

Un exemple d'activité documentaire en terminale scientifique : L'atome de Bohr

par Danielle FAUQUE
Lycée Stanislas
75279 Paris Cedex 6

RÉSUMÉ

Le programme de 1993 propose une étude documentaire sur l'atome de Bohr or les textes du savant danois sont difficilement accessibles en français. L'article suivant présente un extrait d'une conférence au Conseil Solvay de 1921, accompagné de questions à l'usage des élèves.

INTRODUCTION

Dans le programme de 1993, la physique moderne n'a pas ou très peu de chapitres réservés. Considérons ce qui concerne l'atome. En seconde, «sans qu'il soit nécessaire de recourir à un modèle planétaire, on signalera l'existence de niveaux d'énergie : dans cette classe, cela signifie que tous les électrons ne sont pas également liés au noyau...» [1]. Des éléments de physique nucléaire sont vus en première, tronc commun, avec comme fil directeur l'énergie nucléaire. En option de première, l'unité U3, *rayonnement et couleur*, permet d'aborder des points de physique moderne comme le corps noir par exemple.

Le modèle ondulatoire de la lumière et la notion de spectre sont abordés du seul point de vue phénoménologique en seconde. C'est en terminale que la question de la dualité onde-corpuscule se pose. C'est dans la troisième et dernière partie de ce programme, *Lumières visibles et invisibles*, que l'on trouve les aspects les plus modernes, c'est-à-dire la notion de quanta [2], l'interprétation des spectres atomiques, l'étude d'une source cohérente, le laser. En terminale, on propose de procéder en activité à une «étude documentaire sur l'atome de Bohr» sans oublier que ce modèle reste hors programme [3].

Voilà finalement un champ très ouvert à l'introduction, auprès des élèves, d'éléments d'histoire de physique moderne. Chaque item cité ci-dessus suggérera à chacun quelques noms et peut-être quelques textes.

Les noms d'Einstein, de Curie, de Broglie ou de Kastler ne sont pas inconnus des élèves. Les noms de Bohr et de Planck sont déjà plus rarement avancés, voire pas du tout connus. Quant aux autres, par exemple, Rutherford ou Joliot, ils sont franchement ignorés.

On peut sélectionner une série de textes susceptibles de faire l'affaire, mais très difficilement. Ils demandent une explication préalable qui pour la plupart dépasse de beaucoup le cadre du programme. Il suffirait pour comprendre ces textes de faire appel aux théories classiques mais les prérequis nécessaires pour en saisir l'enjeu font appel à une formulation que ces élèves n'ont jamais apprise, ou bien font appel à des notions qui ne sont plus enseignées dans le programme actuel parce qu'elles sont aujourd'hui dépassées ou plus simplement hors du thème du programme [4].

BOHR ET LE MODELE D'ATOME

Tentons l'aventure avec le texte de Bohr reproduit en annexe. Ce texte est extrait du rapport que Bohr a rédigé pour le troisième congrès Solvay à Bruxelles en avril 1921. Mais la maladie l'empêcha de le lire lui-même, il fut remplacé par Ehrenfest. L'article s'intitule : *l'application de la théorie des quanta aux problèmes atomiques*.

Le modèle nucléaire proposé par Rutherford n'est pas stable, chacun le sait. Les électrons qui gravitent autour du noyau devraient émettre un rayonnement dit de freinage, perdre de l'énergie, décrire une spirale et tomber sur le noyau en un temps très court, selon la théorie électromagnétique classique. Bohr part de là dans son article de 1913 «sur la constitution des atomes et des molécules» et reprend son argumentation dans sa communication de 1921. Seul, le recours à la discontinuité de l'énergie émise pouvait expliquer la stabilité de l'atome [5].

C'est le début du texte de 1921 qui est ici reproduit. Il serait tentant de prendre un modèle planétaire, dit-il, mais il y a une différence fondamentale dans le cas de l'atome qui fait rejeter cette image. Puis, après avoir appliqué la théorie des quanta, il définit les états stationnaires de l'atome et la loi de fréquence mise en jeu lorsqu'il y a émission ou absorption de rayonnement.

Le texte proposé est tout à fait compréhensible pour des élèves de terminale. Il conviendrait à une activité dirigée en séance à effectif réduit, c'est-à-dire dans la tranche

horaire des séances de travaux pratiques, une heure et demie. On pourra insister particulièrement sur deux parties.

