

Rôle des concepts théoriques dans la recherche expérimentale (Esquisse historico-épistémologique)

par Józef Hurwic
(Université de Provence, Centre de Saint-Charles, 3, place Victor-Hugo, 13331 Marseille Cedex 3)



1. Théorie et expérience

La science se développe par l'interpénétration de l'expérience et de la théorie qui se complètent mutuellement. En se basant sur les faits établis expérimentalement, on construit des théories. Une théorie valable est en mesure d'expliquer ou, plus précisément, de décrire de façon cohérente les faits connus. La meilleure théorie est celle qui, en plus, permet de prévoir des faits inconnus, nouveaux. Mais lorsqu'on atteint une précision plus élevée dans les opérations expérimentales ou lorsqu'on étend le domaine d'investigation, il arrive souvent que certains faits découverts ne s'expliquent pas dans le cadre de la théorie et sont même en contradiction évidente avec elle. A l'époque on pouvait alors dire : tant pis pour les faits. Adolf von Baeyer a écrit malicieusement sur Kekulé qu'il ne s'intéressait qu'aux substances qui obéissaient à ses idées, en négligeant tout simplement les autres. La communauté scientifique cherche d'abord à intégrer à tout prix dans la théorie « officielle » les discordances détectées. Mais si le nombre des divergences entre la théorie et l'expérience dépasse un certain degré, cette pratique devient impossible. Il faut donc introduire des corrections dans la théorie, il faut la modifier, la perfectionner. Mais cela ne suffit pas toujours. On crée alors, soit une théorie nouvelle plus générale

englobant la théorie précédente et en mesure de rendre compte aussi des phénomènes aberrants (la théorie apparaîtra ainsi comme constituée de modèles « emboîtés »), soit on abandonne de façon radicale la théorie ancienne et on la remplace par une théorie complètement différente.

La théorie en vigueur est un moteur, un guide fécond qui oriente et impulse toute la recherche expérimentale. L'expérience est une mise en acte de la théorie.

On attribue souvent une grande importance au hasard dans la recherche scientifique. D'accord, mais il faut aider un tel hasard favorable pour qu'il puisse apparaître et il faut ensuite l'exploiter. « *Le hasard, a dit Pasteur, n'aide que les esprits bien préparés.* Il faut chercher quelque chose pour trouver quelque chose, et parfois trouver ce que l'on n'a pas cherché, mais qui peut être quelquefois même plus précieux. Il n'y a pas de recherche expérimentale sans un fil directeur, sans des concepts préalables. Même l'idée, qui par la suite se révèle fautive, peut conduire à des découvertes valables. Passons aux exemples de différentes recherches expérimentales.

2. Découvertes des éléments chimiques

Presque tous les éléments chimiques, bien qu'ils se trouvent autour de nous et dans notre propre organisme, n'ont été découverts qu'à partir de l'apparition des notions théoriques modernes sur la matière au 18^e siècle. Aux environs de la naissance du Christ, on connaissait parmi les éléments métalliques existants (plus de quatre-vingts) seulement sept métaux : cuivre, étain, fer, plomb, mercure, argent et or. Ce sont eux qui pendant des milliers d'années ont satisfait les connaissances et les besoins pratiques de l'humanité. Dans l'antiquité, on ne connaissait en plus que deux éléments non métalliques : carbone et soufre. Pendant tout le Moyen Age on a découvert seulement quatre nouveaux éléments : arsenic, antimoine, bismuth et zinc.

Il était nécessaire que Robert Boyle en 1661 dans son célèbre ouvrage « *The Sceptical Chymist* » définisse les éléments comme « certaines substances primordiales simples ou des corps entièrement exempts d'impuretés » et que les études quantitatives aboutissent, vers la moitié du 18^e siècle, à faire bien comprendre que l'élément chimique est la limite de la décomposition qualitative des substances, pour que les découvertes des nouveaux éléments deviennent possibles. La première liste des éléments chimiques, publiée en 1789 par Lavoisier dans son « *Traité élémentaire de chimie* », contient déjà 33 positions dont d'ailleurs cinq, comme on l'a constaté plus tard, sont des composés.



Robert Boyle, physicien et chimiste anglo-irlandais (1627-1691).
(Photo H. Roger-Viollet.)

Au début de la deuxième moitié du 19^e siècle on connaissait environ 60 éléments.

