

Niels Bohr — Un penser aux frontières

100 ans du modèle de Bohr

Johannes Kühl

Voici 100 ans Niels Bohr publiait sa « Trilogie », trois articles, dans lesquels il décrivait le modèle d'atome qui porte son nom.¹ Ce n'est que quelques années plus tard seulement qu'il fut considéré comme valable sous sa forme originelle. Pourquoi cela vaut-il la peine de jeter un coup d'œil en arrière sur cet événement ?

D'une part, le modèle du noyau, et des électrons qui tournent autour, a durablement marqué les représentations que nous nous faisons de la « structure » de la matière ; aujourd'hui encore, on le rencontre dans des logos (de firmes) et il orne des pages de titre.² L'analogie avec le système solaire a presque un caractère suggestif et, en outre, c'est l'ultime représentation à peu près intuitive que nous pouvions nous faire de l'atome.

D'autre part, ce fut justement Bohr qui poussa la porte vers une physique, qui reconnut l'insuffisance des représentations tombant sous le sens : son modèle prenait en compte, pour la première fois, l'hypothèse de Planck des quanta de lumière. En plus, il devait faire des hypothèses ou selon le cas admettre des postulats absurdes du point de vue de la physique classique. Ce sont nonobstant ceux-ci qui ouvrirent directement la voie vers la nouvelle physique du 20^{ème} siècle. Avec cela, il traça les contours, pour ainsi dire, d'un programme de recherche pour les décennies suivantes. Cela constitue son importance dans l'histoire.

Il se rajoute à cela le fait que de Bohr, et de son penser, et avant tout, de son interrogation, nous pouvons apprendre aujourd'hui encore — et nous pouvons admirer sa personnalité. Il fut sans doute l'un des penseurs philosophiques les plus profonds parmi les physiciens du 20^{ème} siècle, qui lutta pour arriver au seuil cognitif de sa science. « Il aime passionnément à penser » (Carl Friedrich von Weizsäcker).³

La biographie de Bohr se laisse articuler en trois grandes phases : la première s'étend de sa naissance, le 7 octobre 1885, jusqu'à sa 28^{ème} année, celle de la publication de sa « Trilogie ». La seconde englobe les années de développement de la mécanique quantique jusqu'à peu près la découverte de la fission nucléaire et l'éclatement de la seconde Guerre mondiale. La troisième est finalement marquée par l'engagement humain et politique de Bohr, jusqu'à sa mort, le 18 novembre 1962.⁴

Jeunesse et première production scientifique

Niels Bohr grandit dans un environnement stimulant à Copenhague. Ses parents — son père était professeur de physiologie à l'université — entretenaient un cercle d'amis cultivant de vastes intérêts scientifiques, philosophiques et culturels. Son frère cadet Harald — plus tard un mathématicien notable — aimait la musique et jouait du violon, Niels, par contre, était plus intéressé par la langue, la poésie et la littérature. Tous deux eurent une jeunesse active, jusqu'à prendre part aux Olympiades de 1908, dans l'équipe nationale danoise de football, qui remporta alors la médaille d'argent (Niels fut gardien de but remplaçant ; lorsqu'en 1922, il reçut le prix Nobel de physique, un journal danois devait titrer : « *Le célèbre joueur de football danois, Niels Bohr, a reçu le prix Nobel de physique* »).

En 1903, il entre à l'université de Copenhague (physique auprès de Christian Christiansen, philosophie auprès de Harald Høfding, mathématique, astronomie et chimie). Le savoir-faire pratique de ce futur théoricien est remarquable : en 1906, il reçoit la médaille d'or de l'académie royale danoise des sciences pour un travail expérimental permettant la détermination de la tension superficielle des fluides. Enfant déjà, il réparait des jouets, par la suite des bicyclettes et même des montres. Finalement, en tant que directeur en poste d'Institut et prix Nobel, il gagna un pari lorsque, invité au chalet de ski de Heisenberg, il se mit à sculpter des éoliennes.

Werner Heisenberg, par contre, avait presque échoué à l'examen du doctorat, à cause de la physique expérimentale. Cette opposition est décrite par Weizsäcker de la manière suivante : « Un mot sur les mains. Heisenberg, le jeune homme élancé, blond, avaient les mains pleines de nerfs et d'artiste, celles du pianiste, habiles à saisir des accords parfaits. Bohr avaient celles, quelque peu plus

charnues, larges et puissantes et plus assurées d'un ébéniste. Il pouvait saisir parfaitement les choses. Jeune physicien, il expérimentait et soufflait lui-même ses tubes de verre... on considérait à peine en lui le sportif résistant... Il affectionnait la voile et faisait du ski. »⁵

Après sa thèse, en 1911, sur la théorie électronique des métaux, il se rendit à Cambridge pour un séjour de recherche post-doctoral, pour travailler chez Joseph John Thompson, à qui on imputait la découverte de l'électron. Il y fait la connaissance de Ernest Rutherford, l'expérimentateur divinement doué et père de nombreuses découvertes dans le domaine de la radioactivité, et il changea bientôt pour intégrer le laboratoire de celui-ci à Manchester. Ici commença une collaboration fructueuse, qui mena finalement aux trois publications sur l'édification de l'atome, le « modèle atomique de Bohr ».

