

LA DÉMARCHE EXPERIMENTALE



Tableau de Magritte

*À Eliott et Marilou
et
À la mémoire de la culture vilnoise*

PRÉAMBULE

« Si tu sais que tu ne sais pas, tu sauras.

Si tu ne sais pas que tu ne sais pas, tu ne sauras pas. »

Amadou Hampâté Bâ

Le préambule de l'an 2000, que l'on trouvera plus loin, avait pour objectif de montrer que, malgré tous les efforts accomplis antérieurement, les difficultés de l'enseignement de la Physique persistaient, les élèves se détournaient de plus en plus de l'enseignement scientifique, preuve que toutes les actions passées n'avaient pas encore été couronnées de succès¹. Pour quelle raison ? Je dirais maintenant² parce qu'il est nécessaire d'accepter de prendre les problèmes au fond, d'accepter de modifier ses modes de penser, de modifier au besoin son vocabulaire et que tout cela demande des remises en cause que peu de personnes acceptent de faire. Seulement aucun progrès ne peut être réalisé sans y mettre ce prix. Je pense encore que les problèmes perçus empiriquement ne peuvent pas être résolus sans que soit construit un cadre théorique auquel se référer. Pourquoi la physique est-elle si difficile à enseigner ? Précisons : quelles pourraient être les caractéristiques de l'enseignement d'une science expérimentale dans le cadre scolaire ou universitaire, et comment pourrait-on le réaliser ? Interrogé, chaque enseignant exprime une opinion qu'il croit d'autant plus valable qu'elle se fonde sur la pratique de son métier. En réalité, les réponses ne s'improvisent pas. L'élaboration de solutions nécessite autre chose que des réponses intuitives. Le besoin s'en fait cruellement ressentir ; les nouveaux programmes enjoignent d'enseigner « la méthode expérimentale » sans préciser en quoi elle consiste ni comment procéder. Pour le savoir, il faut d'abord décrire comment s'effectue la création de connaissances en recherche. C'est ce que vise le modèle de la démarche expérimentale proposé.

Le modèle a des conséquences dans deux domaines : l'épistémologie et l'enseignement. Qu'est-ce qui assure la scientificité d'une connaissance ? C'est une question à laquelle le modèle répond et qui intéresse de nombreux domaines d'investigation. Le modèle proposé ici apporte aussi un fondement aux débats concernant la construction de la science qui trouve son application dans plusieurs champs de réflexion ; citons l'histoire, l'économie, la sociologie et bien d'autres.

Étant donné le sujet traité, quelques informations sur l'auteur ne sont pas inutiles. Quel est son domaine de compétence ? A-t-elle fait de la recherche en physique ? S'agissait-il de recherche expérimentale ou théorique ? Ces précisions permettent de situer l'origine de ses éventuels partis

¹ Ce qui reste malheureusement vrai en 2006.

² En 2006.

pris. C'est pourquoi je vais me présenter. J'ai exercé le métier d'enseignant et de chercheur à l'université Pierre et Marie Curie (Paris VI) depuis 1960 jusqu'en 2000. J'ai fait des recherches dans différents laboratoires de physique expérimentale pendant plus de vingt-cinq ans. Constamment préoccupée par les processus en jeu dans l'enseignement, j'ai entrepris de les prendre comme sujet de recherche en 1985. Je suis alors entrée dans un laboratoire de didactique³ afin de m'initier aux méthodes d'investigation spécifiques à ce domaine.

Je m'intéresserai particulièrement dans ce travail, à l'initiation à la physique que ce soit au lycée ou au cours de la première année universitaire. Je vais montrer que les difficultés rencontrées par les étudiants résultent essentiellement du changement de statut que subit la connaissance entre le moment où elle est créée et celui où elle est enseignée. Pour ce faire j'ai eu besoin de construire un modèle représentant le fonctionnement de la démarche expérimentale à partir des étapes par lesquelles elle passe nécessairement d'une part, et à partir de la structure des entités qu'elle met en œuvre d'autre part. Le modèle est exposé au premier chapitre. Posé *a priori*, il semblerait gratuit si on ne prenait pas en compte le fait que son élaboration vise un objectif bien précis : élaborer des moyens de surmonter les principaux obstacles que rencontre l'initiation à la physique. Ainsi, dans le deuxième chapitre, le modèle sert de cadre au repérage d'un certain nombre de phénomènes d'enseignement. La cohérence des processus décrits provient de ce qu'ils sont corrélés. Ils sont, en effet, associés par des relations de cause à effet qu'il a été possible de décrire. Il en résulte que l'on peut comprendre pourquoi de nombreux événements de l'enseignement se manifestent avec une régularité qui les rend prévisibles. Ils correspondent souvent à des dysfonctionnements qui sont la conséquence directe des limites d'un enseignement dogmatique. Une analyse critique des phénomènes exhibés serait d'un intérêt limité si elle ne permettait pas de comprendre comment procéder pour faire évoluer l'enseignement. Les moyens d'action seront précisés sous la forme de propositions exposées au troisième chapitre. Quelques idées philosophiques sur lesquelles se fonde le discours enseignant traditionnel seront examinées dans le quatrième chapitre. Dans le cinquième chapitre sera fait le récit d'une expérience de recherche didactique effectuée dans une classe de seconde. L'expérience visait initialement la construction des idées qui fondent le traitement statistique des mesures. Finalement, la description de la séquence permet aussi de comprendre comment il est pratiquement possible d'enseigner une démarche expérimentale dans un cadre scolaire. Après avoir vu ce que la démarche expérimentale apporte à la construction de la connaissance, il sera possible en conclusion d'exposer en quoi son enseignement paraît indispensable à la formation de l'homme moderne qui veut comprendre comment fonctionne le monde auquel il appartient.

³ Groupe de Didactique des sciences expérimentales de Paris 7, Laboratoire inter-universitaire de recherche sur l'éducation scientifique et technologique (GDSEP7). LIREST, 2 place Jussieu. Le groupe a cessé d'exister.

La problématique formulée à propos de l'enseignement de la physique est transposable à celui de bien d'autres disciplines. Les réponses apportées concernent aussi l'ensemble des sciences expérimentales, mais pas seulement, d'autres enseignements sont aussi vraisemblablement concernés ; la connaissance qu'exige l'histoire ou la géographie qui se crée est, elle aussi, bien différente de celle qui s'enseigne ; il en va de même de la littérature, de la philosophie, etc. Ainsi est-il fort probable que de nombreuses conclusions seront utiles à l'enseignement de plusieurs autres matières.

Dans quel cadre se situait ma recherche ?

Préambule de l'année 2000

Comment les chercheurs procèdent-ils pour édifier la science? Cette question a toujours préoccupé les épistémologues sans que les réponses apportées soient satisfaisantes. Nous constaterons au cours de ce travail que pour parvenir à créer une représentation satisfaisante du fonctionnement des sciences, il est efficace de s'interroger sur un domaine empirique déterminé. Ainsi nous montrerons qu'en construisant une modélisation de la démarche expérimentale ayant comme objectif de repérer les origines des dysfonctionnements de l'enseignement de la physique, nous fabriquons du même coup un modèle de validité générale concernant l'ensemble des sciences expérimentales. Notre but pédagogique est particulièrement utile parce que, malgré les efforts consentis depuis des années, l'enseignement de la physique ne donne toujours pas les satisfactions qu'enseignants et étudiants en espèrent.

Déroulons le fil de l'histoire. Après l'expédition dans l'espace du premier Spoutnik par l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques en 1957, des enseignants et des scientifiques occidentaux de renom, craignant un retard de leurs pays sur les puissances de l'Est, se sont mobilisés pour rénover l'enseignement de la physique. Ils ont constitué des groupes de travail et ont produit de nouveaux manuels comme, par exemple, le remarquable « Physical Science Study Committee⁴ », le seul à être traduit en français. Le plus souvent, ils ont travaillé anonymement, afin d'élaborer un cours de physique élémentaire satisfaisant. Depuis cette époque, le perfectionnement de l'enseignement de la physique n'a pas cessé d'être une préoccupation dans de nombreux pays, sans que les mesures prises entraînent l'enthousiasme des étudiants. En France, les rédacteurs des programmes de 1987⁵ constatent une diminution en dix ans du nombre d'élèves en classe de première S, alors que celui des élèves de seconde a beaucoup augmenté. Cette tendance continue de se manifester. D'après Roger Maynard le phénomène atteint les universités, il cite les chiffres

⁴ Ouvrage collectif, publié en 1960 par Heath and Company, Boston, et traduit en français sous le titre *La Physique*, Dunod, 1967. Pour le lycée.

⁵ B.O. n° spécial 3-9 juillet 1987. P 67.

suivants : « diminution de 50% des inscriptions en DEUG⁶ Sciences (de la physique) depuis 5 ans, diminution de 1/3 des élèves de terminale dans les sections scientifiques, érosion de 10% des effectifs des filières de deuxième cycle de physique depuis 3 ans⁷. » Quelles sont les raisons d'une telle désaffection ? Répondre de façon raisonnée à cette question nécessite une élaboration théorique du fonctionnement de la science, ce qui n'a pas été fait jusqu'ici. La réforme de la fin des années 1980 en France était fondée sur une impression selon laquelle pour intéresser les étudiants à la physique, il fallait que les sujets enseignés soient reliés aux objets techniques utilisés dans la vie quotidienne. L'avis change pour la réforme suivante. Le président de la commission des programmes de Physique/Chimie au ministère de L'Éducation nationale, explique pourquoi la complexité des objets techniques est un obstacle à l'apprentissage. Il propose pour l'an 2000 une réforme qui se fonde sur de nouvelles hypothèses. « Il nous a semblé urgent de revenir à un contenu plus fondamental et plus maîtrisable par des élèves qui, en majorité, n'optent pas pour des filières scientifiques⁸. » Qu'est-ce qui justifie ces choix ? Comment savons-nous ce qui est maîtrisable par les élèves ?

Selon le rapport de Pierre Bergé⁹ qui a fait suite au travail de la commission de la Société française de physique, le problème que pose l'enseignement réside essentiellement dans sa forme dogmatique, il s'est « insidieusement formalisé » et s'est « marquée par la tradition du cours magistral. » Les moyens proposés pour « redonner ses lettres de noblesse à l'enseignement expérimental de la physique » passent, selon l'auteur, par une meilleure formation des maîtres et par une modification des moyens d'évaluation des élèves. Malgré leur apparente pertinence, toutes les recommandations trop vagues ne peuvent pas être suivies d'effet et les critiques restent toujours d'actualité. Pourtant des efforts ont été accomplis ; ainsi, à la suite de la commission Laguarrigue qui s'est tenue en France au cours des années 1970, des laboratoires de didactique ont été créés pour résoudre les difficultés qu'affronte l'enseignement. Des recherches ont permis d'analyser de nombreuses situations avec la volonté d'apporter des solutions. Au début, les investigations ont commencé par une interrogation sur les idées préalables que les élèves se font des grandeurs physiques et qui faisaient, croyait-on, obstacle à l'acquisition de la connaissance. En fait, il s'agissait de la « Connaissance » telle qu'elle est conçue par les enseignants. Les idéologies sous-jacentes de l'époque ne permettaient pas de progresser. Par exemple, les

⁶ Diplôme d'Etudes Universitaires Générales.

⁷ Roger Maynard Directeur pour la physique et les sciences pour l'ingénieur, de la Mission scientifique universitaire au ministère de l'Éducation nationale, de la recherche et de la technologie, *Désaffection des étudiants pour la physique pour le nouveau millénaire ?* Bulletin de la SFP. (123) mars 2000.

⁸ J. Treiner, *La réforme des programmes*, Pour la Science N° 264. Octobre 1999.

⁹ P. Bergé, Rapport de la mission sur l'enseignement de la physique, *Perspective et avenir*, octobre 1989.

chercheurs pensaient que les élèves commettaient des « erreurs ». Ils les ont répertoriées afin de leur éviter de faire des « fautes ». Ce point de vue laisse des traces dans le programme de 1987 « Objectif : [...] Amener l'élève à ne plus commettre la faute consistant à croire qu'il faut une force pour maintenir un mouvement rectiligne¹⁰. » Or on peut, tout aussi légitimement, penser que l'erreur n'est pas une faute, qu'elle est non seulement inévitable mais souhaitable, et qu'elle fait intrinsèquement partie de la progression de la pensée.

En résumé, de nombreux travaux de recherche attribuaient aux élèves la responsabilité des différentes sortes d'obstacles rencontrés. Ensuite, d'autres chercheurs ont pensé que la médiocrité des résultats obtenus en mettant en pratique les idées précédentes provenait de la passivité des élèves. Ils se sont alors interrogés sur leur rôle dans un enseignement dont la pédagogie vise essentiellement la transmission des connaissances par l'intermédiaire d'un cours dogmatique. Ils ont cru qu'il fallait cesser de considérer l'élève comme un récepteur de la parole du maître, mais qu'on devait plutôt le transformer en acteur de la construction de sa propre connaissance. Dans un cas comme dans l'autre, l'élève est au centre de l'analyse. Ces courants de pensée se perpétuent encore dans de nombreux centres de recherche. Cependant, déjà en 1985, la psychologue Annick Weil-Barais et le physicien Gérard Lemeignan, préféraient s'interroger sur les moyens permettant aux élèves de construire leurs connaissances à partir de la description de l'évolution de plusieurs situations expérimentales¹¹.

Malgré toutes les difficultés rencontrées, nombreux sont ceux qui continuent à défendre la physique ; ils pensent que l'étude d'une science expérimentale peut contribuer de façon privilégiée à la formation des jeunes. Les circonstances évoluent, mais la volonté de renouveler l'enseignement continue de se manifester. La rénovation est donc perçue comme nécessaire. Ainsi l'Américain Leon Lederman, prix Nobel de physique, a initié la mise en œuvre d'une formation scientifique dans les quartiers défavorisés de Chicago. En France Georges Charpak, lui aussi prix Nobel de physique, tente une expérience qui s'en inspire dans les classes primaires ; c'est l'opération « La main à la pâte. » Elle prend le contre-pied d'un enseignement dogmatique en faisant agir les enfants. Cela suffit-il pour créer un enseignement scientifique efficace ? C'est une question cruciale qui sera examinée dans ce travail.

Remerciements

Ce travail n'aurait jamais pu être écrit sans un environnement intellectuel stimulant. Une réflexion se nourrit de tous les contacts et toutes les discussions qui l'ont générée. Nombreux sont ceux qui, sans le savoir, y ont contribué. Je ne pourrai donc sûrement pas tous les citer. Que ceux

¹⁰ B.O. *op. cit.* p 72.

¹¹ G. Lemeignan, A. Weil-Barais, *Construire des concepts en physique*, Hachette, 1993.

que j'oublie ne m'en tiennent pas rigueur.

De nombreuses idées ont pu s'épanouir grâce à la formation que j'ai reçue, juste après la guerre de 1940, dans les « classes nouvelles » au lycée expérimental de Sèvres, sous la direction de Madame Hatinguais à qui je veux rendre hommage.

J'ai travaillé avec Yvan Simon pendant de nombreuses années ; ce furent des années de bonheur intellectuel intense. Il est de ceux qui vont toujours au fond des analyses des situations et il a toujours su donner du sens aux questions que je n'avais pas réussi à résoudre par moi-même. L'enseignement qu'il pratique m'a servi de modèle et je lui suis particulièrement reconnaissante pour tout ce que sa collaboration m'a apporté.

Que Gérard Lemeignan et Annick Weil-Barais, eux aussi, trouvent ici l'expression de ma gratitude. Ils m'ont initiée aux techniques et aux formes d'interrogations spécifiques à la didactique. Je dois en plus à Annick Weil-Barais des encouragements sans lesquels je n'aurais peut-être pas eu la témérité de me lancer dans mon entreprise. Merci également à William Sacks, non seulement pour sa relecture attentive et critique du manuscrit, mais surtout pour le soutien qu'il a apporté à des idées dont il a perçu l'intérêt dès l'instant où je lui en ai parlé.

Je remercie Monique Saint-Georges qui a nourri mes réflexions par les observations qu'elle faisait sur le terrain à l'Institut Universitaire de Formation des Maîtres (IUFM) de Limoges lors de son travail de thèse.

Je remercie surtout les générations d'étudiants dont les questions m'ont toujours incitée à évoluer. Dès le début de mon enseignement, elles m'ont confortée dans l'idée que tenir compte de leurs interrogations était un moyen privilégié pour progresser.

Je terminerai par ceux qui me sont les plus proches. Je dois à l'observation de mon fils bébé la conviction que tous les enfants pensent et font des expériences avant même de savoir parler, ce que confirment des recherches parmi les plus récentes. Je veux le remercier ainsi que sa femme Karine, d'avoir nourri mes réflexions par des critiques particulièrement adroites et judicieuses.

Enfin un grand merci à Hélène Ouanounou qui, grâce à son sens de la langue, a directement contribué au manuscrit en effaçant quelques unes de ses scories.

Chapitre 1

MODÉLISATION DE LA DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

“Ce qu'il faut peindre, c'est l'image de la ressemblance.”

Magritte

Comment décrire la démarche expérimentale ? Existe-t-il des procédures communes à la physique, à la chimie et à la biologie ? Comment caractériser la connaissance dans ces domaines ? La réponse à cette dernière question est cruciale pour que les enseignants se sentent à l'aise dans leur pratique, ils n'ont pourtant pas souvent l'occasion de s'interroger sur le savoir qu'ils ont la charge de transmettre. Il semble aller de soi : les scientifiques l'ont élaboré, les programmes le définissent et la tradition le perpétue. Il suffit en effet de lire les programmes scolaires pour le constater ; les grandeurs physiques et les lois constituent la connaissance en physique. Or, et je vais m'attacher à le montrer, il est pratiquement impossible de justifier les lois de façon satisfaisante sans tenir compte de la fonction prédictive qu'elles assurent en recherche. Pour y parvenir, il m'a semblé indispensable de construire une représentation opératoire de la démarche expérimentale. Bien qu'elles recouvrent des activités diverses, il existe des caractéristiques communes à l'ensemble des démarches pratiquées. On les trouve en cherchant les étapes invariantes qui jalonnent le déroulement de la recherche et ceci quel que soit le domaine exploré. Un modèle de la démarche expérimentale, au singulier, doit tenir compte à la fois des objectifs poursuivis et de la façon dont ils sont réalisés. Le mot scientifique sert habituellement à qualifier toutes sortes de connaissances, or elles ont un statut différent selon le domaine concerné ; il n'est pas le même en philosophie, en mathématiques ou en physique ou en économie etc. La physique ne comporte que des connaissances produites par une démarche expérimentale. C'est donc seulement de celle là qu'il s'agira par la suite.

Le modèle proposé comporte deux descriptions complémentaires. La démarche expérimentale se déroule selon un processus cyclique qui passe par différentes phases caractéristiques qui seront représentées sur la figure 1 : ce sont les phases de questionnement, de recherche des réponses et de validation des réponses. La deuxième description est structurelle. Les processus en jeu dans la démarche nécessitent de mettre en relation trois domaines différents : le monde expérimental, le

monde technique et le monde théorique. Ils seront décrits dans la deuxième partie de ce chapitre et sont représentés sur la figure 2.

LA FONCTION DE LA DEMARCHE EXPERIMENTALE

Quelle est la fonction de la démarche expérimentale en physique ? Lorsque la question leur est posée, les étudiants répondent qu'elle sert à démontrer, à savoir, à décrire, à étudier, mais la plupart disent : à expliquer. De jeunes chercheurs répondent majoritairement : à comprendre. Admettons, mais alors, si tel était le cas, quels seraient les arguments qui permettraient de convaincre un interlocuteur sceptique de la validité des explications fournies ? Comment un professeur pourrait-il procéder pour faire partager sa propre compréhension sans se contenter de l'imposer autoritairement ou en jouant de sa séduction ? Ce sont en effet les seuls moyens dont il dispose lorsqu'il veut faire croire, par exemple, que les forces « existent » alors que personne ne les a jamais rencontrées. Le seul argument qui semble acceptable est le suivant :

Par principe, la démarche expérimentale vise à rendre le monde prévisible. Cela nécessite de construire des grandeurs physiques, d'élaborer des théories, de fabriquer des expériences et de mettre au point des appareils de mesure¹².

LES PHASES DE LA DEMARCHE EXPERIMENTALE

Toute démarche expérimentale passe obligatoirement par les trois phases qui vont être décrites maintenant. Dans la pratique celles-ci ne sont pas aussi strictement séparées et ne se déroulent pas forcément suivant l'ordre chronologique que la modélisation peut laisser entendre, ce qui ne présente aucun inconvénient pour résoudre les problèmes d'ordre épistémologiques qui nous préoccupent. En conséquence, la description de l'une des phases telles qu'elle se présente dans la démarche effective entraîne obligatoirement l'évocation des autres. L'important n'est d'ailleurs pas que les phases soient distinctes ou non, mais qu'elles existent nécessairement et si une seule des phases manque, le but de la démarche ne peut pas être atteint ; aucune prévision de l'évolution des situations matérielles n'est possible.

La phase de questionnement.

Certains hommes cherchent à décrire de façon systématique les phénomènes remarqués en raison de leur régularité ou d'anomalies manifestes. Leurs observations et interrogations se font toujours dans le cadre d'une "conception préétablie", c'est à dire par l'intermédiaire d'une théorie explicative du monde qu'ils ont en tête. Peu importe, d'ailleurs, qu'elle soit formulée ou pas ; embryonnaire ou élaborée, elle préexiste forcément à toute observation. Par exemple, jusqu'à 600 ans av. J.-C. environ, les philosophes grecs s'imaginaient que la Terre était plate et que le Soleil

¹² Le fond coloré indique l'énoncé des lois et des concepts épistémologiques constituant la théorie proposée.

naissait chaque matin pour mourir à nouveau le soir. Cette représentation était suffisante pour rendre compte de l'événement le plus apparent, le mouvement du Soleil ; pourtant elle ne permettait pas de comprendre pourquoi, lorsque les bateaux s'éloignaient en mer, la coque disparaissait avant les mâts.

Notons que, contrairement à ce qui est souvent dit dans l'enseignement, le seul fait d'observer n'est pas suffisant pour générer une démarche expérimentale, ce qui a une importance déterminante dans l'enseignement¹³. Des millions sinon des milliards d'individus observent le ciel, sans que cela produise la moindre connaissance. De plus, une observation n'est réalisable qu'avec un objectif plus ou moins précis à atteindre.

La démarche expérimentale ne peut se développer qu'à partir du moment où un observateur cherche une réponse à une interrogation.

Même si certaines questions surgissent à propos de l'observation de phénomènes présentant une anomalie ou une régularité étrange, le rôle de l'observation à lui seul n'est pas déterminant ; il faut rechercher le moyen de répondre aux interrogations pour que la démarche expérimentale se déclenche.

De nombreux obstacles s'opposent à l'émergence des questions. Les principaux sont d'ordre idéologique. En fait, déjà Aristarque de Samos, dès le III^e siècle av. J.-C., avait supposé que la Terre n'était pas le centre du monde. Reprise et précisée par l'astronome Copernic, l'idée que les planètes tournent autour du Soleil ne sera définitivement confirmée par Galilée qu'environ vingt siècles plus tard. L'Inquisition le condamna ; il avait osé s'opposer à l'opinion de l'Église qui soutenait la croyance selon laquelle la Terre est au centre autour duquel tournent les astres.

La formulation des questions qui font progresser la connaissance de façon spectaculaire se fait très souvent contre des représentations qui traduisent l'ensemble des idéologies dominantes. Elles peuvent être de tous ordres : religieux, philosophique et même scientifique.

Toutes les questions qui viennent à l'esprit ne peuvent pas être considérées comme scientifiques. Pour être qualifiée de scientifique, une question doit être fructueuse, c'est-à-dire qu'elle doit permettre de créer les instruments nécessaires à l'élaboration de nouvelles connaissances ; nous dirons alors que la question est pertinente.

Dans la démarche expérimentale, sont pertinentes des questions suffisamment précises pour qu'il soit possible de construire les outils techniques et théoriques permettant de leur apporter une réponse contrôlable.

Une question intéressante, mais qui arrive trop tôt, c'est-à-dire avant que les outils soient

¹³ Nous y reviendrons au chapitre 3.

disponibles, est inutile donc non pertinente. Rien n'interdit qu'elle puisse le devenir ultérieurement. Ainsi, au XVIII^e siècle Pierre Louis Moreau de Maupertuis, qui participe à l'introduction en France de la théorie de Newton, émet des objections qui s'expriment par des questions qui ne sont pas pertinentes : « Une attraction uniforme et aveugle, répandue dans toutes les parties de la matière, ne saurait servir à expliquer comment ces parties s'arrangent pour former le corps dont l'organisation est la plus simple. Si toutes ont la même tendance, la même force pour s'unir les unes aux autres, pourquoi celles-ci vont-elles former l'œil, pourquoi celle-là l'oreille ? Pourquoi ce merveilleux arrangement ? Pourquoi ne s'unissent-elles pas toutes pêle-mêle¹⁴ ? » Il faut attendre le XX^e siècle pour que la biologie fournisse des réponses aux intéressantes questions qui intriguaient Maupertuis. De même nous n'aurions pas pu répondre aux interrogations concernant l'origine de ce que nous savons maintenant être des maladies génétiques avant que les gènes aient été découverts. Une question non pertinente est celle pour laquelle il n'est pas possible de construire de réponse raisonnée. Par exemple dans le domaine de l'enseignement il est difficile de savoir comment « motiver » les élèves. Ce que pensent les uns et les autres n'est souvent que l'expression de leur opinion personnelle. En revanche, la question : comment engager les élèves dans une action autonome ?, est pertinente dans la mesure où, comme nous le verrons au troisième chapitre, il est possible de décrire les conditions qui permettent aux étudiants de travailler par eux-mêmes, ce qui est probablement le moyen indirect le plus efficace de les motiver justement.

La pratique la plus productive de la démarche expérimentale consiste à faire évoluer le questionnement. Des recherches empiriques fructueuses commencent parfois sur des intuitions correspondant à des questions trop vagues pour être exprimées. Chercher à les préciser fait très souvent avancer considérablement les investigations en les orientant vers la création de nouvelles expériences. Tout chercheur sait bien qu'il approche de la solution d'un problème lorsqu'il parvient à clarifier la formulation des questions qu'il se pose. Les questions pertinentes sont des moteurs particulièrement efficaces de la démarche expérimentale, ce qui, nous le verrons, a des applications pratiques dans l'enseignement.

La phase de recherche des réponses

La recherche des réponses suit la phase de questionnement et met en œuvre tout un ensemble d'activités, dont la fabrication d'expériences et des instruments de mesure font partie au même titre que les élaborations théoriques. Le progrès en astronomie a été entravé pendant des siècles par la conjonction de deux circonstances défavorables : d'une part, comme nous avons vu, l'idéologie a inhibé l'émergence de nouvelles hypothèses, d'autre part le débat d'idées est resté

¹⁴ Cité in B. Pullman, *L'Atome*, Fayard. 1995, p. 189.

cantonné au domaine théorique. L'adjonction d'investigations expérimentales est cruciale pour évoluer.

Le besoin de moyens permettant de décrire de nouveaux phénomènes dans un cadre théorique unique et cohérent s'oppose généralement au *statu quo* préalablement adopté. Dès l'origine, la recherche d'une prédiction est bien la raison qui motive la démarche ; au début les observations du ciel avaient pour objectif de prédire le destin des hommes conçu comme lié à celui des étoiles. Les premiers astronomes étaient des astrologues. Puis les observations ont concerné plus spécifiquement l'évolution des positions des astres : les prédictions les plus spectaculaires ont trait aux dates des éclipses de la Lune.

Le changement de nature de la prédiction, passant du type astrologique au type astronomique, signe l'émergence de la démarche expérimentale. Elle se fait très lentement et progressivement. Des Grecs, dès le VI^e siècle avant J.-C., ont l'intuition que la raison humaine peut comprendre le fonctionnement de l'univers ; ils observent le monde mais l'expérimentation reste accessoire sinon absente. Ils privilégiaient encore l'activité mathématique qui est de nature plus spéculative : Pythagore fonde les mathématiques et Euclide la géométrie et l'arithmétique. Platon pense que la Terre est au centre d'une immense sphère qui contient les planètes et les étoiles. Pour rendre compte du déplacement apparent des planètes, il considère que l'univers, limité par cette sphère, est doté d'un mouvement de rotation quotidien. Il s'agit là d'une représentation forcément arbitraire et hypothétique, puisqu'elle ne convient que pour quelques cas particuliers. Elle est facilement remise en cause par le mouvement étrange de certaines planètes que ce modèle ne peut pas expliquer. En effet, c'est lorsque la précision des mesures d'angles permet de voir que les planètes n'ont pas les trajectoires circulaires qu'implique la représentation de Platon, qu'il a fallu multiplier le nombre des sphères jusqu'à cinquante-cinq pour décrire leurs déplacements tout en conservant l'idée de circularité. Les explications cessent alors d'être simples pour prendre un caractère strictement local, autrement dit *ad hoc* ; elles conviennent toujours, puisqu'il suffit de rajouter un nombre suffisant de cercles pour décrire n'importe quel mouvement. Le modèle aux multiples sphères, aussi complexe soit-il, ne permet pourtant pas de rendre compte de l'ensemble des phénomènes observés. Ptolémée propose une solution un peu différente en plaçant les planètes sur de nouvelles sphères mais centrées cette fois sur la voûte céleste. Ainsi déroge-t-il un peu, mais pas trop, aux conceptions de l'époque afin de satisfaire à une préoccupation qui est bien de rapprocher la théorie et les faits observés.

Galilée est généralement considéré comme le véritable inventeur de la méthode scientifique parce qu'il a construit des expériences et qu'il a attribué un rôle fondamental à la confrontation entre les résultats expérimentaux et théoriques. En faisant des mesures à l'aide de nouveaux instruments, il se donne les moyens de construire des réponses en rompant avec la circularité des raisonnements qu'impliquent les débats d'idées fermés sur eux-mêmes. Dans les *Discours concernant deux*

sciences nouvelles, il décrit les multiples montages qu'il fait, soit pour rechercher des lois, soit pour les contrôler ; en voici un échantillon choisi parmi de multiples exemples. Rappelons que la boule qu'il utilise dans ses expériences ne roule pas sur un « plan incliné » comme il le dit lui-même lorsqu'il relate sa fameuse expérience par la pensée (la seule à être reprise dans tous les cours), mais bien dans une sorte de gorge qu'il décrit fort opportunément ; « Afin de rendre certain que l'accélération des graves descendant naturellement s'opère bien selon la proposition énoncée plus haut... [Il faut creuser] dans un chevron de bois...un canal parfaitement rectiligne [garni] d'une feuille de parchemin lustré pour le rendre aussi glissant que possible [y laisser rouler] une boule de bronze très dure parfaitement arrondie et polie¹⁵. » Contrairement à ce que croient certains théoriciens purs et durs, il faut qu'il ait effectivement fait les expériences pour remarquer d'autre part que : « Un œuf de marbre descendra dans l'eau cent fois plus vite qu'un œuf de poule, alors que dans l'air, sur une distance de vingt coudées, il ne le précèdera pas de quatre doigts¹⁶. » Ce sont de multiples constats empiriques de ce type qui lui suggèrent les lois qu'il énonce en réponse aux questions qu'il se pose.

La recherche d'une théorie compatible avec les résultats d'expérience repose sur une croyance que rien ne justifie *a priori* : tout l'univers peut être décrit par des lois identiques. Cette idée constitue une hypothèse opératoire dans tous les domaines et reste, aujourd'hui encore, d'actualité. Les explorations les plus récentes sont toujours à la recherche d'une théorie unificatrice. Le rêve, sans cesse poursuivi par les physiciens nucléaires et les astronomes, reste de trouver l'expression d'une force unique à l'aide de laquelle il deviendrait possible de décrire tous les phénomènes à toutes les échelles. C'est peut-être une illusion qui tient du fantasme, mais ce fantasme est utile à la progression de la science.

En physique, la recherche des réponses nécessite obligatoirement la construction d'outils permettant soit de mesurer la valeur des grandeurs, soit de rendre possible des observations nouvelles. C'est l'utilisation de la lunette astronomique qui permit à Galilée de remarquer que quatre astres tournaient autour de Jupiter, comme la Lune tourne autour de la Terre. La découverte des satellites de Jupiter invalidait définitivement l'idée que la Terre était au centre de l'univers et il devint alors possible de supposer que les planètes tournent autour du Soleil. Cette conclusion ne fut pas facilement acceptée pour autant. Dans ce cas, la nature de la « démonstration » réside dans l'adéquation entre la nouvelle théorie et les observations obtenues grâce à la lunette. Le terme « adéquation » est utilisé à dessein. L'observation est orientée uniquement vers le but poursuivi. À ce moment là, la forme des trajectoires est un problème du

¹⁵ Cité in Galilée p. 144 *Discours concernant deux sciences nouvelles*, Puf.

¹⁶ *op. cit.* p. 56.

second ordre par rapport à celui qui vient d'être évoqué, et la remise en cause de leur circularité ne peut intervenir que plus tard, lorsque ce premier problème aura déjà trouvé une solution. La nouvelle représentation, mettant le Soleil au centre, permet de rendre compte d'un nombre plus grand d'observations que les modèles précédents. Concernant la méthode, rien n'a changé depuis cette époque ; les physiciens nucléaires éprouvent toujours le besoin d'obtenir de nouvelles données expérimentales pour décider de la validité des modèles qu'ils imaginent, et c'est bien pourquoi ils construisent des accélérateurs de plus en plus performants.

Comment les lois sont-elles obtenues ? Il n'existe, heureusement, aucune règle heuristique. L'acharnement est une condition favorable, ni nécessaire ni suffisante, pour faire des découvertes majeures. Newton aurait répondu à quelqu'un qui lui demandait comment il avait trouvé la loi de la gravitation : "en ne pensant qu'à ça". Même s'il ne s'agit pas d'une réponse historiquement avérée, elle garde toute son actualité. Ce sont les méticuleuses observations des planètes, accumulées pendant plus de vingt ans par l'astronome danois Tycho Brahé dans la seconde moitié du XVI^e siècle, ce sont les multiples calculs aussi bien que les mesures sur des quadrants à visée d'angle, qui ont permis à Kepler de découvrir que les orbites des planètes n'étaient pas circulaires mais elliptiques.

Posons par principe que les lois sont des énoncés qui permettent de prévoir l'évolution des événements observés.

C'est l'intuition qui permet de synthétiser toutes les informations captées au préalable et qui forge la première impression des chercheurs. Cela se produit de façon inimaginable. Certains sentent de façon juste, d'autres se trompent systématiquement et tous font progresser la science. À l'époque de Descartes on pensait que le mouvement des planètes résultait de tourbillons de matières. Les concurrents de Newton, Leibniz et Huygens n'admettaient pas l'idée d'attraction par une force qui n'aurait pas un support : « Il y a seulement cette difficulté, que Mr Newton, en rejetant les Tourbillons de Des Cartes, veut que les espaces célestes ne contiennent qu'une matière fort rare, afin que les Planètes et les Comètes rencontrent d'autant moins d'obstacle en leur cours. Laquelle rareté étant posée, il ne me semble pas possible d'expliquer ni l'action de la Pesanteur, ni celle de la Lumière, du moins par les voies dont je me suis servi¹⁷ », écrivait Huygens. Cette objection se fonde sur une conception contestable mais productive des objectifs de la science ; elle n'est pas d'expliquer les phénomènes, comme on le croit encore trop souvent, mais de les décrire.

L'inférence (ou induction) désigne l'opération intellectuelle qui consiste à passer du constat d'un nombre fini de faits expérimentaux à l'énoncé d'une loi générale. Le statut de loi est acquis dès que la réalisation de sa fonction prédictive est confirmée sur un nombre suffisant d'événements.

¹⁷ Huygens cité par Alexandre Koyré dans *Études newtoniennes*. Gallimard. 1968. p. 164.

Aucune démonstration logique n'est susceptible de justifier le passage de quelques observations expérimentales au fait de poser une loi qui s'applique à tous les phénomènes similaires. La construction d'une réponse en physique met en œuvre un ensemble d'arguments tant théoriques qu'expérimentaux, dont certains sont jugés comme étant plus particulièrement décisifs ; ils sont dits cruciaux. Aucun en soi ne peut constituer une preuve au sens mathématique : c'est pourquoi il ne peut pas y avoir de démonstration qui soit limitée à la seule logique des propositions pour apporter des preuves irréfutables en physique.

Bien qu'elle puisse survenir soudainement, à propos d'un événement qui peut paraître fortuit, la découverte d'une loi résulte d'une intuition qui ne se produit ni par hasard, ni chez n'importe qui. Elle résulte d'une intime conviction, construite à force d'un travail obstiné. C'est ce qu'écrit le Français Louis de Broglie, l'un des fondateurs de la mécanique quantique, prix Nobel de physique, à propos de la découverte du rayonnement de l'uranium¹⁸ qui est souvent citée comme résultant d'une chance inouïe : "Ces accidents heureux n'arrivent qu'à ceux qui par un effort prolongé sont déjà parvenus au bord de la découverte, à ceux qui, ayant consacré leur vie à l'étude d'une science et connaissent à fond les données du problème qu'ils étudient, sont tout préparés à saisir la solution cherchée quand par quelque hasard elle s'offre soudainement à eux¹⁹. » Les accidents heureux arrivent assez souvent aux chercheurs, pratiquement chaque fois qu'ils trouvent.

Dans une représentation de la démarche expérimentale, il est nécessaire de rendre compte de l'extraordinaire rencontre entre la formulation d'une question pertinente, l'existence des objets techniques utiles aux mesures et à l'expérimentation et les concepts théoriques permettant une organisation nouvelle des faits expérimentaux. Pourquoi l'enseignement cite-t-il préférentiellement la très belle expérience par la pensée de Galilée sur la chute des corps, et passe-t-il systématiquement sous silence les multiples investigations qui ont permis l'émergence de ses idées ? Peut-être les scientifiques, comme l'ensemble des hommes, succombent-ils par moment à l'attrait de ce qui semble magique et ne veulent pas exhiber le labeur qu'impliquent les découvertes.

Il faudrait pouvoir faire abstraction de ce qui nous semble actuellement "évident", pour apprécier à sa juste valeur la nature des difficultés que surmonta Galilée pour convaincre de la validité de ses découvertes. L'une d'elles est particulièrement importante parce que le problème posé garde, sous une forme ou sous une autre, la même actualité. Les instruments d'observation transforment-ils les objets ? Une objection faite par les opposants de Galilée consistait à prétendre ne voir que des illusions dans la lunette pointée sur les satellites de Jupiter. On retrouve encore aujourd'hui

¹⁸ Par Henri Becquerel.

¹⁹ L. de Broglie, *Savants et découvertes*, Albin Michel, 1956. p. 361.

des contestations analogues et il se trouve des gens pour exprimer des doutes concernant la matérialité des atomes sous prétexte que leur “visualisation” est le produit d’appareillages complexes. Galilée répondit à ses détracteurs par une interrogation : pourquoi ces “illusions” n'apparaissent-elles qu'autour de Jupiter ? La raison qu’il donne est incontestable. La véritable nature de la nouvelle direction que Galilée fait prendre à la science consiste à ne pas se contenter des spéculations de la raison pure pour cerner le monde matériel, mais à utiliser l'expérimentation de façon systématique. Il fonde ses arguments sur ce qu'il perçoit par l'intermédiaire d'un instrument et non sur ce qui est directement accessible aux sens. L'expérimentation transforme les données sur le monde pour en augmenter la visibilité.

La phase de validation des réponses

Les réponses apportées aux questions que l’on se pose appartiennent au monde théorique. Leur élaboration fait intervenir la construction de grandeurs physiques. Les réponses se présentent sous la forme d’énoncés de nouvelles lois. Un ensemble cohérent de lois portant sur le même sujet forme une théorie. Les lois dites empiriques décrivent à peu près correctement les résultats expérimentaux de situations complexes, sans faire appel aux lois fondamentales.

L’élaboration des réponses à une question donnée passe par la construction de grandeurs physiques et par l’énoncé de lois. Les lois ont un statut de propositions théoriques qui permettent de prévoir l’évolution des situations.

Trouvées par des opérations intellectuelles complexes et mystérieuses, les lois ne peuvent pas être justifiées par des règles logiques. Aucune démonstration ne permettant de prouver les lois, il faut donc construire des arguments pour les valider.

Comment contrôler la validité de lois nouvelles, qui émergent à partir de constatations faites sur un nombre nécessairement fini de constatations expérimentales et ensuite généralisées ? Posons par principe que :

La justification d'une théorie réside dans sa fonctionnalité : une théorie est valable si elle est opératoire c'est à dire si elle prévoit l'évolution des événements auxquels participent les objets matériels.

Les arguments qui militent en faveur des lois constituant une théorie nouvelle sont ceux qui :

- assurent une meilleure adéquation entre les conséquences des lois et les résultats expérimentaux ;
- montrent que les lois obéissent au principe d'élégance et d'économie de pensée ; elles décrivent un plus grand nombre de faits que le système théorique précédent et ceci de façon plus simple et cohérente ;
- fondent la construction de nouveaux instruments techniques ;

- permettent de prévoir des phénomènes non encore observés ;
- permettent de préciser le champ expérimental d'application des lois.

Pourquoi une telle profusion d'arguments de natures si diverses est elle nécessaire pour valider une loi ? L'impossibilité de prouver, au sens logique du terme, « l'existence » ou la “vérité” des lois implique la complexité des procédures visant à les justifier. Les lois scientifiques sont des doctrines, et c'est bien déjà de doctrine dont parle Galilée, par la voix de Simplicio discutant avec Salviati et Sagredo, dans ses *Discours concernant deux sciences nouvelles* : « Il me semble que les choses devraient bien se passer ainsi, du moins selon votre doctrine qui enlève au poids toute influence sur l'accélération ou le ralentissement du mouvement²⁰. » Cependant ce sont des doctrines différentes des croyances ordinaires en ce qu'elles sont fondées sur des raisons indépendantes de celui qui les énonce. La vérification d'une réponse à une question ne peut être effectuée ni directement ni de façon définitive. Comment alors s'assurer de la validité des réponses ? Y parvenir nécessite de mettre en œuvre tout un jeu complexe de contrôles divers que nous allons examiner maintenant.

La validation d'une théorie par la confrontation de ses résultats à ceux de l'expérience.

Une des premières validations qui vient à l'esprit est la confrontation entre ce que prédit la loi et ce qui se passe effectivement. Même si, par abus de langage, les scientifiques eux-mêmes prétendent “vérifier expérimentalement” leurs théories, ils savent tous qu'ils ne peuvent au mieux qu'établir un accord qu'ils jugent raisonnable entre les prévisions théoriques et les constats expérimentaux. Les techniques d'ajustement automatique des paramètres qui permettent de faire coïncider ce qui est calculé à partir du modèle et les résultats des mesures peuvent créer l'illusion qu'ils sont confondus, mais c'est alors sur la détermination de la valeur des paramètres d'ajustement que porte l'écart irréductible entre les deux approches. Tout au plus, l'expérience permet-elle de corroborer les idées préalables que le chercheur désire valider. En revanche, en cas de désaccord effectif, la loi testée est irrémédiablement rejetée.

Pourquoi l'accord entre les résultats de mesures et les résultats théoriques ne permet-il pas une confirmation directe du modèle proposé ou de la loi présumée ? D'abord, ils ne peuvent pas strictement coïncider car il existe toujours une dispersion des valeurs mesurées. Ensuite, toute théorie a un champ d'application qui en définit les limites. Bien que théoriques (et pour de nombreux esprits cela signifie à tort parfaits,) les modèles sont, eux aussi, des représentations approximatives de la situation envisagée. Un modèle ne peut jamais décrire la totalité d'une situation, sa construction ne tient compte que d'un nombre limité de facteurs. Quel que soient les efforts faits par l'opérateur pour diminuer l'importance des “erreurs” expérimentales et pour tenir compte du plus grand nombre de paramètres dans la modélisation, il est impossible de faire

²⁰ Cité in Galilée *op. cit.* p. 73.

coïncider de façon absolue les résultats théoriques et expérimentaux. De plus les deux domaines, l'expérimental et le théorique, sont intrinsèquement différents du monde "réel" exploré. En conséquence :

La confrontation des résultats expérimentaux avec les résultats théoriques ne peut jamais à elle seule apporter une validation directe aux théories.

Les expériences ne permettent donc pas de vérifier directement une loi, pas même la fameuse loi de la gravitation. Le mouvement des planètes ne suit pas deux fois de suite la même trajectoire et n'est pas exactement ellipsoïdal, parce que le ciel n'est pas vide, outre les poussières errantes, il contient une multitude d'astres qui ont tous une influence à des degrés divers. Si l'adéquation entre les prévisions théoriques et le déroulement des événements est raisonnablement réalisée — et le bon sens joue un rôle considérable pour en décider — l'expérimentateur adopte provisoirement la loi.

Notons la remarquable dissymétrie qui existe entre le fait qu'un très grand nombre d'observations ne suffit pas pour établir une loi, alors qu'une seule suffit pour l'éliminer ! En effet, un désaccord, dûment établi, suffit à invalider une théorie en cour d'élaboration. Le constat d'un désaccord n'est pas, lui non plus, simple à réaliser, et nécessite à lui seul beaucoup de travail. Il faut en effet s'assurer que tous les facteurs sont bien évalués et que la différence dépasse de façon sensible ce qu'il est raisonnable d'attendre.

La validation des lois par le principe de simplification. Kepler a simplifié la description en supprimant les cinquante-cinq sphères censées prévoir le mouvement des planètes et la loi de Newton assure une simplification des théories qui l'ont précédée. Une nouvelle théorie décrit un plus grand nombre de faits que la théorie qu'elle supprime. Elle réunit donc dans une même explication de nombreux événements apparemment disparates. La loi de la gravitation décrit de façon cohérente aussi bien le mouvement de la Lune que celui de la pomme qui tombe de l'arbre. Elle décrit aussi le mouvement des marées et l'aplatissement de la Terre aux pôles. Ainsi se trouvent satisfaits les principes de simplicité et de cohérence qui constituent une des règles du jeu de la physique. L'expression d'une loi, du fait de sa simplicité, possède une élégance qui provoque chez les scientifiques une sensation esthétique dont le rôle n'est pas toujours suffisamment mis en valeur auprès des profanes.

La validation des lois par la réalisation de nouveaux instruments techniques. Le principe des objets techniques découle des théories. Le fait qu'ils fonctionnent comme prévu, est une confirmation éclatante de la validité des lois ayant fondé leur fabrication. Tous les appareils qui font partie de notre environnement familier peuvent être considérés comme des applications confirmant les théories, ainsi le fonctionnement du téléphone, de la radio ou de la télévision confirme la validité de la description théorique de la propagation des ondes électromagnétiques

dites “hertziennes” du nom du physicien allemand Heinrich Hertz.

La validation des lois par la prévision de phénomènes inconnus et ensuite avérés. C'est la composante la plus spectaculaire et sans doute la plus connue de la validation. Pourtant, c'est celle qui se produit le plus rarement. Les scientifiques éprouvent un plaisir intellectuel intense lors de la découverte d'un événement prédit par une théorie. La satisfaction du chercheur provient du fait que cette situation fournit des arguments incontestables marquant la fin du travail de validation. Qui ignore encore la prévision, faite par le Français Urbain Le Verrier, de la présence d'une planète inconnue en un point précis du ciel ? Il a suffi alors à l'astronome allemand Johann Galle de tourner sa lunette vers l'endroit indiqué pour y trouver la planète Neptune, confirmant ainsi de façon éclatante la validité des lois de Newton. De même, les lois de la relativité générale ont été corroborées par la constatation de la déviation des rayons lumineux par le Soleil. De telles expériences sont dites “cruciales” car elles permettent de mettre fin à la recherche en fournissant la plus convaincante de toutes les argumentations. Quasi définitive, c'est souvent la seule méthode citée dans l'enseignement ; pourtant elle ne représente pas l'ensemble des processus de validation des lois.

La validation des lois par la limitation de leur champ d'application. À partir de quel moment les lois cessent-elles d'être conjecturales pour acquérir le statut d'une connaissance établie ? Paradoxalement ce sont les phénomènes qu'elle ne peut pas expliquer qui participent le mieux à la validation définitive d'une loi, parce qu'ils permettent d'en limiter le champ d'application. Dans la pratique du chercheur, l'expérience construite pour confirmer une spéculation la contredit souvent. Dans la plupart des cas, la résistance de l'expérience fait progresser la problématique. C'est bien ce qui se passa pour les lois de la gravitation, comme l'explique Louis de Broglie : « Mais de nouveaux faits sont venus montrer les limites de l'explication newtonienne : le mouvement du périhélie de Mercure, la récession des nébuleuses lointaines ne s'expliquent pas par les lois de la Mécanique Céleste. On entrevoit aujourd'hui la possibilité d'expliquer ces effets aberrants par de nouvelles créations de l'imagination scientifique, telles que la théorie de la Relativité Généralisée et celle de l'expansion de l'univers²¹. » Devons-nous en conclure que les lois de la gravitation ont été totalement remises en question ? Non, bien sûr ; elles apparaissent comme les limites des nouvelles lois. Ces limites s'appliquent avec une bonne approximation dans un champ expérimental plus restreint, pour une plus petite variété de phénomènes. Ils ne concernent que les mouvements des corps ayant un nombre suffisant d'atomes et dont la vitesse est petite par rapport à celle de la lumière. C'est donc bien la possibilité de décrire le champ de validité des lois qui les établit définitivement. Elles deviennent alors parfaitement opératoires et leur énoncé final comporte la description de la limite de leur domaine d'application :

²¹ L. de Broglie, *op. cit.*, p. 363.

Une loi est définitivement établie lorsque son champ d'application est complètement décrit.

Examinons de nouveau l'exemple de la théorie de la gravitation. Pour Louis de Broglie : « La nouvelle théorie de gravitation [c'est à dire la théorie de la relativité générale] ne modifie pas les calculs classiques de la Mécanique céleste qui ... reste valable comme approximation entièrement suffisante, mais elle propose une explication séduisante de l'avance séculaire [un mouvement apparemment anormal] du périhélie de Mercure ou, du moins, ce qui restait inexpliqué dans cette avance quand on avait tenu compte de toutes les perturbations²². » La réussite des expéditions de satellites dans l'espace constitue la plus éclatante preuve moderne de la validité de la loi classique de la gravitation.

Toutes les lois ayant une limitation de leur champ d'application, pourquoi la loi de la gravitation est-elle si souvent qualifiée « d'universelle » ? C'est qu'elle a, en effet, semblé l'être pendant près de trois siècles ; ce n'est pas une raison pour se laisser mystifier par l'usage historique des mots. Résumons-nous : c'est l'adéquation des descriptions théoriques aux phénomènes observés, c'est la cohérence de l'ensemble des arguments et c'est tout le système de contrôle par les différentes validations, qui confèrent à la démarche expérimentale son extraordinaire efficacité. La fonctionnalité des lois résulte de l'unification et de la simplification des théories. Pourtant, un argument, aussi décisif soit-il, n'entraîne pas l'adhésion de tous les opposants à une théorie nouvelle. Au départ, seul le chercheur concerné par la résolution d'un problème, lui a consacré le temps et l'énergie nécessaires pour en comprendre toute l'utilité. Pour que d'autres partagent ses idées, il faut qu'elles aient été testées sur un grand nombre d'expériences. Cela prend forcément du temps. Même le physicien allemand Max Planck, l'inventeur de la constante qui porte son nom, se plaint de l'opposition soulevée par ses idées : « C'est une des plus pénibles expériences de ma vie scientifique tout entière, que j'aie bien rarement — et en fait, je pourrais dire que je n'aie jamais — réussi à obtenir l'assentiment universel pour un résultat nouveau²³. » C'est justement cette méfiance qui procure à la science sa solidité.

C'est la croyance *a priori* qu'il existe des lois uniques pour tout l'univers qui fonde l'activité scientifique. C'est la réussite, résultant de la rigueur des contrôles effectués, qui valide la démarche. Les modalités de contrôle sont trop nombreuses et trop diverses pour être modélisées, alors que la fonction de contrôle l'est. Mais l'enseignement de la démarche expérimentale devrait au moins comporter quelques activités permettant aux élèves de contrôler leurs résultats lors de leurs activités expérimentales ou lors de leurs résolutions de problèmes. C'est en effet sans doute

²² L. de Broglie, *op. cit.*, p. 38.

²³ M. Planck, *Autobiographie scientifique*, Champs Flammarion, 1960, p. 81.

la caractéristique la plus importante de la démarche expérimentale, celle qui lui confère son efficacité. Ne pas enseigner les différentes techniques de validation des lois ne rend pas compte de la façon dont la démarche procède pour élaborer la connaissance. Seuls les concepts et les lois, résultats des recherches sont objets d'enseignement, ce qui en dénature le statut.

