

Pour une intégration de la physique moderne dans les programmes de sciences physiques des classes préparatoires

par **Rémy DUPERRAY**

Lycée Ferdinand Buisson - 38506 Voiron

remy.duperray@orange.fr

<http://remy.duperray.free.fr>

RÉSUMÉ

L'enseignement des sciences physiques en classe préparatoire (CPGE) n'incorpore que trop peu la physique moderne et il apparaît de ce fait trop déconnecté de la pratique contemporaine et quotidienne des sciences physiques par nos ingénieurs et chercheurs. Nous suggérons quelques pistes pour introduire de façon continue des notions de physique moderne dans le programme de CPGE de sciences physiques, sans remettre en cause son architecture principale. Nous espérons ainsi contribuer au débat sur la question au sein de la communauté des enseignants de sciences physiques de CPGE.

INTRODUCTION

L'enseignement des sciences physiques dispensé à nos élèves des classes préparatoires aux grandes écoles est riche et varié, mais une chose est frappante : la physique dite moderne (qui date tout de même d'un siècle en ce qui concerne la relativité restreinte) y est quasiment absente. La physique enseignée reste essentiellement celle du XIX^e siècle. Le cours de chimie est plus moderne puisque des notions de physique quantique sont abordées dans l'étude de l'architecture de la matière. Ainsi beaucoup de nos élèves, après cinq ans d'études supérieures et l'obtention d'un diplôme d'ingénieur, n'auront jamais entendu parler de relativité restreinte et seront incapables d'expliquer la relation la plus célèbre de toute la physique, $E = mc^2$, que même l'homme de la rue a déjà vue. La physique quantique et l'équation de Schrödinger resteront aussi un mystère pour beaucoup de nos ingénieurs.

Le terme physique moderne est généralement utilisé pour décrire la physique dont les fondements théoriques datent d'après 1900. En pratique, la physique moderne regroupe les deux grandes révolutions de la physique du XX^e siècle : la relativité et la physique quantique et par conséquent les champs d'application comme la physique atomique et la physique des solides qui ne peuvent être compris proprement que grâce à ces deux théo-

ries (la physique des systèmes chaotiques est considérée comme la troisième grande révolution physique du XX^e siècle). Le terme physique moderne est utilisé par opposition aux autres champs de la physique comme la mécanique de Newton et l'électromagnétisme de Maxwell qui ont été formalisés avant 1900.

Dans la première édition du célèbre livre américain d'introduction à la physique pour étudiants en science et futurs ingénieurs *Physics for Students of Science and Engineering* de David HALLIDAY et Robert RESNICK [1], qui date de 1961, les auteurs expliquent dans leur préface : « Les critiques les plus fréquentes qui sont adressées, à des niveaux variés, aux manuels utilisés pour de tels cours sont les suivantes : (a) le contenu est trop souvent encyclopédique ; (b) le contenu n'est pas suffisamment moderne et les applications reflètent trop des pratiques d'ingénieries passées et n'illustrent pas assez la pratique de la physique contemporaine ; (c) l'organisation du contenu est trop compartimentée et ne reflète pas l'unité essentielle de la physique et de ses principes... ». Ces remarques peuvent, hélas, encore trop s'appliquer au contenu du programme de sciences physiques des CPGE et la réforme des programmes de 1995 (positive à plusieurs titres, introduction de cours de Sciences de l'ingénieur...), n'a fait qu'aggraver la situation puisque la relativité restreinte et l'équation de Schrödinger ont disparu des programmes.

L'absence d'une introduction élémentaire aux notions de la relativité restreinte et à celle de la physique quantique est préjudiciable à plusieurs titres :