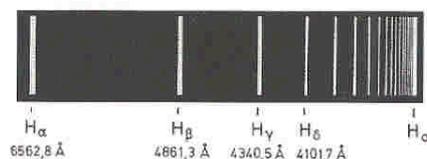
À l'été 1912, il épousa, lors d'un plus bref séjour au Danemark, Margarethe Nørlund, qui l'accompagna toute une vie, en agissant souvent comme assistante et avec laquelle il discuta de nombre de ses idées philosophiques. Ils eurent six fils ensemble. L'aîné mourut en 1934, à l'âge de 18 ans à bord d'un tragique accident de navigation à voile — le père était à bord du bateau. Le quatrième, Aage, reçut pareillement par la suite le prix Nobel de physique et succéda à son père à la tête de l'Institut de Copenhague. Margarethe Bohr mourut en 1984, à l'âge de 95 ans.

Le modèle de Bohr

Si l'on veut comprendre et estimer la performance de Bohr, on doit d'abord remonter quelques décennies en arrière : en 1859, Gustav Kirchhoff et Robert W. Bunsen avaient découvert l'analyse spectrale : des substances émettent de la lumière selon des couleurs caractéristiques lorsqu'elles sont portées à incandescence en tant que gaz (c'est pour cette expérience que fut développé le bec [brûleur, *ndt*] Bunsen). Si l'on engendre un spectre, au moyen d'une fente et d'un réseau optique ou d'un prisme, on obtient en général plusieurs raies parallèles ordonnées, images colorées de la fente, qui forment ensemble ce qu'on appelle un spectre de raies. La disposition et la couleur des raies sont typiques du gaz émetteur de lumière, de sorte que on peut en identifier la matière respective (analyse spectrale). Toutes les affirmations sur les substances dans l'univers reposent sur l'investigation de tels spectres ou analogues.

Les raies de la série Balmer de l'hydrogène

Avec quelques substances, ces raies montrent un ordre géométrique étonnant, en particulier avec l'hydrogène, où elles peuvent rappeler, en étant vues en perspective, des piquets de tente (voir illustration). En physique on détermine à partir de la position une longueur, qui est interprétée comme la longueur d'onde de la lumière émise. Ainsi à chaque raie correspond une longueur d'onde déterminée λ (elle peut par exemple se monter à 500 nm [nanomètre, 10^{-9} m], à savoir la moitié d'un millième de mm). L'enseignant et mathématicien bâlois, Johann Jakob Balmer, étudia par le calcul les rapports de ces longueurs d'onde dans le spectre de l'hydrogène et découvrit, en 1888, qu'ils pouvaient être étonnamment représentés par une simple formule (n sont des nombres entiers plus grands que 2, et R une constante déterminée empiriquement, appelée constante de Rydberg, $1,0907 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$) :



$$\frac{1}{\lambda_n} = R \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

À l'œil nu on ne peut voir que 4 de ces raies, pour lesquelles n adopte les valeurs 3,4,5. Si l'on photographie le spectre, on obtient essentiellement plus de raies, pour lesquelles la formule de Balmer est juste. Plus tard, on découvrit, dans les domaines du spectre infrarouge et l'ultraviolet, invisibles pour nous, d'autres raies, pour lesquelles la formule devait être simplement modifiée :

$$\frac{1}{\lambda_{n,m}} = R \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Ici, m est de nouveau un nombre entier, dans le cas des raies de Balmer c'est $m = 2$, on parle des séries de Balmer. Pour l'hydrogène, on ne connaît que 5 de ces séries (avec $m = 1, 2, 3, 4$ et 5), pour lesquelles la formule est juste. — Un résultat étonnant sur la proportion des propriétés de la matière avec les lois des nombres entiers

À une onde appartient aussi une fréquence ν (le nombre d'oscillation par seconde), qui dans le cas le plus simple d'une lumière de longueur d'onde l et la vitesse de la lumière c ($3 \cdot 10^8$ m/s) se laisse calculer par :

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Mais elle est si élevée pour la lumière, qu'elle ne se laisse pas directement observer comme phénomène temporel.

Pour amener les corps à briller, il faut un apport d'énergie, par exemple, les brûler à la cire d'une bougie. Inversement, un corps éclairé se réchauffe lorsqu'il « englutit », absorbe, de la lumière, par exemple, une surface obscure qui absorbe les rayons du Soleil. Dans celle-ci, la lumière « transmet » de l'énergie. Lorsque Max Planck, en 1900, tenta de décrire mathématiquement la lumière émise d'un corps incandescent (plus exactement le rapport entre la température et l'intensité de couleur dans le spectre d'émission lumineuse), il trouva — contre un certain mauvais grès de sa part —, que l'énergie était transmise en « portions », qui en vérité sont si petites, que l'émission lumineuse apparaît continue à l'observateur. Il fallut des expérimentations raffinées et la technique moderne, pour parvenir à démontrer expérimentalement ces portions. Planck se vit donc obligé d'« atomiser » le transfert d'énergie par la lumière. Un peu plus tard (en 1905), Einstein montra avec l'effet photoélectrique, qu'avec l'aide des portions l'absorption de la lumière peut aussi être mathématiquement décrite .

