

Comment améliorer l'image de marque de la Physique auprès des étudiants ?

par Jean SIVARDIÈRE

DRF/SPh/Groupe Magnétisme et Diffusion par Interactions Hyperfines
Centre d'Études Nucléaires de Grenoble
85 X-38041 Grenoble Cedex, France

RÉSUMÉ

Science difficile, la physique est aussi une science difficile à enseigner, et son image de marque auprès du public universitaire est médiocre comme l'indiquent diverses enquêtes récentes. Cette note rassemble des suggestions variées permettant de rendre la physique plus compréhensible et plus attrayante. Ces suggestions concernent surtout le cours magistral et les travaux dirigés : travaux pratiques et évaluations ne sont évoqués qu'accessoirement.

INTRODUCTION

La physique est une science passionnante, tant par ses implications culturelles que par ses applications pratiques. Cependant son image de marque auprès des étudiants n'est pas bonne. Pourquoi ? Deux explications, en partie liées, peuvent être proposées : d'une part la physique est une science intrinsèquement difficile, beaucoup plus que les mathématiques, d'autre part elle est difficile à enseigner. Souvent mal enseignée, elle reste peu compréhensible et peu attrayante, et bien des étudiants la subissent avec passivité.

La physique, une science difficile

L'histoire des sciences met en évidence de manière frappante les rythmes très différents de développement des mathématiques et de la physique. Les mathématiques ont émergé dès l'antiquité. Les assyriens et les égyptiens créent l'algèbre ; les grecs font de la géométrie une doctrine très élaborée et fondent la trigonométrie. Dès 1550, les algébristes italiens - Cardan, Bombelli, Tartaglia - inventent les

nombres complexes. Le contraste est brutal avec la physique qui à la fin du seizième siècle, c'est-à-dire avant l'intervention de Galilée, est encore embryonnaire : mis à part le principe d'Archimède, on ne sait pas grand chose des lois de la nature. La méthode expérimentale est à peine née, le système de Copernic - publié en 1450 - est toujours rejeté. Et il faudra attendre le début du dix-neuvième siècle pour que la structure discontinue de la matière, pressentie par quelques philosophes grecs, devienne une hypothèse scientifique fondée sur des faits expérimentaux.

Ce retard de la physique a des causes variées qu'il est utile d'examiner. Citons en particulier :

– l'imbrication de la physique et de la métaphysique. La métaphysique a d'ailleurs été autant un moteur qu'un frein. C'est par exemple une conception métaphysique de la structure du système solaire qui incita Képler à étudier le mouvement des planètes !

– les difficultés d'observation des phénomènes et des mesures. De nombreuses découvertes n'ont été possibles qu'après une invention expérimentale (lunette d'approche utilisée par Galilée, télescope d'Herschel) ou un progrès des méthodes de mesure (longueur, angle, temps) ou de calcul. Notons cependant que, s'il avait disposé d'observations plus précises, Képler n'aurait pu découvrir ses trois lois, qui ne sont qu'approximatives.

– la complexité des phénomènes physiques. De nombreux paramètres jouent simultanément sur un phénomène et il est souvent difficile d'isoler le paramètre dominant, s'il existe. Il est nécessaire de créer des modèles approchés et de les affiner par approximations successives.

– le caractère parfois trompeur de l'intuition. L'observateur naïf, trompé par des forces de frottement, écrit avec Aristote : $\vec{F} = m\vec{v}$ et non : $\vec{F} = m\vec{a}$ [1]. Il faudra attendre Galilée et Newton pour comprendre qu'un mouvement peut exister sans force. Képler, qui réussit à décrire correctement la cinématique du mouvement des planètes, imaginait encore, pour expliquer ce mouvement, des anges ou des tourbillons magnétiques qui les poussaient sur leurs orbites. Bien des phénomènes échappent à l'intuition : citons seulement les propriétés du gyroscope ou le phénomène de Venturi.

– la nécessité d'un formalisme mathématique élaboré. Pour décrire une nature très complexe, les physiciens ont souvent dû - à commencer par Newton - forger des outils nouveaux, formalisés ultérieurement par les mathématiciens. La physique sans calculs ne va pas très loin : certes le

général Faraday n'écrivait pas d'équations, mais il a bien fallu que Maxwell en écrive quelques-unes pour pouvoir comprendre la nature de la lumière et prédire l'existence des autres ondes électromagnétiques.

La physique une science difficile à enseigner

Science naturelle et science mathématique, combinant expérimentation et théorie, la physique laisse beaucoup d'étudiants insatisfaits malgré sa diversité. Ils la jugent à la fois difficile (plus que les mathématiques) et peu attrayante, voire ennuyeuse :

- trop abstraite, trop formelle, déconnectée des observations de la vie quotidienne (expériences usuelles, phénomènes naturels), éloignée des découvertes et applications modernes, en un mot trop scolaire.
- trop mathématisée, de longues suites de calculs masquant la réalité physique, le formalisme mathématique étant trop cultivé pour lui-même alors qu'il s'agit d'abord d'expliquer des phénomènes (par exemple en relativité restreinte).
- peu rigoureuse, les approximations se faisant de manière «pifométrique», la notion même d'approximation étant assimilée souvent à un tour de passe-passe.
- confuse. La physique apparaît comme une accumulation disparate de connaissances théoriques et expérimentales, sans logique, sans cohérence, sans points de repère. Les difficultés rencontrées pour résoudre exercices et problèmes accentuent cette impression : faute de méthode, de stratégie, l'étudiant avance un peu au hasard, il cherche à appliquer des recettes et des formules, à découvrir l'astuce qui lui donnera la solution.

