longtemps, attiré mon attention et celle de nombreux autres physiciens. Le modèle standard considère les quarks et les leptons comme ponctuels et indivisibles. Pourtant, de nombreux indices suggèrent que ces particules pourraient en fait être composées d'éléments encore plus petits. Cela permettrait d'expliquer que certaines particules ont des propriétés communes. Nous présente-

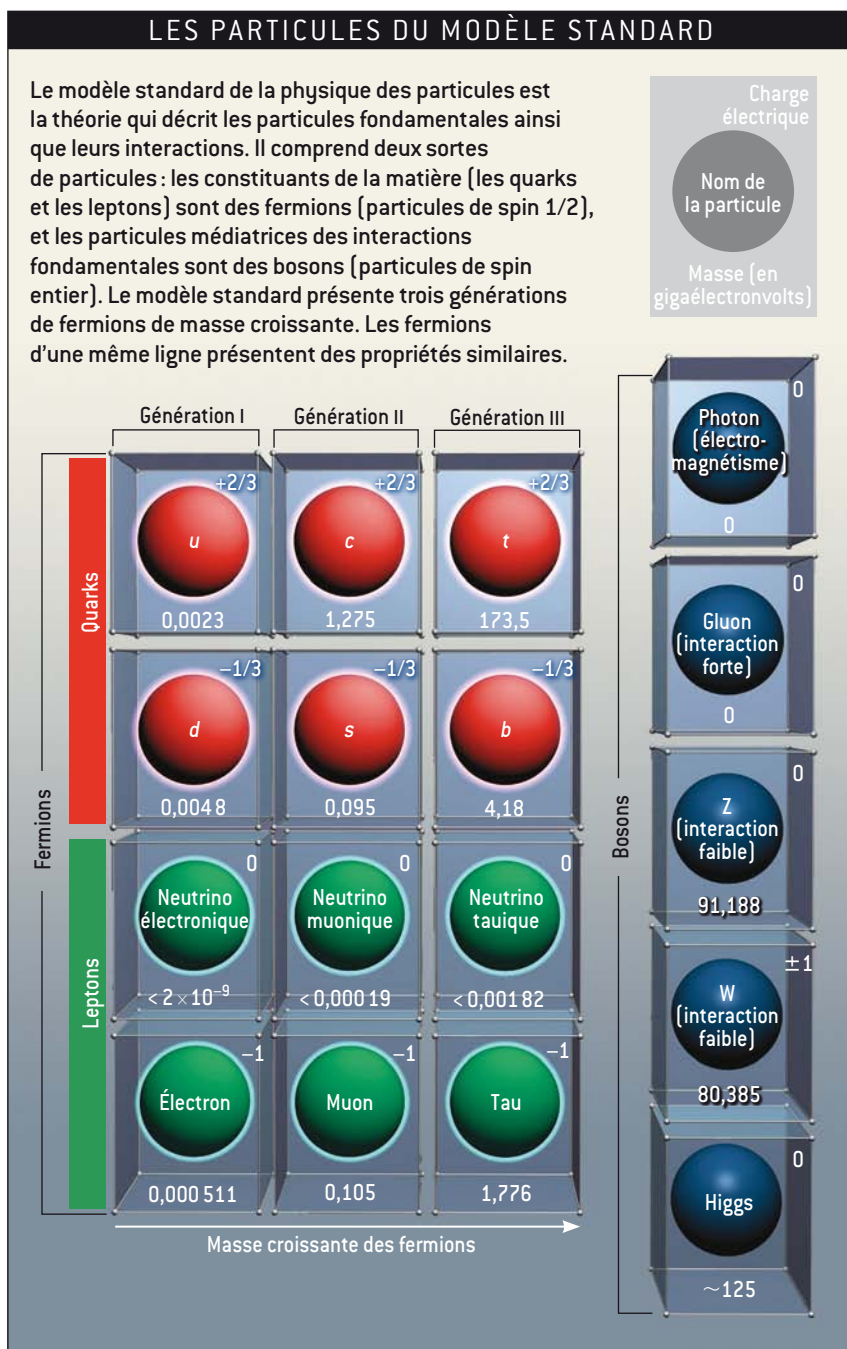
rons un modèle de sous-structure pour les quarks et les leptons ainsi que les recherches expérimentales qui tentent de confirmer cette hypothèse. Une telle découverte pourrait s'accompagner de phénomènes que nous n'avions jusqu'à présent pas anticipés et nous forcerait à revoir en profondeur notre vision du monde microscopique.

Afin d'étudier la physique des particules et les problèmes du modèle standard, les physiciens doivent sonder la matière à des échelles toujours plus petites. Pour y parvenir, ils ont construit des accélérateurs où les particules se percutent à des vitesses proches de celle de la lumière. En effet, plus l'énergie de la collision est élevée, plus il est possible de faire émerger des détails fins dans la structure de la matière. Depuis la mise en évidence des quarks, dans les années 1970, il nous manque les outils qui nous permettraient de regarder à l'intérieur des quarks. Mais aujourd'hui, le grand collisionneur de hadrons du CERN (le LHC, pour *Large Hadron Collider*) près de Genève pourrait être à la hauteur de la tâche. Le LHC a d'ailleurs fait ses preuves en révélant, en juillet 2012, les premières traces du boson de Higgs, la dernière particule non observée du modèle standard.

Le fossé des générations

Les premiers signes d'une structure interne aux quarks et aux leptons ont émergé des recherches sur une autre question (sans réponse à ce jour) concernant le nombre de quarks et de leptons découverts. Les protons et les neutrons sont constitués de deux types de quarks, les quarks *u* (ou *up*) et *d* (ou *down*). La charge électrique de ces derniers vaut, respectivement, $+2/3$ et $-1/3$, celle du proton étant l'unité. Au fil des années, d'autres types de quarks ont été décelés. Les quarks *s* (pour *strange*, étrange) et *b* (*bottom*) sont de même charge que le quark *d*, mais ils sont plus lourds. De la même façon, les quarks *c* (*charm*) et *t* (*top*) sont deux versions lourdes du quark *u*. Les quatre quarks les plus lourds sont instables et se désintègrent en quelques fractions de seconde pour donner les deux plus légers.