La première porte sur la discussion du modèle planétaire et les raisons pour lesquelles il faut le rejeter. C'est une très bonne introduction à la nécessaire utilisation de la théorie des quanta. Le second extrait porte sur la définition des états stationnaires et l'interprétation des spectres de raies. Nous ne ferons pas ici ce travail d'enseignement. Mais on peut comprendre qu'il sera nécessaire d'introduire le texte auprès des élèves, c'est-à-dire de leur brosser le paysage de la physique à l'époque ¹, les découvertes sur la structure de la matière, les hypothèses envisagées pour expliquer les faits, les difficultés rencontrées avec les théories physiques classiques, etc.. Le professeur devra aussi préparer des questions pour alimenter et diriger la réflexion des élèves. En effet, après la présentation du contexte, il faudra laisser les élèves lire le texte tranquillement, en leur laissant noter ce qui leur pose problème (vocabulaire ou questions), puis leur laisser le temps de l'échange entre eux et avec le professeur, ensuite, je dirais lorsque le champ intellectuel est préparé, aborder l'étude des questions fournies par le professeur. On conçoit très bien que, dans ces conditions, il faut bien une heure et demie pour étudier ce texte original. Le vocabulaire peut poser quelques difficultés. Par exemple qu'est-ce, pour un élève de terminale, que la théorie électromagnétique classique (ils ne connaissent que la force de Lorentz, les systèmes oscillants électriques libre et forcé, et pour ceux qui suivent la spécialité physique-chimie, les ondes hertziennes d'un point de vue expérimental et non théorique), qu'est-ce qu'un train d'ondes harmoniques (expression à la limite du programme de terminale) ? On comprend la nécessaire introduction que doit faire le professeur.

CONCLUSION

Un tel travail d'approche historique demande une préparation personnelle de la part du professeur de lycée. Il doit passer de longues heures en bibliothèque spécialisée pour trouver une documentation approfondie sur un sujet aussi pointu ! On conçoit donc la première difficulté que présente cette volonté institutionnelle de faire entrer l'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique. Les professeurs de physique-chimie ne sont en général pas formés à la recherche documentaire et encore moins à l'histoire des sciences, de plus une physique moderne approfondie est le plus souvent à la limite de leurs connaissances propres.

Enfin, la population d'élèves actuellement en terminale n'a pas majoritairement un profil scientifique. Ce sont de bons élèves en général puisqu'ils sont en terminale mais

¹ voir la bibliographie succincte mais suffisante à la fin de l'article.

dont peut-être le quart va poursuivre des études longues en sciences et non forcément en physique. Les difficultés conceptuelles sont souvent grandes et non forcément dues à la physique elle-même. Elles portent davantage sur des difficultés d'utilisation de l'outil mathématique - celui utilisé en physique est le plus souvent en avance de phase sur son apprentissage en cours de mathématiques. Elles portent aussi sur des difficultés plus générales de compréhension de la langue française. Il est encore très difficile d'obtenir une rédaction au sens vrai du terme pour un exercice en terminale. Enfin, la structure très culturelle de l'épreuve du baccalauréat n'induit pas le développement d'une pédagogie de recherche d'une solution en plusieurs étapes, or «le raisonnement à tiroirs» ou avec «plusieurs coups d'avance comme aux échecs» est très formateur en physique. Le texte historique peut pallier en partie ce manque [6].

NOTES

- [1] Ministère de l'Éducation nationale, *Physique-Chimie, classes de seconde, première et terminale, série scientifique*, CNDP, 1996, page 35.
- [2] Dans l'enseignement secondaire, à propos de la théorie quantique, M. HULIN écrit : «*Dans ce contexte, il devient par contre pensable de s'appuyer sur des références aux comportements - et concepts - de la physique ondulatoire classique. Pensable ne veut d'ailleurs pas dire réaliste... Avec la mécanique quantique, une rupture épistémologique formidable traverse la physique... Dans un premier temps, il n'est peut-être pas inutile de remettre la mécanique quantique, au-delà de ses pratiques et de ses succès techniques, "en perspective", de faire une première fouille sans ambition à résoudre le moins du monde le problème au fond*» in M. HULIN, «La physique quantique dans l'enseignement secondaire et la vulgarisation : quelques remarques préliminaires, Archives personnelles, n.p., 1985, page 2, avec l'aimable autorisation de Nicole HULIN.
- [3] Ministère de l'Éducation nationale, op. cit., page 87-88.
- [4] M. HULIN, op. cit. : «En France, un enseignement élémentaire fut tenté dans le cadre de l'expérience Lagarrigue : il insistait sur les relations de Planck et de Broglie, l'énergie de localisation, la recherche des états propres pour des modèles de potentiel très simples. En fait - et malgré une préparation dans les classes antérieures assez pensée - «ça ne passe pas» ! Problème fondamental : les notions classiques passent très mal, (puits potentiel en mécanique, phénomènes vibratoires, interférences, diffraction, ondes stationnaires). Or on voudrait qu'elles servent de référents. L'approche de la mécanique quantique bute ici sur la difficulté des apprentissages préalables dans le domaine classique», page 12.

