

Que font vraiment les physiciens ?

par Pablo JENSEN
Département de Physique des Matériaux
CNRS - Lyon I

INTRODUCTION

La vision habituelle qu'on a des physiciens est qu'ils découvrent le monde, un peu comme des explorateurs qui pénètrent peu à peu dans une île déserte. Richard Feynman, le prix Nobel de physique et génial vulgarisateur, parlant de la recherche des lois fondamentales de la physique, dit que «Nous avons beaucoup de chance de vivre une époque où on fait encore des découvertes. C'est comme la découverte de l'Amérique, on ne la découvre qu'une fois» [1]. Les physiciens sont censés observer objectivement le monde qui les entoure et en déduire les lois qui le gouvernent. Je voudrais suggérer que cette image est par trop simpliste.

Mon objectif ici est de montrer comment, concrètement, le physicien introduit des présupposés, une vision du monde préalable à toute analyse «impartiale». Pour résumer, la physique suppose que tout est composé de mécanismes simples, élémentaires, et analyse le monde avec ces lunettes-là. Ceci ne signifie nullement que la physique (ou la science en général) n'est qu'une construction de l'esprit, le lien avec le réel est très important, mais il est plus subtil que la relation d'observateur impartial envisagée plus haut.

Je pense que cette présentation du travail du physicien est utile car il est difficile de saisir ce que font vraiment les physiciens si on ne voit que la partie technique de leur travail ou sa version vulgarisée. De plus, connaître les présupposés de la physique, leurs avantages mais aussi leurs limites a une grande importance pour son enseignement, ainsi que pour ses rapports avec la société.

1. LE MONDE IMAGINAIRE DE GALILÉE

Je voudrais d'abord illustrer, par un exemple tiré de la physique élémentaire, la différence entre le monde «réel» (dans le sens où il correspond à celui que nous percevons tous les jours) et le monde inventé par les physiciens. Il s'agit d'un épisode célèbre dans l'histoire de la physique, un des moments fondateurs de son histoire : l'étude par Galilée du mouvement du pendule, à l'aube du XVII^e siècle.

Galilée a, le premier, affirmé que les oscillations d'un pendule sont isochrones, c'est-à-dire effectuées dans le même temps quelque soit leur amplitude : «[...] Si deux personnes se mettent à compter, l'une les grandes oscillations [de 180 degrés], l'autre les petites [de 10 degrés], elles s'aperçoivent qu'elles peuvent en dénombrer non seulement des dizaines, mais bien des centaines, sans que leurs chiffres diffèrent d'une seule unité» (Réf. [2], p. 277). Comment est-il parvenu à cette conclusion ?

La légende nous dit que Galilée aurait découvert l'isochronisme des oscillations du pendule dans une église de Pise autour de l'année 1600. Par exemple, F. Wolf affirme que «Lorsque Galilée était âgé d'à peine dix-sept ans, il observa passivement un lustre qui oscillait comme un pendule dans l'église de Pise où il grandit (...) Ennuyé par le sermon, il regarda attentivement le lustre et, en plaçant ses doigts sur son poignet, compta ses pulsations. Il découvrit alors quelque chose de surprenant... parfois le lustre oscillait amplement, parfois à peine... cependant il effectuait toujours le même nombre d'aller-retours tous les soixante battements de cœur» (cité dans [3]). Cette même anecdote - avec quelques variantes - revient souvent, aussi bien dans l'Encyclopédie Britannique que dans le tout récent «Horloges, pendules et mécanique céleste» de Simon Gindkin [4].

Cette version des faits, qui conforte la thèse de la découverte passive des lois physiques, par simple observation, est invraisemblable, et pas seulement parce que le lustre en question n'était pas encore installé à Pise quand Galilée s'y trouvait... Comment expliquer en effet que tous les autres savants qui ont précédé Galilée (de Vinci, del Monte...) n'aient jamais observé un phénomène aussi simple, alors qu'ils avaient, eux aussi, longuement étudié le pendule ? Comment expliquer surtout que Galilée ait pu observer quelque chose qui est en fait faux, ainsi que le montraient les expériences à l'époque et les reconstructions modernes de ses expériences.

