

Colloque « L'enseignement de la physique subatomique »

18-19 novembre 2010

Enseignement de la physique subatomique dans le secondaire et notions mathématiques associées : considérations sur une approche phénoménologique complémentaire.

Christophe COUVREUR

Professeur de sciences physiques

Lycée Guez de Balzac

16000 ANGOULEME

Note :

Les encadrés qui apparaissent dans ce document renvoient au fichier Powerpoint qui lui est associé.

Nous allons présenter les notions qu'un élève est censé acquérir en physique subatomique tout au long de son parcours scolaire du collège au baccalauréat, et les moyens qui peuvent lui être offerts pour les assimiler. Nous verrons ainsi les concepts et savoir-faire mathématiques indispensables et différentes manières d'exposer les phénomènes physiques. Nous entamerons également une réflexion sur la mise en œuvre pratique des programmes et les difficultés à concilier la réalisation des objectifs de ces mêmes programmes avec les motivations et capacités des élèves et avec les contraintes matérielles diverses.

I) Comment se passer des mathématiques pour enseigner la physique subatomique au collège et jusqu'en classe de 2^{nde}.

Mathieu, élève de 5^{ème} :

« M'sieur, m'sieur, est-ce qu'on fera de la quantique en 3^{ème} ? »

Le professeur (moi), un peu surpris :

« Attends, c'est quoi, pour toi, la physique quantique ? »

Mathieu : « Ben, les temps parallèles et tout ça... »

Le dialogue ci-dessus, trop beau pour avoir été inventé, traduit une réalité : les enfants, dès leur plus jeune âge, sont confrontés à de multiples sources d'informations extrascolaires : télévision, Internet, livres et magazines... (en l'occurrence, il s'agissait de deux magazines Science & Vie Junior hors série, consacrés respectivement au temps¹ et au « monde étrange des particules². ») Le rôle des professeurs est entre autres de leur rendre autant que possible le monde qui nous entoure intelligible et de satisfaire leur curiosité naturelle. Au niveau du collège, il est bien entendu impossible de se cacher derrière des formules : point d'équation de Schrödinger ni de notation « bra-ket » de Dirac à l'horizon, il faut donc trouver d'autres moyens que les mathématiques afin de répondre aux (parfois) très bonnes questions des élèves. Encore faudrait-il se mettre d'accord sur ce que l'on entend par « faire des maths » ; nous y reviendrons ultérieurement.

1) Au collège : atome, noyau et électrons.

Au collège, la notion d'atome est introduite en classe de 4^{ème}, dans le cadre de l'interprétation des transformations chimiques (combustion du carbone notamment) ; les atomes peuvent alors être représentés comme de petites sphères, à l'instar de celles utilisées dans la construction de modèles moléculaires.

La physique subatomique n'est donc abordée qu'en classe de 3^{ème}. La première particule rencontrée est, logiquement, l'électron, afin d'interpréter la conduction du courant électrique³. Le

cours de chimie présente quant à lui les constituants de l'atome : le noyau et les électrons, ces derniers étant alors identifiés clairement comme particules subatomiques.

A ce niveau, il devient possible d'étudier les constituants de l'atome grâce à des textes de vulgarisation scientifique.

Extrait d'un manuel de 3^{ème} : L'histoire des modèles de l'atome.⁴

Les phénomènes physiques, l'évolution des idées, l'aspect historique sont privilégiés. Aucune notion mathématique n'est alors nécessaire. Il est bien sûr possible de donner des ordres de grandeur, mais cela exige de manipuler les puissances de 10, ce qui est possible en classe de 3^{ème} mais est en général davantage développé en 2^{nde}.

L'approche historique se prête également fort bien à une recherche documentaire, en concertation avec le (ou la) documentaliste. L'intérêt devient alors de laisser les élèves travailler en autonomie.⁵

2) L'arrivée au lycée : la structure du noyau.

En classe de 2^{nde}, l'exploration de l'atome continue avec la découverte du proton et du neutron. Les élèves doivent se familiariser avec le vocabulaire qui leur est associé (nombre de charge, nombre de masse, isotopie) grâce à des exercices permettant de passer du nombre de protons et de neutrons à l'écriture symbolique du noyau et réciproquement.

Dans un premier temps, une étude de texte peut permettre d'énoncer certaines caractéristiques fondamentales de l'atome. Ainsi, dans *Le monde de Sophie*⁶, Jostein Gaardner expose la théorie atomiste de Démocrite, compare les atomes à des éléments de Lego® de par leur faculté à s'assembler pour fabriquer d'« autres choses » et fournit une illustration marquante de leur caractère éternel et immuable en écrivant : « [...] qui sait si un atome de carbone de mon muscle cardiaque ne se trouvait pas , il y a bien longtemps, sur la queue d'un dinosaure ? ». Il conclut en citant les constituants de l'atome (protons, neutrons et électrons), ce qui permet de faire le lien entre les connaissances acquises au collège et les nouveautés du programme de 2^{nde}.