L'électron a lui aussi des cousins lourds instables, le muon et le tau, de même charge que lui. Et pour compléter l'inventaire des particules de matière connues, il faut ajouter les trois versions du neutrino, toutes de masse très faible et électriquement neutres.



La structure des particules dans la théorie des préons

Les physiciens ont proposé divers modèles pour les préons, constituants hypothétiques des quarks et des autres particules du modèle standard. Ci-dessous est présenté le système proposé en 1979 par l'Israélien Haim Harari et par l'Américain Michael Shupe. Il postule l'existence de deux types de préons – chacun avec l'antiparticule associée –, qui pourraient composer à la fois les particules de matière (les quarks et les leptons, qui sont des fermions) et les particules médiatrices de force (des bosons).

Particules de matière (fermions)

Les deux préons de ce modèle peuvent être représentés par + et 0. Le + a une charge égale à 1/3 de celle du proton, et le 0 a une charge nulle. Chacun a son antiparticule, de charge opposée : – (de charge –1/3) et $\bar{0}$ (de charge nulle). Dans le modèle de H. Harari et M. Shupe, les quarks et les leptons sont chacun composés de trois préons.

CHARGE	CONTENU EN PRÉONS	PARTICULE
+1	+ + +	Antiélectron
+2/3	+ + 0	Quark u
+1/3	+ 0 0	Antiquark $\bar{d}$
0	0 0 0 $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$	Neutrino électronique Antineutrino électronique
–1/3	– $\bar{0} \bar{0}$	Quark d
–2/3	– – $\bar{0}$	Antiquark $\bar{u}$
–1	– – –	Électron

Particules médiatrices de force (bosons)

Regroupés par deux et par six, les préons peuvent également décrire les bosons vecteurs, dont l'échange régit les interactions subatomiques : l'électromagnétisme (photon), l'interaction forte (gluon) et l'interaction faible (bosons W^+ , W^- et Z). La composition des gluons, particules qui véhiculent l'interaction forte, est un peu plus compliquée et n'apparaît pas ici.

CHARGE	CONTENU EN PRÉONS	PARTICULE
+1	+ + + 0 0 0	Boson W^+
–1	– – – $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$	Boson W^-
0	0 0 0 $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$ + + + – – – + + – – 0 $\bar{0}$ + – 0 $\bar{0} \bar{0} \bar{0}$	Boson Z (quatre versions)
0	+ –	Photon

Cette abondance a naturellement conduit les physiciens à se poser la question suivante : étant donné que le quark u , le quark d et l'électron sont les seules particules de matière nécessaires pour construire l'Univers, pourquoi ont-ils autant de cousins ? C'est un peu cette interrogation qu'exprime la célèbre réflexion du prix Nobel de physique Isidor Rabi lorsqu'il apprit la découverte du muon en 1936-1937 : « Qui a commandé cela ? »

En rangeant ces particules dans un tableau en fonction de leurs caractéristiques (voir l'encadré page ci-contre), les physiciens ont vu émerger un phénomène semblable à celui du tableau périodique des éléments chimiques. Dans ce dernier, le fait que certains éléments partagent des propriétés indique qu'ils possèdent une sous-structure ayant des traits communs. Celle-ci est liée au nombre d'électrons autour du noyau atomique. Elle rend compte des propriétés communes des éléments d'une même colonne ou d'une même ligne du tableau périodique.

Le tableau des quarks et des leptons comporte trois colonnes nommées générations (la question de la multiplicité des particules est souvent nommée « problème des générations »). La première, tout à gauche, inclut les quarks u et d ainsi que l'électron et le neutrino électronique, c'est-à-dire tout ce

qui est nécessaire pour expliquer l'Univers qui nous est familier. La deuxième génération contient les versions un peu plus massives des mêmes particules ; la troisième génération comprend les particules les plus lourdes.

Le modèle standard traite les quarks et les leptons comme des particules ponctuelles, dépourvues de structure interne. Mais la répétition des propriétés d'une génération à l'autre, comme pour les éléments chimiques, laisse penser que les quarks et les leptons ont une structure sous-jacente.

Des indices d'une sous-structure

Une autre observation, faite à l'aube du XX^e siècle et qui pourrait avoir une pertinence pour la recherche d'une structure interne aux quarks, est la découverte de la radioactivité. On sait aujourd'hui que lors d'un tel processus, un proton peut se transformer en neutron ou réciproquement. Cette transmutation correspond au changement d'un quark, constituant du proton ou du neutron, en un autre : un quark u devient un quark d ou inversement. Cette transformation s'effectue par l'intermédiaire de l'interaction faible, qui peut aussi transmuter les leptons (bien que les quarks ne puissent pas être changés en