Ces deux questions deviennent moins mystérieuses si on comprend qu'en cette occasion Galilée s'est laissé aveugler par sa confiance dans ses calculs et leur aptitude à décrire le réel. Il faut bien comprendre en effet que l'idée fondamentale de Galilée, qui est aussi le point de départ de toute la physique moderne, a été de *décider* que la nature obéit à des lois simples qu'il faut articuler avec les mathématiques [5]. Ceci n'est nullement évident d'après notre expérience quotidienne. Galilée déclara pourtant sans ambages que «[L'Univers] est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont les triangles, les cercles, et autres figures géométriques, sans lesquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot - sans lesquels on erre vainement en un labyrinthe obscur» (cité dans [6]). Mais il faut bien se rendre compte que ce que Galilée essaye de nous «vendre» comme une propriété intrinsèque du monde est en fait une décision a priori, un présupposé, et pas une déduction expérimentale. Dans le cas du pendule, cette idéalisation est claire : on suppose que la boule est ponctuelle, que le fil qui la soutient est sans masse et inextensible et qu'il n'y a pas de frottements - ni avec l'axe de rotation, ni avec l'air. Moyennant ces hypothèses, on peut utiliser les

mathématiques pour calculer «simplement» les propriétés du pendule. C'est ce que fit Galilée, arrivant à la conclusion que les oscillations devaient être isochrones. Malheureusement, on montra par la suite que son calcul était erroné, et que l'isochronisme est une bonne approximation seulement pour les petites oscillations. Cet exemple du pendule est très révélateur de la «foi» mathématique qui animait Galilée. Sa confiance dans les mathématiques l'empêcha de «voir» que les oscillations des pendules ne sont pas isochrones, ni dans le monde réel (mais a-t-il vraiment fait l'expérience ? Voir à ce sujet Pierre Thuillier : «Galilée et l'expérimentation» dans *La Recherche* d'avril 1983), ni dans son monde idéal sans frottements.

Lorsque des tenants de la mécanique d'Aristote comme del Monte ou di Grazia, qui étaient aussi de bons expérimentateurs, lui faisaient remarquer que les oscillations n'étaient manifestement pas isochrones, il répliquait que les expériences sont imparfaites, qu'il y a du frottement, et que si on les réalisait dans un monde idéal, elles donneraient le «bon» résultat. Il exprima cette idée clairement à propos du mouvement parabolique qu'il avait prédit pour les projectiles en l'absence de frottement : «J'accorde que les conclusions établies dans l'abstrait se modifient dans la réalité, et se montrent à ce point inexactes que [...] la trajectoire d'un projectile [ne peut] avoir la forme d'une parabole» (Réf. [2], p. 274). Cette attitude provoquait des réactions indignées de ses contradicteurs qui affirmaient que les lois de la physique doivent s'appliquer à notre monde réel et non pas à un monde idéalisé, et que Galilée confondait la physique avec les mathématiques.

Ce qu'il faut retenir de ce rapide aperçu de l'étude du pendule est que le mythe suivant lequel les physiciens (ou, plus généralement, les scientifiques) observent la nature pour en déduire ses lois ne tient pas. Une vue plus réaliste est que, en articulant des éléments simples avec les mathématiques, ils construisent un monde qui reproduit certains phénomènes du monde réel. Et il faut voir que ces concepts n'existent pas réellement, du moins dans le sens courant du verbe exister, dans le sens où nous disons qu'une table existe : ils sont créés de toutes pièces. Par exemple, une des étapes essentielles de la démarche de Galilée pour l'étude du mouvement fut de définir l'accélération comme (en termes modernes) le taux de variation de la vitesse par rapport au temps, et non pas comme on le faisait à l'époque par le taux de variation de la vitesse par rapport à la distance parcourue. Ces deux définitions sont a priori valables, le seul avantage de la première - mais il est de taille - est qu'elle permet d'exprimer de manière simple les lois de la mécanique : dans les cas étudiés par Galilée (chute libre, sur un plan) elle est tout simplement constante. Mais je ne pense pas qu'il en découle une réalité plus grande. Malheureusement, dans la plupart des cours de physique, la notion d'accélération tombe du ciel, comme si elle était une donnée intrinsèque de l'objet, alors qu'elle n'est en fait qu'une construction de l'esprit (très utile, certes, mais construction tout de même). Nous y reviendrons.

