

# Les expériences de pensée

## Leur rôle dans l'évolution de la chimie physique

Françoise Thévet

### Résumé

Les expériences de pensée font seulement appel à l'intelligence humaine et à l'imagination des scientifiques pour essayer d'expliquer certains paradoxes et de résoudre quelques énigmes que l'on rencontre en science. La chimie physique bénéficie largement des avancées dues à ces expériences de pensée et peut ainsi évoluer en utilisant les prédictions comme indicateurs théoriques et en exploitant au mieux les conclusions, parfois surprenantes, obtenues par la réflexion des scientifiques. L'aspect philosophique de certains paradoxes, en particulier en physique quantique, permet à l'esprit humain de réfléchir et d'approfondir sa pensée. Le scientifique dont l'esprit effectue un effort d'imagination peut alors prévoir ce que sera la science dans l'avenir, mais il doit garder la faculté de faire évoluer son raisonnement pour l'adapter aux nouvelles découvertes.

### Mots-clés

**Expériences de pensée, paradoxe, imagination, prédiction, philosophie.**

### Abstract

**Thought experiments: their role in advancement of physical chemistry**

Thought experiments only require human intelligence and imagination of scientists to try to explain some paradoxes and to resolve a few riddles that occur in science. Physical chemistry greatly benefits from progress due to these thought experiments and in this way can advance using predictions as theoretical indicators and for the best making the most of sometimes amazing conclusions that reflection of scientists obtains. Philosophical side of some paradoxes, especially in quantum physics, allows at human mind to ponder and to go deeper into this thought. Scientist whose mind carried out an effort of imagination can so anticipate science in the future, but he has to keep the freedom to evolve his thought process for trying to adapt it at new discoveries.

### Keywords

**Thought experiments, paradox, imagination, prediction, philosophy.**

L'histoire des sciences est riche en expériences de physique et de chimie. Elles ont apporté de précieux renseignements aux scientifiques et, bien souvent, elles leur ont permis soit d'énoncer de nombreux principes et lois, soit d'effectuer d'importantes découvertes. Les expériences de pensée sont des essais pour résoudre un problème ou tenter d'expliquer un paradoxe en faisant uniquement appel à l'intelligence humaine. On les rencontre aussi bien en philosophie (par exemple les paradoxes de Zénon d'Élée et le malin génie de Descartes) qu'en physique et, fréquemment, elles s'avèrent très fructueuses. L'observation de certains faits conduit à la formulation d'une hypothèse que conçoit l'intelligence et l'imagination d'un scientifique ; il faut ensuite procéder à la vérification de cette hypothèse, c'est-à-dire la confirmer en invoquant de nouveaux faits. Le rôle de ces expériences de pensée est particulièrement important dans l'évolution de la chimie physique.

Dès l'Antiquité, l'imagination et l'intuition des savants s'avèrent pertinentes. Au V<sup>e</sup> siècle av. J.-C., les philosophes grecs de l'École éléate sont les premiers à étudier les principes et les conditions de la connaissance scientifique. Vers 470 av. J.-C., Leucippe de Milet, qui fut l'élève de Zénon, émet les premières idées *atomistes*. Son disciple Démocrite reprend ces idées vers 420 av. J.-C. et il soutient que la matière n'est pas infiniment divisible. La physique de Démocrite est la première physique corpusculaire mécanique ; à la dernière limite de la matière (corpuscule indivisible de la matière), il donne le nom d'*atome*. Il arrive ainsi à la conception d'atomes tous

identiques mais de formes variées. Il faudra attendre une vingtaine de siècles pour que cette hypothèse des atomes soit vérifiée.