Si Planck avait encore admis que la formation de portions dépendît d'un matériel émettant de la lumière, Einstein admit, quant à lui, que la lumière « consistait » en de telles portions ou particules, par la suite dénommée photons. La grandeur de ces portions d'énergie est liée à la fréquence citée ci-dessus par la formule :

$$E = h\nu,$$

Où E est l'énergie, ν la fréquence et h une constante d'abord déterminée expérimentalement, qui fut nommée constante de Planck.

Lorsqu'en 1912, Bohr arriva chez Rutherford, celui-ci venait d'avoir concocté sa célèbre expérience de la feuille d'or et l'avait fait réaliser, sur la base de laquelle il avait pu développer une notion de la structure de l'atome : un très petit noyau chargé positivement au centre, dans laquelle toute la masse est réunie, entouré d'électrons très légers négativement chargés, de sorte que l'ensemble est électriquement neutre. Le modèle n'avait pourtant encore aucun rapport avec de quelconques propriétés directement perceptibles de la matière. Lorsque Bohr, en février 1913, eut son attention attirée par un collègue sur la série de Balmer, il commença par rechercher une relation de dépendance des enveloppes électroniques d'avec les raies spectrales, et il parvint, en faisant entrer la relation de Planck entre fréquence et énergie, à affiner si loin le modèle de Rutherford, qu'il put avec cela calculer le spectre de l'hydrogène. Ainsi, pour la première fois, abstraction faite des

proportions massiques des réactions chimiques, un phénomène macroscopique fut dérivé du modèle atomique et l'hypothèse des quanta de Planck fut introduite dans la physique atomique.

Il est vrai que pour cela Bohr dut poser quelques exigences au comportement des électrons de l'atome qui, avec le comportement connu des charges électriques, par l'électro-dynamique classique, n'étaient pas conciliables et ne furent finalement justifiées que par le succès du modèle.

Les postulats les plus importants sont :

- a) Les électrons se déplacent sur des orbites stables déterminées autour du noyau comme les planètes autour du Soleil (à la place de la force de gravitation, c'est l'attraction électrique entre le noyau chargé positivement et les électrons négativement), mais il ne se présente que des orbites déterminées, lesquelles sont déterminées par la constante de Planck.
- b) Si un électron « saute » d'une orbite à une autre, alors la différence d'énergie entre les deux états est émise ou absorbée comme lumière.

Le postulat a) est en contradiction avec l'électrodynamique, parce qu'une charge qui se déplace sur une orbite circulaire (l'électron) devrait continuellement rayonner et à l'occasion tomber lentement sur le noyau. En outre, il n'y a aucune raison pour que telle orbite se présente et telle autre non.

Le postulat b) contredit également l'électrodynamique, parce que l'émission de lumière (ou bien de rayonnement en général) n'est pas dépendante de la vitesse de rotation de l'électron, mais au contraire, de la transition d'orbite. Comment cela se produit-il, là-dessus on ne peut rien en dire (« saut quantique »).

Le résultat : Avec ces postulats (et deux autres encore), on parvint à dériver la formule de Balmer et à calculer correctement la constante de Rydberg R , uniquement sous l'utilisation de grandeurs électriques (comme la charge et la masse de l'électron) ainsi que des constantes de Planck, qui furent toutes mesurées d'un autre côté. R n'était plus seulement déterminée empiriquement.

L'élément particulier, c'est que les proportions sont toujours déterminées par des nombres entiers (n et m dans la formule de Balmer). Einstein écrivit un jour sur ce travail de Bohr : « C'est de la haute musicalité dans le domaine de l'idée ».⁶

Plus tard Bohr et d'autres, parvinrent à gagner un discernement profond sur le système périodique des éléments.

Mécanique quantique et communauté scientifique

Après une série d'autres succès avec l'utilisation du modèle de Bohr, on tenta aussi de calculer les raies spectrales d'autres éléments que l'hydrogène, ce qui se révéla nonobstant de plus en plus difficile. En particulier, les postulats requis restaient toujours comme avant, incompris. Cela mena finalement à une « nouvelle physique », à la mécanique quantique par Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Max Born — et Niels Bohr, pour ne nommer que les plus importants. Les années entre 1913 et le début de la seconde Guerre mondiale furent pour Bohr marquées par un travail des voyages et des discussions infatigables. De retour de Manchester, il devint à Copenhague le premier professeur de physique théorique du Danemark et continua à travailler à l'introduction des hypothèses quantiques en physique atomique. Ses visites auprès d'autres centres de recherches furent toujours l'occasion d'organisations festives. À Berlin (1920), il fit connaissance de Einstein et Planck, et de jeunes chercheurs organisèrent, à l'initiative de Lise Meitner, en extra, un « colloque sans pontifes » avec lui.⁷ La visite à Göttingen (1922) est entrée dans l'histoire comme le « Festival Bohr ». Il en vint à sa première rencontre avec Max Born et le jeune Werner Heisenberg, âgé de 21 ans, qu'il invita peu après à Copenhague. Son propre Institut fut ouvert en 1921 : « *Universitets Institut for teoretisk fysik, København* » (aujourd'hui Institut Niels Bohr).