Extrait d'un manuel de 2^{nde} : Voyage avec un physicien atomiste (Charpak).⁷

Ce document, qui reste dans l'esprit du précédent, invite lui aussi à un exercice de compréhension de texte (et présente par ailleurs l'avantage de présenter un personnage contemporain, hélas disparu récemment). Il aborde également les dimensions relatives des atomes, noyaux et quarks.

Activité : La structure lacunaire de la matière (exp. de Rutherford).⁸

Voici une activité qui, avec le questionnaire associé, mobilise diverses compétences d'une manière très intéressante et équilibrée en combinant étude de document, interprétation physique des phénomènes et calculs mathématiques. L'utilisation des puissances de 10 est alors indispensable pour calculer le rapport entre le diamètre d'un atome et celui de son noyau, ou le rapport entre la masse d'une particule alpha et celle d'un électron par exemple.

Un tel exercice permet d'aborder l'aspect quantitatif de la physique subatomique, même à un niveau encore modeste. Si, jusqu'à présent, l'approche phénoménologique s'imposait d'elle-même, elle ne doit désormais plus être la seule manière de traiter les notions. Mais on se heurte d'emblée aux difficultés des élèves :

- les puissances de 10 ne sont pas maîtrisées par une bonne partie d'entre eux ; la charge élémentaire « $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ » est ainsi fréquemment perçue comme négative à cause de l'exposant -19 . Il devient alors nécessaire de réécrire cette valeur avec tous les chiffres afin qu'elle retrouve sa véritable signification. Un problème similaire apparaît avec les masses des particules : si une masse négative n'a bien sûr aucun sens, l'association « exposant positif = grand nombre » et « exposant négatif = petit nombre » est loin d'être automatique pour de nombreux élèves.
- La manipulation de la calculatrice s'avère également source d'erreurs ; il est maintenant quasiment indispensable de faire en début d'année la « tournée » des machines pour vérifier que les élèves les utilisent correctement. Lors du calcul, par exemple, du nombre d'atomes de carbone dans une mine de crayon, un usage inapproprié de la calculatrice et/ou une méconnaissance des règles de priorité des opérations peuvent conduire à une valeur aberrante que l'élève aura le plus grand mal à interpréter. Et ne parlons pas de

l'incapacité chronique de l'élève moyen à stocker un résultat intermédiaire en mémoire de sa calculatrice.

| |
|-------------------------|
| « Maquette d'un atome » |
|-------------------------|

- Les dimensions relatives de l'atome et de son noyau amènent des exercices proposant de construire à l'échelle une « maquette » de l'atome. Si le noyau est ainsi figuré par une balle de ping-pong, on se rend compte que le diamètre de l'atome atteint alors plusieurs centaines de mètres ! Ce résultat illustre de manière spectaculaire le caractère lacunaire de la matière au niveau microscopique. Mais les élèves doivent alors résoudre un problème de proportionnalité, ce qui est loin d'être évident pour tous (cela dit, et bien qu'un tel exercice ne soit pas réservé au cours de sciences physiques, certains adultes en sont incapables...). S'y ajoute l'obligation de convertir certaines données. Si des sous-multiples comme le nanomètre et le femtomètre sont des nouveautés, les simples conversions du centimètre ou du millimètre en mètre conduisent parfois à des erreurs que l'on ne devrait plus voir à ce niveau.
- A partir de la classe de 2^{nde}, il est désormais possible de parler des étoiles à neutrons, et de réinvestir la notion de masse volumique. Amener les élèves à calculer qu'une petite cuillère remplie de la matière d'un tel astre aurait la même masse qu'une dizaine de voitures est propre à frapper leur imagination. Là encore, ils vont rencontrer des problèmes de conversion, aggravés par le fait de travailler non plus sur des distances mais sur des volumes. Les résultats fournis lors de telles opérations sont parfois hautement fantaisistes.

En résumé, nous venons de voir que l'irruption des mathématiques dans l'enseignement de la physique subatomique, même s'il s'agit davantage de « calculs » que de notions mathématiques sophistiquées, ne se fait pas sans douleur, du côté de l'élève comme de celui de l'enseignant. Malgré tout, et bien que les instructions officielles aient plutôt tendance ces dernières années à réduire la part dévolue aux mathématiques, il est indispensable que les élèves acquièrent ou perfectionnent dans ce domaine un savoir-faire qui leur sera précieux en classe de première et de terminale scientifique. S'il faut bien sûr insister sur la compréhension des phénomènes physiques, il ne faut pas négliger le formalisme mathématique. Le cours de sciences physiques n'est pas le dernier salon où l'on cause, c'est aussi un endroit où l'on fait de l'algèbre ; comme souvent, tout est affaire de dosage.