Avec l'augmentation du nombre des éléments connus naît une tendance naturelle à les classer suivant certaines régularités. De cette façon on découvre la périodicité des propriétés. Mendéléev, en étudiant la succession de l'intensité des propriétés physiques et chimiques des éléments, a constaté, dans certains cas, des sauts particulièrement grands dans cette succession. Ces accidents l'ont amené à laisser dans son tableau quelques places vacantes qu'il a attribuées à des éléments encore inconnus. Par l'interpolation des propriétés des éléments voisins, à gauche et à droite, en haut et en bas, Mendéléev a pu décrire leurs propriétés. Dans sa publication de 1871 il a fait cela, de façon très détaillée, pour trois éléments. Ces trois éléments prédits ont été par la suite découverts : gallium en 1875 par Lecoq de Boisbaudran, scandium en 1879 par Nilson et, enfin, germanium en 1886 par Winkler. Leurs propriétés se sont révélées en accord étonnant avec les prédictions hardies de Mendéléev. La simple classification, dont la justification théorique n'a été donnée qu'un demi-siècle plus tard par Niels Bohr, a pu servir comme base de prédictions, confirmées ensuite expérimentalement.

Ces découvertes ont donné la preuve de la validité du système périodique. Dès lors le système périodique sert comme guide très efficace dans la « chasse » aux nouveaux éléments.

En se basant sur des exigences de la classification périodique, on a changé les valeurs utilisées à l'époque de la masse atomique de l'yttrium et du cérium et pour l'uranium même doublé la valeur.

L'établissement en 1913 de la loi de Moseley, a permis de déterminer expérimentalement le nombre atomique de l'élément, suivant son spectre des rayons X. De cette façon, le numéro de l'élément, dans la classification périodique, a obtenu une signification objective en éliminant tous les doutes qui existaient à cet égard. Toutes les lacunes dans l'ensemble des éléments connus sont devenues détectables sans équivoque.

La classification périodique enrichie, en plus, par l'interprétation quantique de la configuration électronique des atomes, a rendu possible la découverte, par exemple,

de l'élément n° 72. L'élément précédent, n° 71, lutécium, appartient aux lanthanides. Les chimistes ont donc pensé que l'élément 72, non encore découvert, faisait partie de la même famille. C'est pourquoi, ils l'ont cherché parmi les minerais de terres rares, mais sans résultat. Bohr, prenant en considération l'ordre du remplissage des niveaux quantiques par les électrons, a démontré que le nombre des lanthanides (éléments *f*) doit être égal à 14. Dès lors, puisque le cérium, élément n° 58, commence la série des lanthanides, le dernier parmi eux doit avoir le nombre atomique 71, c'est le lutécium. L'élément suivant, cherché doit donc appartenir à la famille du titane dans la colonne IVa et occuper la place au-dessous du zirconium. Dirk Coster et Georg von Hevesy, collaborateurs de Bohr, en suivant ses indications, ont donc dirigé leurs recherches vers les différents minerais du zirconium. En 1922, ils ont trouvé, par étude des spectres des rayons X, des traces de l'élément 72 auquel ils ont donné le nom de hafnium (Hafnia — ancien nom latin de Copenhague où cette découverte a été faite).

Les places vacantes dans la classification périodique, confirmées par la loi de Moseley, ont donc servi comme indicateurs théoriques des éléments à découvrir ; la position dans la classification de l'élément cherché a guidé les recherches expérimentales, en prévoyant les propriétés de cet élément et en montrant où on peut le trouver.

Après la découverte du hafnium, seulement cinq places vacantes, de numéros : 43, 61, 75, 85 et 87, ont subsisté dans le tableau périodique. Les numéros 85 et 87 appartiennent à la partie finale où tous les éléments sont radioactifs ; l'élément 61 est un lanthanide, alors difficile à séparer. Donc les éléments 43 et 75 semblaient les plus faciles à trouver. Tous les deux, prévus par Mendéléev, font partie de la famille du manganèse. Et c'est en 1925 que Walter Noddack et Ida Tacke (future Mme Noddack), en cherchant ces deux éléments dans les minerais du manganèse, ont trouvé l'élément 75, rhénium, qui est d'ailleurs le plus rare élément solide dans la nature. Les recherches analogues de l'élément 43 ont échoué. Après l'établissement en 1934 de la règle de Mattauch, il est évident qu'il n'existe pas d'isotope stable de cet élément. Suivant cette règle, parmi les deux isobares appartenant aux deux éléments voisins, un seulement peut être stable tandis que l'autre est nécessairement radioactif. S'il existe un isotope stable de l'élément 43 (technétium), son nombre de masse doit être compris entre la masse atomique 95,94 de l'élément précédent, molybdène, et celle 101,07 de l'élément qui suit le technétium, ruthénium, c'est-à-dire doit être égal à : 96, 97, 98, 99, 100 ou 101. Mais tous ces nombres entiers correspondent déjà à des isotopes stables soit du molybdène soit du ruthénium. De la même façon on peut expliquer qu'il n'existe pas d'isotope stable de l'élément 61, prométhium. Les éléments 85, astate, et 87, francium, prévus par Mendéléev, possèdent uniquement des isotopes d'une très courte vie. Il faut quand même remarquer qu'il y a quelques exceptions à la règle de Mattauch.