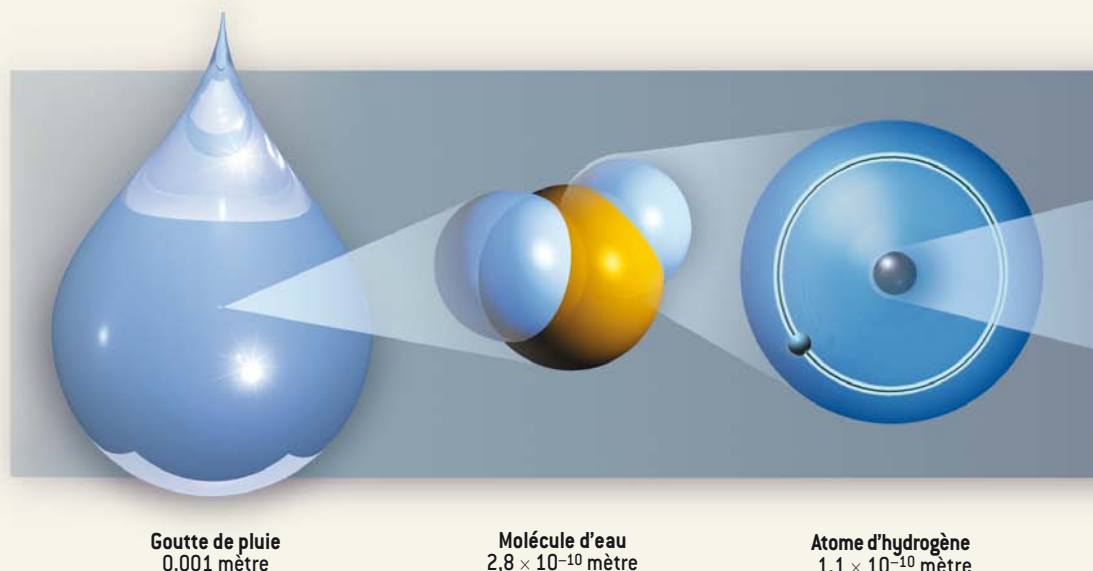
leptons, ni l'inverse). La métamorphose des quarks et des leptons pourrait être un signe supplémentaire de l'existence de détails plus fins au sein de ces particules.

Forts de ces observations, les physiciens théoriciens ont proposé de nombreux modèles de sous-structures pour les quarks et les leptons. Le terme générique de « préon » s'est imposé pour désigner leurs constituants.

Pour illustrer ces modèles, prenons une version simple proposée en 1979 indépendamment par l'Israélien Haim Harari et l'Américain Michael Shupe, et ultérieurement étendue par H. Harari et son étudiant Nathan Seiberg, tous deux à l'Institut Weizmann en Israël (voir l'encadré ci-dessus). Ils ont proposé l'existence de deux sortes de préons, l'un de charge électrique +1/3, l'autre de charge nulle. Chacun de ces préons a un homologue, une antiparticule, de charge opposée : –1/3 et 0, respectivement. Ces préons sont des fermions, des particules de matière. Chaque quark ou lepton est une combinaison de trois préons. Deux préons de charge +1/3 et un de charge nulle, par exemple, constituent un quark u , alors que l'antiquark $\bar{u}$ est formé de deux préons de charge –1/3 et d'un de charge nulle. Les bosons vecteurs de force, quant à eux, sont des combinaisons de deux ou six préons. Le boson W^+ , porteur de l'interaction faible qui agit à

AUX PLUS PETITES ÉCHELLES DE LA MATIÈRE

Si les préons existent, ils sont minuscules. Ils devraient tenir dans un quark, qui lui-même doit être assez petit pour tenir dans le proton. En fait, toutes les expériences sont, pour l'heure, compatibles avec un quark de taille nulle, ce qui exclurait toute sous-structure. Mais de futures expériences vont sonder des échelles encore plus petites. Une taille non nulle du quark renforcerait sérieusement l'hypothèse des préons.



la fois sur les quarks et les leptons, a trois préons de charge $+1/3$ et trois de charge 0 .

Avec une série d'hypothèses judicieuses, H. Harari et M. Shupe ont postulé le contenu en préons de toutes les particules de la première génération et des bosons vecteurs d'interactions.

Une théorie de la structure interne des quarks, des leptons et des bosons doit rendre compte des nombreuses propriétés et interactions des particules que le modèle standard décrit déjà avec succès. Les modèles de préons parviennent à décrire les processus subatomiques de façon satisfaisante. Prenons par exemple l'interaction d'un quark u et d'un antiquark $\bar{d}$, qui donne un boson W^+ , lequel se désintègre ensuite en un positron et un neutrino électronique. Dans le modèle de Harari-Shupe, les deux quarks incidents, qui ont trois préons chacun, se combinent pour engendrer un boson W , qui regroupe les trois charges $+1/3$ et les trois charges nulles. Puis le boson W se désintègre, restituant les six mêmes préons dans une configuration différente : un positron (trois préons de charge $+1/3$), et un neutrino électronique (trois préons de charge nulle).

Jusqu'ici, la physique des préons ressemble à de la numérologie des quarks et des leptons. L'exercice s'apparente à celui consistant à équilibrer une réaction chimique ou une équation mathématique. Or pour être valable, un modèle de préons doit expliquer les quarks et les leptons à l'aide d'un nombre limité d'éléments et de règles. Après tout,

l'objectif est de trouver un ordre sous-jacent qui unifie des particules, différentes en apparence, et non un système de définitions *ad hoc* qui rend compte des propriétés au cas par cas. Les préons y parviennent, à la fois dans le modèle de Harari-Shupe et dans des versions concurrentes plus abouties.

Un assemblage de préons

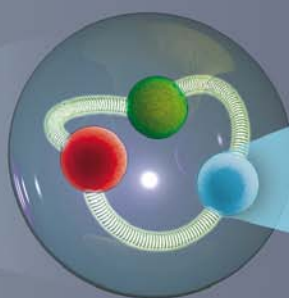
La présentation ci-dessus du modèle de Harari-Shupe s'est pourtant limitée à la première génération et ne répond pas à la question de la répétition des propriétés entre les générations. La situation se complique quand nous portons notre attention sur les deuxième et troisième générations. Dans ce modèle, on fait l'hypothèse que les générations deux et trois sont des états excités des configurations de la première génération, de même que les atomes excités sont des atomes où des électrons ont sauté d'un état à un autre, d'énergie supérieure. En outre, on pense qu'un mécanisme inconnu assure la cohésion des préons au sein des quarks et des autres particules.

