Peut-on enseigner l'épistémologie dès le début de l'enseignement de la physique ?

par **François BASTIEN**
25000 Besançon
francois.bastien6@wanadoo.fr

Cet article pose le problème de l'extension de l'épistémologie dans le cadre de l'enseignement de la physique. Ces éléments d'épistémologie portent sur la méthode scientifique, la différence entre langage commun et langage scientifique, les limites intrinsèques de la science, la différence entre science et croyance et les limites de la connaissance scientifique. Les relations entre les théories, les modèles et l'expérience ne sont pas directement abordées, malgré leur importance, car souvent discutées par ailleurs. Il s'agit de présenter des possibilités et non de donner des réponses fermes et définitives.

INTRODUCTION

Les façons d'enseigner la physique

Avant d'aborder la question de l'extension de l'enseignement de l'épistémologie, nous ne ferons pas de comparaison détaillée entre les méthodes d'enseignement de la physique. Le lecteur pourra se reporter au *Bup* n° 1000, en particulier à l'article sur l'évolution des programmes de physique en classe de lycée d'enseignement général [1]. Cependant, d'une façon quelque peu simplificatrice, nous dirons quelques mots sur trois façons d'envisager d'enseigner la physique que l'on peut caractériser comme suit :

- une préparation aux études supérieures dans des domaines réduits, mais cohérents, l'usage des mathématiques étant conseillé ;
- un enseignement de type « technique », l'apprentissage de procédures étant primordial ;
- un enseignement « général » de la science dont le but principal est de décrire « la nature de l'esprit scientifique ».

La méthode n° 1 est celle d'une tradition dogmatique. Elle traite avec précision de domaines limités comme l'optique géométrique dans l'approximation de faibles angles. Elle insiste très peu sur les limites du domaine considéré. À titre d'exemple, voir en annexe 1, quelques remarques sur deux livres anciens appliquant cette méthode. Elle n'est plus adaptée aux élèves actuels et elle n'est plus généralisable étant donné la très faible proportion d'élèves qui deviendront étudiants en physique ou dans un domaine proche.

L'enseignement technique présente la possibilité de restreindre les réflexions sur les concepts et d'insister sur des procédures précises. La méthode de type technique peut se permettre de définir la tension électrique comme étant ce que mesure le voltmètre et l'intensité du courant ce que mesure l'ampèremètre. Cependant, les concepts abstraits restent utiles dans certains cas.

La méthode n° 3 peut se faire à différents niveaux. Elle privilégie en général l'étude par thème, par exemple le phénomène ondulatoire. On peut se demander si l'étude de quelques points d'épistémologie ne serait pas utile, en corrélation avec l'histoire des sciences préconisée par les instructions officielles (cf. encadré ci-dessous).

> ***Bulletin Officiel de l'Éducation nationale***
> *Programme de physique-chimie de terminale générale*
> [Bulletin du 25 juillet 2019[1] - Spe249_annexe1158929.pdf]
>
> *Dès qu'elle est possible, une mise en perspective des savoirs avec l'histoire des sciences et l'actualité scientifique est fortement recommandée. En particulier, les limites des modèles étudiés en classe peuvent être abordées, ce qui peut offrir l'occasion d'évoquer des théories plus récentes, comme la physique quantique ou la relativité, que les élèves pourront être amenés à approfondir dans le cadre de leurs études supérieures. Le recours régulier à des « résolutions de problèmes » est encouragé, ces activités contribuant efficacement à l'acquisition des compétences de la démarche scientifique et au développement de l'autonomie et de l'initiative.*

C'est une intéressante incitation à parler de l'histoire des sciences, mais la limite des modèles évoqués dans cette citation concerne les limites de certaines théories et pas les limites intrinsèques de la science ou les limites de la connaissance scientifique. En dehors de l'enseignement technique, la troisième méthode devient prépondérante. Il est donc utile de voir si on peut la compléter par des éléments d'épistémologie en conjugaison avec l'histoire de la science.

1. ÉPISTÉMOLOGIE

L'épistémologie est l'étude critique des sciences destinée à déterminer leur origine logique, leur valeur et leur portée.