COMMENT RENDRE LA PHYSIQUE PLUS COMPRÉHENSIBLE ?

Les suggestions que nous développons ci-dessous répondent à plusieurs objectifs généraux : mieux mettre en évidence les phénomènes physiques ; préciser la signification des notions et lois fondamentales ; développer le sens physique ; apprendre à maîtriser l'outil mathématique ; organiser les connaissances.

Montrer les phénomènes

La physique est d'abord une science de la nature, dont certains

chapitres (mécanique «rationnelle», hydrodynamique) ont été trop longtemps enseignés en France par des mathématiciens, contrairement à la tradition anglo-saxonne. Il importe donc en priorité de montrer concrètement les phénomènes auxquels on va s'intéresser. Expériences de cours, photographies, films, simulations numériques, visites de laboratoires et d'usines : les possibilités sont nombreuses mais insuffisamment exploitées. Peu d'étudiants sortant du DEUG ont vu de près un gyroscope ou observé un phénomène de capillarité...

Présenter la physique avant les équations

Prenons un exemple typique : les forces d'inertie. Le plus souvent, on combine la deuxième loi de Newton et la formule de transformation de l'accélération dans un changement de repère, ce qui « fait apparaître » les trois forces d'inertie, ces pseudo-forces mystérieuses qu'il faut ajouter aux forces physiques pour pouvoir appliquer la deuxième loi de Newton dans un repère non galiléen. Le caractère artificiel de cette procédure ne peut être évacué : les forces d'inertie ne sont que des artifices de calcul. Mais il peut être rendu acceptable par l'étudiant si on examine d'abord, dans un repère galiléen, un mouvement simple dont les forces physiques rendent compte aisément, puis ce même mouvement dans un repère non galiléen où ces forces ne suffisent pas à l'expliquer.

Expliciter le contenu physique des grands principes

Les grands principes de la physique - lois de Newton, principes de la thermodynamique,... - sont généralement présentés de manière trop rapide : les conséquences que l'on peut en déduire font l'objet de longs développements, mais leur origine et leur contenu physique restent obscurs pour bien des étudiants. La deuxième loi de Newton, par exemple, signifie qu'un système mécanique n'a aucune mémoire du passé (puisque le mouvement ne dépend que des conditions initiales) [2] : cet aspect est généralement passé sous silence. Il en est souvent de même de la signification physique de la loi d'Avogadro-Ampère.

Expliciter la signification de certaines notions physiques

Comme l'a montré Viard [3] à propos de la température, de la chaleur et de l'entropie, de nombreux étudiants utilisent des notions physiques sans en comprendre la signification, c'est-à-dire de manière purement symbolique et opératoire : «l'énergie, c'est U , l'entropie, c'est S », explique un étudiant interrogé par Viard. D'autres étudiants

ont retenu la formule $dS = dQ/T$, mais (après 5 années d'études universitaires) ne savent ni l'interpréter, ni l'utiliser.

La difficulté ressentie par les étudiants est double. D'une part ils ne savent pas relier entre elles les diverses définitions (mathématique et intuitive, ou encore macroscopique et microscopique) d'une même grandeur qui leur ont été présentées. D'autre part ils ne comprennent pas les relations qui lient certaines grandeurs physiques telles que chaleur et température, ou entropie et température.

Insister sur la mécanique classique

Historiquement la mécanique classique est le point de départ de la physique (Galilée, Newton), et c'est bien à tort qu'elle est enseignée de manière trop rapide malgré ses applications attrayantes (mécanique céleste, mouvement des particules chargées), sans doute plus susceptibles de faire aimer la physique que d'autres sujets. Cette discipline difficile mérite d'être mieux assimilée car elle reste d'actualité (astronautique), elle s'est renouvelée récemment (chaos), et elle est très utile pour aborder les systèmes «modernes» (atome de Rutherford, molécules modélisées par des toupies, effet Coriolis dans les molécules et les noyaux, vibrations des noyaux modélisés par des gouttes liquides).

Enfin une bonne connaissance de la mécanique classique facilite la compréhension de la mécanique statistique (espace des phases), de la mécanique relativiste (relativité galiléenne) et de la mécanique quantique, qui en utilise de nombreux concepts et résultats (puits de potentiel, hamiltonien, lois de conservation, problème de Képler, perturbations, formalisme de Hamilton-Jabobi, modes propres de vibration et nombres quantiques).

Faire apprécier les ordres de grandeur

L'étudiant doit disposer pour chaque grandeur importante (longueur, temps, masse, force, énergie) de quelques points de repère numériques lui permettant d'apprécier la plausibilité d'un résultat, d'adapter l'unité au problème étudié : de discuter le caractère mesurable ou non d'un effet prévu par la théorie, ou encore de justifier une approximation. S'il s'agit par exemple de longueurs, l'échelle utile comprend le fermi (taille du noyau), l'ångström (atome), le micron (objets mésoscopiques), le mètre (objets macroscopiques), le kilomètre

(distances géographiques), l'unité astronomique (système solaire) et l'année-lumière (univers).

On peut donner des illustrations physiques de bien d'autres unités usuelles : l'énergie cinétique d'une pomme qui tombe d'un arbre quand elle arrive au sol est de l'ordre du joule ; le flux d'énergie solaire reçu par la Terre est d'environ 10 watts/cm^2 .

La notion même d'ordre de grandeur peut se discuter sur le cas de grandeurs mal définies telles que les rayons du noyau, de la terre, de l'univers. Il importe aussi d'habituer l'étudiant à apprécier, avant toute application numérique à la calculatrice, l'ordre de grandeur du résultat en effectuant un calcul numérique grossier (en prenant par exemple $g = \pi^2 = 10$), afin d'éviter une éventuelle erreur de lecture, et surtout de juger de la plausibilité du résultat et de son caractère mesurable ou non.