- [5] Lire : Pierre MARAGE et Grégoire WALLENBORN (dir.), *«Les conseils Solvay et les débuts de la physique moderne»*, Université libre de Bruxelles, 1995, pages 149-154. Compte-rendu in BUP, n° 793, avril 1997, pages 867-868.
- [6] Ce texte est extrait de la communication faite lors du Congrès de la Société française de Physique, à Paris, le 8 juillet 1997.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

Jean ROSMORDUC et al. : *«Histoire de la physique»*, tome 1 : la formation de la physique classique, éditions Lavoisier, Tec & Doc, 1987.

Jean-Paul MATHIEU et al : *«Histoire de la physique»*, tome 2 : la physique du XX^e siècle, éditions Lavoisier, Tec & Doc, 1991.

Emilio SEGRÈ : *«Les physiciens modernes et leurs découvertes, des rayons X aux quarks»*, Fayard, 1984.

Benoit LELONG : *«Personne n'a découvert l'électron»*, La Recherche, n° 303, novembre 1997, pages 80-84.

Pierre FRÉCHENGES et Jean-Michel DUSSEAU : *«Bref historique de l'émergence du concept d'électron»*, Bulletin de l'Union des Physiciens, n° 808, novembre 1998, pages 1573-1588.

ANNEXE

Les traits généraux de la théorie des quanta

Le problème de la constitution des atomes, qui fait l'objet de ce rapport, a pris dans ces derniers temps une forme bien différente de celle qu'il avait il y a quelques années. Ainsi que cela a été exposé dans le rapport de Sir Ernest Rutherford, nous avons à présent des connaissances détaillées sur les particules qui sont les constituants de l'atome. Nous pouvons donc admettre qu'un atome se compose d'un noyau central positif, possédant à peu près toute la masse de l'atome et entouré d'un essaim d'électrons, dont le nombre est égal, dans l'atome neutre, à ce qu'on appelle le nombre atomique, c'est-à-dire le nombre qui indique la place que l'élément occupe dans le tableau périodique. Cette image de l'atome est d'une simplicité remarquable et l'on pourrait s'attendre, à première vue, à ce que le problème devant lequel nous sommes placés, lorsque nous voulons étudier de près les mouvements à l'intérieur de l'atome, fût analogue à ceux que l'on rencontre dans la mécanique céleste. En effet, comme nous sommes conduits à

admettre que les dimensions des particules de l'atome sont très petites en comparaison de celles de tout le système, le problème auquel nous avons affaire est à première vue celui d'un système de points-masses se mouvant sous l'influence de forces réciproques, qui varient en raison inverse du carré de la distance, tout comme les forces de gravitation entre les corps célestes. Mais un examen approfondi des phénomènes physiques et chimiques nous apprend bientôt qu'une semblable comparaison est boîteuse en des points essentiels. En effet, si nous considérons par exemple les orbites des planètes dans le système solaire, nous pouvons certainement admettre que le mouvement de ces corps s'explique, jusqu'à un haut degré d'approximation, par les lois générales de la gravitation ; mais les orbites des différentes planètes ne sont pas déterminées complètement par leurs masses et par celle du Soleil ; elles dépendent essentiellement des conditions qui présidèrent à la formation du système solaire, en d'autres termes de la préhistoire de ce système.

D'un autre côté, pour rendre compte des propriétés physiques et chimiques bien déterminées des éléments, nous sommes obligés d'admettre que le mouvement des particules de l'atome, dans son état normal du moins, est complètement déterminé par les valeurs des charges et des masses des particules constituantes. Cette stabilité intrinsèque des atomes se reconnaît peut-être le mieux lorsque l'on considère les processus qui donnent lieu à l'émission des spectres caractéristiques des éléments. Nous pouvons admettre que par ces processus nous prenons connaissance d'un changement de l'état de l'atome, produit par certains agents extérieurs, changement dans lequel de l'énergie est fournie à l'atome et qui est suivi d'un processus de réorganisation, par lequel l'état normal se rétablit et dans lequel l'énergie est réémise sous forme de radiations électromagnétiques. Lorsqu'on analyse ce rayonnement, on constate qu'il se compose d'un grand nombre de trains d'ondes harmoniques, correspondant chacun à une raie dans le spectre. Alors qu'en se basant sur la théorie classique de l'électromagnétisme il est impossible d'expliquer ni la stabilité de l'état normal de l'atome, ni la constitution du rayonnement ainsi produit, on trouve une base pour l'interprétation rationnelle des propriétés atomiques considérées dans ce qu'on appelle la *théorie des quanta*, dont le germe se trouve, comme on sait, dans la théorie du rayonnement thermique, proposée par Planck, il y a une vingtaine d'années.