**II) La physique subatomique en première et en terminale :
de plus en plus de raisons de « faire des mathématiques. »**



$$E = mc^2$$

$$\ln x$$

$$\Delta m$$

$$1,6 \cdot 10^{-19}$$

Après les prémices en classe de 2^{nde}, le passage en 1^{ère} S puis en terminale va consacrer le retour en force de l'« outil mathématique » dans l'enseignement de la physique subatomique (et des sciences physiques en général).

1) En 1^{ère} scientifique : particules élémentaires et interactions fondamentales.

Dans la lignée de la classe de 2^{nde}, le proton, le neutron et l'électron continuent à être présentés en 1^{ère} scientifique comme des particules élémentaires. Il paraît toutefois souhaitable de parler des quarks, d'une part pour poursuivre la progression amorcée depuis la classe de 4^{ème} (l'atome, puis le noyau – et les électrons – en 3^{ème}, les nucléons en 2^{nde}), et d'autre part parce que les élèves en ont souvent entendu parler.

Extrait d'un manuel de 2^{nde} : Le bestiaire des particules + Des atomes d'antimatière.⁹

Ces documents plutôt ambitieux sont extraits d'un ancien manuel de 2^{nde}. Le premier présente les six quarks, et introduit le caractère non élémentaire de la « charge élémentaire » e en donnant les charges des quarks. Le second parle d'antimatière, notion qui peut paraître au profane issue d'un ouvrage de science-fiction et dont les particularités intrigantes sont susceptibles d'éveiller l'intérêt des élèves. Sans susciter de développements excessifs, tous deux peuvent être présentés à des élèves de 2^{nde} ou de 1^{ère} S comme pistes de réflexion invitant à aller au-delà du

programme. Les limites qui s'imposent sont alors la curiosité des élèves et le temps que l'on peut consacrer à une telle activité.

Le programme de 1^{ère} S a également pour but ici d'expliquer la cohésion de la matière à diverses échelles. Des exercices, essentiellement « calculatoires », permettront d'appliquer la loi de Newton pour l'interaction gravitationnelle et la loi de Coulomb pour l'interaction électrostatique, entre un noyau et un électron par exemple.

$$\text{loi de Newton : } F_{A/B} = F_{B/A} = G \times \frac{m_A \times m_B}{d^2}$$

$$\text{loi de Coulomb : } F'_{A/B} = F'_{B/A} = K \times \frac{|q_A \times q_B|}{d^2}$$

On retrouvera les mêmes problèmes qu'en 2^{nde} concernant notamment l'utilisation des puissances de 10 la maîtrise de l'algèbre. Ceux-ci doivent, au moins en théorie, être mieux surmontés en 1^{ère} S, d'autant plus que la loi de Newton a déjà été étudiée l'année précédente. L'interaction électrostatique amène quant à elle, avec le caractère algébrique des charges, le phénomène de répulsion et non plus seulement d'attraction, ce dont il faudra tenir compte lors de la représentation vectorielle des forces. Il est à noter que les élèves actuels sont moins familiarisés avec les vecteurs puisque toute étude concernant ceux-ci est désormais hors programme au collège (depuis la rentrée 2008).

L'interaction forte, nécessaire pour expliquer la cohésion du noyau, ne donne lieu à aucun développement mathématique. Le « quatrième mousquetaire », l'interaction faible, n'a pas à être évoquée mais on peut toutefois indiquer aux élèves que les interactions fondamentales sont au nombre de quatre et que la dernière, que l'on ne détaillera pas au lycée, est responsable d'un type particulier de radioactivité.

Il est possible d'observer sur un diagramme (N, Z) les domaines d'existence et de stabilité des noyaux atomiques ¹⁰, mais une telle activité s'inscrit plutôt dans le cadre de l'étude de la radioactivité en classe de terminale.

Les accélérateurs de particules peuvent quant à eux être étudiés également lors du cours sur le champ magnétique. Ils fournissent alors l'occasion de parler de l'actualité de la recherche, de revenir sur la notion de vitesse limite de la lumière dans le vide et de donner des chiffres spectaculaires concernant la taille des installations et les valeurs des champs magnétiques.

Extrait d'un manuel de 1^{ère} S : La grande collision des protons.¹¹

2) Les transformations nucléaires.

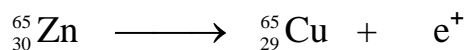
Le programme de terminale actuel constitue incontestablement le point d'orgue de l'étude de la physique subatomique dans le secondaire, tant par la richesse que par la complexité des concepts qui y sont détaillés.

La découverte des rayons X par Wilhelm Röntgen, celle de la radioactivité par Henri Becquerel et les travaux de Pierre et Marie Curie fournissent une excellente entrée en matière qui gagne à être illustrée par exemple par un petit film qui pose également le contexte historique. Sans tomber dans la rubrique « people » et bien que certains faits relèvent de l'anecdote, il est toujours important de mettre un visage sur des personnages qui ne doivent pas rester des abstractions. Et savoir que Marie Curie a été la première femme à enseigner à la Sorbonne rappelle utilement l'évolution de la place des femmes dans la société en général et dans les domaines scientifiques en particulier (les filles, faites des sciences !).