La dernière phase... et tout recommence

Souvent fondée sur de nouvelles conquêtes théoriques, l'amélioration des performances techniques permet de nouvelles mesures plus sensibles et plus précises, créant des conditions favorables à l'émergence de nouvelles questions. « Mais c'est la destinée, à la fois magnifique et douloureuse, de la recherche scientifique de n'être jamais terminée et de ne franchir victorieusement un obstacle que pour en voir apparaître de nouveaux sur sa route. Vers 1900 les physiciens [...] savaient que la théorie électromagnétique, malgré ses éclatants succès, se heurtait à de grandes difficultés quand elle abordait l'étude des corps en mouvement²⁴. » Le déroulement de la recherche n'a pas changé depuis que Louis de Broglie a formulé ces remarques.

Au cours des multiples tentatives de validation, il arrive toujours un moment où, grâce aux perfectionnements techniques, de nouveaux phénomènes apparaissent qui ne peuvent pas être décrits par le système théorique en vigueur. Ces phénomènes vont dorénavant solliciter l'attention du chercheur ; ce sont souvent les résultats obtenus de façon détournée, au cours de recherches sur d'autres sujets, qui vont permettre de construire les réponses les plus convaincantes aux questions qui semblaient abandonnées.

Une fois commencée, une démarche expérimentale n'est donc jamais terminée : aucun critère ne permet d'affirmer qu'un processus de validation est définitif. La validation des réponses n'est jamais directement affirmative : au mieux, elle renvoie à de nouvelles questions ; au pire, et c'est le cas le plus fréquent, elle indique que la réponse testée ne convient pas et qu'il faut en chercher une nouvelle. Comme l'écrit le physicien allemand Werner Heisenberg : « [...] le progrès de la science apparaît bien comme un processus continu d'ajustement de notre pensée à des connaissances expérimentales sans cesse élargies, processus qui ne connaît pas de fin²⁵. » De nouvelles questions surgissent donc inéluctablement.

Organigramme des phases de la démarche expérimentale. L'organigramme de la figure 1 synthétise l'ensemble des considérations exposées dans la première partie de la description de la démarche expérimentale. Il offre l'avantage d'illustrer la façon dont s'articulent les différentes phases. De plus il traduit le fait qu'il n'y a jamais de réponse positive et que, par conséquent, la recherche se déroule comme un processus qui ne s'achève jamais.

²⁴ L. de Broglie, *op. cit.*, p. 234.

²⁵ W. Heisenberg, *La Partie et le tout*, 1969, réédité chez Champs Flammarion en 1990, p. 142.

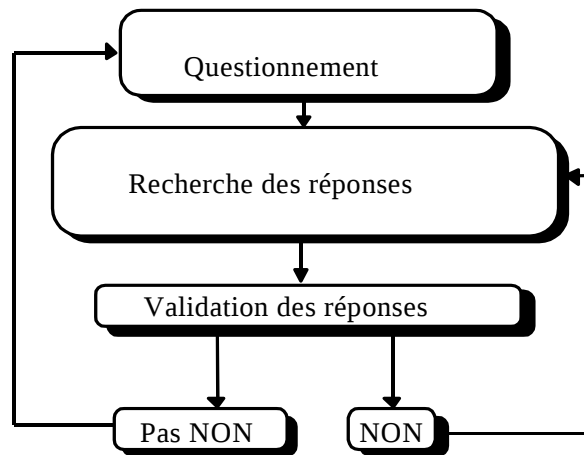


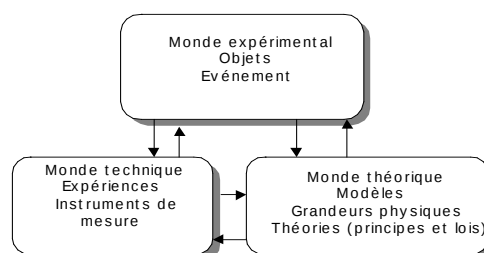
Figure 1. Représentation du déroulement des phases de la démarche expérimentale

La recherche des réponses à une question émise à un moment donné met en œuvre les instruments techniques, théoriques et expérimentaux qui existent ou qu’il est possible d’élaborer à ce stade du questionnement. Ce sont ces procédures que nous allons examiner maintenant.

LES COMPOSANTES STRUCTURELLES DE LA DEMARCHE EXPERIMENTALE

La recherche des réponses à une question donnée met en relation trois domaines représentés sur la figure 2 : le “monde expérimental”, qui comporte les objets matériels et les événements auxquels les objets participent et sur lesquels portent les prévisions, le “monde théorique”, qui comporte les grandeurs physiques, les modèles et les théories, elles-mêmes composées des principes et des lois, et enfin le “monde technique” auquel appartiennent les instruments de mesure et les dispositifs expérimentaux. Toutes ces entités constituent la représentation structurelle de la démarche expérimentale.

Organigramme de la structure de la démarche expérimentale



Chapitre 1 Figure 4

Figure 2. Représentation des éléments appartenant à chacun des mondes démarche expérimentale

Les trois “mondes” cités sont en réalité étroitement imbriqués, au point que chacun d’eux comporte les deux autres. De même que pour les différentes phases, l’important n’est pas que les

mondes soient ou non distincts, mais que chacun d'eux joue son rôle.

Si l'un des trois mondes, expérimental, théorique et technique n'intervient pas dans un ensemble de processus de création de connaissances, alors aucune prévision n'est possible.

Toute valorisation de l'un au détriment des autres est donc abusive et en particulier celle, très fréquente dans l'enseignement, qui place la théorie au-dessus des autres. Nous allons examiner les caractéristiques et les fonctions des éléments de chacun de ces trois mondes.

Le monde expérimental

Au départ, c'est sur le monde réel que portent les questions. Il faut donc donner les raisons pour lesquelles il ne figure pas dans le modèle. Sa composition est, en effet, identique à celle du monde expérimental ; le monde réel, c'est le monde environnant, peuplé d'individus, d'animaux, de plantes et d'objets divers. Si, seuls les objets matériels sont pris en compte, il n'y a pas lieu de distinguer le contenu du monde réel de celui du monde expérimental, et alors rien ne les différencie du point de vue de la physique.

La recherche des réponses aux questions initiales nécessite de simplifier la situation réelle, et le monde expérimental est construit dans ce but. Il comporte les expériences qui créent les conditions particulières qui permettent d'amplifier les caractéristiques spécifiques des phénomènes examinés. Certains physiciens ne considèrent pas que l'astronomie fasse partie des sciences expérimentales, car ils pensent qu'elles sont définies par la capacité d'agir directement sur les objets. Cette restriction n'est pas pertinente, car l'astronomie est bien une science prédictive. C'est la possibilité de faire des mesures nouvelles grâce à des appareils de plus en plus performants, ce sont les moyens de quantifier les grandeurs et de contrôler le discours par les validations qui caractérisent la démarche expérimentale et non pas la faculté d'agir sur les objets matériels.

Les caractéristiques des composantes de l'expérience. Le monde expérimental comporte des objets matériels participant à des événements : une situation évolue à partir d'un état initial, défini par la position et la vitesse des objets et par la nature des contraintes auxquelles les objets sont soumis. Cet énoncé n'est pas si facile à interpréter qu'il y paraît de prime abord. Pour s'en servir utilement, il faut préciser ce qu'on entend par objets matériels. Par exemple, s'il paraît simple de reconnaître intuitivement le caractère matériel d'une table ou d'un livre qui sont des objets à notre échelle, qu'en est-il des atomes dont la dimension est de l'ordre de l'Angström (10^{-10} mètre) ? C'est d'autant plus difficile que le sens du mot atome a évolué au cours du temps. Pour les philosophes grecs, les atomes constituaient des entités hypothétiques appartenant au monde théorique. Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, « atomistes » et « énergétistes » s'opposèrent sur le statut de l'atome ; est-il matériel ou abstrait ? « Ainsi la conception atomique devenait la

plus féconde et pour cette raison s'imposait de plus en plus à l'esprit des physiciens et des chimistes malgré la résistance tenace des énergétistes ennemis des représentations concrètes²⁶. » Attention, si Louis de Broglie parle d'une époque où l'atome correspondait à une "conception" féconde, cela ne confère pas pour autant un caractère abstrait à l'objet matériel "atome". L'hypothèse atomique est restée une idée, c'est-à-dire un élément du monde théorique, pendant des siècles, et l'élaboration du statut d'objet matériel a été particulièrement laborieux et n'est pas encore complètement acquis pour tout le monde. Évoquant les travaux du physicien français Jean Perrin, Louis de Broglie précise : « [...] il commença la magnifique série d'expériences qui allait lui permettre d'apporter en peu d'années quelques-unes des preuves les plus décisives que l'on pouvait souhaiter en faveur de l'existence réelle des atomes. La concordance des résultats obtenus à partir d'apparences variées et par des méthodes diverses apportait une preuve très convaincante de la réalité des molécules [ou des atomes]²⁷. » Il est cependant plus clair de dire que les atomes appartiennent à la catégorie des objets matériels que de dire qu'ils ont une existence réelle²⁸. En ce qui concerne la matérialité des atomes, elle est attestée par les expériences de Jean Perrin²⁹. Il détermine de plusieurs manières, le nombre d'Avogadro, c'est-à-dire qu'il dénombre les atomes dans un échantillon, et ceci n'est réalisable qu'avec des objets matériels. La description de l'ensemble de ses expériences, qui lui valurent le prix Nobel de physique en 1926, occupe les 300 pages de son livre !

Bien qu'il ait eu un statut d'hypothèse avant d'avoir celui d'objet matériel, l'objet "atome" appartient donc bien au monde expérimental ; il diffère du concept "atome" qui en est la représentation dans le monde théorique. Le mot "atome", a donc deux sens. La confusion entre les objets et leur représentation empêche très souvent de savoir de quoi on parle. Il faut donc établir des critères permettant de différencier clairement les deux sens.

Les objets matériels ont les caractéristiques suivantes :

- ils sont identifiables ; il est possible de distinguer des objets de nature différente ;
- ils sont dénombrables ;
- ils participent à des événements ou à des phénomènes ;
- ils ne peuvent pas être décrits de façon exhaustive.

Reprenons l'exemple de l'atome. Il appartient à la catégorie des objets matériels : un atome d'hydrogène diffère d'un atome de cuivre, il est possible de compter les atomes, d'en faire des

²⁶ L. de Broglie, *op. cit.*, p. 175.

²⁷ L. de Broglie, *op. cit.*, p. 181 et 182.

²⁸ De même il vaut mieux dire que les forces et autres concepts appartiennent à la catégorie des idées que de parler de leur « existence »

²⁹ J. Perrin, *Les Atomes*, Librairie Félix Lacan, 1913.

faisceaux de projectiles. Il est possible de mesurer la masse d'un atome, sa vitesse, sa position, son énergie cinétique, etc., c'est-à-dire que nous pouvons donner la valeur d'un ensemble de grandeurs physiques qui décrivent partiellement, et partiellement seulement, la nature ou l'état de l'atome.

L'ensemble des critères caractérisant les objets matériels fonctionne jusqu'aux quarks³⁰, dont on ne connaîtra l'éventuelle nature d'objet matériel que le jour où il sera possible de se prononcer sur la possibilité de les isoler pour en faire, par exemple, des jets.

Certains physiciens ont une telle familiarité avec les concepts qu'ils utilisent, qu'ils les « sentent », ainsi certains professeurs sentent-ils les forces par exemple. Ils pensent aussi que le champ gravitationnel est matériel. Pourquoi pas ? Encore faudrait-il dans ce cas qu'ils définissent les critères qui caractérisent la matérialité des champs qui, selon notre modèle, font partie des entités théoriques pour la raison suivante : le champ de gravitation est complètement défini par son intensité, sa direction, son sens et son point d'application, il a donc le statut d'une grandeur physique, c'est-à-dire d'un concept ou d'une idée si l'on préfère. Il appartient au monde théorique, tout comme le champ électrique.

Encore une fois, il ne s'agit pas d'établir une quelconque “vérité” valable pour la physique de tous les niveaux ; le chercheur doit pouvoir penser et sentir comme il veut ; il s'agit seulement ici de clarifier le langage lorsque nous nous adressons à des étudiants qui commencent leurs études. Les confusions sémantiques ne peuvent qu'augmenter les difficultés qu'ils rencontrent³¹. Les objets participent à des événements qui font, eux aussi, partie du monde expérimental. Les pierres tombent, tandis que les feuilles d'automne volent avant d'atteindre le sol ; les événements ou les phénomènes, sont décrits par des grandeurs physiques dont les valeurs varient en fonction du “temps” : ils sont caractérisés par le fait qu'ils suivent une chronologie. Ainsi la position de la pierre ou de la feuille qui tombe dépend de l'instant où ils sont observés.

Les fonctions de l'expérience. Quels sont les rôles de l'expérience au cours de la recherche ? Ils sont multiples et différents selon l'état d'avancement du travail. Il arrive que des expériences soient tentées avant que des questions soient clairement formulées. L'expérience a alors une fonction exploratoire. Cela se produit, en particulier, dans des domaines nouveaux pour lesquels il manque encore un cadre théorique. Lorsque celui-ci est déjà ébauché, l'expérience crée les conditions d'observation de faits prévus par la théorie. Lorsque le cadre théorique en est au stade de la validation, l'expérience assure deux rôles indissociables : elle permet un certain contrôle des

³⁰ Les quarks sont des composants des nucléons, éléments constitutifs du noyau des atomes.

³¹ L'intérêt pratique de la précision du vocabulaire est explicité en annexe où seront exposés des textes de problèmes où de nombreuses confusions sont manifestes.

hypothèses en éliminant de façon sûre celles qui ne sont pas pertinentes, et elle met en lumière des événements qui suscitent de nouvelles interrogations.

La construction du monde expérimental consiste à séparer les facteurs déterminants d'un événement particulier et à réduire suffisamment l'intensité de tous les facteurs considérés comme parasites. S'interroger sur les lois qui décrivent des comportements apparemment aberrants nécessite de créer les conditions particulières où ils pourront se manifester de façon mesurable. Ainsi le phénomène dit "de capillarité", en vertu duquel le coton hydrophile absorbe les liquides, ne peut être rendu quantifiable que si l'expérimentateur utilise des tubes bien propres, bien calibrés et de diamètre inférieur au millimètre : le liquide monte alors de plusieurs centimètres dans le tube plongé dans un récipient rempli d'eau. Cet effet existe en permanence quel que soit le diamètre du tube. Ainsi la surface de l'eau contenue dans un verre n'est pas strictement horizontale et remonte vers les parois, mais le phénomène de capillarité y est bien moins visible que dans des conditions spécifiquement créées pour l'examiner.

Dans tous les cas l'expérience permet de caractériser des phénomènes. En physique, un phénomène désigne un fait qui ne paraît pas raisonnable dans le cadre de la pensée intuitive, l'aspect du monde devient inhabituel ; un arc-en-ciel se forme dans un jet d'arrosage, l'asphalte prend, par endroits, des teintes irisées après la pluie, des mirages apparaissent dans le désert, etc. Ils se présentent donc avec une régularité suscitant des interrogations. La force exercée par la Terre sur les objets agit en sorte que, dans l'ensemble, ils tombent. C'est la régularité de ce phénomène qui a suscité le besoin de le décrire. Comme toujours, cette régularité comporte des exceptions. Il existe des événements qui semblent ne pas suivre la loi de la chute des corps : un ballon de baudruche gonflé à l'hélium s'élève vers le ciel ; mis en contact avec une goutte liquide, un buvard l'aspire vers "le haut" ; les gouttes de pluie restent accrochées aux pare-brise, etc. Ces situations constituent des phénomènes dans la mesure où ils diffèrent de la norme constituée par l'événement le plus frappant et le plus fréquent pour les objets lâchés : ils tombent.

Le jeu de la physique consiste à caractériser les phénomènes et à se donner les moyens de prévoir l'évolution des événements. Il faut donc chercher les grandeurs physiques permettant de le faire. Il faut, de plus, trouver les relations existant entre les grandeurs physiques qui caractérisent les objets et celles qui caractérisent les événements. Prenons un exemple : le balancement d'un lustre attira l'attention de Galilée lors d'un office au baptistère de la cathédrale de Pise. Le balancement est un événement auquel participe l'objet lustre. La description des oscillations fait intervenir leur amplitude et leur durée. Elles s'expriment en fonction des caractéristiques de la situation matérielle qui peuvent être *a priori* la masse du lustre, sa forme, la longueur de la suspension, etc. Or, constate Galilée, la durée qui caractérise une "oscillation" semble être constante. En fait, elle

ne dépend, en première approximation, que de la longueur du “fil” de suspension de la lampe³². Que la lampe soit plus ou moins lourde ne l’influe pas de façon sensible. De plus, Galilée remarque que les oscillations de faible amplitude ont toutes la même durée, ce qui contredit le sens commun. Cela étonne celui qui s'attend à ce que les plus grandes oscillations durent plus longtemps que les petites³³. Galilée décrit en détail une expérience où il montre que la durée des oscillations d'un pendule ne dépend pas de sa masse. Grâce à une astuce digne du grand expérimentateur qu'il était, ses mesures sont très précises, bien qu'il ne dispose même pas de chronomètre ; « En fin de compte j'ai pris deux boules, l'une de plomb et l'autre de liège, celle-là au moins cent fois plus lourde que celle-ci, puis j'ai attaché chacune d'elles à deux fils très fins, longs tous deux de quatre ou cinq coudées ; les écartant alors de la position perpendiculaire, je les lâchais en même temps, et celles-ci, suivant les circonférences des cercles ayant les fils égaux pour rayon, dépassaient la perpendiculaire pour remonter de l'autre côté, par la même voie ; une bonne centaine d'allées et venues, accomplies par les boules elles-mêmes, m'ont clairement montré qu'entre la période du corps pesant, et celle du corps léger, la coïncidence est telle que sur mille vibrations comme sur cent, le premier n'acquiert sur le second aucune avance, fût-ce la plus minime, mais que tous deux ont un rythme rigoureusement identique³⁴. »

L'expérience du pendule revêt une importance fondamentale pour au moins deux raisons ; c'est sur le principe de l'isochronisme des petites oscillations qu'ont été construites les horloges d'une part, et de nombreux phénomènes sont modélisables par des oscillations dites harmoniques qui ont les mêmes caractéristiques que les oscillations du pendule, d'autre part.

L'expérience est ce par quoi commence la démarche et c'est aussi ce par quoi elle se termine. L'élaboration théorique se situe entre les deux ; comme la démarche expérimentale est cyclique, certains trouvent légitime de placer la théorie au-dessus de l'expérience et de la technique. Ils ont tort. « Or si l'expérience sans la théorie est aveugle, la théorie sans l'expérience est stérile et inutile³⁵ », écrit le physicien et épistémologue Marceau Felden. L'expérience et la théorie se

³² Dans l'approximation des petites oscillations du pendule, la période T , c'est-à-dire la durée d'une oscillation, s'exprime par l'expression : $T = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, l désigne la longueur du fil et g l'accélération que les objets acquièrent au voisinage de la Terre. C'est une constante au voisinage de la Terre qui ne dépend pas de la masse du pendule.

³³ C'est effectivement ce que pensent des élèves de seconde comme nous le verrons au cinquième chapitre.

³⁴ Galilée, *op. cit.*, p.70. Il exagère certainement la précision de ses expériences, mais on ferait bien de les relire et de s'en inspirer pour enseigner le pendule au lycée.

³⁵ M. Felden, *Le Modèle géométrique de la physique. L'espace et le problème de l'interprétation en relativité*

complètent de façon indissociable.

Comme nous l'avons vu, l'expérience est décisive : elle a rarement la complaisance de confirmer les extraordinaires fausses bonnes idées que le chercheur veut tester. Un bon physicien tient toujours compte des résultats expérimentaux, même s'ils sont contraires à ses attentes, il sait qu'ils permettent d'éliminer avec certitude les idées inadéquates. Ce rôle, pourtant prépondérant dans la pratique, ne laisse pratiquement pas de traces parce que les erreurs, les impasses, les idées infructueuses ne sont généralement pas mentionnées dans les publications lorsque leur existence est trop éphémère. Seules certaines d'entre elles s'ancrent dans l'histoire. Citons le cas de l'éther. Ne pouvant pas concevoir que les ondes électromagnétiques (qui transportent l'information des antennes émettrices aux postes radiophoniques, téléphoniques ou autres) puissent se déplacer dans le vide, les savants de la deuxième moitié du XIX^e siècle imaginèrent un support matériel : l'éther. Bien avant, pour des raisons analogues, Leibniz n'admettait pas la théorie de Newton parce que les forces semblaient se transmettre à distance. « Il s'ensuit que les planètes se meuvent en circulation harmonique, les principales autour du Soleil [...] Il faut donc convenir que l'éther c'est-à-dire l'orbe fluide de chaque planète se meut en circulation harmonique³⁶ », dit-il.

L'hypothèse de l'éther peut apparaître aujourd'hui comme une sorte d'aberration due à l'ignorance de l'époque, alors qu'elle a eu son utilité pour répondre à des interrogations qui se posent toujours. C'est pour déceler un entraînement de l'éther par la Terre, que le physicien américain Albert Michelson construisit un interféromètre de grande sensibilité : le résultat négatif prouva que l'éther était devenu une hypothèse « superflue », selon le qualificatif d'Einstein. La propagation des ondes dans le vide est maintenant parfaitement admise mais elle reste toujours aussi mystérieuse, même si elle a cessé de nous étonner.

Les différents types de difficultés inhérentes au travail expérimental sont d'autant plus contraignants que la défection d'un seul élément du dispositif remet en cause le fonctionnement de tout l'ensemble. Bref, pour qu'une expérience « marche », il faut que tout « marche ». Or l'expérience joue un rôle crucial ; tous les praticiens partagent ce point de vue, même s'il n'est pas toujours estimé à sa juste valeur par ceux qui ont une formation uniquement théorique : « L'expérimentation est le critère ultime de la justification dès lors qu'elle remplit certaines conditions de reproductibilité et de cohérence³⁷ », écrit Marceau Felden qui ajoute : « Près de trois siècles d'histoire des sciences et de résultats justifient la méthode de base de la progression du savoir scientifique, fondée sur l'observation, l'expérience et la mesure et sur la modélisation

et en physique quantique, Masson, 1992, p. 183.

³⁶ Cité par A. Koyré, *op. cit.*, p. 172.

³⁷ M. Felden, *op. cit.*, p. 9.

théorique³⁸. » Les résultats expérimentaux doivent effectivement être reproductibles, ils doivent donc satisfaire à une triple indépendance : de l'expérimentateur, du lieu et de la date à laquelle ils sont obtenus.

Le monde technique

Le monde technique comporte les dispositifs expérimentaux et les instruments de mesure. Leur élaboration, leur fabrication et leur amélioration conditionnent la qualité des découvertes. Le bon fonctionnement des appareils, indispensable à la réussite, est une préoccupation majeure de l'expérimentateur. Le monde technique a donc une importance tout aussi fondamentale que le monde théorique. Il est d'ailleurs amusant d'établir des relations de cause à effet entre l'évolution des techniques et celle des théories. Les exemples qui suivent sont empruntés à l'historien Daniel Boorstin. Les cadrans solaires sont un des premiers moyens de repérage du temps. « Les Égyptiens connaissaient l'instrument et l'un d'entre eux, datant de Thumose III [vers 1500 av. J.-C.] est parvenu jusqu'à nous. [...] Mais même lorsque le Soleil resplendissait, le déplacement de son ombre était si lent qu'il n'eût guère permis de marquer les minutes, encore moins les secondes³⁹. » En fait, à cette époque, la durée des journées variant avec les saisons, les "heures" ont des durées différentes. Pendant cette période, les observations du ciel sont limitées au relevé minutieux des positions des astres et se font à partir de la Terre qui est, tout naturellement, considérée comme étant au centre du monde. Au XIV^e siècle, l'horloge à échappement à ancre est construite par un génie de la mécanique, William Clément. Ce n'est qu'à partir du moment où les heures deviennent mesurables, avec un instrument fiable, qu'elles peuvent avoir la même durée définie comme étant la vingt-quatrième partie du jour. Ainsi devient-il possible de passer de l'heure saisonnière ou temporaire à l'heure de durée égale, ce qui a un impact scientifique considérable. Or c'est justement au moment où l'horloge fait son apparition que la Terre quitte la position centrale dans les représentations humaines. S'agirait-il d'une simple coïncidence ? C'est peu probable ; la possibilité de mesurer le temps détermine les conditions de l'émergence des idées nouvelles. Par exemple l'établissement des lois de Kepler qui décrivent le mouvement des planètes n'est concevable que si un instrument fiable permet de mesurer le temps.

Certaines réalisations d'instruments, précédant la création des connaissances qui justifient leur fonctionnement, restent mystérieuses. Ceux qui considèrent que la théorie est le fondement essentiel de la connaissance se sont-ils demandé comment les machines à vapeur ont pu être construites avant même que soient énoncés les principes de la thermodynamique qui permettent d'en décrire le fonctionnement ? Et il ne s'agit pas là uniquement d'histoire ancienne : plus

³⁸ M. Felden, *op. cit.*, p. 176.

³⁹ D. Boorstin., *Les Découvreurs*, Seghers, 1986, p. 36.

récemment la découverte des matériaux supraconducteurs à haute température a précédé l'élaboration théorique qui aurait permis de les fabriquer.

C'est véritablement l'introduction des instruments de mesure, donc de la technique, qui permet à Galilée de fonder la science. La première phrase de ses *Dialogues* fait référence à l'enseignement qu'il tire de sa visite à l'Arsenal : « Quel large champ de réflexion me paraît ouvrir aux esprits la fréquentation assidue de votre fameux Arsenal, seigneurs Vénitiens. Toutes sortes d'instruments et de machines y sont en effet constamment mis en œuvre par un grand nombre d'artisans⁴⁰ », fait-il dire à Salviati.

Pourquoi, malgré son importance, la composante technique est-elle si souvent occultée ? Est-ce parce que les techniciens ne sont pas des écrivains capables de mettre en valeur leur activité ? Qui se souvient aujourd'hui de Denis Papin, bricoleur de génie, inventeur du cylindre à piston et du ventilateur hélicoïdal ? Combien d'autres restent inconnus ? Dommage. La mémoire collective doit faire un tri dans les faits qu'elle veut conserver ; leur nature est plus révélatrice de la hiérarchie des valeurs adoptée par la société que de ce qui lui est véritablement utile. La technique n'est pas reconnue à sa juste valeur. Pourtant ses réalisations ont des conséquences jusque dans notre vie journalière et nous devrions faire la correspondance entre la multitude d'objets tels que le téléviseur, le téléphone, la télécommande, le four à micro-ondes, les montres à quartz, le laser, le téléphone portable (sans oublier ceux qui sont au service de notre santé) et les découvertes scientifiques dont ils sont les applications. En recherche, les appareils de mesure conditionnent la qualité et surtout la primauté des résultats. C'est pourquoi un véritable expérimentateur ne sous-estime jamais le rôle de la technique dans le processus de création des connaissances.

Le monde théorique

Appartiennent au monde théorique : les modèles, les grandeurs physiques, les principes et les lois. Ce sont des instruments ; ils jouent en quelque sorte le rôle d'outils de l'intelligence.

Toutes les entités, qui font partie du monde théorique, ont le statut d'outils au service de la prévision de l'évolution des situations matérielles.

Les modèles. La modélisation est une activité fondamentale de la démarche expérimentale ; elle s'exerce suivant différentes modalités. Nous avons déjà décrit les principes de la modélisation des situations, à propos de la construction des expériences ; elles sont essentielles. Voyons maintenant comment les objets sont modélisés. Dans le monde matériel les objets se présentent dans toute leur complexité ; représenter les objets réels par des modèles sert à simplifier l'analyse des situations. La modélisation consiste à ne sélectionner que les paramètres utiles à la résolution du problème traité. Des modèles, ayant le statut d'objets théoriques, sont ainsi inventés. Nous

⁴⁰ Galilée, *op. cit.*, p.49.

avons déjà décrit l'oscillateur harmonique à propos du pendule. Il en existe de nombreux autres, par exemple le fonctionnement d'un condensateur, objet matériel, fait intervenir deux de ses caractéristiques, sa capacité et sa résistance. Cela se traduit par la création de deux objets théoriques : un condensateur dit parfait, caractérisé par sa capacité seule, et un résistor parfait, caractérisé par sa seule résistance. Comprendre la fonction effective du modèle devient problématique lorsque le mot désignant l'objet matériel est remplacé par la caractéristique du modèle, c'est le cas, par exemple lorsque la capacité désigne un condensateur, la résistance désigne le résistor et la self désigne une bobine d'induction. La distinction entre modèles et objets matériels devient alors impossible et c'est sans doute pourquoi ils sont si souvent confondus.

Lorsqu'une grandeur physique caractérise un objet matériel, elle ne doit pas être confondue avec lui.

Dans de telles circonstances, l'activité de modélisation n'est pas seulement éludée, elle devient irréalisable. Elle est pratiquement totalement ignorée dans l'enseignement.

La fonction d'un modèle est de limiter la description des objets et des situations aux seules caractéristiques qui sont nécessaires pour répondre aux questions. Par conséquent les modèles n'ont pas pour fonction première de décrire la réalité.

Ainsi, alors que l'objet atome est toujours le même, un grand nombre de modèles successifs différents l'ont représenté au cours de l'histoire ; en fait, chacun des modèles répondait à une question différente.

Les grandeurs physiques. L'élaboration des grandeurs physiques a suivi des cheminements complexes. La masse, la différence de potentiel ou le courant électrique ne se sont pas construits en un jour et leur statut, variant au cours de l'histoire, n'est toujours pas clairement énoncé. Précisons :

Les grandeurs physiques n'existent pas dans le monde matériel, il n'est donc pas possible de les « mettre en évidence »

comme il est si souvent stipulé dans les manuels scolaires. Selon notre modèle, ce sont des créations de l'esprit. Personne n'a jamais rencontré dans la nature une force, un champ ou une entropie ! Newton le savait pertinemment et disait déjà à propos du statut des forces : « [...] car je considère des forces mathématiquement et non physiquement ; ainsi le lecteur doit bien se garder de croire que j'ai voulu désigner par ces mots une espèce d'action, de cause ou de raison physique ; et lorsque je dis que les centres attirent, lorsque je parle de leur force, il ne doit pas penser que j'ai voulu attribuer une force réelle à ces centres que je considère comme des points mathématiques⁴¹. » Pourquoi ne veut-on pas retenir ce que Newton lui-même a dit du statut des forces ? Mystère.

⁴¹ Cité par A. Koyré, *op. cit.*, p. 190.

Dans le langage commun la masse désigne souvent des objets : avant qu'elles ne soient digitalisées, on disait que l'on posait des masses sur le plateau d'une balance. En sciences le mot masse devrait avoir le statut d'une idée. Paradoxalement, en physique, "matérialiser" le concept de masse, n'a pas de sens. Chercher à comprendre ce qu'"est" la masse est vain. C'est probablement une des leçons les plus étonnantes que puisse apporter l'enseignement de la physique : apprendre comment procéder pour atteindre des objectifs précis en utilisant des concepts pour leur fonction et non pour leur essence. Ainsi le courant, la tension, la puissance sont des outils conceptuels utiles pour décrire le fonctionnement des circuits électriques.

En conséquence :

Les grandeurs physiques sont des créations de l'esprit parfaitement justifiées par le seul fait qu'elles sont opératoires.

Les théories, les principes et les lois. Comme nous l'avons vu précédemment, les lois, posées *a priori* par le chercheur, gardent un caractère hypothétique tant que les étapes de validation n'ont pas été franchies de façon acceptable. Les lois permettent de décrire les phénomènes et de prévoir l'évolution de situations matérielles ; elles constituent des réponses aux questions qui génèrent une recherche, elles ne peuvent donc pas être considérées comme étant « vraies ». Les lois sont des créations de l'intelligence, elles n'existent pas dans le monde matériel, il est donc impossible de les découvrir comme on trouve des champignons cachés sous les feuilles mortes jonchant le sol d'un sous-bois en automne.

Sauf exception, les principes et les lois s'expriment par des relations mathématiques entre grandeurs physiques. Les modifications des valeurs prises par les grandeurs physiques au cours du temps décrivent le déroulement des événements. Ainsi, la loi fondamentale de la dynamique classique lie l'accélération d'un objet à sa masse et à la somme des forces que tous les autres objets exercent sur lui. Elle n'est utilisable que sous certaines conditions : nous avons vu que le domaine de validité d'une loi apparaît délimité quand elle est mise en défaut par des mesures plus sensibles ou par des conditions d'observation différentes. Les lois ont donc le statut et les caractéristiques suivantes :

- Les lois ont pour fonction de décrire l'évolution de systèmes matériels : elles n'y parviennent qu'en transcendant les situations expérimentales ;
- Les lois sont l'expression de propositions hypothétiques dont la validité est assurée par leur fonctionnalité ;
- Les lois restent l'expression de propositions hypothétiques tant que leur domaine de validité n'est pas délimité ; puis elles traduisent des propositions certaines à l'intérieur de leur domaine de validité ;

- Le domaine de validité d'une loi ne pouvant pas être déterminé *a priori*, la vérification directe d'une loi est impossible.

Doit-on pour autant n'accorder qu'une confiance limitée aux lois ? Évidemment pas :

Une loi reste toujours fonctionnelle au niveau de précision où elle a été établie,

et n'est plus jamais remise en cause, indépendamment des évolutions théoriques ultérieures. - Sous réserve, bien sûr, d'un travail bien fait. - Il est impossible d'établir une liste exhaustive et minimale de conditions à remplir pour la valider. Il faut admettre que, au cours de la démarche expérimentale, tous les enchaînements ne relèvent pas d'opérations rationnelles. Certaines sont explicitement arbitraires, d'autres résultent d'intuitions. Malgré cela il arrive un moment où plus personne ne conteste une loi qui décrit un nombre suffisant de phénomènes différents. Cela se passe, au plus tard, lorsque son domaine de validité a été délimité à l'occasion de nouvelles interrogations. Il est rare en effet que le chercheur s'acharne à démontrer la validité d'une loi ; chacun sait bien, sans forcément se l'avouer clairement, que c'est une opération impossible. Il est stratégiquement préférable de poursuivre la recherche sur de nouvelles interrogations, ce qui entraîne très souvent des justifications indirectes.

Les lois de la gravitation et de l'action et de la réaction font partie de la mécanique classique, c'est à dire de la mécanique macroscopique non relativiste ; elles font partie d'un ensemble théorique. Comme elles ne proviennent pas de raisonnements totalement logiques, elles sont posées ou déclarées. Elles résultent d'un effort intellectuel particulier, qui consiste à rendre compte de la réalité tout en la transcendant. Ainsi les mouvements effectifs des satellites ne sont pas exactement décrits par la loi de la gravitation, ne serait-ce que parce qu'ils sont freinés par le choc des particules résiduelles qui subsistent dans l'espace. Il s'ensuit que la relation mathématique qui traduit un principe ou une loi ne suffit pas pour l'énoncer : la loi n'est opératoire que si on en précise son champ d'application et les conditions d'utilisation.

Les situations complexes ne relèvent pas toutes d'une description par des lois fondamentales. Il existe un autre ensemble de lois, dites empiriques, qui décrit assez bien, dans des conditions d'application très limitées, certains phénomènes. Ainsi l'équation de Van der Waals décrit à peu près bien le comportement de gaz réels dans des conditions particulières de température et de pression. Notons incidemment que les gaz dits parfaits ne sont pas des gaz conceptuels, mais des gaz réels suffisamment dilués pour que les interactions entre les atomes ou les molécules qui les constituent n'interviennent pas dans la description de leur comportement collectif.

Des énoncés, qualifiés tantôt de principes tantôt de lois, sont utilisés sans que la différence entre les deux soit explicitée. Clarifier leur statut respectif permettra ensuite de spécifier la nature des arguments à utiliser dans une résolution de problème par exemple.

Les principes traduisent des déclarations liminaires, à caractère universel, qu'aucune conséquence théorique ni aucune expérience n'a jamais mis en défaut jusqu'à présent. Les

principes sont universels, parce qu'ils restent opératoires quel que soit le domaine exploré et quelle qu'en soit l'échelle.

L'énoncé du principe de conservation de l'énergie — "l'énergie totale d'un système isolé reste constante" — constitue effectivement un principe puisqu'il n'a jamais été démenti, que ce soit à l'échelle des astres, des atomes ou celle des nucléons. Certains principes sont traduits par des relations mathématiques entre grandeurs physiques, d'autres ne s'expriment que verbalement comme le principe de la thermodynamique qui stipule que : "l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter lorsqu'il évolue vers son état d'équilibre".

Des mondes reliés

L'utilisation des éléments appartenant aux trois mondes ne suit aucun ordre préétabli : en revanche ils sont tous nécessaires à la production des connaissances et ils jouent tous un rôle d'égale importance. Parfois, la théorie prévoit les phénomènes, dans d'autres cas c'est l'observation de phénomènes qui suscite l'élaboration de théories ; tantôt le principe d'un instrument résulte des théories, tantôt le progrès technique est la source de nouvelles théories.

Qu'une seule des trois composantes, technique, expérimentale ou théorique fasse défaut et la démarche expérimentale ne peut plus créer de connaissance nouvelle.

Cela se produit constamment aussi bien en astronomie qu'en physique nucléaire lorsque les chercheurs attendent de nouveaux instruments et de nouveaux résultats expérimentaux pour valider leurs théories les plus récentes.

Il est possible de résumer la dynamique de la démarche expérimentale dans le schéma ci-dessous (fig.3).

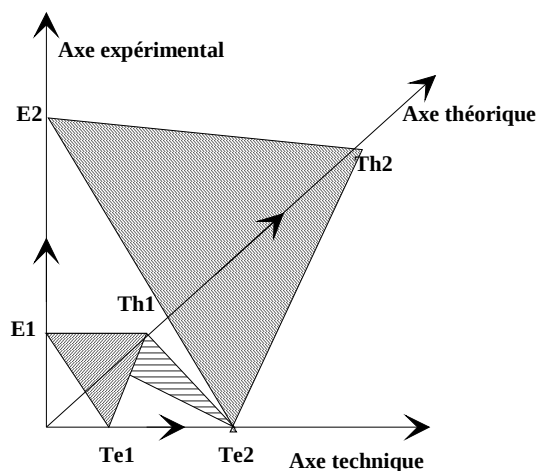


Figure 3. Représentation de l'évolution des différents domaines de la structure.

La figure 3 donne une idée de la dynamique des mécanismes impliqués dans la démarche. Chaque axe représente un domaine ; chaque point d'un axe, tel que E₁, représente l'état de ce domaine à

un moment donné. Un trajet sur un axe, passant d'un point à un autre, traduit une évolution d'un domaine particulier. L'accroissement du champ de connaissance en fonction de l'avancement de chacun de ces domaines, est assez bien figuré par l'aire des triangles hachurés construits à partir des points de chacun des axes.

L'INVERSION ÉPISTÉMIQUE DES OBJETS DE CONNAISSANCE

Le modèle de la démarche expérimentale proposé permet d'ores et déjà de percevoir la nature profonde des difficultés que doit surmonter l'enseignement des sciences expérimentales. En effet, dans son désir de convaincre la communauté scientifique, le chercheur, s'il n'est pas préoccupé par la cohérence épistémologique de son discours, n'hésite pas à affirmer que la nature "obéit" aux lois qu'il a découvertes ou que les lois "gouvernent" les événements. Ses auditeurs ne sont pas dupes de ces abus de langage, qu'ils partagent et dont ils rétablissent automatiquement le sens. En revanche, cette façon de s'exprimer trompe involontairement les profanes et les observateurs inattentifs. Dans son discours, le chercheur, valorisant son travail, n'attribue généralement pas la connaissance à la faculté de prévoir, mais aux outils conceptuels qu'il a construits dans ce but. Comme la connaissance des concepts et des lois est nécessaire à la prévision, le physicien succombe à la facilité qui consiste à confondre l'outil et la fonction qu'il assure. Ce dérapage sémantique, lorsqu'il atteint la sphère de l'enseignement, a pour conséquence de dissocier la connaissance de sa fonction prédictive et de l'identifier définitivement aux concepts et aux lois.

L'expression "inversion épistémique des objets de connaissances" désigne le phénomène qui traduit la transformation de la caractéristique et de la fonction de la connaissance entre le moment où elle est construite et celui où elle est enseignée.

Le néologisme "épistémique"⁴², dérivé du mot épistémologie, qualifie tout ce qui est relatif à la construction logique de la connaissance du point de vue de l'étudiant.

Les obstacles épistémiques auxquels les étudiants se heurtent au cours de leur apprentissage de la physique découlent de la modification du statut de la connaissance entre sa création et sa transmission. C'est pourquoi l'inversion épistémique des objets de connaissances est un phénomène fondamental qui en conditionne de nombreux autres. Ces derniers résultent d'enchaînements logiques et se manifestent par leurs régularités. Qu'ils soient prévisibles n'est guère étonnant puisque le statut des grandeurs physiques et des lois disparaît lorsqu'elles sont enseignées indépendamment de la démarche expérimentale qui les a produites ; c'est ce que nous détaillerons dans les chapitres suivants.

⁴² Le néologisme m'a été suggéré par le professeur Claude Marti ; qu'il en soit remercié.

À PROPOS DE LA METHODE UTILISEE DANS CE CHAPITRE

Le modèle exposé et l'ensemble des propositions qui en résultent constituent un cadre théorique permettant de caractériser certains processus se produisant dans l'enseignement. Une théorie, même scientifique, exprime toujours un point de vue qui peut être considéré comme un préjugé idéologique tant qu'il n'est pas validé. Prise isolément, la modélisation de la démarche expérimentale proposée n'échappe évidemment pas à la règle. Une théorie ne surgit jamais comme peut le laisser croire un exposé linéaire qui ne cite qu'une sélection parmi les arguments susceptibles de convaincre. Le créateur, qui connaît tous les fondements de sa théorie, engage sa responsabilité parce qu'il est convaincu de son utilité. Ce qui n'est pas une preuve suffisante de la pertinence de sa production.

Ma théorie résulte d'une réflexion suscitée par de multiples recoupements qu'il serait impossible, fastidieux et vain d'exposer en détail puisque, de toute façon, une théorie ne peut pas être prouvée. C'est pourquoi le modèle proposé est affirmé, déclaré, posé *a priori*. En vertu de quoi les citations qui accompagnent la description ne servent qu'à en illustrer les différentes composantes. Notons que les citations des physiciens montrent indirectement que le point de vue adopté ici, bien qu'idéologique, n'est ni totalement arbitraire, ni totalement spécifique à la thèse développée. Louis de Broglie est souvent cité parce que sa réflexion sur le sens donné à la création scientifique n'a pas vieilli. Le parti a été pris de ne citer, à de rares exceptions près, que des physiciens chercheurs, car leurs opinions sont partagées par un grand nombre d'expérimentateurs.

Le modèle est composé d'éléments ; chacun, pris séparément, peut sembler parfaitement banal, tant il fait partie des convictions partagées. Or le modèle est constitué par l'ensemble des éléments, par leurs caractéristiques et les fonctions qu'ils assurent d'une part, et par la structure dans laquelle ils s'insèrent d'autre part. Par exemple, le fait de faire commencer la démarche par la phase de questionnement fait aussi partie du modèle. Il serait impossible, en effet, de former les étudiants à une démarche expérimentale en commençant par une autre phase telle que l'observation qui est si souvent préconisée. Dans la recherche, en revanche, les phases se déroulent comme une bande sans fin, et tous les jeunes savent combien il est difficile de s'insérer dans une équipe ayant déjà commencé le travail.

Tout résultat qui se veut scientifique a pour vocation d'être contesté. Les explications proposées sont toujours tributaires du point de vue adopté. Or, contrairement aux mathématiques où un seul contre-exemple ruine définitivement une proposition théorique, en sciences expérimentales les événements isolés qui semblent contredire une théorie bien établie ne font que susciter de nouvelles interrogations.

Refuser une théorie nouvelle fait partie de la démarche telle qu'elle est décrite. Dans ce cas il ne

suffit pas de se borner à exposer une opinion défavorable. Pour réfuter de façon légitime et constructive une théorie, il faut en proposer une autre, encore plus performante, c'est-à-dire capable d'englober dans un réseau logique commun à la fois les phénomènes déjà décrits et ceux qui semblent la remettre en cause. De plus, la nouvelle théorie doit permettre de poser de nouvelles questions. Ainsi va la démarche expérimentale, chaque avancée théorique doit servir de support à la suivante ; c'est ce qui permet l'accumulation des connaissances.

Chaque élément du modèle proposé est choisi intentionnellement et sera repris dans les chapitres suivants ; ils seront utilisés tour à tour plusieurs fois afin d'éclairer les faits sous des angles différents. Le modèle aura d'ores et déjà atteint une partie de ses objectifs si chacun de nous qualifie de "prédictives" les sciences physiques au lieu du sempiternel "exactes" qui abuse les esprits.

Chapitre 2

LES PHÉNOMÈNES DE L'ENSEIGNEMENT

Si les dénominations ne sont pas correctes, si elles ne correspondent pas aux réalités, le langage est sans objet. Quand le langage est sans objet, l'action devient impossible, et, en conséquences, toutes les entreprises humaines se désintègrent : il devient impossible et vain de les gérer.

Confucius

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le préambule, l'enseignement de la physique se heurte à un certain nombre d'obstacles qui persistent malgré les efforts tentés pour les surmonter. Les étudiants⁴³, sauf exception, ressentent toujours de multiples difficultés qui se manifestent par le fait qu'ils ne parviennent généralement pas à résoudre les problèmes qui leur sont posés. Ils n'en comprennent pas les objectifs, ils ne savent pas se représenter les situations qui leur sont décrites, ils utilisent mal les grandeurs physiques, ils ne comprennent pas l'origine des lois, ils ne savent pas argumenter les solutions etc. Quelles sont les raisons de ces états de faits que nous pouvons constater en l'an 2000 ?

La description de la démarche expérimentale proposée au chapitre précédent va permettre de détecter un certain nombre de processus d'enseignement qui transgressent la logique des raisonnements précédemment qualifiés d'épistémiques⁴⁴. Autrement dit, la logique du discours enseignant est, dans certains cas, incompatible avec celle de l'étudiant qui cherche à comprendre. Nous détecterons les phénomènes qui se produisent en nous interrogeant sur ce qui subsiste de la démarche expérimentale pratiquée en recherche dans l'enseignement. Examinons d'abord ce qui reste des différentes phases du modèle présenté au chapitre précédent, puis nous décrirons comment les différents éléments de la structure de la démarche expérimentale sont présentés aux étudiants. L'objectif essentiel de l'analyse étant toujours de surmonter les difficultés que pose l'acquisition des connaissances, l'objectif est de produire des analyses utiles aux professeurs qui désirent faire évoluer leur pratique. Ceci implique de mener trois activités de front : mettre au

⁴³ Dans ce chapitre le mot étudiant désigne celui qui veut apprendre, que ce soit au lycée ou à l'université.

⁴⁴ Dans le premier chapitre « épistémique » se réfère plus particulièrement à la construction scientifique chez les étudiants.

jour les phénomènes, caractériser leurs causes et surtout proposer des solutions.

LA DISPARITION DU QUESTIONNEMENT DANS L'ENSEIGNEMENT

Le premier phénomène repérable concerne l'absence quasi systématique de référence au questionnement qui est à l'origine de la création de la connaissance. Il se produit avec une régularité étonnante : tout se passe comme si les questions résolues étaient oubliées. La loi de Newton, par exemple, est énoncée de but en blanc comme une vérité qu'aucun étudiant ne doit plus ignorer. Bien plus, les manuels d'enseignement ne comportent pas non plus de "questions pertinentes" auxquelles les étudiants pourraient éventuellement s'intéresser. Encore faut-il, pour s'en convaincre, définir le sens donné à l'expression "question pertinente". Il ne s'agit pas d'attirer l'attention de l'élève comme on le fait dans cet exemple pris dans un manuel scolaire de seconde : " Quel est le mécanisme véritable de l'émission sonore⁴⁵ ? " Le lecteur interpellé ignore le sens de l'expression "émission sonore" ; comment disposerait-il des moyens nécessaires pour pouvoir répondre ? De plus, comment devinerait-il ce que le professeur entend par "le mécanisme" ? Nous sommes en présence d'une simple figure de style ayant pour seul objectif de solliciter l'attention de l'élève.

En recherche, une question "pertinente" est une question à laquelle il est possible d'apporter une réponse contrôlable, grâce à la construction de nouveaux outils techniques et théoriques.

Transposée :

Une question pertinente pour l'étudiant est une question qu'il peut comprendre, s'approprier, et à laquelle il peut trouver une réponse par sa propre réflexion, en consultant les documents à sa disposition et en étant éventuellement guidé par de nouvelles questions adaptées aux circonstances⁴⁶.

Constatons incidemment l'utilité du cadre théorique proposé ; sans ce cadre, il aurait été difficile, sinon impossible, de repérer la régularité de l'absence de « question pertinente ». La conséquence la plus directe de la disparition des questions est que l'objectif de la démarche expérimentale ne peut plus être enseigné aux étudiants, et par conséquent le statut des entités ne peut pas leur être dévoilé. Ainsi est-il vain de rechercher dans les manuels scolaires ou les ouvrages universitaires les raisons pour lesquelles Galilée a pu s'intéresser aux " référentiels " qui, depuis, portent son nom. Pourtant elles ont gardé, aujourd'hui encore, leur intérêt et pourraient montrer la nature du problème qu'il se posait. De plus, elles ne manquent pas de poésie. Dans un bateau qui va de

⁴⁵ Les citations correspondant à des phénomènes qui concernent tous les manuels sont suffisamment caractéristiques pour ne pas citer de source particulière. Il s'agit ici d'éviter de sembler stigmatiser les uns ou les autres, alors que tous sont également concernés.

⁴⁶ Nous compléterons au chapitre 3 la définition des questions pertinentes.

Venise à Alep, Galilée remarque que les papillons volent de-ci, de-là, de la même façon lorsque le navire est au repos ou lorsqu'il se déplace. Pourquoi le vol des papillons n'est-il pas affecté par le mouvement du bateau ?, s'interrogea Galilée. Une question analogue se pose à propos d'une situation équivalente qui nous est plus familière. Si, dans un train en marche, nous nous versons une boisson, le filet de liquide sortant du goulot de la bouteille atteindra-t-il le verre ? Nous savons par expérience que la réponse est affirmative, sauf dans les virages ou au démarrage ou à l'arrivée en gare. Tant que le train ne tourne pas, n'accélère pas ou ne ralentit pas, à l'intérieur du train le mouvement des objets peut être prévu de la même manière qu'à l'arrêt ; les lois de la physique s'y appliquent sans difficulté. Dans un train, les expériences ne permettent donc pas toujours de savoir s'il est immobile ou non. Même regarder par la fenêtre peut nous tromper : un train qui démarre silencieusement sur des rails voisins donne l'impression que le nôtre part alors qu'il reste en gare. Lorsque le train a une vitesse constante et que sa trajectoire est une ligne droite, il a ce qu'on appelle "un mouvement rectiligne uniforme" et il peut constituer un référentiel dit "galiléen". Par définition un référentiel est un objet particulier, étoile fixe, Terre, laboratoire, par rapport auquel la position des autres objets est repérée.

Pourtant, comme toujours en physique, l'analyse doit être affinée. Le laboratoire est pris comme référentiel galiléen pour l'examen de nombreuses situations envisagées dans les cours élémentaires. Or comment espérer que les étudiants ne s'en étonnent pas, puisqu'il est lié à la Terre, que la Terre tourne, à la fois sur elle-même et autour du Soleil ? Les cours qui enseignent que la Terre est un référentiel galiléen sans prendre de précaution ne peuvent qu'être légitimement suspectés par les étudiants débutants. (L'accumulation de discours approximatifs de ce type écœure très vite les étudiants.) Le seul moyen de répondre à d'éventuelles objections consiste à calculer les ordres de grandeurs des différents facteurs qui entrent en jeu, ce qui permet à l'étudiant de percevoir dans quelles limites il est possible de faire l'hypothèse du laboratoire constituant un référentiel galiléen. Ainsi l'effet de la rotation de la Terre sur elle-même ne modifie la valeur du poids⁴⁷ d'un objet que d'un centième. Il est donc inutile de le prendre en compte tant que l'on ne cherche pas une précision supérieure à cette valeur. L'influence de la rotation de la Terre autour du Soleil est encore plus petite que la précédente.