2. LA SIMPLICITÉ EN PHYSIQUE AUJOURD'HUI

Le paragraphe précédent illustre la démarche d'un des premiers physiciens. Je voudrais à présent donner quelques exemples précis de la façon dont les physiciens s'y prennent *maintenant* pour «analyser» le monde, pour montrer que leur science procède toujours de la même manière. J'analyserai deux stratégies complémentaires couramment employées par les physiciens. La première est typique du théoricien qui aime jouer dans le monde idéal, et essaye d'appliquer ses jeux au monde réel. La seconde caractérise plutôt l'expérimentateur, qui s'attaque au monde réel et s'efforce de le simplifier. Nous verrons donc dans l'ordre un exemple classique de monde idéal : «l'ensemble de particules sans interaction» et comment les théoriciens adaptent cette chimère pour lui faire décrire une partie du monde réel. Puis nous décrirons brièvement comment les expérimentateurs construisent une sorte de «scène de théâtre», aussi dépouillée que possible pour que les outils simples de la physique puissent la décrire. Pour plus de détails et d'exemples, le lecteur pourra consulter la référence [7].

2.1. Du côté des théoriciens : le monde composé de boules de billard

Pour les physiciens théoriciens, l'archétype du système simple est «l'ensemble de particules sans interaction». De quoi s'agit-il ? Une bonne image de ce que les physiciens appellent «particule» est fournie par une boule de billard. Ses caractéristiques essentielles doivent être les suivantes : il faut qu'elle ait une position, qu'elle soit individualisable, et aussi impénétrable, sans structure interne. On dit que l'ensemble de ces particules sont sans interaction si elles ne s'influencent pas, si ces particules s'ignorent. Ce point est très important car on ne sait pas calculer exactement les propriétés d'un système aussi simple que trois particules soumises seulement à la force de gravitation. Si en revanche l'interaction est nulle (ou négligeable), la physique statistique [8] permet de prédire les propriétés du système de toutes ces particules en fonction des contraintes qui lui sont imposées de l'extérieur (énergie totale, température).

On pourrait penser qu'un tel modèle est bien trop simpliste pour être d'une quelconque aide dans l'étude d'un système réel. En effet, il semble évident que des interactions sont toujours présentes (la force de gravitation par exemple), rendant cette construction inutile. Il n'en est rien. Le truc est le suivant : puisque ce sont les interactions qui nous embêtent, éliminons-les, quitte à redéfinir le système, à changer les particules «réelles» par des pseudo-particules qui n'interagissent pas. On pourra alors appliquer les recettes simples de la physique statistique. Il s'agit de la même démarche que celle qui conduisit Galilée à «oublier» le frottement qu'il ne pouvait introduire facilement dans ses calculs. Comment s'y prend-on concrètement ?

Parfois la nature est gentille (ou nous sommes intelligents dans le choix du système) et l'interaction entre les particules est effectivement très faible comme dans les gaz.

Le modèle dit du «gaz parfait» permet alors de bien comprendre le comportement des gaz réels en appliquant les méthodes de la mécanique statistique à une collection d'atomes. Et les physiciens, pour se rapprocher de cette chimère, travaillent dans des conditions précises : équilibre thermodynamique, faibles pressions...

Mais cette notion de particule, que l'on sait facilement combiner grâce à la physique statistique, les physiciens essayent de l'appliquer dans des cas où la nature se montre moins coopérative. On devra bien sûr un peu adapter les notions intuitives de particule, mais ce qui semble essentiel aux physiciens est de se ramener à ce système simple sur lequel on peut faire des calculs... Quand on n'a qu'un marteau, tout ressemble vite à un clou ! Voyons deux exemples relativement simples de l'application du concept de particule.