Après d'indispensables rappels sur les nucléons, leurs dimensions, leur masse et leur charge (que le proton soit chargé positivement et l'électron négativement n'est toujours pas acquis par tous les élèves), il est temps d'entrer dans le vif du sujet.

La présentation de nucléides stables et instables sonne le glas de l'immuabilité des atomes, en tout cas pour une partie d'entre eux. On assiste alors à la transmutation de la matière, et il faut dès lors bien distinguer la chimie, à laquelle les élèves sont habitués, qui met en jeu le cortège électronique des atomes mais laisse les noyaux intacts, et la radioactivité qui concerne les transformations que subissent ces mêmes noyaux.

L'étude des radioactivités alpha, bêta et gamma donne lieu aux inévitables exercices d'écriture de réactions nucléaires, avec application des règles de conservation du nombre de charge et du nombre de nucléons.



Le positon introduit la notion d'antiparticule et donc d'antimatière, ce qui peut amener des questions de la part des élèves, et des commentaires de la part de l'enseignant. On notera toutefois que ni le neutrino, ni l'antineutrino électronique ne sont exigibles au baccalauréat. On peut le déplorer, d'autant plus qu'ils apparaissaient dans les anciens programmes de 1^{ère} S. Par ailleurs, le neutrino est cité dans de nombreux textes et documents concernant le Soleil par exemple.

A côté de l'écriture des équations de réactions nucléaires (qu'il faut encore une fois bien distinguer des réactions chimiques), il est intéressant de préciser dès maintenant certaines caractéristiques des particules ou rayonnements émis, et les moyens de s'en protéger (des particules alpha arrêtées par une simple feuille de papier au rayonnement gamma beaucoup plus pénétrant).

Le temps est par ailleurs venu d'étudier le diagramme (N, Z) et l'image de la « vallée de stabilité » autorise des parallèles intéressants avec la mécanique et l'énergie potentielle vue en classe de 1^{ère}.

Photo CRAB

Il n'est malheureusement plus possible de présenter en classe un appareil comme le C.R.A.B. (Compteur de RAdiations Bêta et gamma). Muni d'une source radioactive, d'un compteur Geiger et d'un affichage lumineux, il permettait d'illustrer d'une manière extrêmement parlante le caractère aléatoire des désintégrations radioactives. L'emploi de disques d'aluminium ou de plomb insérés entre la source et le détecteur montrait également la façon dont les rayonnements étaient absorbés par les différents matériaux en fonction de leur épaisseur. C'était aussi l'occasion de faire entendre le célèbre crépitement du compteur Geiger.

Les sources radioactives ayant totalement disparu des établissements scolaires, les élèves doivent donc admettre sans illustration expérimentale le caractère aléatoire d'une désintégration radioactive. Le postulat « un noyau meurt sans vieillir » amène parfois des commentaires discrets sur le mode « ils ont bien de la chance... ». Plus sérieusement, la nécessité de travailler sur de grandes populations de noyaux conduit à réinvestir les notions, vues en cours de mathématiques, de probabilités et de traitement statistique de données (moyenne, écart-type, variance).

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

L'expression de la loi de décroissance radioactive amène, dans un premier temps, à raisonner sur l'évolution d'une population de noyaux. Pour l'interpréter, on peut proposer des élèves des activités de type « lancer de dés ». Il convient aussi de présenter des exemples montrant la diversité des valeurs des demi-vies que l'on rencontre parmi les radionucléides, de 24,7 s pour l'argent 110 à $1,26 \cdot 10^9$ années pour le potassium 40 par exemple. Enfin, la définition de l'activité d'une source radioactive permet de comprendre comment, en la mesurant, accéder au nombre de noyaux présents dans un échantillon.

La loi de décroissance radioactive permet aussi de pratiquer des raisonnements mathématiques plus poussés que ceux réalisés antérieurement. L'élève doit ainsi résoudre des équations où figurent le logarithme népérien et l'exponentielle, et se familiariser avec les propriétés de ces fonctions qu'il découvre en classe de terminale. Définies bien entendu en cours de mathématiques, elles sont aussi évoquées en cours de SVT dans le cadre de datations de roches ou d'échantillons d'origine biologique. Les exercices proposés aux élèves en sciences physiques conduisent invariablement à la relation :

$$t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{A_0}{A}$$

Aux élèves de voir que, derrière des habillages différents, la démarche est toujours la même, qu'il s'agisse de dater un sarcophage égyptien en bois à l'aide du célèbre carbone 14, un vin nouveau grâce au tritium, des sédiments marins ou une coulée de lave à la surface de la Lune. Dans une même classe, malgré la répétition de ce genre d'exercice, les résultats en devoirs sont souvent contrastés...

Les applications de la radioactivité (radiothérapie, scintigraphie...) et ses effets biologiques peuvent être cités et exploités dans des exercices, ou donner lieu à des activités annexes : étude de textes, projection de vidéos, recherches sur Internet... Si le rayonnement gamma peut tuer, paradoxalement, il peut aussi guérir.