Je voudrais maintenant consacrer quelques remarques sur la découverte des éléments du groupe O, c'est-à-dire de la famille de l'hélium (pour lesquels les noms de gaz rares ou de gaz inertes sont incorrects) qui manquaient dans le tableau de Mendéléev. Il faut revenir à l'année 1892 quand une nouvelle sensationnelle éclata dans le monde scientifique. Lord Rayleigh venait de constater qu'il y avait deux azotes différents : un provenant de l'air duquel on a éliminé l'oxygène, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau, avec une masse volumique $\rho = 1,2572 \text{ g.l}^{-1}$, et le second, obtenu par la décomposition des composés d'azote,

avec une masse volumique un peu inférieure : $\rho = 1,2505 \text{ g.l}^{-1}$. Lord Rayleigh, physicien, et le chimiste Sir William Ramsay entreprennent des recherches pour expliquer cet étrange résultat. En commençant par des vérifications dans la littérature, ils trouvent dans un mémoire d'Henry Cavendish de 1875 un compte rendu de l'expérience de l'absorption totale de tous les constituants de l'air : oxygène, azote, dioxyde de carbone, vapeur de l'eau. Malgré ces opérations, il reste dans le récipient $\frac{1}{120}$ du volume initial

de l'air et le gaz restant ne réagit avec aucune substance. Cavendish avait négligé ce détail. Mais Rayleigh et Ramsay, après confirmation expérimentale, de façon perfectionnée, de ce fait, et après des études spectrales, ont conclu à la présence dans l'air d'un gaz jusqu'à ce moment inconnu. La mesure de la chaleur massique conduisit à la constatation étonnante que les molécules de ce nouveau gaz sont monoatomiques. Ainsi en 1894 a été découvert l'argon. Mais pour cet élément n'existait aucune place vide dans la classification périodique.

Un an plus tard William Crookes trouvait dans le spectre d'un gaz obtenu à partir de clévélite la raie intense orange (longueur d'onde : 587,6 nm) à côté du doublet jaune D du sodium. C'était la même raie qu'en 1868 l'astronome danois Janssen avait détectée dans le spectre de l'atmosphère solaire et que Norman Lockyer a ensuite attribuée à un nouvel élément, inconnu sur la Terre et existant sur le Soleil, appelé pour cette raison hélium. Et c'est seulement presque trente ans plus tard qu'on a découvert cet élément sur la Terre. Quand on a constaté que ce gaz était, comme l'argon, monoatomique et chimiquement inerte, il fallait ajouter au tableau périodique la colonne O et y placer ces deux éléments zéro-valents.

Cavendish, dans sa maîtrise expérimentale, est le premier à avoir isolé l'argon, à l'avoir entre ses mains mais ne l'a pas découvert parce que *soutenu dans ce sens par quelque concept théorique que ce soit*.

Hélium et argon furent découverts au hasard, mais il suffisait qu'ils se trouvent dans la classification périodique pour que la prédiction de l'existence des autres éléments de cette même famille soit faite. Tout de suite, la lacune entre hélium et argon a guidé la découverte du néon. Un peu plus tard on a découvert des gaz plus lourds de ce groupe : le xénon, le krypton et, au cours des études sur la radioactivité, le radon.

Les transuraniens, en tout cas à partir de l'américium (n° 95), ont été découverts ou, plus précisément, obtenus, par synthèse nucléaire, dans des expériences planifiées avec un choix prémédité des cibles et des projectiles, et identifiés chimiquement suivant la place qu'ils doivent occuper dans la classification périodique. De cette façon on est arrivé jusqu'à l'élément 106.

Tous les derniers transuraniens synthétiques subissent soit la désintégration α soit la fission, avec une très courte période. Les synthèses nucléaires, quand augmente le nombre atomique, deviennent de plus en plus difficiles à réaliser. On pourrait donc penser, qu'on se trouve à la limite des possibilités de l'existence des éléments chimiques. Mais d'autre part, suivant le modèle en couches du noyau atomique, élaboré dans les années 1948-1950 par Maria Goepfert-Mayer et H. D. Jensen, les noyaux contenant les nombres magiques 2, 8, 20, 50, 82 et 126 des protons ou neutrons, se caractérisent par une grande stabilité. Les noyaux connus possédant le nombre magique le plus élevé de protons, 82, sont les noyaux atomiques du plomb. L'élément suivant contenant le nombre magique de protons dans ses noyaux atomiques est l'élément hypothétique n° 126. Les calculs perfectionnés, tenant compte de

tous les facteurs influençant la stabilité des noyaux, abaissent ce nombre jusqu'à 114. D'après ces calculs, on peut s'attendre à ce que le noyau comportant 114 protons et le nombre magique 184 neutrons (suivant 126), c'est-à-dire 298 nucléons, ${}_{114}^{298}\text{E}$, doive être suffisamment stable, pour qu'il puisse exister ... dans la nature. Si c'est vrai, il y aurait une certaine probabilité pour trouver de ses traces dans des minerais de l'élément analogue occupant la place au-dessous dans la classification périodique, c'est-à-dire le plomb (ou ses proches voisins) *. De telles recherches sont entreprises, même dans des minerais provenant de... la Lune, et l'avenir montrera si elles conduiront au succès, en confirmant les calculs théoriques qui sont à leur origine.