2.1.1. Les électrons dans les solides

On sait très bien manipuler les électrons comme des particules lorsqu'ils se trouvent dans le vide, donc loin de toute influence, dans un tube cathodique de télévision par exemple. Pour les diriger vers un point fixé de l'écran, on utilise des champs électriques et magnétiques qui, en interagissant avec sa charge et sa masse vont déterminer sa trajectoire, tout comme on peut le faire pour une boule de billard avec une queue. Mais qu'en est-il des électrons dans un solide, où ils sont très proches les uns des autres et interagissent fortement ? Peut-on encore garder cette image d'un électron comme une particule que l'on pourrait diriger simplement avec des champs ? De la réponse à cette question dépend le comportement électrique d'un solide. Les physiciens veulent aussi savoir quelle est l'énergie des électrons dans le solide en fonction de la température. Comment l'évaluer ? On pourrait penser que les interactions très fortes entre les électrons (la répulsion électrostatique, la répulsion liée au principe de Pauli qui en toute rigueur devrait interdire de considérer les électrons individuellement) ainsi que leur interaction avec les noyaux du solide ne permettent pas d'assimiler les électrons à un ensemble de particules sans interaction. C'est sans compter avec l'ingéniosité des physiciens qui y parviennent quand même, en inventant une «quasi-particule» (c'est l'appellation technique) qui comprend un électron plus un ensemble de charges positives (en gros, quelques ions du réseau). Ces quasi-particules sont difficiles à «construire» mathématiquement, mais on les définit en s'arrangeant pour qu'elles interagissent le moins possible entre elles. On pourra ainsi assimiler l'ensemble des électrons d'un cristal à un gaz parfait, où les particules n'interagissent pas. Bien sûr, il y a un prix à payer pour cela : par exemple, la masse de cette quasi-particule peut-être très éloignée de celle du «vrai» électron placé dans le vide : elle en vaut seulement le dixième dans un alliage d'arséniure de gallium, très utilisé dans l'industrie électronique. Il peut sembler absurde de ramener un ensemble d'électrons interagissant fortement à un gaz parfait, mais cela est très pratique pour le physicien qui peut ainsi appliquer simplement les notions développées dans ce cas simple et répondre, au moins partiellement, aux questions posées ci-dessus. C'est d'ailleurs de cette façon qu'on

introduit généralement les étudiants à l'étude des propriétés électroniques des solides. Il peut sembler dommage qu'on ne leur dise pas pourquoi cette analogie est faite, quelles en sont les justifications et les limites. Ces dernières apparaissent clairement par exemple dans le domaine de la supraconductivité [9].

2.1.2. Les vibrations des atomes

Un autre exemple d'adaptation du monde à cette notion de particules indépendantes est fournie par les vibrations des atomes au sein des cristaux. Lorsqu'un cristal est à température nulle, les atomes sont pratiquement immobiles à leur position ordonnée d'équilibre. Si on fournit de la chaleur à ce cristal, celui-ci l'emmagasine sous forme de vibrations de ses atomes, ce qu'on traduit en disant que la température du cristal augmente. L'étude de ces vibrations est indispensable pour caractériser le comportement thermique d'un solide et aussi la propagation des ondes, notamment du son. Cependant, la nature semble ici aussi peu coopérative. En effet, quand un atome vibre, il repousse ses voisins qui font de même avec les leurs et ainsi de proche en proche, ce qui fait que les vibrations des différents atomes sont corrélées : tout le contraire de particules sans interaction. Comment les physiciens vont-ils pouvoir s'en sortir cette fois-ci ? Sans rentrer dans les détails techniques bien expliqués par ailleurs [8, 9], l'astuce consiste à considérer comme particules de départ non pas les atomes individuels, caractérisés par leur position et leur vitesse, mais des ondes de vibration, caractérisées par leur longueur d'onde et leur fréquence. Bien sûr, il existe une relation mathématique rigoureuse entre ces deux descriptions, mais elle est en général impossible à expliciter. Et la description en termes d'ondes jouit d'avantages décisifs aux yeux des physiciens. En effet ces ondes - appelées «phonons», particules de son - interagissent peu si les atomes ne vibrent pas trop. Ceci a deux conséquences très importantes aux yeux des physiciens. D'abord, on peut mesurer leurs caractéristiques par diverses méthodes expérimentales (diffusion de neutrons, Raman). Ensuite, en utilisant ces phonons et la mécanique statistique on peut calculer l'énergie de vibration des atomes en fonction de la température et en déduire les propriétés calorifiques des corps. On voit donc que les physiciens ont intérêt à quitter l'espace «réel» où vibrent les atomes et partir vers le monde des phonons où les propriétés sont simples à calculer. Le prix à payer pour cette efficacité est un éloignement du monde habituel.