En outre Niels Bohr était tout autre qu'un conférencier béni des dieux. Abraham Pais écrit : « He was divinely bad as a public speaker [Il était divinement mauvais comme conférencier en public] ».⁸ Et Carl Friedrich von Weizsäcker : « Lorsque Bohr parle, il oublie, ainsi disait-on, les lois de l'acoustique, de la grammaire et de la logique. À voix basse, en bredouillant et répétant, il dit ce que tous savent déjà et lorsqu'il dit la chose réellement importante, il met encore sa main devant sa bouche. » Mais : « On se moquait un peu de lui, parce que souvent on ne le comprenait pas, on

l'admirait et on l'aimait sans presque aucune limite. »⁹ Il a dû donner sa meilleure conférence après la remise du prix Nobel : après la cérémonie, en effet, il n'eut plus le temps d'aller rechercher son manuscrit soigneusement travaillé, oublié à l'hôtel, il fut donc obligé de parler librement... Durant ces années, Bohr fut un partenaire de débats et de questionnements infatigable. Son institut était depuis longtemps devenu le centre de la physique atomique. « La science naît dans la discussion » — cette formulation d'Heisenberg s'enracine dans les expériences vécues à Copenhague. La description de Weizsäcker de cette époque (1932) est au-dessus de tout : « Il était d'une grandeur moyenne, de port légèrement courbé. La tête, souvent contemplative et timide comme un peu incliné de côté, semblait constituée de deux moitiés différentes. Le front étroit, haut sous des cheveux déjà grisonnant, quelque peu clairsemés, qu'il houspillait et sillonnait en réfléchissant : l'énorme intensité du penser. La partie inférieure du visage, quelque peu rondelette, des lèvres retroussées, des joues quelque peu ballantes : un amical bourgeois danois. Un sourire souvent craintif, qui traversait le visage comme l'éclair, en réunissant les deux moitiés. Les yeux profondément enfoncés derrière des sourcils broussailleux, semblaient en même temps regarder précisément les choses et au travers des choses, dans un autre lointain qui nous était insondable ; ils regardaient autrui avec timidité et bonté en même temps, comme s'ils ne l'avaient jamais vu sinon... Quand un autre — Heisenberg, Dirac, Pauli par exemple — faisait un rapport, Bohr l'interrompait en lui posant des questions, enveloppé dans le « pain de sucre » de sa manière de parler embarrassée et amicale. « C'est en effet très, très intéressant... Nous sommes en effet beaucoup plus d'accord que vous le pensez... Je veux dire... non pas pour critiquer, seulement pour apprendre... je dois dire, je dois dire » Au près d'êtres humains tout à fait inertes il ne disait encore, tout résigné que : « Oh, très, très ! » Et alors tout devenait impitoyablement clair. »¹⁰ Von Weizsäcker rapporta aussi ses propres vécus au moment où Bohr lui rendit visite pour discuter un projet d'article : « Il arriva en retard, il semblait infiniment fatigué, il sortit le travail et dit : « Oh, très très... C'est en effet devenu un très beau travail... Oui, à présent tout est clair... J'espère, que vous le publierez très bientôt... » Je pensai : « Le pauvre homme ! Il n'a assurément pas eu le temps, de lire le travail. » Il continua : « Seulement pour apprendre : que signifie la formule à la page 17 ? » Je lui expliquait. Lui : « En effet, je comprends cela. Alors la note en bas de la page 14 doit signifier ce qui suit ». Moi : « Oui, c'est ce que j'ai voulu dire. » « Mais alors... », et cela continuait ainsi de suite, il avait tout lu. Une heure s'écoula, il devenait de plus en plus frais, et j'en vins une fois à une difficulté d'explication. Deux heures plus tard, il était rayonnant de fraîcheur, en plein dans l'affaire, dans une pleine ardeur candide et je ressentais ma fatigue, car j'étais repoussé dans mes retranchements. Mais à la troisième heure, il me dit en triomphant et en même temps sans absolument aucune mauvaise volonté : « Maintenant, je comprends ! Maintenant je comprends la *pointe* [en français dans le texte, *ndt*], la *pointe*, c'est que tout est exactement le contraire de ce que vous avez dit. C'est la *pointe* ! » Et, avec la restriction bienséante du mot « tout », il en était bien ainsi. Quand on a fait ce genre d'expériences une paire de fois avec son maître, on a appris quelque chose, de ce qui ne peut pas autrement s'apprendre ». ¹¹

Au début des années 20, les difficultés apparurent pour expliquer des spectres et d'autres propriétés des substances à partir de l'édifice atomique, [elles étaient même, *ndt*] insurmontables — jusqu'à ce qu'en 1925, Heisenberg parvint à réaliser une percée : sa progression radicale consista à renoncer totalement à la notion d'orbites de particules dans l'atome : Il ne devait se présenter que des grandeurs observables dans la théorie. Schrödinger traita, en 1926, l'électron en terme d'onde, constatant avec cela le dualisme onde-particule et il fut en mesure d'expliquer l'état stationnaire comme une sorte d'onde stationnaire (comme vibration fondamentale ou harmonique d'une corde), les raies spectrales comme des transitions entre de tels états. Max Born, enfin, démontra avec les collègues l'équivalence des formulations de Heisenberg et de Schrödinger.