Comment le référentiel galiléen est-il présenté dans l'enseignement ? La définition suivante se trouve dans tous les manuels: "On appelle référentiel galiléen un référentiel dans lequel le principe d'inertie s'applique." Encore faut-il connaître le principe d'inertie pour pouvoir dire si un référentiel est galiléen. Voici ce qu'il stipule : "Lorsqu'un solide n'est soumis à aucune action extérieure, un de ses points appelé centre d'inertie, a un mouvement rectiligne uniforme ou reste immobile." Et comme apparemment il n'existe pas de "solide soumis à aucune action

⁴⁷ Il traduit la force que la terre exerce sur l'objet.

extérieure », l'étudiant peut, à juste titre, se demander ce que ces phrases signifient ! Constatons combien l'ignorance des questions en jeu dans la construction du concept « référentiel galiléen » peut rendre obscure une telle définition lorsqu'on se met à la place de l'étudiant qui essaie de comprendre. De plus comment un étudiant normalement constitué pourrait-il accepter de faire l'effort nécessaire pour comprendre des énoncés dont il ne perçoit pas l'utilité ? À l'époque où de nombreuses recherches en éducation voudraient trouver les moyens de stimuler la « motivation » des étudiants, il serait plus judicieux de commencer par s'interroger sur ce qui, à l'inverse, peut l'entraver. Nombreux sont nos concitoyens qui gardent un très mauvais souvenir des disciplines scientifiques. L'aversion qu'ils éprouvent résulte fort probablement de l'ignorance des questions auxquelles la démarche expérimentale répond.

Une autre conséquence de la disparition des questions est que l'étudiant ne dispose pas des fondements qui lui permettraient de comprendre le statut des entités enseignées.

Avec la disparition des questions, l'étudiant n'a plus la possibilité de percevoir l'objectif de la démarche expérimentale. En conséquence, il ne peut pas comprendre le statut des grandeurs physiques ni celui des lois.

Comment introduire des questions dans l'enseignement ? Nous pourrions croire naïvement qu'il "n'y a qu'à" aller puiser dans l'histoire des sciences. Certes, l'histoire des évolutions des interrogations pourrait fournir des idées mais ce serait un immense travail de les rechercher et de les reformuler dans un langage moderne ; qui serait disposé à le faire et serait-ce utile ? Sauf cas exceptionnels, les questions telles qu'elles se sont posées sont trop complexes, les enchaînements historiques suivent trop de méandres pour pouvoir les utiliser à l'état brut ; il faudrait faire un tri avant même d'être sûr de trouver des questions pertinentes pour les étudiants. Prendre en compte la phase de questionnement dans l'enseignement nécessite d'élaborer des questions spécifiques à l'usage des étudiants. Il faut donc essayer de se placer de leur point de vue. Cette tâche est d'autant plus ardue que, pour y parvenir, les enseignants doivent faire abstraction de ce qu'ils croient connaître. D'autre part, ils ont d'autant plus de difficulté à percevoir l'intérêt des interrogations qu'ils les perçoivent comme étant périmées dès lors que les réponses sont connues. C'est ce qu'exprime André Durupthy, ancien président de l'Union des Physiciens : " Je dirais que lorsque l'expérience est un moyen d'étude, on essaie de montrer aux étudiants comment, par le biais d'une expérience, on peut retrouver des résultats qui ont été trouvés bien avant nous⁴⁸. "

La disparition des questions dans l'enseignement se manifeste dans des situations si diverses et si nombreuses, que nous pouvons supposer qu'elle assume une fonction dont nous chercherons la nature.

⁴⁸ Débat du 16 novembre 1992, "La physique dans tous ses états", *Bulletin de la Société française de Physique*, n° 91, 1993, p. XIX.

Avec la disparition des questions, les autres phases de la démarche expérimentale n'ont plus aucune justification. Il est donc inutile d'en rechercher les manifestations ; la construction des réponses aux questions et la confrontation contradictoire entre les élaborations théoriques et les résultats d'expérience n'ont donc plus aucune raison de se produire.

Aucune activité ne contrôle le discours enseignant.

Nous verrons qu'en conséquence, plus rien ne permet d'éviter des dysfonctionnements qui vont donc fatalement se produire. C'est bien pourquoi :

La disparition des questions est un phénomène fondamental à l'origine de nombreux dysfonctionnements de l'enseignement de la physique.

LES OBJETS D'ENSEIGNEMENT

Le choix des objets d'enseignement dépend, bien évidemment, de la conception que nous nous faisons de la nature de la connaissance. Bien que les intentions déclarées dans les programmes de lycée de 1992 visaient explicitement l'enseignement de la physique en tant que science expérimentale, les objets d'enseignement n'avaient pas fondamentalement changé : c'était, comme toujours, les grandeurs physiques et les lois. Ainsi le programme de la classe de seconde stipulait qu'il fallait enseigner : la “ Tension entre deux points, grandeur algébrique. Loi des tensions⁴⁹. ” Il semblerait que cela ait favorablement évolué, du moins dans les intentions du programme de seconde de l'an 2000, bien que les contenus soient parfois formulés de façon traditionnelle. En effet il faut encore enseigner, le principe d'inertie, la gravitation universelle etc. Cependant les phénomènes et leur modélisation, les ordres de grandeur et la mesure semblent enfin y être au moins évoqués.

Un examen des anciens programmes universitaires confirmerait que la connaissance est constituée par les objets théoriques indépendamment de leur fonction, ce qui constitue une inversion épistémologique ou épistémique des objets de connaissance⁵⁰. Il n'est pas possible d'enseigner des contenus centrés sur l'acquisition des concepts et des lois sans se heurter obligatoirement à des difficultés d'ordre épistémique insurmontables. Est-il nécessaire de restaurer le statut des entités théoriques ? Faut-il établir explicitement les liens entre le monde

⁴⁹ “Les principes directeurs de l'enseignement de la physique et de la chimie au collège et au lycée”, *Bulletin officiel*, n° hors série du 24-09-1992, p. 84.

⁵⁰ Le propos doit être nuancé car, pour la première fois depuis 1999, des tentatives pour faire évoluer les pratiques enseignantes se sont manifestées. Ainsi des modules de méthodologie ont été introduits dans les cursus universitaires à l'Université Pierre et Marie Curie. (C'est ce que j'écrivais en 2000.) Des réflexions se développent dans de nombreuses autres universités. Cependant lorsque je lis en 2006 sur la toile les discours sur la physique, je constate qu'ils n'ont pas beaucoup évolué.

théorique et le monde expérimental ? Pour répondre, il faut commencer par examiner les propriétés qu'acquièrent dans l'enseignement les éléments composant chacun des mondes de la représentation structurelle de la démarche expérimentale.

Les événements enseignés

D'après le modèle proposé, les événements sont au cœur de l'activité scientifique puisque la prévision de leur déroulement est l'objectif principal de la démarche, mais ce ne sont pas ceux-là qui sont enseignés... Quelles sont alors les caractéristiques des événements enseignés ? Énonçons-les à partir d'un exemple précis. La lecture du *Discours concernant deux sciences nouvelles* permet de comprendre le point suivant : en extrapolant les résultats de plusieurs expériences (chute des objets dans l'air, dans l'eau et dans d'autres fluides) et en cherchant à donner à un ensemble de faits une explication cohérente, Galilée était parvenu à énoncer la loi selon laquelle un objet isolé se déplace avec une vitesse constante, selon un mouvement dit "uniforme". Comme le monde expérimental ne comporte jamais d'objet totalement isolé, la situation qu'il décrit est purement imaginaire ; c'est une "expérience par la pensée". Il s'agit là d'une opération intellectuelle proprement extraordinaire, puisqu'elle permet de prévoir l'évolution effective des événements du monde expérimental, alors que la loi énoncée les transcende. Ainsi s'opère une des liaisons existant entre le monde matériel et le monde théorique.

Alors qu'il ne peut pas se manifester dans le monde expérimental, le "mouvement rectiligne uniforme" est devenu un objet d'enseignement en soi, tout comme le "mouvement circulaire uniforme" ou encore la "chute libre". Tous font partie des "événements conceptualisés" appartenant au monde théorique ; ils ne se réalisent jamais. Parler de leur "existence" témoigne d'une confusion entre un événement réel et sa représentation. Cela induit forcément une perception erronée de la nature des mouvements. Autrement dit :

Les conditions d'application d'une loi ne sont jamais rigoureusement réalisables. Les lois ne décrivent que des événements conceptualisés.

Le fait d'éluder les raisonnements dits « de modélisation » qui permettent de passer des mouvements réels aux mouvements conceptualisés interdit de pouvoir ensuite justifier l'utilisation de ces derniers par leur fonction. Dans ces conditions comment les enseignants procèdent-ils ? Ils cherchent, vainement, à prouver leur "existence". Une première méthode consiste à prétendre les "constater" dans le monde expérimental. Comme c'est strictement impossible, cela oblige à mettre en œuvre tout un ensemble de subterfuges. Limitons pour le moment la description aux astuces du discours théorique. Nous verrons à la fin de ce chapitre quelques stratagèmes expérimentaux.

Prenons l'exemple de "la chute libre". Notons en premier lieu que l'objet qui tombe n'est, le plus souvent, même pas évoqué. Il est cependant possible de défendre ce procédé en arguant que les

propriétés du mouvement de l'objet qui tombe sont indépendantes de sa "masse"⁵¹. Admettons ; en effet tous les objets tombent à la même vitesse... dans le vide. Chacun constate en effet que dans l'air environnant les plumes ne tombent pas de la même manière ni aussi vite que les pierres. Le mot « libre » se réfère à l'absence d'éléments susceptibles de perturber le mouvement ; c'est à dire l'air et le sol ou un lien. Une « chute libre » est donc le mouvement d'un objet qui ne cesserait pas de tomber sur une Terre sans atmosphère !

Or, si l'objet qui tombe, pierre ou plume, n'est pas cité, la cohérence apparente, à laquelle le discours enseignant est très attaché, interdit d'évoquer la présence de tous les autres objets. Ainsi disparaissent non seulement ceux qui perturbent le mouvement comme l'air ou le sol, mais aussi la Terre. L'apothéose est atteinte avec l'étude de la cinématique. C'est un domaine de la physique qui étudie des trajectoires, des vitesses et des accélérations indépendamment des objets et de leurs interactions. Certains croient qu'il est possible de définir des vitesses et des accélérations en soi, sans faire référence aux objets mis en jeu, pourtant, il est absurde d'instaurer l'idée que les grandeurs physiques existent en elles-mêmes. Ce sont des habitudes intellectuelles dommageables qu'il est ensuite pratiquement impossible d'amender.

Pour la suite du propos, il est utile de distinguer deux catégories d'événements : les événements conceptualisés (ou théoriques) et les événements que nous appellerons théorisés :

Les événements conceptualisés sont des représentations modélisées des événements du monde expérimental. Ils ne comportent qu'un ensemble limité de caractéristiques utiles à l'élaboration d'une réponse à une question donnée. Les événements dits « théorisés » sont des événements qui semblent "exister" en eux-mêmes indépendamment des raisons de leur construction.

Comment expliquer que l'on persiste à tenter de montrer l'existence d'événements théoriques bien que ce soit impossible ? Un procédé aussi contestable n'aurait pas pu se perpétuer pendant si longtemps sans raison. Il trouve son origine dans une idéologie dominante selon laquelle seule la théorie constitue la "connaissance". En outre, des arguments d'ordre stratégique confortent cette opinion. L'enseignement cantonné au domaine théorique permettrait, croit-on, de gagner du temps en simplifiant l'exposé :

L'enseignement des événements dits « théorisés » simplifie l'exposé.

Résultat de ce soi-disant gain de temps : de nombreux étudiants ne gardent aucun souvenir de ce qu'ils sont censés avoir appris. Paradoxe intolérable : les étudiants perdent un temps considérable sous prétexte d'en gagner⁵² !

⁵¹ La « masse » d'un objet est une de ses caractéristiques qui rend compte de la quantité de matière qui intervient indépendamment de sa nature.

⁵² C'est pourquoi ils sont de plus en plus nombreux à désertir les études de physique.

La disparition des objets a une conséquence importante : les arguments du discours enseigné sont obligatoirement limités au domaine théorique. Éliminer les références au monde matériel élude toutes les difficultés inhérentes à la représentation du réel (qui ne concernent pas seulement les sciences physiques !). Le prix à payer consiste à renoncer à comprendre la nature des liens qu'entretiennent les événements théoriques avec ceux du monde expérimental.

La modélisation des situations, qui consiste à hiérarchiser les différents facteurs en fonction de l'évaluation de leurs ordres de grandeurs et à choisir un ensemble judicieux de caractéristiques du monde expérimental est une tâche difficile ; cependant c'est une procédure essentielle qui confère à la démarche expérimentale une grande partie de son efficacité. En effet, il est impossible de pratiquer une modélisation sans réintroduire tous les objets matériels, les ordres de grandeurs de leurs caractéristiques et sans tenir compte des questions à résoudre.

Ainsi se manifeste un des multiples processus circulaires qui font obstacle à l'évolution de l'enseignement.

L'élimination des questions transforme la nature des objets à enseigner et entraîne la disparition de la fonction du monde expérimental, ce qui rend impossible toute modélisation ; de ce fait, la phase d'interrogation disparaît, elle aussi. Il n'y a donc plus rien d'étonnant à ce que les événements du monde expérimental soient remplacés par des événements théorisés qui, n'étant pas construits comme des événements simplifiés, ne peuvent plus à leur tour être interrogés.

Cette analyse conforte l'hypothèse selon laquelle les dysfonctionnements obéissent bien à une logique interne.

Les objets enseignés

Si les objets matériels ne sont plus mentionnés, à quelle sorte d'objets le discours enseignant fait-il référence ? Il évoque les objets que nous avons qualifiés de "théorisés". Ceux-ci correspondent à des modélisations implicites.

En principe, un modèle ne comporte que les caractéristiques utiles à la résolution du problème à résoudre.

Ainsi la couleur n'a aucune incidence sur le déroulement de la chute d'un objet, alors qu'elle en a sur la manière dont l'œil le perçoit.

Le modèle appartient au monde théorique.

C'est, par exemple, le thermostat, le condensateur "parfait" déjà évoqué, mais aussi la diode "idéale", le fil "infini" chargé, le ressort "sans masse" et bien d'autres encore. Ces objets, souvent qualifiés "d'idéals" ou de « parfaits », constituent des entités théoriques servant d'outils à la pensée. Ils ont pour fonction de traiter séparément les influences des différents facteurs ; le thermostat a une température constante, un condensateur parfait n'a pas de résistance, le ressort sans masse est seulement caractérisé par sa raideur, etc.

Tout comme pour les événements, aussi longtemps que le monde expérimental n'est pas évoqué, le discours ne peut pas faire le lien entre les objets théoriques et les objets matériels qu'ils représentent ; tout le travail de modélisation est donc forcément esquivé. C'est probablement la raison d'un nouveau phénomène : l'identification de l'objet à sa représentation. Il en résulte, dans l'enseignement, un embarras permanent qui se manifeste clairement dans l'exemple suivant extrait d'un manuel de seconde : " Les diodes idéales sont des composants dont les propriétés sont assez voisines de celles des diodes réelles mais dont le comportement est plus simple, ce qui les fait intervenir dans de nombreux problèmes. " Dans ce texte, la "diode idéale" n'est pas construite comme une représentation de la diode réelle, c'est-à-dire au moyen d'une description simplifiée utile pour assurer la prévision du fonctionnement d'un circuit où elle est insérée. Les propriétés de la diode idéale sont décrites de façon floue, à l'aide d'un adverbe aussi imprécis que "assez ". Le mot "composant", désignant généralement un élément matériel du circuit électrique, est particulièrement mal choisi pour désigner une idée, le modèle de la diode. Ainsi vaudrait-il mieux préciser :

La "diode idéale" est un modèle, c'est-à-dire un objet conceptuel, qui schématise les propriétés et le fonctionnement des véritables composants électroniques matériels que sont les diodes.

L'objectif de la modélisation est de faciliter la résolution formelle de nombreux problèmes de circuits électroniques, quitte à ce que les solutions trouvées soient approximatives.

Comment parler de la modélisation ? Prenons un exemple. Il est possible de décrire la trajectoire d'un objet aussi grand qu'une planète ou aussi petit qu'un atome en le représentant par un point mathématique donc sans dimension. En fait, dans la mécanique newtonienne, l'expression "point matériel" traduit deux propriétés : d'une part, localiser l'objet avec une précision absolue et, d'autre part, représenter l'objet uniquement par sa masse. Or d'innombrables textes identifient une particule à un point ; citons cet extrait d'un manuel parmi d'autres : « Une particule (électron, proton...) ou une très petite portion d'un système constitue ce qu'on appelle un point matériel. » Cette définition abuse les esprits ; un objet réel, aussi petit soit-il, possède une dimension finie et ne peut, en aucun cas, "constituer" un point ou « avoir » la taille d'un point. Pourquoi ne pas dire qu'il est "représenté" ou "modélisé" par un point ? C'est toujours le même processus : le refus systématique d'opérer des modifications de vocabulaire afin d'utiliser des termes précis a un sens : accepter de le faire entraînerait l'obligation d'introduire dans l'enseignement des activités

de modélisation, donc d'accepter de faire des raisonnements complexes qui impliquent, entre autres, d'évoquer les objets matériels.

Les chercheurs sont les premiers à parler en termes identiques des objets qu'ils manipulent et de leurs représentations. Un auditeur non initié peut légitimement croire qu'ils les confondent, d'autant plus que cela leur arrive. Cela peut se comprendre puisqu'ils doivent se fondre dans la matière pour trouver. Le mathématicien Henri Poincaré évoquait déjà le rôle historique de l'anthropomorphisme dans la genèse de la mécanique. La familiarité des chercheurs avec les concepts qu'ils enseignent leur donne le sentiment de les "sentir". Ils ne se rendent pas toujours compte que ces "sensations" ne sont pas communicables à des étudiants qui ne partagent pas leurs préoccupations. Si les enseignants chercheurs universitaires prenaient conscience de la nature de l'ignorance de leurs étudiants, peut-être feraient-ils évoluer leur vocabulaire en évitant des approximations de langage qui peuvent légitimement perturber la compréhension de leurs discours. Il ne s'agit pas ici de créer chez les enseignants la crainte de ne plus pouvoir s'exprimer correctement devant les étudiants⁵³. Il ne s'agit pas, non plus, comme le redoutent certains universitaires, de chercher à instaurer un langage "scientifiquement correct". L'objectif est seulement d'attirer leur attention sur les dangers qu'implique une verbalisation trop souvent fautive. La connaissance du fonctionnement de la démarche expérimentale qu'ils pratiquent journellement devrait permettre aux enseignants chercheurs de parler spontanément en respectant le statut épistémologique ou épistémique des entités évoquées. Encore faut-il qu'ils acceptent de modifier leurs habitudes.

Les raisons fondamentales des phénomènes que nous avons décrits résident dans les limites intrinsèques du discours théorique. Ou bien l'étudiant est mis en présence de situations matérielles ou bien il en lit une description. Or une description ne peut pas être exhaustive et elle comporte obligatoirement des réductions. Il faut aussi tenir compte d'une difficulté supplémentaire inhérente à toute verbalisation : le mot lui-même étant un concept, il est ontologiquement une représentation de l'objet, et ceci même lorsqu'il désigne un objet matériel. Les mots font intrinsèquement partie du monde théorique et le simple fait de parler des objets en transforme inévitablement le statut, ce qui est par essence source de confusion. Ainsi le mot "atome" appartient effectivement au monde des concepts même lorsqu'il désigne l'objet atome. Comment signifier alors que le mot « atome » désigne un objet matériel et non pas sa conceptualisation ? Pour ce qui nous préoccupe ici, lorsque le mot atome désigne l'objet nous pourrions écrire " objet - atome " afin d'éviter les confusions. Rien ne s'y oppose, on accepte bien d'écrire "vecteur - vitesse", alors que l'utilité de cette désignation est loin d'être démontrée.

⁵³ Objection qui m'a été transmise et qui fait partie du refus que mon travail a rencontré.

Citons, pour finir, une conjoncture qui brouille encore plus le statut des entités évoquées verbalement. Elle est parfaitement illustrée par l'usage du mot "masse" qui désigne dans le langage courant à la fois une grandeur caractéristique des objets matériels et l'objet lui-même. Dans ma jeunesse, un de mes professeurs de lycée reprenait systématiquement ses élèves lorsque qu'ils disaient "masse" au lieu de "masses marquées" sans expliquer pourquoi. Par un processus analogue, comme nous l'avons évoqué au premier chapitre, la "résistance" a fini par remplacer un résistor et la "self" une bobine d'induction. Il devient alors très difficile de comprendre que l'objet "bobine d'induction" puisse avoir une résistance, alors que l'objet conceptuel "self" est un modèle construit de façon à en être dépourvu. La compréhension des cours théoriques trouve sa limite dans l'accumulation de tous les phénomènes que nous venons d'évoquer.

Il ne s'agit pas pour autant de nier l'utilité des exposés, mais de montrer les limites du discours fermé sur lui-même. Les limites en question se manifestent de façon particulièrement probante dans le codage de certains textes d'exercices. Apparaissent alors des dérapages que nous allons illustrer à l'aide d'un texte donné en première année d'université : " Une masse m , supposée ponctuelle, est fixée à l'extrémité d'un fil inextensible. Elle peut osciller dans un plan vertical autour de l'axe horizontal Oz. " Commentons : " Une masse m , supposée ponctuelle " [ici l'étudiant doit comprendre qu'il s'agit de la représentation d'un objet de masse m , qui est supposé être confondu avec un point] " est fixée " [comme il est impossible de fixer une représentation, dans cette seconde partie de la même phrase m désigne l'objet dont la masse est m] " à l'extrémité d'un fil inextensible... " Pour saisir le contraste entre une description formelle et une description matérielle, comparons ce texte avec l'extrait d'un article de Léon Foucault décrivant son fameux pendule destiné à mettre en évidence le mouvement de rotation de la Terre : " Je supposerai que l'observateur se transporte au pôle pour y établir un pendule réduit à sa plus grande simplicité, c'est-à-dire un pendule composé d'une masse pesante homogène et sphérique, suspendue par un fil flexible à un point absolument fixe ; je supposerai même, tout d'abord, que ce point de suspension est exactement sur le prolongement de l'axe du globe, et que les pièces solides qui le supportent ne participent pas au mouvement diurne⁵⁴. " Et Foucault parle déjà de masse pesante, que signifie-t-il par là ? Certaines expressions contestables proviennent, telles des fossiles, directement des textes les plus anciens.

Le phénomène de disparition des objets matériels se produit aussi chaque fois que l'objet est désigné par un concept mathématique. Nous lisons dans un manuel scolaire : " Le solide S est posé sur un plan incliné⁵⁵ " au lieu de poser une boule sur une planche : d'aucuns rétorqueront que Galilée lui-même utilisait l'expression "plan incliné" dans la description de sa fameuse

⁵⁴ L. Foucault, "Démonstration physique du mouvement de rotation de la terre au moyen du pendule", *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, T. XXXII, n°5, 1851, p. 135.

⁵⁵ Nous examinerons d'autres exemples dans les annexes.

expérience par la pensée. Cette objection ne tient pas compte de toutes les justifications qu'il fournit par ailleurs. En effet Galilée décrit toujours, dans ses *Dialogues*, le rapport entre les entités intervenant dans ses expériences imaginées et les objets participant effectivement aux expériences qu'il réalise ; nous avons fait remarquer au premier chapitre, avec quel soin il décrivait la gorge et la boule qu'il utilisait. Ceux qui méconnaissent la multitude de détails que les grands expérimentateurs prennent toujours le soin d'explicitier, ne se rendent pas compte de leur importance ou ne se sont tout simplement pas donné la peine de les lire.

Encore une fois, il est impossible d'imaginer que les phénomènes d'enseignement que nous décrivons ont pu se perpétuer sans raisons profondes. Pourquoi l'objet n'est-il plus désigné que par une propriété, sa masse, ou par son état, "solide", ou par sa forme, "plane" ? Pourquoi dire qu'un fil tourne autour d'un "axe" et non autour d'un crochet ? Il s'agit là de formulations qui ne sont pas fortuites. Dans un exercice ou un problème scolaire, la description d'un objet par du vocabulaire mathématique a pour fonction d'éviter d'affronter la complexité des situations matérielles. Par exemple, l'utilisation de l'objet théorisé "fil infini chargé" au lieu d'un fil ordinaire, évite de spécifier que l'on ne s'intéresse qu'à un espace restreint qui se situe très près du fil et très loin de ses bords afin de pouvoir négliger les effets de ses extrémités. Généralement⁵⁶ les seules difficultés qui restent à la charge de l'étudiant dans la résolution d'un problème sont d'ordre algébrique. Dans la pratique, pour réaliser un pendule de Foucault, il faut retrouver un grand nombre d'astuces techniques et en inventer d'autres. Alain Marillier a décrit nombre de solutions qu'il a trouvées pour construire le pendule exposé au Palais de la Découverte⁵⁷ ; il existe aussi de multiples différences entre un objet technique véritable et sa modélisation.

Toutes les précisions utiles à la représentation d'une situation expérimentale nécessitent des descriptions que certains enseignants jugent trop longues à lire pour les étudiants. Ils ne se sont jamais donné la peine de le vérifier ; en fait c'est un moyen qu'ils utilisent pour éviter de remettre en question leur façon de s'exprimer. Selon eux seuls les étudiants sont blâmables de ne pas comprendre les textes proposés. Notons incidemment que l'attitude des enseignants qui consiste à rejeter sur les étudiants l'incapacité d'accepter les efforts que le professeur refuse lui-même de faire, se produit si fréquemment qu'elle constitue une nouvelle régularité. Ce nouveau phénomène est désigné par :

"L'étudiant alibi"⁵⁸.

⁵⁶ Les seuls exercices que je connaisse qui échappent à cette règle sont ceux construits par Yvan Simon.

⁵⁷ A. Marillier, "L'expérience du pendule de Foucault au Palais de la Découverte", *Revue du Palais de la découverte*, vol. 26, n° 258, 1998.

⁵⁸ Le concept d'étudiant alibi a été présenté par Monique Saint-Georges dans sa thèse, *Formation des professeurs de sciences physiques par la didactique*, soutenue à l'Université Denis Diderot (Paris 7) en 1996. Thèse

Chacun le reconnaîtra dans de nombreuses discussions pédagogiques.

Les processus précédents, qui concourent à éliminer du discours enseignant l'ensemble des éléments du monde expérimental, ne constituent pas des mécanismes fortuits, mais des phénomènes généraux qui ont les caractéristiques suivantes :

- ils simplifient le discours de l'enseignement de la physique ;
- ils obéissent parfaitement aux lois.

Notons qu'il ne suffit pas de parler des objets pour remédier aux difficultés que rencontre l'enseignement. L'expérience ne peut pas, à elle seule justifier les lois qui sont les objets essentiels de l'enseignement. En effet, le comportement des entités théorisées, tout comme celui des entités théoriques, est conforme à ce que stipulent les lois mais il ne faut pas espérer qu'il en soit de même avec les objets matériels. L'ignorer entraîne de nouveaux phénomènes qui seront examinés plus loin à propos des travaux pratiques.

Les défenseurs des énoncés d'exercices théorisés prétendent viser un simple entraînement "formel", ce qui traduit bien le but implicite essentiel de l'enseignement de la physique. Dans les exercices formels, et ils sont nombreux, les étudiants apprennent à faire du calcul algébrique, ce qui, en principe, devrait être du ressort de l'enseignement des mathématiques. Vaut-il mieux leur proposer des textes courts "théorisés" ou bien des textes effectivement plus longs, mais permettant de faire le lien entre les expériences et la théorie ? Chacun doit trouver sa propre réponse. Encore faut-il que le problème soit clairement posé et les enjeux de l'enseignement clairement définis.

LES ÉLÉMENTS DU MONDE THÉORIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT

Le monde théorique comporte les modèles, les grandeurs physiques et les lois ; examinons comment l'enseignement les présente.

Les modèles enseignés

Une question particulièrement significative surgit régulièrement : quel modèle de l'atome faut-il enseigner ? Le débat est généré par le souci de transmettre les connaissances les plus récentes et de ne pas perdre de temps avec des notions périmées. Or il s'agit d'un faux problème engendré par une croyance selon laquelle les modèles décrivent la réalité ; si on cherche à savoir quel est le bon modèle de l'atome dans l'absolu, on se trompe. Chaque nouveau modèle est créé pour répondre aux dernières questions non résolues. En 1913 Niels Bohr a exposé un modèle de l'atome constitué d'électrons qui gravitent sur des trajectoires circulaires planes autour d'un noyau. Le modèle rend compte à la fois de la stabilité de l'atome et des valeurs de ses énergies

d'ionisation ; il est très bien adapté pour décrire les raies du spectre d'émission de l'hydrogène qui sont obtenues sous l'effet d'une décharge électrique. Dans cette situation, un atome d'hydrogène peut être porté à un niveau d'énergie plus élevé que celui qu'il possède normalement dans son état fondamental. Il émet alors spontanément de la lumière, mais celle-ci ne contient pas toutes les longueurs d'onde d'un arc-en-ciel : observée à l'aide d'un spectrographe, elle se présente sous forme de raies, dites de Balmer, du nom du physicien qui a trouvé des règles numériques pour rendre compte de leur longueur d'onde. Pour certains enseignants, l'atome de Bohr serait obsolète; or il n'a pas cessé de décrire les raies de Balmer : il est donc toujours adapté aux objectifs qui lui étaient fixés à l'origine, et les étudiants qui veulent analyser des spectres d'émission de l'hydrogène seront bien avisés de l'utiliser encore aujourd'hui ! En résumé : les modèles répondent à des questions précises. Seules les questions ont perdu de leur actualité dès lors que les réponses sont connues.

Les modèles fonctionnels ne sont jamais dépassés. Ce sont les questions qu'ils permettent de résoudre qui sont périmées.

Un modèle ne répond jamais à toutes les questions, il n'est donc jamais définitif.

Aucun modèle n'a décrit de façon exhaustive et définitive la structure des atomes. Ainsi l'expérience montre que les raies d'émission de l'hydrogène comportent à leur tour des raies plus fines, désignées par "effet Stark". Il a fallu introduire les nombres quantiques pour les décrire. Que ce soit le modèle de Bohr ou ceux de la mécanique quantique qui lui ont succédé, aucun ne peut décrire l'atome dans sa globalité. Pour chaque nouveau problème il s'agit d'imaginer une structure de l'atome permettant de décrire les phénomènes observés. Bien sûr, les modèles donnent des idées de plus en plus précises sur la composition des atomes matériels, mais ils en diffèrent nécessairement. Il est donc illusoire de croire qu'il existe un "bon" modèle identique à l'objet qu'il modélise. S'ils avaient le loisir de s'exprimer, les atomes ne se reconnaîtraient pas plus dans le modèle de Rutherford que dans celui de Bohr ou encore dans celui de Heisenberg. Un modèle est à l'atome ce qu'une photographie est à un individu ; elle ne traduit certes pas la richesse de la personnalité de l'être représenté, mais, placée sur une carte d'identité, elle permet à la police de le reconnaître. L'idée selon laquelle il existerait des modèles périmés découle donc bien de l'ignorance des questions résolues qui empêche de restituer leur statut aux modèles.

Les grandeurs physiques enseignées

Les grandeurs physiques sont, comme nous l'avons déjà dit, objets d'enseignement en soi. Il est dès lors impossible de les justifier comme outils de la pensée au service de la prévision de l'évolution des situations matérielles. Prenons encore une fois l'exemple de la masse ; comment a-t-elle été construite ? Seule une enquête historique apporterait la réponse. Bornons-nous à constater que Newton a utilisé une grandeur susceptible de caractériser une quantité de matière

indépendamment de sa nature. Cette opération n'est pas ordinaire et mériterait l'admiration des plus blasés ; pourtant l'usage s'en est si bien banalisé qu'il semble extravagant de penser qu'on ne sait pas ce qu'est la masse ni comment l'expliquer alors que son utilité est des plus fréquentes.

La justification des concepts est une préoccupation ancienne. Le mathématicien Henri Poincaré s'interroge dans *La science et l'hypothèse* : “ Qu'est-ce que la masse ? ” Il passe alors en revue les réponses que lui auraient données les savants : “ - C'est, répond Newton, le produit du volume par la densité. - Il vaudrait mieux dire, répondent Thomson et Tait, que la densité est le quotient de la masse par le volume. Qu'est ce que la force ? - C'est répond Lagrange, une cause qui produit le mouvement d'un corps ou qui tend à le reproduire. - C'est, dira Kirchhoff, le produit de la masse par l'accélération. Mais alors pourquoi ne pas dire que la masse est le quotient de la force par l'accélération ? Ces difficultés sont en effet inextricables⁵⁹. ” La diversité des propositions réunies par Poincaré montre que malgré leur indéniable compétence, même les plus grands savants ne peuvent pas donner de réponse satisfaisante à une question qui n'a pas de sens. Personne ne peut dire, encore aujourd'hui, ce “ qu'est ” la masse ou ce “ qu'est ” n'importe quelle autre grandeur physique. Seuls les métaphysiciens pourraient éventuellement se risquer à donner des réponses qu'aucune expérience ne pourrait jamais remettre en cause. Nous pourrions peut-être admettre que, après trois siècles de bons et loyaux services, la masse constitue un outil conceptuel puissant pour prévoir les mouvements des objets. Encore faut-il renoncer à en chercher “ l'essence ” ou à la définir “ en soi ”. La seule solution convaincante pour définir les grandeurs physiques consiste à le faire de façon opératoire.

Les grandeurs physiques ont un statut d'outils conceptuels. Elles sont définies de façon opératoire par leur mesure, par l'ensemble de leurs caractéristiques et par leur fonction.

Selon les cas, les grandeurs physiques caractérisent soit l'état d'un objet (ou d'un système constitué de plusieurs objets), soit les interactions et les échanges entre les objets, soit encore les événements.

Comment les grandeurs physiques sont-elles introduites dans l'enseignement ? Tant que les objectifs de la démarche expérimentale ne seront pas énoncés, tant que les objets matériels ne seront plus évoqués, tant que les modélisations seront éludées, la présentation des grandeurs physiques dans l'enseignement résultera fatalement de procédures discutables qui vont être examinées maintenant. Pour les illustrer, des exemples seront choisis dans les *Cours de physique générale* de Bruhat⁶⁰. Ces manuels, d'une qualité inégalée, ne sont plus édités. Cependant, ils ont eu leurs heures de gloire dans les années soixante et ils ont servi pendant longtemps de référence,

⁵⁹ Henri Poincaré, *La science et l'hypothèse*. Flammarion, 1968. p. 118.

⁶⁰ G. Bruhat, *Cours de physique générale, Mécanique*. Masson, 1967.

aussi bien pour les étudiants que pour les enseignants. Ils représentent assez bien la teneur idéologique du discours enseignant jusqu'à aujourd'hui. Examinons les différents types de justifications des grandeurs physiques que nous y trouvons.

L'existence. Focalisons notre attention sur la nature des justifications fournies par Bruhat pour introduire le concept de force : “ La Mécanique a pour objet l'étude des mouvements et des déformations que subissent les corps sous l'influence des diverses causes qui peuvent agir sur eux ; nous verrons que ces diverses causes peuvent être représentées, au point de vue de leurs actions mécaniques, par des grandeurs qui sont toutes de même nature, et qu'on appelle des forces⁶¹. ” Autrement dit, la “ force ” représenterait une action mécanique qui agirait sur les objets et qui provoquerait leur mouvement. Une description causale entraîne presque automatiquement l'affirmation implicite de “l'existence” de la cause. Plus tard un dérapage conceptuel non contrôlé conduit à imaginer que les forces elles-mêmes existent. Un corps est “soumis” à des forces, elles sont capables de “se compenser ” ou de “satisfaire à des conditions” : “ étant donné un corps ou un système de corps soumis à des forces, on cherche à quelles conditions ces forces se font équilibre, c'est-à-dire à quelles conditions elles doivent satisfaire pour que les corps considérés restent en repos⁶². ” Traduisons ce texte en termes d'action, d'objets et d'événements. Que faudrait-il faire pour qu'une assiette “reste au repos” lorsqu'on la lâche ? Selon l'énoncé de Bruhat, il faut que les forces qui s'exercent sur l'assiette s'équilibrent. Est-il possible d'aller chercher des forces, de les prendre et de les appliquer sur l'assiette afin d'empêcher qu'elle tombe et se casse ? Non bien sûr, nul besoin d'être grand clerc pour répondre qu'il suffit de poser l'assiette sur une table ; et, comme le dit Poincaré : “ On ne peut pas décrocher une force appliquée à un corps pour l'accrocher à un autre corps, comme on décroche une locomotive pour l'atteler à un autre train⁶³. ” Les équations traduisent exactement la situation ; c'est bien pour décrire l'événement – l'assiette reste immobile sur une table – que nous devons supposer que la table exerce sur l'assiette une force égale et opposée à celle que la Terre exerce sur l'assiette. Car, pour ne rien cacher, c'est le seul moyen de connaître la force que la table exerce sur l'assiette ! Ces considérations ne sont pas gratuites ; elles interviendront lorsque nous voudrons rendre opératoire l'énoncé de la loi fondamentale de la dynamique qui décrit cette catégorie de situations.

L'anthropomorphisme. Un autre type de présentation apparaît dans le passage suivant : “ La première notion de force nous est donnée par la sensation d'effort musculaire : nous savons qu'il

⁶¹ G. Bruhat, *op. cit.*, p. 40.

⁶² *Op. cit.*, p. 40.

⁶³ H. Poincaré, *op. cit.*, p. 118.

nous faut exercer un tel effort pour mettre en mouvement une voiture arrêtée sur un plan horizontal⁶⁴, ou pour augmenter la longueur d'un fil de caoutchouc dont une extrémité est fixée à un mur et dont nous tenons l'autre extrémité à la main. Nous avons ainsi directement la notion de deux effets que peut produire une force...⁶⁵. ” Bruhat utilise ici une analogie anthropomorphique entre l'effort et la force. Ce faisant, il ne prend en compte ni les précisions de Newton⁶⁶, ni les objections de Poincaré : “ Mais quand bien même cette intuition directe nous ferait connaître la véritable nature de la force en soi, elle serait insuffisante pour fonder la Mécanique ; elle serait d'ailleurs tout à fait inutile⁶⁷. ” Il est donc bien impossible, selon Poincaré, de fonder le concept de force sur une intuition créée par la sensation d'effort. Or, la plupart des manuels récents introduisent les forces à l'aide de cette analogie : pratiquement aucun d'entre eux n'échappe à une présentation anthropomorphique des forces.

La visualisation et la mise en évidence. Si les grandeurs physiques existaient matériellement, on pourrait concevoir qu'elles puissent être “visualisées” à partir de l'expérience. Bien que ce ne soit pas le cas, certaines formulations le laissent entendre. Ainsi trouvons-nous dans le programme de seconde : “ Utilisation de l'oscilloscope pour visualiser une tension et mesurer ses caractéristiques (amplitude et fréquence)⁶⁸. ” Ce n'est pourtant pas la tension qui est visualisée, mais c'est la trace d'un faisceau d'électrons sur un écran que l'on voit ! Ce nouveau dérapage sémantique permet d'affirmer ce que l'on prétend démontrer. De même un manuel scolaire énonce explicitement la possibilité de montrer des concepts et leurs propriétés qui, selon notre modèle, font partie du monde théorique : “Objectif, mettre en évidence la force électromagnétique et observer ses caractéristiques.” L'expérience, évoquée à l'aide d'un schéma, est censée montrer qu'un circuit électrique, initialement situé dans l'entrefer d'un aimant, se déplace lorsqu'il est parcouru par un courant. Les auteurs en déduisent “la mise en évidence” d'une force électromagnétique. Nous sommes en présence d'une manifestation typique du phénomène d'inversion épistémologique ou épistémique des objets de connaissance ; la force électromagnétique n'est pas construite comme un outil conceptuel permettant de décrire le mouvement du circuit, c'est le fait que le circuit électrique bouge qui est censé prouver “l'existence” du concept.

L'expression “mettre en évidence” sert à présenter indifféremment les grandeurs physiques, leurs

⁶⁴ Pourquoi ne pas dire sur une route plate ?

⁶⁵ G. Bruhat, *op. cit.*, p. 40.

⁶⁶ Voir celles qui ont été déjà citées au premier chapitre.

⁶⁷ H. Poincaré, *op. cit.*, p.124.

⁶⁸ Bulletin officiel, *op. cit.* 1992, p. 84.

caractéristiques, les principes et les lois. Or si on se place du point de vue d'un étudiant la "mise en évidence" n'a de sens que dans le cas où est "donné à voir" un phénomène qui, sans un effort particulier, passerait inaperçu. En revanche, prétendre voir un concept relève de l'imagination. Il n'empêche qu'une utilisation fréquente des grandeurs physiques provoque une telle familiarité qu'elle finit par créer l'impression d'une relation sensible. Ce n'est pas une raison suffisante pour enseigner les grandeurs physiques comme si elles appartenaient au domaine des sens (ceux du professeur bien entendu).

La "substantification" est l'attitude intellectuelle qui consiste à assimiler les concepts à de la matière. Elle est très ancienne. De multiples exemples montrent que la "substantification" a été une étape utile à l'élaboration des concepts. Ainsi, à l'origine, la transmission de la chaleur ne pouvait se concevoir que portée par une substance mystérieuse, le phlogistique. À une autre époque, la transmission des ondes nécessitait un support matériel, l'éther. Une fusion entre le monde réel et ses différentes représentations est probablement une étape nécessaire à la progression de la pensée. Après tout, peu importe, chacun interprète la physique à sa manière. S'il ne faut pas minimiser le rôle d'une phase intuitive dans l'élaboration des concepts (à laquelle participent l'anthropomorphisme et la « substantification »), encore faut-il être conscient de ses limites et ne pas l'utiliser comme fondement de la science.

La dissociation entre les grandeurs physiques et la matière constitue une véritable conquête de l'esprit et cette étape instructive doit être explicitée. En effet ne pas le faire provoque d'étranges phénomènes. Ayant acquis une existence quasi matérielle, les forces "se manifestent". Elles deviennent susceptibles de "s'appliquer" à des objets, comme si elles pouvaient le faire par elles-mêmes. Elles acquièrent une étrange autonomie qui n'étonne plus les enseignants ; elles se mettent à "travailler". Ainsi un chapitre de *la Mécanique* de Bruhat s'intitule-t-il : "Travail d'une force appliquée à un point matériel"⁶⁹. Dans ces conditions, la compréhension du nouveau concept « le travail », qui est, par définition, un mode de transfert d'énergie d'un système à un autre, devient problématique. Ces verbalisations ne seraient pas répréhensibles si elles ne créaient pas des obstacles majeurs à une utilisation efficace des concepts.

La mesure. Je partage l'avis de Poincaré lorsqu'il affirme que les grandeurs physiques sont définies par leurs mesures : "Ce qui importe, ce n'est pas de savoir ce qu'est la force, c'est de savoir la mesurer"⁷⁰. À juste titre, dans son manuel, Bruhat consacre plus de vingt pages à la mesure des longueurs, plus de dix-sept à celle des masses et trente à celle du temps. Cependant pour que la mesure puisse véritablement fonder une grandeur physique, il faut pouvoir décrire et

⁶⁹ G. Bruhat, *op. cit.*, p. 81.

⁷⁰ H. Poincaré, *op. cit.*, p. 118.

justifier toutes les opérations manuelles et intellectuelles qui interviennent dans l'acte de mesurer. Or il suffit d'examiner les différents ouvrages d'enseignement actuels pour constater que l'explicitation des mesures est trop elliptique pour permettre de construire efficacement les concepts. Le rôle de la mesure n'est généralement pas apprécié à sa juste valeur.

Les difficultés décrites en mécanique se reproduisent à l'identique, et pour les mêmes raisons, en électricité, à ceci près qu'il est encore plus difficile de présenter intuitivement le courant, la tension ou la puissance que la force. Dans certains ouvrages du secondaire, la tension électrique⁷¹ est d'emblée définie par sa mesure à l'aide d'un multimètre. Seulement, comme il suffit de tourner un bouton de l'appareil pour mesurer le courant, cette opération ne peut pas permettre de définir la tension. Une autre solution adoptée par les manuels consiste à la définir par la "visualisation" de la trace d'un faisceau d'électrons à l'oscilloscope. On oublie alors que la déviation est elle-même provoquée par la tension dont on recherche la valeur. Comment connaître la tension appliquée pour dévier les électrons, tant qu'on ne sait pas la mesurer ? Pour percevoir la circularité du raisonnement, il suffirait de proposer aux étudiants de graduer l'appareil. Notons que dans leurs articles les scientifiques ne manquent jamais de spécifier avec une très grande précision la façon dont ils procèdent et les instruments qu'ils utilisent pour mesurer. Ainsi Jean Perrin⁷² décrit-il avec un grand luxe de détails toutes les opérations qu'il faut accomplir pour mesurer une longueur ou une durée. Cette attitude est toujours d'actualité : en 1996 Leon Lederman⁷³ ne fait l'économie d'aucune description des méthodes de mesures et des appareils utilisés en physique nucléaire, dans un ouvrage destiné pourtant à un large public. Ainsi décrit-il la mesure des distances, " Nous envoyons des signaux lasers sur un nouveau réflecteur placé sur la lune pour, mesurer la distance Terre Lune. L'aller-retour dure à peu près 1,0 seconde⁷⁴. " Il écrit ailleurs, et on pourrait prendre bien d'autres exemples dans son ouvrage ; " Dans la machine de Cockroft et Walton, des explosions de protons, environ mille milliards par seconde, étaient accélérés dans le tube à vide et s'écrasaient contre une cible de plomb, de lithium ou de béryllium⁷⁵. " Il faudrait que les manuels scolaires donnent plus d'informations sur les réalisations techniques, sans forcément entrer dans tous les détails.

⁷¹ Personne n'a encore trouvé, que nous sachions, de moyens convaincants de présenter la tension électrique de façon satisfaisante.

⁷² J. Perrin, *Les Éléments de la physique*, Albin Michel, 1929.

⁷³ L. Lederman, Dick Teresi, *The God particle*, 1993 editions Houghton Miffling Company, New York. *Une Sacrée particule* Odile Jacob, 1996, p. 34.

⁷⁴ *op. cit.*, p. 145 ;

⁷⁵ *op. cit.*, p. 230.

Nous revenons toujours à la même explication : la diversité de présentations des grandeurs physiques dans l'enseignement prouve que leur fonctionnalité n'est pas perçue comme étant une raison suffisante pour les justifier.

Les définitions. Les considérations précédentes expliquent la gêne ressentie par certains enseignants lorsqu'ils tentent de "présenter" les grandeurs physiques à partir du monde expérimental. En conséquence, nombreux sont ceux qui préfèrent s'en tenir à un discours axiomatique. Par exemple les physiciens Pierre Fleury et Jean-Paul Mathieu utilisent la définition suivante : "Les forces se manifestent soit par leurs effets dynamiques (action sur le mouvement des corps), soit par leurs effets statiques (action s'équilibrant sur un corps au repos)⁷⁶." Notons qu'ici encore, les forces gardent la faculté de se "manifester".

Il faut de l'audace pour remettre en cause la fonctionnalité des définitions alors que le milieu enseignant en fait un si grand usage. Pourtant, il n'y a là rien de véritablement original ; Poincaré écrivait déjà à propos de la définition des forces : " Quand on dit que la force est la cause du mouvement, on fait de la métaphysique, et cette définition, si on devait s'en contenter, serait absolument stérile⁷⁷." La vigueur du qualificatif "stérile" est parfaitement adaptée à la circonstance puisque les élèves refusent de telles « explications » et je ne fais qu'égrener les arguments qui leur donnent raison. En effet, par quel moyen le constat des effets d'une force permettrait-il de remonter à leur cause ? La cause est-elle unique ? Comment opère-t-elle ? La position de Poincaré n'est pas obsolète. Le physicien Luc Valentin la reprend plus récemment à son compte : " Mais peut-on définir dans l'abstrait ce que sont force et masse⁷⁸ ? " se demande-t-il sans donner de solution. C'est bien parce que nous ne savions pas comment procéder que nous avons continué à imposer à des générations d'étudiants des définitions stériles. Les définitions utilisées n'étant pas opératoires, il n'y a rien d'étonnant à ce qu'elles puissent être incomplètes, comme le notent G. Lemeignan et A. Weil-Barais après une étude des manuels du secondaire : " Ainsi, il n'est jamais dit explicitement ce que décrivent ces grandeurs (un état ou un transfert d'énergie)⁷⁹."

Pouvons-nous pour autant nous passer totalement de définitions ? Évidemment pas. Pour être utiles, les grandeurs physiques doivent être définies mais de façon opératoire. Pour transformer

⁷⁶ P. Fleury et J.-P. Mathieu, *Mécanique physique*, Eyrolles, 1961, p. 56.

⁷⁷ H. Poincaré, *op. cit.*, p. 118.

⁷⁸ L. Valentin, *L'Univers mécanique*, Hermann, 1995, p. 76.

⁷⁹ G. Lemeignan et A. Weil-Barais, "L'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie", *Rapport de fin de contrat LIREST - INRP*, 1990, p. 7.

une définition abstraite en définition opératoire, il suffit de poser *a priori* les caractéristiques du concept :

Les grandeurs physiques doivent être définies de façon opératoire par leurs caractéristiques et leur fonction⁸⁰.

Voyons ce que donne l'application de ce principe pour la force :

- Une force est la représentation de l'action d'un objet sur un autre ;
- Une force est caractérisée par sa grandeur, sa direction et son sens et, pour les objets d'extension finie, par son point d'application.
- Les forces interviennent dans l'énoncé des lois de la mécanique qui décrivent le mouvement des objets.

Cette façon de procéder diffère des justifications habituelles⁸¹. Voici comment Bruhat procède pour introduire les propriétés des forces : “Nous voyons également quels sont les éléments qui caractérisent la force : [...] nous savons également que nous exerçons notre effort dans une certaine direction, qui est celle dans laquelle nous tendons le fil, et dans un sens bien déterminé ; enfin nous avons instinctivement la notion d’avoir à exercer un effort plus ou moins grand, suivant que nous voulons déplacer la voiture [...] Pour achever de caractériser la force, il faut se donner un dernier élément, qui est sa grandeur. Nous voyons ainsi apparaître, comme éléments caractéristiques d’une force, les quatre éléments, point d’application, direction, sens et grandeur, par lesquels nous avons défini un vecteur, et nous sommes conduits à représenter les forces par des vecteurs⁸². ” Nous sommes, une fois de plus, en présence d’un exemple impressionnant d’inversion épistémologique ou épistémique des objets de connaissance. Pour l’éviter, il suffirait de dire que la description de la force qu’exerce l’opérateur qui tire la voiture nécessite d’en préciser la grandeur, la direction et le sens. Il se trouve que l’objet “vecteur” comporte toutes ces informations ; c’est pourquoi nous l’utilisons pour représenter mathématiquement la force.

Les caractéristiques des forces peuvent-elles “apparaître” à partir d’une observation du monde expérimental ? Si tel était le cas, pourquoi ne les filmerions-nous pas ? Pourquoi l’ensemble des étudiants éprouveraient-ils la moindre difficulté pour les “connaître” ? Le plus étrange c’est que les “bons” étudiants, entre autres ceux qui deviendront professeurs, finissent par « voir » les forces ou par les « sentir » ; ils en deviennent tellement persuadés qu’il est excessivement difficile de mettre ces “sensations ” en cause par la suite.

⁸⁰ Et je suis tentée de croire que cette “définition” s’applique aux concepts construits dans toutes les recherches qui se veulent scientifiques comme les sciences économiques ou les sciences dites humaines.

⁸¹ Il suffit d’aller consulter les définitions sur la toile pour se convaincre que les termes utilisés par Bruhat, un maître incontesté, sont repris pratiquement par tout le monde.

⁸² G. Bruhat, *op. cit.*, p. 40.

Le discours a-t-il évolué depuis les années 1990, période où j’essayais de convaincre mes collègues de la validité de mes propositions ? Il suffit de consulter l’encyclopédie en ligne Wikipédia pour voir qu’il n’en est rien.