2.2. Du côté des expérimentateurs : créer une scène

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu comment le théoricien se débrouille pour interpréter le monde en des termes qui lui conviennent. Nous allons voir ici la démarche complémentaire, caractéristique des expérimentateurs : observer le monde réel non pas passivement, mais en le transformant pour le rendre interprétable.

Nous montrerons qu'une idée importante est de partir d'un point de référence aussi simple que possible, d'un vide, ou, pour employer une image plus familière, d'une

scène de théâtre. On peut en effet voir cette dernière comme un morceau de monde particulièrement simple, désigné pour mieux faire ressortir le message du metteur en scène. Il est clair que, ce faisant, on laisse de côté une grande partie de la vie, mais cela semble nécessaire si on veut faire passer un message identifiable.

Comment les physiciens s'y prennent-ils ? Ce qu'il faut, c'est cacher le plus possible d'événements indésirables, arriver à une scène aussi dépouillée que possible. Un exemple simple est fourni par le dépôt d'atomes sur une surface pour former des structures à l'échelle atomique [10]. Si les atomes sont déposés sur la surface sans précautions, le processus de croissance des couches est trop difficile à analyser, du moins pour le physicien (mais l'ingénieur peut arriver à s'en sortir avec ses propres outils). Le monde réel est trop compliqué. La solution pour le physicien consiste à cacher beaucoup de ces phénomènes «parasites» sous le tapis, ce qui n'est pas facile à faire expérimentalement. Seulement alors les modèles ultra-simples des physiciens pourront s'appliquer, être utiles pour la compréhension du monde. Concrètement, la scène est préparée en travaillant en ultra-vide (on élimine tous les gaz parasites qui pourraient interférer avec notre simplification), en utilisant des surfaces aussi parfaites que possible (sans défauts cristallins, marches par exemple) et à basse température, ce qui élimine un grand nombre de phénomènes qui n'ont pas l'énergie nécessaire pour apparaître (formation de lacunes, dissociation des dimères, réévaporation des atomes, etc.). C'est seulement à ce prix (dans tous les sens du terme !) qu'on pourra se rapprocher des idéalités du physicien et penser avoir «compris» la croissance des couches. Il me semble que les efforts requis et la technologie mise en œuvre n'indiquent pas que l'on ne fait que «découvrir» les lois naturelles de la condensation d'atomes sur une surface. Dans le même registre, il est intéressant de noter comment Sébastien Balibar conclut son article consacré à l'hélium et à sa merveilleuse «simplicité» qui séduit les physiciens : «A la fin d'une de mes conférences, un jeune chercheur m'a fait plaisir, exprimant le désir de travailler sur un système aussi pur que l'hélium. Je lui ai soigneusement caché les semaines entières, les mois, parfois les années que nous passons à empêcher ce diabolique superfluide de sortir de nos cellules expérimentales par la moindre porosité qu'à provoquée une soudure un peu chaude ou un collage un peu défectueux» (*La Recherche*, 24 (juillet-août 1993), p. 811).

3. INTÉRÊTS ET LIMITES DE LA MÉTHODE DES PHYSICIENS

Nous avons jusqu'ici illustré la véritable révolution apportée par Galilée à l'étude de la nature, et la manière dont les physiciens appliquent cette méthode aujourd'hui. On pourrait résumer grossièrement le changement de perspective de la façon suivante. Pour Aristote, les éléments de départ, les mécanismes «simples» sont ceux que nous pouvons observer dans notre vie de tous les jours : chute des corps lourds vers la terre, y compris leur frottement avec le milieu, élévation de la fumée et des corps légers, le fait qu'une force est nécessaire pour faire bouger un corps, que celui-ci s'arrête dès