- ◆ Premièrement, c'est tronquer la physique de deux de ses membres les plus importants qui perd de ce fait beaucoup de sa cohérence et de sa richesse. On voit mal, à l'heure actuelle, un cours de biologie de niveau CPGE faire l'impasse sur la génétique et l'ADN (dont la structure n'a été élucidée que dans les années 1950 soit plus tard que la mise au point de la relativité restreinte et de la physique quantique). De même, un cours de géologie n'aurait que peu d'intérêt sans la tectonique des plaques.
- ◆ L'apport de ces deux piliers de la physique contemporaine à la technologie et aux sciences de l'ingénieur n'est pas anecdotique, mais crucial. Par exemple, les sciences et technologies de l'information n'auraient pas vu le jour sans la mise au point de l'électronique à base de semi-conducteurs dont le fonctionnement repose sur les lois de la physique quantique. L'avenir est même à l'électronique de spin, grandeur purement quantique, dont le dernier prix Nobel de physique français, Albert FERT, est un des fondateurs. L'imagerie médicale doit beaucoup à la physique atomique et même à la physique des particules. Le fonctionnement du GPS, qui semble se banaliser sur les téléphones portables dont sont friands nos élèves, repose sur les équations de la relativité générale. Un GPS basé sur la dynamique newtonienne ne fonctionnerait tout simplement pas.
- ◆ L'introduction de notions de physique moderne dans l'enseignement dispensé en CPGE participerait de leur attractivité auprès des lycéens dans un contexte de désaffection des filières scientifiques et dans un environnement d'offre accrue avec les formations des universités et des classes préparatoires intégrées (dont l'enseignement des sciences physiques est beaucoup plus moderne, comme dans les CPP-INP). Beau-

coup de lycéens ont entendu parler d'EINSTEIN, des mystères de la physique quantique et autres trous noirs et sont avides d'en apprendre plus sur la question. Quand ce genre de sujet est abordé en cours, en marge du programme officiel, nous percevons un réel intérêt de la part des étudiants et une motivation accrue.

Nous nous proposons ici d'aborder quelques pistes pour introduire des notions de physique moderne dans le programme de sciences physiques de CPGE, sans en modifier fondamentalement l'architecture. Pour cela, nous allons nous appuyer sur ce qui est fait dans les ouvrages d'introduction de sciences physiques américains utilisés bien sûr par les universités américaines, mais aussi par les universités de nombreux autres pays. Il est toujours instructif de regarder ce qui se passe ailleurs.

1. INTRODUIRE DES NOTIONS DE RELATIVITÉ RESTREINTE DE FAÇON CONTINUE DANS LE COURS DE PHYSIQUE

Les ouvrages américains d'introduction à la physique sont de deux types : le premier est de type « calculus » [2-3], et utilise le calcul intégral et différentiel comme outil mathématique à un niveau identique, voire inférieur à celui de CPGE. Ces cours d'introduction à la physique (première année universitaire) sont destinés à une formation de base pour les futurs physiciens et ingénieurs. Le deuxième est de type « algebra » [4] et n'utilise que l'algèbre élémentaire comme outil mathématique. Ces cours sont destinés à une formation auprès des futurs biologistes, médecins et autres professionnels de santé.

Ils ont en commun qu'ils présentent tous un chapitre d'introduction à la relativité restreinte. Ils possèdent évidemment une partie entière consacrée à la physique moderne, physique quantique, physique atomique, physique des solides, physique nucléaire, physique des particules et cosmologie.

En effet, le niveau mathématique nécessaire à une telle introduction n'est pas élevé et est largement à la portée de nos élèves de CPGE. La principale difficulté technique dans l'introduction de la relativité restreinte dans les programmes réside dans le volume horaire disponible pour le cours de physique, qui n'est pas extensible ; nos élèves sont déjà bien chargés. Pour remédier à ce problème, nous proposons d'introduire de façon continue dans le cours des notions de physique relativiste. Cette façon de procéder, tout en n'ayant que peu d'influence sur le volume horaire disponible, possède des avantages pédagogiques. Elle permet, outre une présentation plus contemporaine de la physique, de distiller de façon progressive une « culture relativiste » aux élèves et aussi de mieux délimiter le domaine de validité de la physique classique qui reste le cadre de référence du cours de physique de CPGE. Il est aussi regrettable que l'étude des collisions entre particules ne soit plus au programme du cours de mécanique. D'une part, les collisions permettent de manipuler les lois de conservation et d'autre part, elles constituent l'outil privilégié d'étude de la structure de la matière (collisionneur de particules comme le LHC du CERN).

C'est en partant de ce principe que de nouveaux ouvrages d'introduction de physique

ont vu le jour aux États-Unis, en particulier l'ouvrage en deux tomes *Matter and Interaction* de R. CHABAY et B. SHERWOOD [5]. Les auteurs ont pris le parti dès le départ de présenter la physique d'une façon contemporaine (en introduisant régulièrement au fil de l'ouvrage des notions de physique relativiste et de physique quantique) et d'utiliser de nombreux exemples issus de la physique moderne (physique des particules, semi-conducteurs...). Bien que la physique classique reste le cœur de l'ouvrage, cette dernière est présentée à partir des lois de conservation de la quantité de mouvement, du moment cinétique et de l'énergie. Notons qu'une telle approche de l'enseignement de la physique est déjà présente dans le célèbre cours de Richard FEYNMAN, approche si souvent citée en exemple, mais finalement si peu mise en pratique.