— À cette description de l'atome peu de chose jusqu'à aujourd'hui a été modifié en principe, elle a pour ainsi dire remplacé le modèle de Bohr : l'onde de Schrödinger fournit une répartition spatiale pour la « probabilité de séjour » des électrons, qui sont intuitivement volontiers représentés par des « nuages de charge » ou « orbitales », ou selon l'état énergétique des formes sphériques ou d'haltères. Se sont rajoutées à l'occasion des « propriétés » découvertes, comme par exemple, le spin des électrons en jeu, sur lesquelles entrer dans le détail ici dépasserait le cadre de cet article. Et des procédés ont été développés, avec l'aide

d'approximations conformes de calculer d'autres molécules aussi sur ces bases. Ce n'est que récemment qu'a paru un travail, dans lequel est décrit une sorte de « coup d'œil direct » sur de telles orbitales.¹² —

Ainsi apprenait-on de plus en plus à comprendre les mathématiques. Mais que signifiait la nouvelle théorie ? Bohr et Heisenberg menèrent ensemble là-dessus à Copenhague d'interminables conversations et travaillèrent ensemble, en 1927, à une « interprétation » de la mécanique quantique — loin des différences tranchantes des contenus. Sur la base d'un travail de Born, on put voir que les « ondes » indiquaient la probabilité qu'en un lieu un « événement » pouvait être mesuré — l'« événement » lui-même, par exemple un noircissement sur un film ou bien un « clic » d'un appareil de mesure, est ensuite de « nature particulière ». D'une « particule » raisonnable on eût dû nonobstant attendre qu'au moins, en principe, à chaque instant lieu et vitesse pussent être donnés — mais ce ne fut jamais plus le cas. (Même les orbitales ne décrivent pas une « nuage particulière » ; dans lequel l'électron se trouve « réellement » quelque part.) On a donc ainsi abandonné la notion classique de particules. À cela se rajouta le fait que la théorie, pour des situations déterminées, ne permet que des affirmations de probabilité. Ainsi donc fut aussi contredite la stricte causalité classique, pour le moins pour de telles situations.

Ondes et particules sont dans ce modèle des notions « complémentaires » pour le comportement des « événements élémentaires » ou « phénomènes quantiques ». Complémentaire au sens de Bohr signifie ici : elles s'excluent l'une l'autre et font nonobstant toutes deux partie d'une description complète de ce domaine de la physique. « En soi, selon Bohr, l'électron n'est ni une particule ni une onde — et non pas une petite sphère, qui vole dans l'espace, comme nous nous représentons volontiers les particules ; il n'est donc pas à concevoir en images intuitives.¹³

Lorsque la première publication de Bohr sur le thème de la complémentarité parut en 1928 dans *Nature*, on plaça devant l'article — ce qui est inhabituel dans cette revue — une déclaration rédactionnelle qui culminait en une phrase : « Il est sérieusement à espérer que ce n'est pas votre (le physicien de Copenhague ; JK) dernier mot dans cette affaire et que vous pourrez éventuellement réussir à exprimer le postulat quantique sous une forme intuitive ». Wolfgang Pauli a « traduit » ce commentaire : « Nous, physiciens anglais serions terriblement contents, si les manières de voir, défendues dans cet article, s'avéraient inexactes à l'avenir. Mais étant donné que Monsieur Bohr est un homme charmant, une telle joie ne serait pas aimable, et comme il est un physicien renommé et a plus souvent raison que tort, il ne nous reste qu'une chance infime pour l'accomplissement de nos espoirs. » Et Pauli de commenter : « En tout cas, c'est ce que *moi* j'ai lu à partir du commentaire de *Nature* », et je me pensai alors : « *sancta simplicitas !* »¹⁴

À l'occasion, le concept de complémentarité pour Bohr avait une signification beaucoup plus générale que seulement en rapport avec la physique. Il le trouva utile en d'autres circonstances, ainsi pour la relation de la physique et de la vie jusqu'à l'équité et l'amour. Ainsi a-t-il diversement exprimé : « Le contraire d'une affirmation juste c'est une affirmation fautive. Mais le contraire d'une vérité profonde peut de nouveau être une vérité profonde. »¹⁵ Ici se révèle une attitude qui va bien au-delà du penser intellectuel. Von Weizsäcker a expliqué pourquoi Bohr n'est pas devenu un philosophe spécialiste : « Ce n'était pas dans sa nature d'interpréter des idées d'autrui dans leur contexte, ce que fait le scientifique de l'esprit ; il s'agissait pour lui d'aller directement à la vérité même. Mais lorsqu'il se trouva devant la vérité, il se trouva devant un abîme indicible. »¹⁶ Les résultats des entretiens de Bohr et d'Heisenberg sur les fondements des travaux de Bohr entrèrent dans la physique comme « l'Interprétation de Copenhague ». Toute sa vie durant Einstein ne l'a pas acceptée et à mené d'infinis débats avec Bohr.¹⁷ On a à faire avec la physique quantique, jusqu'à présent, à la situation intéressante que les physiciens maîtrisent bien les mathématiques et que ce pronostic rend possible de pouvoir confirmer les expérimentations. Pourtant le contenu conceptuel reste incontestable. Jusqu'à présent, d'autres interprétations ont été tentées sans cesse, mais, pour autant que l'auteur peut embrasser cela du regard, on en est toujours revenu à l'interprétation de Copenhague. Pais, qui est lui-même agissant dans la recherche en physique l'a admise, il écrit à ce propos en 1991 : « I have seen too much to believe that anyone has the last word on a scientific issue, but I do think that Bohr's exegesis of the quantum theory is the best we have to date. [J'ai vu beaucoup trop de choses pour croire que quelqu'un ait le dernier mot sur une question scientifique, mais je pense vraiment que l'exégèse de Bohr de la théorie quantique est la meilleure que nous