qu'on ne le pousse plus. Pour Galilée en revanche, les mouvements simples sont ceux qui peuvent s'articuler mathématiquement : mouvement dans le vide, sans aucune force, ... Il s'ensuit que pour Galilée, ce que nous voyons tous les jours devient complexe, et il faut généralement combiner un grand nombre d'effets «simples», qui sont impossibles dans notre monde réel, pour les expliquer. Pourquoi Galilée a-t-il choisi cette voie ? Il le dit très clairement lorsqu'il étudie le mouvement : «Même le mouvement qui sur le plan horizontal, après qu'on ait écarté tous les obstacles, devrait se conserver indéfiniment, et de façon uniforme, sera altéré par la résistance de l'air et en fin de compte arrêté : et à nouveau d'autant plus rapidement que le mobile sera plus léger. Ces propriétés de gravité, de vitesse et même de forme sont susceptibles de varier de tant et tant de manières qu'il est impossible d'en donner une science rigoureuse : c'est pourquoi, si l'on veut traiter scientifiquement ce problème, il convient d'en faire abstraction, et après avoir découvert et démontré les lois, en supprimant toute résistance, de les compléter, au moment de les utiliser concrètement, par ces limitations que l'expérience nous enseignera. L'avantage de cette méthode n'est pas petit, car on peut choisir les matériaux et les formes les moins sensibles à la résistance du milieu, comme le sont les corps très pesants et de forme arrondie, et, d'autre part, les distances et les vitesses ne seront pas en général si grandes que l'on ne puisse corriger avec précision les différences» (Réf [2], p. 276). L'idée selon laquelle le monde est composé de mécanismes simples qui obéissent aux mathématiques ne permet peut-être pas vraiment de le comprendre (bien sûr, rien ne le peut «vraiment», chaque domaine apporte sa pierre), mais il permet à coup sûr de le *manipuler*, tout du moins en ce qui concerne le monde inerte. En effet, en combinant de manière adroite plusieurs mécanismes simples, il est possible de construire de belles machines dont on peut calculer a priori les propriétés. Par exemple, Huyghens réalisa peu après Galilée un pendule réellement isochrone, oscillant non pas suivant un arc de cercle mais un arc de cycloïde, courbe qui donne mathématiquement des oscillations d'égale durée. Pour prendre un exemple moderne, l'idée de base du «bricolage quantique» [10, 11] est de préparer des couches minces ou des nanostructures ayant a priori des caractéristiques opto-électroniques intéressantes. Ces propriétés sont prédites par la mécanique quantique, ce qui oblige toutefois à élaborer des couches parfaites, avec les difficultés technologiques considérables que cela suppose.

Mais cette approche, qui a fait ses preuves dans le domaine technologique, est-elle forcément aussi féconde dans d'autres domaines ? Comme le dit le philosophe antichien Paul Feyerabend : «Nous pouvons admettre que des notions et des principes abstraits peuvent être articulés entre eux plus facilement que des concepts pratiques (empiriques). Les arguments de Parménide, les paradoxes de Zénon à propos des points et des lignes (...) montrent quels merveilleux châteaux en Espagne peuvent s'ériger à partir d'idées qui ne sont plus contaminées par les idiosyncrasies du particulier. Mais le fait que des idées simples peuvent s'articuler de manière simple ne donne pas aux propositions qui en résultent une autorité spéciale que si l'on peut montrer que tout est fait de choses simples.» [12]. La question est d'autant plus pressante que les succès de

la méthode analytique dans la maîtrise du monde matériel ont conduit les sociétés occidentales à essayer de la généraliser à l'ensemble de la société. On ne peut ici se livrer à une analyse un tant soit peu profonde de ce problème central de notre société. Prenons juste quelques exemples pour illustrer notre propos. Dans le domaine de l'économie [13], «la théorie actuellement dominante est née dans la seconde moitié du XIX^e siècle, à l'époque du triomphe de la physique et de la mécanique. Au demeurant, il y a beaucoup d'ingénieurs parmi ses pères fondateurs [...] qui rêvaient d'en faire une *physique sociale*, en empruntant à la physique ses images, ses concepts et ses outils mathématiques». Ainsi, l'économie «prend pour point de départ des individus - considérés comme des *atomes* - mus par des forces tels le profit ou le plaisir» et elle se propose de montrer «comment l'action des forces du marché est source d'enrichissement, de bonheur [...], au moins dans des circonstances idéales, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a ni *imperfections* ni *frottements*» [13]. Le parallèle avec la description que nous avons donné de la physique est frappant. Il en résulte que l'homme qui est adapté à ces modèles économiques - l'*homo æconomicus* - peut n'avoir qu'un très lointain rapport avec l'homme réel, qui produit d'indésirables *frottements*. Ailleurs, en biologie, le fait de considérer le corps comme une machine composée de mécanismes simples connaît certes de grands succès mais aussi des limites qui deviennent évidents à présent, notamment avec les problèmes d'éthique.