Si cette explication semble un peu vague, c'est parce que beaucoup de détails n'ont pas été déterminés. De façon similaire, les premiers travaux théoriques qui ont introduit la notion de quark avaient un niveau comparable de complexité. C'est seulement plus tard que l'interaction forte, qui confine les quarks en protons et en neutrons, a été

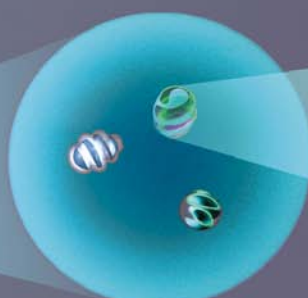
décrite précisément. Néanmoins, la question des générations reste ouverte et plusieurs physiciens ont proposé des modèles concurrents à celui de Harari-Shupe. Selon une version, l'un des préons porte le numéro de génération ainsi qu'une nouvelle charge nommée hypercouleur, qui confine les préons en quarks ou leptons.

Il existe de nombreuses variantes du modèle des préons. Certaines supposent des préons de charge $1/6$, au lieu de $1/3$ dans le modèle de Harari-Shupe. Dans d'autres, les quarks et les leptons sont formés de cinq préons, et non trois. D'autres variantes encore proposent des contenus en préons différents pour les bosons ou introduisent des préons fermioniques et bosoniques. Les possibilités sont nombreuses, et davantage de données expérimentales sont nécessaires pour départager les diverses pistes.

Au-delà de l'idée que les plus petits constituants connus de l'Univers puissent receler des constituants plus petits encore, nous sommes nombreux à être intéressés par les préons pour une autre raison. S'ils existent, ils pourraient révéler de précieuses informations sur l'origine de la masse des particules. Dans le modèle standard, cette masse est engendrée par l'interaction des particules avec le « champ de Higgs ». Les particules qui subissent une sorte de traînée lorsqu'elles traversent ce champ omniprésent sont dotées d'une masse, tandis que les particules de masse nulle, le photon notamment, glissent sans encombre. Si les préons



Proton
 $1,7 \times 10^{-15}$ mètre



Quark
Moins de 10^{-18} mètre



Préon (hypothétique)
Ponctuel, ou formé de constituants plus petits encore

Malcolm Gordon

qui constituent les particules des deuxième et troisième générations sont les mêmes que pour la première, il y a certainement quelque chose chez les préons qui permet aux particules d'interagir plus ou moins avec le champ de Higgs. Cela expliquerait pourquoi les particules des générations deux et trois sont plus lourdes.

Le mécanisme de Higgs permet d'expliquer comment les particules acquièrent une masse, mais il ne précise pas les valeurs de ces masses. En l'absence d'une théorie plus fondamentale, les masses des particules subatomiques ne peuvent être déterminées qu'en les mesurant une par une. Il est vraisemblable qu'en comprenant la structure des quarks et des leptons, et pourquoi les générations diffèrent, nous en apprendrons beaucoup plus sur le mécanisme de Higgs.

Un problème de masses

La théorie des préons n'est cependant pas sans problèmes. Tout d'abord, tous les efforts expérimentaux déployés pour mettre en évidence les préons ont été sans résultat. Cet échec est décevant, mais il pourrait simplement être dû aux limites des expériences actuelles, qui ne parviennent pas à sonder de si petites échelles (*voir l'encadré ci-dessus*).

Hormis les questions expérimentales, la théorie des préons présente quelques difficultés intrinsèques. La masse des quarks en est un exemple. Les préons sont confinés en

quarks et leptons. Or la physique quantique indique que les masses pertinentes sont inversement proportionnelles à la taille du volume de confinement. En effet, d'après les relations d'incertitude, formulées par le physicien allemand Werner Heisenberg, la quantité de mouvement des préons, confinés dans le petit volume d'un quark, serait, exprimée en unités d'énergie, de l'ordre du téraélectronvolt (10^{12} électronvolts) au moins. En conséquence, la masse du quark (exprimée aussi en unités d'énergie) devrait être de cet ordre de grandeur. Mais la masse du proton, constitué de deux quarks u et d'un quark d , est de seulement un gigaélectronvolt (10^9 électronvolts), soit de l'ordre de 1 000 fois moins que la somme des masses de ses composants ! En outre, la masse des quarks a été mesurée et correspond à une gamme comprise entre quelques mégaélectronvolts et 173 gigaélectronvolts, bien moins que le téraélectronvolt.

Face au paradoxe d'une entité plus légère que ses composants, des arguments théoriques, fondés sur la conservation de certaines symétries, pourraient expliquer une compensation des quantités de mouvement des préons, et ainsi éviter le problème de masse. Cependant, aucune observation n'a jusqu'ici étayé ces hypothèses.

Les modèles de préons restent à compléter, mais ils constituent une piste intéressante pour résoudre le problème des générations. Ce n'est pas la seule piste. Une alternative qui se distingue est l'idée des

supercordes, selon laquelle les éléments ultimes de la matière ne sont pas des particules subatomiques, mais de minuscules cordes qui vibrent. Grossièrement, on peut se représenter chaque type de particules du modèle standard comme une corde vibrant à une fréquence bien définie. En outre, les préons et les supercordes peuvent coexister, les dimensions des supercordes se situant à une échelle beaucoup plus petite que celle des quarks et des leptons.

Supercordes et préons ?

Si les supercordes existent, elles pourraient bien constituer non pas les quarks et les leptons, mais plutôt les préons ou même les pré-préons, voire les pré-pré-préons, selon le nombre de niveaux d'emboîtement que recèle la matière.

Une autre alternative, s'inspirant des préons, est celle qu'a proposée en 2005 Sundance Bilson-Thompson, de l'Université d'Adélaïde en Australie. Dans son modèle, les préons seraient des tresses torsadées d'espace-temps, des objets constitués du tissu de l'espace-temps, et non des particules ponctuelles. Ce modèle en est encore à ses débuts, mais on en explore les implications, en particulier parce qu'il propose d'intégrer au modèle standard une théorie quantique de la gravitation, objectif sur lequel les physiciens travaillent depuis longtemps.