Par ailleurs, une fois donnés les ordres de grandeur de l'activité de notre environnement immédiat, le temps est venu de démythifier la radioactivité en la présentant pour ce qu'elle est avant tout : un phénomène naturel. A la cantine, un élève peut ainsi manger un steak radioactif accompagné de frites radioactives, le tout préparé par un cuisinier radioactif... et l'élève lui-même contient dans son corps des nucléides instables. C'est la haute activité d'une source qui la rend dangereuse, la radioactivité elle-même n'étant pas intrinsèquement néfaste. N'oublions pas que le Soleil, dont on ne saurait nier les bienfaits, peut quant à lui provoquer des cancers de la peau...

3) L'énergie nucléaire.

Le chapitre concernant l'énergie nucléaire commence par la plus célèbre formule de la physique :

$$E = m.c^2$$

Aux bonnes questions « comment a-t-on démontré cette formule ? » et « que vient faire la célérité de la lumière là-dedans ? », nous ne pouvons pas en terminale fournir de réponses compréhensibles aux élèves. Le but est alors de leur faire admettre la notion peu intuitive d'équivalence entre masse et énergie, puis de leur faire utiliser correctement la relation d'Einstein.

Comme pour les datations à l'aide d'isotopes radioactifs, les manuels scolaires regorgent d'exercices quantitatifs. Pour certains, il s'agit de calculer la masse d'uranium consommée par un réacteur nucléaire en un an et de la confronter à la masse de pétrole ou de charbon nécessaire à la production de la même quantité d'énergie électrique. D'autres demandent d'étudier les réactions de fusion au cœur des étoiles. De tels exercices peuvent objectivement s'avérer difficiles car ils nécessitent de manipuler de nouvelles unités comme l'unité de masse atomique ou le mégaelectronvolt (éternel retour des puissances de 10...), et des notions comme la puissance, l'énergie (nucléaire ou électrique), le rendement...

En complément, il est intéressant de présenter, au moins succinctement, le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire et de le comparer à celui d'une centrale thermique classique, en faisant éventuellement appel aux TICE. C'est aussi l'occasion de rappeler la part prépondérante du nucléaire dans la production d'énergie électrique dans notre pays.

Le professeur de physique a ici la possibilité d'intervenir dans le débat concernant les changements climatiques en exposant le plus objectivement possible les avantages de l'énergie nucléaire (peu d'émission de CO_2 , réacteurs de puissance élevée, faible consommation de « combustible ») et ses inconvénients (déchets radioactifs, risques d'accidents...). Il s'agit de sortir du débat trop souvent simpliste entre pro- et anti- nucléaire et de montrer que les problèmes complexes d'approvisionnement énergétique et de pollution n'ont certainement pas une solution unique, et de présenter les perspectives d'avenir. L'éolien n'est pas exempt de défauts. Le solaire peine à s'imposer. La fusion nucléaire contrôlée est très prometteuse, mais rien ne permet d'affirmer que des centrales à fusion alimenteront un jour nos habitations. Aux difficultés purement techniques s'ajoutent des problèmes économiques, politiques... A l'élève de suivre s'il le souhaite les pistes de réflexion qui lui ont été offertes et de s'informer pour forger sa propre opinion.

Dans le cadre de recherches personnelles, les élèves peuvent avec profit consulter des sites celui du CEA, du CERN, ou certains sites canadiens, pour rester dans le giron francophone. En plus de leur caractère attractif présentant théories, applications et perspectives de la physique subatomique à l'aide de photographies, images de synthèse et animations, ils fournissent d'autres informations dont nous ne parlons généralement pas en classe, comme l'impact économique de la recherche et les retombées en terme d'emplois.

4) L'ouverture au monde quantique.

Cette partie du programme a pour but de montrer les limites de la mécanique de Newton lorsque l'on tente d'appliquer celle-ci à l'atome, et d'introduire la notion de quantification des niveaux d'énergie d'un atome, d'une molécule, d'un noyau.

Extrait d'un manuel de terminale S : La structure des atomes (Hawking).¹²

Comme souvent en terminale, un court article comme celui-ci peut servir à rappeler certaines notions indispensables ou servir d'introduction à un exercice, sans constituer une activité à

part entière. Il est à noter à ce propos que les récents sujets de sciences physiques au baccalauréat comportent souvent pas mal de texte.

Ce chapitre clôt en général l'année de terminale. Il est donc souvent traité très (voire trop) rapidement lors des dernières séances de l'année. Il s'agit alors de caser en un minimum de temps les exercices les plus classiques, permettant d'exploiter la relation de Planck-Einstein et d'interpréter des spectres de raies (d'émission ou d'absorption), faisant en cela le lien avec des notions vues en classe de 2^{nde}.