En s'appuyant essentiellement sur l'ouvrage de R. CHABAY et B. SHERWOOD, nous présentons ici quelques idées pour une introduction des concepts de physique relativiste dans le cours de physique de CPGE.

1.1. Dans le cours de première année sur la dynamique du point matériel, présenter le principe fondamental de la dynamique sous sa forme relativiste

Il est préférable, à bien des égards, de présenter le principe fondamental sous la forme :

$$\boxed{\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum \vec{f}}$$

Outre le fait qu'elle est d'emblée relativiste, avec l'expression correcte de \vec{p} , cette écriture fait apparaître la grandeur fondamentale qu'est la quantité de mouvement. Avec l'énergie et le moment cinétique, il s'agit de trois grandeurs dynamiques fondamentales de la physique (qu'elle soit classique, relativiste ou quantique) dont la conservation est liée aux invariances des lois de la physique respectivement par translation dans l'espace, par translation dans le temps et par rotation dans l'espace. Il s'agit du fameux théorème de Noether. Il est assez étrange que le terme « quantité de mouvement » n'apparaisse pas dans les programmes de première année sur la dynamique du point matériel. Sous cette écriture, il est facile de faire l'analogie avec le principe de conservation de l'énergie (ou premier principe de la thermodynamique) $\Delta E = W + Q$ et le théorème du moment cinétique $d\vec{L}_O/dt = \sum \vec{M}_O$. Le principe fondamental de la dynamique devrait être présenté sous la forme du principe de conservation de la quantité de mouvement.

Revenons à l'aspect relativiste des choses. La quantité de mouvement \vec{p} peut être présentée directement sous sa forme relativiste :

$$\vec{p} \equiv \gamma m \vec{v} \quad \text{avec} \quad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

\vec{v} est la vitesse de la particule (ou point matériel) étudiée, v sa norme, m la masse invariante de la particule et c la vitesse de la lumière dans le vide, autre invariant fondamental. Si $v \ll c$ alors $\gamma = 1$ et nous retrouvons $\vec{p} \approx m\vec{v}$. Dans le cas de l'étude d'une particule de masse m invariante, on retrouve le principe fondamental de la dynamique sous sa forme classique : $d\vec{p}/dt = dm\vec{v}/dt = m d\vec{v}/dt$ soit $m\vec{a} = \sum \vec{f}$. C'est seulement dans l'approximation des faibles vitesses, par rapport à celle de la lumière, que force et accélération sont proportionnelles !

L'écriture relativiste du principe fondamental de la dynamique permet de mettre en avant devant les élèves le rôle de limite inatteignable joué par la vitesse de la lumière. Quand une particule va de plus en plus vite, approchant la vitesse de la lumière, une nouvelle augmentation de sa vitesse devient de plus en plus difficile. En effet, une faible augmentation de la vitesse nécessite une forte augmentation de la quantité de mouvement et donc des forces mises en jeu de plus en plus importantes.

Enfin, notons que l'écriture $d\vec{p}/dt = \sum \vec{f}$ est aussi valable pour des systèmes de masse variable comme dans l'exemple habituel des fusées (même si cette étude est encore hors programme).

1.2. Dans le cours de première année sur l'énergie du point matériel, introduire l'énergie d'une particule massique, système physique le plus simple, sous sa forme relativiste

Définir l'énergie d'un système est une chose délicate, il existe toujours une constante arbitraire, car l'on ne peut mesurer expérimentalement que des variations d'énergie. Par contre, dans le cas d'une particule libre de masse m , son énergie est définie sans ambiguïté (dans un référentiel donné) par la relation relativiste :

$$E \equiv \gamma mc^2$$

On peut montrer les analogies entre l'expression de E et \vec{p} mais aussi les différences (unité grandeur scalaire, grandeur vectorielle). On peut ensuite réécrire E sous une forme qui fait apparaître deux termes, une énergie de masse et une énergie cinétique :

$$E \equiv mc^2 + \underbrace{(\gamma - 1)mc^2}_{\text{Énergie cinétique } (E_c)}$$

On peut montrer sur l'exemple d'un proton animé d'une certaine vitesse, dans quelle proportion son énergie est sous forme de masse et sous forme cinétique. Contrairement à sa vitesse qui est limitée, l'énergie d'une particule n'a pas de limite théorique. Quand $v \rightarrow c$, $\gamma \rightarrow \infty$ et $E \rightarrow \infty$.