### Les places vacantes dans la classification de Mendeleev

De tout temps et quelle que soit la discipline, les scientifiques ont trouvé nécessaire d'établir des classifications (zoologie, botanique, minéralogie...) ; c'est à partir du XIX<sup>e</sup> siècle que les chimistes essaient de classer les éléments chimiques. Dimitri Mendeleev étudie les périodicités des propriétés des 63 éléments déjà connus et le 17 février 1869, il publie un *Essai d'une (sic) système des éléments chimiques d'après leurs poids atomiques et fonctions chimiques* (titre en français sur le manuscrit original, *figure 1*). Mais il va aller au-delà de son travail systématique en imaginant l'existence de nouveaux éléments. Il n'hésite pas à laisser des places vides pour trois éléments inconnus à l'époque : l'ekabore, l'ekaaluminium et l'ekasilicium ; en 1871, il prédit leurs poids atomiques et décrit leurs propriétés ainsi que celles de certains de leurs composés avec une précision extraordinaire. Mendeleev aura la grande satisfaction d'assister à la découverte du gallium (ekaaluminium) par Paul Émile Lecoq de Boisbaudran en 1875, du scandium (ekabore) par Lars Nilson en 1879 et du germanium (ekasilicium) par Clemens Winkler en 1886 ; toutes ses prédictions seront alors largement confirmées. Pour aligner verticalement les

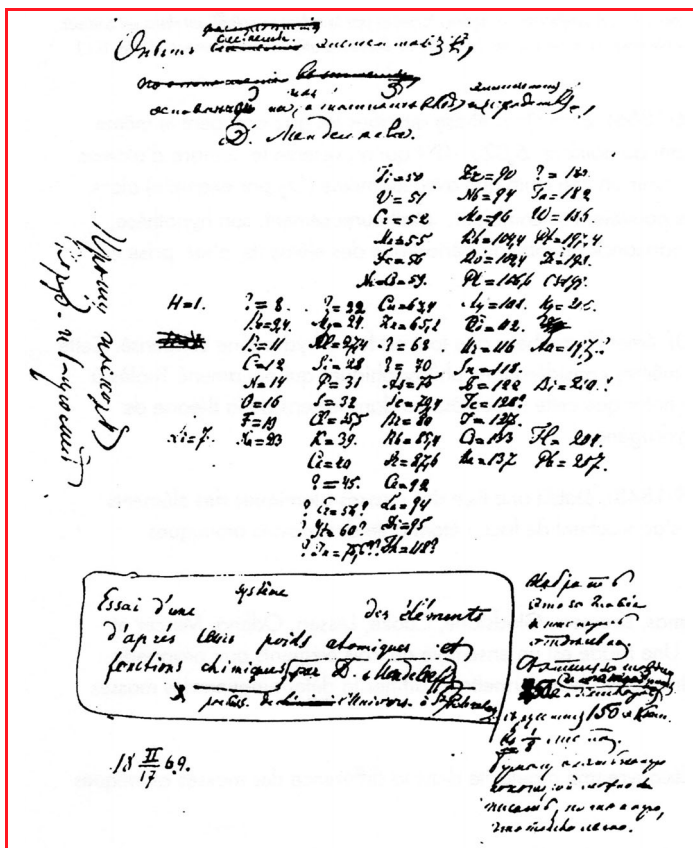


Figure 1 - Manuscrit de la publication de Mendeleev le 17 février 1869 sur lequel on peut lire le titre en français (Musée D. Mendeleev, Saint-Petersbourg, Ph). © APN.

éléments à propriétés similaires, il n'hésite pas à inverser l'ordre du tellure et de l'iode, pensant que le poids atomique du tellure est erroné ; de plus il modifie le poids atomique de certains éléments tels que l'indium et l'uranium.

De 1894 à 1898, les gaz nobles ont été découverts, mais ils n'avaient pas de places prévues dans la classification de Mendeleev ; il fallut alors ajouter un neuvième groupe à cette dernière. Les terres rares constituent la deuxième pierre d'achoppement à la classification périodique car, en 1902, Bohuslav Brauner eut l'idée de toutes les rassembler dans une case particulière au centre de la classification. Bien que satisfaisants, les travaux de Mendeleev demandaient une justification théorique car la découverte des éléments radioactifs posait un problème pour les placer dans le système périodique. En 1913, Niels Bohr décrit son modèle atomique et Henry Moseley établit que le numéro atomique est en relation simple avec le spectre de rayons X de l'élément considéré. La même année, Frederick Soddy émet l'hypothèse du phénomène d'isotopie pour expliquer la position des éléments radioactifs dans la classification périodique. Un même élément peut donc exister sous différents états massiques et occuper une seule case du système périodique. Antonius van den Brøk, scientifique amateur, identifie en 1913 le numéro atomique au numéro de la case de la classification périodique. Les éléments sont donc classés par numéro atomique croissant ; les masses atomiques peuvent varier selon la proportion des isotopes, ce qui explique bien les inversions et les prédictions de Mendeleev.