1.1. Qu'est-ce que la science ?

La méthode scientifique dépend du domaine de la connaissance. Nous parlerons essentiellement de la physique qui est à l'origine de cette méthode. Les mathématiques, n'étant ni une science expérimentale ni une science d'observation, constituent un cas particulier qui mérite une étude spécifique.

(1) https://fr.calameo.com/read/003236613e9bfa0e24deb

Il existe une première approche de la description de la méthode scientifique que l'on peut résumer comme suit. À partir d'observations initiales, on développe un modèle qui doit permettre de faire des prédictions conformes à l'expérience sur l'évolution d'un système. Il n'y a pas de science sans expériences ou observations. L'observation et l'expérience sont guidées par la théorie. La théorie prévoit l'évolution de certains systèmes d'un certain domaine avec une certaine précision.

Un point important est la différence entre science et croyance dont voici une définition (d'après Wikipédia). La croyance est le processus mental expérimenté par une personne qui adhère à une thèse ou une hypothèse, de façon qu'elle les considère comme vérité, indépendamment des faits, ou de l'absence de faits, confirmant ou infirmant cette thèse ou cette hypothèse. Ainsi, les croyances sont souvent des certitudes sans preuve (cf. le livre d'Alan Chalmers [2]).

Dans le paragraphe qui précède, il existe au moins un oubli, c'est le « falsificationisme » de Karl Popper (1902-1994), philosophe.

Pour faire partie de la science, une hypothèse doit être falsifiable (néologisme discutable certains disent « possibilité de réfuter »). Une hypothèse est falsifiable si la logique autorise l'existence d'un énoncé qui lui soit contradictoire. La logique étant la logique classique avec le principe du tiers exclu.

Exemples

- « Il ne pleut jamais le jeudi » est falsifiable, il suffit d'observer une pluie un jeudi. L'énoncé « soit il pleut soit il ne pleut pas » n'est pas falsifiable.
- « Tous les cygnes sont blancs » est falsifiable, il suffit de trouver un cygne qui n'est pas blanc.

La proposition de Karl Popper est théorique, mais fondamentale (cf. article de Stefan Karagozoski [3]).

Une remarque sur la phrase suivante de cet excellent article : « Les lois scientifiques sont absolument incertaines, mais tant qu'elles n'ont pas été réfutées par l'expérience nous pouvons et devons les considérer comme vraies ». L'usage du mot « vrai » est discutable en raison de l'extension de son usage, il serait plus adéquat de dire « permettant de prédire l'évolution d'un système ».

Par ailleurs, la science occidentale moderne a introduit la notion de loi générale qui s'applique du laboratoire à l'Univers. La théorie de Newton, regroupant la chute des corps sur la Terre et le mouvement des planètes, a été une étape fondamentale de cette introduction. Il est remarquable que cette notion n'existe pas dans la science chinoise traditionnelle (cf. annexe 2).

1.2. Écart entre la langue courante et les concepts du physicien

Voici un exemple de cet écart qui gêne l'apprentissage de la physique. Considérons la loi d'Ohm, elle paraît très simple sous la forme $U = R\,I$ pour une résistance en courant continu. En fait, elle suppose l'introduction de concepts comme la différence de potentiel, la résistance et l'intensité de courant. Ce qui n'est pas évident quand dans le langage courant on dit « On use ou consomme du courant » et que l'on parle de potentiel psychique. D'où l'importance de souligner la spécificité des notions de potentiel, de courant et d'énergie en physique.

En outre, les lois de la physique sont souvent des lois de conservation d'une grandeur telle que moment, masse, charge… Ces lois de conservation permettent de prévoir les évolutions possibles d'un système.

Une des lois les plus importantes est la loi de conservation de l'énergie. Dans le langage courant, on parle de consommation d'énergie alors qu'il s'agit d'une dégradation d'énergie. Il s'agit d'insister sur la différence sémantique de mots comme énergie entre le langage courant et le concept scientifique. Les définitions scientifiques sont souvent difficiles à expliquer, mais on peut en donner une idée. Prenons l'exemple de l'énergie.

En physique, la fonction d'énergie est basée sur l'idée qu'il existe une constante qu'on appelle l'énergie. L'expression de l'énergie est construite pas à pas, de la mécanique à tous les domaines de la physique en passant par l'électricité. On trouve ce concept de l'énergie dans le cours de physique de Richard Feynman [4] :

La loi est appelée conservation de l'énergie.