Dans l'approximation classique des faibles vitesses $v \ll c$, l'expression de l'énergie cinétique E_c se simplifie : $\gamma \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$ et $E_c \equiv (\gamma - 1) mc^2 \approx \frac{1}{2} mv^2$. On retrouve ainsi l'expression classique de l'énergie cinétique. On peut noter que $E_c \approx \frac{1}{2} mv^2 = \frac{p^2}{2m}$ à faible vitesse.

Il est, d'un point de vue conceptuel, beaucoup plus riche et aucunement plus difficile d'un point de vue mathématique de partir de $E_{\text{relativiste}} \equiv \gamma mc^2$ pour l'énergie d'une particule libre que de partir classiquement de la définition de l'énergie cinétique. Pourquoi masquer à nos élèves la véritable nature des choses (telles que nous les comprenons aujourd'hui) quand cela n'entraîne aucune complication technique supplémentaire ?

On peut faire remarquer que dans le cas classique, $v \ll c$, l'énergie d'une particule libre $E_{\text{classique}} \equiv mc^2 + \frac{1}{2} mv^2$ s'écrit simplement $E_{\text{classique}} \equiv \frac{1}{2} mv^2$ car le terme mc^2 reste constant (pas de réactions nucléaires). Seules étant accessibles expérimentalement les variations d'énergie, on peut toujours choisir l'origine des énergies de façon arbitraire et prendre comme origine nulle le terme mc^2 .

Enfin, on peut montrer (par une simple manipulation algébrique) que la quantité de mouvement relativiste et l'énergie relativiste d'une particule libre sont liées par :

$$(E)^2 = (mc)^2 + (pc)^2$$

Cette relation fondamentale est souvent représentée par le triangle rectangle ci-dessous (cf. figure 1), on a une relation de type Pythagore.

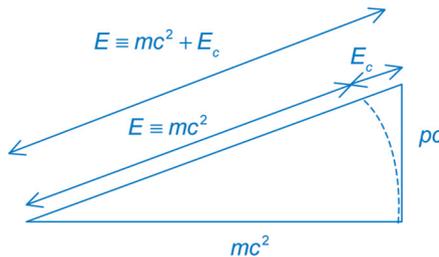


Figure 1

Quand le côté pc est inférieur au côté mc^2 , l'énergie de la particule est davantage sous forme de masse (cf. figure 1). Dans le cas contraire, l'énergie de la particule est davantage sous forme cinétique.

Il faut indiquer le fait que le terme $E^2 - (pc)^2$ prend la même valeur quel que soit le référentiel d'étude (ce qui n'est pas le cas de E et \vec{p}), il s'agit d'un invariant relativiste qui vaut toujours $(mc^2)^2$. Le terme $E^2 - (pc)^2$ vaut simplement 0 pour les particules de masse nulle comme le photon et l'on obtient pour le photon la relation $p = \frac{E}{c}$. On voit dès lors qu'il est possible d'attribuer au photon, comme à toute particule, une quantité de mouvement. Si l'on se contente de l'expression classique $\vec{p} \approx m\vec{v}$, on arrive à une situation délicate. Le photon aurait une quantité de mouvement toujours nulle ! Notons que le fait que le photon ait une quantité de mouvement finie n'est pas en contradiction avec l'expression $\vec{p} \equiv \gamma m\vec{v}$. m étant nulle, il faut que $\gamma \rightarrow \infty$ soit $v \rightarrow c$. Une particule de masse nulle ne peut voyager qu'à la vitesse de la lumière.

1.3. Accélération d'un électron dans un champ électrique, comparaison entre le cas classique et le cas relativiste

L'étude d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme est l'occasion de montrer que la physique relativiste n'a rien d'ésotérique, mais qu'elle est utilisée quotidiennement par les physiciens et les ingénieurs comme dans les accélérateurs de particules.

On peut donner l'exemple suivant : l'accélérateur linéaire de Stanford (le SLAC) aux USA permet d'accélérer des électrons jusqu'à une énergie cinétique de 50 GeV. Quelle est la vitesse de ces électrons ?