Cette « ouverture au monde quantique » laisse donc un goût d'inabouti. Les bonnes années, c'est-à-dire lorsqu'il reste par miracle un peu de temps disponible, il est alors tentant de creuser davantage ce fascinant sujet, en présentant quelques-uns des célèbres paradoxes de la mécanique quantique. Le fameux « chat de Schrödinger » obtient en général un franc succès. Il est même parfois possible de pousser encore le raisonnement, en parlant de la théorie de l'information. Il faut pour cela que la classe soit réceptive et qu'elle ait du répondant. Le risque principal est alors de s'écouter parler... et, malheureusement, tout le monde n'est pas Richard Feynman.

III) La mise en œuvre des programmes : l'idéal et la réalité.

Nous venons de voir quels sont les contenus des programmes concernant la physique subatomique au collège et au lycée, et certains des moyens que l'enseignant peut mettre en œuvre pour les inculquer aux élèves, en supposant ceux-ci passionnés ou au moins désireux d'apprendre. Nous allons maintenant tenter de confronter ces programmes à la réalité du terrain.

1) Un enseignement de masse.

Un constat s'impose : avec les suppressions successives de voies d'orientation comme les classes de 4^{ème} et de 3^{ème} technologiques, et une désaffection certaine pour les filières professionnelles, de plus en plus d'élèves, après avoir passé quatre ans au collège, débarquent au lycée. Qu'est-ce que cela change pour l'enseignant de sciences physiques ?

Tout d'abord, il est évident que les élèves arrivant en 2^{nde} n'ont, pour une bonne partie d'entre eux, pas pris l'habitude de travailler. Un élève normalement constitué peut maintenant sans grand effort obtenir des notes flatteuses en physique au collège. Il lui arrive parfois d'être désagréablement surpris après son premier devoir en 2^{nde}. Et on ne peut qu'être sidéré par l'incapacité de certains à mettre en regard leur absence de travail et leur absence de progrès.

Depuis deux ou trois ans, la question « y aura-t-il un devoir de rattrapage ? » devient monnaie courante après une interrogation écrite ratée. Elle est symptomatique d'une dérive actuelle qui consiste à noter au même niveau les devoirs en classe, des travaux pratiques, la participation orale, des travaux de groupe et éventuellement des devoirs à la maison. Une mauvaise note obtenue lors d'un devoir nécessitant un travail intellectuel un tant soit peu élaboré peut être aisément compensée par une note de travaux pratiques réclamant beaucoup moins d'investissement. S'il est sans doute légitime d'évaluer diverses compétences, il est plus discutable de multiplier les notes et de leur attribuer à toutes le même coefficient. Par ailleurs, le risque est que certains ne travaillent plus que lorsque l'activité est notée.

La quasi-disparition du redoublement n'encourage pas non plus certains élèves à travailler. Combien de fois voit-on des élèves à qui l'on a reproché toute l'année leur absence d'efforts passer

tout de même en classe supérieure malgré des résultats extrêmement médiocres ? Même si un redoublement ne doit pas être une sanction, l'institution y perd en crédibilité.

A l'inverse, les élèves doués et travailleurs existent, heureusement ! Il en résulte une hétérogénéité de plus en plus en grande à l'intérieur des classes (et qui devient pratiquement ingérable). Il est fréquent de voir toute l'étendue de l'échelle des notes balayée sur un même devoir, avec une prédominance de résultats extrêmes. Affirmer que l'on note de zéro à vingt n'est pas une image. Même si ce phénomène s'atténue en 1^{ère} et en terminale scientifique, on peut encore trouver dans une même classe de 1^{ère} S des élèves qui viennent discuter à la fin du cours de la théorie des cordes, et d'autres capables de calculer des quantités de matière négatives (!). En terminale, on rencontre aussi bien des élèves posant des questions sur l'effet Tcherenkov que des élèves faisant la confusion entre acide et base ou entre oxydant et réducteur, ou n'ayant pas compris la différence entre poids et masse.

Différences de capacités, différences de motivation. Certains élèves arrivent en classe de 2^{nde} en n'ayant aucune intention de travailler les sciences physiques parce qu'ils « n'aiment pas ça ». Certains n'ont même explicitement aucun goût pour le travail scolaire tout court. En témoignent leurs notes qui, avec des professeurs de disciplines, de formations, d'âges et de pratiques pédagogiques différentes, se retrouvent toutes à des niveaux dramatiquement bas. Si la personnalité du professeur, son enthousiasme, ses efforts pour rendre ses cours attractifs et accessibles ont bien évidemment une influence sur ses élèves, il est clair que certains d'entre eux intéresseront à la physique subatomique uniquement lorsqu'un « Secret Story » sera organisé au CERN.