Elle affirme qu'il y a une certaine quantité que nous appelons énergie qui ne change pas dans les multiples modifications que peut subir la nature.

C'est une idée très abstraite, car c'est un principe mathématique ; ce principe dit qu'il existe une certaine quantité numérique que nous appelons énergie qui ne change pas lorsque quelque chose se passe. Ce n'est pas la description d'un mécanisme, ou de quoique ce soit de concret ; c'est simplement ce fait étrange que nous puissions calculer un certain nombre et que lorsque nous avons terminé d'observer l'évolution de la nature et que nous recalculons ce nombre il soit le même.

[Fin de citation]

Cette définition est très abstraite et doit se construire pas à pas dans les différents domaines de la physique.

Dans ce cours, Richard Feynman [4] avant d'aborder la construction de la physique, donne une idée de la conservation en utilisant une analogie. Il illustre la notion de constante dans un jouet qui est un groupe de cubes indestructibles. Le nombre total de cubes est donc constant, cette constante est maintenue même si certains cubes sont enfermés dans un coffre impossible à ouvrir ou dans un récipient d'eau sale, non

transparente. Pour détecter les cubes du coffre, la mère de l'enfant utilise le poids du coffre pour les cubes enfermés et le niveau de l'eau pour ceux dans l'eau. Elle retrouve la loi de conservation du nombre de cubes en utilisant trois méthodes, la vue directe, le poids et le volume.

Il faut noter que cet exemple analogique pour l'introduction de la vraie signification de la notion d'énergie est repris par Richard Feynman dans un livre de vulgarisation [5].

Le fait que la notion d'énergie soit en construction et non pas donnée *a priori* est une difficulté pour enseigner la physique.

Note

Dans ce qui suit, nous présenterons des limites qui peuvent se modifier avec l'évolution de la science, mais l'existence de ces limites n'est pas mise en cause.

1.3. Limites intrinsèques de la science

La science, malgré ses succès, a de nombreuses limites soit intrinsèques, liées aux règles de la démarche scientifique, soit liées à l'avancement actuel de la connaissance.

Limites intrinsèques : la science ne peut pas démontrer que certains faits n'existent pas. Par exemple, elle ne peut pas étudier l'existence des miracles qui arrivent une seule fois dans un seul lieu. On peut tout au plus parler de phénomènes inexpliqués. Cette difficulté est moins gênante en physique que dans d'autres domaines où les prévisions sont plus floues c'est-à-dire moins précises. Néanmoins, la physique a fait l'objet de tentatives, sans succès, d'étudier des questions métaphysiques allant jusqu'à discuter de l'existence de Dieu.

Dans un tout autre domaine, celui de la médecine, nous donnons en annexe 3 un exemple frappant de limites du concept de maladie.

1.4. Limites de la connaissance

Malgré de grands succès des théories physiques, de nombreux phénomènes, quelques fois très faciles à observer, n'ont pas de théories appropriées. L'enseignement donne souvent l'impression de l'absence de limites en ne présentant que des domaines bien définis et bien connus.

Voici quelques exemples de limites de la connaissance dans le domaine classique, c'est-à-dire à l'exclusion de la relativité et de la théorie quantique. Prenons comme premier exemple les équations de Navier-Stokes dans la théorie de l'hydrodynamique.

1.4.1. Les équations de Navier-Stokes

Elles sont censées décrire les écoulements fluides donc la turbulence. Elles sont utilisées avec succès dans de nombreux cas, mais elles ont une limite de validité. On sait que la turbulence est un phénomène qui met en jeu de multiples échelles de longueur qui vont jusqu'à l'échelle microscopique. Or à cette échelle microscopique, la description d'un fluide en tant que milieu continu, qui est à la base des équations de Navier-Stokes, perd sa pertinence. De plus, le problème de la cohérence mathématique de ces équations n'a pas été résolu et fait l'objet d'un prix de un million de dollars (prix du millénaire par l'Institut de mathématiques Clay). Voir les articles [6-7].