La vitesse et la force sont présentées généralement comme si elles étaient intrinsèquement assimilables à des vecteurs. Ainsi les vitesses sont désignées par le groupe nominal “vecteurs - vitesses”, les forces par “vecteurs - forces”, ce qui revient à assimiler leurs caractéristiques physiques à leurs caractéristiques mathématiques. Cela n’aurait aucune importance si c’était vrai, ce qui n’est pas le cas. Prenons par exemple un caractère qui les différencie : la vitesse caractérise un objet tandis que la force elle, caractérise une interaction, c’est-à-dire ce qui se passe entre deux objets ! Le fait de se contenter de représenter la vitesse et la force par un vecteur, n’exprime pas cette différence qui est forcément passée sous silence tant que les objets ont disparu du discours. *A contrario* on n’éprouve pas le besoin de spécifier avec autant d’insistance que la masse est décrite par une grandeur scalaire, il serait pourtant légitime, par souci de cohérence, de désigner la masse par un groupement analogue : le “scalaire - masse”. Tout se passe comme si le fait de représenter une propriété physique par une grandeur plus facilement calculable facilitait la compréhension du concept, ce qui n’est pas le cas.

De façon analogue, la définition mathématique du “travail d’une force” ne met pas en valeur l’information essentielle, à savoir que le “travail” représente un mode particulier de transfert d’énergie d’un système à un autre⁸³. G. Lemeignan et A. Weil-Barais, après une analyse systématique des programmes et des manuels concernant la présentation de l’énergie, constatent que : “ Le travail d’une force ne prend pas de sens en terme d’énergie⁸⁴. ” Ils ajoutent que : “ De manière générale les propriétés des grandeurs ne sont ni systématiquement ni explicitement énoncées⁸⁵. ” Remplacer des définitions abstraites par des définitions opératoires rendrait l’enseignement plus efficace ; les étudiants pourraient enfin acquérir une compétence.

Les dénominations. Bien qu’établies depuis longtemps, de nombreuses grandeurs physiques ont des désignations diverses. Il suffit d’ouvrir n’importe quel manuel pour constater la multitude de qualificatifs attribués aux forces : force pressante, élastique, de frottement, de réaction, de contact, visqueuse, conservative etc. Un étudiant n’est jamais certain de les connaître tous, alors qu’il n’existe que quatre types de forces⁸⁶. Quelle est la raison d’une telle profusion ? Toujours la

⁸³ Le transfert d’énergie peut aussi se faire sous forme de chaleur ou de rayonnement.

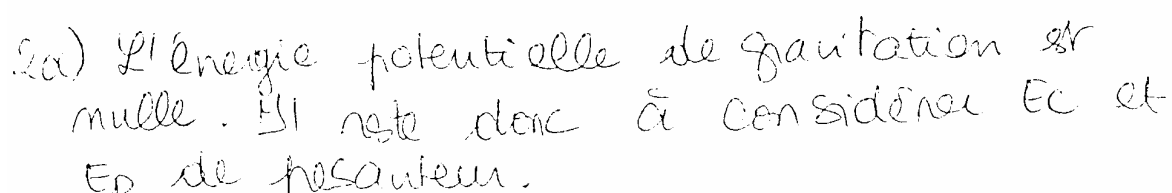
⁸⁴ G. Lemeignan et A. Weil-Barais, *op. cit.*, p. 13.

⁸⁵ G. Lemeignan et A. Weil-Barais, *op. cit.*, p. 7.

⁸⁶ Deux forces fondamentales s’expriment par des relations mathématiques : les forces, dites de gravitation, qui s’exercent entre des objets dont l’un au moins possède une masse aussi importante que celle d’une planète. Les

même ; les différents noms servent à évoquer des situations sans mentionner les objets. Leur modélisation est implicite lorsqu'ils sont transformés en « solides ponctuels ». Qualifier les forces d'élastiques évite de prendre en compte les ressorts qui les exercent. Les forces "pressantes" sont du type de celles qu'exerce l'eau sur un sous-marin. Toutes ces appellations seraient inutiles si, au lieu de faire un bilan des forces "dans l'abstrait", on demandait aux étudiants de rechercher les objets interagissant de façon notable, ce qui nécessite des calculs d'ordre de grandeur. C'est donc bien, une fois encore, la disparition des objets qui entrave la construction de l'unicité du concept. Non seulement les désignations sont multiples, mais, en plus, elles sont souvent impropres. Prenons l'exemple du poids : dans l'expression "le poids d'un objet" se télescopent deux concepts différents : d'une part, la masse qui caractérise effectivement l'objet en question et le poids proprement dit, qui est le nom communément attribué à la force que la Terre exerce sur l'objet. Dans le deuxième cas, le possessif qui attribue le poids à l'objet est particulièrement mal venu puisqu'il lui confère un caractère qu'il n'a pas.

Jusqu'ici, il ne s'est agit que de montrer en quoi les expressions habituelles sont préjudiciables à une bonne compréhension de la physique. L'anecdote suivante confirme toute la légitimité de telles préoccupations :



2a) L'énergie potentielle de gravitation est nulle. Il reste donc à considérer E_c et E_p de pesanteur.

Figure 1

« L'énergie potentielle de gravitation est nulle. Il reste donc à considérer E_c et E_p de pesanteur »

L'étudiant semble ignorer dans sa copie de contrôle que l'énergie potentielle de gravitation n'est rien d'autre que l'énergie potentielle de pesanteur ! Pour lui deux noms différents désignent deux choses différentes. Dans ce cas, il se trompe, mais a-t-il tous les torts ? Les étudiants devraient savoir que des scientifiques, qui se veulent des parangons de la rigueur, s'autorisent, s'agissant du langage, un très grand laxisme. Ainsi, à l'opposé, un mot unique le "temps" ne sert pas seulement à désigner la date et la durée, mais aussi le temps des poètes, celui qui s'écoule en refusant de

forces, dites électromagnétiques, qui s'exercent entre objets dès qu'ils portent des charges électriques. Les deux autres forces sont les interactions fortes, qui ont une portée de l'ordre de 10^{-15} m, et les interactions faibles, qui ont une portée de 10^{-19} m : elles ne concernent que les constituants des noyaux des atomes dont la dimension est de l'ordre de 10^{-15} m. (Les dimensions des atomes sont de l'ordre de l'Angström, 10^{-10} m.)

suspendre son vol. Autrement dit le même mot désigne trois entités différentes.

La définition opératoire. Passer d'une définition "abstraite" à une définition "opératoire" nécessite une remise en cause de nos habitudes de pensée ; les annexes 1, 2 et 3 montrent comment procéder. Les définitions formelles constituent un nouveau processus circulaire qui fige les pratiques de l'enseignement de la physique. Le fait que les définitions ne soient pas opératoires résulte, répétons-le, directement de la disparition des objets. Tant que les objets matériels ne feront pas partie de la description d'une situation, il restera impossible de proposer des définitions opératoires.

Les lois enseignées

La justification des lois se heurte à des difficultés analogues à celles qui ont été examinées à propos des grandeurs physiques. Les lois sont implicitement considérées par les enseignants puis par les étudiants, comme des vérités produites par "la science". Les professeurs n'éprouvent donc pas la nécessité d'en préciser le statut.

Introduction axiomatique des lois. Comparons la situation de la recherche, où la loi est ignorée de tous, à celle de l'enseignement, où le professeur la connaît à l'avance. En recherche, des expériences et des recoupements théoriques multiples permettent parfois de soupçonner une loi par un processus intellectuel complexe. La construction d'une loi résulte d'une sorte de synthèse de données différentes se produisant après un long travail d'élaboration. Une loi vient à l'esprit sans obéir à des règles identifiables. Ensuite, elle est prise comme une hypothèse qu'un travail de validation complexe permet éventuellement d'accepter, comme nous l'avons vu au chapitre précédent. La capacité d'apporter de nouvelles solutions aux problèmes restés en suspend milite alors en la faveur de la nouvelle loi proposée.

Focalisons maintenant notre attention sur la présentation des lois dans l'enseignement. Bruhat respecte explicitement leur statut hypothétique. Elles sont posées par l'auteur qui s'exprime au nom d'une communauté scientifique, à laquelle les étudiants sont invités à se joindre. Il engage sa responsabilité, ce qu'il indique par l'utilisation du pronom " nous ". " Nous admettons que : l'accélération du mouvement d'un point matériel donné a pour direction la résultante des forces qui agissent sur lui, et qu'elle lui est proportionnelle. [...] Nous appellerons la loi fondamentale de la Dynamique l'énoncé suivant : l'accélération d'un point matériel en mouvement est proportionnelle à la force qui agit sur lui et inversement proportionnelle à sa masse⁸⁷. " Comment ces mêmes lois sont-elles énoncées dans les manuels du secondaire ? " Si $\mathbf{F}$ est la somme des forces qui s'exercent sur le point matériel, m sa masse, et $\mathbf{a}$ son accélération, on pourra écrire : $\mathbf{F}$

⁸⁷ G. Bruhat, *op. cit.*, p. 112 et p. 116 pour la citation suivante.

= m.a. Cette relation est appelée loi fondamentale de la dynamique ou deuxième loi de Newton. ” Avec la suppression de “nous admettons” disparaît le caractère hypothétique de la loi qui, notons-le incidemment, en devenant une “ relation ” mathématique, perd son statut de loi.

Tout se passe comme si les enseignants éprouvaient une gêne extrême à exprimer quelque chose qui ressemblerait à un doute incompatible avec la croyance selon laquelle les lois sont vraies.

Sinon, comment expliquer l’utilisation d’une formulation canonique impersonnelle introduite par le pronom indéfini “on” ? L’expression “ on pourra ” traduit indubitablement un embarras provenant de la méconnaissance du fonctionnement de la création des connaissances et du statut des lois.

La présentation des principes est tellement similaire à celle des lois que les canons, car il s’agit bien d’un langage codé, auxquels obéissent leurs énoncés sont identiques. Dans ces conditions, les étudiants ne peuvent pas comprendre la différence de statut entre principe et loi.

Introduction expérimentale. Peu satisfaits d’avoir à décréter les lois, à les “balancer” comme ils disent, certains enseignants préfèrent les présenter à partir des expériences. Les lois étant connues, ils n’ont pas le sentiment d’encourir le moindre risque en prétendant les “mettre en évidence”. Étant irréalisable, un tel projet se heurte forcément à toute une série d’obstacles. Comment éviter, en effet, que les objets matériels refusent « d’obéir » aux lois ? Par exemple aucun objet n’étant isolé dans l’espace, aucun mouvement ne peut être rigoureusement décrit par la loi de l’inertie, il est donc faux de croire que l’on peut mettre expérimentalement en évidence un mouvement rectiligne uniforme. Le comportement effectif des objets matériels explique pourquoi les professeurs et les lycéens sont, dans leur ensemble, convaincus que “les expériences, ça ne marche jamais”. Concernant une science expérimentale, cette idée est extravagante ; pourtant elle se perpétue.

Si les lois sont considérées comme des objets de connaissances, il ne semble plus nécessaire de se donner du mal pour les établir rigoureusement ; pourtant il n’y a aucune raison que les étudiants admettent sans discussion le passage des résultats de mesure comportant nécessairement une dispersion, à une loi mathématique, rigoureusement exacte. Les étudiants ne doivent pas non plus accepter sans justification le passage des résultats obtenus par une unique expérience à un énoncé de caractère général.

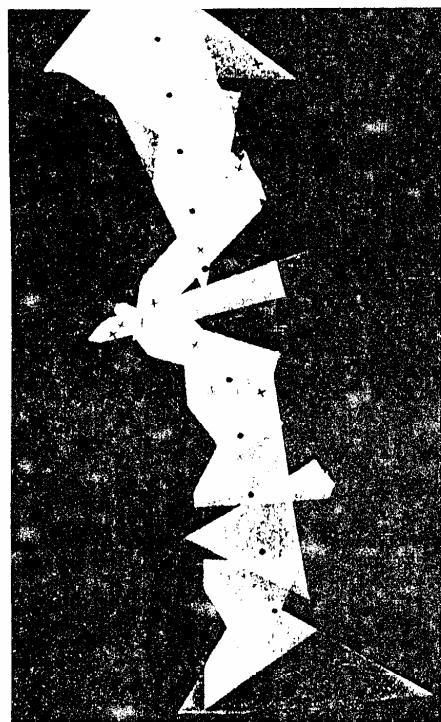
Dans l’enseignement la justification des lois par l’expérience implique un ensemble de procédures visant à créer l’illusion que les résultats théoriques et expérimentaux sont identiques. Il est possible de faire semblant d’y parvenir en utilisant des dispositifs performants qui minimisent l’inévitable dispersion des valeurs mesurées au point de la rendre imperceptible. Il faut bien qu’une telle pratique comporte des avantages, pour qu’elle subsiste malgré l’ensemble

des artifices qu'elle implique. Les impasses communément exécutées évitent d'affronter les difficultés d'ordre expérimental et permettent, croit-on une fois de plus, de gagner du temps.

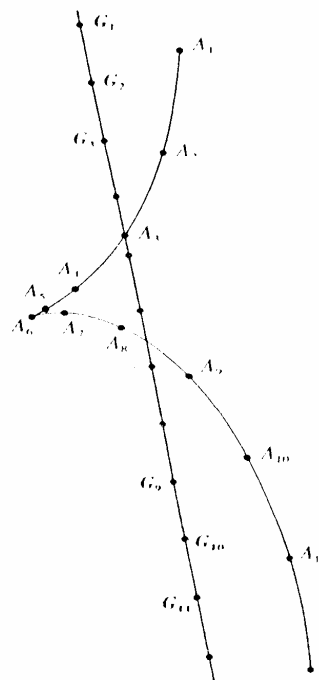
Si la démarche expérimentale produit des connaissances grâce à la confrontation entre le monde expérimental et le monde théorique, c'est justement parce qu'ils sont intrinsèquement différents. L'action qui consiste à les identifier afin de justifier les propositions théoriques est illégitime, même s'il est possible de camoufler leurs différences. Elle conduit inévitablement à négliger la rigueur méthodologique et crée des obstacles insurmontables à la compréhension de la démarche expérimentale et des connaissances qu'elle crée.

Décrivons ce qui se produit pratiquement lors de l'exploitation d'une expérience visant à "mettre en évidence" le principe d'inertie, déjà évoqué. Rappelons son énoncé : tout objet isolé se déplace suivant un mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire en ligne droite et avec une vitesse constante). Nous avons vu qu'il s'agit d'un événement conceptuel puisqu'il est impossible de créer une situation comportant un objet isolé. Vers le milieu des années soixante-dix, un dispositif expérimental, complexe et coûteux, a été introduit dans les lycées afin d'établir le principe d'inertie. L'expérience mettait en jeu le mouvement d'un palet sur une table dite à coussin d'air. La présentation de cette expérience mérite d'être analysée bien qu'elle ne reste pas en permanence dans le cursus scolaire français ; elle réapparaît régulièrement sous une forme ou sous une autre. Le raisonnement proposé dans les manuels scolaires met en œuvre tout un ensemble de procédures dont l'équivalent est utilisé dans de nombreuses autres circonstances.

fiche expérimentale 1
mouvement du centre d'inertie d'un solide pseudo-isolé



Une plaque triangulaire dont on a précédemment déterminé le centre de gravité (point rouge) est lancée sur une table à coussin d'air; cette plaque est pseudo isolée. Une fois lancée, elle est photographiée à des intervalles de temps τ égaux. Le point noir A_i quelconque, a un mouvement curviligne.
Le point rouge G a une trajectoire rectiligne.



De plus on constate que $G_1G_2 = G_2G_3 = G_3G_4 = \dots$
Le mouvement de G est *rectiligne uniforme* parcourt des distances égales pendant des durées τ égales.
Le centre de gravité de la plaque, solide pseudo isolé, est animé d'un mouvement rectiligne uniforme.
Il est appelé « centre d'inertie » de la plaque.

Figure 2. Expérience présentée dans un manuel de lycée.

Le palet lancé sur la table n'est pas isolé : la table l'empêche de tomber, et le coussin d'air soufflé au dessus de la table réduit, sans les annuler, les frottements qu'il aurait subis s'il avait été posé directement sur la table. Comment surmonter les contradictions entre la réalité et ce qu'on veut « démontrer »? Les enseignants ont inventé pour la circonstance un concept *ad hoc* : l'objet pseudo isolé ; il est supposé se mouvoir « librement » dans la direction horizontale.

Pourvu d'un dispositif de marquage, le palet laisse en se déplaçant des traces qui sont soit disant enregistrées. Elles sont désignées par G_1, G_2 , etc.

Les « positions » du palet sont représentées sur la figure 2 par des pastilles équidistantes, elles sont dessinées pour les besoins de la « démonstration ». Des mesures ne se présentent jamais sous cette forme.

Dans la fiche expérimentale, reproduite sur la figure 2, nous lisons : « De plus on constate que $G_1G_2 = G_2G_3 = G_3G_4 = \dots$. Le mouvement de G est rectiligne uniforme ; G parcourt des

distances égales pendant des durées égales. ” Ainsi le mouvement du palet est assimilé à celui d'un point G. La lettre G désigne à la fois un point, le palet et sa trace. Le procédé qui consiste à utiliser la même lettre pour désigner trois entités de nature différentes, vise à convaincre les étudiants que les distances G_1G_2 , G_2G_3 et G_4G_5 sont effectivement égales et qu'il est possible de le constater.

L'enregistrement représenté sur la figure 3, obtenu à partir d'une expérience que j'ai effectivement réalisée dans un lycée, montre que les taches représentant les traces laissées par le palet ne sont ni ponctuelles, ni rondes, ni rigoureusement alignées. De plus il n'est pas possible de “prouver” que leurs distances sont strictement égales⁸⁸.



Figure 3. Résultats expérimentaux obtenus au cours d'une expérience non simulée.

N'importe quel examen attentif des manuels de lycée permet de constater que la plupart des résultats présentés comme étant expérimentaux ne le sont pas. Ils sont construits pour les besoins de la démonstration souhaitée. Les valeurs expérimentales reportées sur les graphiques correspondent trop bien aux résultats théoriques attendus pour qu'elles puissent représenter de véritables résultats de mesure. Cette accusation est grave mais elle peut être contrôlée par différents moyens. D'abord la dispersion interdit d'identifier les résultats expérimentaux aux lois, mais il y a plus ; il existe aussi des raisons théoriques. Prenons l'exemple de la loi d'Ohm pour s'en convaincre. Elle stipule que si V désigne la tension aux bornes d'une résistance et I le courant qui la traverse, la variation de V est proportionnelle à I . La fonction $V(I)$ est linéaire et de la forme : $V=RI$. La loi d'Ohm se représente donc théoriquement par une droite passant par l'origine dans un diagramme portant la tension V en fonction de I . Or il n'est pas possible de mesurer en même temps la tension aux bornes d'une résistance et le courant qui la traverserait si le voltmètre, qui mesure la tension, n'était pas branché à ses bornes. La “vérification” expérimentale directe de la loi d'Ohm est donc impossible. Aucune courbe traçant de façon précise la variation de la tension mesurée V_m en fonction du courant mesuré I_m , ne peut rigoureusement passer par l'origine, contrairement à ce que montre la figure 4.

Notons cependant que les performances techniques permettent, dans certaines circonstances, de

⁸⁸ J'ai enregistré des entretiens avec des élèves qui ont tenté simplement de mesurer la distance entre des taches consécutives. Ils se sont vite rendu compte de la difficulté de la tâche.

créer une illusion laissant croire que l'identification est possible⁸⁹. Les enseignants connaissent tous parfaitement l'ensemble de ces faits. Ils ont appris à l'université à faire des montages pour réaliser les mesures en tenant compte de l'effet produit par l'introduction des appareils de mesure dans le circuit⁹⁰. Ils les désignent par les termes conventionnels de "montage aval" et "montage amont". Pourquoi alors procèdent-ils comme s'ils les ignoraient ? Ne serait-ce pas pour faire comme si les lois étaient expérimentalement "démonstrables" ? Ils finissent par croire que leurs actions sont légitimes ; la preuve ?, nous l'avons trouvée dans un manuel : " Comme nous l'avons vu en classe de troisième, l'expérience montre que l'intensité I du courant et la tension appliquée U_{AB} sont proportionnelles. La caractéristique intensité - tension est une droite passant par l'origine...

Nous écrivons $U_{AB} = R I$.

Ce résultat constitue la loi d'Ohm ”.

1. Le courant traverse le dipôle de A vers B

Le générateur G maintient aux bornes du conducteur ohmique une tension u_{AB} positive réglable et fait circuler un courant de A vers B . Pour différentes valeurs de u_{AB} , nous mesurons l'intensité correspondante. Nous nous limitons à des courants d'intensité faible pour éviter que le conducteur ne chauffe; sa température est pratiquement constante.

Un couple de mesure $\{u_{AB}, I\}$ caractérise un état de fonctionnement du dipôle (A, B) .

Dans un plan muni d'un repère cartésien, la courbe

représentative de la fonction $I \mapsto u_{AB}$ est la caractéristique intensité-tension du dipôle (A, B) , le courant traversant ce dernier de A vers B . Cette caractéristique est une demi-droite passant par l'origine, d'équation :

$$u_{AB} = R \cdot I, \quad u_{AB} \geq 0.$$

La pente R peut être déterminée à partir des coordonnées d'un point quelconque de la caractéristique.

Prenons par exemple $M (0,22 \text{ A}; 5 \text{ V})$:

$$R = \frac{5}{0,22} = 22,7 \, \Omega.$$

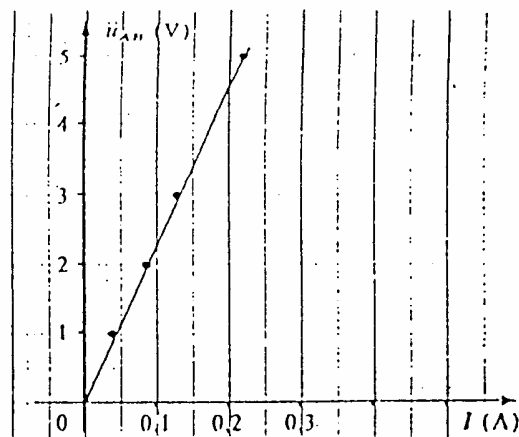
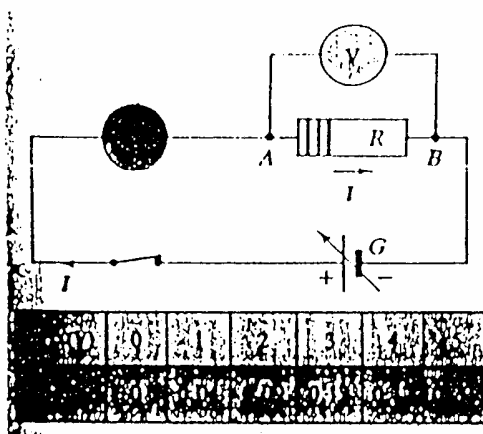


Figure 4. La loi d'Ohm telle qu'elle est présentée dans les manuels scolaires.

⁸⁹ C'est le cas, lorsque la résistance interne du voltmètre est beaucoup plus grande que la valeur de la résistance mesurée, et que la résistance interne de l'ampèremètre est, en revanche, beaucoup plus petite.

⁹⁰ Ils découvrent à cette occasion qu'on leur a raconté des histoires dans le passé.

Au lieu de s'évertuer à raconter des histoires, il vaudrait mieux présenter la loi en commençant par préciser son statut :

La loi d'Ohm, comme toute autre loi, doit être déclarée, affirmée, posée comme une relation entre grandeurs physiques. Elle est justifiée par le fait qu'elle permet de prévoir le fonctionnement des circuits électriques.

Il ne s'agit pas de contester ici le rôle de l'expérience dans la justification d'une loi. Cependant l'expression "l'expérience montre", que les chercheurs eux-mêmes utilisent quand ils transmettent leurs résultats, est abusive. Ils connaissent cependant l'ensemble des procédures qu'il a fallu effectuer pour les valider. Quant aux enseignants, ils sont d'autant plus enclins à croire la véracité des lois que les sciences physiques sont considérées comme "exactes". Le terme, une fois de plus, est trompeur. À elle seule, une expérience ne montre rien de définitif, il est néanmoins possible de l'utiliser en s'exprimant de façon plus conforme à la réalité :

Si l'expérience ne permet pas de vérifier une loi, au moins montre-t-elle qu'elle est plausible et qu'il est possible de l'admettre jusqu'à la preuve du contraire.

L'utilisation du mot "plausible" traduit des positions épistémologiques ou épistémiques compatibles avec les propriétés de la connaissance produites par la démarche expérimentale. Comme le dit le physicien Richard Feynman : " On n'est jamais sûr d'avoir raison, on ne peut qu'être sûr de se tromper⁹¹. " Encore plus important : affirmer le caractère plausible d'une loi permet de se prémunir contre les arguments remettant en cause les connaissances acquises par de prétendues révolutions⁹². Les lois de Newton n'ont pas été détrônées par la relativité, elles permettent toujours de prévoir la trajectoire des satellites. Nous avons déjà noté que c'est la marge d'incertitude entre les résultats théoriques et les résultats des mesures expérimentales qui autorise l'émergence de nouvelles théories. Or c'est justement l'existence de cette marge qui est niée dans les processus de justification des lois mis en œuvre dans l'enseignement. Dans un contexte qui vise à conforter le discours théorique, la vérification des lois exige donc bien de faire dire aux expériences plus qu'elles ne le peuvent, au prix d'un certain nombre de procédures illégitimes.

Lorsqu'elle a été validée, une loi ne peut plus être remise en cause ; seul son domaine d'application peut être délimité.

Toutes les analyses précédentes sont corroborées par la différence d'attitude entre les chercheurs et les enseignants vis-à-vis des résultats d'une expérience. Non que le chercheur soit, par nature, différent de l'enseignant, mais son travail le met en permanence sous le contrôle de la communauté scientifique. Ainsi, dans son laboratoire, l'expérimentateur n'a pas le choix : il doit

⁹¹ R. Feynman, *La Nature des lois physiques*, Marabout université, 1970, p. 192.

⁹² Nous développerons cette idée au chapitre 4.

prendre en compte tous les résultats d'expériences pour ne pas se discréditer auprès de ses collègues. D'ailleurs, c'est dans son intérêt : souvent les résultats sont d'autant plus intéressants qu'ils diffèrent de ses prévisions. En revanche, pour certains enseignants, les expériences sont réputées ne jamais fonctionner.

Les dangers de l'utilisation de l'outil informatique. L'enseignement assisté par ordinateur multiplie les risques de dérives dénoncées ci-dessus. Un projet informatique de mise en évidence des lois mérite d'être décrit parce qu'il comporte tous les défauts qu'auraient par essence tous ceux ayant le même but. Des enseignants chercheurs du service audiovisuel de l'Université Pierre et Marie Curie, ont filmé des expériences réalisées sur un manège tournant au Palais de la Découverte. L'objectif était de fournir des supports pédagogiques aux enseignants ne disposant pas du matériel. Or le film a servi à une équipe canadienne pour réaliser une simulation des expériences intitulée : "Le laboratoire de physique : un apprentissage fondé sur l'expérimentation simulée", voulue aussi réaliste que possible. Or une expérience ne peut en aucun cas être simulée, sauf à dénaturer l'essence même de l'activité expérimentale. Le "laboratoire" en question montre à l'écran, des objets fictifs qui s'animent et participent à des événements... modélisés par le programmeur. L'étudiant est supposé faire des "mesures" ; en fait, il doit cliquer à l'aide d'une souris sur un appareil fictif qui fournit des valeurs fallacieusement dites "expérimentales" ; elles sont en réalité calculées par le programme. Puis l'étudiant reporte les valeurs relevées en cliquant sur une figuration de cahier dit "de laboratoire". Et, construction sociale du savoir oblige, il ne lui reste plus qu'à communiquer ses "résultats" à une autre classe grâce à l'Internet !

Les simulations d'expérience ont été faites à partir de la vision du film. Or, si les auteurs avaient eu l'occasion de réaliser les expériences par eux-mêmes, ils auraient vu que le comportement réel des objets est différent de ce qu'ils montrent. Jamais la représentation d'un événement, aussi "réaliste" soit-elle, ne peut être identique à l'événement lui-même. Ce sont donc des événements conformes à la théorie qui sont donnés à voir. La physique virtuelle comporte une contradiction interne irréductible. Ce que montre l'ordinateur est obligatoirement le produit de la modélisation du réel avec tous les risques d'erreurs que cela comporte.

Prétendre enseigner de la physique virtuelle est un contresens absolu.

Si la mesure est supprimée, aucun contrôle n'est plus réalisable car toute confrontation entre les résultats expérimentaux effectifs et les résultats théoriques devient impossible. C'est là le danger essentiel de ce type de projet. Il faut insister parce que des enseignants chercheurs physiciens semblaient séduits par la démonstration grâce à un graphisme de qualité et aux facilités d'enseignement qu'un tel projet laisse entrevoir. Prenons la mesure de l'alarme qu'il faut lancer à l'encontre de l'enseignement programmé de la physique : le monde fictif élimine définitivement le monde matériel. Si on n'y prend garde, des catastrophes sont prévisibles. En classe, même s'ils

n'osent pas toujours le faire, les étudiants ont la possibilité d'interpeller le professeur. Quels recours ont-ils face à l'autorité anonyme qui se cache derrière un écran d'ordinateur ? De quels moyens disposent-ils pour discuter la validité des modélisations présentées ? En résumé, l'expérimentation fictive ne respecte aucune des "lois" épistémologiques ou épistémiques énoncées dans cet ouvrage.

En revanche il est possible d'utiliser l'outil informatique comme on le fait lorsqu'on recherche les caractéristiques du modèle qui correspond le mieux aux mesures ; il joue alors un rôle inestimable pour choisir le modèle le mieux adapté à la situation.

Les énoncés des lois. Prendre les lois comme objet d'enseignement valorise automatiquement la théorie. L'enseignement formel est un choix auquel rien *a priori* ne s'opposerait s'il pouvait être cohérent et s'il pouvait se dispenser de toute référence à l'expérience, mais il n'en est rien. C'est pourquoi un phénomène identique à celui que nous avons constaté pour les grandeurs physiques se reproduit pour les énoncés des lois : ils ne sont pas opératoires.

Les énoncés des lois ne sont pas opératoires ; les étudiants ne peuvent pas résoudre les problèmes en les utilisant de façon autonome⁹³.

Rappelons l'énoncé traditionnel de la loi fondamentale de la dynamique ; il stipule que : " l'accélération d'un point matériel en mouvement est proportionnelle à la force qui agit sur lui et inversement proportionnelle à sa masse⁹⁴. " Comparons ce texte à un énoncé opératoire de la loi fondamentale de la dynamique qui pourrait être le suivant :

La somme des forces que les objets extérieurs à un objet S exercent sur S est égale au produit de la masse de S par l'accélération de S.

L'étudiant doit connaître les opérations de pensée qui accompagnent la mise en œuvre de la loi pour pouvoir l'appliquer sans répéter des solutions apprises par cœur. Ainsi, pour utiliser la deuxième forme de la loi fondamentale de la dynamique, il faut sélectionner par la pensée un objet particulier constituant le système S dont nous voulons connaître le mouvement. Puis il faut recenser les objets extérieurs à S qui exercent sur S des forces d'intensité notable. Cela implique d'évaluer les ordres de grandeurs des forces afin de ne prendre en compte que les plus importantes.

Une fois de plus, toutes ces opérations ne peuvent être enseignées que si les objets du monde expérimental font partie de la description des situations.

Tant que les objets du monde matériel sont absents du discours théorique, le bilan des forces qu'ils exercent les uns sur les autres ne peut pas être fait de façon systématique. Les

⁹³ Voir les mises au points dans *les solutions de problèmes* ou *Les énoncés opératoires des lois de Newton*.

⁹⁴ G. Bruhat, *op. cit.*, p. 116.

opérations intellectuelles qui accompagnent l'utilisation de la loi fondamentale de la dynamique ne peuvent pas être mises en œuvre.

Prenons un autre exemple : l'énoncé du principe de la conservation de l'énergie tel qu'il est proposé dans de nombreux manuels : “ Lorsqu'un point matériel est soumis à plusieurs forces, toutes conservatives, son énergie mécanique se conserve au cours du temps...” L'énergie mécanique dont il est question comprend deux termes : une énergie potentielle et une énergie cinétique. Rappelons que l'énergie potentielle ne peut pas caractériser le seul “point matériel” car elle fait intervenir obligatoirement au moins deux objets. Cette raison suffit à elle seule pour disqualifier l'énoncé, mais il en existe une autre beaucoup plus importante qu'illustre la remarque que me faisait un jour un collègue écologiste : “ Ils me font bien rire les physiciens avec leur conservation de l'énergie ; moi, si je veux que ma voiture roule, il faut bien que je mette de l'essence dans le réservoir ! ” Il a, bien sûr, raison. Le caractère non opératoire de l'énoncé provient de l'utilisation impropre de l'expression “se conserve” qui fait partie du langage usuel de presque tous les enseignants. Or l'utilisation du pronom “se” est particulièrement inadaptée puisque l'énergie ne se conserve pas en elle-même : c'est l'énergie d'un système isolé qui, par principe, ne varie pas. Dire que l'énergie “se conserve”, sans préciser le système qu'elle caractérise, entrave l'utilisation fonctionnelle du principe de conservation⁹⁵. La meilleure preuve est donnée par ce titre du programme de 1988 du secondaire: “ Conservation ou la non-conservation de l'énergie mécanique⁹⁶. ” L'énergie totale d'un système isolé étant toujours constante, il est facile de déduire que, *a contrario*, l'énergie d'un système non isolé peut varier. Si le principe était énoncé de façon opératoire, il ne viendrait même pas à l'esprit d'énumérer des cas où il ne s'applique pas. D'où l'énoncé suivant :

L'énergie totale d'un système isolé est constante.

Notons, parce qu'il semble que ce soit une source de confusion, que, si un objet isolé n'existe jamais, il est toujours possible de construire un système isolé de plusieurs objets ; à la limite, il suffit de mettre tout l'univers dedans, mais cela n'est pas utile lorsqu'on tient compte des ordres de grandeurs. Voyons plus précisément comment fonctionne un énoncé devenu opératoire par la prise en compte des systèmes concernés. Examinons la situation du pendule. Il est constitué par la Terre et par un objet suspendu à un support par l'intermédiaire d'un fil. L'énergie du pendule n'a aucune raison d'être constante aussi longtemps qu'il interagit avec le support et l'air. Pourtant, à partir du moment où un opérateur, ayant préalablement écarté l'objet, fil tendu, de sa position d'équilibre et l'a lâché, plus rien d'extérieur n'agit sur le système total S constitué par la Terre, le

⁹⁵ Il semble que nos “élites” réussissent tous leurs examens sans s'en apercevoir ! Nous analyserons plus tard comment ce miracle peut se produire.

⁹⁶ Programme de classe de 2^d de physique de 1988.

pendule, le support et l'air ambiant : S est isolé. En revanche le sous-système S' (pendule + Terre), n'est isolé qu'en première approximation, c'est-à-dire en supposant que, durant un délai assez bref, les échanges d'énergie du système S' (pendule + Terre) avec S'' (l'air ambiant et le support) restent négligeables. En réalité le pendule s'arrête toujours au bout d'un certain temps. Cela signifie que l'énergie perdue par le système S' (pendule + Terre) a été transmise à S'' (le support et l'air), tandis que l'énergie totale du système complet S est bien restée constante.

Le principe de la conservation de l'énergie est inopérant s'il n'est pas spécifié qu'il ne concerne que les systèmes isolés et qu'il ne souffre aucune exception.

La résolution des problèmes de mécanique nécessite de procéder à des regroupements d'objets qui constituent le "système" considéré ; le regroupement diffère selon que l'on utilise la loi fondamentale de la dynamique ou la conservation de l'énergie. Dans le premier cas, c'est l'objet dont on cherche à décrire le mouvement (ou l'équilibre) qu'il faut sélectionner, tandis que dans le second cas, il faut regrouper tous les objets qui forment un système isolé.

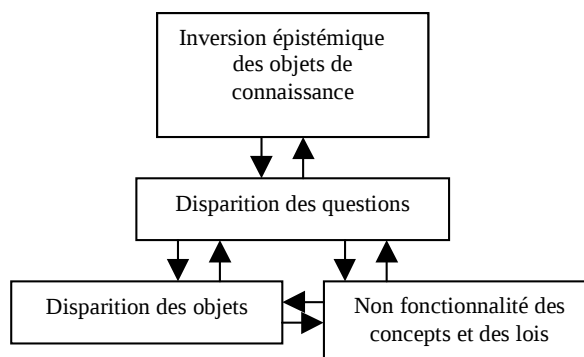
Tant que les objets du monde matériel sont absents du discours théorique, la notion de système ne peut pas être construite.

Le caractère non opératoire des énoncés des lois de la mécanique résulte de l'impossibilité de faire appel aux objets et aux regroupements d'objets qui constituent les systèmes.

Le manque de fonctionnalité des lois fondamentales de la mécanique résulte directement de la disparition des objets.

L'énoncé opératoire du principe de la conservation de l'énergie est incompatible avec la séparation traditionnelle des domaines de la mécanique et de la thermodynamique ; en effet il existe toujours des frottements provoquant des transferts de chaleur d'un objet à un autre, même dans les problèmes traités en mécanique où les frottements ne sont pas censés exister.

Résumons les différentes relations de cause à effet énoncées dans ce chapitre dans le schéma suivant :



La figure 5 représente les liens entre les phénomènes de l'enseignement.

La figure 5 illustre les liens qui unissent les différents phénomènes d'enseignement résultant de l'inversion épistémologique ou épistémique des objets de connaissance. Elle montre la façon dont ils se renforcent mutuellement : aucun n'est donc fortuit. La figure résume les différentes remarques de ce chapitre. Finalement le manque de fonctionnalité des énoncés provient d'une excessive valorisation de la théorie au détriment de l'expérience. Cela va de pair avec une estime exagérée de l'esprit dit "abstrait" et une dépréciation de l'esprit dit "concret". Nul doute que la connaissance des caractéristiques des phénomènes d'enseignement contribue à une évolution bénéfique des pratiques.

À PROPOS DE LA MÉTHODE UTILISÉE DANS CE CHAPITRE

Fait remarquable, nous avons pu détecter des phénomènes dans un domaine impliquant des êtres humains d'une part et sans faire référence à ce qui se passe dans les classes d'autre part⁹⁷. Notons qu'une observation directe n'aurait pas permis de les faire apparaître à cause de la diversité des pratiques. L'examen de nombreuses classes n'aurait pas suffi à créer la connaissance que nous avons proposée. Il ne s'agit pas là d'une affirmation gratuite : j'ai observé des séquences d'enseignement, je les ai enregistrées au magnétophone, je les ai transcrites, je les ai analysées et je peux témoigner que ce travail, extraordinairement fastidieux, n'a servi à rien d'autre qu'à certifier ici à quel point il est inutile si on n'a aucune idée de ce qu'on cherche. L'intuition de la connaissance à construire n'a pu être générée qu'à partir de l'utilisation d'une méthode qui a consisté, dans notre cas, à comparer les démarches des chercheurs et celles des enseignants. Peut-être que cette intuition n'aurait pas pu avoir lieu sans le travail préalable fait dans les classes, qui peut savoir ?

Pour identifier les raisons épistémologiques ou épistémiques des dysfonctionnements de l'enseignement de la physique, il fallait s'affranchir des effets liés aux êtres humains, qu'il s'agisse des professeurs ou des étudiants. Aucune implication des participants, qu'elle soit d'ordre psychologique ou sociologique, n'a donc eu sa place dans l'analyse qui a été faite. Ainsi, tout au long de ce chapitre, des processus d'enseignement ont effectivement été décrits indépendamment des individus. Ceux-ci jouent, sans aucun doute un rôle important dans le déroulement des événements scolaires ; il a fallu laisser ce type de préoccupations à d'autres, plus compétents pour les envisager. Il faut sérier les problèmes pour tenter de les résoudre. La progression de la connaissance exige de ne pas chercher à répondre à toutes les interrogations à la fois.

⁹⁷ Ceci prouve que la démarche expérimentale, telle que nous la décrivons en physique, ne s'applique pas seulement aux objets !

Des phénomènes d'enseignement ont été identifiés et caractérisés, mais cela ne suffit pas ; il faut en plus, trouver les moyens d'alerter à leur propos la communauté des gens concernés. Les raisons qui conduisent à proposer un cadre théorique puis à détecter les phénomènes sont trop complexes et diffuses pour être exposées. Il reste à trouver les moyens de décrire les processus que la théorie proposée modélise. C'est le rôle des exemples illustratifs. J'ai précisé au cours de l'exposé pourquoi le *Cours de physique générale* de Bruhat⁹⁸ a été la source de certains exemples. Il ne s'agit évidemment pas de le critiquer d'autant plus que Bruhat complète le discours théorique qu'il tient en montrant comment l'utilisation des concepts permet de décrire le fonctionnement de nombreux dispositifs techniques, ce qui suffit à les rendre opératoires. Ceux qu'il a inspirés ont pu croire, à tort, que cette partie de l'explicitation n'était pas cruciale pour construire les grandeurs physiques de façon opératoire. Il en résulte des conceptions dont il n'est pas responsable.

Les diverses citations de manuels, extraites de leur contexte, conduiraient à des interprétations abusives si l'objectif consistait à juger leur teneur. Or tel n'est pas le but, elles n'ont été choisies que pour illustrer les phénomènes exhibés.

Les descriptions grossissent forcément le trait, par un effet inévitable de loupe auquel n'échappe pas un exposé qui ambitionne de présenter des phénomènes qui n'apparaissent pas en tant que tels jusqu'ici. De plus, les mettre en évidence consiste à montrer qu'ils ne résultent pas du hasard. Il a donc fallu exposer les raisons de la régularité de leurs manifestations.

Les très nombreux enseignants qui travaillent de leur mieux risquent de trouver les descriptions un peu sévères et ne s'y reconnaîtront pas. Forcément. De même que l'atome matériel ne peut se reconnaître dans le modèle de Bohr, un "enseignant" réel ne reconnaîtra pas sa pratique particulière dans les phénomènes tels qu'ils ont été décrits. Il faut, une fois de plus, bien faire la distinction entre un événement appartenant au monde réel de l'enseignement et le phénomène décrit ici qui n'en est que sa représentation théorique. Les phénomènes d'enseignement ne visent pas directement la description des pratiques réelles : ils ont pour objectif de créer des outils afin que ces mêmes enseignants puissent surmonter les obstacles d'ordre épistémologique ou épistémique auxquels ils se heurtent obligatoirement. En revanche si aucune des descriptions ne peut prétendre représenter de façon "réaliste" ce qui se passe dans les classes, il serait abusif de dire que les faits exhibés ne correspondent à aucune pratique.

Le terme "enseignant" a désigné, tout au long de ce chapitre, un être générique, ayant le statut de modèle représentant l'ensemble des individus dont la fonction est d'enseigner : "l'enseignant

⁹⁸ On trouverait aussi des références analogues dans les ouvrages anglo-saxons : Berkeley Cours de mécanique volume 1. Armand Colon. 1984, et Marcelo Alonso, Edward J. Finn. *Physics*. Addison-Wesley. 1992. Voir les annexes.

épistémologique ou épistémique ” en quelque sorte. En effet, quelle que soit la façon dont ils procèdent individuellement, les enseignants réels sont forcément confrontés aux contradictions dues au fait que la physique enseignée diffère par essence de la physique qui se crée. Le repérage de la nature des contraintes qu'ils subissent constitue une condition nécessaire, et bien évidemment non suffisante, pour qu'ils puissent les surmonter.

De même “l'étudiant” évoqué au cours de ce chapitre représente un être générique et non un individu particulier. Dans la mesure où il apprend, l'étudiant se trouve dans une situation analogue à celle du chercheur, à cette différence près que, pour l'un, il s'agit de s'approprier des connaissances nouvelles pour lui, tandis que pour l'autre, il s'agit d'élaborer des connaissances inconnues de tous. C'est pourquoi le terme “étudiant” désigne lui aussi une entité représentant tout individu dont la fonction est d'apprendre. L'étudiant considéré ici est animé par le désir de construire ses connaissances de façon logique. Il est supposé être idéalement rigoureux. Il diffère donc, lui aussi, de l'étudiant réel ; il diffère aussi de l'élève tel qu'il est habituellement conçu, c'est-à-dire comme devant apprendre tout ce qui lui est enseigné, quelle que soit la pertinence du discours. En didactique, de façon significative, l'élève est souvent désigné comme étant “l'apprenant ”. Apprenant quoi ? C'est, selon notre modèle, la véritable question.

Toutes ces mises au point ne suffiront probablement pas à éviter que certains enseignants se croient personnellement remis en cause. Il serait dramatique qu'ils se sentent blessés, d'autant que l'objectif poursuivi est de les aider et qu'ils ne peuvent en aucun cas être tenus pour responsables des circonstances qui ne dépendent pas d'eux.

Chapitre 3

LES RÈGLES DU JEU DE L'ENSEIGNEMENT ET DE L'APPRENTISSAGE DE LA PHYSIQUE

Dans une réunion internationale, quatre délégués – un Indien ; un Américain, un Russe et un Israélien – discutent ensemble. Un journaliste s'approche d'eux et leur demande : « Messieurs, pouvez-vous, s'il vous plaît, me donner vos opinions sur la pénurie de la viande dans les pays pauvres ? » « Qu'est-ce que c'est, la viande ? », dit l'Indien. « Qu'est-ce que c'est, une pénurie ? », demande l'Américain. « Qu'est-ce que c'est, une opinion ? », interroge le Russe. Et l'Israélien demande ce que veut dire : « S'il vous plaît. »

Histoire juive

Nous allons examiner les activités des étudiants. Il ne s'agit pas de se prononcer sur leur bien-fondé, mais de comprendre comment ils peuvent les percevoir. En lisant les descriptions suivantes, il ne faut pas perdre de vue que l'objectif n'est pas de rendre compte de la complexité de la réalité, ni de la réalité elle-même, mais de justifier les solutions constructives qui seront exposées dans la seconde partie de ce chapitre ; ce sont de simples propositions. Si les modélisations qui les précèdent sont affirmées d'une façon directe, c'est surtout pour ne pas alourdir le texte de conditionnels et de précautions verbales superflues à partir du moment où leur statut d'hypothèse de travail est clairement spécifié. Répétons le, afin de ménager la susceptibilité des enseignants, il ne s'agit pas de critiquer leurs façons de faire mais de leur proposer des outils pour mieux faire. Comme dans le chapitre précédent, le mot étudiant désigne généralement une entité, celui qui acquiert des connaissances, mais il sera parfois nécessaire de distinguer ceux qui étudient dans les universités, tandis que nous reprendrons le mot élève pour désigner ceux qui suivent l'enseignement des lycées.

LES ACTIVITES DEMANDEES AUX ETUDIANTS

Les étudiants sont sensés pratiquer les activités suivantes : écouter le cours, l'apprendre, faire des travaux pratiques, résoudre des problèmes, se soumettre à des contrôles et passer des examens.

Examinons ce qu'elles impliquent.

Écouter les cours

Les étudiants passent le plus clair de leur temps assis à écouter des enseignants parler. C'est un fait. Est-il possible de comprendre pourquoi l'enseignement magistral occupe une place prépondérante dans l'enseignement de la physique ? La pratique d'exposés dogmatiques va probablement de pair avec une valorisation excessive de la théorie au détriment de l'expérience qui pourtant, comme notre modèle nous l'a montré, joue un rôle équivalent. C'est un phénomène général : l'importance abusive attribuée à « l'abstraction » explique la prédominance du cours sur les autres formes d'apprentissage. Comme l'écrit Cuban cité par Gage⁹⁹ « Les pratiques de la classe se caractérisent par une grande stabilité : elles ne se différencient guère, en effet, de celles qu'utilisaient les maîtres d'autrefois. Environ 90% des professeurs de l'enseignement supérieur continuent à recourir à des méthodes traditionnelles centrées sur l'enseignant. »

Alors que son inefficacité est si souvent déplorée, le cours magistral ne peut pas avoir persisté sans raisons profondes. Pourquoi lui accorde-t-on autant d'importance ?

Nous pouvons maintenant admettre que le cours magistral assure en physique, une fonction qui consiste à imposer une connaissance dont la validité n'est pas démontrable.

L'étudiant écoute la parole du maître, il lui est conseillé de prendre des notes. Le rythme à l'université est tel que, le plus souvent, il ne peut pas écrire et comprendre en même temps. Il est dans la situation du ruminant qui doit emmagasiner de l'information afin de la digérer éventuellement plus tard. Pendant le cours il a rarement le temps de comprendre ce qu'il entend. Ensuite il faudra qu'il l'apprenne.

Les étudiants ne donnent-ils pas l'impression d'écouter passivement parce qu'ils ne peuvent pas faire autrement ? En effet, une « écoute active » générerait immanquablement une interrogation de leur part. Pour fournir les réponses, une vaste culture scientifique est indispensable mais ne suffit pas, il faut, en plus connaître le fonctionnement de la démarche expérimentale. Or les enseignants du secondaire ne l'ont jamais pratiquée, les stages que les agrégés devaient faire dans des laboratoires de recherche ont été supprimés depuis longtemps. Ces raisons permettent de comprendre pourquoi les étudiants ont le sentiment de ne pas pouvoir questionner l'enseignant sans prendre le risque de le gêner ; aussi évitent-ils de le faire. Quand néanmoins un étudiant se décide, l'enseignant a le choix entre : répondre à la question et s'assurer que sa réponse correspond bien à la question posée, ou bien ne pas répondre. Dans ce dernier cas, il croit sauver les apparences en justifiant son attitude par deux échappatoires : ou bien il dévalorise la question,

⁹⁹ Cité dans : M. Crahay, D. Lafontaine, *L'art et la science de l'enseignement*, Belgique : édition Labor, 1992.

ou bien il prétend qu'elle est prématurée. Dans de telles conditions, la seule attitude raisonnable que les étudiants puissent prendre consiste justement à donner l'impression d'être passifs. Ceux qui ne veulent pas risquer d'être rejetés par un enseignant ayant le pouvoir de leur interdire de poursuivre des études, adoptent une position de protection en se taisant. Sont-ils pour autant aussi passifs que leur attitude extérieure le laisse croire ? Cela reste à prouver. Il n'est pas impossible qu'ils fassent de l'autocensure. Une anecdote personnelle m'a alertée sur une telle éventualité. Lorsqu'il était en cinquième, mon fils m'a raconté ce qu'il avait fait en classe. « Nous avons appris que la lampe s'allume lorsqu'on ferme l'interrupteur et s'éteint quand on l'ouvre. C'était facile, mais moi, ce que j'aimerais savoir, c'est pourquoi la lampe, elle brille. Curieuse de connaître la réponse du professeur : - As-tu posé la question ? - Oh non ! - Pourquoi ? - Cela ne sert à rien, m'a-t-il répondu sèchement et j'ai compris qu'il était inutile d'insister. Cette attitude est sans doute plus fréquente qu'on le pense.

Dans sa thèse, Monique Saint-Georges¹⁰⁰ montre que, contrairement à l'attente des stagiaires¹⁰¹, les élèves de seconde sont prolixes lorsque leur expression est véritablement sollicitée. Au cours d'une séance de travaux pratiques, des élèves devaient déterminer la place d'une résistance, dite de protection, par rapport à une diode électroluminescente (del) ; le stagiaire provoque une discussion afin de choisir le schéma du circuit électrique approprié. Les séances ont été enregistrées et transcrites. Les analyses montrent que les élèves pensent que le courant s'évanouit le long du circuit¹⁰². Ils se demandent donc s'il faut placer la résistance avant ou après la del pour la protéger. Un des élèves met alors les autres en garde : « il ne faut pas prendre le sens conventionnel du courant, dit-il, parce qu'il circule en réalité en sens inverse. Par conséquent, pour protéger la diode, il faut placer la résistance après et non avant la del. » Ce raisonnement est remarquable par sa parfaite rigueur dans les limites des connaissances de l'élève. Pour les stagiaires, le plus difficile a été de trouver des arguments pour convaincre les élèves que le courant est le même dans le circuit avant et après la diode. Ils ont essayé de le « prouver » en montrant qu'une lampe placée avant ou après la diode brille de la même manière ; ils se sont rendu compte que cela ne suffisait pas à persuader les élèves. Ces derniers ont raison de résister ; on ne prouve pas « l'existence » d'une grandeur physique, il suffit de leur dire que le courant est une grandeur dont la propriété est d'être constante le long d'une branche du circuit. C'est ce qui peut être déclaré a priori pour construire le courant de façon opératoire.

¹⁰⁰ M. Saint-Georges, *op. cit.*

¹⁰¹ Ce nom désigne les étudiants des instituts universitaires de formation des maîtres (IUFM),

¹⁰² Cette « conception » des élèves est bien connue ; elle a été depuis longtemps repérée et décrite dans les recherches de didactique sans que soit explicité pourquoi, après enseignement, le concept de courant n'est toujours pas opératoire.

Le courant électrique, comme toute autre grandeur physique, est un outil de la pensée défini par sa fonction : représenter la quantité d'électrons circulant dans la branche du circuit et par la propriété qui en découle : être constant le long d'une branche du circuit.