3. Recherches sur la radioactivité

Les découvertes ci-dessus décrites des nouveaux éléments, jusqu'à 106, ont confirmé les concepts théoriques qui ont guidé ces recherches. Passons maintenant au cas où l'expérience s'avère en contradiction avec le concept théorique initial.



Withem Conrad Rontgen (1845-1923).
(Photo H. Roger-Viollet.)

La découverte par Wilhelm Conrad Röntgen en 1895 des rayons X, grâce à leurs propriétés extraordinaires, fut très rapidement diffusée dans la presse et suscita un intérêt énorme, en particulier dans le monde scientifique, même parmi les spécialistes d'autres domaines, dont le grand mathématicien français, Henri Poincaré. Celui-ci émit l'hypothèse que ces rayons accompagnent toute fluorescence et toute phosphorescence **. L'origine de cette hypothèse fautive se trouve dans la construction donnée à son tube par Röntgen. Le tube d'aujourd'hui possède, en face de la cathode, froide ou chauffée, une anticathode métallique qui, sous le bombardement des électrons, émet des rayons X. Les premiers tubes de Röntgen n'avaient pas d'anticathode métallique. La source d'émission des rayons X y était constituée par la paroi de verre du tube bombardée par les rayons cathodiques. Simultanément apparaissait une forte fluorescence de la paroi; elle était, comme nous le savons maintenant, émise par le verre sous l'influence des rayons X. Mais pour l'observateur de l'époque qui ne connaissait pas le mécanisme du phéno-

* O. L. Keller Jr., J. L. Burnett, T. A. Carlson et W. C. Nestor Jr., *J. Phys. Chem.*, 1970, 74, 1127.

** H. Poincaré, *Rev. Gén. des Sciences*, 1896, 7, 52.



Antoine Henri Becquerel dans son laboratoire.
(Photo H. Roger-Viollet.)

mène, la cause, les rayons X, et l'effet, la fluorescence, étaient inséparables. D'où l'erreur possible de Poincaré qui a pris la conséquence pour la cause : il pensait que la fluorescence y provoquait l'apparition des rayons X. Cette hypothèse erronée fut cependant très fructueuse pour la science. Henri Becquerel, pour vérifier l'hypothèse de Poincaré, s'attacha à l'étude des sels phosphorescents d'uranium se trouvant à sa disposition au Muséum d'Histoire naturelle à Paris. Il les soumettait à la lumière qui excite la phosphorescence, pour les placer ensuite sur une plaque photographique enveloppée de papier noir. La lumière visible de la phosphorescence est arrêtée par le papier. Si toutefois il y a émission de rayons X, pour lesquels le papier n'est pas un obstacle, la plaque doit noircir. Conformément à son attente, Becquerel put constater ce noircissement. L'expérience confirmait donc, semblait-il, l'hypothèse de Poincaré.

Dans les expériences ultérieures Becquerel posa sur la plaque photographique, entourée d'une enveloppe protectrice de papier noir ou d'aluminium, le même sel d'uranium, mais sans l'avoir auparavant exposé à la lumière, donc sans phosphorescence. Pourtant la plaque fut, aussi cette fois, impressionnée. Le résultat resta identique même quand le sel était gardé longtemps dans

l'obscurité. Becquerel constata enfin que tous les composés d'uranium, phosphorescents et non phosphorescents, irradiés préalablement par la lumière ou non exposés, noircissent la plaque photographique. L'uranium métallique donne le même effet, même encore plus fort. Le phénomène n'est donc absolument pas lié à la phosphorescence. Ainsi l'hypothèse de Poincaré, malgré qu'elle soit fautive, a quand même conduit à la découverte du rayonnement émis spontanément par l'uranium et ses composés et qui, traversant le papier noir, agit sur la plaque photographique. C'était la découverte de la radioactivité, communiquée le 2 mars 1896 à l'Académie *.