1.4.2. Quelques exemples de domaines mal connus, dont certains d'observation courante

Citons des phénomènes comme la formation de la pluie et du brouillard qui ne sont pas complètement connus, de même pour les transitions de phase, les théories de la rupture en mécanique, la triboluminescence du sucre, la sonofluorescence… Voici un exemple intrigant, celui de la physique de la montée de la sève dans les grands arbres qui atteignent 100 m de haut ce qui correspond à une pression hydrostatique de 10 bar soit 10^6 Pascal.

Après avoir éliminé l'idée d'une pression aussi élevée dans la sève ainsi que l'aspiration classique limitée à 10 m, certains en viennent à considérer la montée de la sève par pression négative très forte dans une colonne de sève, ce qui constitue un phénomène extrêmement métastable donc peu crédible [8].

1.4.3. La limite du domaine de la thermodynamique [9-10]

Il existe également des limites concernant des cas intéressants, mais difficiles à expliquer simplement et brièvement, par exemple la limite du domaine de la thermodynamique.

Une observation des galaxies semble montrer qu'elles tendent à former des structures dans l'espace [11] [amas de galaxies, structure à grande échelle de l'Univers] contrairement aux molécules des gaz neutres qui tendent à se répartir uniformément dans l'espace disponible. Ce phénomène conduit à se poser la question de la validité de la thermodynamique en dehors du cas des gaz neutres pour lesquels l'hypothèse ergodique est vérifiée.

Pour une description détaillée de l'hypothèse ergodique voir non seulement les livres classiques de physique, mais aussi les mathématiques qui examinent la possibilité d'une démonstration de l'hypothèse pour un type d'interaction entre les éléments (molécules neutres, galaxies…).

Ces derniers paragraphes ne constituent pas une présentation suffisante pour exposer la question, il ne s'agit ici que de signaler le problème.

CONCLUSION

Cet article a présenté quelques aspects de l'épistémologie susceptibles d'être enseignés dans l'enseignement secondaire. Ces aspects concernent la définition de la méthode scientifique, la différence entre le langage courant et scientifique et les limites de la science.

Il est évident qu'il ne s'agit que d'une proposition qui demande des réflexions collectives ainsi que des expériences pratiques d'enseignement. Il ne s'agit pas de faire un enseignement approfondi de philosophie, mais de faire prendre conscience aux élèves de la nature de la méthode scientifique, de l'importance, des limites de cette méthode, de la différence entre propositions scientifiques et croyance et des limites de l'intuition. Cet enseignement participerait à la lutte contre les fausses nouvelles et les « théories du complot ».

Note : pour rester dans un cadre précis, nous n'avons pas abordé le problème des applications et de la confiance du public dans l'usage de la science et en particulier de la physique. Nous dirons quelques mots sur l'évolution de la physique dans l'annexe 4.

BIBLIOGRAPHIE

[1] G. Bouyrie, « Évolution des programmes de physique en classes de seconde générale, première et terminale scientifiques », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 112, n° 1000, p. 55-79, janvier 2018.

[2] A. F. Chalmers, *Qu'est-ce que la science ?* Le livre de Poche, Éditions La Découverte, 1987 (original en 1976).

[3] S. Karagozoski, « Science, certitude, incertitude », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 98, n° 863, p. 567-568, avril 2004.

[4] R. Feynman, *Cours de physique - Tome 1 : Mécanique*, chapitre 4, Éditions Dunod, p. 42.

[5] R. Feynman, "The Great conservation principles", *The character of physical law* publié à The MTI press (Massachusetts Institute of technology).

[6] T. Sonar, « Turbulence sur les équations des fluides », *Pour la Science*, n° 403, mai 2011.

[7] *Comprendre les sciences - Spécial : 65 théories mathématiques*, Équation Navier Stokes, p. 98-101, 2019.

[8] U. Zimmerman et *al.*, "Water ascent in tall trees: does evolution of plants rely on a highly metastable state ?", *New Phytologist*, vol. 162, p. 575-615, june 2004.

[9] Boltzmann et l'entropie, *L'univers va-t-il vers la mort thermique*, collection Les grandes idées de la science, RBA France, 2015.

[10] D. Ruelle, *Hasard et chaos*, éditions Odile Jacob, 1991.

[11] *Les grandes structures de l'univers - Le cosmos à grande échelle*, collection Voyage dans le cosmos, RBA France, 2016.