Les élèves d'aujourd'hui sont-ils moins intelligents que ceux d'il y a dix ans ? Certainement pas ! Mais leur rythme de travail est nettement moins élevé, y compris pour ceux dont la bonne volonté est incontestable. On traite beaucoup moins d'exercices actuellement en une séance qu'il y a une dizaine d'années, et cela se répercute aussi sur les contenus des devoirs (au cours desquels il ne faut plus par ailleurs espérer donner des exercices « à tiroirs »). Est-ce dû à un manque d'entraînement aux mathématiques ? A un travail qui reste souvent superficiel ? Au fait d'avoir privilégié la « réflexion » au détriment de l'apprentissage ? Y a-t-il un problème d'éducation, lorsque l'élève commence par se demander s'il va se mettre au travail au lieu de s'atteler effectivement à la tâche ? La société, privilégiant l'argent facile par rapport à la valeur « travail » est-elle en cause ? Les origines sont certainement multiples, mais les faits sont là.

Face à la diversité des élèves, il convient de s'interroger : comment à la fois appliquer des programmes souvent lourds, préparer les élèves aux études supérieures, ne pas perdre en route les élèves les plus en difficulté, en intéresser le plus grand nombre malgré l'attitude négative de certains d'entre eux ? Est-il seulement possible de concilier ces objectifs dont certains sont contradictoires ? En bref, pour parodier Pierre Desproges qui disait qu'on peut rire de tout, mais pas avec n'importe qui, est-il envisageable de « faire de la physique » avec tout le monde ?

2) Quelle physique pour quel public ?

Nous l'avons dit, certains élèves lisent des revues scientifiques (Science & Vie essentiellement) ou regardent des émissions de vulgarisation (C'est pas sorcier, $E = M^6$ sont fréquemment citées). De telles sources leur permettent d'acquérir des connaissances qui complètent et enrichissent celles enseignées en classe, et suscitent des questionnements pouvant donner lieu à des discussions profitables.

La physique subatomique, ou en tout cas le vocabulaire qui lui est associé, s'invite par ailleurs régulièrement dans le domaine de la science-fiction. Peter Parker devient Spider-Man après avoir été mordu par une araignée radioactive. L'incroyable Hulk doit sa force terrifiante à une dose excessive de rayons gamma. C'est grâce à une torpille à protons que Luke Skywalker arrive à détruire l'Etoile Noire dans le film « La Guerre des Etoiles ». Dans *Darwinia*¹³, roman paru en 1998, Robert Charles Wilson évoque les « distorsions du champ de Higgs ». Et les réacteurs du vaisseau Enterprise de la série Star Trek fonctionnent à l'antimatière... Le super-héros Mikros se retrouve un jour confronté à un adversaire émettent « un flux neutrino surpuissant » (évidemment, quand on connaît les propriétés du neutrino, l'ennemi devient nettement moins effrayant...). En débattant de tels sujets en classe, l'enseignant va faire la part des choses entre ce qui relève de l'imaginaire et ce qui relève de la science et, parfois, ouvrir des perspectives d'avenir quant aux recherches menées dans tel ou tel domaine de pointe.

Vulgarisons donc ! A l'image de ce qui se fait actuellement en 1^{ère} littéraire, il est effectivement possible de présenter de manière attractive et néanmoins rigoureuse un programme de sciences physiques ne contenant pratiquement aucun calcul. Ce programme est en l'occurrence consacré à la représentation visuelle du monde, à un thème liant alimentation et environnement, et enfin aux enjeux planétaires énergétiques (des élèves non scientifiques peuvent ainsi entendre parler d'énergie nucléaire et de pollution par des gens qui n'ont à leur vendre ni centrales nucléaires ni

programme électoral). Les cours tiennent alors à la fois de la conférence et de la séance de travaux pratiques, auxquels les élèves adhèrent en général avec intérêt et bonne volonté. Et comme, du fait de l'horaire réduit, il est pratiquement impossible de donner du travail à la maison, on se quitte bons amis et tout le monde rentre chez soi.

Cet enseignement peut convenir à des élèves qui abandonneront les sciences à la fin de leur année de 1^{ère}. Il faut toutefois regretter la faiblesse de l'horaire (une heure et demie par quinzaine) et le manque d'ambition d'un programme d'où les mathématiques sont bannies, ainsi que la facilité consternante de certaines questions à l'épreuve anticipée (« Quels sont les trois états de la matière ?... ») ne favorisant même pas les élèves travailleurs au détriment des autres. Et il convient de se demander pourquoi les élèves de 1^{ère} ES ne bénéficient pas d'une telle éducation du « citoyen-consommateur » pourtant chère aux instructions officielles.

En revanche, il est clair qu'avec un tel programme, il est impossible de former de futurs scientifiques. Si appliquer de telles méthodes en classe de 2^{nde} notamment est à la rigueur envisageable pour des élèves qui n'ont aucune intention de suivre une filière scientifique (et qu'il est par conséquent inutile d'importuner avec des notions comme la quantité de matière ou la représentation vectorielle de forces), il faut faire preuve d'une exigence beaucoup plus grande en termes de qualité et de quantité de travail pour préparer des élèves à affronter les difficultés des études scientifiques supérieures.