Becquerel constata aussi que les corps, qu'on appelle aujourd'hui radioactifs, ionisent l'air qui devient un bon conducteur électrique et de ce fait provoque la décharge d'un électroscope préalablement chargé. Cette propriété des rayons uraniques a été étudiée par Marie Curie-Sklodowska dans ses recherches sur la radioactivité débutées à la fin de l'année 1897. Mais elle utilisait un dispositif plus précis que l'électroscope classique. Elle plaçait les échantillons étudiés dans une chambre d'ionisation et mesurait l'intensité du courant en appliquant l'élec-

* H. Becquerel, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 1896, 122, 501.

tromètre à quartz, montage mis au point plus de quinze ans auparavant, dans d'autres buts, par son mari Pierre Curie et le frère de ce dernier, Jacques.

Le passage des expériences *qualitatives* de Becquerel aux expériences *quantitatives* a rendu possible l'obtention par Madame Curie de nouveaux résultats fondamentaux. Son étude quantitative, *très précise*, prouva que l'intensité des rayons ne dépend ni de l'état physique ni de la composition chimique de l'échantillon émettant ces rayons mais uniquement de la teneur en uranium : elle est proportionnelle à cette grandeur. La savante en tira une conclusion importante : le pouvoir d'émettre des rayons de Becquerel est une propriété de l'élément uranium, plus précisément de ses atomes, ce qui veut dire qu'il s'agit d'une propriété atomique. La tâche suivante que se fixait alors Madame Curie visait à rechercher s'il existe d'autres substances, en dehors de l'uranium et ses composés, ayant la propriété d'émettre des rayons ionisants. Après avoir étudié tous les corps simples connus à ce jour, elle put donner, ainsi qu'indépendamment d'elle G. C. Schmidt en Autriche, une réponse affirmative : le thorium et ses composés sont aussi radioactifs. Marie Curie examina ensuite très soigneusement, après les composés purs de l'uranium et du thorium, les différents minerais de ces éléments. Quelle ne fut alors sa surprise ! Après avoir exclu l'erreur possible dans ses mesures, elle constata que certains échantillons des minerais d'uranium, comme la pechblende ou la chalcolithé, étaient deux ou trois fois plus actifs que ne pouvait le laisser supposer leur teneur en uranium.

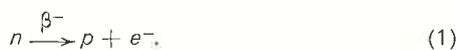
Fallait-il donc renoncer à la constatation précédente que la radioactivité est une propriété atomique ? Marie Curie n'était pas favorable à une telle conclusion. Afin d'expliquer la contradiction entre l'hypothèse et l'expérience elle synthétisa un composé similaire à la chalcolithé, le phosphate de cuivre et d'uranyle, à partir des produits purs. Le rayonnement de la chalcolithé synthétique est normal. Alors Marie Curie émit l'audacieuse hypothèse que le minéral naturel devait contenir une certaine quantité d'un élément encore inconnu dont la radioactivité était plus forte que celle de l'uranium. Il fallait maintenant par l'expérience vérifier cette hypothèse ; c'est-à-dire, il fallait isoler l'élément hypothétique. Madame Curie, rejointe par Pierre, qui intéressé par la découverte de sa femme, abandonna pour peu de temps, pensait-il alors, ses propres recherches cristallographiques, tente de réaliser cette tâche. En utilisant la pechblende provenant de la mine tchèque d'uranium à Yachymov (Joachimsthal), les Curie séparent chimiquement diverses fractions et étudient, suivant l'ionisation, leur rayonnement, car l'élément cherché devait signaler sa présence par un rayonnement accru. De cette façon, ont été, enfin découverts, d'abord, le polonium et, ensuite, le radium.

4. Difficultés dans les études sur les noyaux atomiques et les particules élémentaires

En 1900 on a prouvé que les rayons β^- , émis par certains corps radioactifs, sont de même nature que les rayons cathodiques, c'est-à-dire sont formés d'électrons se déplaçant à de très grandes vitesses. Après la découverte, quelques années auparavant, de l'électron libre, naquit la conception de la complexité de l'atome. L'atome dans son ensemble est électriquement neutre. Du fait que, dans sa composition, on trouve des électrons à charge négative, on déduit que l'atome doit contenir également un composant à charge positive. Partant de ce raisonnement, J. J. Thomson élabora en 1897 le premier modèle de l'atome. Selon lui, l'atome constituait un genre de globe

rempli de matière à charge positive, dans laquelle « flottaient » les électrons. Quelques années plus tard, il était conduit à admettre que ces électrons sont disposés symétriquement suivant des anneaux autour d'une partie centrale chargée positivement *. Dans des considérations théoriques on attribue souvent aux modèles des caractéristiques de simplicité, de symétrie, d'esthétique, et même... de beauté, bien que les objets de la nature ne sont pas toujours simples, ni symétriques, ni « beaux ».