[12] G. Treherne, *Livre de physique : classe de première - sections A, B, C et moderne*, Librairie de l'enseignement libre, Fernand Nathan, Années cinquante.

[13] Réunion de professeurs, *Physique : classes de 5e, 4e et 3e*, Librairie générale de l'enseignement, 1949.

[14] J. Needham, *La science chinoise et l'Occident*, éditions du Seuil.

Note de l'auteur

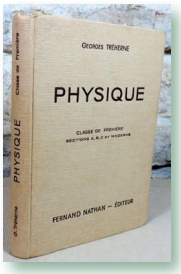
J'aimerais avoir vos avis, vos critiques et vos suggestions.

François BASTIEN
Professeur retraité
Université de Franche-Comté
Institut Femto-ST
Besançon (Doubs)

Annexe 1
Livres de physique

Coup d'œil sur deux livres parus autour des années cinquante. Ces livres ont été choisis, car ils datent d'avant les souvenirs les plus lointains des contemporains. Notons que des méthodes analogues à celles de ces livres ont été utilisées jusque dans les années soixante du siècle dernier.

♦ ***Physique : classe de première – sections A, B, C et Moderne*** [12]
(Nathan, années cinquante)



Ce livre traite des domaines relativement restreints de l'électricité en courant continu et de l'optique géométrique. Il s'agit de préparer les élèves à l'enseignement futur jusqu'au doctorat. L'auteur tente d'introduire les concepts en utilisant des idées datant de l'époque où ils furent introduits dans la physique. Il n'essaie pas, conformément au programme, d'introduire explicitement de l'histoire des sciences ni des discussions sur les problèmes de ces concepts, en fait il suit l'ordre d'apparition des progrès de la science sans raconter explicitement l'histoire de la science et de la technologie.

Vous trouverez ci-dessous les nombreux chapitres sur l'électricité pour tenter de présenter les concepts de ce domaine

1 - Généralités sur le courant électrique.
2 - Électrolyse quantité d'électricité et intensité de courant.
3 - Effet calorifique du courant. Notion de résistance électrique.
4 - Effet calorifique du courant. Loi de Joule.
5 - Force électromotrice et contre-électromotrice, différence de potentiel, loi d'Ohm.
6 - Courants dérivés.
7 - Polarisation des voltamètres. Application aux accumulateurs et aux piles.

♦ ***Physique : classes de 5e, 4e et 3e*** [13]
(Ligel, 1949)

Le livre contient des chapitres sur la pesanteur, la statique des fluides, la chaleur, l'électricité, l'acoustique et l'optique. Les auteurs, étant devant des élèves en majorité destinés à arrêter leurs études au Brevet élémentaire (BE), couvrent dans le livre un maximum de sujets. Ils citent certaines limites en petits caractères et ils définissent la masse de façon étrange (phrase soulignée).

Quelques citations

- *Page 27 : Il importe de distinguer ces deux grandeurs souvent confondues dans le langage et de discerner leur rapport.*
  Le poids d'un corps représente l'intensité de la force avec laquelle la Terre attire ce corps, sa masse la quantité de matière qui le constitue.
  Le poids d'un corps varie suivant les lieux, sa masse est partout la même. Par exemple si on pouvait le transporter au centre de la Terre son poids deviendrait nul, mais sa masse ne changerait pas.
  Quand on plonge un corps dans un liquide, il subit une diminution de son poids. Ces diverses comparaisons montrent que le poids d'un corps et sa masse sont radicalement distincts.
- *Page 244 :* À la fin du résumé du chapitre travail et puissance, on peut lire en petits caractères : *L'énergie ne peut ni se détruire ni se créer ; elle ne peut que se transformer en se dégradant.*
- *Page 360 :* En petits caractères, on lit à la fin des paragraphes sur la propagation de la lumière la remarque suivante : *L'hypothèse de la propagation de la lumière n'est qu'une hypothèse approchée. Elle donne des résultats conformes aux faits que nous venons d'étudier. Tout se passe comme si la lumière se propageait en ligne droite et comme si les rayons lumineux existaient.*

Annexe 2

La science chinoise

La science chinoise, bien que très développée, n'a pas su créer de grande loi comme l'attraction universelle de Newton. Ceci, peut être en partie, en raison de l'absence en Chine d'une religion d'un dieu créateur de l'univers et de ses lois. Néanmoins, des techniques chinoises ont précédé celles d'Occident. Un exemple important, mais mal connu, celui du collier efficace pour la traction animale, apparaît en Chine 200 ans av. J.-C. et en Occident 1000 ans après J-C.