Les places vacantes dans la classification, confirmées par la loi de Moseley, ont donc servi d'indicateurs théoriques

**Le hasard n'aide que les esprits bien préparés (Louis Pasteur)**

des éléments à découvrir. L'interprétation quantique de la configuration électronique des atomes a encore enrichi la classification établie et imaginée par Mendeleev. Ceci montre bien que pour effectuer des découvertes fructueuses, il faut utiliser les travaux antérieurs, en accord avec la remarque de Louis Pasteur : « *Le hasard n'aide que les esprits bien préparés.* »

## Le deuxième principe de la thermodynamique et le démon de Maxwell

Le deuxième principe de la thermodynamique est un principe d'évolution, c'est-à-dire que si un changement peut se produire spontanément par une transformation irréversible, l'inverse de ce changement ne se produira jamais spontanément. Cet énoncé permet d'envisager une expérience de pensée qui ne pourra pas être observée expérimentalement. On suit tout d'abord l'évolution spontanée du rebond d'une balle sur le sol ; par la suite, à chaque rebond, la balle et le sol deviennent plus chauds (figure 2). On voit que le mouvement ordonné diminue et on constate que la direction de transformation spontanée correspond à une évolution vers la balle au repos ; toute son énergie est alors dégradée sous forme d'agitation thermique désordonnée répartie dans le sol considéré comme infini. Mais pourquoi une balle posée sur un sol chaud ne se met-elle pas d'elle-même à rebondir ? Pour que l'on puisse observer ce phénomène, il faudrait que deux conditions soient réalisées simultanément. Une partie de l'agitation thermique du sol devrait d'abord s'accumuler dans un objet unique et petit : la balle (localisation spontanée d'une multitude de vibrations aléatoires du sol dans un petit nombre d'atomes de la balle). Comme l'agitation thermique est chaotique, il faudrait ensuite que le mouvement de tous les atomes ait la même direction pour que la balle puisse s'élever au-dessus du sol. La probabilité de l'apparition de ce mouvement localisé et unidirectionnel étant quasiment nulle, il est invraisemblable de l'observer. Ce raisonnement confirme que le deuxième principe est un principe d'évolution.

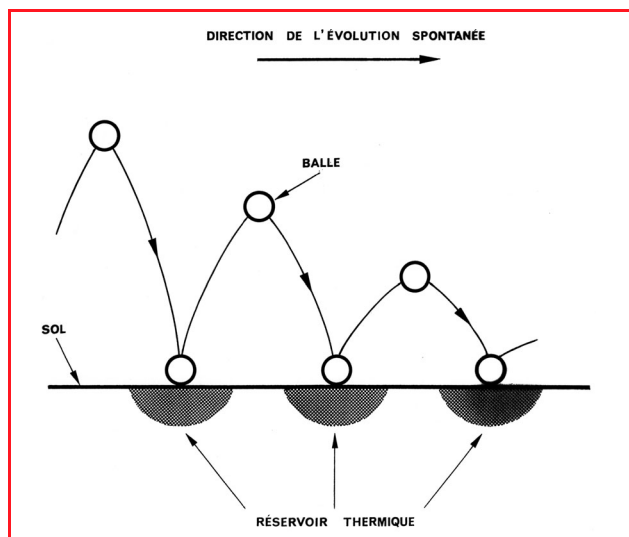


Figure 2 - Évolution spontanée du rebond d'une balle sur le sol. Pourquoi une balle posée sur un sol chaud ne se met-elle pas d'elle-même à rebondir ? (d'après P.W. Atkins).