Faire expérimenter

Les travaux pratiques traditionnels sont des exercices nécessaires mais souvent artificiels. Ils permettent à l'étudiant de se familiariser avec les techniques usuelles de mesure et de traitement des données, mais ils ne lui donnent guère l'occasion d'exercer son imagination et de découvrir par lui-même, puisqu'il s'agit pour lui de vérifier des résultats bien connus suivant une démarche en grande partie imposée.

On peut imaginer des travaux pratiques plus ouverts, demander par exemple à l'étudiant d'appréhender un phénomène, ou de mesurer une propriété d'un système, en mettant à sa disposition un mini-laboratoire, ce qui l'obligerait à mettre au point une stratégie personnelle. Mais une telle initiative suppose des moyens matériels importants et un personnel d'encadrement très disponible, sans doute difficiles à mobiliser.

Enseigner la physique expérimentale

Sans présenter un véritable cours de physique expérimentale, on peut aiguïser le sens physique de l'étudiant en discutant une expérience célèbre de la physique : mesure de la constante de Newton (Cavendish et Boys), déviation de la chute d'un corps par rapport à la verticale (Flammarion) [4], identité des masses inertielle et gravitationnelle (Oetvös). Quelles sont les causes d'erreur ? Quelle est la précision de la mesure ? L'expérience constitue-t-elle un test significatif de la

théorie ? L'anharmonicité du mouvement d'un pendule est une cause de précession, mais son influence est négligeable devant celle de la rotation terrestre, qui est donc bien démontrée par l'expérience de Foucault.

Donner des problèmes qualitatifs

Pourquoi une bulle de savon explose-t-elle ? Que se passerait-il s'il existait des masses négatives ? Comment varie la résistance équivalente à un ensemble de résistances si on fait varier l'une d'elles [5] ? Le temps de chute d'un corps dépend-t-il de la composante horizontale de la vitesse initiale ? Que se passerait-il si une constante universelle - h , c ou G - était multipliée par 1000 ? Comment le Mississippi peut-il s'écarter du centre de la terre quand il s'écoule de sa source vers la mer ? Pourquoi une orbite planétaire est-elle fermée en l'absence de perturbations (il n'y a ni précession ni capture) ? Face à de tels problèmes, l'étudiant ne peut éviter de réfléchir aux mécanismes physiques, il ne peut pas écrire bien vite une équation et se réfugier dans les calculs [6].

On peut aussi lui proposer l'étude de phénomènes complexes qu'il s'agira de modéliser, par exemple le phénomène de convection de Rayleigh-Bénard : de quels paramètres physiques dépend l'écart critique de température entre les deux surfaces limitant le fluide ? On peut aussi proposer des problèmes dans lesquels certaines informations nécessaires à leur résolution ne sont pas données ou contenant au contraire des informations inutiles, ou encore faire imaginer par l'étudiant une application numérique.

Discuter les grandeurs caractéristiques des systèmes

Un oscillateur est caractérisé par deux temps : sa période T et son temps τ de relaxation : la valeur de leur rapport détermine le régime, hypo- ou hypercritique, du mouvement. Si l'oscillateur est un atome de Rutherford, $T = 10^{-16}$ s et $\tau = 10^{-10}$ s, le régime est hypocritique très peu amorti. Dans le cas d'un noyau radioactif, on peut comparer sa période radioactive T et la période $\tau \approx 10^{-22}$ s d'oscillation d'un nucléon de plusieurs MeV à l'intérieur du noyau : si T est beaucoup plus grand que τ , le noyau est très stable.

Lorsqu'une onde électromagnétique interagit avec une cible, il faut comparer sa longueur d'onde avec une dimension caractéristique de la

cible (taille de la cible, période spatiale) pour savoir s'il y aura diffraction. Considérons de même l'ascension d'un liquide dans un tube capillaire de rayon r : elle n'est notable que si r est très inférieur à la longueur capillaire du fluide, longueur caractéristique du fluide en présence du champ de pesanteur.

Présenter physiquement les outils mathématiques

Venons-en au formalisme mathématique, redouté des étudiants. Il ne s'agit pas de l'évacuer, car il est partie intégrante de la physique, mais de mieux le présenter et de mieux l'utiliser afin de vaincre chez l'étudiant la peur des mathématiques.

Les étudiants connaissent beaucoup de mathématiques, beaucoup plus que leurs professeurs au même âge, mais ils arrivent difficilement à mobiliser leurs connaissances, trop abstraites, quand ils font de la physique. Il est donc souhaitable de leur enseigner des mathématiques «concrètes», plus appliquées, plus opérationnelles, en mettant l'accent sur les motivations géométriques et physiques et non la rigueur mathématique. Le professeur a tout intérêt à prendre le temps de développer un véritable exposé de mathématiques pour physiciens.

1 – Les connaissances des étudiants en géométrie sont notoirement insuffisantes : le physicien a besoin de dominer par exemple les propriétés différentielles des courbes (courbure, torsion) et des surfaces (rayons de courbure), et de bien connaître un certain nombre de courbes et de surfaces usuelles (coniques et quadriques, cycloïdes). Les propriétés de l'ellipse (excentricité) peuvent être illustrées à l'aide des sections méridiennes des planètes et de leurs orbites autour du Soleil [7]. De même les solutions des équations différentielles peuvent être illustrées à l'aide de leurs courbes intégrales. L'étudiant doit acquérir une bonne vision dans l'espace à trois dimensions.