Dans la forme sous laquelle nous ferons usage, dans ce qui va suivre, de la théorie des quanta, nous baserons nos considérations sur le postulat fondamental suivant : un système atomique, qui émet un spectre formé de raies nettes, peut prendre un certain nombre d'états distincts, qu'on appelle les *états stationnaires* ; le système peut exister dans un pareil état pendant quelques temps du moins, sans émettre de rayonnement, l'émission n'ayant lieu que par un processus de transition complète entre deux états stationnaires, et alors le rayonnement émis se compose toujours d'un train d'ondes harmoniques simples. Dans la théorie, la fréquence du rayonnement émis pendant un proces-

sus de cette espèce n'est pas déterminé directement par le mouvement des particules dans l'atome d'une façon qui correspond aux idées de la théorie classique de l'électromagnétisme ; elle est simplement liée à la quantité totale d'énergie émise durant le passage, le produit de la fréquence ν par la constante h de Planck étant égale à la différence des valeurs E' et E'' de l'énergie de l'atome dans les deux états impliqués dans le processus, de sorte que l'on a :

$$h\nu = E' - E''$$

Cette loi, que dans la suite nous appellerons la *loi de fréquence*, constitue la base formelle de la théorie du rayonnement par quanta, en même temps que certaines relations, contenant également la constante de Planck, et caractérisant certaines propriétés des mouvements dans les états stationnaires d'un système atomique, propriétés par lesquelles ces mouvements se distinguent parmi toute une série continue de mouvements, qui seraient possibles conformément aux idées ordinaires en mécanique. Ces dernières relations, que nous appellerons *relations d'état*, et que nous allons examiner en détail dans la suite, peuvent, tout comme la loi de fréquence, être considérées comme des généralisations naturelles des hypothèses faites au sujet des actions mutuelles entre un simple oscillateur harmonique et un champ de rayonnement électromagnétique, hypothèses qui ont été introduites d'abord dans la théorie de Planck du rayonnement thermique et appliquées ensuite avec un si grand succès, en particulier par Einstein, dans la théorie de la chaleur spécifique et des actions photo-électriques.

Les italiques sont de Bohr.

N. BOHR, L'application de la théorie des quanta aux problèmes atomiques, «*Atomes et électrons*», 3^e conseil Solvay, 1- 6 avril 1921, Gauthier-Villars, 1923, pages 228-231. Texte recueilli grâce à l'obligeance de Michèle GOUBERN alors conservateur à la Bibliothèque de premier cycle à l'Université de Paris VI- Pierre et Marie Curie.

PROPOSITIONS DE QUESTIONS ²

1 - Préciser les propriétés du modèle d'atome que propose Bohr au début du texte. Indiquer les mots ou expressions qu'il utilise pour décrire ce modèle.

² Je voudrais ici remercier vivement Madame Annie MARTIN, professeur de physique-chimie au lycée Stanislas, qui a bien voulu jouer les rôles du candide et du cobaye pour le texte et les questions.

2 - À quelle référence de modèle plus classique pense-t-on immédiatement après cette proposition? Quelles justifications spontanées apporte-t-on à ce choix ?

3 - Quel avertissement théorique donne Bohr pour infirmer cette proposition immédiate ?

4 - Citer des agents extérieurs pouvant provoquer les changements d'états d'un atome.

5 - Que veut dire Bohr en écrivant «est suivi d'un processus de réorganisation» ? Que peut-on dire de l'énergie de l'atome dans cet état stable ?

6 - Pourriez-vous expliquer ce que Planck propose en 1900 sous le vocable «quanta» ? Comment explique-t-il les échanges d'énergie entre la lumière et la matière ?

7 - Par quel schéma vu en cours peut-on illustrer le passage «un système atomique....états stationnaires» ?

8 - Que veut dire Bohr lorsqu'il écrit : «le système peut exister dans un pareil état....ondes harmoniques simples» ?

9 - Donner un schéma simple illustrant la phrase «elle est simplement liée... $h\nu = E' - E''$ ».