La direction de la transformation spontanée est celle qui conduit à une dispersion chaotique de l'énergie totale : le processus inverse est irréalisable car cette dispersion chaotique de l'énergie ne peut pas se transformer en un mouvement unidirectionnel et localisé.

En 1871, dans son ouvrage *Theory of Heat* (Théorie de la chaleur), James Clerk Maxwell imagine une expérience de pensée, le démon de Maxwell, qui semble capable de violer le deuxième principe de la thermodynamique. À partir de 1860, Maxwell étudie la théorie cinétique des gaz et arrive à la conclusion que les vitesses des molécules d'un gaz obéissent à une loi de distribution statistique. Pour tenter d'expliquer l'irréversibilité des processus thermiques, Maxwell considère une boîte contenant un gaz, divisée en deux compartiments séparés par une paroi munie d'une porte. À l'échelle moléculaire, un petit diable très mobile et capable de discerner les molécules individuelles commande l'ouverture et la fermeture de la porte sans dépense d'énergie : le démon de Maxwell (figure 3). Ce démon ouvre uniquement la porte pour laisser passer de la droite vers la gauche les molécules les plus rapides et, au contraire, de la gauche vers la droite les molécules les plus lentes. Finalement, ce démon aura, sans dépense de travail, élevé la température du compartiment de gauche (la vitesse moyenne des molécules est augmentée) et abaissé celle de celui de droite (la vitesse moyenne des molécules est diminuée).

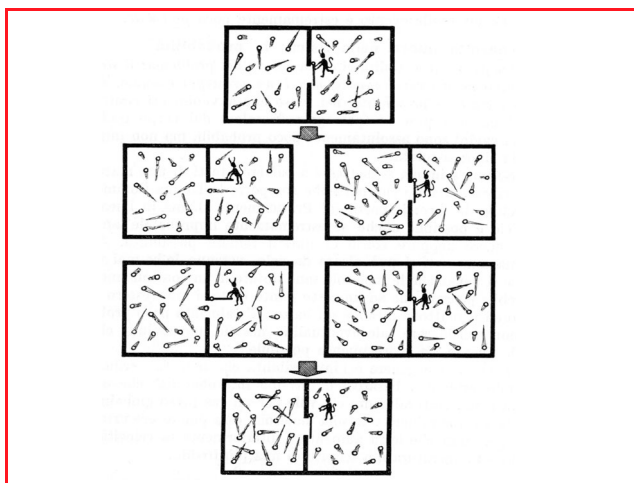


Figure 3 - Le démon de Maxwell se moque du deuxième principe de la thermodynamique. © Alberto Bandini Buti.

Le démon de Maxwell a ainsi violé le deuxième principe de la thermodynamique énoncé par Rudolf Clausius en 1850 : « Il est impossible de transporter de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud sans dépense de travail ou sans chute compensatrice d'un corps chaud sur un corps froid. » L'entropie du système a donc diminué sans apport d'énergie extérieure, en contradiction flagrante avec le deuxième principe. Par suite, Maxwell considère que l'irréversibilité est équivalente au passage d'un système ordonné (les molécules plus rapides dans le compartiment de gauche et les plus lentes dans le compartiment de droite) à un système moins ordonné (molécules rapides et lentes mélangées). C'est bien l'opposé de l'expérience réalisée par le démon de Maxwell. Ultérieurement quatre scientifiques ont apporté leur contribution à l'idée du démon de Maxwell. William Thomson (Lord Kelvin) lui attribue des propriétés presque « humaines ». Marian Smoluchowski établit en 1913 que le démon n'est pas nécessairement un être vivant. Leo

Szilard définit l'intelligence du démon comme une sorte de mémoire. En 1951, Léon Brillouin raisonne sur la théorie de l'information qui utilise le concept d'entropie et conclut que le démon n'aurait jamais pu opérer car dans tous les cas, il aurait provoqué l'augmentation de l'entropie et aurait respecté le deuxième principe de la thermodynamique.