2 – Les notions mathématiques ne doivent pas être parachutées à travers des définitions abstraites, mais introduites à partir de situations géométriques et physiques concrètes, selon la démarche historique. C'est le cas, en particulier, des différentielles [8], des développements de Taylor, ou encore des opérateurs différentiels. La divergence et le rotationnel s'introduisent logiquement à partir de situations hydrodynamiques simples (source et tourbillon) [9]. Le laplacien, suivant le point de vue, bien oublié, de Maxwell lui-même, est proportionnel à

l'anomalie locale (différence entre la valeur d'une fonction en un point et sa valeur moyenne dans le voisinage du point).

Guider les calculs par la physique

Il est utile de montrer que les calculs ne sont jamais conduits au hasard, mais sont sans cesse inspirés par des considérations physiques, et que les résultats mathématiques (ou les signes qui affectent les grandeurs : forces, déplacements,...) sont toujours interprétables physiquement. Si par exemple on résout l'équation différentielle de l'oscillateur harmonique, la solution particulière donne la position d'équilibre, la solution générale décrit l'oscillation.

Comparer les méthodes de calcul

Souvent l'étudiant ne sait quelle méthode de calcul privilégier dans la résolution d'un problème. Il est donc intéressant de faire observer que plusieurs démarches permettent d'aboutir au même résultat, et de mettre en évidence la méthode la plus simple, la plus systématique, la plus puissante. Ainsi si on étudie le mouvement (ou l'équilibre) d'une masse ponctuelle sous l'action de forces à circulation conservative, on peut utiliser la deuxième loi de Newton, ou bien la loi de conservation de l'énergie, ce qui est plus simple car on manipule alors des scalaires et non des vecteurs et, dans le cas du mouvement, on aboutit à une équation différentielle d'ordre un seulement. Dans le cas du mouvement de Képler, on peut soit utiliser les formules de Binet, obtenues à partir de la deuxième loi de Newton, soit combiner les lois de conservation du moment cinétique et de l'énergie, soit appliquer les équations de Hamilton, soit exploiter l'invariance du vecteur de Laplace. Cette dernière méthode est la plus puissante puisqu'elle fournit l'équation de l'orbite sans intégration [10].

On peut calculer un champ électrique (magnétique) à partir de la loi de Coulomb (Biot et Savart), ou utiliser le théorème de Gauss (Ampère), ou encore déterminer d'abord le potentiel scalaire (vecteur). Un mouvement peut s'étudier dans plusieurs repères : celui du pendule de Foucault dans un repère galiléen, dans un repère lié à la terre, ou encore dans un repère tournant à une vitesse angulaire telle que la force de rappel et la force d'inertie centrifuge s'annulent [11] ; l'effet Zeeman dans le repère du laboratoire ou dans le repère de Larmor ; le mouvement d'une charge soumise à des champs électrique et magnétique dans le repère du laboratoire ou dans un repère où l'un des deux

champs disparaît. La précession d'une ellipse de Képler peut être calculée à l'aide du vecteur de Laplace ou par une méthode de perturbations.

Justifier et discuter les approximations

Une approximation n'est pas une astuce mais une opération logique, imposée par la réalité physique et possédant un domaine précis de validité [12] : sur une même équation, plusieurs approximations peuvent être envisagées suivant que tel coefficient de couplage est fort ou faible, ou plus généralement que telle grandeur sans dimension, rapport de 2 grandeurs caractéristiques du système étudié, est très supérieure ou très inférieure à l'unité.

Il est particulièrement intéressant de comparer les résultats d'une théorie exacte (dans le cas où on sait résoudre les équations) et ceux d'une théorie approchée, afin de chiffrer l'impact de l'approximation effectuée. Ainsi la déviation de Rutherford peut être obtenue exactement (trajectoire hyperbolique) ou par l'approximation impulsion ; la précession d'une orbite de Képler (dans le cas d'un potentiel perturbateur en $1/r^2$) peut être obtenue exactement ou par l'approximation adiabatique, de même que le mouvement du pendule de Lorentz ; la précession d'une orbite électronique dans un champ magnétique peut être déterminée numériquement ou par l'approximation de Larmor ; la chute d'un corps dans un repère terrestre peut être étudiée en résolvant exactement les équations du mouvement ou en négligeant la composante horizontale de la vitesse dans le calcul de la force d'inertie de Coriolis.

Apprendre à modéliser

Les grands modèles de la physique permettent de faire comprendre la démarche du physicien, qui travaille par approximations successives (gaz parfait, gaz de Van der Waals, développement du viriel, ou encore : terre sphérique, aplatie, en rotation sur elle-même), en dégageant une situation idéale et des perturbations (Soleil et planète formant un système isolé, et perturbations planétaires).

Mais on peut faire apprécier cette démarche sur des problèmes plus élémentaires, par exemple la chute d'un corps, ou la vidange d'un réservoir (expérience de Toricelli) : l'étudiant recherchera les variables dont dépend la vitesse d'éjection du liquide (sections du réservoir et du

tuyau de vidange, hauteur du liquide dans le réservoir, viscosité,...), écartera celles dont l'influence est faible a priori, écrira alors une équation qui sera résolue exactement ou de manière approchée, puis réintroduira certaines variables provisoirement négligées après avoir comparé son résultat à l'expérience.

Apprendre à vérifier

L'étudiant manque souvent de confiance en soi. Pour l'aider à en acquérir, il est souhaitable de lui apprendre à vérifier systématiquement ses résultats [13]. Les méthodes suivantes peuvent être mises en œuvre : retrouver le résultat par une autre méthode (par exemple en se plaçant dans un autre repère) ou par un calcul approché ; vérifier l'ordre de grandeur et le signe du résultat ; vérifier que la formule obtenue est homogène tensoriellement et dimensionnellement, et relie bien entre elles deux grandeurs se transformant de la même manière quand on renverse l'orientation de l'espace ou du temps ; faire varier un paramètre du problème (coefficient de frottement, température, champ extérieur) pour se ramener à un cas particulier dont la solution est simple et bien connue.