Il suffit d'utiliser la relation $E_c \equiv (\gamma - 1)mc^2$ que l'on résout par rapport à v ce qui donne :

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + E_c/mc^2)^2}}$$

Pour un électron $mc^2 = 0,511 \text{ MeV}$, soit $v = 0,999\,999\,999\,948 c$. La vitesse de l'électron approche de celle de la lumière sans jamais la dépasser. Un calcul classique donne, en utilisant $E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$, $v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$. Avec $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $v = 4,24 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1,41 c > c$. On voit que la physique classique donne des résultats erronés.

1.4. Dans le cours de deuxième année sur l'interféromètre de Michelson, présenter l'expérience de Michelson et Morley, les postulats de la mécanique relativiste, la notion de contraction des longueurs et de dilatation du temps

L'étude de l'interféromètre de Michelson est l'occasion de parler de la fameuse expérience de Michelson et Morley qui a conduit EINSTEIN et les autres à l'abandon de la notion de l'Éther et à postuler l'invariance de la vitesse de la lumière. On arrive ainsi à la présentation des deux postulats de la relativité restreinte, à savoir : l'invariance de la vitesse de la lumière et que les lois de la physique sont identiques dans tous les référentiels d'inertie. Ce dernier postulat est une généralisation du principe de relativité galiléenne (qui ne s'applique qu'aux lois de la mécanique classique) vu en première année.

Il est facile en utilisant ces deux postulats d'arriver aux résultats surprenants, et qui susciteront à coup sûr l'intérêt des élèves, que sont la dilatation du temps et la contraction des longueurs. Ces calculs ne présentent aucune difficulté (il suffit de connaître le théorème de Pythagore) [1, 3, 6]. Il est plus difficile en comparaison de calculer la fonction de transfert d'un filtre du deuxième ordre.

On peut illustrer la dilatation du temps (expression en réalité pas très heureuse) par la fameuse expérience de détection des muons cosmiques et ainsi montrer aux élèves que cet effet est bien réel.

1.5. Au final

Les exemples précédents (qui ne sont pas exhaustifs) montrent qu'il est possible, sans trop perturber le volume horaire assigné aux cours de physique, de présenter des notions de physique relativiste aux élèves. Les professeurs agrégés des classes de CPGE ont largement les compétences pour un tel enseignement ; le niveau du concours de l'agrégation est exigeant et la physique moderne y occupe une place importante.

2. INTRODUIRE DES NOTIONS DE PHYSIQUE QUANTIQUE DE FAÇON CONTINUE DANS LE COURS DE PHYSIQUE

La physique quantique est mieux traitée puisque des notions sont présentées dans le cours de chimie qui de fait semble plus moderne que celui de physique. On parle de quantification de l'énergie dans l'atome (modèle de BOHR) ; les notions quantiques sont abordées, en particulier les nombres quantiques pour expliquer la structure électronique des atomes.

Mais là encore, à l'image de ce qui a été présenté pour la relativité restreinte, il est souhaitable d'introduire régulièrement dans le cours des notions de physique quantique. Voici quelques pistes envisageables pour cela...

2.1. Dans l'étude énergétique des problèmes à un degré de liberté, parler de la quantification de l'énergie

Dans cette étude et en particulier dans la représentation graphique de l'énergie potentielle (caractère borné ou non d'un mouvement), on peut déjà indiquer, sans attendre le cours de chimie, que dans les systèmes atomiques et moléculaires, l'énergie totale ne varie pas de façon continue, mais qu'elle est quantifiée (notions déjà abordées au lycée). C'est l'occasion d'aborder les spectres d'émission et d'absorption des atomes. On peut travailler sur des représentations graphiques et (ré)introduire la relation $\Delta E = \hbar\omega$.

L'étude énergétique de l'oscillateur harmonique permet d'aborder une limite supplémentaire de la physique classique. L'énergie totale d'un oscillateur harmonique classique vaut $E = \frac{1}{2}kA^2$ avec A l'amplitude maximale des oscillations. Dans le cas quantique, on peut indiquer que la résolution de l'équation de Schrödinger donne comme résultat :

$$E_n = \hbar\omega_0 \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

avec

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

L'énergie d'un oscillateur harmonique est quantifiée. Il est judicieux d'indiquer que l'on peut représenter un solide cristallin par un ensemble d'atomes liés entre eux par des ressorts « quantiques » et, qu'une fois de plus, les énergies (ici de vibration) d'un solide sont quantifiées. Les niveaux d'énergie d'un oscillateur harmonique sont équidistants ce qui n'est pas le cas des niveaux d'énergie d'un atome d'hydrogène (lien avec le cours de chimie).