## La mécanique quantique, le chat de Schrödinger et le paradoxe EPR

La mécanique quantique, introduite au début du XX<sup>e</sup> siècle, s'avère être un domaine privilégié pour les expériences de pensée ; elles ont été imaginées par quelques physiciens pour tenter d'expliquer un certain nombre de paradoxes. Un paradoxe (du grec *παρὰ*, contre, et *δόξα*, opinion) est une proposition contraire à l'opinion commune et qui va à l'encontre des idées reçues. C'est parfois une vérité qui choque par sa trop grande nouveauté.

À partir de 1925, Albert Einstein et Erwin Schrödinger entretiennent une correspondance régulière ; ils ont de plus en plus de mal à accepter l'interprétation de la physique quantique par l'École de Copenhague (principe de complémentarité : mode de pensée défendu par Niels Bohr, soutenant que la nature ondulatoire ou corpusculaire de l'électron dépend de l'instrument de mesure utilisé) et ils essaient de trouver le moyen de la prendre en défaut. Le 8 août 1935, Einstein imagine l'expérience du baril de poudre et le 19 août 1935, Schrödinger lui répond en imaginant une autre expérience de pensée qu'il qualifie lui-même de « burlesque » : le paradoxe du chat de Schrödinger. Il imagine une boîte fermée contenant un chat et un compteur Geiger capable de détecter l'émission d'une particule par un atome d'uranium ; ce compteur Geiger est relié à un dispositif qui, si l'émission de la particule issue de la désintégration radioactive a lieu, entraîne un marteau qui s'abat sur une fiole contenant de l'acide cyanhydrique, la casse, provoquant alors le dégagement du gaz mortel qui tue le chat (figure 4).



Figure 4 - Le paradoxe du chat de Schrödinger : expérience de pensée « burlesque » imaginée en 1935 par Schrödinger. © Erwin Schrödinger.

La probabilité pour que l'atome radioactif se désintègre ou ne se désintègre pas est la même. D'après la mécanique quantique, l'état du système est dans la superposition de deux états : l'atome s'est ou ne s'est pas désintégré et, par suite, a tué ou n'a pas tué le chat. Or le chat ne peut être simultanément mort et vivant : quand on ouvre la boîte, on ne trouve pas de superposition mais le chat mort ou vivant, avec la même probabilité. Selon l'interprétation de l'École de Copenhague, c'est le processus de la mesure qui crée le résultat ; sans mesure de l'état du chat, on ne peut pas dire



si le chat est mort ou vivant. Cette conclusion pose donc le problème de la mesure en mécanique quantique.

Cette expérience de pensée illustre ainsi la question cruciale de la frontière entre la mécanique classique à l'échelle macroscopique (le chat) et la mécanique quantique à l'échelle microscopique (l'atome). Les équations de la physique quantique impliquent la présence d'états superposés tandis que de telles superpositions ne sont pas observées à l'échelle macroscopique. La théorie de la décohérence permet de résoudre ce problème car elle affirme que l'état de superposition ne peut être maintenu qu'en l'absence d'interactions avec l'environnement. Or le chat qui s'intrique très vite avec cet environnement ne peut être décrit par un état quantique propre et a un comportement conforme aux lois de la physique classique. La décohérence qui tend à rétablir l'apparence classique du monde est aussi une conséquence de la notion de complémentarité et de l'intrication inévitable des systèmes complexes avec leur environnement.

Depuis plus de quatre-vingts ans, la mécanique quantique est l'objet de deux interprétations contradictoires provoquant bien souvent des débats animés. En 1969, Werner Heisenberg publie un ouvrage intitulé *Der Teil und das Ganze* (La partie et le tout) dans lequel il rappelle que les paradoxes de la mécanique quantique relèvent tout autant de la philosophie que de la science. Le 26 septembre 1927, lors de la Conférence internationale de physique tenue à Côme en Italie pour commémorer le centième anniversaire de la mort d'Alessandro Volta, Bohr intervient au sujet de deux idées qu'il considère comme très importantes : tout d'abord, il insiste sur les inégalités traduisant le principe d'incertitude établies par Heisenberg en 1926 (inégalités impliquant l'impossibilité de connaître simultanément la valeur précise de deux variables conjuguées) ; il propose ensuite le principe de complémentarité.