La physique est avant tout une science expérimentale. Une théorie a beau être

La recherche de désintégrations rares du muon

Encore récemment, le LHC, le grand collisionneur de protons et d'ions du CERN, a montré que les collisionneurs de haute énergie sont parmi les meilleurs outils pour la découverte de nouvelles particules, tel le boson de Higgs en 2012. Cependant, rechercher des particules de plus en plus lourdes signifie construire des accélérateurs toujours plus puissants, ce qui se heurte aux limites de la technologie.

Au lieu de chercher à obtenir des collisions d'énergie maximale, l'expérience *Mu2e*, au *Fermilab*, opte pour des collisions à plus faible énergie, mais en très grand nombre. Cette approche permet de rechercher des processus rares. On espère par cette méthode détecter des désintégrations de particules par l'intermédiaire de nouveaux types d'interaction.

Une telle observation indiquerait l'existence d'une nouvelle particule médiatrice de l'interaction. Cette particule serait créée, puis détruite, au cours du processus. Elle est dite virtuelle. Les particules virtuelles sont

capables d'apparaître sans apport d'énergie équivalent à leur masse, à condition de n'exister que pour un temps très bref – ce qu'autorise le principe d'incertitude de Heisenberg. On peut donc observer indirectement une particule dont la masse dépasse de beaucoup l'énergie disponible dans l'expérience. C'est ainsi que *Mu2e* va tester l'existence de particules jusqu'à 1 000 fois plus massives que l'énergie équivalente disponible au LHC.

Comme son nom l'indique, l'expérience *Mu2e* (se prononce « *Mutoe* » en anglais) étudie la conversion de muons en électrons. Ce processus de désintégration est bien connu, mais il est toujours accompagné de la production de deux neutrinos. L'objectif de *Mu2e* est d'observer cette conversion sans la production de neutrinos.

La désintégration du muon sans émission de neutrinos n'est pas possible dans le modèle standard de la physique des particules. C'est pourquoi l'observer serait synonyme de la découverte d'une nouvelle physique.

Elle pourrait correspondre à une nouvelle interaction ou, comme cela est indiqué dans l'article de Don Lincoln, à l'existence de préons. Les préons du muon sont un état excité de ceux de l'électron. Le retour dans l'état fondamental des préons correspond au processus de transformation du muon en électron avec l'émission d'un photon.

L'expérience *Mu2e* se déroulera en deux étapes. Dans un premier temps, de grandes quantités de muons seront produites en bombardant une cible avec des protons de très haute énergie, fournis par un accélérateur. Ces collisions créeront des pions qui se désintégreront rapidement en muons.

Un champ magnétique guidera les muons sur une distance d'environ 20 mètres vers une cible d'aluminium qui les stoppera. Chaque muon prendra la place d'un électron en orbite autour d'un noyau d'aluminium. Le muon en orbite pourra alors soit se désintégrer, soit être capturé par un proton du noyau en créant un neutron et un neutrino.

La désintégration du muon décrite dans le modèle standard produit des électrons dont l'énergie appartient à un spectre continu, entre 0 et 105 mégaelectronvolts, alors que le nouveau mode de désintégration recherché produirait des électrons de 105 mégaelectronvolts précisément. La difficulté est donc d'observer un faible signal d'un processus rare à proximité du bruit de fond que représente la physique du modèle standard et dont les processus sont plus fréquents. La trajectoire et l'énergie des électrons seront mesurées par plus de 20 000 détecteurs similaires à des compteurs Geiger, faisant cinq millimètres de diamètre et un mètre de longueur.

L'expérience *Mu2e* devra produire 10^{20} muons pour atteindre son objectif (on estime entre 10^{20} et 10^{24} le nombre de grains de sable sur notre planète...). On prévoit que cette expérience recueillera des données durant trois ans, à partir de 2019.

Anthony Hillairet
Université de Victoria, Canada

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Lincoln, *The Quantum Frontier: the Large Hadron Collider*, Johns Hopkins University Press, 2009.

P. D. B. Collins *et al.*, *Composite Models*, dans *Particle Physics and Cosmology*, Wiley-VCH, 2005.

I. A. D'Souza et C. S. Kalman, *Preons: Models of Leptons, Quarks and Gauge Bosons as Composite Objects*, World Scientific Publishing, 1992.

H. Harari, *A schematic model of quarks and leptons*, *Physics Letters B*, vol. 86, pp. 83-86, 1979.

M. Shupe, *A composite model of leptons and quarks*, *Physics Letters B*, vol. 86, pp. 87-92, 1979.

brillante, si elle n'est pas en accord avec les mesures, elle est fautive. Que peuvent donc faire les expérimentateurs pour prouver ou réfuter l'existence des préons ? Le modèle standard décrit avec succès les quarks, les leptons et les bosons, sans invoquer de préons. Les physiciens doivent donc être à l'affût de subtils écarts par rapport aux prédictions du modèle standard, de minuscules fissures dans l'édifice de la physique moderne qui pourraient être le fait des préons. Deux facettes du modèle, en particulier, semblent mériter une exploration plus fine.

La première est la taille des particules. Le modèle standard traite les quarks et les leptons comme s'il s'agissait de points, c'est-à-dire des particules de dimension zéro et sans structure interne. Si l'on mesurait une taille non nulle pour ces particules, cela plaiderait en faveur des préons. Les expériences ont montré que les protons et les neutrons ont un rayon d'environ 10^{-15} mètre. Avec les principaux collisionneurs de particules, passés et présents, les physiciens ont recherché, pour les quarks et les leptons, des indices d'une taille mesurable. Pour l'instant, toutes les données

sont en parfait accord avec une taille nulle. Les résultats expérimentaux livrent des limites supérieures sur la taille des particules : 0,0002 fois la taille du proton pour les quarks, 0,001 fois cette taille pour les leptons. Les expériences ne sont cependant pas capables de trancher entre un rayon exactement nul ou extrêmement petit. Le LHC, au CERN, devrait nous permettre d'en apprendre davantage sur la taille des quarks et des leptons, grâce à l'énorme quantité de données ainsi qu'à la montée en énergie prévue pour l'accélérateur d'ici 2015.