Paul Langevin a dit : « Le concret, c'est de l'abstrait rendu familier par l'usage ». Un élève arrivant au lycée doit avoir à l'esprit qu'il doit au mieux se préparer à suivre des études supérieures, et ce dès le début de la classe de 2^{nde}. Ce qui passe notamment, en sciences physiques, par l'aptitude à manipuler des concepts abstraits, par l'acquisition de savoir-faire en mathématiques (ce qui doit être entamé dès le collège) et un travail assidu. Si l'approche phénoménologique, l'histoire des sciences et les travaux pratiques sont des éléments indispensables au futur étudiant en sciences, il serait intellectuellement extrêmement malhonnête de faire croire aux élèves que l'on peut envisager des études scientifiques sans faire de mathématiques et sans travailler sérieusement.

3) Du temps et des moyens !

Alors qu'il est clairement impossible de concilier à la fois vulgarisation grand public et exigence de formation des scientifiques de demain, surtout avec l'écart qui ne cesse de se creuser

entre les meilleurs élèves et ceux qui sont le plus en difficulté, quelles solutions proposer ? Faut-il envisager un enseignement différencié dès la classe de 2^{nde} ? Ou un tronc commun accessible à la majorité, et une option « sciences physiques renforcées » plus sélective que pourraient choisir les élèves qui le souhaitent ? Faut-il offrir davantage d'opportunités aux élèves pour travailler en petits groupes leurs matières de prédilection ? Le débat mérite d'être ouvert. Il ne l'a pas été jusqu'à présent.

Il convient de s'interroger sur les contenus et la cohérence des programmes. Si la physique subatomique, de l'atome en 4^{ème} à la physique nucléaire en terminale, bénéficie d'une progression régulière en rapport avec l'évolution de la maturité des élèves, l'électricité, quasiment absente en classe de 2^{nde}, est beaucoup plus mal traitée. Par ailleurs, de nombreuses notions qui nous sont indispensables sont étudiées tardivement en cours de mathématiques (vecteur en 2^{nde}, barycentre en 1^{ère}, logarithme en terminale...). Les programmes sont souvent très chargés pour des élèves de plus en plus lents. Quel est l'intérêt d'aborder une multitude de sujets s'il ne s'agit que de les effleurer ? Pour ancrer les savoirs, il convient de marteler les notions importantes, de les traiter par diverses approches, de faire des exercices nombreux et variés... et cela prend du temps. Et il est indispensable de disposer de personnel qualifié en nombre suffisant pour encadrer des groupes d'élèves aux effectifs raisonnables.

L'actuelle « réforme » de la classe de 2^{nde} a conduit à un enseignement thématique (santé, pratique du sport et Univers). S'il est légitime de montrer les applications des sciences physiques dans la vie courante (ce que nous faisons déjà les années antérieures, soit dit en passant...), il est discutable de réduire celles-ci à un rôle seulement utilitariste, notamment dans le choix démagogique du thème « la pratique du sport ». La physique et la chimie méritent mieux que cela !

Cette « réforme » de la classe de 2^{nde} a surtout pour effet d'ôter une demi-heure de cours à l'horaire hebdomadaire de sciences physiques. Et il est question d'amputer le cours de 1^{ère} S d'une heure et demi par semaine... soit un tiers de l'horaire ! Et ce n'est sans doute pas fini... Je suis au regret de terminer sur une note pessimiste, mais que l'on se rassure, pratiquement toutes les disciplines au lycée sont logées à la même enseigne.

dessin de Sidney Harris (Kepler) – Bréal physique-chimie 2nde p. 230

¹ Les dossiers de Science & Vie Junior n° 30, Le temps, octobre 1997.

² Les dossiers de Science & Vie Junior n° 34, Le monde étrange des particules, octobre 1998.

³ B.O. Spécial n° 6 du 28 août 2008 : « La conduction du courant électrique s'interprète par un déplacement d'électrons. »

⁴ L'histoire des modèles de l'atome – Nathan physique-chimie 3^{ème}, édition 1994, p. 106.

⁵ Des recherches peuvent être effectuées en classe de 4^{ème} sur des thèmes comme « de l'alchimie à la chimie », le système solaire ou la conquête de l'espace.

⁶ Jostein Gaardner, Le monde de Sophie ; extrait tiré du document d'accompagnement des programmes de seconde, 2000, p. 116-117.

⁷ Voyage avec un physicien atomiste (Charpak) – Nathan physique-chimie 2nde, programme 2000, p. 217.

⁸ Accompagnement des programmes de seconde, 2000, p. 95-96.

⁹ Le bestiaire des particules + Des atomes d'antimatière – Nathan physique-chimie 2nde édition 1997 p. 220.

¹⁰ La vallée de stabilité des noyaux – Nathan physique 1^{ère} S programme 2001 p. 30.

¹¹ La grande collision des protons – Nathan physique 1^{ère} S programme 2001 p. 207.

¹² La structure des atomes (Hawking) – Bréal physique Terminale S p. 358.

¹³ Robert Charles Wilson, Darwinia, Folio SF p. 174.