En octobre 1927, à Bruxelles, a lieu le cinquième Conseil de physique Solvay ayant pour thème « Électrons et photons ». Les discussions sont très animées entre Bohr et Einstein, ce dernier s'ingéniant à trouver des « Gedankenexperimenten » (expériences de pensée), expériences virtuelles imaginées pour tenter de mettre en défaut l'École de Copenhague ; mais Bohr réussit chaque fois à trouver une réponse satisfaisante. Au sixième Conseil de physique Solvay à Bruxelles en 1930, le débat entre Bohr et Einstein est toujours très vif. Ce dernier propose une expérience de pensée destinée à prouver l'incohérence de la mécanique quantique : la boîte à photons. Pour la contrer, Bohr utilise les inégalités d'Heisenberg et la théorie de la relativité générale : c'est le comble de l'ironie puisqu'Einstein sort vaincu grâce à sa propre théorie ! Ces discussions acharnées sur la mécanique quantique sont finalement bien illustrées par cette pensée d'Einstein : « *En science, ceux qui ont de l'imagination vont plus loin que ceux qui sont rigoureux.* »

Dans le but de développer et d'améliorer le dispositif de la boîte à photons, Einstein recherche une expérience de pensée pouvant conduire à la mesure indirecte mais simultanée de deux grandeurs s'excluant mutuellement telles que la position et la quantité de mouvement, ce qui serait contraire au principe d'incertitude. En 1935, en collaboration avec deux physiciens de l'Université de Princeton aux États-Unis, Boris Podolsky et Nathan Rosen, il signe un article qui paraît dans *Physical Review* : « *Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?* » (La description de la réalité physique par la mécanique quantique peut-elle être

*En science, ceux qui ont de l'imagination vont plus loin que ceux qui sont rigoureux*  
(Albert Einstein)

considérée comme complète ?). Cet article est connu sous le nom de paradoxe EPR d'après les initiales des trois auteurs. Les lois de la mécanique quantique autorisent la formation de paires de particules intriquées (par exemple deux photons intriqués polarisés perpendiculairement l'un à l'autre) pour lesquelles les mesures des propriétés de l'une permet de connaître instantanément les propriétés de l'autre, quels que soient la distance qui les sépare ou le type de mesure que l'on effectue. Le lien immatériel à distance entre les deux particules est décrit par une fonction d'onde non séparable pour l'ensemble du système. Pour Einstein, une telle situation est impossible et il pense à l'intervention de variables cachées encore inconnues en 1935.

Il faudra attendre 1964 pour qu'une étape décisive soit franchie quand John Bell, un théoricien irlandais, démontre que pour deux particules intriquées, les prédictions quantiques sont incompatibles avec tout modèle intégrant de façon explicite des variables cachées (ou paramètres supplémentaires). En 1982, le physicien français Alain Aspect réalise à l'Institut d'optique à Orsay une expérience montrant pour la première fois que l'intrication quantique de deux photons existe effectivement avec toutes les propriétés annoncées. C'est donc la théorie de Bohr qui est correcte : la mécanique quantique décrit totalement l'ensemble des objets infiniment petits ; c'est une théorie complète et il n'y a pas de variables cachées. Cependant, le défi d'Einstein lancé avec le paradoxe EPR permet aujourd'hui d'accéder à la cryptographie quantique, à la téléportation et, dans l'avenir, de mettre au point l'ordinateur quantique.

## Les particules élémentaires et l'Univers

Actuellement, les scientifiques sont particulièrement intéressés par l'énigme que constituent les particules élémentaires et l'Univers. En 1964, le physicien écossais Peter Higgs imagine le boson qui porte son nom (*figure 5*), invention réalisée indépendamment la même année par les physiciens belges François Englert et Robert Brout. Un boson est une particule qui transmet des forces, c'est-à-dire une particule d'interaction ; le boson de Higgs donne leur masse aux particules élémentaires. Plongées

dans le champ de Higgs, les particules interagissent avec lui, ce qui les ralentit et, par suite, diminue leur vitesse : elles ont donc acquis une masse. L'effet du champ de Higgs est l'équivalent d'une sorte de viscosité du vide pour les particules qui le traversent. Cependant, le boson de Higgs reste insaisissable et pourtant c'est le chaînon manquant du modèle standard. Cette hypothèse théorique du boson de Higgs doit être confirmée expérimentalement par les collisionneurs de particules.