Il est important de comprendre et d'indiquer aux élèves que, dans le cas classique comme dans le cas quantique, la fréquence angulaire $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ d'un oscillateur est fixée, que son énergie soit grande ou petite. Par contre, l'énergie totale est déterminée par les conditions initiales ; l'amplitude A dans le cas classique, le nombre entier n dans le cas quantique.

Enfin, on peut signaler que les deux autres grandeurs fondamentales, la quantité de mouvement et le moment cinétique, existent toujours dans le monde quantique, mais sont aussi quantifiées. Pour une particule libre non relativiste, comme $E = \frac{p^2}{2m}$, la quantification de l'énergie conduit à celle de \vec{p} . La quantification du moment cinétique est abordée dans le cours de chimie sous la forme $L = mvr = n\hbar$ avec n entier naturel et $\hbar = h/2\pi$ dans l'étude du modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène (\hbar a la même dimension qu'un moment cinétique c'est-à-dire énergie \times temps).

2.2. Dans l'étude des interférences par le dispositif des trous d'Young ; introduire la dualité onde-particule

Le professeur Richard FEYNMAN disait de l'expérience d'interférence des fentes de Young qu'elle contenait tout le mystère de la physique quantique.

Cette expérience est donc l'occasion privilégiée de montrer aux élèves le comportement mystérieux et fascinant des particules quantiques. On peut commencer par indiquer aux élèves que si l'on envoyait à la place de la lumière (donc des photons) des électrons à travers les fentes d'Young, on obtiendrait la même figure de diffraction (si la largeur des fentes est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des électrons). Les électrons ont une nature ondulatoire que l'on peut résumer en introduisant la relation de De Broglie qui donne la longueur d'onde associée à un électron (grandeur ondulatoire) en fonction de sa quantité de mouvement (grandeur corpusculaire) :

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{ou} \quad p = \hbar k$$

On peut généraliser en disant que toute particule, électron, photon, neutron... possède à la fois une nature ondulatoire et une nature corpusculaire. Richard FEYNMAN disait encore que le comportement des particules était incompréhensible, mais qu'au moins elles se comportaient toutes de la même façon. On peut parler de la diffraction des neutrons par les molécules et les cristaux, ce qui représente un outil puissant de détermination de ces structures complexes (réacteur à haut flux Laue Langevin de Grenoble).

Comme chaque particule possède un caractère ondulatoire, elle a une étendue spatiale et dès lors sa localisation précise pose des problèmes. Cette remarque conduit à introduire le principe d'indétermination d'Heisenberg :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$$

L'incertitude sur la connaissance de la position de la particule Δx et l'incertitude sur la connaissance de sa quantité de mouvement Δp_x sont corrélées. Il n'est pas possible de connaître (de mesurer) de façon aussi précise que souhaitée, en même temps, la position et la quantité de mouvement d'une particule. Plus la position de la particule est connue avec précision, Δx petit, et plus l'indétermination sur sa quantité de mouvement est grande, Δp_x grand. Il faut insister sur le fait qu'il s'agit d'un principe fondamental de la nature qui n'est pas lié à une quelconque imprécision des appareils expérimentaux, c'est pourquoi il est plus correct de parler de principe d'indétermination que de principe d'incertitude. Il convient ensuite de donner des applications numériques dans le cas d'un électron et dans celui d'une balle de tennis. Pour l'électron, le principe d'indétermination joue un rôle crucial. Si l'on souhaite connaître avec précision sa quantité de mouvement au sein d'un atome, l'incertitude sur sa position peut être plusieurs ordres de fois la taille de l'atome ! Pour un objet macroscopique tel qu'une balle de tennis, le principe d'indétermination n'a pas de conséquence du fait de la petitesse de la constante de Planck

($\hbar = 1,055 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), Δx et Δp_x seront beaucoup plus petits que la meilleure précision instrumentale possible.

2.3. Introduire l'équation de Schrödinger indépendante du temps

Cette célèbre équation, dans sa version simplifiée indépendante du temps, a disparu des programmes en 1995. Faut-il la réintroduire ? Nous pensons que oui. Pour beaucoup d'élèves, ce sera l'unique occasion d'apercevoir cette équation puisque la physique quantique n'est pas au programme d'un grand nombre d'écoles d'ingénieurs.