À l'épreuve de la réalité

Une autre façon de mettre en évidence une sous-structure des particules, au moins pour les leptons, consiste à s'intéresser à leur spin et à leur moment magnétique, deux grandeurs liées. De façon erronée, mais commode, on peut se représenter un électron comme une bille en rotation sur elle-même ; plus précisément, la physique quantique attribue à l'électron un moment cinétique intrinsèque nommé spin. Comme tous les fermions fondamentaux, l'électron a un spin égal à $1/2$, dans les unités

appropriées. Et comme cette particule a aussi une charge électrique, la combinaison du spin et de la charge lui confère un moment magnétique, ce qui revient à dire que l'électron constitue un minuscule aimant. La valeur du moment magnétique dépend de la nature ponctuelle ou non de la particule. En comparant la valeur théorique du moment magnétique d'un électron ou muon ponctuels à la valeur expérimentale, on pourrait obtenir un indice sur la présence de préons.

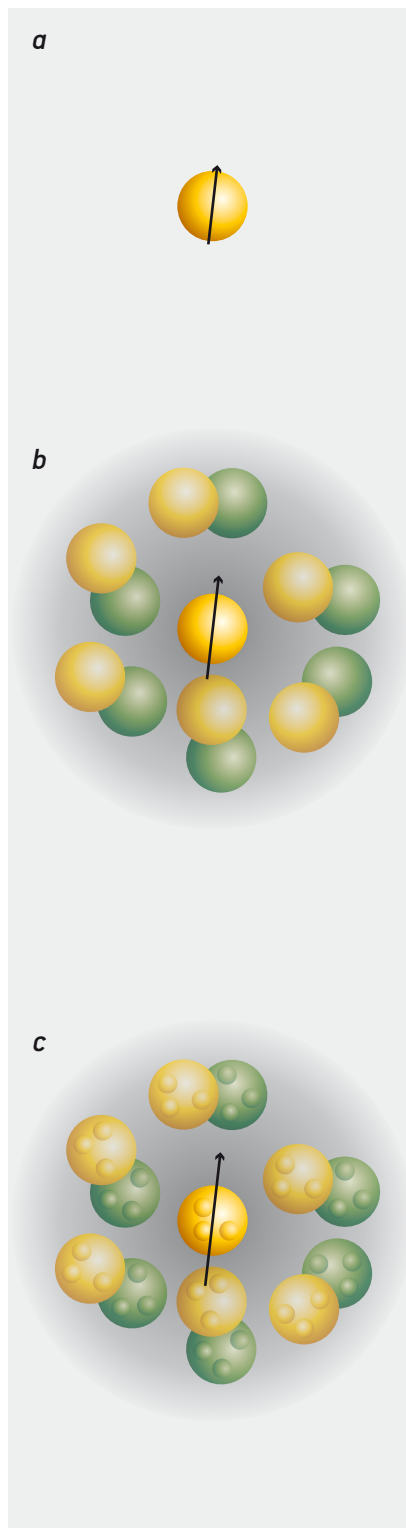
Un effet de taille ?

On sait depuis longtemps que le moment magnétique de l'électron, comme celui du muon, diffère légèrement de celui d'une particule ponctuelle. Cet écart n'est pas dû aux préons et s'explique parfaitement dans le cadre du modèle standard. Chaque lepton est entouré d'un nuage évanescent de paires de particule-antiparticule dites virtuelles, qui naissent aussi vite qu'elles disparaissent (voir la figure ci-contre).

Ce nuage de particules virtuelles modifie la valeur du moment magnétique de l'ordre de un pour mille, et le calcul théorique de cette contribution est en très bon accord avec les mesures expérimentales. Les effets des préons seraient encore plus faibles, mais ils pourraient être détectables. Des résultats intéressants viendront peut-être de la future expérience « Muon $g-2$ » au *Fermilab*, qui devrait mesurer le moment magnétique du muon quatre fois plus précisément qu'auparavant.

Les physiciens ont aussi fouillé dans les données des collisionneurs à la recherche de désintégrations de particules que l'on attendrait si les préons existent et si les particules des deuxième et troisième générations sont des états excités de celles de la première génération. L'un de ces processus est la désintégration d'un muon en un électron et un photon. Cette désintégration n'a pas encore été observée et, si elle a lieu, elle se produit moins d'une fois sur 100 milliards de désintégrations de muons (voir l'encadré page ci-contre).

Toutes les mesures directes effectuées jusqu'à présent sont compatibles avec l'hypothèse de quarks et leptons ponctuels. Pour ceux d'entre nous qui pensent que les générations observées des particules subatomiques sont le signe d'une sous-structure à découvrir, les dernières décennies ont été frustrantes. Mais de réelles



UN LEPTON PONCTUEL, l'électron par exemple (a), a un moment magnétique (flèche noire) que l'on sait calculer. En réalité, il est toujours entouré d'un nuage de paires particule-antiparticule virtuelles qui apparaissent et disparaissent sans cesse (b). Ce nuage crée un volume effectif pour la particule et modifie la valeur du moment magnétique. Si les leptons sont constitués de préons (c), cette sous-structure modifiera légèrement cette valeur.

possibilités s'ouvrent maintenant pour explorer de nouveaux territoires.