Le plus grand accélérateur actuel de particules, le LHC (« large hadron collider », *figure 6*), se situe à Genève au CERN (Centre européen de recherche nucléaire). Ce grand collisionneur de hadrons, mis en route brièvement en septembre 2008 et redémarré en mars 2010, permettra sans doute de mettre en évidence le boson de Higgs ; l'énergie mise en jeu lors des collisions entre deux protons est de 14 téraélectronvolts, la plus

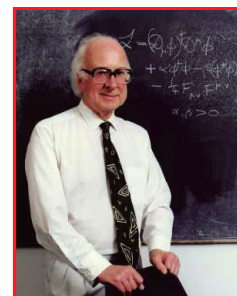


Figure 5 - Peter Higgs, physicien écossais né en 1930, professeur à l'Université d'Édimbourg. © M. Cimadevila/CERN.



Figure 6 - Le LHC est un anneau de 27 km de circonférence, situé à 100 m sous terre. © CERN.

grande énergie jamais atteinte. L'outil idéal pour trouver ce boson serait un collisionneur électron-positron formé de deux accélérateurs linéaires face à face, l'ILC (« international linear collider ») ou mieux encore, le CLIC (« compact linear collider ») ; ces collisionneurs permettront d'atteindre un gradient accélérateur de 150 mégaélectronvolts par mètre. Leur construction annoncée pour 2020-2030 semble constituer un espoir pour traquer l'infiniment petit.

Il faut donc s'attendre à des découvertes parfois surprenantes dont on ignore quelles seront les conséquences théoriques. La physique des particules a incontestablement une envergure philosophique puisque, bien souvent, les certitudes et les doutes se côtoient. Les prochaines avancées influenceront certainement sur la réflexion philosophique en l'obligeant à se mobiliser pour ouvrir de nouveaux chemins de pensée. Quand un scientifique imagine une expérience de pensée, son esprit effectue un effort pour considérer une idée sous toutes ses formes. Il réfléchit, c'est-à-dire qu'il revient sur sa pensée pour l'approfondir ; son esprit se replie sur lui-même pour envisager le pour et le contre de son idée première, pour la modifier s'il y a lieu ou bien lui en substituer une autre. La pensée caractérise une opération de l'esprit dans son sens philosophique le plus large. En effet, l'esprit selon le mot remarquable de Nicolas Malebranche « *a toujours du mouvement pour aller plus loin.* » Aller plus loin, c'est dans le cas du scientifique imaginer, prévoir ce que sera la science dans l'avenir, en conservant la faculté de modifier son raisonnement pour l'adapter aux nouvelles découvertes.

Le grand collisionneur LHC, qui opère à des niveaux d'énergie très élevés, permettra sans doute de résoudre quatre grandes énigmes de la physique.

Tout d'abord, *la découverte du boson de Higgs* parachèvera le modèle standard ; l'enjeu de la connaissance de la matière consiste à dépasser les modèles théoriques actuels en obtenant par l'expérience des résultats capables de les contredire.

Ensuite, l'exploration de *la supersymétrie* pourra expliquer pourquoi la matière visible ne représente qu'un très faible pourcentage de la masse totale de l'Univers ; la matière noire et surtout l'énigmatique énergie noire (en plus grande proportion) qui rend compte de l'accélération de l'Univers se partagent le reste. La validation de la supersymétrie favorisera l'unification des quatre forces fondamentales existant dans la Nature.

Puis l'élucidation du mystère que constitue *l'antimatière* sera réalisée ; en effet, la matérialisation (création d'un

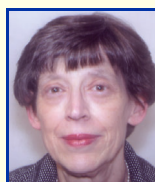
couple particule-antiparticule à partir d'énergie) et le phénomène inverse, l'annihilation (création d'énergie par collision entre une particule et son antiparticule) doivent se produire dans la même proportion. L'Univers devrait contenir des quantités égales de matière et d'antimatière. En réalité, l'antimatière est rare : pour quelles raisons ?