4. POUR UNE AUTRE PÉDAGOGIE

Peut-on tirer quelques idées de ce qui précède pour améliorer l'enseignement de la physique ? De nombreuses études ont en effet montré qu'en général les étudiants n'en retiennent pas grand chose, qu'ils ne voient qu'un amoncellement de formules sans trop de sens. Des études précises [14, 15, 16] ont montré qu'une grande partie des problèmes de l'enseignement de la physique provient de ce que beaucoup d'étudiants ne comprennent pas réellement ses fondements, sa méthode, ni même ses concepts de base (vitesse, accélération...). Par exemple, en mécanique, les étudiants arrivent à leur première classe de physique avec un ensemble d'idées sur le comportement des objets. Ces idées - fruit de leur expérience quotidienne - sont souvent en contradiction avec le système Newtonien. Il semble en fait que leur «bon sens» soit assez proche du système Aristotélicien, complété par un zeste d'*impetus*, la théorie du mouvement du Moyen Âge [15, 16]. Par exemple, la plupart des étudiants sont convaincus que tout mouvement nécessite une force pour se maintenir et qu'un corps se «souvient» de son mouvement passé : s'il était circulaire, il continuera, au moins pendant un certain temps à suivre cette trajectoire, même en absence de toute force. Cette distance entre le bon sens et ce qu'on enseigne est habituellement négligée. A mon avis, la croyance en l'évidence de la physique, qui découlerait simplement d'une observation attentive de la nature y est pour beaucoup. Si au contraire on se rend compte que tous les concepts de la physique ont été inventés par des hommes de génie au bout de longs efforts, on aurait moins de mal à comprendre qu'ils sont très difficiles à admettre pour les

étudiants. Des constats similaires ont été faits par Stella Baruk en ce qui concerne les mathématiques [17].

Peut-être faudrait-il montrer comment les concepts qu'utilisent les physiciens se sont imposés, les comparer explicitement aux concepts intuitifs des étudiants, et essayer de convaincre ceux-ci de l'avantage d'utiliser les premiers. Cela me semble plus formateur que de leur imposer la physique comme tombée du ciel, à accepter parce que la «Science» dit que. Ce serait nettement plus intéressant pour l'immense majorité des étudiants - qui ne referont jamais de physique - leur montrant que la science n'est pas qu'un amoncellement de formules sans queue ni tête, leur donnant une idée plus réaliste de la science, qui est indispensable aux citoyens de nos sociétés modernes. Par exemple, dans le cas du pendule, au lieu de parachuter la formule donnant la période en fonction des paramètres et leur demandant de la vérifier expérimentalement, on pourrait leur refaire l'histoire qui a amené Galilée à énoncer ses lois, leur montrer quelle était sa démarche et les oppositions qu'elle a soulevées. Cela leur montrerait que des concepts aussi évidents (aujourd'hui) que ceux de vitesse, d'accélération ou d'énergie ont une histoire, qu'ils furent forgés par des hommes à des moments bien précis et qu'ils ne s'imposèrent que progressivement. A ceux qui objecteraient que on n'a pas le temps de procéder de la sorte, je répondrai qu'il ne sert à rien de passer rapidement sur des sujets qui seront oubliés : même les élèves qui obtiennent des bonnes notes ont rarement compris ce qu'ils font, leur réussite s'expliquant plutôt par leur habileté à «appliquer-la-bonne-formule».