ayons actuellement]. »¹⁸ Le travail en commun de ces deux êtres humains si différents, le « penseur pratique », qui lutta pour la compréhension de la physique, et le théoricien orienté sur Platon, qui avait en vue l'ordre mathématique, les symétries (Heisenberg), a sans doute mis au jour quelque chose de grand.

L'engagement humain

Dans les années 30, Bohr donna — avec une théorie du noyau atomique (avec Wheeler) sur la fission nucléaire — des contributions essentielles à l'évolution dramatique que connaissait la physique dans ces années-là. Le souci, au sujet du développement d'armes atomiques, faisait naturellement la ronde parmi les physiciens, et comme l'écrivit Heisenberg un jour, en 1939 encore une dizaine à une douzaine d'hommes eussent pu stopper la bombe. Mais dès l'automne 1939, cette lettre signée par Einstein fut adressée à Roosevelt, lequel mit en garde contre une bombe atomique allemande et le projet Manhattan démarra. Impressionnant fut l'engagement humain avec lequel Bohr aida les collègues juifs à émigrer de l'Allemagne nazie, et il contribua ainsi souvent à les sauver. Après l'occupation du Danemark par les troupes allemandes, en avril 1940, les médailles d'or de certains prix Nobel furent dissoutes dans l'eau régale^a, mises en lieu sûr à l'Institut de Copenhague, et ses contacts avec le mouvement de résistance rendirent possibles maintes fuites en bateau par la mer Baltique vers la Suède.

Il est particulièrement digne de mentionner la discussion mémorable et tragique que mena Bohr, en 1941, avec Heisenberg : Celui-ci se rendit à Copenhague avec l'intention de faire savoir à son vieil ami qu'en Allemagne on ne travaillait pas sur le sujet d'une bombe atomique. Mais il vint — parce qu'il utilisait une tournée de service —, en ayant revêtu l'uniforme de l'occupant. Tous deux redoutaient de parler ouvertement ; dans la crainte d'être épiés, ils eurent recours à une promenade. Pourtant Heisenberg ne se fit pas clairement comprendre. L'information — que l'on sût en Allemagne qu'une bombe fût possible — a manifestement tellement choqué Bohr, — lequel connaissait très bien, en effet, son collègue de réussite et l'aimait bien — qu'il comprit que les Allemands construisaient la bombe. Heisenberg n'a eu de cesse d'insister sur le fait qu'il avait dit que l'on savait que cela fût possible, mais que la dépense technique était bien trop élevée pour un pays comme l'Allemagne, c'est pourquoi on avait pu convaincre le gouvernement d'en abandonner les plans.¹⁹ Par la suite, cette présentation a été confirmée par Weizsäcker. Quoi qu'il en soit, ils se quittèrent sans mutuellement se comprendre. Quelques semaines plus tard, Bohr reçut l'avertissement qui était attendu depuis longtemps qu'il était en danger de tomber aux mains de la *gestapo*, et par une nuit de brouillard, il émigra par bateau en Suède. Il fut ensuite emmené aux USA et travailla au projet Manhattan — bel et bien dans l'angoisse aussi d'une bombe atomique allemande.

On a parfois supposé qu'une autre issue de cet entretien eût peut-être pu empêcher la bombe atomique. Sans sous-évaluer les possibilités de Bohr, on doit cependant admettre que le projet Manhattan était alors si avancé qu'il n'eût pas pu être entravé.^b Si l'on examine la liste des publications de Bohr de 1945 à sa mort, on découvre encore seulement quelques thèmes de physique isolés. Au lieu de cela, il s'est en effet consacré à des sujets humains en général, de théorie cognitive et de questions éthiques. Pendant la guerre déjà, et en particulier après, Bohr fit partie des scientifiques qui firent valoir toute leur influence pour empêcher la course aux armements atomiques. Pour cela il mena des entretiens avec des hommes politiques de haut rang, parmi lesquels (encore durant la guerre) Churchill et Roosevelt, plus tard Marshall, et il se tourna en 1950 vers l'ONU, par une lettre ouverte aux Nations Unies — mais tout cela, comme l'histoire le montre, sans grand succès particulier. Un congrès commémoratif à l'Université de Copenhague en décembre 2013 est consacré à cet engagement de Bohr.²⁰

^a L'eau régale est un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique qui dissout l'or et le platine. *ndt*

^b Le traducteur du présent texte a lui-même travaillé dans un laboratoire de recherche et donc fréquenté de grands chercheurs et il peut témoigner qu'aucune découverte ne peut être entravée, quelle qu'elle soit. En effet, la nature humaine du chercheur fait qu'il est prêt à vendre père, mère, enfants et descendants, pour parvenir à ses fins. Il ne considère jamais de son ressort d'assumer la responsabilité des conséquences humaines de ses découvertes. Il n'y pense même pas. Si l'on vous écrit ou dit le contraire, c'est tout simplement que l'on vous ment. *ndt*

Conclusion

Si l'on embrasse d'un coup d'œil les périodes de la vie de Bohr exposées ici, on reconnaît trois progressions conséquentes : la première période est consacrée au développement personnel, jusqu'à un coup d'œil profond dans la « nature de nombre » de la matière. Dans la seconde période domine la communication avec les collègues et amis ; il y éprouve « l'abîme du penser aux limites ». La troisième période est avant tout consacrée finalement à la coresponsabilité de l'humanité.