Enfin, *les conditions de l'Univers* qui existaient *quelques millièmes de seconde après le big bang* seront recréées ; la matière se trouvait alors sous la forme d'un plasma constitué de quarks et de gluons. En se refroidissant, les quarks ont formé les protons, les neutrons et les autres particules élémentaires. Les collisions entre des ions libéreront les quarks et les scientifiques pourront voir comment ils réagissent pour créer la matière.

Il se peut que le LHC fasse découvrir aux scientifiques l'existence de nouveautés auxquelles ils ne s'attendaient pas. Les expériences de pensée seront donc, dans l'avenir, un outil de choix pour essayer de résoudre les problèmes posés par la constitution de la matière, et ceci quelle que soit l'échelle envisagée. L'intelligence humaine et l'imagination des scientifiques ont encore un bel avenir devant elles.

### Pour aller plus loin

- Bandini Buti A., *I quanti di Planck*, Delfino, 1963.
- Bachelard G., *Le pluralisme cohérent de la chimie moderne*, Vrin, 1973.
- Hurwic J., Rôle des concepts théoriques dans la recherche expérimentale, *L'Act. Chim.*, oct. 1975, p. 3.
- Atkins P.W., *Chimie physique* (2 vol.), Tec & Doc Lavoisier/Vuibert, 1982.
- Pais A., *Subtle is the Lord*, Oxford University Press, 1982.
- Segré E., *Les physiciens modernes et leurs découvertes*, Arthème Fayard, 1984.
- Gribbin J., *Le chat de Schrödinger*, Le Rocher, 1988.
- Ruhla C., *La physique du hasard*, Hachette, 1989.
- D'Espagnat B., *Penser la science ou les enjeux du savoir*, Gauthier-Villars/Bordas, 1990.
- Lescuyer C., *Les éléments dans tous leurs états*, Oxane, 1992.
- Biezunski M., *Histoire de la physique moderne*, La Découverte, 1993.
- Talbot J., *Les éléments chimiques et les hommes*, Sirpe, 1995.
- Depovere P., *La classification périodique des éléments*, Debrøek Université, 1999.
- Haroche S., *Physique quantique*, Collège de France/Arthème Fayard, 2004.
- Aspect A., Grangier P., Des intuitions d'Einstein aux bits quantiques, *Pour la Science*, 2004, 326, p. 120.
- Peruzzi G., Maxwell, dossier « Les génies de la Science », *Pour la Science*, 2005, 24, p. 106.
- Haroche S., Raimond J.-M., Brune M., Le chat de Schrödinger se prête à l'expérience, *Les Dossiers de la Recherche*, 2005, 18, p. 76.
- Cerf N., Gisin N., L'étrange pouvoir de l'intrication quantique, *Les Dossiers de la Recherche*, 2005, 18, p. 84.
- Le paradoxe du chat de Schrödinger, *Sciences et Avenir*, 2006, 146.
- Colas P., Tuchming B., Qui attrapera le Higgs ?, *Les Dossiers de la Recherche*, 2006, 23, p. 20.
- Klein E., *Il était sept fois la révolution, Albert Einstein et les autres...*, Flammarion, 2007.
- Smolin L., *Rien ne va plus en physique*, Dunod, 2007.
- Davier M., *LHC : enquête sur le boson de Higgs*, Le Pommier, 2008.
- Peruzzi G., Niels Bohr, dossier « Les génies de la Science », *Pour la Science*, 2008, 34, p. 20.
- Klein E., Une matière à penser, *Dossier pour la Science*, 2009, 62, p. 4.
- Quigg C., Le Higgs et autres quêtes du LHC, *Dossier pour la Science*, 2009, 62, p. 18.



#### Françoise Thévet\*

est maître de conférences honoraire de chimie physique et de chimie minérale à la Faculté des sciences pharmaceutiques et biologiques de l'Université Paris Descartes.

\* Courriel : jerome.dugue@parisdescartes.fr (préciser le destinataire).