Apprendre à prévoir

L'étudiant doit être incité à réfléchir avant de se lancer dans les calculs, c'est-à-dire à comprendre les phénomènes physiques. Mais il doit aussi disposer de deux techniques mathématiques de prévision : l'analyse dimensionnelle, basée sur l'invariance d'échelle et la symétrie.

Ces techniques sont rarement enseignées de manière systématique malgré leur simplicité et leur efficacité. L'analyse dimensionnelle utilise les notions de grandeurs pertinentes, grandeurs réduites, grandeurs fondamentales indépendantes, le théorème π et l'argument de Jeans-Einstein permettant d'évaluer un ordre de grandeur dans le cas où il existe une seule grandeur réduite. On peut alors déterminer la forme a priori des lois physiques et examiner les problèmes les plus variés, du théorème de Pythagore à la vitesse des vagues et à la pression au centre de la terre.

Quant à la symétrie, on ne peut se borner aux très imprécises «considérations de symétrie» évoquées çà et là dans les ouvrages de physique. Il faut exposer le principe de Curie mais il est inutile, dans

une première approche, d'introduire la théorie algébrique des groupes et les représentations matricielles. Le principe de Curie est particulièrement utile en mécanique : il permet souvent de prévoir si un mouvement est plan ou rectiligne, ce qui simplifie considérablement les équations du mouvement. Combiné avec les théorèmes de Gauss et d'Ampère (et aussi avec l'analyse dimensionnelle), il permet de déterminer aisément les champs créés par les répartitions symétriques de charges et de courants.

Enseigner des méthodes

D'une manière générale, il est sans doute souhaitable d'enseigner moins de faits et de théories, et de mettre davantage l'accent sur les méthodes de travail du physicien [14] : méthodes prévisionnelles exploitant les grands principes (invariance d'échelle, principe de symétrie de Curie, les trois principes de la thermodynamique macroscopique réversible, principe d'Onsager de la thermodynamique irréversible, principe de causalité) ; maniement des ordres de grandeur ; méthodes d'approximation (recherche de quantités négligeables, linéarisations) ; analogies ; enfin méthodes de vérification.

Certaines de ces méthodes sont directement utilisables par l'étudiant et facilitent la résolution des exercices et problèmes, dont la difficulté est une source fréquente de découragement.

Clarifier et structurer les connaissances

Les étudiants éprouvent souvent le besoin de classer leurs connaissances, ce qui facilite la compréhension et en même temps soulage la mémoire. Diverses possibilités peuvent leur être offertes, par exemple : classer les grandeurs physiques suivant leur dimension (grandeurs géométriques, cinématiques, mécaniques, électriques, thermiques) ; classer les états de la matière suivant leur symétrie (états amorphes et ordonnés suivant une, deux ou trois dimensions).

La notion de produit tensoriel de deux vecteurs permet d'unifier les notions de produit scalaire et de produit vectoriel, ou encore celles de divergence et de rotationnel. Le théorème de Bertrand permet de donner une vue d'ensemble des mouvements dans un champ central : l'orbite n'est fermée, et c'est alors une ellipse, que pour les mouvements harmonique et képlérien ; une perturbation du champ harmonique ou képlérien provoque une précession de l'orbite. Le théorème de

Noether permet de relier les lois de conservation (quantité de mouvement, moment cinétique, énergie) à une propriété de symétrie continue dans l'espace ou dans le temps, et d'introduire les invariants dynamiques tels que les vecteurs de Laplace et de Landau [15].

Les comparaisons permettent de mieux saisir l'originalité de certaines situations physiques. On peut ainsi comparer utilement le mouvement harmonique et le mouvement képlérien à deux ou trois dimensions, ou encore les différents types de gaz rencontrés dans la nature : gaz moléculaire, gaz électronique des solides conducteurs, gaz de nucléons (noyau, étoile à neutrons, gaz de neutrons thermiques) et, pour chacun d'eux, étudier le rapport énergie cinétique/énergie potentielle.

Les analogies entre phénomènes physiques distincts mais susceptibles d'une même description mathématique sont également très structurantes et peuvent être développées systématiquement : gravitation et électrostatique ; électromagnétisme et hydrodynamique (analogies entre singularités : charge et source, courant et tourbillon) ; phénomènes de transport (lois d'Ohm, de Fick, de Fourier) ; force de Coriolis et de Lorentz ; oscillations mécaniques et électriques ; phonons, librons et magnons.

Enfin il faut insister sur les conditions de validité des principes, théories et approximations utilisés. Ainsi le principe de symétrie de Curie n'est applicable que si la solution du problème est unique.

Donner une vision unifiée de la physique

On peut chercher à unifier les connaissances des étudiants, afin que la physique leur apparaisse bien comme une construction cohérente, et non comme la juxtaposition de doctrines indépendantes (mécanique, acoustique, chaleur, électricité, optique...) qu'elle était encore il y a 150 ans. Ainsi la distinction traditionnelle entre cours de mécanique (y compris la gravitation) et d'électricité devrait disparaître : même si elle reflète l'évolution historique, elle est aujourd'hui artificielle et dangereuse, et induit les étudiants en erreur. Ce sont en effet les différentes interactions (gravitationnelles, électriques, magnétiques, nucléaires) qui peuvent être mises sur pied d'égalité, et non les lois de Newton d'une part, les lois de Maxwell d'autre part.