La pensée humaine a une tendance à comparer le microcosmos et le macrocosmos. Cette comparaison est aussi venue à l'esprit de Jean Perrin. Ce grand physicien français au cours d'une conférence faite le 16 février 1901, aux étudiants et aux Amis de l'Université de Paris **, supposait que chaque atome était comparable à un ou plusieurs systèmes solaires en miniature, dans lesquels les électrons, sortes de petites planètes négatives, graviteraient autour de corpuscules très fortement chargés d'électricité positive, sorte de soleils positifs. Les distances entre ces « soleils » et ces « planètes » doivent être relativement immenses. Quelques années plus tard, Ernest Rutherford reprit (en la citant) cette suggestion et pour la vérifier, étudia avec ses collaborateurs G. Geiger et E. Marsden, le sort des particules α projetées sur une feuille métallique très mince. Rutherford constata : 1° que la majorité des particules traversent cette feuille presque sans déviation, ce qui signifie que les atomes de métal sont presque vides, et 2° qu'une petite partie des particules α subit une très forte déviation, ce qui témoigne de l'existence dans l'atome d'un centre positif très réduit. De cette façon Rutherford a découvert en 1911 le noyau atomique et établi le modèle planétaire de l'atome ***. En 1919 Rutherford bombarde des noyaux d'atomes d'azote avec des particules α et constate l'expulsion de noyaux atomiques d'hydrogène. Il conclut alors à la présence de noyaux atomiques d'hydrogène, les protons, dans les noyaux atomiques de tous les éléments. D'autre part, on savait que la radioactivité β^- consiste en l'expulsion d'électrons des atomes β^- -radioactifs, et plus précisément, de leurs noyaux, parce qu'on savait que la radioactivité est un phénomène nucléaire. On pouvait donc déduire simplement que le noyau d'un nuclide $\frac{A}{Z}E$, de nombre atomique Z, et de nombre de masse A, est constitué de A protons et (A - Z) électrons (nucléaires). Mais la présence de l'électron dans le noyau atomique était contestée suivant certaines considérations théoriques (calculs de spin ou application des relations d'incertitude). Cette contradiction ne pouvait être supprimée qu'après la découverte, en 1932, du neutron. C'est alors que Werner Heisenberg en Allemagne et indépendamment Dmitri Iva-nenko en U.R.S.S. ont établi la nouvelle théorie suivant laquelle le noyau $\frac{A}{Z}E$ est composé de Z protons et (A - Z) neutrons. Mais comment alors expliquer le fait que le noyau β^- -radioactif expulse quand même l'électron ? Il fallait alors supposer qu'un, parmi les neutrons (n) se trouvant dans le noyau, se transforme en proton (p) et électron (e^-) et ce dernier ne pouvant rester dans le noyau est tout de suite expulsé :



Les neutrons libres (en dehors des noyaux atomiques) subissent d'ailleurs aussi cette transformation, avec une période de 12 minutes environ.

Mais des mesures exactes ont détecté que le mécanisme suggéré de la transformation

* J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, 1904, 7, 237.

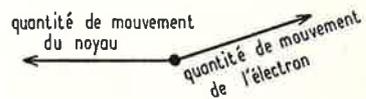
** J. Perrin, *Revue Scientifique (Revue Rose)*, 4^e série, 1901, 15, 449.

*** E. Rutherford, *Phil. Mag.*, 1911, 21, 669.

β^- est en désaccord avec certaines lois de conservation.

Le noyau β^- -radioactif avant l'émission d'un électron possède une énergie bien déterminée et l'énergie du noyau filial est aussi bien définie. La différence entre ces deux énergies doit être emportée par l'électron expulsé. Les électrons émis au cours de la transformation β^- considérée doivent donc être isoénergétiques (isocinétiques). Mais l'expérience montre que les rayons β^- donnent un spectre énergétique continu limité du côté des grandes énergies. Cela signifie qu'on retrouve la totalité de l'énergie, perdue par les noyaux radioactifs, uniquement dans une petite partie des électrons expulsés ; la majorité d'eux possède une énergie inférieure. Ce phénomène semblerait alors en contradiction avec la loi de conservation de l'énergie et aussi, en vertu de l'équivalence de la masse de l'énergie, à la loi de conservation de la masse.

Le noyau β^- -radioactif initial, qu'on peut considérer comme étant au repos, ne possède aucune quantité de mouvement. Au contraire, l'électron expulsé emporte une certaine quantité de mouvement. Mais la transformation radioactive s'effectue spontanément, sans intervention de forces extérieures, alors la quantité de mouvement du système, composé du noyau filial et de l'électron expulsé, doit être égale à la quantité de mouvement du noyau initial, c'est-à-dire doit être nulle. Ainsi on peut s'attendre à ce que le noyau filial, en subissant un recul, doit avoir la même quantité de mouvement que l'électron, mais de signe opposé, ce qui signifie que les vecteurs de ces deux quantités de mouvement doivent être portés par la même droite dans le sens contraires. Mais ce n'est pas le cas (fig.), en contradiction avec la loi de conservation de la quantité de mouvement.