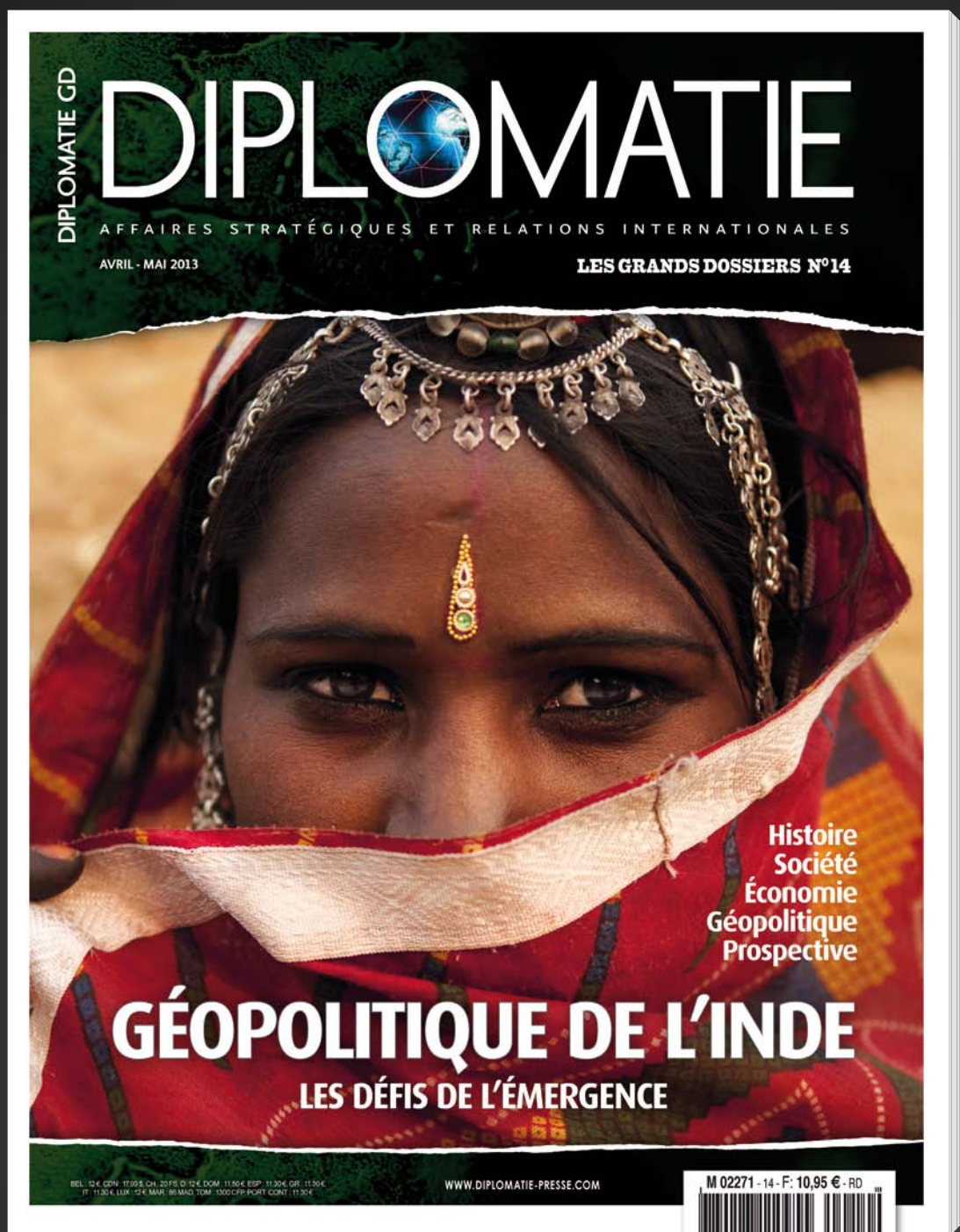
Depuis l'arrêt du *Tevatron* en 2011, les accélérateurs du *Fermilab* ont subi un remplacement complet de leur équipement. Ils vont alimenter les expériences de mesure du moment magnétique du muon et de désintégration du muon en un électron et un photon. Le LHC pourrait aussi fournir des résultats intéressants. En 2011, cet accélérateur a produit des collisions de protons à une énergie de sept téraélectronvolts. En une seule année, le LHC a fourni autant de données que le *Tevatron* pendant ses 28 ans de fonctionnement. En 2012, l'énergie de ses collisions a été portée à huit téraélectronvolts, avec la perspective de quadrupler les données recueillies avant de mettre le collisionneur à l'arrêt pendant un an et demi, pour réparations et améliorations. Le LHC devrait ensuite reprendre son service au début de 2015, avec des collisions de protons à 13 ou 14 téraélectronvolts et à un rythme beaucoup plus soutenu.

L'augmentation limitée de l'énergie de collision en 2012 pourrait donner l'impression d'un ajustement mineur, mais elle aura une grande importance pour la recherche des préons. Le nombre de collisions enregistrées aux énergies les plus élevées, qui sondent les échelles les plus petites et donc qui sont les plus pertinentes pour la recherche des préons, va quintupler. Et la montée en puissance de 2014 et 2015 augmentera ces capacités de façon époustouflante.

Pour la recherche d'une structure interne aux quarks et leptons, les prochaines années pourraient se révéler riches d'enseignement. Mes collègues et moi sommes déjà en train de passer au peigne fin les énormes quantités de données accumulées par le LHC. Nous y recherchons des preuves que les quarks et les leptons sont de taille non nulle. D'autres signes de l'existence des préons pourraient être la découverte d'une quatrième génération de quarks et de leptons, ou des indications que les particules médiatrices des forces ont elles aussi des générations différentes, avec des particules similaires plus massives.