Lors de sa mort, les condoléances affluèrent du monde entier, entre autres aussi du président des Etats-Unis, J.F. Kennedy. Au CERN, à Genève, les drapeaux de toutes les nations furent mis en berne, lors d'une réunion de l'UNESCO, une minute de silence eut lieu en sa mémoire. Sir Henry Dale, le premier président de la Royal Society, écrivit dans *The Times of London* : « I believe that the memorial that he would have wished for most himself would have been a renewed and really determined effort, even now, to follow where he tried to give lead, to get back to a policy which might have been tried before the bombs were dropped [Je crois que la requête qu'il eût souhaité au plus, pour lui-même, aurait été un effort renouvelé et déterminé, maintenant encore, pour suivre là où il tenta de donner l'exemple, en revenant à une politique qui eût été essayée avant que les bombes ne tombent]. ».²¹

Dans une lettre du 23 mai 1955, Bohr avait écrit à Oppenheimer : « Cela t'intéressera également de savoir que j'ai reçu une invitation de Hammarsljöld d'assumer à Genève une conférence plénière, dans laquelle j'ai le dessein de parler sur le travail de collaboration international en physique de l'atome et d'apporter la contribution d'une compréhension mutuelle, qui apporte avec elle l'argumentation d'une théorie de la connaissance ainsi conquise. »²²

L'expérience de l'abîme, ainsi a-t-il espéré, devait porter des fruits.

Die Drei, 12/2013.

(Traduction Daniel Kmiecik)

Johannes Kühn est né en 1953 à Hambourg. Après avoir fréquenté l'école Waldorf et le service civil dans l'agriculture, il fait des études de physique, mathématique et chimie à Hambourg et Göttingen. Il enchaîne un travail de recherche au département sciences naturelles au Goetheanum de Dornach en Suisse. De 1982 à 1996, il est professeur dans les grandes classes de l'école Waldorf de Stuttgart Uhlandshöhe. Depuis 1996, il dirige le département des sciences naturelles. Il travaille sur divers domaines de la physique et de la technologie, en particulier en optique goethéenne et la *Farbenlehre* ainsi que la didactique en physique — contact : Johannes.kuehl@goetheanum.ch

Littérature

Des nombreux articles et ouvrages écrits sur Niels Bohr et ses travaux qui ont paru, on va ici n'en citer que quelques-uns :

- Carl Friedrich Weizsäcker tint une conférence pour commémorer le centième anniversaire de la naissance de Niels Bohr, une œuvre maîtresse tant au plan contenu, langage et humanité : *Niels Bohr*, dans : **Physikalische Blätter** 41 (1985), pp.308-314 (http://www.pro-physik.de/SpringboardWenApp/userfiles/prophy/file/PhysikJournal/physBl_41_1985_9_303_317_kl.pdf), une version légèrement abrégée parue dans le FAZ du 5.10.1985 : Carl Friedrich Weizsäcker : *Un Socrate parmi les physiciens*.
- Très bien à lire et riche en matériau : Ulrich Röseberg : *Niels Bohr — Vie et œuvre d'un physicien de l'atome*, Berlin/Heidelberg/New York, 3^{ème} édition 1992 (accessible seulement en antiquariat).
- L'œuvre standard au sujet de la biographie de Niels Bohr vient du célèbre biographe de Einstein. L'œuvre est une mine, pleine de souvenirs personnels, étant donné que l'auteur a travaillé en étroite collaboration avec Bohr : Abraham Pais : *L'époque de Niels Bohr, en physique, philosophie et politique*, New York 1991.
- Récemment est parue une nouvelle biographie de l'historien des sciences Ernst P. Fischer : *Niels Bohr, Physicien et philosophe de l'époque de l'atome*, Munich 2012 (voir le comemntaire dans ce numéro).
- Pour fréquenter la physique aux limites du monde représenté objectivement que soit recommandé (malheureusement épuisé) : Jos Verhulst : *L'éclat de Copenhague*, Stuttgart 1994.

Notes :

- (1) Niels Bohr : *Sur la constitution des atomes et molécules*, dans **Phil. Mag.** 26(1913), Partie I : 1-25 ; Partie II : 476-502, Partie III : 857-875.