D'autre part, il est évident que l'équation schématique (1) n'est pas également en accord avec la loi de conservation de spin parce que le spin de la particule se trouvant dans le membre de gauche est égal à 1/2, tandis que le spin total, des deux particules dans le membre de droite, chacune aussi de spin 1/2 (toutes ces particules sont des fermions), est entier.

Et enfin, le schéma (1) contredit la loi de conservation du nombre des leptons (nombre leptonique), parce que dans le membre de gauche il n'y a pas de leptons, tandis que dans le membre de droite apparaît l'électron. En résumé, on constate que les expériences s'opposent aux lois fondamentales de conservation : de la masse, de l'énergie, de la quantité de mouvement, de spin, de nombre leptonique. L'issue la plus simple de cette situation est d'admettre que ces lois fondamentales ne sont pas toujours satisfaites, qu'il y a des phénomènes qui leur échappent. Même Niels Bohr était disposé à une telle conclusion. Mais ce n'est guère agréable de déclarer injustes des lois qui jusqu'à maintenant ont résisté aux diverses réfutations dont elles ont été l'objet. Alors Wolfgang Pauli, pour sauver les lois de conservation a « inventé » une nouvelle particule, anti-neutrino ($\bar{\nu}$), qui doit accompagner l'électron expulsé et emporter l'énergie, la masse, la quantité de mouvement, le spin, et le nombre leptonique « perdus ». La loi de conservation de la charge électrique est satisfaite dans le schéma (1) donc la particule nouvelle ne doit pas changer le bilan électrique, c'est-à-dire elle doit être neutre. D'autre part, elle doit avoir une très petite masse, avoir le spin 1/2 (fermion) et avoir un nombre leptonique - 1 (antiparticule, plus précisément : anti-



Enrico Fermi, physicien italien (1901-1954).
(Photo H. Roger-Viollet.)

lepton). Le schéma (1) se transforme en :



donné en 1934 par Enrico Fermi.

Le mécanisme de la transformation β^+ de certains nuclides artificiels, découverte dans la même année par Frédéric et Irène Joliot-Curie, peut être décrit par le schéma analogue :



où e^+ représente le positon et ν le neutrino. Et c'est ensuite que les expérimentateurs, guidés par ces schémas, dans des expériences très délicates, A. I. Leipunsky en 1935, J. S. Allen en 1942, F. Reines et C. L. Cowan en 1953 et après en 1957, ont confirmé l'existence de ces deux particules élémentaires hypothétiques : neutrino et antineutrino.

On peut également rappeler que quelques autres particules élémentaires, dont le positon et le pion (méson π), avant d'être découvertes expérimentalement, ont été prévues par les théoriciens : la première en 1927 par P. A. M. Dirac et la deuxième en 1935 par Hideki Yukawa. En sachant que le positon doit porter une charge électrique positive, il suffit d'appliquer dans la chambre de Wilson un champ magnétique pour que C. D. Anderson en 1932 puisse détecter, sur la photographie des parcours des particules ionisantes provenant du rayonnement cosmique, les trajectoires déviées symétriquement par rapport à celles des négatons. En ce qui concerne le méson, C. F. Anderson et S. H. Neddermeyer, guidés par la théorie de Yukawa, ont découvert en 1937 le muon (méson μ) qui n'était pas la particule recherchée. Et c'est seulement en 1947 que

C. Lattes, G. Occhialini et C. Powell ont trouvé le méson recherché.

L'histoire de la découverte de l'hypéron Ω^- est particulièrement intéressante. Dans la classification des hadrons (mésons et hypérons), établie en 1961 par M. Gell-Mann et Y. Ne'eman [suivant le groupe de la symétrie unitaire tridimensionnelle SU (3)], se trouvait pour cette particule une place vacante, comme Mendéléev a laissé dans son tableau des places vacantes pour les éléments inconnus, dont on pouvait déduire les propriétés à partir de ces places. La classification de Gell-Mann et Ne'eman, de façon semblable a prévu les propriétés de l'hypéron Ω^- , ce qui a rendu possible sa découverte en 1964 par V. E. Barnes et ses collaborateurs, et en 1971 celle de l'antihypéron $\bar{\Omega}^-$ par un autre groupe américain*.