En conséquence la résistance de protection diminue le courant dans l'ensemble de la branche où est située la diode, quelle que soit sa position.

La prétendue « passivité » des étudiants existe parce qu'elle leur est utile. Il ne sert à rien de la déplorer tant que les conditions permettant aux étudiants d'être actifs ne sont pas créées. Nous en proposerons quelques-unes, mais pour trouver de nouveaux moyens de modifier l'attitude feinte ou réelle des étudiants, il faudra faire des recherches et trouver les moyens de créer les circonstances permettant aux étudiants d'agir.

Apprendre le cours

Même lorsqu'ils ont choisi des études scientifiques à l'université, les étudiants n'apprennent pas régulièrement leurs cours. C'est un fait. Le seul moyen de les y contraindre est de leur infliger régulièrement des interrogations notées. L'Université ne dispose pas d'un budget suffisant pour le faire. En revanche, les « colles orales » sont imposées, à grand frais, pratiquement chaque semaine dans les classes préparatoires aux grandes écoles. Pourquoi est-il nécessaire faire travailler de force des étudiants triés parmi les plus performants et qui ont librement choisi des études scientifiques ? Nous pouvons maintenant comprendre pourquoi il est rebutant d'avoir à retenir des recettes inopérantes. Quel que soit leur niveau, les étudiants ne connaissent ni les règles du jeu de la science qui se pratique, ni celles auquel leur travail devrait se conformer. Comment pourraient-ils les inventer alors que le corps des enseignants lui-même n'a pas réussi à le faire jusqu'ici ?

Manipuler en travaux pratiques

La salle des travaux pratiques est le seul endroit où les étudiants peuvent manipuler des objets et voir des événements auxquels les objets participent. Même s'il est possible d'adresser des critiques aux travaux pratiques, les étudiants les apprécient parce qu'ils accèdent directement aux phénomènes en utilisant leurs propres organes sensoriels. C'est, entre autres, pourquoi les travaux pratiques sont indispensables : ils devraient être le fondement de tout enseignement de la physique.

Il est difficile d'imaginer qu'un contexte expérimental ne suscite pas chez les étudiants une interrogation personnelle. Ils n'ont pas souvent l'occasion de comprendre pourquoi leurs propres préoccupations sont négligées au profit de celles qui leur sont imposées. Comment parvenons-nous à éviter les questions qu'ils seraient susceptibles de poser ? Il existe un moyen très simple dont l'usage est parfaitement généralisé, sans que cela soit dicté par une volonté délibérée ; il suffit de donner plus de travail que celui que l'étudiant le plus doué peut faire dans le délai

imparti. Cela explique pourquoi la durée des séances de travaux pratiques est toujours trop courte pour faire tout ce qui est prévu.

La plupart des fiches de travaux pratiques qui guident le travail contiennent des protocoles qui ne laissent aucune initiative à l'étudiant. Elles comportent généralement une succession de directives qui s'expriment toujours de la même manière. Ce nouveau phénomène de l'enseignement se traduit par l'utilisation des verbes à l'infinitif suivants : observer, étudier, vérifier, et conclure. Examinons ce que ces « activités » impliquent.

« Observer » un phénomène. « Il faut des règles pour voir, pour donner forme au monde et mieux le percevoir [...] l'observation la plus naïve exige un savoir ordonné dans une théorie¹⁰³ », écrit l'éthologue Boris Cyrulnik. Pour étayer sa remarque, il relate avec humour les deux descriptions de la retransmission télévisée d'un match de rugby, l'une faite par un adolescent qui pratique ce sport, l'autre par sa mère qui en ignore les règles. La mère dit y voir : « des hommes couverts de boue qui s'entassent et se bagarrent dans une ambiance de vocifération », tandis que le fils raconte : « la troisième ligne s'est détachée rapidement parce que les piliers toulonnais sont plus solides, ce qui a permis au demi de mêlée de passer son adversaire et d'envoyer à l'essai son trois-quarts centre déjà lancé. » Deux personnes ne peuvent pas faire spontanément des observations concordantes d'un même spectacle ; chacun peut facilement s'en convaincre en reproduisant une expérience analogue. Ayant des préoccupations différentes, un peintre, un paysan et un urbaniste ne décriront jamais le même paysage de façon identique. Seules des questions précises peuvent orienter l'attention des étudiants vers l'objectif souhaité.

Si nous créons une situation où l'étudiant ne se sent pas obligé de reproduire une conduite stéréotypée (généralement attendue de lui) et si nous lui demandons de noter par écrit ses observations sans avoir formulé de question, le résultat est garanti : en aucun cas les étudiants ne fourniront les réponses attendues par l'enseignant. Dans l'expérience qui sera relatée au cinquième chapitre, nous désirions connaître les idées préalables des élèves de seconde au sujet des mesures. Nous avons posé des questions que nous avions élaborées en équipe et que, longuement réfléchies, nous avions crues précises ; pourtant de nombreuses réponses écrites nous ont surpris. Elles correspondaient à des interprétations légitimes mais différentes du sens que nous pensions avoir donné aux questions¹⁰⁴.

La démarche expérimentale commence par une interrogation sur le monde matériel. Dans le cadre de l'enseignement, jusqu'ici les étudiants doivent commencer par « observer ». Comment peuvent-ils savoir ce qu'il faut « observer » sans qu'une question leur soit posée ?

Aucune observation fructueuse ne peut se produire sans question préalable.

¹⁰³ B. Cyrulnik, *Les nourritures affectives*, Éditions Odile Jacob, 1993, p. 13.

¹⁰⁴ Je ne saurais trop recommander aux professeurs d'en faire l'expérience, le résultat est très amusant.

Cette remarque est fondamentale et elle concerne tous les domaines d'investigation. Solliciter l'observation des étudiants sans leur poser de question leur permettant d'orienter leur regard, revient à leur demander de deviner ce que nous avons en tête. Il faut bien que certains réussissent à le faire pour qu'une telle situation perdure. Un échec massif aurait contraint le corps enseignant à modifier ses pratiques. Il faut donc se demander : comment certains étudiants parviennent-ils à satisfaire notre attente bien que ce soit impossible ? En fait ils décodent des indices semés à cet effet. C'est la fonction assurée par la forme stéréotypée des fiches de travaux pratiques (et des textes d'exercices) et, en particulier des verbes systématiquement utilisés. Il serait donc instructif d'examiner si ce n'est pas une compétence liée à la faculté de se conformer à un modèle qui consiste à savoir détecter des indices secondaires fournis par l'enseignant que valident les contrôles de physique¹⁰⁵.

« Étudier » un phénomène. Comme pour « observer », il est impossible « d'étudier » *a priori*, sans définir un but. Si nous demandons, par exemple, d'étudier le mouvement d'un pendule, comment un étudiant peut-il savoir ce qu'il doit faire ? Comment pensera-t-il à déterminer les caractéristiques pertinentes du phénomène, puisqu'elles ne le sont pas dans l'absolu, mais seulement en fonction du problème à résoudre ? Comment pouvons-nous espérer qu'il imagine de but en blanc les questions que Galilée se posait après des années de réflexion ? Et finalement, comment résoudre un problème lorsqu'il n'est pas formulé ? Pour l'étudiant, étudier revient donc, encore une fois, à deviner ce que nous désirons qu'il fasse.

L'injonction « d'étudier » ne permet pas à l'étudiant d'exercer une action autonome.

« Vérifier » et « conclure ». Comme les activités expérimentales visent généralement la justification du discours théorique, il est très souvent demandé de « vérifier » les lois. Or nous avons vu qu'une loi est invérifiable ; il est donc inutile de revenir sur les raisons qui rendent cette action impossible. La modélisation de la démarche expérimentale permet de mettre en évidence le fait que les étudiants doivent accomplir une nouvelle activité irréalisable. Il en est de même de l'invitation à « conclure » sans qu'aucune question préalable n'ait été posée. Quelle réponse l'étudiant peut-il donner ? Le seul moyen dont il dispose pour sortir de l'impasse où il est mis consiste à se conformer aux habitudes acquises dans des situations analogues. Cela fait partie du « contrat didactique » décrit par Yves Chevallard¹⁰⁶ pour les mathématiques ; en font partie des règles qui sont d'autant plus figées qu'elles sont implicites. La régularité des attentes des enseignants est telle que les étudiants peuvent les détecter et savoir, par exemple, que l'injonction

¹⁰⁵ Cela est cohérent avec le constat que ce sont les enfants d'enseignants qui réussissent le mieux dans le domaine scolaire : les parents savent les aider à décoder le système d'enseignement.

¹⁰⁶ Y. Chevallard, *La transposition didactique du savoir savant au savoir enseigné*, La pensée sauvage, 1985, p. 75.

à conclure peut se solder par une remarque stéréotypée du genre : « l'expérience montre que la loi est bien vérifiée ». Ils peuvent même gagner la réputation d'être doués en physique, en ajoutant une autre phrase toute faite, « aux erreurs d'expérience près. »

Une évolution considérable découlerait de l'obligation d'éliminer du vocabulaire l'usage des verbes : observer, étudier, vérifier et conclure, au profit de la formulation de questions que les étudiants peuvent comprendre et auxquelles leurs activités permettraient de répondre.

Ce n'est pas si difficile à réaliser qu'il y paraît. Comme nous le verrons au cinquième chapitre, demander aux étudiants de contrôler leurs résultats les entraîne automatiquement à s'interroger sur ce qu'ils mesurent.

Résoudre des problèmes

La résolution de problèmes qui se situent dans le registre théorique occupe, à juste titre, une place importante dans les activités des étudiants. Ils sont alors confrontés à un texte qui comporte des questions auxquelles ils doivent répondre. Nombre d'entre eux restent tétanisés devant un énoncé qu'ils ne savent pas interpréter, comme en témoigne Jacques Roubaud ancien professeur de mathématiques à l'université : « Ce qui se produisit fut alarmant et inattendu. Certes, tout ce qui était calcul semblait assez simple, une fois les données physiques traduites en symboles reconnaissables par un être doué de raison calculatoire. Mais je ne savais pratiquement jamais effectuer convenablement cette traduction. [...] Dans les problèmes de physique scolaire, d'électricité ou d'optique qui m'étaient proposés, j'avais l'impression exaspérante que des renseignements implicites, évidents pour tout le monde (sauf pour moi !), m'étaient dissimulés, et il m'arrivait souvent de rester un temps indéfinissable devant l'énoncé, sans savoir par quel bout le prendre¹⁰⁷. » Nous allons rechercher les raisons qui génèrent un tel comportement que partagent de nombreux étudiants qui pourraient se croire moins doués.

Il n'existe pas chez les enseignants de réflexion systématique concernant les règles de rédaction des textes de problèmes. À l'université, chacun improvise, avec plus ou moins de malheur, rarement de façon satisfaisante¹⁰⁸. Généralement l'auteur doit choisir l'information qu'il juge utile pour que l'étudiant puisse répondre aux questions qu'il pose. Il ne cherche donc pas à décrire la situation. C'est pourquoi le phénomène de disparition des objets se manifeste de nouveau, et seules leurs représentations théoriques sont évoquées. Il en existe une pléthore d'exemples : les étudiants doivent étudier des mouvements « à forces centrales », les « masses » tombent « dans des

¹⁰⁷ J. Roubaud, *Mathématique*, Seuil, 1997, p. 29.

¹⁰⁸ Le seul qui décrivait (avant 2000 à Paris VI) les situations en tenant compte des objets, des contraintes et des événements est Yvan Simon ; c'est en analysant ses textes que j'ai déterminé les critères que je décris.

champs», on leur demande de calculer le rendement d'un cycle de Carnot et non celui d'une machine thermique, etc. Il devient difficile de préciser à quel monde appartiennent les situations évoquées ; en tous cas elles ne font pas partie du monde expérimental.

Ignorant la nature des difficultés que leurs textes génèrent, les enseignants ne comprennent pas pourquoi les étudiants ne parviennent pas à se représenter les situations. En fait, dans la majorité des cas, les problèmes font référence à des situations qui appartiennent, elles aussi, au monde fictif, centré sur lui-même, que nous avons qualifié de « théorisé ». L'expression : « on considère que », est un indicateur linguistique de ce phénomène : placée en début de problème, elle correspond plus à un tic verbal qu'à un sens précis. En fait, elle a pour fonction d'introduire une situation déjà modélisée de façon implicite et partielle. Pour résoudre les problèmes, les étudiants consacrent l'essentiel de leur énergie à décoder des textes rédigés en « langue de bois » de la physique. Nous pourrions fort opportunément chercher à éviter de les coder. Les annexes comportent quelques exemples de la façon de procéder pour y parvenir¹⁰⁹.

Les objectifs pédagogiques déterminent les informations nécessaires à la résolution des problèmes. Pour le moment ils consistent surtout à faire calculer les étudiants, et c'est pourquoi les textes ne comportent que les données utiles à la mise en équations du problème, ce qui, inévitablement, entraîne des dérapages. Certains exercices sont tellement formels qu'ils en perdent tout sens physique comme nous en verrons un exemplaire en annexe 1.

Comment certains étudiants parviennent-ils à résoudre les problèmes malgré les obstacles décrits ? Encore une fois, ils développent des stratégies de reconnaissance d'indices secondaires. Ainsi, les données fournies dans les textes étant nécessaires et suffisantes pour trouver la solution algébrique du problème, les étudiants peuvent réussir en se contentant de chercher les « formules » qui font intervenir les données. Cette méthode étant parfaitement efficace pour réussir le baccalauréat, ils l'utilisent à l'exclusion de toutes les autres. Ainsi s'adaptent-ils, mais cette adaptation a un prix ; une fois ce mode de raisonnement acquis, il leur devient impossible de le changer. Dans de telles conditions, les étudiants n'ont pas la moindre chance de manifester leur pouvoir créatif en inventant les solutions des problèmes. L'analyse précédente est corroborée par le fait qu'à l'université, en travaux dirigés, bon nombre de maîtres de conférences renoncent à faire travailler leurs étudiants : ils se bornent à exposer les solutions des exercices au tableau.

Passer des examens

Examinons les stratégies utilisées par les étudiants pour réussir leurs examens. Les enseignants déplorent souvent que le bachotage constitue l'activité principale que les étudiants pratiquent

¹⁰⁹ On peut aussi consulter l'analyse d'un texte d'exercice dans le Bulletin de la S.F.P. J. Brenasin, *Comment surmonter les difficultés rencontrées par l'enseignement de la physique ?* N° 108 ; 1997.

systématiquement. Nous pouvons maintenant comprendre pourquoi ils en éprouvent le besoin ;

Comme les étudiants ne perçoivent pas les règles qu'ils doivent appliquer pour résoudre un problème, ils n'ont pas d'autre solution que d'apprendre par cœur des corrections d'exercices stéréotypés qu'ils imiteront plus ou moins bien.

Plus ils en connaissent, plus leurs chances de réussite sont grandes.

Il ne sert à rien de regretter le bachotage tant que l'on ne se donne pas les moyens de le rendre inutile.

Dans le contexte actuel, l'étude systématique des corrigés des problèmes d'examen est effectivement le moyen le plus efficace de réussir. Les étudiants détectent les caractères communs aux exercices, ce qui leur permet de deviner l'attente des correcteurs. La méthode est d'autant plus adaptée qu'il leur suffit souvent de se livrer à un jeu formel. Les étudiants des classes préparatoires aux grandes écoles sont passés maîtres dans cette technique. Si tel n'était pas le cas, on comprendrait mal le succès commercial des livres de problèmes résolus, que n'explique pas leur valeur scientifique. Enfin remarquons que le bachotage, avec la recherche de régularités et la détermination d'indicateurs pertinents pour réussir les examens, est une activité qui utilise les mêmes moyens que ceux de la démarche expérimentale. Un bachotage efficace nécessite donc des aptitudes que l'entrée dans une grande école cautionne effectivement.

La réussite d'un nombre acceptable d'étudiants au baccalauréat interdit de changer les habitudes et de poser un problème sortant des normes.

Et les normes ne peuvent pas être modifiées avant que l'enseignement le soit. Il est donc impossible de faire évoluer la situation en posant un problème dont la solution exigerait de mettre en œuvre des concepts et des lois de façon opératoire sans commencer par les enseigner ; mais pour que l'enseignement change, il faut que l'examen change et... vice versa.

Ceci « met en évidence » un des multiples processus circulaires qui s'opposent à toute évolution de l'enseignement.

OBSTACLES À L'ÉVOLUTION DE L'ENSEIGNEMENT

Malgré toutes les réformes préconisant l'enseignement d'une démarche scientifique, nous pouvons constater la pérennité du cours magistral et sa suprématie sur les activités expérimentales. Si nous voulons faire évoluer la situation, il faut commencer par comprendre les raisons de l'immobilisme. Il existe en effet un certain nombre de circonstances qui se conjuguent pour faire obstacle à toute modification de l'état actuel. Nous en avons déjà décrit incidemment un certain nombre et nous allons en examiner d'autres.

Le statut du maître

Dans un contexte où la science est diffusée essentiellement par l'intermédiaire de la parole du maître, le professeur acquiert le statut, particulièrement gratifiant, de celui qui « sait » ; le mériter

lui interdit de faillir aux yeux des étudiants. La crainte de se trouver face à des questions auxquelles ils ne pourraient éventuellement pas répondre, génère une véritable angoisse chez certains enseignants. C'est probablement une des raisons qui leur fait préférer le travail théorique au travail expérimental ; cela leur évite d'affronter les imprévisibles difficultés qu'engendre inévitablement la gestion des expériences. Résoudre des problèmes imprévus exige d'autres compétences que celles qu'il faut avoir pour faire un cours magistral qui, à la limite, ne nécessite que de réciter le livre du maître. Notons que les chercheurs eux aussi éprouvent de l'appréhension lorsqu'ils doivent réparer une panne de leur dispositif expérimental. Ils le supportent parce que, travaillant en équipe, ils peuvent se faire aider et en plus l'intensité du plaisir qu'ils ressentent lorsqu'ils trouvent des solutions originales compense largement tous leurs déboires.

Le volume des programmes

Un des plus sûrs moyens d'éviter les situations embarrassantes provoquées par des questions intempestives, consiste à enseigner des programmes trop vastes pour être traités dans le temps imparti.

Le volume des programmes, toujours excessif, aurait pour fonction de ne pas laisser aux étudiants le loisir d'interroger les enseignants.

Régulièrement jugés trop lourds par tous les partenaires du système éducatif, rien n'empêcherait de les réduire effectivement si la volonté de le faire était sincère.

Comment déterminer le contenu des programmes ? Leur ampleur est parfois défendue au nom de l'augmentation de la quantité des connaissances ; ce n'est qu'un alibi puisque de toutes les façons, il est impossible de les enseigner toutes. Il faut donc nécessairement faire des choix. Sur quels critères ? Là est la véritable question. Les programmes ne devraient pas être fixés d'après une sélection arbitraire des connaissances, mais en fonction d'objectifs de formation clairement définis. Ils pourraient être réduits, tout en restant efficaces, si les caractéristiques de la formation à une démarche expérimentale étaient prises en compte. Pour n'en citer que deux :

Enseigner les concepts et les lois formulés de façon opératoire, enseigner des méthodes de travail où le contrôle des résultats obtenus intervient.

Tous les étudiants de première année de faculté ne deviendront pas chercheurs ou enseignants ; il serait donc utile de concentrer nos efforts sur une formation exportable à d'autres domaines que ceux explorés par la physique. L'enseignement de la démarche expérimentale a l'avantage de créer des compétences utiles à la fois aux futurs physiciens, aux futurs enseignants et à ceux qui veulent exercer des métiers où le contrôle de la pensée est nécessaire, c'est dire s'ils sont nombreux.

L'évaluation des connaissances

Comme nous l'avons vu, une sorte d'examen cautionne un type d'enseignement et inversement

l'enseignement se fait en fonction des normes que les questions d'examen imposent.

Le mode de contrôle des connaissances étant fixé, il devient ensuite très difficile de faire évoluer l'enseignement, puisque l'objectif prioritaire des étudiants est d'être reçus¹¹⁰.

D'après André Durupthy participant à un débat organisé par la Société française de physique, il semblerait que l'introduction d'un travail expérimental se heurte au manque de critères d'évaluation : « Malheureusement, aujourd'hui, les outils qu'on s'est donnés pour évaluer la formation ne sont capables que d'évaluer la formation théorique. En particulier, l'évaluation ne porte jamais sur ce que l'élève est apte à faire, ou sait faire dans le domaine expérimental. Ce défaut de notre système d'évaluation a pour conséquence que les élèves ne font pas les efforts qu'il faut dans ce domaine¹¹¹. » L'impossibilité de pouvoir évaluer le travail expérimental devient un obstacle à l'évolution, puisque il est convenu que « les élèves ne travaillent que ce qui est évalué ». On voit donc se mettre à l'œuvre un de ces raisonnements circulaires qui bloquent l'évolution de l'enseignement. En d'autres termes :

1. Les élèves ne font des efforts que pour ce qui est évalué.
2. Nous ne savons pas évaluer le travail expérimental.
3. Donc nous ne pouvons pas enseigner le travail expérimental.

Selon un tel point de vue, que je ne partage bien évidemment pas, il faudrait limiter l'enseignement à ce que les professeurs savent évaluer, c'est-à-dire le travail théorique. Notons qu'il s'agit là d'une double illusion ; d'une part, un véritable travail théorique, qui met en œuvre des modélisations, ne se réduit pas à la résolution algébrique de quelques équations et, d'autre part, nous avons vu que l'on peut s'interroger sur ce que l'examen classique valide effectivement : s'agit-il de connaissances ou de stratégies d'adaptation ? Pour une grande majorité d'enseignants les étudiants ne travaillent que pour les contrôles¹¹². En conséquence il s'instaure une hiérarchie des préoccupations qui fait passer l'évaluation avant celle de l'élaboration du contenu de l'enseignement. Ainsi devient-il impossible de proposer un enseignement nouveau avant de savoir le valider. Or comment déterminer les critères du contrôle des connaissances avant d'expérimenter l'enseignement ? Ainsi se trouve bloquée, une fois de plus, et pour une raison supplémentaire, toute évolution.

Imposer que la détermination des procédures d'évaluation précède la mise en œuvre de nouvelles propositions pédagogiques est le meilleur moyen de contrecarrer toute velléité de progression.

¹¹⁰ Or souvent, par un souci de fausse rigueur, on veut évaluer une nouvelle façon d'enseigner par des épreuves traditionnelles.

¹¹¹ Débats, *op. cit.*, p. XIV.

¹¹² Que fait-on de l'éventuel intérêt pour le contenu de l'enseignement ?

Le comportement des étudiants

La plupart des étudiants et des élèves ne travaillent que pendant la période qui précède les examens. C'est un fait que chacun peut constater et sur lequel il faudrait aussi s'interroger. Pourquoi faut-il contraindre les étudiants à travailler même lorsqu'ils ont choisi librement des études scientifiques ? Il est clair qu'ils n'éprouvent pas un plaisir suffisant pour le faire tout le temps. Cette situation est quand même très étonnante. Et si elle provenait du fait qu'ils ne peuvent pas travailler de façon autonome ? Une telle supposition est d'autant plus plausible qu'elle permet d'expliquer l'ampleur du phénomène. De plus, elle permet de rendre compte de la quantité d'énergie que certains étudiants dépensent dans des clubs ou lors de leur participation aux Olympiades de la physique par exemple. Si les étudiants s'y engagent, c'est probablement parce qu'ils réalisent des activités bien définies, souvent techniques, comme le relate un ouvrage coordonné par Sylvain Chaty¹¹³. D'autre part, il est toujours très facile de trouver des volontaires pour se soumettre à des expériences de didactique, même si celles-ci se déroulent tous les mercredis après-midi pendant douze semaines, comme cela a été le cas lors des études entreprises par Gérard Lemeignan et Annick Weil-Barais¹¹⁴ à propos de la construction des concepts en physique.

Tout se passe comme si nous renoncions à l'avance à créer des conditions où les étudiants pourraient travailler simplement parce que l'enseignement de la physique les intéresserait. Nous avons constaté qu'une initiation à la démarche expérimentale peut plaire aux étudiants comme le montre une expérience tentée à l'Université Pierre et Marie Curie ; les enseignants ont été surpris par la quantité et la qualité de travail effectué par les étudiants lors de la rédaction de leurs rapports d'activité. Les principes guidant une telle initiation seront décrits plus loin dans ce chapitre.

Les conceptions des étudiants à la suite de leur formation universitaire

Les professeurs de lycée sont d'anciens étudiants qui fondent leurs discours sur les conceptions qu'ils se sont forgées au cours de leur apprentissage. Dans leur grande majorité, ils n'ont jamais effectué de travail de recherche. Depuis les années soixante-dix les stages de laboratoire ont été supprimés pour les agrégatifs. Ceux-ci ignorent donc en quoi consiste une démarche expérimentale complète. Dans ces conditions, les conceptions que les enseignants de lycée élaborent au cours de leurs études universitaires n'ont aucune raison d'être fondées sur autre chose que les idées implicites qu'ils se sont faites au cours de l'enseignement auquel ils se sont adaptés et qu'ils reproduisent ; ils considèrent que les théories sont vraies et vérifiables, ils

¹¹³ Olympiades de la physique. *Centre national de documentation pédagogique*. 1997.

¹¹⁴ G. Lemeignan, A. Weil-Barais, *Construire des concepts en physique*, Hachette, 1993.

croient légitime de penser que les objets du monde expérimental obéissent aux lois.

Les universitaires exerçant le métier de physicien disposent des connaissances nécessaires pour modifier leur discours, mais dans l'ensemble, ils n'en perçoivent pas l'utilité. Ils sont justement recrutés parmi ceux qui ont le mieux réussi dans le contexte décrit. Ils se bornent à constater des dysfonctionnements qu'ils s'expliquent de façon sommaire sans se donner la peine de vérifier leurs idées. Il faut reconnaître qu'ils sont trop occupés : ils partagent leur temps entre l'enseignement et la recherche et ils sont jugés sur leur production scientifique ; faire carrière ne leur laisse pas le loisir de passer trop de temps pour penser à l'enseignement¹¹⁵.

Les décideurs eux-mêmes sont tributaires des processus valorisant de façon excessive la théorie. Cela est manifeste, même lorsqu'ils le déplorent. La formulation des réticences exprimées dans le rapport Bergé le montre clairement. « La démonstration théorique est, plus que l'expérience, retenue comme preuve suffisante¹¹⁶. » Or, comme nous l'avons vu en décrivant notre modèle, il n'existe pas de preuve unique en physique. L'utilisation des mots « démonstration » et « preuve », au lieu « d'argumentation » révèle que les règles applicables aux sciences expérimentales s'expriment le plus souvent à l'aide du vocabulaire mathématique. Ce n'est guère étonnant :

Les modalités spécifiques à l'argumentation de la physique ne sont pas enseignées.

Et l'argumentation physique est, sans nul doute, beaucoup plus difficile à élaborer que d'énoncer les règles de l'algèbre élémentaire. De plus contrôler une argumentation réclame plus de réflexion que de vérifier une démonstration algébrique. Toutes ces raisons expliquent la prééminence des calculs dans la résolution de problèmes.

SUGGESTIONS POUR L'ENSEIGNEMENT

Les suggestions suivantes ne prétendent pas constituer un ensemble exhaustif et complet de solutions. Nous partons de l'hypothèse qu'il est possible d'élaborer des règles du jeu spécifiques à l'enseignement des sciences physiques en nous inspirant de celles qui régissent la démarche expérimentale.

Comment faire évoluer le travail expérimental ?

L'examen des textes des fiches de travaux pratiques traditionnels montre que l'étudiant doit suivre docilement une succession de consignes stéréotypées qui visent à le convaincre de « l'existence » des lois au lieu de faire valoir leur utilité. En conséquence, la modification des travaux pratiques passe par une réflexion concernant la définition de nouveaux objectifs. Comment déclencher une démarche expérimentale dans l'enseignement ? Il existe des moyens

¹¹⁵ Inutile de préciser que ma carrière a souffert du temps passé à mes recherches sur l'enseignement.

¹¹⁶ P. Bergé *op. cit.*, p. 1.

efficaces pour y parvenir que nous allons examiner maintenant.

Restituer les phases de la démarche expérimentale¹¹⁷. La plus immédiate des conséquences de la modélisation proposée consiste à tenter de restaurer dans l'enseignement les phases de la recherche.

Un étudiant s'engage dans une démarche expérimentale à partir du moment où il cherche à construire une réponse à une interrogation concernant l'évolution d'une situation du monde matériel.

Cependant l'étudiant n'est pas dans la situation du chercheur professionnel. Pour instaurer la phase de questionnement, il faut tenir compte du fait qu'il ne peut pas concevoir de lui-même les interrogations qu'une longue observation du monde aurait pu éventuellement lui suggérer. Dans un contexte scolaire, il n'est pas possible non plus d'imaginer des séances de travaux pratiques où chaque étudiant s'amuserait à chercher des réponses aux questions qui n'intéresseraient que lui. Le rôle de l'enseignant consiste donc à créer les circonstances dans lesquelles les étudiants acceptent de s'investir dans la construction de réponses aux questions qu'ils se sont appropriées. Il faut donc que l'enseignant choisisse des situations permettant de poser une succession de questions qui vont guider les activités. Citons ici l'exceptionnel travail d'Élisabeth Plé, dont les recherches apportent des informations décisives sur la façon de concevoir et d'enchaîner les activités¹¹⁸. Elle observe que les enfants de l'école primaire pensent que le sel disparaît lorsqu'il se dissout dans l'eau, que l'air n'est pas constitué de matière etc. Pour les engager dans la réflexion, elle leur demande de faire des prévisions sur l'évolution de situations particulières qu'elle choisit afin que les idées spontanées des enfants soient contredites par ce qui se passe en réalité. Elle leur demande par exemple : que restera-t-il dans un récipient lorsque toute l'eau préalablement salée se sera évaporée ? Les enfants pensent *a priori* qu'il ne reste rien et sont étonnés de constater que c'est faux. Bien que le cadre théorique dans lequel Élisabeth Plé situe ses propositions soit assez compliqué, toutes les actions qu'elle décrit pour guider les enfants sont conformes à notre modèle de la démarche expérimentale. Sa méthode de travail avec les enfants pourrait fort utilement inspirer ceux qui désirent construire un tel enseignement au niveau de l'école primaire.

Trouver des questions que les étudiants puissent s'approprier présente des difficultés redoutables et insoupçonnables. Comme en recherche, il faut parfois accepter de partir d'un questionnement imparfait quitte à le faire évoluer au cours du travail.

¹¹⁷ Voir comment procéder dans les documents de recherche.

¹¹⁸ É. Plé, *Transformation de la matière à l'école élémentaire : des dispositifs flexibles pour franchir les obstacles*. Aster N° 24 1997.

Restaurer la phase de questionnement constitue un moyen privilégié permettant de réaliser une initiation à la démarche expérimentale.

Pour que les étudiants puissent entreprendre un travail autonome, il faut qu'ils comprennent la formulation des questions qui leur sont posées ; ce truisme ne mériterait même pas d'être énoncé si c'était généralement le cas mais, comme nous l'avons montré, ils doivent perpétuellement deviner nos intentions à partir de formulations obscures. En conséquence, il faut trouver des «questions pertinentes ».

La fonction d'une «question pertinente » dans l'enseignement consiste à :

- engager les étudiants dans une action autonome.

Les caractéristiques d'une «question pertinente » sont les suivantes :

1. être compréhensible par les étudiants ;
2. être attrayante, c'est-à-dire comporter un enjeu pour les étudiants (il est préférable qu'ils ignorent la "réponse" à la question posée) ;
3. être susceptible d'être résolue par les étudiants : ceux-ci doivent pouvoir se l'approprier au point d'être capables d'imaginer les moyens d'y répondre.

La première de ces trois propriétés est essentielle. C'est une condition nécessaire à la réalisation des deux autres. Nous retiendrons que, munie de sa fonction et de ses caractéristiques, une «question pertinente » acquiert le statut de concept, conformément à ce que doit comporter une définition opératoire.

Une fois la phase de questionnement restaurée :

Les autres phases se déroulent automatiquement à condition que les enseignants imposent aux étudiants de contrôler la validité de leurs réponses.

Prenons un exemple : au lieu de demander «d'étudier » les oscillations d'un pendule, il suffit de proposer de construire un pendule qui bat la seconde et de contrôler qu'il le fait effectivement. Si elle est rigoureusement conduite, cette activité, qui s'énonce en une ligne, permet de faire travailler les étudiants pendant plusieurs séances à très faible coût. En effet, le contrôle, s'il est judicieusement guidé par des questions appropriées, conduit les étudiants à s'interroger au sujet de la relation existant entre les valeurs mesurées et la valeur des grandeurs recherchées, c'est à dire sur la nature de la relation existant entre le monde théorique et le monde expérimental.

Toutes les activités liées à la prévision de l'évolution d'un système et au contrôle des résultats obtenus, permettent de pratiquer une démarche expérimentale.

Les questions les plus simples concernent la prévision de l'évolution d'une situation. Répondre nécessite une modélisation ; cela consiste à décrire les simplifications et les approximations effectuées pour passer d'une situation matérielle à sa représentation.

Ces opérations seront décrites en détail au cinquième chapitre à propos de la description d'une expérience effectuée dans un lycée.

Construire des dispositifs techniques.

Une initiation à la démarche expérimentale peut aussi être réalisée en proposant aux étudiants de construire un dispositif technique ayant une fonction donnée.

Au cours d'une expérience didactique, des élèves de seconde ont fabriqué une guirlande de Noël simplifiée. Elle était réduite à deux petites diodes électroluminescentes alimentées par un générateur et s'allumant alternativement pour simuler le clignotement. L'objectif n'était évidemment pas de fabriquer un objet ayant les performances d'un produit techniquement abouti mais seulement d'en comprendre le principe. Cette méthode constitue un moyen efficace de rendre l'apprentissage opératoire. Il est pratiquement impossible de choisir les éléments d'un circuit ayant des propriétés données sans que les concepts de courant, de tension, de puissance etc. soient maîtrisés. Du point de vue didactique, il s'agissait de créer des circonstances qui obligent les étudiants à mettre leurs connaissances à l'épreuve. Le fonctionnement correct de l'appareil cautionne directement une réussite que les élèves peuvent contrôler par eux-mêmes.

Spécifier les fonctions du compte rendu d'expérience. Lors de travaux pratiques traditionnels, l'étudiant doit rédiger des comptes rendus. Il ne sait pas ce qu'il doit y écrire. Il se trouve donc devant un problème difficile à résoudre. Nous avons tous plus ou moins oublié nos propres difficultés dans ces circonstances. Ravivons nos souvenirs : il fallait commencer par élaborer une stratégie pour deviner quoi faire¹¹⁹. Nous procédions par essais et erreurs. La note obtenue nous indiquait si nous avions visé juste. Le contenu d'un compte rendu dépend des objectifs qu'on lui fixe. Pour les définir, il est possible de s'inspirer des fonctions assurées par le cahier de laboratoire : il sert à garder en mémoire les procédures utilisées et les résultats obtenus et aussi à transmettre les informations utiles à ceux qui doivent poursuivre ou modifier des expériences. Chaque chercheur sait que le choix de l'information à conserver est très difficile à réaliser correctement. Que celui qui n'a pas en mémoire le douloureux souvenir d'avoir omis, au moins une fois dans sa vie, de noter l'information la plus importante - soit pour faire des recoupements, soit pour recommencer une expérience, soit pour rédiger un article – se fasse connaître !

L'établissement des règles de rédaction du rapport des travaux expérimentaux nécessite de définir au préalable les fonctions qu'il doit assurer.

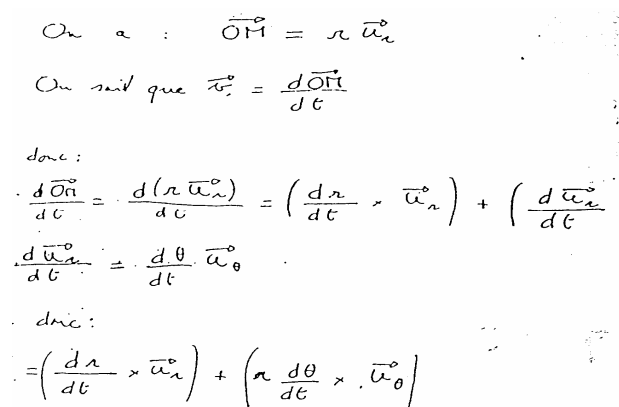
La rédaction du rapport peut aussi participer à la formation des étudiants, à condition qu'il serve un objectif explicite. Si le travail expérimental prend de l'intérêt pour l'étudiant, il y a toutes les raisons de supposer qu'il ait envie de s'en souvenir.

¹¹⁹ Cette situation révèle incidemment un nouveau phénomène : dans certaines circonstances les préoccupations des étudiants sont totalement différentes de celles des enseignants, en particulier lorsque les premiers cherchent à savoir ce qu'ils doivent faire tandis que les seconds cherchent à évaluer leur travail.

Une activité expérimentale peut pratiquement toujours se développer dans différentes directions. Il est possible d'imaginer des situations où les étudiants ne feraient pas tous les mêmes expériences, en particulier dans la phase de contrôle. Ils auraient alors à communiquer leurs résultats aux autres afin de les comparer. Dans de telles circonstances, le compte rendu a une fonction claire : il doit comporter les informations qu'il faut transmettre à ceux qui ignorent ce qui a été fait. Lorsque les étudiants sont en situation de communiquer leurs résultats, nous pouvons déléguer le travail d'évaluation du rapport à ceux qui en prennent connaissance. Ils sauront décider si les informations transmises par les autres équipes sont claires, pertinentes et complètes. Il n'y a aucune raison de supposer que les étudiants soient complaisants les uns envers les autres, et d'ailleurs il est toujours possible de le vérifier. Ainsi est-il possible de créer des situations où les échanges entre étudiants ont une fonction formatrice, encore faut-il se sentir capable de gérer la diversité des activités.

Comment faire évoluer le travail théorique des étudiants ?

Un enseignement de la démarche expérimentale comporte une composante théorique dont il n'est pas question de sous-estimer la fonction. Encore faut-il la préciser. C'est d'autant plus nécessaire que l'ignorance de ce qui constitue une argumentation se manifeste clairement dans les copies ; les étudiants introduisent leurs calculs par les expressions «On a» et «On sait que » qui sont vides de sens.



On a : $\vec{OM} = r \vec{u}_r$

On sait que $\vec{\omega} = \frac{d\vec{OM}}{dt}$

donc :

$$\frac{d\vec{OM}}{dt} = \frac{d(r \vec{u}_r)}{dt} = \left(\frac{dr}{dt} \times \vec{u}_r \right) + \left(r \frac{d\vec{u}_r}{dt} \right)$$

$$\frac{d\vec{u}_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \vec{u}_\theta$$

donc :

$$= \left(\frac{dr}{dt} \times \vec{u}_r \right) + \left(r \frac{d\theta}{dt} \times \vec{u}_\theta \right)$$

Figure 1. Copie d'étudiant de DEUG 1 ère année.

J'ai calculé le nombre de fois où ces expressions interviennent dans un paquet de copies d'examen : deux pour cent des étudiants citent les deux lois qui justifient la mise en équations du problème, cinq pour cent n'en citent qu'une sur deux, vingt-cinq pour cent introduisent leurs calculs par les expressions «on a» «on sait que», et les soixante-huit pour cent qui restent ne donnent aucune justification, ou ne savent pas résoudre le problème. Ce ne sont d'ailleurs pas les détails de ces pourcentages qui importent, mais le fait qu'il n'y ait que deux étudiants sur cent

pour citer les deux lois qui fondent la légitimité de leur calcul. Cette valeur est si faible qu'elle confirme clairement le fait que les étudiants ignorent comment argumenter une solution de problème.

Comment procéder pour qu'ils ne se bornent pas au seul apprentissage du calcul formel ? L'élaboration de toutes les réponses nécessiterait un travail d'expérimentation qui reste à faire. Cependant nous pouvons d'ores et déjà faire quelques suggestions.

Justifier la mise en équations d'un problème¹²⁰

Dès le début d'un exercice de physique, les étudiants doivent se représenter la situation et choisir la stratégie qui permet de résoudre le problème posé¹²¹. Il faut qu'ils trouvent les informations à partir desquelles les calculs algébriques vont s'articuler. Ils ne peuvent pas élaborer une solution de façon raisonnée sans avoir appris comment s'effectue la mise en équations d'un problème ; or celle-ci comporte différentes sortes d'arguments¹²².

Pour justifier une solution il faut indiquer le statut des différentes entités utilisées, il y a :

- les valeurs caractéristiques du système matériel,
- les valeurs qui sont relatives à l'état du système,
- les constantes universelles, etc.

Pour argumenter la solution il faut énoncer :

- les définitions, les lois et les principes, qui interviennent dans la mise en équations de la solution.

Pour expliciter les raisons des différents choix, il faut :

- calculer les valeurs relatives des différentes grandeurs physiques utilisées etc.

Soulignons que tout ceci montre à quel point les règles de l'argumentation en physique diffèrent de celles qui régissent les démonstrations mathématiques.

Effectuer les calculs.

Les calculs qui succèdent à la mise en équations des problèmes obéissent aux règles algébriques. Il faudrait s'interroger sur cette étrange particularité qui confère à l'algèbre la partie la plus développée de l'enseignement de la physique. Je n'ai jamais assisté à une réunion pédagogique qui ne se soit soldée par une plainte unique : les étudiants ne savent pas calculer. C'est peut-être le cas, mais si nous prenions la peine de contrôler cette opinion, nous constaterions sans doute que notre impression provient en fait de ce que les étudiants ne savent pas ce qu'ils doivent calculer.

¹²⁰ Voir comment argumenter dans le livre d'exercices du site.

¹²¹ Rappelons les difficultés rencontrées par Jacques Roubaud pour mettre en équations les problèmes de physique. Voir citation page 80.

¹²² Voir le livre les argumentations dans les solutions de problèmes sur ce même site.

Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer qu'ils ne parviennent pas à utiliser en physique des connaissances de calculs élémentaires qu'ils savent fort bien effectuer en mathématiques¹²³. Exiger qu'ils calculent sans leur expliciter ni les objectifs à atteindre ni la stratégie à utiliser, c'est comme demander à un explorateur de traverser la forêt amazonienne par ciel couvert, sans boussole et sans carte. Nous le constatons tous les jours ; évidemment les étudiants se perdent, ils calculent n'importe quoi. À l'opposé, ceux qui comprennent les règles du jeu proposé ici se passionnent et j'ai pu constater que certains d'entre eux se mettent à travailler pour le plaisir.

Contrôler les résultats obtenus.

L'apprentissage des différents moyens de contrôler la pensée fait partie de ce que la physique peut proposer de plus spécifique et de plus formateur.

C'est pourquoi les interrogations sur la pertinence des résultats obtenus pourraient systématiquement faire partie des questions posées dans les problèmes. Il existe de nombreux cas où des démarches différentes permettent de s'assurer que la prévision de l'évolution d'une situation a été correctement établie. De telles activités ne peuvent se produire qu'en revendiquant pour les étudiants le droit à l'erreur, erreur que des recoupements et les contrôles devraient permettre de corriger ; un chercheur se trompe aussi souvent que le plus «mauvais » des étudiants. La différence essentielle entre les deux réside dans le fait que l'un a appris à corriger ses conclusions et l'autre pas.

Favoriser les autocorrections.

Dans toutes les disciplines, la correction des copies est un travail énorme et particulièrement fastidieux. Une correction rapide ne comportant que les mentions «juste » ou «faux », ne vise que l'évaluation et n'apporte aucune information profitable à l'étudiant, seuls des commentaires sur ses erreurs peuvent l'aider à progresser. Pour les rédiger, l'enseignant doit y consacrer une grande partie de son temps, sans être certain que les étudiants les lisent et en tirent bénéfice. Le rendement d'un tel travail ne justifie pas l'investissement consenti. De plus, le fait de soumettre l'étudiant au jugement de «l'enseignant» renforce l'idée fausse selon laquelle ce dernier détient la vérité.

Une solution pratique consiste à déléguer le pouvoir d'évaluer son travail à l'étudiant lui-même. Il suffit alors de lui fournir un corrigé argumenté assorti d'un barème, puis de contrôler les autocorrections et les notes qu'il s'est attribuées. Cela présente l'avantage de diminuer la partie la

¹²³ Il est difficile d'imaginer que tous les étudiants réussissent le baccalauréat sans avoir des notions élémentaires de mathématiques, telles que le fait de savoir représenter la fonction : $y = a \cdot x + b$. Arrivés à l'Université, nombreux sont ceux qui sont incapables de tracer cette même courbe lorsqu'elle comporte des grandeurs physiques comme la variation du potentiel V en fonction de la position d'un point, d'abscisse x , situé entre les plaques d'un condensateur plan. Elle s'écrit de façon analogue : $V = E \cdot x + V_0$.

plus ennuyeuse du travail de l'enseignant tout en rendant les corrections plus efficaces pour les étudiants, puisqu'ils sont en situation d'exercer un nouveau type d'activité qui les oblige à prendre de la distance par rapport à leurs résultats. L'autocorrection est un moyen d'inciter les étudiants à réfléchir sur leurs erreurs, ce qui est favorable à leur progression. Pouvons-nous faire confiance aux notes qu'ils s'attribuent ? Il faut évidemment les vérifier, mais c'est beaucoup plus rapide que de les attribuer. D'après mon expérience, la majorité des étudiants joue le jeu, certains ont tendance à surévaluer leur travail, d'autres à le sous-estimer ; le leur signaler participe à leur formation. Tous les enseignants qui ont pratiqué cette méthode sont étonnés de constater que les étudiants qui comprennent leur intérêt ne se font pas de concession.

Comment rédiger les textes de problèmes ?

La réalisation de l'ensemble des objectifs décrits n'est possible qu'en remettant en cause la façon de rédiger les textes d'exercices. Un travail interdisciplinaire, réunissant des physiciens, des littéraires et des psychologues, serait utile pour établir des règles auxquelles devraient se conformer les rédactions de textes de problèmes. En attendant qu'une telle situation se réalise, énonçons quelques principes fondés sur les constats que nous avons faits jusqu'à présent.

Faire des descriptions homogènes.

Un exercice d'entraînement théorique contient très souvent la description d'une situation qui est, comme nous l'avons déjà noté, réductrice par nature. Lorsqu'il s'agit d'un problème concernant une situation matérielle, la description devrait ne comporter que des objets et des événements. Ainsi, une pierre devrait tomber sur la Terre et non pas «dans le champ de gravitation.» Ce dernier étant un concept et non un objet matériel, il est difficile de concevoir qu'une pierre puisse tomber dans une idée ! Il existe pourtant des raisons valables à la formulation de plus en plus «théorisée» des énoncés d'exercice ; ils ont l'avantage d'être d'autant plus courts qu'ils sont codés. En effet décrire, comme nous le préconisons, les situations en termes d'objets participant à des événements nécessite de fournir de nombreuses informations. Que faut-il dire, que faut-il passer sous silence ? La réponse n'est jamais simple. Prenons deux descriptions de la même situation : « Un électron se déplace entre les deux plaques d'un condensateur » et «un électron se déplace dans un champ électrique uniforme.» Pour que les deux formulations soient équivalentes, il faudrait préciser, dans le premier cas, que l'électron se déplace dans une zone où le champ électrique est uniforme, c'est à dire près du centre du condensateur ; cela revient donc à expliciter les conditions de modélisation qui permettent de simplifier les calculs. Un texte, qui fait explicitement intervenir les objets et qui précise les domaines de validité des calculs, est forcément plus long que celui qui utilise les codes ; il est aussi plus clair.

Les textes codés ont aussi pour fonction d'éviter que l'étudiant se pose des questions autres que

celles prévues et qui concernent le calcul¹²⁴. Le rédacteur d'un texte d'examen n'est jamais sûr d'avoir spécifié tout ce qui est utile à l'élaboration de la solution du problème proposé. Il se trouve souvent un étudiant pour se poser des questions pertinentes imprévues. C'est une situation délicate à gérer. Si nous ne sommes pas extrêmement vigilants, il peut arriver qu'un étudiant échoue à un examen justement parce qu'il se montre capable de réfléchir. Pourquoi ne pas imaginer des barèmes qui tiennent compte des remarques judicieuses, même dans le cas où elles empêcheraient l'étudiant de trouver la solution attendue. La sélection des esprits originaux s'accommode mal de l'uniformisation des critères d'évaluation concomitante à l'uniformisation des textes d'exercices. Si nous ne cherchons pas tous les moyens d'éviter de pénaliser ceux qui réfléchissent, nous pouvons craindre de sélectionner préférentiellement les esprits conformistes. C'est ce que font souvent les examens et les concours traditionnels.

Regrouper les informations.

Comme nous l'avons déjà fait remarquer, les étudiants bachotent pour réussir leurs examens parce qu'ils peuvent résoudre les problèmes à l'aide d'une stratégie de reconnaissance de «formules¹²⁵». Ils utilisent les données non pas en fonction de ce qu'elles représentent, mais en cherchant dans quelle relation elles interviennent. Cette procédure convient parce que chaque exercice comporte toutes les données utiles et seulement celles là.

Comment empêcher que de telles habitudes s'instaurent ? Il existe un moyen simple de les déjouer : ne pas fournir dans chaque texte d'exercice toutes les informations nécessaires à la résolution du problème. Il suffirait de distribuer une feuille regroupant toutes les valeurs des grandeurs universelles utiles au cours d'une année scolaire en y ajoutant les valeurs des caractéristiques matérielles les plus courantes. Elles sont habituellement introduites dans les textes par une expression consacrée ; «on donne », comme si elles tombaient directement du ciel ! Or elles sont établies par des laboratoires spécialisés les plus performants. Elles sont regroupées dans le Handbook of Physics, cette «bible» du physicien. La consultation du Handbook of Physics permettrait aux étudiants de connaître l'origine des valeurs caractéristiques contenues dans les textes. Enseigner la façon de trouver les informations utiles contribuerait à former des étudiants efficaces. Pourquoi ne pas fabriquer une sorte de Handbook du débutant pour les plus jeunes, tout comme il existe un dictionnaire du débutant ? Il fournirait toutes les valeurs dont ils ont besoin pour résoudre les problèmes au cours de leur cycle d'étude. Un Handbook du débutant bien conçu devrait aussi exposer brièvement, mais rigoureusement, les méthodes utilisées pour mesurer ces grandeurs.

Exposer l'objectif du problème.

¹²⁴ Voir dans l'annexe les différents exemples de textes.

¹²⁵ C'est ainsi que les étudiants désignent les lois.

Cela est nécessaire pour que l'étudiant puisse élaborer une stratégie de résolution. Faute de le faire, certains auteurs fournissent dans le texte l'équation à laquelle les étudiants doivent aboutir. C'est ce qu'illustre l'exercice au sujet du satellite cité un peu plus loin¹²⁶. Ce type de soutien comporte d'ailleurs des effets pervers ; lorsque le résultat est donné, presque tous les étudiants le trouvent, y compris si le texte comporte des fautes de frappe ; ils le trouvent même en donnant des justifications farfelues, ils le trouvent même en faisant de multiples erreurs qui, forcément, se compensent toujours. Or ceux qui posent des exercices sans objectif déclaré, sont bien obligés d'indiquer les résultats auxquels les étudiants doivent aboutir s'ils veulent éviter un échec massif. Si l'objectif du calcul était clairement énoncé, les étudiants devraient parvenir au résultat sans cette « aide ». Lorsque le résultat n'est pas donné, les étudiants s'attendent à ce qu'il soit noté indépendamment de la façon de l'obtenir ; ils ont raison aussi longtemps que les règles de résolution ne font pas partie de l'enseignement.

Quels objectifs fixer aux exercices ? Conformément au modèle :

La modification de la forme traditionnelle des exercices peut passer par des interrogations concernant la prévision de l'évolution d'une situation matérielle.

Formuler les questions en utilisant des verbes d'action.

Les formulations des questions devraient servir de guide afin que l'étudiant connaisse la nature de l'action qu'il doit accomplir. Actuellement, la forme des questions posées est non seulement codée, mais de plus impropre. Citons, à titre d'exemple, un texte d'examen : « Un satellite terrestre est placé sur une orbite circulaire, supposée stable.

1°) *Montrer que sa vitesse orbitale V est donnée par... [suit la relation mathématique qui est la solution du problème].*

2°) *Donner l'expression de la période du mouvement circulaire en fonction de... [liste de grandeurs physiques intervenant]. »*

Interrogeons-nous sur le sens des mots : «montrer» et «donner» figurant en tête de pratiquement toutes les questions. Les étudiants ne peuvent pas en déduire ce qu'ils doivent faire. Ils observent la façon dont les professeurs procèdent pour corriger les problèmes, puis ils les imitent pour parvenir à «montrer » et à «donner ». Les solutions sont d'autant plus difficiles à établir que les équations qui fondent le calcul sont le plus souvent posées par les enseignants sans aucune argumentation, comme on peut le constater en examinant la plupart des solutions figurant dans les livres d'exercices corrigés¹²⁷.