Sa nature et sa résolution, dans le cas simple d'une boîte quantique par exemple ou d'un puits infini, font appel aux mêmes mathématiques que celles qui sont employées dans l'étude du mouvement harmonique ; il s'agit d'une équation différentielle du second ordre et linéaire. L'équation de Schrödinger n'est pas plus compliquée que l'équation d'onde ou de d'Alembert, que l'équation de diffusion de la chaleur, que les équations de Maxwell... Alors, pourquoi la cacher ?

Comme la deuxième loi de Newton ou les équations de Maxwell, l'équation de Schrödinger ne peut être dérivée de principes plus fondamentaux. Ces équations sont justifiées *a posteriori* (accords expérimentaux avec les résultats théoriques prévus par ces équations) et elles doivent satisfaire les grands principes de la physique comme les principes de symétrie et les lois de conservation.

Il est cependant possible de « justifier » la forme de l'équation de Schrödinger en partant d'une approche ondulatoire qui est familière des élèves de CPGE. Cette démarche est d'un point de vue pédagogique préférable à une introduction brutale de cette équation.

La justification de la forme de l'équation de Schrödinger est développée dans de nombreux ouvrages d'introduction de physique [2-3, 7-8]. Voici une démarche possible :

- ◆ L'équation de Schrödinger doit satisfaire au principe de conservation de l'énergie :

$$E_c + U = E$$

où E_c , U et E sont respectivement l'énergie cinétique, l'énergie potentielle et l'énergie totale de la particule étudiée. En se plaçant dans le cadre non relativiste,

$$E_c = \frac{p^2}{2m}.$$

- ◆ Quelle que soit la forme de cette équation, elle doit être en accord avec l'hypothèse de De Broglie : $p = \hbar k$. Ainsi l'énergie cinétique d'une particule libre de De Broglie

$$\text{peut s'écrire } E_c = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}.$$

- ◆ On a déjà vu que chaque particule avait un comportement ondulatoire, on peut donc

associer à chaque particule une onde ψ , ou plutôt une fonction d'onde dont la nature exacte reste à déterminer, que l'on peut écrire par analogie avec les ondes planes progressives monochromatiques sous la forme : $\psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$ avec $k = 2\pi/\lambda$ et $\omega = 2\pi/t$. Pour simplifier le problème, on peut « faire une photo » et se placer à l'instant $t = 0$; ce qui donne $\psi(x, t = 0) = A \sin(kx)$.

- ◆ Nous souhaitons une équation indépendante du temps et il faut faire apparaître l'énergie potentielle U . Pour cela, on calcule la dérivée seconde de ψ :

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -k^2 A \sin(kx) = -k^2 \psi.$$

En utilisant le précédent résultat $E_c = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ et $E_c = E - U$, on obtient l'équation de Schrödinger indépendante du temps dans le cas unidimensionnel :

$$\boxed{-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + U\psi = E\psi}$$

Il s'agit d'une équation différentielle du second ordre qui contient le principe de conservation de l'énergie, qui est linéaire et a valeur unique et qui, dans le cas d'une particule libre ($U = 0$), est en accord avec l'hypothèse de De Broglie.

- ◆ Il convient de donner une interprétation plus physique à la fonction d'onde ψ . C'est sans doute le point conceptuel le plus délicat pour les élèves, mais aussi le plus riche. La nature de ψ est différente de celle d'une onde. $|\psi(x)|^2 dx$ donne la probabilité de présence de la particule entre x et $x + dx$. Comme la particule est certainement présente dans l'intervalle $]-\infty, +\infty[$, sa probabilité de présence dans ce dernier doit valoir 1, ce qui conduit à la condition de normalisation de la fonction d'onde :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1.$$

Il est ensuite facile de résoudre l'équation de Schrödinger dans le cas d'une boîte à une dimension. Cela permet d'apporter une assise plus solide au concept de quantification de l'énergie et au cours de chimie sur l'architecture de la matière. L'équation de Schrödinger pourrait, comme c'était le cas avant la réforme de 1995, être étudiée dans le cours de chimie. Le programme actuel de chimie parle d'une part de « probabilité de présence d'un électron dans une région de l'espace » et indique d'autre part que « l'équation de Schrödinger et la notion de fonction d'onde sont hors programme ». Cela n'est pas très cohérent. Pourquoi, encore une fois, cacher aux élèves la notion si riche de fonction d'onde ? Je suppose que, dans la pratique, beaucoup d'enseignants parlent avec intérêt de la fonction d'onde à leurs élèves.