La quête de la structure la plus fondamentale de la matière, aux portes des quarks et des leptons, laisse entrevoir une nouvelle frontière à conquérir, celle des préons. D'ici quelques années, on peut espérer que les physiciens pourront s'aventurer dans ce territoire inconnu. ■

En vente chez votre marchand de journaux



100 pages • Format 23x30 cm • 10,95 € (codification Presstalis : 02271)

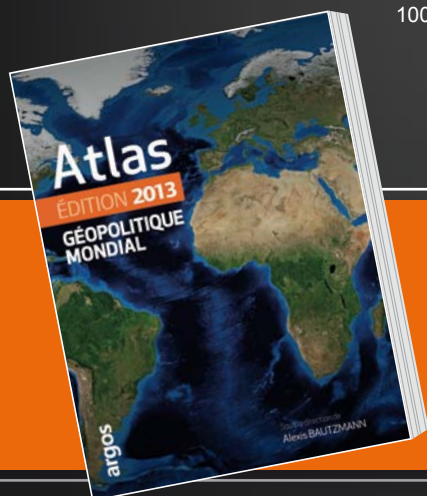
Commandez DIPLOMATIE sur Internet

WWW.GEOSTRATEGIQUE.COM

Et ne manquez pas en librairie

ATLAS GÉOPOLITIQUE MONDIAL 2013

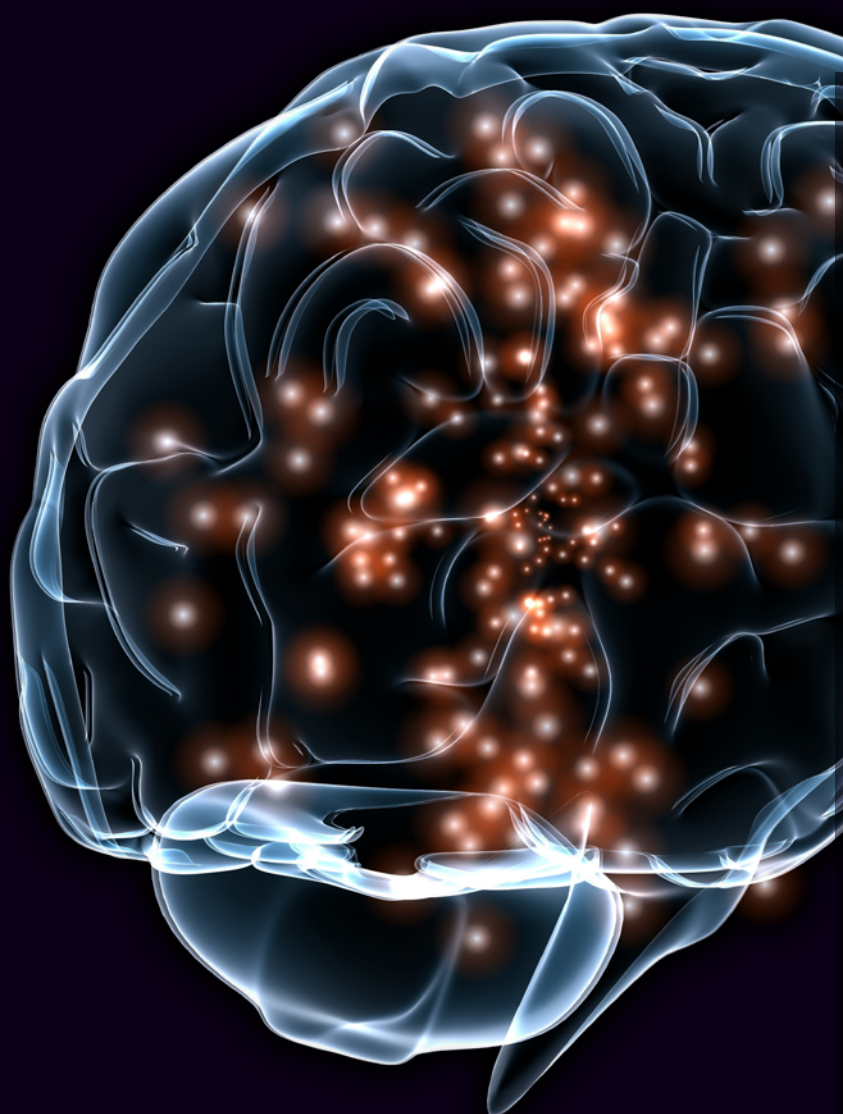
270 cartes et graphiques pour décrypter toute l'actualité internationale
(Éditions ARGOS/AREION - Diffusion PUF - 23x30 cm - 212 pages - 22,50 €)



ALZHEIMER, PARKINSON, HUNTINGTON...

Quand des protéines de type prion détruisent le cerveau

p. 28 - Les graines de la démence, par Lary Walker et Mathias Jucker • p. 36 - Quand des protéines s'agrègent dans le cerveau, par Andrey Kajava et Jean-Pierre Liautard • p. 42 - Les tauopathies : des agrégats dans les neurones, par Simon Dujardin, Laetitia Traquier, Morvane Colin et Luc Buée



Les démences liées au vieillissement représentent aujourd'hui l'un des principaux enjeux de santé publique. Selon l'Organisation mondiale de la santé, 35,6 millions de personnes étaient atteintes d'une telle maladie dans le monde en 2010, dont 1,1 million en France. Et leur nombre devrait doubler tous les 20 ans. Cet enjeu est d'autant plus important que les traitements dont on dispose sont souvent peu efficaces, notamment parce que l'on comprend mal les causes biologiques de ces pathologies.

Toutefois, les neurobiologistes ont mis en évidence un mécanisme qui leur est commun : le cerveau de la plupart des personnes atteintes présente des lésions constituées d'agrégats de protéines mal repliées. Qui plus est, ces protéines transmettent, de proche en proche, leur conformation anormale aux protéines naturellement fabriquées par l'organisme, comme le font les prions, les protéines pathogènes de la maladie de la vache folle : l'anomalie mortelle se propage peu à peu à tout le cerveau (voir page 28).

Aujourd'hui, l'étude de ces agrégats de protéines est au cœur des recherches sur ces démences, avec l'espoir de mettre en évidence les étapes de leur formation et, partant, de nouvelles façons, mieux ciblées, d'enrayer la progression de la maladie. Les recherches se concentrent essentiellement sur deux aspects : l'analyse de la structure des agrégats (voir page 36) et l'étude des mécanismes conduisant à l'agglutination des protéines (voir page 42). Ce dossier fait le point sur ces recherches et sur les stratégies thérapeutiques qu'elles laissent entrevoir.

Marie-Neige Cordonnier