- (2) Voir, par exemple *Die Drei*, 3/2013, Martin Rozumek : « *Les atomes existent ou pas ?* » La « *Confrontation sur l'atomisme* » dans *Die Drei* 1922/1923 — *une discussions directive*. [Traduit en français et disponible auprès du traducteur : daniel.kmiecik@dbmail.com]
- (3) Carl Friedrich von Weizsäcker: *Niels Bohr*, dans *Physicalische Blätter* 41 (1985), pp. 308-314 (http://www.pro-physik.de/SpringboardWebApp/userfiles/prophy/file/PhysikJournal/PhysBl_41_1985_9_303_317_kl.pdf). Une version légèrement abrégée paru dans le *FAZ* du 5.10.1985 : Carl Friedrich von Weizsäcker : *Socrate parmi les physiciens*. [Voir aussi, en français : un entretien avec Carl Friedrich von Weizsäcker (CFWPHY3906) disponible auprès du traducteur daniel.kmiecik@dbmail.com]
- (4) Il existe une abondance d'articles et de livres sur Niels Bohr. Quelques-uns sont mentionnés en fin d'article.
- (5) Carl Friedrich von Weizsäcker, à l'endroit cité précédemment.
- (6) Selon Carl Friedrich von Weizsäcker, à l'endroit cité précédemment.
- (7) Rapporté dans Ulrich Röseberg : *Niels Bohr — Vie et œuvre d'un physicien de l'atome*, Berlin /Heidelberg/New York, 3^{ème} édition, 1992 ; voir aussi Lise Meitner : *Looking Back*, dans : **Bulletin of Atomic Scientists**, 20 : 11 (Novembre 1964), pp.2-7. Online sous <http://www.thebulletin.org/>
- (8) Abraham Pais : *Niels Bohr's Times, en Physique, Philosophie and Polity*, New York 1991, p.11).
- (9) Carl Friedrich von Weizsäcker, à l'endroit cité précédemment.
- (10) Carl Friedrich von Weizsäcker, à l'endroit cité précédemment.
- (11) Cité d'après Ulrich Röseberg, à l'endroit cité précédemment.
- (12) A. S. Stodolna, A. Rouzée, F. Lépine, S. Cohen, F. Robischeaux, A. Gijbsbertsen, J.H. Jungmann, C. Bordas and M.J.J. Vrakking: *Hydrogen Atoms uneder Magnification: Direct Observation of the Nodal Structure of Stark States*, dans *Phys. Rev. Lett.* 110, 31 3001 (2013). Voir aussi la communication *Direct view of atomic orbitals*, dans *Nature* (498), 6 juin 2013, p.9.
- (13) À cet endroit je souhaite renvoyé au travail de Peter Geschwind : alors qu'il décrit la mathématique de la physique quantique avec la proposition de Steiner d'un « Je-nombre » il gagne un nouveau coup d'œil sur la réalité dont il s'agit ici. Voir par exemple Peter Geschwind : *La Structure-Je de la matière*, Dornach 2008.
- (14) *Nature* (suppl.)121 (1928) et lettre de Pauli à Bohr du 16.6.1928, cité d'après Ulrich Röseberg, à l'endroit cité précédemment, pp.164 et suiv.
- (15) Par exemple dans *Physique de l'atome et compréhension de l'être humain I — Articles et conférences des années 1933-1955*. Édité par Aage Bohr, traduit par S. Hellmann, Braunschweig 1964, p 66.
- (16) Carl Friedrich von Weizsäcker, à l'endroit cité précédemment — À cet endroit il serait intéressant d'explorer si et comment la manière de travailler de Niels Bohr est comparable avec ce que Rudolf Steiner décrit comme la fréquentation aux « limites cognitives » dans l'écrit *Des énigmes de l'âme* (1917 ; **GA 21**, Dornach 1983, Chap.1), ou avec des « concepts limites », par exemple dans la conférence du 17.6.1920 (Dans Rudolf Steiner : *Le comportement de l'anthroposophie à l'égard des sciences de la nature. Fondements et méthodes*, **GA 75** ; Dornach 2010). Un condition préalable en serait une étude fondamentale sur les entretiens à l'Institut de Copenhague.
- (17) Voir Abraham Pais, à l'endroit cité précédemment.
- (18) Voir Abraham Pais, à l'endroit cité précédemment.
- (19) Voir Robert Jungk : *Plus clair que mille soleils*, Stuttgart 1956 (le cas échéant d'autres éditions ultérieure. Il s'y trouve en annexe une description de Heisenberg de cet entretien. On s'est beaucoup creusé la tête sur cette rencontre, Abraham Pais en a fondamentalement exploré les sources (à l'endroit cité précédemment, pp.481 et suiv.). En 2002, des lettres de Bohr adressées à Heisenberg furent publiées (<http://www.boa-muenchen.org/boa-kuenstlerkooperative:n0202080.htm#uran1>; voir aussi <http://nba.nbi.dk:papers/docs/cover.html>), que celui-ci n'envoya jamais, mais qu'il avait probablement projetées, après la lecture de l'ouvrage de Jungk. Il ressort de tout cela que Bohr avait compris qu'Heisenberg voulût le mettre en garde contre la bombe allemande. Von Weizsäcker a contredit, encore en 2002, cette présentation des choses.
- (20) <http://bohr-conference2013.ku.dk/>
- (21) Abraham Pais, à l'endroit cité précédemment.
- (22) Ulrich Röseberg, à l'endroit cité précédemment.