De même les unifications qui ont pu être réalisées entre théories

initialement bien distinctes doivent être soulignées : unifications entre mécanique céleste et terrestre (Newton), entre électricité et magnétisme (Faraday), entre électromagnétisme et optique (Maxwell), entre électrodynamique et théorie des interactions faibles (Weinberg, Salam et Glashow).

L'existence de nombreuses analogies permet enfin d'enseigner des classes de phénomènes : champs newtoniens (qui vérifient le théorème de Gauss), vibrations, ondes, phénomènes de transport, excitations élémentaires, propriétés communes aux systèmes linéaires (superpositions des solutions).

COMMENT RENDRE LA PHYSIQUE PLUS ATTRAYANTE ?

Sans prétendre être exhaustif, nous présentons ici quelques pistes insuffisamment exploitées dans les cours pour rendre la physique plus concrète et plus vivante.

Désencombrer la physique

Il est nécessaire d'élaguer le formalisme stérile ($m \in \mathbb{R}^+$ pour dire que la masse est un scalaire positif) ou inutilement compliqué, au moins dans une première approche (les torseurs en mécanique des solides indéformables, le formalisme de Minkowski en relativité restreinte), les exemples trop académiques, les calculs «taupinesques» (évaluer le champ magnétique d'un courant parcourant un polygone régulier de n côtés), certaines techniques trop spécialisées (le théorème de Thévenin ?), ou encore certains aspects vieillots de l'électrostatique.

De même, il est difficile de montrer, dans un cours élémentaire de mécanique, comme Newton a pu retrouver les lois de Képler à partir de sa loi sur la gravitation. Le mouvement des planètes, dont l'attrait est évident, peut cependant être abordé en exposant les lois de Képler et en en déduisant, ce qui est élémentaire, l'expression du potentiel de gravitation.

Mieux illustrer la physique

L'enseignement doit davantage s'appuyer sur les observations de la vie quotidienne et les expériences usuelles, en particulier en mécanique des solides et des fluides : saut à la perche ou marche sur

l'erre du TGV (conservation de l'énergie), propagation de la chaleur, capillarité, phénomène de Venturi, diffusion de polluants, propriétés gyroscopiques de la bicyclette,... Le sport, la musique, l'artillerie, la biophysique, la médecine [16] fournissent de nombreux exemples concrets attrayants (saut à la perche, notes harmoniques, gamme tempérée, corrections de tir, balistocardiographie, structure des os, surfactant pulmonaire, circulation du sang et loi de Poiseuille, circulation de la sève,...).

Il en est de même des grandes réalisations techniques modernes : avions, fusées, satellites artificiels, sonde interplanétaire, grandes souffleries, réacteurs nucléaires, microscope électronique.... On peut souligner à l'inverse l'impact des découvertes inattendues sur le développement de la physique : la lunette utilisée par Galilée a permis de découvrir les satellites de Jupiter, de conforter le système de Copernic et d'obtenir une première évaluation de la vitesse de la lumière (Roemer) ; c'est par hasard que K. Onnes a découvert la supraconductivité du plomb [17].

Les notions mathématiques elles-mêmes sont susceptibles d'illustrations variées et intéressantes, en particulier les équations différentielles : cascades radioactives, démographie, systèmes proie-prédateur (problème de Lotka-Volterra).

Décrire les phénomènes naturels

Les phénomènes naturels - géophysiques, atmosphériques, astronomiques - passionnent généralement les étudiants. Ainsi la conservation du moment cinétique peut être illustrée par la variation de la vitesse de rotation de la terre avec son moment d'inertie (déplacements saisonniers des masses d'air, de la calotte glaciaire et de la végétation, déplacements des continents, tremblements de terre). La notion de repère non galiléen peut être illustrée par l'influence géophysique de la force d'inertie centrifuge (aplatissement de la terre, direction de la verticale, variation de g avec la latitude) et de la force d'inertie de Coriolis (vents, cyclones, loi de Baer, dérive des icebergs, transport d'Ekman).

La théorie de la gravitation est elle aussi l'occasion de présenter des exemples séduisants (phénomènes de Roche, structure des anneaux de Saturne, marées résonnantes), de même que l'électrostatique (pro-

piétés de l'atmosphère, foudre) et l'optique (arc en ciel, couleur du ciel).

Décrire des phénomènes complexes

Il est parfois possible de décrire des phénomènes complexes à l'aide de modèles simples : précession des orbites planétaires, mouvement des électrons dans la ceinture de Van Allen (miroirs magnétiques, aurores boréales), contraction gravitationnelle du soleil (modèle de Helmholtz et Thomson), interaction lumière-atome (modèle de Thomson), freinage de la rotation de la terre par la lune, transitions de phase du premier et du second ordre (modèles mécaniques).

Faire calculer numériquement

La généralisation des micro-ordinateurs programmables en BASIC permet d'aborder des problèmes complexes attrayants dont les équations descriptives sont faciles à écrire mais ne peuvent être résolues exactement (équations non linéaires) [18, 19]. L'étudiant peut réaliser des simulations numériques et par exemple, comme le suggère Feynman dans son célèbre cours, étudier le mouvement des planètes et «découvrir» la loi des aires.

Exploiter les expériences historiques

Les expériences célèbres de la physique peuvent être utilisées pour construire des problèmes non académiques mais accessibles à l'étudiant moyen et permettant des commentaires attrayants : expériences de Cavendish et Boys ; expériences de Reich et Flammarion sur la déviation de la chute des corps vers l'est (interprétation par la loi des aires dans un repère galiléen, influence de la résistance de l'air, déviation vers le sud) ; expériences de Foucault, d'Oertvös, de Millikan, de Rutherford, de Trouton et Noble, de Tolman et Stewart,...