Au lieu d'introduire les questions par des verbes impropres, il serait plus judicieux d'utiliser des

¹²⁶ Dans le paragraphe : formuler les questions en utilisant des verbes d'action

¹²⁷ Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que les étudiants écrivent au début de leurs calculs : «On a » et «On sait que ».

verbes traduisant une action précise. Ainsi au lieu de : « Montrer la relation truc », nous pourrions écrire « Établissez la relation truc », après avoir, bien entendu, enseigné la succession des opérations qui permettent de l'établir. Nous pourrions dire de façon analogue : « rappelez une définition (ou une loi), calculez une valeur, résolvez une équation, décrivez l'état d'équilibre du système, contrôlez la validité des résultats obtenus » etc. Les verbes qui habituerait les étudiants à contrôler leurs résultats sont faciles à énoncer : « vérifiez l'homogénéité des relations trouvées, vérifiez que les règles de symétrie sont bien observées, vérifiez que les ordres de grandeurs obtenus sont raisonnables, retrouvez le même résultat par une autre méthode ». De plus nous devrions abandonner l'utilisation de l'infinitif au profit de la première personne du pluriel afin d'indiquer à l'étudiant que c'est à lui d'agir.

Formuler des questions en respectant le statut épistémique des entités.

Prenons un exemple afin de montrer comment procéder pour respecter le statut des entités évoquées. « Quelles sont les forces qui s'exercent sur un livre posé sur une table ? » Voilà une question qui laisse entendre que les forces, concept théorique, existent dans le monde expérimental. Au lieu de cela nous pourrions demander : « comment décrire l'immobilité du livre posé sur la table en utilisant les forces ? » Ceci respecterait le statut des forces.

Pour faire évoluer les textes de problèmes il suffit de rendre au monde expérimental et au monde théorique la fonction qui leur revient.

LES RÈGLES DE COMPORTEMENT

L'adoption de règles du jeu spécifiques à un enseignement prenant en compte la composante expérimentale de la physique implique qu'enseignants et étudiants modifient certains de leurs comportements acquis dans les structures traditionnelles. Les étudiants devraient être partie prenante de leur instruction. Ils ne doivent pas s'attendre à apprendre la science en écoutant leurs enseignants faire des cours ou en les regardant résoudre des problèmes au tableau. Ils ne peuvent pas espérer que la science puisse leur être insufflée sans qu'ils fournissent le moindre effort. Pour jouer de la musique il faut faire des gammes, et il faut s'entraîner pour gagner des matchs de tennis. Personne n'a jamais appris le violon en écoutant un disque de Jascha Heifetz, ou à jouer au tennis en regardant Mac Enro à la télévision. La nature du travail que nécessite l'apprentissage des sciences ne diffère pas fondamentalement de celui des arts ou des sports, il faut nécessairement les pratiquer.

De grandes affiches placardées sur les murs de la faculté proclament que les études ne sont pas un privilège mais un droit ; il serait judicieux d'ajouter qu'elles sont aussi un devoir et non une sinécure. De plus il faut que les étudiants acceptent de ne pas tout comprendre immédiatement, il faut qu'ils admettent de revenir plusieurs fois sur les difficultés jusqu'à ce qu'une petite lueur se produise dans leur esprit, puis il faut qu'ils souffrent de recommencer, inlassablement, en sachant

qu'il restera toujours des zones d'ombre à éclaircir. Les étudiants ne doivent pas espérer que les enseignants connaissent tout et soient infailibles. En revanche, ils sont en droit d'attendre d'être guidés dans leur travail par des gens compétents.

Les enseignants devraient cesser de croire qu'ils détiennent une « connaissance » à « transmettre » aux étudiants. Dans une initiation à la démarche expérimentale, ils ont pour fonction d'aider les étudiants à construire leur connaissance.

De nombreuses difficultés de communication proviennent de l'inadéquation des mots utilisés. Nous en avons examiné de nombreux exemples. Cependant il ne faudrait pas que les professeurs soient découragés et qu'ils aient le sentiment de ne plus pouvoir s'exprimer « correctement ». L'élaboration d'un langage mieux adapté pourrait être facilitée par la prise en compte de conceptions philosophiques plus conformes à la nature de la connaissance scientifique. Elles vont être présentées au chapitre suivant.

LES COMPÉTENCES DES ÉTUDIANTS

Si nous voulons construire un enseignement adapté aux compétences initiales des étudiants, il faut s'interroger sur leur nature et chercher à les connaître. Certains chercheurs en didactique croient qu'il existe une rupture entre la pensée dite commune et la pensée dite savante. Selon notre modèle, il y aurait plutôt une continuité entre les deux. De récentes recherches montrent que les bébés font de véritables expériences¹²⁸. Pour se familiariser avec l'espace, l'enfant de six mois jette inlassablement sa petite cuillère par terre. L'enfant qui se dresse sur ses jambes apprend à résoudre les problèmes d'équilibre que lui pose l'attraction de la Terre. Et il y parvient ! Très jeunes, les enfants rient lorsque les lois de la physique sont transgressées dans les dessins animés. Ils savent bien, sans en avoir eu une expérience directe, qu'un personnage propulsé à travers un mur n'y laisse pas la trace de sa silhouette. Ils savent aussi qu'il ne reste pas suspendu en l'air lorsque ses pieds ne reposent plus sur le sol. (Comment parviennent-ils à le comprendre et à quel âge ?) Plus tard, l'équilibre que l'adolescent teste en se balançant sur les deux pieds arrière de toutes les chaises sur lesquelles il s'assoit a peut-être bien quelque chose à voir avec la recherche de son centre de gravité. Dès leur naissance les enfants effectuent, dans tous les domaines, des expériences et un travail de conceptualisation sans lequel ils ne pourraient pas survivre. Ils n'arrivent donc pas en classe vierges de toute connaissance ; ils ont déjà résolu de façon efficace et par leurs propres moyens, un nombre incalculable de problèmes pratiques. Nous aurions tort de les sous-estimer¹²⁹. La différence entre le savant et le profane provient de ce que le premier

¹²⁸ H. Sinclair, I. Stambak, I. Lesine, S. Rayna, M. Verba, *Les bébés et les choses ou la créativité du développement cognitif*, PUF, 1982.

¹²⁹ Je n'ignore évidemment pas toutes les recherches sur les « misconceptions » des élèves (selon la

dépense beaucoup d'énergie pour mieux exercer sa paresse : il cherche des descriptions communes au plus grand nombre de situations envisageables, alors que les autres se contentent de solutions locales. L'enseignement gagnerait probablement en efficacité si les programmes permettaient de passer continûment d'un type de connaissance à l'autre, en montrant sur quoi porte le changement et comment il s'opère.

Au terme de ce voyage au pays de l'enseignement de la physique tel qu'il se pratique, il devient possible de comprendre la fondamentale légitimité des contestations exprimées par les étudiants dans les différentes enquêtes. Nous pouvons aussi percevoir la cohérence sous-jacente aux reproches, apparemment disparates, qu'ils adressent à l'enseignement et dont le rapport de Jean Bornarel se fait l'écho. Les citer permet de conclure en montrant qu'elles corroborent la théorie proposée. « Ce n'est pas vraiment de la physique, plutôt des formules et des recettes de cuisine à appliquer¹³⁰ », dit un étudiant soupçonnant un manque, en fait la méconnaissance du statut des lois. Il confirme indirectement que les lois ne sont pas enseignées de façon opératoire. Certains se plaignent de ne pas connaître l'objectif de l'enseignement : « Je ne vois pas ce qu'ils veulent m'expliquer, je ne vois pas où ils veulent en venir...¹³¹ », ainsi, comme nous l'avons admis, la disparition des questions porte bien préjudice à leur compréhension. Un autre exprime que ses questions personnelles ne sont pas prises en compte : « Les questions doivent se rapporter au cours seulement, [...] C'est dommage de se restreindre de poser des questions quand on a de l'intérêt pour quelque chose [...] Après on ne cherche plus à savoir¹³². » Il n'a donc pas appris le rôle des questions pertinentes. Un autre insiste sur la nécessité d'agir : « Cette année, c'est de la théorie seulement, on nous balance des règles, il faut apprendre par cœur [...] l'an dernier ce qu'on notait, on l'avait fait avant avec nos mains ça nous aidait à comprendre¹³³. » Un étudiant trouve la physique : « à la fois trop théorique et pas rigoureuse », parce qu'il n'a pas eu l'occasion d'apprendre comment gérer l'articulation entre le monde théorique et le monde expérimental. Il ne sait pas ce qui différencie le raisonnement mathématiquement rigoureux d'une argumentation physique tout aussi rigoureuse. D'autres étudiants précisent qu'ils perçoivent le monde expérimental comme « entaché d'erreurs ». C'est justement cette idée que vise à remettre en question une formation sur le traitement des mesures qui sera présentée au cinquième chapitre. En fin de compte, la résistance des étudiants est souvent légitime. Qu'ils peinent à résoudre les

terminologie anglo-saxonne), avec lesquelles je ne suis pas d'accord.

¹³⁰ J. Bornarel, « L'enseignement de la physique en premier cycle universitaire », *Bulletin de la SFP (de la Société Française de Physique)*, supplément au n° 81, 1991. p. 6.

¹³¹ Débats, *op. cit.*, p. XXII.

¹³² J. Bornarel, *op. cit.*, p. 308.

¹³³ J. Bornarel, *op. cit.*, p. 308.

problèmes tels qu'ils sont souvent formulés devrait plutôt être mis au bénéfice de leur rigueur. Prenons garde à ce que ce ne soient pas justement ceux qui sont exigeants qui se trouvent rejetés parce qu'ils refuseraient de se soumettre à des pratiques contestables.

S'il n'est pas raisonnable d'imaginer enseigner la physique uniquement au moyen de la pratique systématiquement de la démarche expérimentale, il ne faut pas pour autant y renoncer totalement. Si nous persistons à vouloir enseigner la physique, c'est justement parce que la gestion du monde expérimental est complexe. Admettons que l'apprentissage de la physique est utile à la formation des étudiants justement parce qu'il enseigne comment surmonter des difficultés qui paraissent inextricables.

Chapitre 4

QUELQUES CONSIDÉRATIONS ÉPISTÉMOLOGIQUES ET LEURS CONSÉQUENCES POUR L'ENSEIGNEMENT

Les démonstrations de tout ceci sont si certaines, qu'encore que l'expérience nous semblerait faire voir le contraire, nous serions néanmoins obligés d'ajouter plus de foi à notre raison qu'à nos sens.

Descartes.

Nul ne doute qu'en France, pays connu pour son cartésianisme, nombreux sont les enseignants partageant les idées exprimées par Descartes dans cet extrait. Le cursus universitaire ne comporte pas de formation épistémologique pour les étudiants en physique ; ceux-ci n'ont donc pas l'occasion de remettre en cause les idées qu'ils élaborent implicitement pendant leurs études. Les processus d'enseignement, tels que nous les avons décrits, induisent inévitablement des croyances contestables sur la nature de la connaissance. La pensée de Descartes imprègne la culture française d'une idéologie valorisant la théorie à l'extrême, au détriment de la prise en compte de l'expérience et du monde réel, ce qui entraîne une considération excessive à l'égard de l'esprit dit abstrait. Il y a peu d'espoir pour que cela change car c'est bien au nom de l'aptitude à l'abstraction que se fait la sélection de nos décideurs¹³⁴.

Malheureusement il n'est pas possible de se fier au discours de n'importe quel physicien, même du plus haut niveau scientifique, pour se faire une opinion valable ; tous ne sont pas aptes à faire une analyse épistémologique pertinente de leur activité. Même les scientifiques les plus productifs ne savent pas forcément décrire les processus intellectuels qu'ils mettent en œuvre au cours de leurs propres découvertes. Ils s'intéressent surtout au fonctionnement de la nature et très peu à celui de leur propre pensée. De plus, des effets perturbateurs s'y opposent, il faut littéralement s'identifier à la matière pour faire des découvertes. Leon Lederman raconte à propos de la mise en évidence d'un nouvel effet se produisant dans un accélérateur de particules : « Devant mes yeux, je voyais les pions vomis sous l'impact des protons¹³⁵. » Il est tellement impliqué dans la recherche, qu'il relie directement sa perception des pions, parfaitement invisibles, aux effets qu'ils provoquent dans les accélérateurs. Pour sa part, Richard Feynman « se

¹³⁴ Aujourd'hui, en 2006, je ne changerais pas un iota à ce texte écrit dans les années 1990.

¹³⁵ L. Lederman, *op. cit.* P. 285. Les pions sont des constituants du noyau des atomes.

place mentalement à l'intérieur de l'électron, pour voir ce qu'il verrait à la vitesse de la lumière : les protons accourant vers lui – et ils seraient donc aplatis comme des crêpes sous l'effet de la relativité...¹³⁶ » Ainsi s'exerce l'imagination créatrice, elle confond les objets et leur représentation ; mais ce qui est productif en recherche peut cesser de l'être dans l'enseignement. D'autre part, il faut se méfier des physiciens dont le discours tend insensiblement vers la métaphysique. Cette dérive se repère facilement : elle se produit chaque fois qu'ils se demandent ce que « sont » les choses au lieu de se demander ce qu'elles « font ». Cette dérive se produit aussi lorsque qu'on prétend chercher « pourquoi » les événements se produisent au lieu de se demander « comment » ils se déroulent. Ces classifications sémantiques rudimentaires permettent de débarrasser le terrain de nombreux débats stériles. L'objectif de la physique est bien, comme Leon Lederman le dit très justement, de décrire : « Comment marche l'univers¹³⁷ » mais il n'est pas, en revanche, de chercher « The God Particle¹³⁸ » comme semble stipuler le titre de son livre. Il faut savoir relativiser de tels propos et les théologiens auraient tort de fonder leurs croyances sur des discours de ce type. Parallèlement les physiciens devraient être plus vigilants sur leur façon de s'exprimer. La physique ne dit rien sur la nature ontologique de la matière.

La philosophie telle qu'elle se pratique professionnellement ne fait pas directement partie de mes compétences ; je n'en connais ni les méthodes ni les objectifs. Je n'ai cependant aucune raison de m'interdire d'aborder des questions philosophiques relatives à mon travail, dès lors que certains épistémologues s'autorisent à parler de la démarche scientifique, même lorsqu'ils ne l'ont jamais pratiquée, d'autant plus que je ne reconnais pas le déroulement de ma pratique de recherche dans la plupart des descriptions qu'ils en font. Dès lors il devient intéressant de comprendre les raisons pour lesquelles nos points de vue divergent. Fondamentalement, de nombreux commentateurs n'attachent pas suffisamment d'importance à des activités qui sont cruciales dans les processus de création des connaissances, comme par exemple l'évolution des problématiques et la prise en compte des ordres de grandeurs mis en jeu dans les phénomènes que de nouvelles théories décrivent. Les différences proviennent sans doute aussi du fait que certaines des théories épistémologiques sont construites à partir d'informations indirectes et incomplètes ; de nombreuses activités telles que les discussions informelles entre chercheurs, l'exploration des idées stériles, les erreurs de raisonnement, etc. ne laissent pas de traces matérielles. Seuls ceux qui les ont vécues les connaissent. Malgré leur intérêt épistémologique, les pistes qui conduisent à des impasses sont généralement passées sous silence ; les chercheurs ne jugent pas utile d'exposer leurs errements qui peuvent les dévaloriser à leurs propres yeux ; ceux-ci échappent donc le plus

¹³⁶ J. Gleick, *Le génial professeur Feynman*. OdileJacob. 1994. p. 444.

¹³⁷ L. Lederman, *op. cit.* p. 34.

¹³⁸ « La particule de Dieu », L. Lederman, *op. cit.* p. 70.

souvent aux observateurs extérieurs, qu'ils soient enseignants, historiens, sociologues ou philosophes. Ces derniers se forment donc forcément des conceptions approximatives sur la construction de la connaissance. Il existe cependant de plus en plus de chercheurs qui se disent préoccupés par des soucis épistémologiques et ceci dans de nombreux domaines. C'est, depuis longtemps déjà, le cas de l'historien des sciences biologiques, Mirko D. Grmek qui juge, par exemple utile de décrire en détail les méandres du déroulement de la pensée de Claude Bernard¹³⁹, et c'est passionnant.

Nous n'avons pas l'intention de sortir du champ restreint dans lequel se posent les questions d'enseignement. Nous désirons seulement discuter les conceptions philosophiques sous-jacentes aux phénomènes cités dans les chapitres précédents. Ce n'est pas le lieu d'entreprendre une revue philosophique complète, d'autant que la confrontation des différentes thèses épistémologiques a déjà été faite, à plusieurs reprises, par des spécialistes. Ainsi, par exemple, répondant à ses détracteurs, le philosophe britannique Karl Popper¹⁴⁰ fait dans *Le réalisme et la science* une synthèse des théories existantes. On y trouvera, entre autres, les arguments utiles à la comparaison entre ces thèses et celle que nous allons développer maintenant. Les travaux de Thomas S. Khun¹⁴¹, et bien d'autres, fournissent aussi d'autres références. Nos idées résultent du modèle proposé ; elles se trouvent dans la filiation de celles exprimées par Marceau Felden¹⁴², Francis Halbwachs¹⁴³, Ian Hacking¹⁴⁴ et Jean Ullmo¹⁴⁵ entre autres.

Nos remarques seront limitées aux conceptions épistémologiques ou plus précisément « épistémiques¹⁴⁶ » qui ont des conséquences directes sur la pratique enseignante. Dans une deuxième partie nous examinerons comment les idées concernant le fonctionnement de la science se répercutent sur les stratégies de l'enseignement. Puis enfin nous verrons comment ces idées se répercutent sur les pensées exprimées par certains chercheurs des sciences humaines.

¹³⁹ M. D. Grmek, *Le legs de Claude Bernard*. Fayard 1997.

¹⁴⁰ K. Popper, *Le réalisme et la science*, Hermann, 1990.

¹⁴¹ T. Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*. 1962 Réédité Flammarion 1983.

¹⁴² M. Felden, *op. cit.*

¹⁴³ F. Halbwachs, *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Zeihls 1974.

¹⁴⁴ I. Hacking, *Concevoir et expérimenter* Christian Bourgois 1989.

¹⁴⁵ J. Ullmo, *La pensée scientifique moderne*. Flammarion 1969.

¹⁴⁶ Défini page 27 du chapitre 1.

QUELLES CONCEPTIONS ÉPISTÉMOLOGIQUES FONDENT LE DISCOURS SUR LA CONNAISSANCE ?

La vérité

Une rencontre s'est tenue à Treilles en 1996, sous l'égide de Georges Charpak, sur le thème : améliorer la formation des élèves en repensant, dès l'école maternelle, l'enseignement des sciences de la nature. Le livre intitulé *La main à la pâte. Les sciences à l'école primaire*¹⁴⁷, relate différentes interventions. On peut y lire à plusieurs reprises que la connaissance est « vraie », bien qu'il soit dit par ailleurs qu'elle est aussi « provisoire ». Pourtant la connaissance ne peut pas être à la fois vraie et incertaine ! Une telle contradiction ne semble gêner personne. Pourquoi les enseignants refusent-ils de voir que ces idées s'opposent ? Cette incohérence est tellement générale qu'elle doit avoir une raison profonde de se produire. Nous pouvons supposer que si la conviction concernant la véracité de la science est si forte, c'est qu'elle assure une fonction pour laquelle elle est irremplaçable.

La « vérité » est le seul argument imaginé pour justifier la validité de la connaissance lorsqu'on se prive de l'argument fonctionnel.

La recherche de la vérité n'est pas, comme nous l'avons montré, l'objectif des sciences expérimentales ; elles ne visent qu'à être prédictives. Or pour la majorité des enseignants, la légitimité de la connaissance se fonde sur une conviction implicite profonde : ce que la science établit est « vrai », ce qui va de pair avec la qualification de sciences « exactes » attribuée aux sciences physiques.

Certains philosophes s'accrochent à la notion de « vérité » jusqu'à en modifier le sens, comme le remarque Ian Hacking : « Pierce mettait l'accent sur l'importance d'une méthode rationnelle et d'une communauté de chercheurs qui, petit à petit, s'accorderaient sur une certaine croyance. La vérité étant le résultat final quel qu'il soit ! La vérité est ce qui correspond à nos besoins présents ou, tout du moins, à ceux d'entre eux qu'il nous est possible de satisfaire¹⁴⁸. » Les philosophes ont toutes les raisons de croire qu'ils peuvent adopter la « vérité » comme étant un concept authentique, puisque les scientifiques eux-mêmes emploient souvent ce mot. Ils ignorent probablement que les physiciens l'utilisent dans une acception toute relative. Une loi est considérée comme étant plus « proche de la vérité » ou plus « vraie » qu'une autre, lorsque qu'elle décrit mieux qu'une autre un ensemble plus vaste de situations. Ce n'est, la plupart du temps, qu'une façon rapide, donc approximative de s'exprimer. Même s'il leur arrive de le penser individuellement, aucun scientifique un tant soit peu épistémologue n'a jamais sérieusement cru

¹⁴⁷ G. Charpak, *La main à la pâte Les sciences à l'école primaire*, Flammarion. 1996. p.109.

¹⁴⁸ I. Hacking, *op. cit.* p. 112.

avoir établi une quelconque vérité et un auditeur extérieur aurait tort de prendre cette expression au pied de la lettre.

Il faut avoir affronté les difficultés inhérentes à l'établissement d'une correspondance acceptable entre les mesures expérimentales et les calculs théoriques, pour percevoir les limites de l'expression « vérité expérimentale » si fréquemment utilisée. De quelle vérité s'agit-il ? S'il était possible de tirer la vérité de l'expérience, la connaissance ne pourrait pas progresser. Or c'est bien parce que les résultats de mesures ne peuvent jamais être exactement identiques aux valeurs théoriques, qu'il existe une marge correspondant à des domaines qui peuvent réserver la surprise de voir apparaître de nouveaux phénomènes suscitant de nouvelles interrogations.

Marceau Felden fournit une autre raison fondamentale d'abandonner l'utilisation de la notion de « vérité » : il n'existe aucun critère rationnel pour décider de la véracité d'une théorie. Et pour cause, il ne peut pas y en avoir ! En conséquence, chaque utilisateur confère à ce mot une valeur sémantique qui lui est propre, variable selon le contexte, ce qui ne facilite pas la comparaison des points de vue. La discussion sur la vérité ne peut être claire que si le sens attribué à ce mot est fixé. C'est pourquoi j'adopte le sens le plus absolu : ce qui est vrai l'est au sens logique du terme, en toutes circonstances, autrement dit le vrai est le contraire de ce qui est faux. Dans cette stricte acception, la notion de vérité ne peut pas être opératoire pour caractériser les connaissances produites par une démarche expérimentale. Les débats à propos de la notion de « vérité » ne peuvent donc que traduire des confrontations d'opinions. « ...les concepts de «vérité» et de «réel» ne sont pas formellement définissables, leur signification est incertaine¹⁴⁹. » Marceau Felden poursuit le raisonnement : « Pas plus la logique que les mathématiques ne sont capables de nous fournir la moindre des «vérités» sur l'univers, même la plus élémentaire. Car si ces disciplines peuvent produire des raisonnements rigoureux à partir d'hypothèses posées a priori et vérifiant certaines conditions, on ne dispose cependant d'aucun moyen rationnel permettant d'apprécier leur «degré de vérité», en particulier celui des conclusions. Ce sont, en effet, des langages sans sémantique avec pour conséquence que le fait «d'être rigoureux» n'implique aucunement celui «d'être vrai», au sens des sciences exactes, dont la physique¹⁵⁰. » Ce discours est conforme à la modélisation proposée. Nous constatons le rôle crucial de la technique : la notion de vérité ne peut pas être érigée en concept du fait qu'il n'existe pas d'appareil pour la mesurer.

Pour terminer sur une note humoristique, citons Werner Heisenberg répétant une phrase citée par Niels Bohr : « Le contraire d'une affirmation juste est une affirmation fausse, mais le contraire d'une vérité profonde peut être une autre vérité profonde¹⁵¹. » Il est difficile de dire plus

¹⁴⁹ M. Felden, *Et si l'homme était seul dans l'univers*. Grasset. 1994. p. 206.

¹⁵⁰ M. Felden, *op.cit.* 1994. p. 207.

¹⁵¹ W. Heisenberg *op. cit.* p. 144.

clairement que la notion de «vérité » n'est pas fonctionnelle.

La «vérité » ne peut pas caractériser la connaissance scientifique.

Il serait plus prudent de ne pas utiliser des mots trompeurs afin d'éviter de provoquer des illusions sur la nature des connaissances scientifiques et il vaudrait mieux éliminer la notion de vérité, que la garder en lui attribuant un sens perversi. Cela est d'autant plus important qu'utiliser la vérité revient à se placer sur le même registre que celui des adeptes des pseudosciences ; la vérité constitue en effet la base des faux arguments constamment utilisés par les astrologues et autres mages qui veulent légitimer leur discours. Répétons-le, l'argument le plus convaincant à leur opposer est que le caractère scientifique de la connaissance n'est pas assuré par sa véracité mais par son efficacité prédictive ce qui condamne irrémédiablement les pseudosciences sans avoir à faire d'autres démonstrations. Les caractéristiques de la connaissance scientifique sont les suivantes :

La connaissance scientifique est prédictive, reproductible, indépendante de l'expérimentateur, du lieu où elle est établie et de la date à laquelle elle est produite dans un champ expérimental déterminé.

Ces quelques remarques sur la «vérité » ne visent pas à épuiser le sujet sur le plan philosophique, mais seulement à attirer l'attention sur quelques pièges que cette verbalisation recèle.

La réfutation

Question fondamentale en épistémologie : comment déterminer le caractère scientifique d'une connaissance ? Karl Popper¹⁵² propose de la caractériser par le fait qu'elle soit réfutable empiriquement. Ce n'est pas le lieu de refaire ici une exégèse complète de ce concept. Bornons-nous à exposer un point de vue en accord avec notre modèle. La réfutation fait partie des processus de validation. Elle intervient dans des circonstances qui correspondent à des étapes différentes de l'évolution de la théorie. Pendant la durée de son élaboration, une théorie est hypothétique ; un fait expérimental imprévu peut la contredire de façon certaine, ce qui entraîne son invalidation immédiate. Ce simple rejet peut avoir un statut de réfutation, mais il s'agit là d'une réfutation locale. Elle n'est d'ailleurs pas simple à établir : il faut s'assurer que la contradiction ne provient pas d'artefacts. Dans une étape ultérieure, un phénomène qui n'est pas décrit par la théorie ne permet pas, à lui seul, de la remettre globalement en cause, car la contradiction peut n'être qu'apparente. Le fait que des gouttelettes d'eau restent accrochées aux vitres au lieu de tomber ne réfute pas la théorie de Newton. Ce phénomène particulier peut se décrire dans un cadre théorique plus complet que celui faisant intervenir seulement la gravitation.

¹⁵² K. Popper, *Conjectures and Refutations : the Growth of Scientific Knowledge*, Routledge and Kegan Paul-London, 1965. Hermann. 1990.

Dans une étape ultérieure, lorsqu'une théorie permet d'interpréter un grand nombre d'événements différents, elle acquiert un statut qui progressivement cesse d'être hypothétique. Alors, la réfutation ne se rapporte plus à la théorie elle-même, mais à son champ d'application. À l'intérieur de ce champ, la prévision d'un certain nombre de phénomènes devient certaine. En revanche, la théorie est incapable de décrire certaines autres catégories de phénomènes ; elle est réfutée à l'extérieur de son champ de validité. Il devient alors possible de trouver des caractéristiques communes aux phénomènes qu'elle décrit. Ainsi la théorie newtonienne est certaine pour des objets macroscopiques qui se déplacent à une vitesse négligeable par rapport à celle de la lumière. Dans les autres cas, elle ne l'est plus. Ainsi a-t-elle été réfutée à l'échelle atomique pour des événements décrits par la mécanique quantique qui mettent en jeu des objets comportant peu d'atomes, ainsi que pour les événements concernant des objets ayant des vitesses proches de celle de la lumière, décrits par la relativité.

Pour réfuter une théorie ancienne, il faut qu'une nouvelle élaboration théorique permette d'interpréter les nouveaux phénomènes. C'est bien ce qu'exprime Leon Lederman : « Laquelle est correcte ? La théorie de Newton ou celle de Schrödinger ?, l'enveloppe s'il vous plaît. Et le vainqueur est ... Schrödinger ! » Il poursuit : « La physique de Newton est développée pour les grosses choses ; elle ne marche pas à l'intérieur de l'atome. La théorie de Schrödinger a été conçue pour les micros phénomènes. Et pourtant quand l'équation de Schrödinger¹⁵³ est appliquée aux situations macroscopiques, elle donne des résultats identiques à ceux de Newton¹⁵⁴. » Ainsi, à la frontière des domaines, les différentes théories doivent être cohérentes et donner les mêmes résultats. Notons enfin que le champ de validité d'une théorie n'est jamais délimité de façon définitive : de nouvelles connaissances peuvent toujours le remettre en cause. Ainsi, selon Ilya Prigogine, la théorie newtonienne ne concerne pas non plus les phénomènes « ayant une forme d'instabilité dynamique¹⁵⁵ » qui d'après lui, s'interprètent par la théorie du chaos.

Newton ne pouvait évidemment pas se douter des limites de sa théorie au moment où il l'a énoncée. Il a fallu attendre plus de deux siècles pour que de nouvelles questions se posent et qu'enfin Einstein crée la théorie de la relativité pour y répondre.

De nouveaux phénomènes ne peuvent apparaître que si les techniques ont suffisamment évolué pour les mettre en évidence à l'aide de mesures sensibles à des ordres de grandeurs beaucoup plus faibles que ceux des phénomènes qui interviennent dans l'ancienne théorie.

Tenir compte de la relativité dans le domaine d'application des lois newtoniennes n'a pas de sens. Pour en avoir une idée, calculons la valeur des perturbations introduites par la théorie de la

¹⁵³ L'équation de Schrödinger fait partie de la mécanique quantique.

¹⁵⁴ L. Lederman, *op. cit.* p. 194.

¹⁵⁵ I. Prigogine, *La fin des certitudes*. Odile Jacob. 1996. P. 43.

relativité pour des mouvements d'objets dont la vitesse est très inférieure à la vitesse de la lumière. Prenons, par exemple, une règle de un mètre placée dans un avion supersonique dont la vitesse est environ de 300 mètres par seconde. Sa longueur¹⁵⁶ serait modifiée de 0,5 micron, soit environ le dix millième de l'épaisseur d'un cheveu ; autant dire que cela n'est pas perceptible par nos sens dans le monde environnant.

Si les conditions permettant de délimiter le champ d'application des anciennes théories ne sont pas perçues, les interprétations de la réfutation peuvent devenir particulièrement fausses.

Comment admettre en effet que les principes qui fondent les théories (comme ceux de la thermodynamique) qu'aucune expérience n'a jamais mis en défaut, et qui n'ont donc jamais été réfutés, ne soient pas scientifiques ? La réfutabilité n'est donc pas un critère parfaitement discriminatoire. D'autre part, il existe le danger qu'elle soit mal comprise par ceux qui oublient le rôle de l'expérience dans la réfutation ; il serait alors possible d'attribuer un caractère scientifique à des assertions visiblement fausses parce qu'elles pourraient être facilement contredites !

La réfutabilité est donc susceptible d'entraîner des dérives d'interprétations à cause de la méconnaissance du rôle des ordres de grandeur et du type d'information que l'expérience peut fournir.

Une théorie est totalement établie lorsqu'elle regroupe dans un système de prévision commun un nombre suffisant de phénomènes.

De nouveaux phénomènes ne peuvent pas remettre en cause une théorie bien établie.

L'émergence de phénomènes liés à l'évolution des performances techniques, fait évoluer les questionnements sur de nouveaux domaines d'investigation qui génèrent de nouvelles théories.

Alan F. Chalmers¹⁵⁷ a fait en 1987 une revue des développements philosophiques existants. Il en ressort que :

Les différentes théories épistémologiques existantes n'accordent pas l'importance requise au rôle assuré par les questionnements et par les ordres de grandeurs dans la création des connaissances.

L'enseignement universitaire étant toujours le même, le contexte n'a pas suffisamment évolué entre-temps pour que les conceptions des épistémologues aient radicalement changé. Il existe donc probablement, comme annoncé en début de ce chapitre, des origines communes à toutes les dérives d'interprétations du concept de réfutation. L'exemple suivant, pris dans un journal de

¹⁵⁶ Sa longueur vue de la Terre ; il s'agit là encore d'une expérience par la pensée !

¹⁵⁷ A. F. Chalmers, *Qu'est-ce que la science ? Récents développements en philosophie des sciences* : Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend. Edition de la découverte. 1987.

vulgarisation, en illustre les effets de façon caricaturale. L'auteur, professeur de philosophie dans une grande école, voulait expliquer le concept de réfutation en l'illustrant de la manière suivante : « Si la comète de Halley revient à la date prévue, la conjecture newtonienne n'est pas réfutée. Sinon elle l'est¹⁵⁸. » La date du passage de la comète de Halley est-elle susceptible de réfuter la théorie newtonienne qui a cessé depuis longtemps d'être une simple conjecture ? Certainement pas ; elle énonce des lois qui prévoient parfaitement le mouvement des objets célestes. La position des astres est connue avec une précision presque aussi grande que l'on veut, à condition de prendre un nombre suffisant d'objets environnants dans les calculs¹⁵⁹. La théorie newtonienne étant dûment établie, la date du passage de la comète de Halley est un événement qui appartient à son champ de validité, elle n'est donc pas susceptible de réfuter la théorie. Le prochain passage de la comète de Halley aura bien lieu à la date prévue... à moins qu'elle ne fasse entre temps une rencontre destructrice intempestive.

Revenons aux questions d'enseignement : Les lois ne peuvent pas être à la fois réfutables et vérifiables comme le laissent si souvent entendre les objectifs assignés aux travaux pratiques.

La justification des lois ne peut être obtenue autrement que par l'énoncé de leur caractère prédictif. C'est le seul moyen de convaincre les étudiants sans tricher.

Les révolutions théoriques

Nous venons de voir que la théorie newtonienne n'a pas été réfutée dans son champ d'application. Pourquoi parle-t-on alors si fréquemment de révolutions théoriques lorsqu'on pense à la relativité ? C'est, encore une fois, parce que l'on ignore le rôle crucial que jouent les ordres de grandeur. Les enseignants, les philosophes et les historiens, ne peuvent pas en tenir compte lorsque leur culture scientifique se limite à celle acquise au cours d'études universitaires dogmatiques¹⁶⁰.

S'il n'y a pas de révolution théorique, il existe en revanche une révolution dans la façon de concevoir les grandeurs physiques. Ainsi, la théorie de la relativité a effectivement changé la conception que nous avons des propriétés de l'espace et du temps ; ce ne sont plus, comme on le pensait précédemment, des entités indépendantes : l'espace dépend du temps et inversement, ce

¹⁵⁸ Il s'agit d'un article paru dans un journal dont je ne donne pas la référence ; l'auteur ne doit pas être critiqué personnellement pour une idée largement partagée.

¹⁵⁹ Évidemment cette assertion a aussi ses limites. Ainsi une erreur initiale sur la position d'un astre est multipliée par dix au bout de 10 millions d'années ; il est donc impossible de faire des prévisions précises au-delà de quelques 100 millions d'années !

¹⁶⁰ Rares sont les professeurs de physique qui les introduisent systématiquement dans leur cours. Un des moyens de faire évoluer l'enseignement est que les étudiants exigent de les connaître.

qui est inconcevable dans la vie courante. De même, dans le domaine microscopique, la mécanique quantique a remis en cause la notion de trajectoire. Nombreux sont les physiciens qui prétendent que ces connaissances ont changé leur « vision du monde ». Certains veulent enseigner la relativité à leurs étudiants trop tôt, c'est à dire avant que les concepts fondamentaux soient assimilés. Le plus souvent ils n'insistent pas suffisamment sur la valeur des échelles que le changement théorique implique. Séduits par toutes ces nouveautés, les étudiants concernés déduisent qu'aucune connaissance n'est jamais définitivement acquise. Or, c'est faux.

Si le « jeu de la science » est sans fin, ce n'est pas parce que toutes les connaissances sont perpétuellement contestées, c'est uniquement parce que le questionnement ne se termine jamais.

Au début du siècle, des débats, de nature aussi bien philosophique que scientifique, ont agité la communauté des physiciens lors de l'émergence des nouvelles théories. Depuis, la grande majorité des scientifiques a cessé d'être troublée. Ils se sont familiarisés avec les paradoxes que générerait la mécanique quantique¹⁶¹. Actuellement, plus personne n'est bouleversé par le fait que l'électron ne se trouve pas exactement sur la trajectoire qu'il devrait avoir selon le modèle planaire de Bohr. Chacun admet sans réticence qu'il n'a qu'une forte probabilité de s'y trouver. Rares sont ceux qui partagent encore les craintes d'Einstein au sujet de la mécanique quantique ; les théories sur la probabilité permettent de comprendre comment elle fonctionne sans qu'il soit nécessaire de penser que « Dieu joue aux dés ». La compréhension du fonctionnement des modélisations a quasiment éliminé les tourments métaphysiques qui ont agité la communauté scientifique par le passé. Il subsiste quelques débats qui trouvent leur origine dans l'inadéquation des questions formulées sous une forme anthropomorphique ; quel est le « comportement » des particules élémentaires ? Involontairement le mot « comportement » affuble l'électron de qualités humaines, mais comment dire autrement ? Certaines difficultés d'interprétation subsistent toujours aux changeantes frontières de la connaissance ; la tentation est alors grande de confondre les questions physiques, philosophiques et métaphysiques.

Ceux qui imaginent l'existence de révolutions au sens de bouleversements complets, prennent probablement au pied de la lettre des expressions utilisées par des scientifiques eux-mêmes lorsque leurs préoccupations ne concernent pas les conceptions épistémologiques sous-jacentes à leur discours. La méconnaissance des caractéristiques de la démarche expérimentale n'est pas sans conséquences sur les conceptions que se forgent certains chercheurs des sciences humaines. Par exemple nous trouvons chez Jean-Pierre Pourtois et Huguette Desmet des propos qui laissent

¹⁶¹ Voir l'article de S. Haroche, J.-M. Raimond, M. Brune, « *Le chat de Schrödinger se prête à l'expérience.* »

La Recherche 301 septembre 1997. p. 50. Voir aussi le livre de l'américain R. G. Newton, *Physics*. Princeton University Press. 2000.

entendre que la connaissance produite a toujours un caractère provisoire : « La méthode scientifique se différencie des autres méthodes de connaissance [...] par le fait, [...], qu'elle est capable de s'auto-corriger, c'est-à-dire qu'elle est apte à remettre systématiquement en question tout ce qu'elle a proposé. Ainsi, le jeu de la science est un principe sans fin. Pour Popper, les théories qui rassemblent et organisent les énoncés concernant des faits en un réseau cohérent sont donc des ensembles en continuel changement¹⁶² » disent-ils. Chaque assertion de cette citation serait exacte si elle ne concernait que la phase initiale de la recherche, celle pendant laquelle les théories sont conjecturales, mais si toutes les théories étaient, tout le temps, totalement remises en cause, l'accumulation de connaissances serait impossible.

Finalement il vaut mieux considérer que les descriptions newtoniennes ne sont pas périmées si nous désirons qu'elles soient intelligibles pour les étudiants¹⁶³. Elles gardent toute leur validité pour décrire les phénomènes du monde familier.

L'abstraction

L'abstraction est particulièrement valorisée dans notre système éducatif. L'élève supposé être doté d'un esprit abstrait sera dirigé vers un enseignement général, tandis que celui qui est pourvu d'un esprit concret sera orienté vers l'enseignement technique. Or l'abstraction ne trouve sa pleine efficacité qu'associée au travail concret ; d'autre part, il est difficile de concevoir une action purement concrète qui ne serait pas réfléchie. Le modèle décrit l'abstraction comme associée aux opérations de pensée qui interviennent dans l'établissement de la liaison qui va du monde expérimental vers le monde théorique ; elle doit donc prendre en compte le contenu des deux mondes. **De plus, le travail d'abstraction qui se produit à partir du monde expérimental vers le monde théorique est complémentaire des opérations de pensées qui s'effectuent en sens inverse, en partant du monde théorique pour en examiner les conséquences dans le monde expérimental.**

La pensée abstraite et l'activité concrète sont indissociables.

La dichotomie abstrait - concret conduit à des impasses. Les définitions, dont l'enseignement fait un grand usage, illustrent parfaitement les méfaits de l'abstraction pure. Nous avons constaté au chapitre précédent que, telles qu'elles sont généralement formulées, les définitions et les lois fondamentales de la mécanique ont pour étonnante propriété de ne pas être opératoires. Il ne s'agit pas de circonstances exceptionnelles mais d'un phénomène qui a des raisons profondes de se produire. Pour comprendre ce qui est en jeu dans l'activité consistant à définir abstraitement, rien de mieux que de se dépayser en choisissant un exemple hors des champs d'investigation

¹⁶² J.P. Pourtois & H. Desmet, *Épistémologie et instrumentation en sciences humaines*, Madraga, 1997, p. 14.

¹⁶³ Si tel n'était pas le cas, pourquoi continuerions-nous à les enseigner ?

familiers ; prenons le concept de membrane décrit par Marceau Felden. Le mot membrane désigne à la fois la matière qui entoure une cellule et le concept associé. Ce sont les fonctions spécifiques aux membranes qui les distinguent des autres objets biologiques : « Le quantum élémentaire cellulaire n'a de réalité que s'il représente une unité fonctionnelle parfaitement individualisée par rapport à son environnement. C'est ce qui explique l'importance fondamentale du concept de membrane, bien que celle-ci puisse se présenter sous plusieurs formes et aspects en fonction de la nature de la cellule et des propriétés de son milieu.¹⁶⁴ » Un discours analogue s'applique aussi au mot atome qui désigne à la fois un objet et le concept associé. S'appliquant au même objet, les différentes modélisations de l'atome sembleraient contradictoires si chacune n'était pas définie par sa fonction. Ce n'est pas par hasard que l'écrivain Henri Miller se plaint de l'inefficacité des définitions à propos des mots du vocabulaire. « Je croyais tout ce que disait le dictionnaire, exactement comme on croit en la Bible. Je pensais, comme tout le monde, qu'en obtenant une définition, on a le sens ou dirais-je, la «vérité» d'un mot. Mais ce jour-là où, en passant de dérivation à dérivation, je tombai sur les plus stupéfiants changements de sens, sur des contradictions flagrantes, tout l'échafaudage de la lexicographie commença à s'effondrer devant moi¹⁶⁵. » Il n'y a rien d'étonnant à ce que les remarques concernant les distorsions de sens associées aux définitions des mots restent applicables aux définitions des concepts scientifiques ; les mots étant aussi des concepts, ils sont aussi peu définissables les uns que les autres. Certains dictionnaires tiennent compte de ces particularités lorsqu'ils décrivent le sens des mots par l'usage qu'en font les auteurs. « Car définir c'est, en fin de compte, une affaire de référence et de renvoi à des références¹⁶⁶. » Marceau Felden décrit « l'autoréférentialité » comme un « discours qui se réfère à lui-même¹⁶⁷. » C'est en fin de compte pour cette raison que les définitions abstraites ne sont pas fonctionnelles ; il est particulièrement remarquable que, dans des domaines différents, Henri Miller et Marceau Felden trouvent des arguments similaires pour l'expliquer. Il est donc ontologiquement vain de tenter de définir un concept abstraitement. Le caractère « autoréférentiel » des définitions abstraites devrait nous inciter à reconsidérer leur rôle dans l'enseignement. Les modifier provoquerait des progrès considérables. La situation est moins dramatique qu'il y paraît ; des solutions existent puisqu'un concept peut être défini à partir de ses caractéristiques et des fonctions qu'il assure. Nous avons montré au deuxième chapitre comment transformer la définition abstraite de l'énergie potentielle en définition opératoire. Nous avons défini les questions pertinentes de la même manière.

¹⁶⁴ M. Felden, *op. cit.* 1994 p. 127.

¹⁶⁵ H. Miller, *Les livres de ma vie*, Gallimard, 1957. Réédité en 1994, p. 62.

¹⁶⁶ M. Felden *Op. cit.* p. 63.

¹⁶⁷ M. Felden *Op. cit.* p. 9.

Un concept devient opératoire lorsqu'il est décrit par ses caractéristiques et sa fonction.

L'échec des définitions abstraites est sûrement ressenti, plus ou moins confusément, par les enseignants, même s'ils n'en perçoivent pas toujours clairement les raisons profondes. Ainsi, pour remédier aux méfaits de l'abstraction, certains croient-ils que les concepts et les lois peuvent être définis «concrètement». C'est pour cela qu'ils effectuent des expériences qui, comme nous l'avons vu, visent à mettre des concepts, tels que les forces électromotrices, «en évidence.» Or la pratique enseignante qui consiste à justifier les grandeurs physiques en laissant croire qu'elles traduisent directement le monde expérimental¹⁶⁸ a sans doute, elle aussi, des fondements philosophiques. D'après Ernst Cassirer : «...aux concepts portant sur la nature, il n'incombe et ne peut incomber d'autres tâches que celles consistant à reproduire les faits donnés à la perception et à restituer leur contenu sous une forme abrégée. [...] L'observation est alors ce qui seul fonde la vérité et la certitude du jugement ; la pensée n'a plus la moindre liberté créatrice et le concept va s'aligner, en tout point, sur le contenu matériel qui lui prescrit d'emblée ses modalités et son style¹⁶⁹. » Si le concept traduisait directement le monde expérimental sur lequel il se calquerait, il deviendrait apparemment légitime de concevoir sa validation à partir de l'expérience, mais si tel était le cas, il serait difficile de concevoir comment se réaliserait «l'alignement du concept sur le contenu matériel» auquel Ernst Cassirer fait référence dans cet extrait.

CONSÉQUENCES POUR L'ENSEIGNEMENT

En recherche, à chaque instant, le but à atteindre détermine la marche à suivre. En conséquence, il n'existe aucune stratégie, ni méthode, ni activité privilégiée pour parvenir à élaborer une connaissance prédictive ; seul compte le résultat obtenu. Comment procède-t-on avec les étudiants ? L'examen de l'histoire de l'enseignement au cours du siècle dernier permet de constater que deux options principales alternent avec une régularité quasi pendulaire. La première consiste à affirmer les lois, puis à tenter de les justifier en montrant qu'elles sont vérifiées par l'expérience. Cette stratégie génère le caractère dogmatique de l'enseignement. La seconde, qualifiée d'empirique, prétend induire les lois à partir de l'expérience. Ainsi les enseignants opposent-ils deux méthodes que nous allons schématiquement qualifier de «dogmatique» et d'«empirique».

L'alternance des choix stratégiques

Les choix pédagogiques se réfèrent plus ou moins explicitement aux théories épistémologiques

¹⁶⁸ Nous en avons donné des exemples au chapitre précédent.

¹⁶⁹ Le fragment cité hors contexte ne vise pas à remettre en cause le discours global d'un philosophe dont l'œuvre est importante. E. Cassirer, *Substance et fonction*, Les éditions de minuit, 1977, p. 138.

susceptibles de les fonder. Dans le monde scolaire, les débats qui utilisent des concepts philosophiques ne peuvent évidemment pas prendre en compte toutes les subtilités intervenant dans leurs constructions initiales. Le sens d'un concept, forgé dans un contexte, ne peut être que modifié lorsqu'il est transféré dans de nouveaux domaines. Les dérives sont d'autant plus accentuées que les problématiques traitées dans les deux champs disciplinaires sont différentes.

Comme nous l'avons souligné au premier chapitre :

Dans l'élaboration des réponses à une question donnée, les démarches inductives et déductives alternent et se complètent, aucune n'est décisive, aucune, prise séparément, ne peut être convaincante¹⁷⁰.

En ne laissant place qu'à un seul des deux termes de l'alternative, dogmatique ou empirique, le débat pédagogique ne peut pas progresser. L'histoire des programmes révèle que les choix sont cycliques ; régulièrement, l'échec de l'une des deux stratégies entraîne le choix de l'autre. Or, dans ce domaine, comme dans bien d'autres, le contraire d'une erreur est encore une erreur !

Si nous adoptons le point de vue de l'étudiant, la stratégie dogmatique entraîne au moins deux sortes de difficultés. Tout d'abord la connaissance lui est affirmée sans qu'il sache au nom de quoi, puis elle est justifiée par une vérification expérimentale qui peut ne pas le convaincre pour toutes les raisons énoncées dans les chapitres précédents. Les difficultés ne sont pas résolues par la stratégie empirique. Cela tient au fait qu'aucun étudiant ne parviendrait à induire des lois à partir de l'expérience si elles n'étaient pas connues à l'avance. Nous avons vu combien il est illusoire d'observer une loi directement comme si elle émergeait de l'expérience, telle une naïade hors de l'eau. Il est impossible de « constater » une loi ne serait-ce qu'à cause de la dispersion des valeurs mesurées. D'autre part cette procédure accrédite implicitement l'idée fausse selon laquelle les lois établies ont un champ de validité illimité.

Beaucoup plus difficile à mettre en œuvre, les méthodes empiriques durent généralement beaucoup moins longtemps que les dogmatiques.

Quant à l'utilisation d'une démarche dite « hypothético-déductive », très à la mode chez les didacticiens, elle correspond à une conception tellement réductrice de l'activité scientifique qu'elle ne peut pas, elle non plus, être convaincante ; en effet, elle ignore l'induction. Comme le remarque Ian Hacking, « la science n'est pas hypothético-déductive. Certes, elle émet des hypothèses, elle procède bien par déduction, elle vérifie effectivement les conjectures, mais aucune de ces activités ne détermine le mouvement de la théorie¹⁷¹. »

La problématique de l'enseignement n'a pas évolué pendant des décennies. L'alternance systématique des méthodes dogmatiques et empiriques est le symptôme de l'inefficacité du débat

¹⁷⁰ Voir la figure 2 du premier chapitre.

¹⁷¹ I. Hacking *op. cit.* p. 239.

stratégique exprimé en des termes qui se résument à une question pratique triviale que se posent les enseignants de façon récurrente : faut-il faire les travaux pratiques avant le cours ou après ? Les faits permettent de comprendre qu'il ne faut pas opposer ce qui, en réalité, se complète. Or des propositions visant à rapprocher l'enseignement de la pratique de la démarche expérimentale effective ont déjà été faites par le passé ; elles ont été vouées à l'échec et ont systématiquement été rejetées à brève échéance.

Le rejet de l'enseignement simultané des deux composantes inductives et déductives de la démarche expérimentale constitue un nouveau phénomène dont la régularité est frappante. Il résulte probablement du fait que la connaissance, enseignée comme une vérité, ne semble plus nécessiter d'efforts particuliers pour être établie. Il reste à comprendre pourquoi le retour aux idéologies dogmatiques dure plus longtemps que la période où l'empirisme l'emporte. Il est possible que les raisonnements déductifs, les seuls à obéir aux règles de la logique, rassurent les enseignants. L'évaluation d'arguments divers que nécessite l'induction est un exercice beaucoup plus périlleux. De plus les expériences sont difficiles à mettre en œuvre, et elles obéissent rarement à la volonté de l'expérimentateur. Toutes ces raisons expliquent pourquoi l'enseignement d'une démarche expérimentale n'a jamais été mis en pratique de façon durable. Connaître la nature des obstacles auxquels il se heurte constitue sûrement une des conditions nécessaires pour les surmonter. Une description détaillée de ce qu'il est possible de faire pratiquement sera l'objet du prochain chapitre.

Complémentarité des points de vue dogmatiques et empiriques

Il ne faudrait pas conclure hâtivement que le discours dogmatique est condamnable, il faut seulement en spécifier le rôle. Il est particulièrement fécond lorsqu'il vise à satisfaire des objectifs théoriques et qu'il fournit les outils nécessaires à la résolution des problèmes expérimentaux. Une formulation dogmatique est une façon théorique d'envisager un problème, une formulation empirique correspond à des questions qui se posent lorsqu'une situation est examinée du point de vue de l'expérimentateur. Un exemple permettra de mieux comparer les fonctions, les limites et les avantages respectifs des deux points de vue.