2.4. Au final

Le cas de la physique quantique est moins « grave » que celui de la physique relativiste puisque des notions sont abordées dans le cours de chimie. Cependant, le cours de physique est l'occasion d'introduire de façon régulière des notions quantiques auprès des élèves. L'étude, dans des cas élémentaires, de l'équation de Schrödinger est souhaitable. Il est étrange de former des scientifiques de haut niveau (bac +5) qui n'ont jamais vu cette fameuse équation même, si pour beaucoup, elle ne leur sera pas utile. Est-il nécessaire au quotidien à un ingénieur de savoir démontrer si une suite arithmétique est absolument convergente ou non ?

CONCLUSION

En un siècle, le paysage des sciences physiques a été bouleversé et notre vision du monde n'est plus la même ; révolution relativiste, révolution quantique et encore plus récemment révolution cosmologique. À l'heure actuelle, les choses bougent encore en physique des particules, en cosmologie. Les applications technologiques issues de ces révolutions ont modifié comme jamais notre quotidien.

Malheureusement, l'enseignement des sciences physiques en CPGE ne reflète que trop peu ces changements. La physique moderne est quasi absente des programmes. Certes, une solide base en physique classique est toujours indispensable et nécessaire à la poursuite des études. Mais il est possible d'enseigner à un niveau élémentaire des notions de physique moderne sans attendre d'avoir étudié de A à Z la physique classique. Ces notions peuvent être présentées de façon régulière dans le cours de physique de CPGE. Nous avons à présent le recul nécessaire pour cela. L'enseignement de la physique moderne fait partie intégrante de beaucoup de cours d'introduction de physique, dans de nombreux pays.

Il faut montrer aux élèves la physique telle qu'elle existe aujourd'hui. Même la physique classique peut être présentée d'une façon plus moderne (nous avons un recul encore plus important sur cette physique), par exemple en insistant sur les lois de conservation ou encore en présentant l'entropie d'emblée « par sa véritable nature statistique », comme le suggère Georges GONZY [9] et comme cela est déjà le cas dans plusieurs ouvrages d'introduction à la physique [5].

Il faut donner le goût des sciences physiques à nos élèves en les exposant telles qu'elles sont et telles qu'elles sont pratiquées par nos chercheurs et nos ingénieurs.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HALLIDAY D. et RESNICK R. *Physics For Students of Science and Engineering*. 1^{ère} édition, New York : Wiley, 1960.
Ce manuel en est à présent à sa cinquième édition en deux volumes : HALLIDAY D., RESNICK R. et KRANE K. *Physics*. 5^e édition, New York : Wiley, 2002.

- [2] KNIGHT R. *Physics For Scientists and engineers : A Strategic Approach with modern physics*. 2^e édition, San Francisco : Pearson Addison-Wesley, 2008.
- [3] GIANCOLI D. *Physics For Scientists and engineers with modern physics*. 4^e édition, Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2009.
- [4] KNIGHT R., JONES B. et FIELD S. *College Physics: A Strategic Approach with modern physics*. 1^{ère} édition, San Francisco : Pearson Addison-Wesley, 2007.
- [5] CHABAY R. et SHERWOOD B. *Matter and interaction I, Modern Mechanics*. 2^e édition, New York : Wiley, 2007.
CHABAY R. et SHERWOOD B. *Matter and interaction II, Electric and Magnetic Interaction*, 2^e édition, New York : Wiley, 2007.
- [6] BENSON H. *Physique 3, Ondes, Optique et Physique Moderne*. 3^e édition, Bruxelles : De Boeck, 2005.
- [7] KRANE K. *Modern Physics*. 2^e édition. New York : Wiley, 1996.
- [8] TAYLOR J.R., ZAFIRATOS C.D. et DUBSON M.A. *Modern Physics for scientists and engineers*. 2^e édition. Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2004.
- [9] GONCZI G. « La thermodynamique est-elle compréhensible ? ». *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, novembre 2008, vol. 102, n° 908 (2), p. 113-122.



Rémy DUPERRAY
Professeur en PTSI
Lycée Ferdinand Buisson
Voiron (Isère)