Voir les travaux de Joseph Needham sur la science chinoise en une trentaine de volumes ! Il existe un résumé en cinq volumes de trois cents pages sous le titre : *The shorter science and civilisation in China,* Cambridge university press (voir également *La science chinoise et l'occident* [14]).

Annexe 3

Malade et maladie

La médecine « scientifique », la maladie, les tests en double aveugle

Les malades ont-ils des maladies ou des symptômes ? La maladie a-t-elle une existence intrinsèque ou est-ce une notion qui permet de regrouper les malades en catégories de façon à profiter des réussites thérapeutiques dans des cas analogues ? Ne pas croire à l'existence intrinsèque de la maladie ne signifie pas que l'on renonce à la médecine moderne. En effet, cela n'empêche pas de penser que la maladie est un concept très utile à l'efficacité de la médecine scientifique.

La médecine soigne les malades.

La science médicale s'intéresse principalement aux maladies. En effet, la science médicale démontre son efficacité par des études statistiques d'essais en double aveugle. Cela pousse à regrouper les malades en catégories et à introduire le concept de maladie. Le caractère conventionnel du concept « maladie » est renforcé par le fait que l'on peut désigner une maladie par le nom de son concepteur par exemple Parkinson.

Par un ensemble de symptômes, on définit une maladie. Pour une maladie X, on compare des protocoles de soin par une étude statistique en double aveugle. On en conclut, par exemple, que le protocole A guérit plus de malades que le protocole B.

Cela prouve-t-il que pour le patient P, pour lequel on a diagnostiqué la maladie X, le protocole A est meilleur que le protocole B ? La science ne le prouve absolument pas. La science prouve que pour la maladie X, statistiquement le protocole A est le meilleur.

La situation est analogue au voyage par autoroute qui est statistiquement plus rapide que par la route, mais pour un voyage particulier l'autoroute peut être bloquée. et la route libre.

Le recours à la science médicale est basé au moins sur une croyance, le destin individuel peut être décidé à partir d'une probabilité statistique. La médecine doit soigner des malades. La science médicale guérit des maladies.

Malgré ses succès statistiques, la science médicale ne peut pas complètement remplacer la médecine.

Annexe 4
Évolution de la physique

Nous ne parlerons ici que de la physique proprement dite et non pas des succès énormes de la physique dans le développement des instruments de l'astronomie, de l'informatique, de la biologie et de la géologie.

Après la période très faste de la découverte de la relativité et de la mécanique quantique, il est apparu un déclin relatif de la physique réductionniste malgré quelques succès comme le boson de Higg et la détection d'ondes gravitationnelles.

Nous n'aborderons point la défiance du public pour les applications (réacteur nucléaire…), nous énoncerons quelques blocages dans le développement des théories.

- ***Théories qui ne prédisent rien***
  Par exemple la théorie des cordes. Les cas possibles sont beaucoup trop nombreux, on parle de 10^{500} solutions. La théorie semble donc non réfutable.
- ***Théorie invérifiable à la limite***
  La théorie du big-bang dans laquelle le point essentiel, celui de l'origine du monde, semble inaccessible, car on peut indéfiniment se poser la question « que se passe-t-il avant l'instant considéré » quand l'existence même du temps n'est pas évidente (cette théorie marque une attirance vers la métaphysique).
- ***Théories non encore vérifiées***
  Matière noire et énergie sombre qui sont des éléments introduits pour expliquer avec succès certaines observations, mais dont on ne connaît pas la nature faute d'observations directes.
- ***Théorie qui semble avoir un développement très difficile***
  Théorie unifiée des quatre interactions : électromagnétique, faible, forte et gravitation. Seules les trois premières ont été unifiées, mais la gravité reste isolée.

Ces difficultés n'enlèvent pas le caractère exemplaire de la physique dans le domaine de la science et l'importance de la physique dans le développement, entre autres, des outils de l'informatique et du numérique.