Examinons une situation empruntée à Charles Ruhla¹⁷² : la détermination des points d'impact sur le sol des obus tirés par un canon. Du point de vue théorique, la détermination de la position des chocs dépend de la vitesse et de la direction de l'obus à la sortie du canon ; leurs valeurs sont fixées arbitrairement et constituent les données du problème. Le point d'impact est déterminé par un calcul. Comment s'effectue le passage d'un problème théorique à un problème expérimental ? Les questions que se posent des artilleurs sur le terrain sont de nature différente de celles des

¹⁷² Ch. Ruhla, *La physique du hasard*. Hachette. 1989. p.14.

théoriciens, des facteurs supplémentaires à ceux qui sont pris en compte de façon dogmatique dans le calcul théorique risquent de modifier la position de l'impact. La trajectoire effective dépend de la vitesse et de la direction initiale réelle et non supposée de l'obus. Elle dépend aussi de facteurs qui ne peuvent pas être pris en compte dans la modélisation, comme par exemple l'influence du vent qui perturbe la trajectoire de l'obus. D'une part parce qu'il faudrait l'introduire dans la description théorique de la trajectoire, d'autre part parce qu'étant changeantes l'intensité et la direction du vent sont difficiles à mesurer et ne peuvent pas être maîtrisées. Par conséquent les données expérimentales dont les artilleurs disposent sur le terrain ne leur permettront pas de connaître avec certitude la trajectoire des obus. En revanche, elles leur permettront de délimiter la zone approximative où l'impact de l'obus sur le sol se situe. La confrontation des deux approches montre que la résolution du problème des artilleurs sur le terrain n'est possible que si la solution du problème posé de façon dogmatique est connue.

De nombreuses situations permettent d'avertir les étudiants de la possibilité d'un jeu complémentaire entre les problèmes traités d'une façon ou de l'autre. L'enseignement théorique retrouverait sa place et son utilité si, à chaque fois qu'il est possible, nous reprenions les problèmes d'un point de vue expérimental en tenant compte de sa complexité. Dans l'annexe, le texte sur l'expérience de Millikan montre comment rédiger un texte d'exercice en adoptant alternativement ces deux approches.

POINT DE VUE « FONCTIONNALISTE »

Le mot qui synthétise le mieux le cadre théorique proposé est «fonctionnaliste ».

Il exprime un point de vue où les démarches dogmatiques et empiriques ne s'opposent pas, mais sont indissociables et complémentaires ; elles servent un objectif commun, la prévision de l'évolution des situations.

Dès le début du siècle, Pierre Duhem s'exprimait en ces termes ; « Ainsi, la théorie physique ne nous donne jamais l'explication des lois expérimentales ; jamais elle ne nous découvre les réalités qui se cachent derrière les apparences sensibles ; mais plus elle se perfectionne, plus nous pressentons que l'ordre logique dans lequel elle range les lois expérimentales est le reflet d'un ordre ontologique ; plus nous soupçonnons que les rapports qu'elle établit entre les données d'observation correspondent à des rapports entre les choses...¹⁷³ » Répétons-le, l'objectif n'est pas de comprendre la nature profonde des lois et cela n'a pas de sens de rechercher l'essence des concepts que nous créons.

Nombreux sont ceux qui pensent que le fait d'être "mathématisables" est une caractéristique essentielle des sciences. Or une expression mathématique, traduisant une relation entre grandeurs

¹⁷³ P. Duhem , *La théorie physique*. Vrin 1981 réédité en 1993. p. 35.

physiques, ne fait que faciliter les prévisions en permettant d'échapper aux ambiguïtés introduites par le langage verbal. Cela ne suffit pas pour dire qu'une connaissance est définie par le seul fait que les lois peuvent être traduites par des relations mathématiques. Toute la biologie l'atteste ; bien que les équations y jouent un rôle minime, c'est une science expérimentale prédictive à part entière¹⁷⁴. Prenons un exemple médical cité par Mirko D. Grmek : « La périodicité de certaines fièvres est bien notée [...], tout comme la régularité dans le nombre de jours qui séparent l'apparition de certains symptômes du début de la maladie. Cela donnait au médecin hippocratique le pouvoir de décrire les crises¹⁷⁵. » Depuis, comme l'explique Jacques Ruffié, la médecine est parfois devenue prédictive¹⁷⁶.

Une relation mathématique entre grandeurs ne suffit pas à conférer un caractère prédictif, donc scientifique, au domaine concerné. Ainsi, est-il presque toujours possible de trouver des relations de type statistique entre des paramètres, même s'ils ne sont pas pertinents. Elles n'apportent pas de connaissance, contrairement à ce que leurs créateurs peuvent croire ou veulent faire croire. C'est toujours quand il pleut que les essuie-glaces s'arrêtent de fonctionner ! Pourtant l'usure, plus que la pluie, est sans nul doute responsable de la panne. Pour acquérir un statut scientifique, la prédiction ne peut pas résulter de simples cooccurrences, mais elle doit être justifiée par tout un ensemble de relations.

Une connaissance prédictive est nécessairement reproductible. Curieusement, la réciproque n'est pas forcément vraie. Il suffit, en effet, d'établir des codes stricts de lecture sur un ensemble de documents (corpus) pour que l'information tirée de leur analyse soit reproductible ; cela n'en assure pas pour autant la « prédictivité ».

Les sciences humaines peuvent-elles produire, elles aussi, des connaissances prédictives ? Jean Pierre Pourtois et Huguette Desmet semblent en douter : « A la méthode expérimentale stricte, on peut reprocher sa volonté de simplifier et de fragmenter pour mieux maîtriser et d'ignorer la complexité et la variabilité des phénomènes, si bien que certains s'interrogent sur la valeur des résultats obtenus par cette méthode. D'autre part en sciences humaines, la quantité de variables est telle qu'il est pratiquement impossible de les contrôler toutes car cela entraînerait des combinaisons infinies et des observations en nombre considérable¹⁷⁷. » Ils énoncent probablement des opinions largement partagées. Pourtant ce n'est pas le nombre de variables à maîtriser qui rend l'étude difficile ; il n'y aura jamais autant de variables dans une situation où interviennent

¹⁷⁴ Qui progresse à pas de géant sans formalisme mathématique.

¹⁷⁵ M. D. Grmek, *La première révolution biologique*, Payot, 1990, p. 28.

¹⁷⁶ J. Ruffié, *Naissance de la médecine prédictive*. Odile Jacob. 1993.

¹⁷⁷ J.-P. Pourtois et H. Desmet, *op. cit.* p. 217.

des êtres humains que dans un mètre cube d'air qui comporte des molécules ayant chacune une position et une vitesse, ce qui fait au total environ 10^{26} inconnues¹⁷⁸.

C'est la détermination des grandeurs pertinentes qui compte, non pas pour décrire de façon réaliste et exhaustive une situation, mais pour répondre de façon appropriée à une question précise la concernant.

Ainsi, pour reprendre l'exemple précédent, trois grandeurs suffisent pour décrire l'état de l'air ; son volume sa pression et sa température. L'objectif direct de la démarche expérimentale ne peut pas être de rendre compte de la complexité du monde... tout simplement parce que c'est strictement impossible.

La « prédictivité » constitue un objectif explicite pour certaines recherches même en sciences humaines. La transposition directe des méthodes pratiquées en physique est donc possible. Il suffit de s'attacher à définir un questionnement plutôt qu'un objet d'étude. Les réductions de situations assurent une fonction claire : elles rendent possible la détermination et le choix des paramètres pertinents. Les recherches relatées par Bénédicte de Boysson-Bardie, par exemple, y parviennent parfaitement. Elles décrivent l'élaboration du langage chez les bébés à partir de leur naissance. Chaque chapitre de *Comment la parole vient aux enfants* présente une question, spécifie les indicateurs utilisés pour y répondre et expose les résultats obtenus. Ils sont prédictifs ; tous les enfants évoluent en suivant les mêmes étapes. Nos démarches coïncident parfaitement : « Nous ne doutions pas que les enfants allaient répondre à toutes ces questions : il ne restait plus qu'à formuler celles-ci de façon à obtenir des réponses¹⁷⁹ ! » Or ils ne parlent pas encore, les bébés interrogés... Et les chercheurs parviennent pourtant à obtenir des réponses grâce à des moyens techniques appropriés ; ils ont remarqué que les bébés fixent leur regard plus longtemps sur les objets qui les intéressent et qu'ils se mettent alors à sucer leur tétine avec une vigueur accrue. Le temps de fixation du regard ou l'intensité de la succion, sont les grandeurs mesurables qui fournissent des indications suffisamment objectives pour créer une connaissance prédictive.

Aussi paradoxal que cela puisse paraître, l'histoire peut, elle aussi, devenir une science prédictive, à condition que son objectif ne se limite pas à faire un récit réaliste du passé. Selon le point de vue adopté par le chercheur, selon son idéologie personnelle, selon les documents consultés, la « vision » de la réalité peut varier. En revanche, s'il s'agit de répondre à des questions que nous nous posons sur le passé, alors les réponses peuvent devenir indépendantes du chercheur et de l'ensemble des documents pris en compte. Les réponses peuvent alors devenir prédictives, et être

¹⁷⁸ C'est un ordre de grandeur qui dépasse l'imagination. Essayons quand même d'en donner une idée ; 10^{26} est à peu près le nombre d'atomes d'hydrogène qu'il faudrait aligner pour couvrir la distance parcourue par la lumière pendant une année.

¹⁷⁹ B. De Boysson-Bardies, *Comment la parole vient aux enfants*, Odile Jacob. 1996. p. 127.

confirmées par des faits découverts ultérieurement. Il ne s'agit pas d'une utopie : il existe effectivement des recherches historiques prédictives. C'est le cas de récentes recherches archéologiques, c'est le cas de la linguistique historique. Dans *L'origine des langues*, Merrit Ruhlen¹⁸⁰ développe toute une argumentation qui établit de façon convaincante¹⁸¹ l'existence d'une «langue mère» de toutes les langues. Il en déduit la description des mouvements de populations qui ont eu lieu il y a plus de 5000 ans. La linguistique historique présente bien le caractère prédictif d'une science expérimentale, et qui plus est, à un double titre : elle prédit l'évolution des langues et des populations à partir d'une origine commune, et elle prédit (ou corrobore suivant les cas) les résultats des investigations faites par d'autres sciences telles que la génétique et l'archéologie. « Au cours des dernières décennies, plusieurs équipes de généticiens ont découvert une corrélation significative entre les classifications linguistiques et biologiques dans de nombreuses régions du monde¹⁸². »

Répondre à des questions afin de créer une connaissance prédictive, est un objectif difficile à atteindre mais certainement plus facile à accomplir que la recherche d'une vérité sur une réalité insaisissable. Quels que soient les domaines, et certains sont cruciaux, formuler les questions utiles est essentiel. Le nombre de meurtres perpétrés par le nazisme et le bolchevisme n'en fait pas nécessairement des régimes comparables, et les comptabilités macabres n'ont jamais empêché le renouvellement des exactions. Les questions qui se posent et que nous aimerions voir résolues sont plutôt : comment éviter que de nouveaux régimes perpètrent des meurtres de masse ? Quels moyens se donner pour les contrecarrer ? Nous sommes bien obligés de constater que satisfaire au devoir de mémoire ne suffit pas. Peut-être faudrait-il chercher comment l'idéologie, le despotisme et la cupidité se combinent en utilisant la haine et la peur pour générer des processus qui conduisent des hommes ordinaires à en massacrer d'autres. Comment se fait-il, d'autre part, que certains préfèrent risquer leur vie plutôt que participer aux tueries ? Existe-t-il des caractères communs aux événements qui se sont produits au Cambodge et au Ruanda ? Diffèrent-ils, et en quoi, de ceux qui se sont produits en Algérie et en Bosnie ? Il serait certainement plus profitable que les recherches portent sur les mécanismes qui conduisent des hommes à commettre des crimes contre l'humanité plutôt que sur la description de la façon dont ils les ont commis. Les descriptions factuelles, aussi fidèles qu'elles puissent être, ne permettent pas, à elles seules, de comprendre comment agir pour éviter que de tels méfaits se reproduisent¹⁸³. Urgent.

¹⁸⁰ M. Ruhlen, *L'origine des langues*. Belin. 1997. p. 197.

¹⁸¹ Convaincante pour le non initié que je suis et qui ne dispose pas des arguments adverses sous une forme aussi accessible.

¹⁸² *Op. cit.* p. 165.

¹⁸³ Inutile de me reprocher ce passage comme étant hors sujet, c'est probablement à cause de ces questions que

Chapitre 5

PRATIQUER UNE DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Les personnalités ne sont pas formées par ce qui est entendu et dit, mais par le travail et l'activité. Par conséquent, la plus importante méthode d'éducation a toujours consisté en ceci que l'élève a été poussé à une créativité réelle.

Einstein

Nous avons examiné jusqu'ici un certain nombre de raisons permettant de comprendre pourquoi l'enseignement de la physique ne plait pas à la majorité des étudiants. Cependant il ne suffit pas d'identifier les obstacles pour pouvoir les surmonter. Un bricolage improvisé sous le label «physique expérimentale» ne peut pas apporter de remèdes aux dysfonctionnements constatés. Pour les décideurs, c'est ; « *à travers la démarche expérimentale* », [que la rigueur des étudiants doit être formée]¹⁸⁴. De grands débats réunissant les sommités ne sont pas plus éclairants. Ainsi A. Durupthy¹⁸⁵ dit que l'enseignement doit : « [...] *s'appuyer sur l'expérience*¹⁸⁶. » L'imprécision d'expressions telles que : « *à travers* » et « *s'appuyer sur* » montrent bien que l'on ne connaît pas les moyens d'attribuer une fonction pratique aux expériences dans l'enseignement. On ne les cherche même pas. Sophie Ernst exprime bien ce que pensent les uns et les autres : « [...] *c'est expérimental, mais en fait l'expérience est bidon, parce que le vrai savoir est dans les bouquins*¹⁸⁷. » Voilà une pensée qui peut faire obstacle au rétablissement du rôle de l'expérience dans l'enseignement. Il s'agit donc bien, comme le dit la physicienne Françoise Balibar, de : « *savoir ce que l'on fait avec cet enseignement expérimental, si on le pratique*¹⁸⁸. » Le plus urgent est donc d'exposer une façon, parmi d'autres, de le faire.

Je vais relater dans ce chapitre une expérience didactique qui constitue un enseignement expérimental concevable au lycée. Si j'avais voulu suivre l'ordre chronologique de ma recherche, il aurait fallu commencer l'ouvrage par ce chapitre. Pourquoi ne pas l'avoir fait ? C'est que, pour

j'ai travaillé si longtemps.

¹⁸⁴ J. Bornarel, *op. cit.* p. 74.

¹⁸⁵ Bulletin officiel. 1992. *Op. cit.*

¹⁸⁶ Débat *op. cit.* p. XII.

¹⁸⁷ Débat *op. cit.* p. XX.

¹⁸⁸ Débat *op. cit.* p. XVII. Apprécions le « si » conditionnel de cette phrase qui indique bien à quel stade se trouve la réflexion !

l'analyser de façon significative, il m'aurait manqué une modélisation de la démarche expérimentale à laquelle me référer. L'examen critique exposé jusqu'ici donne toutes les raisons de croire que, pour surmonter les difficultés rencontrées par l'enseignement de la physique, il faut créer une situation où les élèves peuvent exercer des activités ayant les propriétés d'une démarche expérimentale au moins une fois dans leur vie scolaire. C'est ce que réalise l'expérience qui va être décrite.

QUELQUES RECHERCHES SUR L'ENSEIGNEMENT DES TRAVAUX PRATIQUES

Avant de commencer, je vais présenter brièvement quelques recherches qui ont précédé notre travail. Il ne s'agit pas d'en faire ici une étude exhaustive, mais de valoriser la spécificité de mes propositions. Les solutions, une fois construites, paraissent toujours simples, voire un peu simplistes à ceux qui les découvrent sans avoir eu le douloureux plaisir de les élaborer.

Des travaux pratiques d'un type nouveau ont été développés surtout depuis 1968. Ils portent souvent le nom de projets et ont fréquemment pour objectif la construction d'un dispositif technique ou l'étude de phénomènes. Les projets nécessitent de la part des étudiants et des enseignants un travail d'une durée incomparablement plus longue que les trois ou quatre heures consacrées habituellement à une séance de travaux pratiques. Ils sont régulièrement proposés pour remplacer les travaux pratiques traditionnels qui sont supposés comporter des défauts, bien que l'on ne se soit généralement pas donné les moyens de les décrire.

Une expérience récente¹⁸⁹ est relatée par les physiciens Jean-Claude Bacri, Jacques Berger et François Lenoir dans *le bulletin de la Société Française de Physique*. Pour eux, les projets visent à : « *montrer aux étudiants qu'ils possèdent des potentialités qu'ils ignorent, et leur faire acquérir une démarche scientifique prenant en compte tous les aspects d'un travail achevé*¹⁹⁰. »

Comment tenir compte de tous les aspects d'un travail achevé lorsqu'on ne dispose pas d'une description précise de la démarche scientifique ? Comme bien d'autres, les auteurs de l'article utilisent l'expression «démarche scientifique» ; qui n'est sans doute pas très différente de la démarche expérimentale décrite ici. Si, depuis le début, j'ai utilisé systématiquement cette dernière expression, c'était pour désigner l'ensemble des sciences où la confrontation des prévisions théoriques au déroulement effectif des événements est obligatoire.

De plus, quel étrange aveu ! L'enseignement traditionnel ne permettrait-il pas aux étudiants de développer leurs potentialités tout en acquérant des connaissances ? Il est étonnant de voir s'opposer des objectifs qui ne devraient jamais être incompatibles.

¹⁸⁹ Ce texte date de l'an 2000.

¹⁹⁰ J.-C. Bacri, J. Berger, F. Lenoir, Initiation à la physique expérimentale en D.E.U.G. A (S.S.M.) 1re année, *Bulletin de la SFP* **84** avril 1992, p. 18. (SFP pour Société Française de la Physique).

Nous pouvons constater que, sauf exception, chacun de nous retient surtout ce qu'il a fait ; or dans l'enseignement traditionnel les étudiants passent le plus clair de leur temps à écouter des cours. De nombreuses potentialités se manifestent dès que les étudiants sont invités à agir par eux-mêmes. C'est bien pourquoi il est tellement important de créer des conditions qui leur permettent d'effectuer un travail autonome.

Faute de cadre théorique permettant de les structurer, les informations acquises pendant toutes les innovations de travaux pratiques ne fournissent pas des connaissances capables de s'accumuler : la plupart des équipes nouvelles reprennent à chaque fois le travail à zéro. Les instigateurs de ces entreprises s'accordent généralement pour penser que les expériences sont exaltantes et qu'elles plaisent aux étudiants. Cela n'est guère étonnant, étant donné le dévouement de leurs promoteurs et l'énergie qu'ils y consacrent. Cependant les résultats des étudiants correspondent rarement aux espérances ; les enseignants s'en étonnent et le déplorent sans disposer des outils leur permettant d'en analyser les raisons. Ils ne pensent même pas à les créer.

Contrairement aux autres, le didacticien Alain Guillon a cherché à construire un modèle d'une «démarche scientifique» susceptible de servir de fondement à ses propositions de renouvellement des travaux pratiques. Pour élaborer son modèle, il a interrogé des chercheurs. Or la recherche qu'il a menée se solde par un constat d'échec. Cela n'a rien de surprenant car, quelles que soient les recherches, les questions posées au cours des investigations révèlent surtout les conceptions préalables de l'enquêteur et n'apportent pas de connaissances nouvelles¹⁹¹. D'autre part, Alain Guillon n'a pas pu concevoir un modèle de portée générale, justement parce qu'il a voulu modéliser les activités des chercheurs. Or elles sont trop diverses pour qu'il soit possible d'y reconnaître des invariants. Alain Guillon finit par conclure qu'il n'existe pas de modèle : « Ainsi plutôt qu'une démarche expérimentale unique et universelle, coexistent dans la science contemporaine plusieurs démarches scientifiques où la place et le rôle de l'expérience ne sont pas identiques¹⁹². » En conséquence, il propose à ses étudiants un certain nombre d'activités qui s'inspirent de celles qui sont pratiquées dans les laboratoires ; il leur fait faire des recherches bibliographiques, des mises au point de protocole de mesures, des confrontations entre modèles théoriques et résultats expérimentaux etc. Lui non plus n'est pas satisfait des performances de ses étudiants. D'après mon modèle, les échecs qu'il déplore proviendraient de ce que les étudiants n'ont pas compris les enjeux de leur action, faute d'avoir eu à répondre à des questions pertinentes.

Les didacticiens canadiens, Marie Larochelle et Jacques Desautels, suivent un courant de pensée

¹⁹¹ On peut voir dans les annexes quelques exemples illustrant cette assertion abrupte.

¹⁹² A. Guillon, Travaux pratiques de physique en DEUG et démarches scientifiques, *3ème Séminaire National de Recherches en Didactique des Sciences Physiques*, 1993, p. 12.

différent. Pour eux, selon une tradition philosophique qu'ils pensent bien établie, la construction du savoir est surtout un acte social, le résultat d'une « négociation ». En conséquence, ils développent avec leurs étudiants des stratégies devant imiter les échanges entre chercheurs. Ainsi ont-ils « conçu et réalisé une expérimentation qui visait à amener 35 étudiants à s'interroger sur le processus de production du savoir dit scientifique et, plus particulièrement, sur le caractère construit et négocié de ce savoir¹⁹³. » Comme ils s'intéressent essentiellement aux processus sociaux, Marie Larochelle et Jacques Desautels n'éprouvent pas le besoin d'utiliser une situation expérimentale comportant des objets participant à des événements. Ils font travailler les étudiants sur une simulation de situation apparaissant sur un écran d'ordinateur¹⁹⁴. Ils éludent ainsi le monde matériel. L'interrogation des étudiants ne peut donc pas porter sur les processus résultant de la confrontation entre le monde expérimental et le monde théorique. Il est indéniable que les échanges sociaux interviennent dans la création scientifique, ils en sont une des nombreuses modalités mais ils n'en sont pas la composante principale.

Le didacticien Samuel Johsua¹⁹⁵ préconise de faire pratiquer aux élèves une démarche hypothético-déductive. Son projet est limité par le fait qu'il vise essentiellement l'acquisition des concepts et des lois. Il s'agit donc encore de trouver le meilleur moyen de les justifier. Johsua ne tient pas compte, lui non plus, de l'importance du déroulement des différentes phases dans la construction de la connaissance. Comme nous l'avons vu au quatrième chapitre, une démarche hypothético-déductive est trop réductrice pour pouvoir constituer une représentation opératoire de la démarche expérimentale.

C'est en cherchant des réponses à des questions que l'enseignement d'une initiation à la démarche expérimentale devient réalisable.

C'est ce que nous allons examiner maintenant.

¹⁹³ M. Larochelle & J. Desautels, *Autour de l'idée de sciences*, Itinéraires cognitifs d'étudiants, De Boeck, 1992, p. 135.

¹⁹⁴ En fait, il s'agit d'une représentation sur un écran d'ordinateur de la réflexion d'un rayon lumineux sur un miroir. Seulement, le miroir est caché par un carré noir et les étudiants doivent deviner ce qui se passe derrière. Ils font varier la direction des traits qui arrivent sur le carré. Le logiciel gère la modélisation de la situation et les étudiants voient les traits émergeant du carré. La représentation est conçue par les réalisateurs du programme informatique. Ils décrivent leur dispositif à la page 80.

¹⁹⁵ S. Johsua & J.-J. Dupin, *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Puf, 1993.

DESCRIPTION DES EXPÉRIENCES¹⁹⁶

Supposons que la prise en compte d'une interrogation concernant une situation expérimentale véritable puisse générer des processus de pensée participant à la construction de la connaissance. Voyons comment cela peut être réalisé en utilisant une expérience de recherche didactique. Au début il s'agissait d'explorer la possibilité d'enseigner les idées qui fondent le traitement statistique des mesures. Il se trouve que le déroulement des séances que nous avons mises au point dans ce but, convient parfaitement à la description d'une initiation à une démarche expérimentale complète.

Tout d'abord je décrirai deux expériences emboîtées, celle des chercheurs qui ont mis en place un dispositif didactique, et celle que les élèves devaient effectuer sur le dispositif matériel. Ensuite j'exposerai les développements théoriques qu'il est possible d'envisager et qui pourraient utilement prolonger les expériences réalisées.

Dispositif didactique. Conduite par une équipe de chercheurs¹⁹⁷, l'expérience didactique a eu lieu en 1990, dans une classe de seconde de l'école Saint-Michel de Picpus, lycée privé du douzième arrondissement de Paris. La classe comportait trente sept élèves¹⁹⁸. Le professeur, qui a participé à la mise au point de la séquence, conduit la classe et informe les élèves : les trois chercheurs présents s'intéressent à ce que pensent les élèves. Ils n'interviennent qu'à la demande du professeur ou s'ils le jugent absolument nécessaire.

Pendant la première séance de travaux pratiques, les élèves sont séparés en deux groupes de dix-huit et dix-neuf personnes chacun. Au signal du professeur, les élèves répondent par écrit aux questions contenues dans un carnet qu'ils doivent remplir lorsque le professeur les sollicite. À la fin de la séance, le professeur demande à chacun d'eux de faire dix mesures qui sont communiquées à tous les élèves du groupe.

La seconde séance réunit l'ensemble de la classe. Entre-temps, les élèves ont fait un devoir personnel consistant à représenter les résultats des mesures de leur groupe.

Les séances sont enregistrées au magnétophone ; elles seront transcrites et analysées. Nous ne disposons que d'une semaine pour tirer les leçons des résultats de la première séance et pour ajuster nos stratégies avant la deuxième séance. Les contraintes scolaires sont telles, que nous ne

¹⁹⁶ Pour les détails voir les documents de recherche sur le site :

<http://www.courville.org/mediawiki/index.php/Brenasin>.

¹⁹⁷ Cette recherche a été faite au sein du L.I.R.E.S.T. (Laboratoire Interuniversitaire de Recherche sur l'Education Scientifique et Technologique de l'Université de Paris VII) avec la participation du professeur de la classe Christian Larcher et des chercheurs Claudine Larcher, Roger Journaux et moi-même.

¹⁹⁸ Le mot élève désigne ici les individus et non des idéaltés.

pouvions pas faire durer l'expérience le temps nécessaire pour exploiter toutes nos idées dont certaines seront néanmoins exposées dans ce chapitre ; elles n'ont donc pas pu être toutes testées.

Objectifs didactiques. La première séance avait pour objectif d'expérimenter les moyens de convaincre les élèves de la dispersion des valeurs mesurées. L'élaboration d'un enseignement adapté aux aptitudes et aux besoins des élèves nécessite de partir de leurs idées préalables. Il faut donc se donner les moyens de les connaître. Différentes études didactiques avaient déjà procuré des indications sur ce qu'ils pensent à propos des résultats de mesure. Certaines conceptions apparaissent avec une régularité suffisamment remarquable pour servir de point de départ. Presque tous les élèves croient qu'une mesure unique suffit pour fournir la "valeur vraie"¹⁹⁹ d'une grandeur. C'est pourquoi la confrontation des élèves à la dispersion des valeurs mesurées est une condition nécessaire pour qu'ils perçoivent l'utilité de refaire des mesures. C'est aussi le moyen de leur faire comprendre qu'ils ne mesurent pas la valeur vraie, unique par essence, mais un ensemble de valeurs qu'il faut interpréter.

Comme toute idée préconçue que l'on cherche à valider, la « valeur vraie », qui correspond à un mythe, constitue un moteur utile à l'initiation d'une démarche expérimentale.

Dispositif matériel. Un ressort à boudin, suspendu à une potence, est posé face aux élèves sur la paillasse, sorte d'énorme table derrière laquelle se place le professeur. Une masse marquée est accrochée à l'autre extrémité du ressort. Pour créer l'événement, le professeur la tire verticalement vers le bas ; il écarte ainsi le ressort de sa position d'équilibre signalée par une baguette horizontale. Puis il la lâche. Le ressort se met à osciller et une oscillation dure un peu moins de 2 secondes.

Les élèves doivent mesurer la durée d'une oscillation du ressort. Pour cela, ils utilisent des chronomètres personnels, sensibles au centième de seconde, que l'enseignant leur a demandé d'apporter. Dès le début de la séance, le problème que les élèves doivent résoudre est formulé par le professeur de la façon suivante : « Je vais vous donner l'objectif de fin de séance. Il faudra que l'on soit capable de donner au deuxième groupe des informations à partir des mesures qu'on a faites pour savoir si les deux groupes ont manipulé avec le même pendule ou avec des pendules différents²⁰⁰. »

Problèmes didactiques. Nous ne sommes pas complètement satisfaits par la formulation de la question posée. Son intérêt nous semble assez limité et il n'est pas à la mesure de l'enjeu pédagogique. Il est beaucoup plus difficile que nous le croyions d'échapper aux questions

¹⁹⁹ S. M. Coehlo, 1993. *Contribution à l'étude didactique du mesurage en physique dans l'enseignement du secondaire : description et analyse de l'activité intellectuelle et pratique des élèves et des enseignants*. Thèse.

²⁰⁰ Dans ce chapitre les textes entre guillemets correspondent à des extraits de la transcription des séances de classe.

stéréotypées et maladroitement formulées, et c'est bien faute d'avoir trouvé mieux que nous avons adopté celle-là.

La forme de la question importe peu à partir du moment où les élèves la comprennent et l'acceptent.

Il vaut mieux une question maladroitement formulée que pas de question du tout. Rappelons qu'une démarche expérimentale ne peut se développer qu'à partir du moment où on cherche à se donner les moyens de répondre à une question.

Par la suite, de nouvelles interrogations surgissent à partir de l'analyse de la situation et elles sont beaucoup plus pertinentes, forcément. Il n'y a aucune raison de se fustiger, il ne sert à rien de désirer atteindre une perfection inaccessible ; nombreuses sont les recherches fructueuses qui débutent, elles aussi, par des questions vagues.

Comment procéder pour mettre en évidence la dispersion des valeurs mesurées ? Les élèves sont invités à mesurer la durée d'une oscillation du ressort. Afin de fixer les idées, le professeur décrit verbalement ce que désigne le mot «oscillation ». Il en montre une, tandis qu'elle se déroule. La mesure d'une grandeur directement accessible par les sens présente un avantage pédagogique certain sur des mesures de grandeurs qui ne le sont pas, comme le courant électrique ou la tension par exemple. Comme nous voulons convaincre les élèves que la dispersion ne provient pas du fait qu'ils mesurent la durée de deux événements différents, nous décidons de leur faire mesurer la durée de la même oscillation. Chaque élève fait une mesure, puis dicte la valeur qu'il a obtenue au professeur qui la note au tableau. C'est à la comparaison des résultats obtenus qu'échoie la mise en évidence d'une dispersion des valeurs mesurées.

Problèmes de mesure. La réalisation de notre objectif nécessite de résoudre toute une série de problèmes pratiques.

Première difficulté expérimentale :

La mesure de la durée de la même oscillation par tous les élèves n'est réalisable qu'en les laissant à leur place. Ceci entraîne de leur part des objections majeures. Certains élèves protestent parce qu'ils ne sont pas en face du dispositif, ce qui entraîne des erreurs de parallaxe disent-ils. « Il faudrait que tout le monde soit placé dans un même axe par rapport au repère et que chacun ait un chronomètre identique », dit par exemple un élève qui ne semble pas percevoir que sa proposition est irréalisable.

Deuxième difficulté expérimentale :

Les élèves ne sont pas convaincus de mesurer la même durée s'ils ne prennent pas tous le même point de départ ; pour certains, rien ne prouve que la durée d'une oscillation complète est la même lorsqu'elle n'est pas mesurée exactement à partir de la même position et à partir du même instant. L'ensemble de leurs remarques, répertoriées dans un carnet, montre que les élèves ont un

degré de rigueur absolu qui s'exprime lorsqu'on leur en laisse l'occasion et qu'on aurait tort de méconnaître.

Troisième difficulté expérimentale :

Pour vérifier les résultats obtenus par la première mesure, il faut obligatoirement recommencer, ce qui implique de mesurer la durée d'une nouvelle oscillation. Or les élèves ne croient pas que deux oscillations différentes puissent avoir la même durée²⁰¹. Cette idée est d'autant plus légitime que l'arrêt du pendule au bout d'une dizaine de minutes les convainc du contraire. « [...] *il y a aussi l'oscillation plus grande, ça va prendre plus de temps* » explique l'un d'entre eux. En accord avec la sensation visuelle, il n'est pas aberrant de croire que la durée de l'oscillation diminue jusqu'à devenir nulle quand le pendule s'arrête ; d'autant plus qu'elle varie effectivement avec l'amplitude du mouvement. Les élèves semblent pratiquer spontanément un raisonnement par continuité, généralement très fructueux et fréquemment utilisé par les physiciens, mais qui nous met dans l'embarras. Pour surmonter cette dernière difficulté, il faut émettre explicitement une hypothèse : toutes les petites oscillations du ressort ont la même durée. Rien ne peut raisonnablement justifier une telle assertion et les élèves restent dubitatifs. J'interviens alors pour expliquer que s'ils refusent de l'admettre, alors il faut arrêter le travail ! Les élèves acceptent très bien cet argument d'ordre stratégique²⁰², d'autant qu'ils se doutent bien que toute une équipe de chercheurs ne s'est pas déplacée pour les conduire vers une impasse. L'hypothèse est présentée comme étant provisoire et devant être contrôlée. Par mesure de précaution, et pour créer les circonstances qui minimisent les risques d'erreur, les élèves décident que le ressort doit être toujours lancé à partir du même endroit. Un deuxième repère est disposé à cet effet.

Remarques d'ordre didactique. Qu'implique le fait d'avoir montré une oscillation en ayant évité d'utiliser le mot « période » ? Au cours de travaux pratiques traditionnels, la plupart du temps, les élèves sont invités à mesurer la « période » d'un pendule. Il faut bien comprendre que définir une période au préalable entraîne le fait d'admettre l'égalité des durées des oscillations. Tous comptes faits, la simple utilisation de ce mot permet de contourner toutes les difficultés expérimentales : puisqu'elles sont présumées constantes, il n'y a plus aucune raison de s'astreindre à établir l'égalité des durées des petites oscillations. Voilà une situation qui illustre parfaitement la nature de certaines différences épistémiques entre un enseignement dogmatique et prématuré d'un

²⁰¹ Notons qu'une telle idée ne devrait pas nous choquer. C'est bien aussi pour avoir postulé le premier que la durée des petites oscillations du pendule était constante, que nous portons une telle admiration à Galilée !

²⁰² Les arguments stratégiques, qui ont une grande place dans la recherche, n'apparaissent pratiquement jamais dans l'enseignement. Nous rencontrons là une bonne occasion pour les utiliser.

concept, la période, et la construction du même concept à partir d'une expérience rigoureusement conduite.

Les opinions que les élèves ont exprimées au cours de cette expérience particulière correspondent, à peu de choses près, à celles que nous aurions obtenues dans n'importe quelle classe de seconde dans des circonstances analogues. La rédaction des réponses comporte suffisamment de fautes d'orthographe et de syntaxe pour signifier que la classe observée n'est ni exceptionnellement brillante ni particulièrement faible. La pertinence des idées des élèves et le sérieux avec lequel ils répondent aux questions attestent qu'ils apprécient la rigueur de la démarche qui leur est proposée.

Quelles premières leçons tirer de ce début d'expérience ?

- 1) Il ne faut pas espérer trouver des moyens permettant d'éviter toutes les difficultés expérimentales ; elles font intrinsèquement partie de la situation et elles sont parfois inextricables. Les dissimuler dénature l'intérêt de la démarche et, de plus, ne se fait qu'au prix de tricheries. Comme il n'est pas toujours possible de les résoudre sur-le-champ il faut les gérer en hiérarchisant les priorités.

La complexité est une caractéristique intrinsèque du travail expérimental.

2) À un moment ou à un autre, l'émission d'hypothèses s'avère nécessaire, ne serait ce que pour continuer le travail.

3) Le contrôle direct des hypothèses n'est pratiquement jamais possible et la validation des résultats obtenus se fait toujours de façon indirecte. Elle peut être différée à condition de le dire explicitement.

4) Il est parfois nécessaire d'arbitrer entre les impératifs qu'impose la réalisation des objectifs pédagogiques et ceux qui président à la logique épistémique de l'apprentissage des élèves. L'arbitrage nécessite une hiérarchisation des arguments qui devrait, autant que possible, privilégier le point de vue des élèves. Ainsi vouloir exhiber la dispersion des valeurs mesurées (objectif pédagogique) ne dispense pas de le faire dans des conditions épistémologiquement (épistémiquement) acceptables par les élèves (être sûr de mesurer les caractéristiques du même événement). Cette dernière condition l'emporte sur l'orthodoxie expérimentale selon laquelle chaque élève devrait être en face du dispositif pour faire les mesures. Bien qu'ils préoccupent les élèves, les effets dus aux erreurs de parallaxes qui s'en suivent sont de moindre importance.

Les membres de l'équipe de recherche n'avaient évidemment pas prévu tous les problèmes rencontrés. Nous avons pu les identifier grâce au dispositif d'observation qui obligeait les élèves à dire ce qu'ils pensaient et à exprimer toutes les objections qui leur passaient par la tête. Le professeur leur donnait du temps pour répondre par écrit aux questions formulées sur le carnet remis à cet effet. Ensuite, il leur demandait à tour de rôle de lire ce qu'ils avaient écrit, et provoquait la discussion sans exposer sa propre opinion.

Les élèves s'exprimaient d'autant plus librement que leur professeur leur avait promis que leurs remarques n'auraient aucune incidence sur leurs notes. Ceci prouve incidemment que les élèves ne travaillent pas uniquement pour les contrôles et sont actifs lorsque les circonstances s'y prêtent. Ils participaient d'autant mieux qu'ils se sentaient sans doute valorisés par le fait que leurs opinions étaient sensées être utiles à des chercheurs. Ce n'est pas l'unique raison ; tous les professeurs ont remarqué que, lorsque les étudiants ont la parole, il s'en trouve toujours un pour poser la question cruciale au moment où, brusquement l'enseignant se met à douter en son for intérieur de la validité de ce qu'il raconte ! Les objections exprimées par les étudiants sont souvent révélatrices de difficultés que nous éludons²⁰³. L'enseignement d'une démarche expérimentale nécessite que les élèves puissent s'exprimer ; seule l'écoute attentive et bienveillante permet de comprendre la nature des différents obstacles qu'ils rencontrent. Pour cela il faut rechercher le sens profond de ce qu'ils veulent dire et que camoufle parfois une expression maladroite. Il faut toujours supposer *a priori* que leurs objections sont pertinentes.

Prendre en compte toutes les questions et toutes les objections des élèves permet à l'activité expérimentale de se dérouler selon des modalités rigoureuses.

Nous avons déjà constaté cet autre fait généralement méconnu : il est très difficile de concilier le point de vue des enseignants et celui des élèves. Les enseignants formulent leurs questions en fonction d'objectifs pédagogiques précis ; ce sont très souvent des questions prétextes. Les étudiants cherchent à les comprendre en fonction de la cohérence épistémique de la construction de leurs propres connaissances. Pourtant il est clair que le but de l'enseignement est le même pour les professeurs et les élèves. Les premiers veulent enseigner des connaissances que les seconds veulent acquérir mais si nous n'y prenons garde, les moyens de parvenir à des objectifs communs peuvent facilement devenir incompatibles²⁰⁴.

Causes de la dispersion. Une fois la dispersion des valeurs mesurées constatée par l'ensemble des élèves, nous avons cherché à savoir à quoi ils l'affectent. Questionnés par écrit, les élèves analysent très finement l'ensemble des causes de la dispersion. Ils l'attribuent aux conditions expérimentales : au fait qu'ils ne se trouvent pas en face du dispositif et à la durée de leurs réflexes. « *Je pense que l'on trouve des valeurs différentes car personne n'a les mêmes réflexes et que l'on réagit plus ou moins vite pour appuyer sur le bouton. De plus personne n'a le même chronomètre : certains s'arrêtent peut-être plus rapidement après la pression* », dit un élève. Il faut avoir soi-même fait les mesures pour savoir qu'il est particulièrement irritant de ne jamais parvenir à déclencher le chronomètre au moment voulu.

²⁰³ Répondre aux questions entraîne inmanquablement un approfondissement de ses propres connaissances.

²⁰⁴ Ainsi se manifeste l'irréductible distance entre le projet d'enseignement et l'apprentissage, évoqué au troisième chapitre.

Interrogés sur les moyens d'améliorer les résultats de mesure, certains élèves suggèrent de prendre une cellule photoélectrique. « *Il aurait fallu utiliser un appareil comme une cellule photo.* » Les idées qu'ils expriment montrent que, majoritairement ils gardent l'illusion de pouvoir atteindre la « *valeur vraie* » à l'aide d'un appareil automatique qui éliminerait les erreurs dues à l'imperfection des « *réflexes humains* ». Nous avions prévu leurs réactions et nous avions préparé un autre dispositif afin de leur montrer qu'il subsiste une dispersion des mesures, même lors de l'utilisation d'une cellule photoélectrique. Bien sûr, elle est beaucoup plus faible puisqu'elle porte sur quelques millièmes de secondes comme le montre la figure 2, mais comme elle s'exprime par un nombre beaucoup plus grand de chiffres significatifs, certains élèves pensent qu'elle est plus grande qu'avec un chronomètre. « *Quand on aura un nombre de chiffres plus important on aura un taux d'erreur plus important aussi. On a vu avec l'appareil que plus on augmente la précision plus on avait un taux d'erreur plus important* », dira un élève au cours de la deuxième séance. Son opinion correspond aux valeurs des mesures suivantes ; c'est le professeur qui parle : « *On va passer, encore plus précis, on va passer au 1/1000 ème, 1,496 - 1,496 - 1,486 - 1,487 - 1,488 - 1,488 - 1,487 - 1,486 - 1,488 - 86 - 85 - 88. Vous voyez les petites variations ? Je vous propose d'aller encore plus loin, plus précis encore, on va passer au 1/10.000 ème de seconde. 1,4874 - 1,4876. Là vous voyez 1,4903.* »

À la fin de la première séance, le professeur rappelle le problème à résoudre. Il a trouvé une façon de le présenter qu'il estime adaptée aux élèves de sa classe. Il leur demande d'imaginer que des êtres communiquent entre deux planètes et qu'ils cherchent « *quelles caractéristiques du dispositif indiquer pour savoir si on a le même ressort* ». Il précise : « *il faudra communiquer à l'autre groupe le résultat de vos mesures pour décider si c'est le même objet.* » À peine a-t-il fini sa phrase, qu'un élève répond : « *Le diamètre du ressort et le poids.* » Reconnaissons que ce qu'il propose caractérise bien plus directement le dispositif que la durée d'une de ses oscillations !

Au moment où il exprime sa proposition, l'élève qui a parlé ne perçoit pas encore que, pour donner les valeurs du diamètre et du poids du ressort, il doit les mesurer, et de plus, il s'agit de deux grandeurs au lieu d'une. Elles ne sont pas plus faciles à évaluer que la durée d'une oscillation. Pourtant cet argument ne suffit pas à le convaincre. Les élèves continuent à vouloir éviter les mesures. Celui qui s'est exprimé cherche probablement à esquiver les difficultés rencontrées pendant tout le début de la séance. Son comportement est analogue à celui des chercheurs qui modifient en permanence leurs stratégies et leurs objectifs lorsqu'ils se heurtent à des obstacles qu'ils jugent trop difficiles à surmonter. Cependant comme, par expérience, nous savons qu'il existe toujours une raison épistémiquement fondée à la résistance d'un élève, il est instructif de chercher à comprendre le sens de ses réticences. Questionné, il rétorque que deux ressorts différents peuvent fort bien avoir la même durée d'oscillation. Et il a parfaitement raison.

Il faut le reconnaître ouvertement, avant de tenter de lui faire accepter l'idée que la durée de l'oscillation présente l'avantage de caractériser globalement le ressort. Et les élèves continuent toujours à vouloir éviter les mesures.

C'est alors qu'apparaît une nouvelle idée selon laquelle il existerait « *une véritable durée de l'oscillation, fournie par la théorie.* » Ceux qui proposent d'avoir recours à la "*valeur théorique*" imaginent que la valeur « *vraie* », correspondant à la durée « *réelle* » de l'oscillation, peut être facilement obtenue à partir d'une « *formule* ». Nous constatons qu'un enseignement qui ne prend pratiquement jamais en compte les activités de modélisation, ne prépare pas les élèves à comprendre qu'il est tout aussi difficile d'approcher la valeur « *vraie* » par la théorie que par une mesure. C'est pourquoi, bien que l'expérience n'ait pas été tentée, je décrirai plus loin ce qu'il est possible de faire pour exploiter leur idée qui peut être utilisée afin de pratiquer une démarche expérimentale complète²⁰⁵.

En fin de séance, nous proposons à chaque élève de faire dix mesures. Nous collectons rapidement l'ensemble des valeurs mesurées par tous les élèves du groupe et nous les leur transmettons rassemblées dans un tableau. N'étant pas directement exploitable sous cette forme, nous proposons aux élèves de les représenter graphiquement ; chacun doit faire chez lui l'histogramme de l'ensemble des valeurs trouvées par son groupe.

C'est le même ressort qui a été présenté aux deux groupes. Rien n'a été modifié afin que les différences entre les deux distributions de valeurs ne puissent être attribuées qu'au caractère aléatoire des erreurs de mesures.

À l'issue de cette première étape de travail, les élèves peuvent admettre les propositions suivantes :

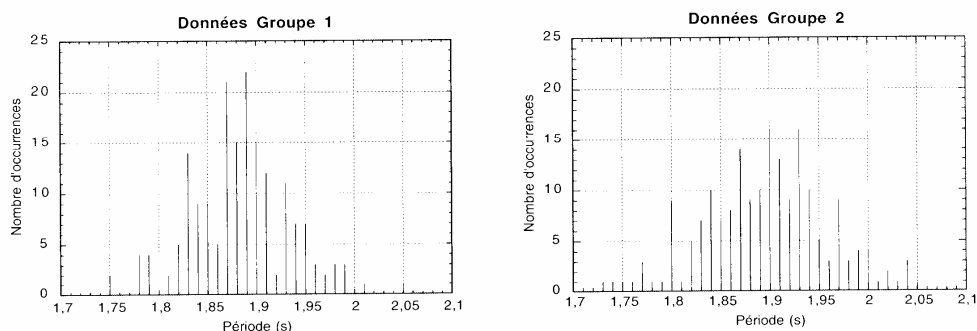
La dispersion, plus ou moins grande, des valeurs mesurées, est inévitable. En conséquence, la valeur « vraie » d'une grandeur physique n'est pas accessible par la mesure.

Une semaine plus tard, la séance suivante réunit tous les élèves de la classe. Entre-temps, l'équipe de recherche a relevé et analysé les histogrammes. Les distributions de valeurs obtenues par chacun des deux groupes ont été représentées de façon à pouvoir être projetées devant les élèves dans le but de provoquer une nouvelle discussion.

Évaluation de la grandeur mesurée. Pendant la deuxième séance, il s'agissait de répondre à la question suivante : quelle valeur prendre pour évaluer la durée de l'oscillation ? La majorité des élèves propose la moyenne des mesures. Au besoin, contrairement à ce qu'autorise le traitement

²⁰⁵ Telle qu'elle est décrite dans les deux schémas du premier chapitre.

statistique, ils éliminent les valeurs qui leur semblent aberrantes. Ils justifient cette action en disant qu'il leur semble avoir déclenché le chronomètre soit trop tôt, soit trop tard. Ainsi déclarent-ils vouloir écarter « *les valeurs qui semblent impossibles, les valeurs extravagantes ou celles qui se détachent trop des autres* », ou bien encore ils proposent de procéder « *en prenant tous les résultats les plus proches et les plus courants et en éliminant les valeurs les plus élevées et les plus basses et en faisant la moyenne des valeurs ainsi relevées*²⁰⁶ » Tout un programme ! Ces idées sont d'autant plus intéressantes à examiner qu'elles sont partagées par le plus grand nombre et... qu'elles sont contestables. L'élimination des valeurs qui semblent fausses peut éventuellement se justifier sur un petit nombre de mesures lorsqu'on connaît la cause de l'erreur. Elle cesse d'être légitime dès que le traitement statistique porte sur un nombre de valeurs suffisamment grand ; il ne faut pas, en effet, perturber la répartition aléatoire des erreurs, ce qui aurait pour conséquence de déformer la répartition des valeurs. Je l'ai vérifié en traçant l'histogramme des valeurs retenues selon les critères suggérés par les élèves ; son allure est totalement biscornue et n'a plus rien de commun avec celle de l'histogramme de l'ensemble des valeurs représenté sur la figure 1. C'est ce que subodore un des élèves : « *Je ne suis pas d'accord, parce que je pense que comme on ne connaît pas la valeur précise, on ne peut pas dire si une valeur est éloignée, [et] si une valeur qui est éloignée sera proche ou loin de la valeur réelle* ». Prenons incidemment acte du fait que certains élèves expriment un raisonnement parfaitement rigoureux lorsqu'ils savent de quoi ils parlent.



La figure 1 représente les distributions obtenues par chacun des deux groupes d'élèves.

La question initiale posée aux élèves revient donc à leur demander de dire si les deux distributions correspondent à des mesures faites sur le même dispositif ou sur des dispositifs différents. Deux histogrammes ne sont jamais superposables si bien que la réponse est

²⁰⁶ La transcription respecte jusqu'à l'orthographe utilisée par les élèves.

théoriquement difficile à établir. Répondre à la question que nous leur posons devient un problème de spécialiste ; néanmoins, guidés, les élèves peuvent s'amuser à construire des critères suffisamment précis pour énoncer une réponse plausible et indépendante de l'expérimentateur²⁰⁷.

Caractérisation des mesures. La seconde partie de la deuxième séance a été en partie ratée. Le professeur s'est lancé dans une analyse des dix valeurs mesurées par chaque élève. Il a perdu beaucoup de temps à expliquer la différence entre une mesure précise et une mesure exacte à l'aide d'une image utilisée très couramment dans l'enseignement ; la cible de tir. L'analogie consiste à faire une analogie entre la répartition des valeurs mesurées et la position de plusieurs impacts de balles tirées sur une cible. Son objectif était de faire les distinctions suivantes : si les impacts sont regroupés près du centre de la cible, alors le tir est précis et exact, si ils sont regroupés mais décentrés, alors le tir est précis mais inexact, enfin si ils sont dispersés, le tir est imprécis (exact ou inexact selon que les points d'impact sont disposés près ou loin du centre). Toute analogie est trompeuse si on ne tient pas compte de ses limites, mais dans le cas précédent elle est particulièrement fallacieuse ; en effet, lors d'une mesure, personne ne connaît la valeur recherchée, ce qui revient à ignorer où se situe le cœur de la cible. Il est donc impossible de connaître *a priori* les qualités des mesures. Cette fois encore, même dans le cadre d'une recherche concertée, les objectifs pédagogiques traditionnels ont eu momentanément gain de cause.

La comparaison des mesures, fournies par une cellule photoélectrique d'une part, et produites par l'« outil » que constitue l'ensemble des élèves d'autre part, permet de comparer les deux « instruments » de façon autrement plus efficace que l'utilisation dogmatique de l'image de la cible de tir. Sur la figure 2 les valeurs mesurées à l'aide d'une cellule photoélectrique se présentent, elles aussi, sous la forme d'une distribution mais qui est cinquante fois moins étendue que celle des valeurs mesurées par l'ensemble des élèves.

²⁰⁷ La comparaison des deux histogrammes nécessiterait non seulement que soient acquis les concepts élémentaires du traitement statistique des mesures, mais aussi la théorie permettant d'évaluer la probabilité pour que deux distributions de mesures proviennent du même dispositif. Ceci relève de la compétence des spécialistes et n'est certainement pas réalisable en classe de seconde.

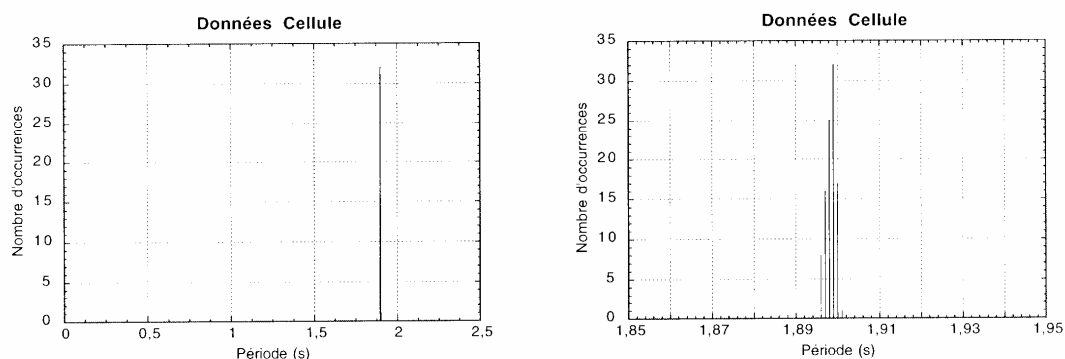


Figure 2. Représentation de la distribution des valeurs mesurées avec la cellule photoélectrique sur le dispositif utilisé par les élèves.