Exploiter les modèles historiques

Plutôt que de proposer des exercices académiques, mieux vaut utiliser certains modèles historiques qui, même s'ils sont périmés, conservent un certain attrait. C'est le cas du modèle atomique de Thomson, source d'exercices variés d'électrostatique et de mécanique (anneaux électroniques).

Enseigner l'histoire de la physique

On peut, sans entrer dans les détails, présenter les grandes étapes de l'évolution de la physique, quelques noms et quelques dates servant de points de repère [20]. Cette démarche, généralement appréciée des étudiants, présente un intérêt culturel évident, qu'il s'agisse de l'évolution des idées en physique ou de l'influence de la physique sur la philosophie (les révolutions introduites par Copernic, Einstein, de Broglie). Elle favorise aussi la compréhension et la mémorisation des phénomènes et des théories.

Dans le même esprit, on peut donner quelques informations sur l'histoire des mathématiques, étroitement liée à celle de la physique : bien des étudiants croient que les nombres complexes sont une invention du vingtième siècle.

Montrer l'intérêt du formalisme mathématique

Le formalisme mathématique ne sert pas seulement à décrire les phénomènes connus : il joue un rôle spécifique dans la découverte. Quelques exemples bien choisis permettent de susciter l'intérêt des étudiants pour ce qu'ils considèrent trop souvent comme un mal nécessaire : prévision de l'existence des ondes électromagnétiques à partir des équations de Maxwell, invention des ondes de de Broglie à partir des analogies entre mécanique et optique dans le formalisme de Hamilton-Jacobi, prévision de l'existence des antiparticules à partir de l'équation de Dirac.

Enseigner la physique moderne ?

Actualiser l'enseignement de la physique est indispensable, mais il n'est pas souhaitable pour autant d'aller trop vite en besogne et de déflorer (sans pouvoir les approfondir) les théories modernes - relativité et mécanique quantique - sous prétexte d'intéresser les étudiants :

1 – Ces théories font peu appel à l'intuition, elles exigent un formalisme mathématique délicat, et leur compréhension en profondeur suppose bien connue la physique classique.

2 – La physique classique permet d'aborder bien des problèmes modernes : mouvement des particules chargées (cyclotron, ceintures de Van Allen), structure de l'atome (expérience de Geiger-Marsden), modèle de la goutte liquide pour le noyau,...

3 – De nombreuses découvertes ou notions récentes peuvent être

évoquées dans le cadre de la physique classique : découverte de Charon, le satellite de Pluton (problème de la dixième planète), chaos (sensibilité aux conditions initiales), bifurcations et brisures spontanées de symétrie, cristaux liquides et quasi-cristaux, points tricritiques des fluides, objets fractals,...

4 – Si on tient à la mécanique quantique, on peut se contenter, dans un premier temps, de la mécanique de Bohr-Sommerfeld-Wilson qui constitue une bonne introduction aux concepts quantiques (quantification, dégénérescence, perturbations). Loin d'être une simple curiosité historique, cette théorie valorise les connaissances acquises en mécanique classique puisque l'adjonction des règles de quantification rend accessible une grande variété de phénomènes nouveaux (atome, molécule, solide) ; elle constitue une bonne approximation de la théorie rigoureuse aux grands nombres quantiques et reste d'actualité (atome de Rydberg). Quant à la relativité, l'analyse de quelques résultats expérimentaux (mouvement de Mercure, expériences de Michelson-Morley et Trouton-Noble) peut suffire à démontrer les limites de la théorie classique.

Donner un enseignement moins déductif

Trop souvent un cours expose, de manière aride, une théorie puis ses applications : c'est le cas de la mécanique quantique, dont l'exposé axiomatique a souvent un caractère caricatural. Cette méthode laisse de côté la manière dont, historiquement, les idées théoriques sont nées : intuition à partir d'une observation fortuite, induction à partir d'un ensemble d'expériences, généralisation, analogie, échec d'un modèle précédent.

Une approche qualitative et historique permet de faire sentir à l'étudiant que l'exposé formel et déductif d'une théorie ne correspond pas nécessairement à la démarche suivie, souvent péniblement, par ses découvreurs : « les scènes d'un film sont rarement tournées dans l'ordre qui apparaît à la projection ». Il est également intéressant de montrer que l'induction d'une loi à partir de faits expérimentaux n'a rien d'automatique et que la démarche hypothético-déductive est la plus fréquente [21].

Montrer la physique en marche

Comme toute science, la physique n'établit qu'une vérité provisoire, et il faut faire passer l'idée que sa construction n'est jamais figée.

Outre l'approche historique de chaque sujet et la mise en évidence des limites des théories classiques, on peut aussi envisager :

1 – l'étude approfondie de sujets spécialisés (équations d'état des gaz, gravité terrestre) ayant donné lieu à un modèle initial affiné peu à peu.

2 – la présentation qualitative de modèles successifs d'une même réalité : structure de l'atome (atome de Thomson toujours valable pour les atomes muoniques lourds, atome de Rutherford [22], atome quantique), mouvement de Mercure (hypothèse d'une planète intramercurielle, hypothèse de Hall, relativité générale) [23], nature de la lumière,...

3 – la discussion d'idées fausses, de controverses, de paradoxes (le fluide calorique, la force vive, la théorie de l'impetus [24], l'écoulement du Mississipi, la cinquième force). Les difficultés rencontrées autrefois par les physiciens le sont souvent par les étudiants d'aujourd'hui, d'où l'intérêt de leur analyse [25-28].