CONCLUSION

«Mieux que quiconque, Galilée nous permet donc d'apercevoir à quel point la science moderne, loin d'être la négation de la philosophie, repose en son principe sur certaines démarches proprement philosophiques. Soutenir l'aptitude de la raison mathématique à comprendre le réel, [...] faire de l'exigence de simplicité un critère pour l'explication, ce n'est pas énoncer des *évidences*, mais introduire, par un acte de libre choix, les affirmations métaphysiques dont la physique classique sera inséparable. Contre la tentation toujours renaissante du positivisme ou du pragmatisme, il n'est pas de meilleure garantie qu'un retour à Galilée». Ainsi concluait Maurice Clavelin son étude de la philosophie naturelle de Galilée [6]. J'ai essayé de vous convaincre que la physique ne se contente effectivement pas d'observer le monde et d'en déduire les lois qui le gouvernent, mais qu'elle part d'une métaphysique, d'un ensemble d'hypothèses invérifiables et essaye de l'interpréter suivant ces schémas. Il est incontestable que cette approche a mené à de grands succès dans la maîtrise et la compréhension du monde matériel. Cependant, de nombreux exemples en montrent les limites lorsqu'on aborde l'étude de l'homme et des sociétés. A nous de les dépasser !

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Richard P. FEYNMAN : «*Qu'est-ce que la science ?*», in *La Nature de la Physique*, Ed. du Seuil (Paris, 1980).
- [2] Galilée : *Discours concernant deux sciences nouvelles*, Armand Colin (Paris, 1970).
- [3] Michael R. MATTHEWS : «*Science Teaching*», Routledge (New York, 1994).
- [4] Simon GINDKIN : «*Horloges, pendules et mécanique céleste*», Diderot Ed. (Paris 1995).
- [5] A. KOYRÉ : «*Études d'histoire de la pensée scientifique*», Presses Universitaires de France (Paris, 1966). On pourra lire notamment son chapitre «Galilée et Platon».
- [6] M. CLAVELIN : «*La philosophie Naturelle de Galilée*», Armand Colin (Paris, 1968).
- [7] Martin H. KRIEGER : «*Doing Physics*», Indiana University Press (Indianapolis, 1992).
- [8] B. DIU, C. GUTHMANN, D. LEDERER et B. ROULET : «*Physique Statistique*», Hermann (Paris, 1989).
- [9] David L. GOODSTEIN : «*States of Matter*», Dover (New York, 1985).
- [10] P. JENSEN : «*Fabriquer des objets à l'échelle atomique*», La Recherche, **283**, 42 (janvier 1996).
- [11] F. CAPASSO (ed) : «*Physics of Quantum Electronic Devices*», Springer-Verlag (Berlin, 1990).
- [12] P. K. FEYERABEND : «*Adieu la Raison*», Seuil (Paris, 1989).
- [13] B. GUERRIEN in «*L'économie dévoilée*», dirigé par S. LATOUCHE, Ed. Autrement, Collection «Mutations», **159** (Paris, 1995).
- [14] D. E. TROWBRIDGE et L. C. McDERMOTT, Am. J. Phys. **48**, 1020 (1980) ; **49**, 242 (1981).
- [15] J. CLEMENT, Am. J. Phys. **50**, 66 (1982).
- [16] I. A. HALLOUN et D. HESTENES, Am. J. Phys. **53**, 1043 et 1056 (1985).
- [17] S. BARUK : «*Fabrice ou l'école des mathématiques*», Le Seuil (1988).

Max Planck et le concept de quantum d'énergie lumineuse

$$\underline{\epsilon = h\nu.} \quad (1)$$

Max Planck étant en physique un conservateur attaché profondément à la physique classique. C'est à son corps défendant qu'il a introduit en physique le concept révolutionnaire du quantum d'action. L'histoire mérite d'en être contée.

UNIVERSITÉ DE PARIS

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

LABORATOIRE DE PHYSIQUE

PARIS (5^e), 1^{er} 8-2-78

24, RUE LOMOND

TEL : 326-07-25

Chère Madame Pauline,
Je vous retourne la frappe
de mon texte. Je l'ai lu et
corrigé les coquilles de frappe.
Je propose l'addition d'une
phrase au bas de la page 8
pour rendre le texte plus clair.

Veuillez agréer, chère Madame,
l'assurance de mes hauts regards

Alfred Kastler