La comparaison des propriétés des deux « instruments » permet de mieux cerner ce que signifie la précision des mesures. La précision permet en effet de chiffrer l'étendue relative de la dispersion des valeurs mesurées par les deux instruments. Ainsi l'étendue du domaine où se trouve la valeur recherchée est restreinte d'un facteur 50 dans le cas de la cellule par rapport à celui du « groupe d'élèves », ce qui est un gain considérable.

Dans l'exemple décrit, les moyennes des valeurs données par les distributions des valeurs mesurées par les élèves et celle de la cellule ne diffèrent que d'un centième de seconde. Cela montre que l'instrument « groupe d'élève » présente des fluctuations suffisamment aléatoires pour que la moyenne soit une estimation étonnamment précise de la valeur cherchée. Elle correspond en effet à la sensibilité du chronomètre. Parallèlement la proximité des deux moyennes tend à prouver que la cellule ne présente pas d'erreur systématique dépassant le centième de seconde. Supposons un instant que nous ne disposions que des résultats de la cellule photoélectrique. Pourrions-nous nous y fier aveuglément ? Se pose alors, de façon pertinente parce que son utilité apparaît clairement, la question de savoir si les valeurs fournies par la cellule photoélectrique sont exactes. Rien n'assure *a priori* l'exactitude du résultat fourni par un instrument de mesure en général, ni par la cellule en particulier. Dans le cas envisagé, l'exactitude de la cellule est vérifiée par la correspondance du résultat qu'elle fournit avec celui de l'instrument « groupe d'élèves ». Sinon, comment s'en assurer ? L'élaboration des réponses à cette nouvelle question peut ouvrir une autre voie de recherche. Quant à la qualité des résultats, les élèves auraient tort de sous-estimer l'évaluation obtenue à partir des mesures qu'ils ont faites avec leurs chronomètres malgré tous les défauts qu'ils ont analysés²⁰⁸ ; en revanche, ils ont raison de

²⁰⁸ Cela peut être l'occasion d'explorer les propriétés des échantillons aléatoires. À chaque étape de cette

suivre l'intuition qui consiste à préférer la cellule photoélectrique en ce qui concerne la précision. *Comment évaluer une grandeur physique ?* Dès que les élèves sont convaincus que les mesures ne permettent pas de « déterminer » la valeur vraie de la durée de l'oscillation du pendule et qu'il est impossible d'échapper aux mesures, ils peuvent accepter la légitimité de la question de savoir comment « l'évaluer » à partir de la collection des valeurs mesurées. C'est « La question » qui va déclencher la pratique des différentes composantes de la démarche expérimentale telle que je l'ai modélisée.

L'utilisation du verbe « évaluer », au lieu de « déterminer », change fondamentalement la conception épistémique du résultat des mesures. La modification du vocabulaire est le signe du changement de perspective permettant de percevoir comment s'articulent les résultats théoriques et expérimentaux dans l'élaboration de la connaissance. Les concepts mis à l'œuvre pour évaluer la durée d'une oscillation du pendule sont les mêmes que ceux qu'il faut utiliser pour évaluer toute autre grandeur physique.

Représentation graphique des valeurs mesurées. L'examen des histogrammes construits par les élèves entre les deux séances confirme que si aucun objectif n'est fixé et si aucune consigne n'est donnée, chacun choisi sa propre échelle selon l'inspiration du moment. Or la nécessité de comparer les résultats des deux groupes impose le choix d'une échelle arbitraire mais identique ; sur quels critères le fonder ? d'abord, sur les propriétés que l'on désire exhiber, puis sur l'esthétique et la lisibilité du graphique qui, de plus, doit être simple à exécuter pour éviter les erreurs de report des mesures.

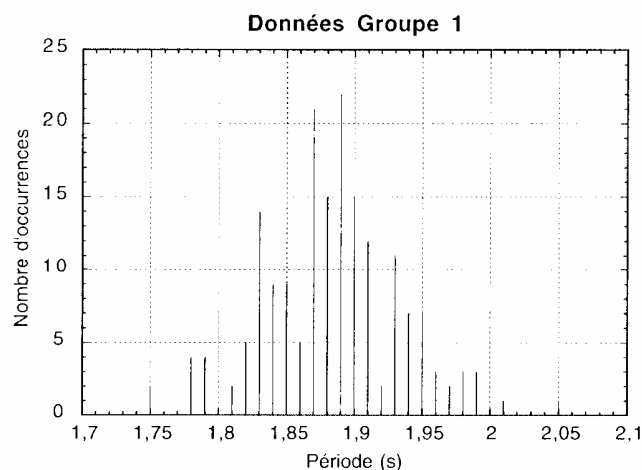


Fig. 3. Une représentation pleine échelle de la distribution des 180 valeurs mesurées par les 18 élèves du premier groupe,

séquence, chacun peut trouver de nouvelles voies de recherche avec les élèves.

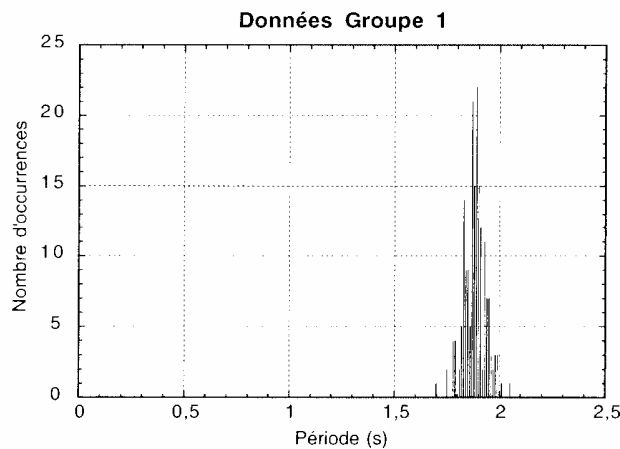


Figure 4. Une représentation de la même distribution de valeurs comportant l'origine.

Les figures 3 et 4 sont construites avec la même distribution des valeurs mesurées ; leur aspect ne diffère que par le choix des échelles : une représentation pleine échelle (figure 3) dévoile la structure de la distribution, tandis qu'une représentation comprenant l'origine des temps (figure 4) permet de relativiser l'extension de la dispersion par rapport à la valeur moyenne.

La détermination des échelles ne s'impose donc pas à l'esprit et suscite un véritable travail : il faut en effet arbitrer entre des arguments d'ordres différents. Bien que ce soit difficile à faire admettre à l'ère des ordinateurs, il me semble indispensable que les élèves tracent, au moins une fois dans leur vie, un histogramme à la main, afin de mieux percevoir l'influence de chacun des facteurs. Mettre en pratique la démarche expérimentale implique, entre autres, de laisser les élèves choisir eux-mêmes les échelles des représentations graphiques au lieu de les leur imposer sans explication. La prescription d'une échelle unique prédéterminée par l'enseignant, comme c'est le cas dans presque toutes les fiches de travaux pratiques, ne permet pas aux élèves de comprendre les enjeux des choix d'échelles dont les applications sont nombreuses y compris dans la vie courante. Les graphiques synthétisent efficacement l'information. C'est pourquoi une réflexion sur la façon de les construire est particulièrement formatrice ; elle permet, entre autres d'interpréter les graphiques tendancieux et de déceler les éventuelles mystifications qui reposent sur de judicieux choix d'échelle qui permettent d'amplifier ou de minimiser les effets selon la volonté de l'auteur²⁰⁹.

²⁰⁹ Ainsi les variations des différentes valeurs boursières représentées en pleines échelles ne permettent pas d'en comparer les « performances » évaluées en pourcentages.

L'évaluation de la durée de l'oscillation à partir d'une distribution d'environ 180 valeurs, génère de la part des élèves des avis suffisamment différents pour provoquer un débat. Certains considèrent que la valeur dont le pic est le plus élevé, autrement dit la valeur la plus fréquente, représente le mieux la grandeur recherchée ; d'autres préfèrent la valeur moyenne. En fait, à ce stade de connaissance, aucun argument n'est décisif pour départager les différentes opinions. Tout comme dans la plupart des discussions de laboratoire, chacun reste fermement fixé sur son avis personnel. Le consensus est une vue de l'esprit tant que rien ne le génère de façon indubitable. D'autre part, pour dire les choses rapidement, la «vérité» scientifique ne résulte pas d'un vote démocratique ! Notons-le incidemment : il ne suffit pas que les élèves échangent des opinions pour élaborer une connaissance scientifique, et il y a lieu de se méfier de discussions qui, si elles ne sont pas rigoureusement dirigées vers l'objectif à atteindre, restent stériles.

L'analyse des sources de la dispersion fait partie des activités expérimentales. Même en admettant qu'un opérateur réussisse à éliminer toutes les causes détectables de la dispersion, il en restera toujours d'irréductibles correspondants à des fluctuations aléatoires résiduelles, et cela, les élèves ne sont pas prêts à l'admettre.

L'allure des histogrammes, représentés sur les figures 2 et 3, comporte un nombre suffisamment grand de résultats pour pouvoir repérer les propriétés des distributions de valeurs mesurées.

Propriétés des distributions :

L'histogramme se compose de trois parties faciles à distinguer ; une zone centrale où sont concentrées toutes les valeurs mesurées et deux zones extrêmes qui n'en comportent aucune.

La zone centrale de l'histogramme a la forme d'une bosse dont le tiers central comporte le plus grand nombre de valeurs.

Que la durée recherchée soit évaluée par la moyenne des valeurs mesurées, par la valeur la plus fréquente ou par tout autre moyen²¹⁰, les élèves continuent de se demander où se situe la valeur vraie de la durée de l'oscillation. Les questions se précisent et deviennent pertinentes. Faut-il la situer dans toute la largeur de l'intervalle où se trouve l'ensemble des valeurs ? Un morceau suffit-il ? Lequel ? Comment le définir ? Malheureusement faute de disposer de séances supplémentaires, nous n'avons pas pu expérimenter l'élaboration des réponses avec les élèves. L'expérience didactique proprement dite se termine mais nous pouvons imaginer ce qu'il aurait été possible de faire.

²¹⁰ Pour avoir une idée de la diversité des moyens utilisés au cours de l'histoire, on peut consulter le livre suivant. J. Feldman, G. Lagneau, B. Matalon, *Moyenne, milieu, centre. Histoire des usages*, Édition de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales, 1991.

PROLONGEMENTS ENVISAGEABLES DE LA SÉANCE EXPÉRIMENTALE AVEC LES ÉLÈVES

Évaluation empirique de la durée de l'oscillation et de la dispersion des valeurs mesurées.

La valeur recherchée se trouve de façon quasi certaine entre les deux valeurs extrêmes mesurées²¹¹. Autrement dit la probabilité de trouver la valeur de la durée de l'oscillation entre les deux valeurs extrêmes est donc à peu de chose près égale à 1 (un). En revanche, plus on réduit l'intervalle, plus faible est la probabilité d'y trouver la valeur recherchée. Il est donc impossible d'évaluer la durée de l'oscillation sans préciser le degré de certitude de la situer dans un domaine donné²¹². L'extension du domaine peut être choisie arbitrairement. La probabilité de trouver cette valeur dans un intervalle donné (dit "de confiance") se calcule empiriquement en faisant le rapport entre le nombre de valeurs trouvées dans l'intervalle choisi et le nombre total de valeurs mesurées. D'après cette définition, la probabilité est d'autant plus petite que l'intervalle est réduit. L'examen de la forme de la distribution des valeurs expérimentales permet de comprendre comment optimiser la réponse. La forme en cloche de la distribution entraîne que l'on peut ne garder que le tiers central de l'extension du domaine et, malgré cela, conserver une probabilité voisine de 2/3 (et non 1/3 seulement) d'y trouver la valeur recherchée.

Toutes les situations mettant en œuvre des activités de mesure conviennent pour comprendre qu'il est impossible de donner un résultat unique avec une certitude absolue, mais que l'on peut, en revanche, évaluer la probabilité de trouver le résultat dans un domaine déterminé arbitrairement. Cela se fait soit par un simple comptage soit par une opération d'intégration comme nous le verrons plus loin.

♣²¹³ Finalement un résultat de mesure comporte trois nombres : la moyenne qui est une estimation de la valeur v de la grandeur cherchée et la probabilité p de trouver la valeur v dans le domaine d . La probabilité p dépend de l'extension du domaine qui est arbitrairement choisie en fonction du degré de certitude que l'expérimentateur veut assurer au résultat ; plus le domaine est étendu plus le résultat est sûr, mais moins il est précis. La façon d'exprimer le résultat dépend du problème à résoudre. Ces notions suffisent pour que les étudiants comprennent les fondements des théories statistiques. De plus elles leur permettent de repérer les informations manquantes lors de la publication des résultats des sondages d'opinions, par exemple. Généralement, seule est mentionnée la moyenne v , mais aucune information directe n'est fournie concernant p et d . ↑

²¹¹ Les fluctuations statistiques des bornes de la distribution ne comptent pratiquement pas.

²¹² C'est cette information en particulier qui manque lorsque les médias donnent les résultats des sondages, c'est dire l'importance de l'acquisition d'une telle notion.

²¹³ Les paragraphes qui contiennent du formalisme mathématique sont signalés par un signe. Tous ceux que les expressions mathématiques inquiètent peuvent éviter de les lire sans perdre la substance du raisonnement.

Évaluation de la durée de l'oscillation par la théorie statistique. Jusqu'ici toutes les évaluations de la durée de l'oscillation portaient directement sur les valeurs mesurées. Comment la théorie statistique intervient-elle ? Elle fournit une description formelle des distributions expérimentales. Dans l'expérience faite en classe, les chronomètres étaient tous différents, les élèves n'étaient pas tous en face du dispositif, il est donc raisonnable de penser que les erreurs commises lors des mesures étaient aléatoirement réparties. Dans de telles conditions, qui sont relativement fréquentes, la répartition des valeurs mesurées est assez bien décrite par une courbe théorique appelée distribution de Gauss²¹⁴.

♣ Le calcul de la distribution de Gauss²¹⁵ et son traçage ne fait intervenir que deux grandeurs :

- la valeur moyenne $\mathbf{m}$ ²¹⁶ des mesures, qui est un estimateur de la valeur de la grandeur cherchée ;
- l'écart type σ ²¹⁷, qui est un estimateur de la dispersion des valeurs mesurées.

♣ Le calcul de la probabilité $\mathbf{p}(\mathbf{d})$ de trouver la valeur recherchée $\mathbf{v}$ dans un domaine $\mathbf{d}$ fixé arbitrairement ne se fait plus, comme précédemment, par un simple comptage, mais par une opération équivalente, qui consiste à faire une intégration en utilisant la distribution de Gauss. Le résultat se lit dans des tables²¹⁸.

En conclusion la comparaison de la forme de la courbe théorique avec la distribution des valeurs mesurées, nécessite d'injecter les valeurs expérimentales dans l'expression de la distribution de Gauss. Il est donc impossible de se passer de la mesure !

²¹⁴ Notons incidemment que le respect du caractère aléatoire des erreurs de mesures interdit de faire le tri proposé par les élèves.

²¹⁵ La distribution de Gauss s'écrit de la façon suivante en fonction des paramètres expérimentaux.

$$P(x, m, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - m}{\sigma} \right)^2 \right].$$

Elle représente la distribution des densités de probabilités de

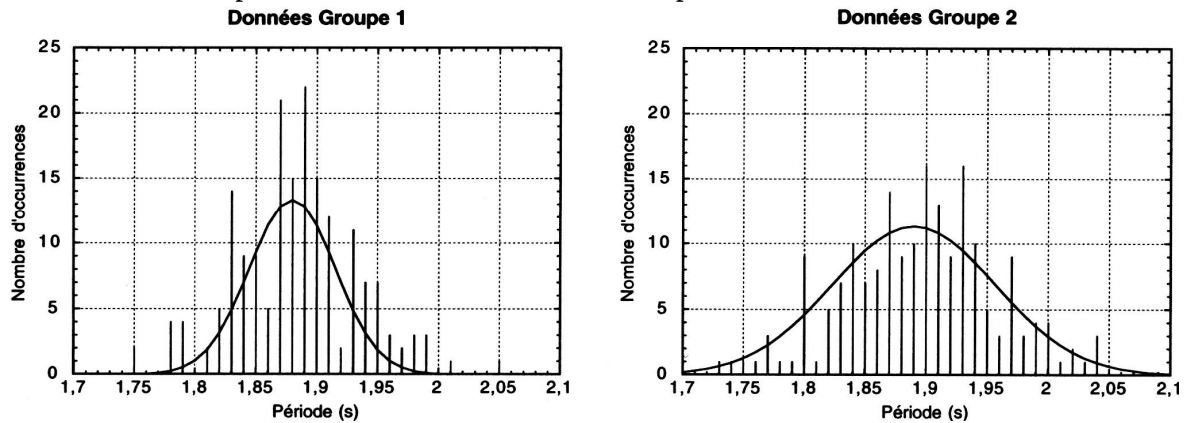
trouver une valeur x . m représente la moyenne des valeurs mesurées et σ l'écart type.

²¹⁶ Si m_i désigne une des valeurs mesurées parmi N mesures au total, la valeur moyenne $\mathbf{m}$ se calcule en faisant la somme de toutes les valeurs mesurées m_i divisé par N . $m = \frac{\sum m_i}{N}$

²¹⁷ L'écart type σ est la racine carrée de la variance, laquelle est égale à la moyenne du carré des écarts des valeurs mesurées à la moyenne. Les 18 élèves du groupe 1 ont mesuré 180 valeurs. La moyenne $m_1 = 1,88$ seconde, l'écart type $\sigma_1 = 0,05$ seconde. Les 19 élèves du groupe 2 ont mesuré 190 valeurs. La moyenne $m_2 = 1,89$ seconde, l'écart type $\sigma_2 = 0,07$ seconde.

²¹⁸ La description des opérations qui permettent de comparer les valeurs expérimentales à une courbe théorique unique ne sera pas développée ici. Cette opération porte le nom de condition de «normalisation.»

L'expression de Gauss fait partie d'un ensemble de distributions théoriques susceptibles de décrire des résultats expérimentaux ; dès lors nous pouvons nous demander si elle convient bien dans notre cas. Cette question est trop compliquée à résoudre pour faire partie d'un programme de seconde, mais elle pourrait fort bien être introduite en première année de l'Université.



La figure 5 représente la superposition des courbes théoriques et des histogrammes pour chacun des groupes.

L'allure des graphiques paraît intuitivement acceptable : les pics et les creux représentant les valeurs mesurées se répartissent harmonieusement de part et d'autre des courbes théoriques, ce qui provoque une sensation esthétique satisfaisante.

♣ Un argument qui peut sembler plus sérieux, mais qui n'est pas forcément plus convaincant, consiste à remarquer que la probabilité théorique de trouver la valeur recherchée dans l'intervalle 2σ ²¹⁹ vaut théoriquement 0,68% et qu'elle diffère peu des 0,66% que nous avons trouvés empiriquement par le comptage décrit précédemment. La correspondance entre les deux valeurs milite en faveur de la validité de la description de la répartition des valeurs mesurées par une gaussienne.

L'ensemble des opérations que nous venons de décrire traduit une nouvelle caractéristique fondamentale de la démarche expérimentale :

Un traitement efficace de l'information nécessite une réduction de l'information.

Réduire 180 valeurs à 2 seulement, apparemment quelle perte! Est-ce aussi grave qu'il y paraît au premier abord ? Curieusement, le profil de la distribution de Gauss, construite à partir des deux seules valeurs de la moyenne m et de la dispersion σ , permet de restituer une grande partie de l'information que nous pouvions croire perdue, comme l'illustre la figure 6. Ceci a d'innombrables applications pratiques.

²¹⁹ C'est-à-dire dans un intervalle d'étendue σ de part et d'autre de la valeur moyenne, ce qui correspond à peu près au tiers central.

Ne comportant que les seuls caractères pertinents pour atteindre les objectifs fixés, la modélisation d'une situation expérimentale correspond obligatoirement à une opération de réduction. La diminution de la quantité d'informations consiste à ne retenir que celles qui sont utiles. Il en résulte une augmentation de l'efficacité de la démarche.

En fin de comptes, ni les valeurs expérimentales ni leur traitement par la théorie statistique ne permettent de "déterminer" les valeurs recherchées. Un dispositif aussi performant que la cellule photoélectrique donne un résultat ayant une dispersion si faible qu'il redevient possible d'imaginer que la valeur de la durée de l'oscillation est effectivement déterminée. Ce serait une illusion de profane. Un physicien donne toujours un résultat d'expérience en tenant compte de la précision obtenue. Pour ce faire, il l'exprime avec exactement le nombre de chiffres significatifs²²⁰ nécessaire. Il n'hésite pas à écrire qu'une durée vaut 2,00 secondes, par exemple. Cela signifie qu'il est certain du nombre écrit et que les incertitudes portent sur les chiffres suivants, le zéro jouant ici le rôle d'un chiffre ordinaire²²¹.

La description des résultats expérimentaux par une gaussienne fournit l'argument qui manquait pour choisir entre la valeur la plus fréquente ou la moyenne qui faisait débat entre les élèves. C'est la valeur moyenne qui intervient dans l'expression théorique et, de plus, elle est facilement calculable, contrairement à la valeur la plus fréquente qui doit être lue sur un histogramme et qui varie d'un histogramme à l'autre. Les calculettes modernes comportent des programmes qui fournissent la valeur moyenne à partir des valeurs mesurées.

Évaluation théorique de la durée de l'oscillation. Il reste à voir la relation entre les données expérimentales et la valeur théorique tirée d'une modélisation du fonctionnement du ressort. Cela devrait compléter l'initiation à la démarche expérimentale.

Rappelons que les élèves avaient exprimé l'idée d'avoir recours à une « formule » pour obtenir la valeur de la durée de l'oscillation. Cette pensée est suffisamment répandue pour l'analyser, d'autant qu'elle permet d'explorer quelques propriétés des représentations.

Comment procéder pour décrire théoriquement la durée d'une oscillation ? Il faut modéliser le fonctionnement du ressort. Contrairement à la durée d'une oscillation du pendule simple dont nous connaissons bien l'expression mathématique, celle du ressort à boudin ne peut être approchée que par des expressions empiriques plus ou moins satisfaisantes. En effet, le ressort « idéal » ne peut pas représenter de façon raisonnable le ressort matériel dont la masse est de l'ordre de deux à trois cents grammes. Une telle situation présente l'avantage de nous préserver

²²⁰ Le nombre de chiffres significatifs est le nombre de chiffre écrit et non le nombre de chiffres après la virgule.

²²¹ Ces précisions, que d'aucuns jugeront évidentes, sont rendues nécessaires par le fait que certains programmes d'enseignement assisté par ordinateur comportent des confusions regrettables.

de tomber dans des habitudes de pensée dont nous n'avons même plus conscience.

Comment trouver une loi décrivant la durée des oscillations du ressort ? Évidemment il faut commencer par chercher dans la bibliographie si d'autres n'ont pas déjà résolu la question. *Le Bulletin de l'Union des Physiciens* fournit un certain nombre de relations empiriques qu'il est possible de tester.

♣ Supposons que les élèves choisissent une loi que nous noterons $T(c)$. Que doivent-ils faire pour calculer la valeur théorique T de la durée de l'oscillation du ressort particulier utilisé au cours de l'expérience ? La loi exprime une relation algébrique entre la caractéristique de l'événement T et l'ensemble des caractéristiques matérielles du dispositif (notées c). La relation $T(c)$ décrit la durée des oscillations de tous les ressorts du même type. Pour trouver $T(c)$, il faut non seulement rechercher les caractéristiques matérielles pertinentes c (ce pourrait être : la masse, la longueur, le diamètre des spires, la nature du métal du ressort etc.), mais aussi la forme algébrique dans laquelle elles s'inscrivent. L'expression mathématique que prend la relation $T(c)$ dépend du degré de précision de la description souhaitée. Quoi qu'il en soit, la modélisation d'une situation expérimentale ne peut jamais comporter un ensemble complet de caractéristiques permettant de décrire le phénomène réel, tel qu'il se produit. D'où la loi épistémique suivante.

L'écart, plus ou moins grand, entre une situation expérimentale et sa modélisation est inévitable. En conséquence, la valeur « vraie » d'une grandeur physique est tout aussi inaccessible par la théorie que par l'expérience.

♣ Supposons que les élèves aient trouvé une équation algébrique $T(c)$ satisfaisante pour décrire la durée des oscillations des ressorts. Est-il possible, comme les élèves le croient, de trouver la valeur vraie de la durée de l'oscillation du ressort utilisé dans l'expérience uniquement par le calcul, en restant confiné dans le monde théorique ? Pour obtenir la valeur théorique T_t de la durée de l'oscillation du ressort utilisé, les élèves doivent introduire les valeurs particulières c_m des caractéristiques matérielles du ressort utilisé dans l'expression de la loi générale $T(c)$.

Et comment connaître les valeurs c_m sinon en les mesurant ? Impossible d'y échapper. La relation permettant de calculer T_t peut s'écrire, en tenant compte de toutes les indications précédentes sous la forme $T_t = T(c_m)$. L'ajustement du modèle théorique se fait en choisissant l'expression algébrique $T(c)$ qui donne la valeur théorique la plus proche de la valeur mesurée pour les valeurs c_m du ressort

Le discours dogmatique ne permet pas de faire la distinction entre toutes ces différentes valeurs. La preuve en est donnée par de nombreux textes d'exercice où un seul symbole, $T(c)$, désigne à la fois la loi générale valable pour tous les dispositifs et la valeur particulière pour un dispositif donné²²².↑

²²² Représenté ici par $T_t = T(c_m)$.

La recherche de la valeur théorique donne aux élèves la possibilité de comprendre pourquoi il n'existe pas de résultat miracle.

La théorie fournit les formes algébriques des lois qui décrivent les événements auxquels participent les objets. Le résultat de la prédiction de l'évolution d'un système particulier nécessite d'introduire les valeurs des caractéristiques matérielles du système examiné dans la loi générale.

La modélisation peut aussi être complétée par l'exploration de l'extension du domaine de validité de la relation théorique adoptée. Ainsi le ressort s'arrêtait au bout d'une dizaine de minutes. Il est clair que parler d'isochronisme des petites oscillations au-delà d'un délai raisonnable n'a pas de sens. De même la durée des oscillations risque d'être modifiée si le ressort est tiré hors de ses limites d'élasticité. Finalement :

Ni la valeur théorique calculée ni la valeur mesurée n'atteignent la valeur vraie de la grandeur recherchée, même si l'évolution des techniques permet de l'approcher avec une très grande précision. Obtenir la valeur vraie reste un mythe.

Toutes les activités qui se rapportent à la recherche d'une loi décrivant des phénomènes perceptibles apportent aux élèves une information sur l'articulation des différentes activités pratiquées dans une démarche expérimentale, ce qui fonde une formation de nature méthodologique. Il faut que les élèves soient mis en situation d'élaborer par eux-mêmes les concepts et les lois pour en percevoir le rôle et les limites.

Notre expérience n'a pas été décrite pour être reproduite telle quelle dans l'enseignement. Elle vise seulement à fournir les informations permettant de construire des séquences différentes dont le principe reste le même quel que soit le dispositif expérimental utilisé.

COMMENTAIRES

Une interrogation sur le sens des mesures. Il n'y a rien d'étonnant à ce que les activités suscitées par une interrogation sur le sens des mesures soient particulièrement bien adaptées à une initiation à la démarche expérimentale. En effet les mesures définissent les grandeurs physiques ; elles font donc intrinsèquement partie de leur élaboration ; selon la définition du vocabulaire international des termes de métrologie, une grandeur mesurable est un attribut²²³ d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement.

Comme nous l'avons vu, proposer aux élèves d'effectuer des mesures et de réfléchir sur leur signification est un moyen efficace pour leur faire analyser les rôles respectifs de l'expérience et de la théorie dans la construction des connaissances. Quel que soit le domaine exploré, la

²²³ Je préfère dire la « caractéristique » d'un phénomène plutôt que son attribut.

confrontation entre les résultats de mesure et les résultats des modélisations participe à la construction des sciences. Or les universitaires refusent d'introduire le traitement statistique des mesures au programme de première année d'université. C'est d'autant plus regrettable que le traitement statistique constitue une connaissance générale exportable, aussi utile aux physiciens qu'à ceux qui exercent de nombreuses autres professions.

Amorcer la curiosité des étudiants. Comme la démarche expérimentale ne se termine jamais, il faut renoncer à répondre à toutes les questions qui vont émerger. De plus, d'après le modèle proposé, il est rarement possible de donner des réponses directement affirmatives à une question. Refuser ces limitations pour des raisons pédagogiques implique de renoncer à une initiation à la démarche expérimentale. En revanche, rien ne s'oppose à ce que l'enseignant reconnaisse la pertinence des questions posées par les élèves, ce qui présente l'avantage d'amorcer puis d'entretenir leur curiosité. Au lieu d'être pris pour un obstacle, le fait de différer les solutions peut très bien être accepté comme un stimulant, un moyen de créer le suspens et de soutenir l'intérêt pour le feuilleton sans fin que constitue la construction de la connaissance en physique.

Amorcer la curiosité des étudiants, au lieu de la satisfaire, permet à l'enseignant d'assumer le fait de ne pas répondre à toutes les questions. Il s'agit d'une attitude qui n'est pas spontanée et les élèves, habitués à recevoir « la connaissance », restent difficilement sur leur faim.

Voici comment se termina notre expérience. Les élèves devaient dire s'ils avaient manipulé sur le même dispositif ou pas. À la fin de la deuxième séquence, faute d'avoir construit des critères permettant de les mettre tous d'accord, les opinions restent partagées et il n'y a toujours pas de réponse définitive. La sonnette se fait entendre, le cours est terminé. Au lieu de partir, les élèves se dirigent vers le professeur pour lui demander ce qu'est finalement la « bonne » réponse. Leur professeur, habitué à répondre, dit qu'il s'agissait du même dispositif pour les deux groupes. Ceux des élèves dont il conforte les idées sortent en hurlant de joie, les bras levés, à l'instar des supporters d'une équipe de foot gagnante !

CONCLUSION

*Il dit non avec la tête
mais il dit oui avec le cœur
il dit oui à ce qu'il aime
il dit non au professeur*

Jacques Prévert

Le modèle de la démarche expérimentale présenté n'est, pas plus qu'un autre, universel mais il permet de bien percevoir les caractéristiques et les fonctions des entités qui le composent. Il restitue à la théorie son véritable rôle : elle ne « gouverne » pas le monde, elle le rend prévisible. Le modèle rend compte de la difficulté qu'il y a à représenter la «réalité» et cela concerne de nombreux champs d'activités. Combien d'historiens, d'écrivains, de peintres se plaignent de se heurter à l'irréductible distance séparant leur sujet et la description qu'ils veulent en faire. Le modèle, en permettant de faire une distinction claire entre le domaine théorique et le domaine expérimental, montre qu'il ne sert à rien de déplorer qu'ils ne puissent pas être identiques ; le reconnaître et l'accepter permettent de créer les conditions de décupler l'efficacité des différentes sortes de représentation. C'est ce que Magritte a parfaitement illustré en peignant de façon apparemment très «réaliste» une pipe dans un tableau portant la mention : «Ceci n'est pas une pipe. »

Mon modèle devrait être utile aux chercheurs de toutes les sciences qui voudraient faire évoluer leurs analyses vers plus de scientificité. La composante épistémologique de la construction des connaissances les concerne tout particulièrement.

Mon modèle permet de savoir comment procéder pour enseigner une démarche expérimentale. Est-il si important de le faire? Un tel enseignement est particulièrement formateur comme nous l'avons montré à plusieurs reprises. De plus, le citoyen a besoin de connaître le fonctionnement de la science pour évaluer la pertinence des arguments concernant la gestion des problèmes nouveaux que nos sociétés doivent affronter. Ainsi est-il bon de savoir qu'aux limites de la connaissance, les «scientifiques» peuvent ne pas être d'accord entre eux ; il faut donc se méfier de l'avis des «experts» qui se prononcent avec assurance ; ils ne peuvent pas connaître la «vérité» et les diagnostics qu'ils prononcent sont parfois le produit de leurs idéologies personnelles ; il serait donc utile que l'honnête homme du XXI^e siècle soit capable de déduire de leur discours une idée précise de leurs compétences. Prenons un exemple. Au tout début des années quatre-vingt, l'augmentation significative et continue du nombre de certaines maladies telles que le sarcome de

kaposi, les candidoses, les pneumonies, a mis en alerte les premiers observateurs américains du Centre for Disease Control. Quelques semaines après les premières observations des manifestations de ces maladies, ils étaient déjà convaincus d'être en présence d'un grave danger. Or, d'après ce que relate Mirko D. Grmek²²⁴, ils ont eu les plus grandes difficultés à faire partager leur inquiétude malgré la validité de leurs arguments et ils ont mis près de deux ans à convaincre les autorités concernées. Il s'agissait du sida.

Les «spécialistes » qui défendent l'usage des aliments génétiquement modifiés, prétendent que leur nocivité sur la santé n'a pas été démontrée (ils ajoutent prudemment, mais sans insister : jusqu'à présent...) ; c'est, bien évidemment, leur innocuité qui devrait l'être, et il faudra attendre des années avant d'y parvenir, si c'est possible, ce dont il est légitime de douter. Un citoyen devrait être apte à juger de la pertinence des arguments qui dénie tout danger au stockage des déchets nucléaires, aux téléphones portables, etc. Il devrait aussi être capable de se demander comment sont élaborés et validés les modèles économiques qui fondent les décisions des gouverneurs des Banques centrales ou des dirigeants du Fond monétaire international.

Nombreux sont les domaines d'activité où la recherche d'une prévision efficace serait utile à la société. Cela se produit particulièrement en politique où les décisions doivent être prises en fonction d'objectifs précis. Apprendre à s'informer, à faire des choix qui ont des chances d'aboutir, savoir reconnaître que certaines options sont idéologiques, pouvoir exiger de les confronter à leurs résultats pratiques dans le monde «réel » serait utile, alors que des opinions sont souvent présentées comme ayant des résultats garantis, avant même d'avoir été testées. Les gouvernements qui doivent journallement agir sur le réel seraient bien avisés d'avoir un regard critique sur les méthodes qu'ils utilisent pour anticiper les conséquences de leurs choix. Les enjeux sociaux d'une véritable formation à la démarche expérimentale sont donc considérables.

Reste à évoquer une question cruciale ; est-il possible de décider d'enseigner la démarche expérimentale sans aucune précaution ? Il faut bien prendre conscience qu'un tel enseignement ne peut pas se faire au rabais ; il nécessite un niveau de compétence et de qualification correspondant à une pratique effective de la recherche. Et encore cela n'est pas suffisant : il faut bien se résoudre à constater que, même effectué par des chercheurs, l'enseignement universitaire reste, lui aussi, très dogmatique. Il faut donc bien réfléchir avant d'imposer des modifications susceptibles de générer une inquiétude inhibitrice chez les enseignants. Leurs conceptions ne changeront pas miraculeusement du jour au lendemain. Les étudiants tireront probablement plus de profit d'un professeur profondément convaincu que les grandeurs physiques existent et que les lois sont des vérités premières ; que de celui qui voudrait l'enseigner en ignorant les tenants et les aboutissants de la démarche expérimentale.

²²⁴ M. D. Grmek, *L'histoire du sida*. Payot. 1985.

Cet ouvrage s'adresse aux nombreux professeurs de physique qui aiment leur métier et qui désirent l'exercer de leur mieux. Sont particulièrement concernés les enseignants chercheurs des universités. Nombre d'entre eux souhaitent trouver les moyens de faire progresser leurs étudiants et n'y parviennent pas. En principe, s'ils font de la recherche, ils ont les connaissances requises pour faire évoluer leur pratique enseignante. C'est une des conditions nécessaires pour commencer à sortir des différents cercles vicieux décrits dans le troisième chapitre, mais elle ne suffit pas : ils doivent accepter de réviser leurs habitudes de pensée. Trouveront-ils l'argumentation développée ici suffisamment convaincante pour entreprendre enfin une réforme de fond ? Même en admettant que la description des objectifs des activités expérimentales soit acceptée, bien des obstacles resteraient encore à franchir. Pratiquer une démarche expérimentale n'est pas de tout repos, et l'enseigner peut donner le sentiment d'être en danger : personne n'est certain à l'avance de parvenir à résoudre des difficultés imprévues. Pour faire fonctionner une expérience, il faut se soumettre à des contraintes draconiennes ; si tout ne marche pas, rien ne marche. C'est difficilement supportable. Seul un travail d'équipe peut aider à surmonter l'inquiétude individuelle résultant d'une telle situation. Pourquoi les enseignants prendraient-ils de tels risques ? De plus, la démarche expérimentale ne se termine jamais, ce qui entraîne une gestion pédagogique inhabituelle. Dernier obstacle à vaincre : les enseignants n'ont aucune raison de renoncer au statut gratifiant de détenteur du savoir pour l'échanger contre celui, plus modeste, de constructeur de connaissances. Il s'agit là d'un métier différent de celui qu'ils pratiquent habituellement. Il faut bien évaluer le sens profond des résistances qu'une telle situation pourrait générer. Pour que des enseignants acceptent de participer à une nouvelle entreprise, ils doivent savoir ce qu'elle implique ; il est donc indispensable de leur donner suffisamment d'éléments de réflexion, pour que ceux qui le désirent puissent faire librement des choix raisonnés.

Question décisive : compte tenu de tous les obstacles que nous venons d'évoquer, une révision des habitudes est-elle bien nécessaire ? Pourquoi ne pas continuer à suivre la tradition et cantonner l'enseignement de la physique au monde théorique ?

Avant d'éviter de prendre en compte mes analyses, il faudrait tenir compte du fait que le discours uniquement théorique est un discours auto-référent, que rien d'extérieur ne vient réguler. Raisonner seulement dans un univers clos sur lui-même entraîne d'inévitables dysfonctionnements qui ne sont pas moins néfastes du fait que nous y sommes tellement habitués que nous ne les voyons plus. Ainsi le monde, tel qu'il est enseigné, est peuplé d'entités théorisées participant à des événements eux-mêmes théorisés dont l'étudiant peut, à juste titre, se demander à quoi ils peuvent servir. Si l'enseignement continuait ainsi, les règles de représentation du monde expérimental dans le monde théorique resteraient inexplicables. Si l'enseignement de la physique n'évolue pas, il risque d'être perçu comme celui d'une science morte qui n'a plus aucun intérêt du

point de vue de la formation des étudiants. Cependant des «experts²²⁵» ont parfois été jusqu'à préconiser la suppression des travaux pratiques en premier cycle universitaire. Ils auraient volontiers confié l'enseignement à des agrégés dont la formation, rappelons-le, ne comporte aucune recherche. De tels projets resurgissent fréquemment. Régulièrement des décideurs, effrayés *a priori* par le coût des équipements des laboratoires, regrettent que l'enseignement de la physique ne puisse se concevoir sans attribuer des crédits aux travaux expérimentaux. Or il est possible de minimiser les dépenses tout en augmentant l'efficacité pédagogique. Il est facile, par exemple, de se passer de la table à coussin d'air, luxueux dispositif, non seulement inutile mais, comme nous l'avons établi, nuisible. Une véritable pratique de la démarche expérimentale ne nécessite pas des montages très élaborés ; nous avons vu qu'un simple ressort à boudin, qui ne coûte que quelques euros, peut occuper une classe d'élèves pendant longtemps pour peu que la situation soit rigoureusement exploitée.

En fin de compte, il s'agit aussi de faire cesser l'ennui des maîtres et des élèves en échappant au dogmatisme dans lequel l'enseignement se laisse souvent piéger. Le physicien Jean Bornarel exprimait déjà dans son rapport l'hypothèse selon laquelle la physique enseignée ne correspondrait pas à celle qui passionne les chercheurs, et il posait la question suivante : « Quelle énigme captivante : ce que l'on enseigne dans les lycées, les CPGE²²⁶, les Universités sous l'appellation «physique» n'en serait pas. Cette physique passionnante, dont on parle, dont on rêve, serait cachée, dissimulée, pour des raisons ignorées. Voilà, comme dit le physicien parfois, une question intéressante et ouverte²²⁷. » C'est bien cette énigme que j'ai voulu résoudre, et ce sont bien ces raisons ignorées que j'ai tenté d'élucider. Tant qu'il fera l'impasse sur les questions que nous nous posons sur le monde, tant que l'enseignement ne précisera pas qu'il vise à décrire l'évolution du monde, tant qu'il n'indiquera pas les moyens qu'il se donne pour atteindre ces objectifs, ce qui est enseigné ne sera pas cette physique passionnante et formatrice dont les chercheurs se grisent et qu'ils voudraient bien trouver les moyens de partager. Espérons que l'élève de Prévert pourra un jour approuver le professeur sans réticence.

Finalement la recherche de la «particule de Dieu» ou celle de la «valeur vraie» est forcément, à l'instar de celle du Graal, une quête sans fin ; ce qu'on acquiert en chemin apporte plus que ce qu'on espère lorsqu'on veut atteindre un objectif insaisissable.

²²⁵ Autoproclamés comme il se doit !

²²⁶ CPGE, classes préparatoires aux grandes écoles.

²²⁷ J. Bornarel *op. cit.* p. 8.

Bibliographie

- Marcelo Alonso, Edward J. Finn. *Physics*. Addison-Wesley. 1992.
- J.-C. Bacri, J. Berger, F. Lenoir, *Initiation à la physique expérimentale en D.E.U.G. A (S.S.M.) 1re année*, Bulletin de la SFP **84** avril 1992.
- S. Berger, *Made in monde*, Seuil. 2006.
- P. Bergé, «Rapport de la mission sur l'enseignement de la physique», *Perspective et avenir*, octobre 1989.
- Berkeley Cours de mécanique volume 1. Armand Colon. 1984.
- Bulletin officiel, n° hors série du 24-09-1992.
- Bulletin officiel, n° spécial 3-9 juillet 1987.
- N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Folio 1991.
- B. De Boysson-Bardies, *Comment la parole vient aux enfants*, Odile Jacob. 1996.
- D. Boorstin., *Les Découvreurs*, Seghers, 1986.
- J. Bornarel, «L'enseignement de la physique en premier cycle universitaire», *Bulletin de la SFP (de la Société Française de Physique)*, supplément au n° 81, 1991.
- Débat du 16 novembre 1992, "La physique dans tous ses états", *Bulletin de la Société française de Physique*, n° 91, 1993.
- J. Brenasin, *Comment surmonter les difficultés rencontrées par l'enseignement de la physique ?* Bulletin de la S.F.P. N° 108 ; 1997.
- J. de Courville-Brenasin, G. Joyez, D. Tchoubar, *Méthode d'ajustement automatique entre courbe expérimentale et calculée dans les diagrammes de diffraction de poudre. Cas des solides à structure lamellaire*. J. Appl. Cryst. (1981) **14**, 17-23.
- L. De Broglie, *Savants et découvertes*, Albin Michel, 1956.
- G. Bruhat, *Cours de physique générale, Mécanique*. Masson, 1967.
- E. Cassirer, *Substance et fonction*, Les éditions de minuit, 1977.
- A. F. Chalmers, *Qu'est-ce que la science ? Récents développements en philosophie des sciences : Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend*. Edition de la découverte. 1987.
- G. Charpak, *La main à la pâte Les sciences à l'école primaire*, Flammarion. 1996. p.109.
- Y. Chevallard, *La transposition didactique du savoir savant au savoir enseigné*, La pensée sauvage, 1985.
- S. M. Coehlo, 1993. *Contribution à l'étude didactique du mesurage en physique dans l'enseignement du secondaire : description et analyse de l'activité intellectuelle et pratique des élèves et des enseignants*. Thèse.
- M. Crahay, D. Lafontaine, *L'art et la science de l'enseignement*, Belgique : édition Labor, 1992.
- B. Cyrulnik, *Les nourritures affectives*, Éditions Odile Jacob, 1993.

- Descartes, *Principes de Philosophie*. 2^{ème} Partie, loi des chocs. Réédité dans La Pléiade 1983.
- P. Duhem, *La théorie physique*. Vrin 1981 réédité en 1993.
- M. Felden, *Le modèle géométrique de la physique*. Masson 1992.
- M. Felden, *Et si l'homme était seul dans l'univers*. Grasset. 1994.
- J. Feldman, G. Lagneau, B. Matalon, *Moyenne, milieu, centre. Histoire des usages*, Édition de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales, 1991.
- P. Fleury et J.-P. Mathieu, *Mécanique physique*, Eyrolles, 1961, p. 56.
- R. Feynman, *La Nature des lois physiques*, Marabout université, 1970.
- R. Feynman, *Le cours de physique, Mécanique 1*. InterEdition. 1986.
- L. Foucault, "Démonstration physique du mouvement de rotation de la terre au moyen du pendule", *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, T. XXXII, n°5, 1851.
- Galilée, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, Puf
- W. Gibbs et D. Fox, *L'enseignement des sciences*, Pour la Science N° 265. Novembre 1999.
- J. Gleick, *Le génial professeur Feynman*. OdileJacob. 1994.
- M. D. Grmek, *L'histoire du sida*. Payot. 1985.
- M. D. Grmek, *La première révolution biologique*, Payot, 1990.
- M. D. Grmek, *Le legs de Claude Bernard*. Fayard 1997.
- A. Guillon, Travaux pratiques de physique en DEUG et démarches scientifiques, *3ème Séminaire National de Recherches en Didactique des Sciences Physiques*, 1993.
- I. Hacking, *Concevoir et expérimenter* Christian Bourgois 1989.
- F. Halbwachs, *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Zeihls 1974.
- S. Haroche, J.-M. Raimond, M. Brune, « *Le chat de Schrödinger se prête à l'expérience.* » La Recherche 301 septembre 1997.
- W. Heisenberg, *La Partie et le tout*, 1969, réédité chez Champs Flammarion en 1990.
- S. Johsua & J.-J. Dupin, *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Puf, 1993.
- A. Koyré, *Études newtoniennes*. Gallimard. (1968).
- T. Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*. 1962 Réédité Flammarion 1983.
- M. Larochelle & J. Desautels, *Autour de l'idée de sciences*, Itinéraires cognitifs d'étudiants, De Boeck, 1992.
- L. Lederman, et Dick Teresi, *Une Sacrée particule* Odile Jacob, 1996, p. 34.
- G. Lemeignan et A. Weil-Barais, "L'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie", *Rapport de fin de contrat LIREST - INRP*, 1990, p. 7.
- G. Lemeignan, A. Weil-Barais, *Construire des concepts en physique*, Hachette, 1993.
- S. Leys, *L'Ange et le cachalot*, Seuil, 1998.

- A. Marillier, "L'expérience du pendule de Foucault au Palais de la Découverte", *Revue du Palais de la découverte*, vol. 26, n° 258, 1998.
- R. Maynard, *Désaffection des étudiants pour la physique pour le nouveau millénaire ? Olympiades de la physique*. Centre national de documentation pédagogique. 1997.
- H. Miller, *Les livres de ma vie*, Gallimard, 1957. Réédité en 1994, p. 62.
- R. G. Newton, *Physics*. Princeton University Press. 2000.
- J. Perrin, *Les Eléments de la physique*, Albin Michel, 1929.
- J. Perrin, *Les Atomes*, Librairie Félix Lacan, 1913.
- Physical Science Study Committee, *La physique*. Dunod. 1970.
- M. Planck, *Autobiographie scientifique*, Champs Flammarion, 1960.
- É. Plé, *Transformation de la matière à l'école élémentaire : des dispositifs flexibles pour franchir les obstacles*. Aster N° 24 1997.
- K. Popper, *Conjectures and Refutations : the Growth of Scientific Knowledge*, Routledge and Kegan Paul-London, 1965. Hermann. 1990.
- K. Popper, *Le réalisme et la science*, Hermann, 1990.
- J.P. Pourtois & H. Desmet, *Épistémologie et instrumentation en sciences humaines*, Madraga, 1997.
- B. Pullman, *L'Atome*, Fayard. 1995, p. 189.
- H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*. Flammarion, 1968.
- I. Prigogine, *La fin des certitudes*. Odile Jacob. 1996.
- J. Roubaud, *Mathématique*, Seuil, 1997.
- J. Ruffié, *Naissance de la médecine prédictive*. Odile Jacob. 1993.
- Ch. Ruhla, *La physique du hasard*. Hachette. 1989.
- M. Ruhlen, *L'origine des langues*. Belin. 1997. p. 197.
- M. Saint-Georges, *Formation des professeurs de sciences physiques par la didactique*, thèse soutenue à H. Sinclair, I. Stambak, I. Lesine, S. Rayna Y. Simon, *Énergie et entropie*, Armand Colin, 1979.
- Y. Simon, *Mécanique et thermodynamique, Tomes 1 et 2*. Vuibert. À paraître.
- J. Treiner, *La réforme des programmes*, Pour la Science N° 264. Octobre 1999.
- l'Université Denis Diderot (Paris 7) en 1996.
- J. Ullmo, *La pensée scientifique moderne*. Flammarion 1969.
- L. Valentin, *L'Univers mécanique*, Hermann, 1995.

CHAPITRE 1	8
MODÉLISATION DE LA DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE	8
LA FONCTION DE LA DEMARCHE EXPERIMENTALE	9
LES PHASES DE LA DEMARCHE EXPERIMENTALE	9
La phase de questionnement.	9
La phase de recherche des réponses	11
La phase de validation des réponses	16
La dernière phase... et tout recommence	21
LES COMPOSANTES STRUCTURELLES DE LA DEMARCHE EXPERIMENTALE	22
Le monde expérimental	23
Le monde technique	29
Le monde théorique	30
Des mondes reliés	34
L'INVERSION ÉPISTÉMIQUE DES OBJETS DE CONNAISSANCE	35
À PROPOS DE LA METHODE UTILISEE DANS CE CHAPITRE	36
CHAPITRE 2	38
LA DISPARITION DU QUESTIONNEMENT DANS L'ENSEIGNEMENT	39
LES OBJETS D'ENSEIGNEMENT	42
Les événements enseignés	43
Les objets enseignés	45
LES ÉLÉMENTS DU MONDE THÉORIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT	50
Les modèles enseignés	50
Les grandeurs physiques enseignées	51
Les lois enseignées	61
À PROPOS DE LA MÉTHODE UTILISÉE DANS CE CHAPITRE	72

CHAPITRE 3	75
LES RÈGLES DU JEU DE L'ENSEIGNEMENT ET DE L'APPRENTISSAGE DE LA PHYSIQUE	75
LES ACTIVITES DEMANDEES AUX ETUDIANTS	75
Écouter les cours	76
Apprendre le cours	78
Manipuler en travaux pratiques	78
Résoudre des problèmes	81
Passer des examens	82
OBSTACLES À L'ÉVOLUTION DE L'ENSEIGNEMENT	83
Le statut du maître	83
Le volume des programmes	84
L'évaluation des connaissances	84
Le comportement des étudiants	86
Les conceptions des étudiants à la suite de leur formation universitaire	86
SUGGESTIONS POUR L'ENSEIGNEMENT	87
Comment faire évoluer le travail expérimental ?	87
Comment faire évoluer le travail théorique des étudiants ?	91
Comment rédiger les textes de problèmes ?	94
LES RÈGLES DE COMPORTEMENT	97
LES COMPÉTENCES DES ÉTUDIANTS	98
CHAPITRE 4	101
QUELLES CONCEPTIONS ÉPISTÉMOLOGIQUES FONDENT LE DISCOURS SUR LA CONNAISSANCE ?	104
La vérité	104
La réfutation	106
Les révolutions théoriques	109
L'abstraction	111
CONSÉQUENCES POUR L'ENSEIGNEMENT	113

L'alternance des choix stratégiques	113
Complémentarité des points de vue dogmatiques et empiriques	115
POINT DE VUE « FONCTIONNALISTE »	116
CHAPITRE 5	120
QUELQUES RECHERCHES SUR L'ENSEIGNEMENT DES TRAVAUX PRATIQUES	121
DESCRIPTION DES EXPÉRIENCES	124
PROLONGEMENTS ENVISAGEABLES DE LA SÉANCE EXPÉRIMENTALE AVEC LES ÉLÈVES	138
COMMENTAIRES	143
CONCLUSION	145
BIBLIOGRAPHIE	149