Le cas de phénomènes, tels que la réfraction de la lumière, explicables par plusieurs modèles (temps minimum de propagation de la lumière) est particulièrement intéressant. Le rapport théorie-expérience mérite aussi discussion : une observation imprécise ou mal interprétée peut conforter un modèle faux ou approché (lois de Képler), ou même amener à rejeter un modèle juste.

Mettre en contact avec la littérature scientifique

Trop souvent l'étudiant français ne lit que des notes de cours, ou des cours «traditionnels» visant davantage à le préparer à des examens ou concours qu'à lui faire découvrir et aimer la physique. Il est important de l'inciter à consulter des livres de «vraie physique» (les ouvrages de Alonson et Finn ou de French, par exemple), des articles de mise au point choisis dans *American Journal of Physics*, *European Journal of Physics* ou le *Bulletin de l'Union des Physiciens*, des revues scientifiques telles que la *Recherche* ou *Pour La Science* qui décrivent les découvertes modernes, ou encore des ouvrages d'histoire de la physique.

Développer la curiosité et l'esprit d'invention

Il est souhaitable de réduire les horaires d'enseignement traditionnel afin de renforcer le travail personnel des étudiants : par des lectures et des recherches bibliographiques (étude d'expériences historiques) ;

par des questions exigeant une réflexion personnelle (fonctionnement d'appareils usuels, explication de phénomènes naturels) ; par des suggestions d'expérimentations n'exigeant pas de matériel sophistiqué, ou de simulations numériques.

Éviter l'encyclopédisme

Il est tentant de présenter des cours surchargés d'informations, mais qui submergent l'étudiant et le découragent. Mieux vaut suivre le conseil de G. Friedel [29] : «le but de l'enseignement doit être moins d'instruire que d'éduquer et de faire réfléchir ; moins d'entasser des connaissances que d'apprendre à en digérer quelques-unes ; moins de glisser sur les difficultés que de les mettre en lumière ; moins de laisser croire à l'infailibilité des méthodes en usage et à la certitude des résultats que d'en montrer les points faibles et de cultiver ainsi l'esprit de critique et de libre examen, base nécessaire de l'esprit de recherche».

CONCLUSION

Qu'il s'agisse de rendre la physique plus compréhensible ou plus attrayante, il apparait nécessaire d'une part d'enseigner à l'étudiant les méthodes spécifiques du travail du physicien et de l'amener à réfléchir sur la nature de la physique, d'autre part de le mettre davantage au contact de la réalité physique. Ainsi la physique lui apparaîtra non plus comme une collection confuse de résultats - voire comme une simple branche des mathématiques -, mais comme une science originale cohérente et passionnante.

Je remercie mes nombreux collègues, enseignants et chercheurs, qui m'ont aidé à préciser mes idées sur l'enseignement de la physique, et plus particulièrement G. Torchet, J.L Oddou, M. Serrero et J. Viard.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G.D. GOERING, Am. J. Phys. 48, 82 (1980)
- [2] L. VIENNOT, La Recherche 72, 983 (1976)
- [3] J. VIARD. Essai d'évaluation d'un enseignement de thermodynamique, rapport non publié, Grenoble (1987)

- [4] C. FLAMMARION, Bull. Soc. Astr. Fr. 17, 329 (1903)
- [5] J.M. DUSSEAU, Colloque Athena, Montpellier (1989)
- [6] J.M. LEVY-LEBLOND, La physique en questions - Mécanique, Vuibert, Paris (1980)
- [7] J. SIVARDIERE, Bulletin du CUIDE 29, 55 (1986)
- [8] M. ARTIGUE, J. MENIGAUX, L. VIENNOT, Questionnaire sur les différentielles, Université Paris 7 (1989)
- [9] J. SIVARDIERE, B.U.P. 719, 1417 (1989)
- [10] P. COLLAS, Am. J. Phys. 38, 253 (1970)
- [11] J. SIVARDIERE, non publié
- [12] M.G. RUSHBRIDGE, S.F. DARLOW, I.H. HALL, Eur. J. Phys. 1, 3 (1980)
- [13] M. SERRERO, B.U.P. 699, 1237 (1987)
- [14] J. SIVARDIERE, Colloque Athena, Montpellier (1989)
- [15] J. SIVARDIERE, Eur. J. Phys. 9, 61 (1988)
- [16] A.H. CROMER, Physics for life sciences, Mc Graw Hill, New-York (1977)
- [17] A. GUINIER, Conférence donnée au National Physical Laboratory, New Delhi (1989)
- [18] J.P. SARMANT, B.U.P. 657, 103 (1983)
- [19] H.M. STAUDENMAIER, Eur. J. Phys. 3, 144 (1982)
- [20] R. LOCQUENEUX, Histoire de la physique, Collection Que Sais-je ? n°421, PUF, Paris (1987)
- [21] G. ROBARDET, B.U.P. 720, 17 (1990)
- [22] S. TOMONAGA, Quantum Mechanics, North Holland, Amsterdam (1962)
- [23] N.T. ROSEVEARE, Mercury's perihelion from Le Verrier to Einstein, Clarendon Press, Oxford (1982)
- [24] M. Mc CLOSKEY, Pour la Science (juin 1983)
- [25] J. CLEMENT, Am. J. Phys. 50, 66 (1982)
- [26] Mc DERMOTT, Physics Today (juillet 1984)
- [27] L. VIENNOT, B.U.P. 716, 951 (1989)
- [28] A. LOUNIS, B.U.P. 721, 205 (1990)
- [29] G. FRIEDEL, Leçons de cristallographie, Blanchard, Paris (1964)