C'est ensuite par l'hypothèse des quarks que Gell-Mann a essayé de donner à ces considérations théoriques une interprétation plus physique. Cette remarquable hypothèse permet d'expliquer beaucoup de phénomènes observés. Chaque méson doit être composé d'un quark et d'un antiquark et chaque baryon (nucléon ou hypéron) de trois quarks. Trois quarks et trois antiquarks sont donc les particules hypothétiques plus fondamentales que les hadrons. La masse d'un quark doit être plusieurs fois plus grande que celle d'un hadron. Cela signifierait que le défaut de masse au cours de la synthèse hypothétique d'un hadron à partir des quarks doit être égale à plusieurs dizaines pour cent tandis que, par exemple, le défaut de masse pendant la synthèse d'un noyau atomique à partir des nucléons est de 1-3%. La liaison entre les quarks doit donc être incomparablement plus puissante que la liaison entre les nucléons dans le noyau. C'est pourquoi, même si les quarks existent, on ne peut pas les rencontrer à l'état libre. Mais on peut essayer de désintégrer des hadrons s'ils les contiennent. Pourtant, malgré la puissance toujours croissante des moyens mis en œuvre, on n'a jamais pu démontrer l'existence des quarks. Malheureusement, les accélérateurs existants ne disposent pas de l'énergie nécessaire. Par l'augmentation de leur puissance on aboutira, peut-être, à l'obtention des quarks, s'ils existent. En tout cas, les recherches entreprises ne resteront pas sans résultats nouveaux, bien qu'ils puissent être tout à fait inattendus.

5. Chercheur-modèle

Les nombreux exemples cités dans cet article montrent l'importance des concepts théoriques dans la recherche expérimentale. On peut maintenant poser la question : dans quelles conditions naissent de tels concepts, ou, autrement dit, on peut se demander quelles caractéristiques doit manifester un chercheur, en particulier en chimie, pour que ses expériences soient efficaces. Le chimiste connu, Paul Walden, dans un de ses

* A. Firestone, G. Goldhaber, D. Lissauer, B. M. Sheldon et G. H. Trilling, *Phys. Rev. Letters*, 1971, 26, 410.

livres sur l'histoire de la chimie, en réponse à cette question, a énuméré cinq qualités commençant en allemand par la lettre G : 1. *Geist* (esprit, intellect); 2. *Geduld* (patience, ce qui dans ce cas signifie aussi un grand effort, un travail); 3. *Genauigkeit* (rigueur, précision, exactitude); 4. *Glück* (chance) et 5. *Geld* (argent). Tous ces facteurs sont en effet nécessaires dans le travail scientifique.

Boyle, Cavendish, Lavoisier, Laplace étaient riches, ce qui leur donnait la possibilité de réaliser leurs recherches. La science contemporaine exige des dispositifs et des matériaux encore plus coûteux qu'on ne peut obtenir sans des moyens financiers importants (condition 5).

Avoir un peu de chance n'est jamais un handicap (condition 4).

Mais la chance ne peut pas remplacer le travail (condition 2).

Rappelons que Pierre et Marie Curie pour obtenir un décigramme de chlorure de radium, à partir de plusieurs tonnes de résidus d'extraction de l'uranium de la pechblende de Yachymov, ont eu besoin de quatre ans d'un travail opiniâtre dans des conditions d'ailleurs très pénibles.

Le célèbre inventeur américain, Thomas Alva Edison, pour réaliser en 1879 la première lampe à incandescence pratique, avait travaillé plusieurs années. D'abord, il avait compris qu'il fallait faire le vide dans l'ampoule. Mais les pompes existant à l'époque ne pouvaient pas donner le vide nécessaire. Edison commença donc par le travail de l'amélioration de la pompe. Ensuite, il essaya, avec ses collaborateurs, six mille matériaux différents pour le fil avant de choisir la fibre de bambou carbonisé. Ses notes sur ce sujet occupent quarante mille pages dans deux cents cahiers. Pour créer l'accumulateur fer-nickel, Edison a effectué cinquante mille expériences différentes. Les nombreuses inventions importantes d'Edison seraient impossibles sans son inaltérable ténacité et sans sa puissance extraordinaire de travail. Il travaillait sans aucun souci de sa famille, vingt heures sur vingt-quatre, il mangeait à sa table de laboratoire et là il couchait avec quelques livres sous la tête. On attribue à Edison les mots suivants : « A une invention géniale contribuent un pour cent de l'intellect et de l'inspiration, et quatre-vingt-dix-neuf pour cent du travail à la sueur de son front. »

Mais cet un pour cent (qualité 1) est quand même indispensable. Sans le pouvoir du raisonnement efficace, sans l'imagination créative, il n'y a pas de recherche scientifique véritable. Et en plus, pour que le chercheur puisse poser des problèmes valables pouvant guider la recherche, il doit manifester, d'une part, une curiosité, un sentiment d'étonnement frais et même d'une certaine naïveté d'enfant avec ses questions sans cesse répétées « pourquoi? », et, d'autre part, la riche expérience d'un vieillard. Enfin, la condition 3, la rigueur dans le travail scientifique, n'a pas besoin, de justification.

Le chercheur doit posséder l'ensemble de telles qualités pour être capable de créer des concepts nécessaires à l'efficacité de l'étude scientifique.