

Donner le goût des sciences avec l'histoire des sciences et l'épistémologie

Un exemple : pourquoi a-t-on eu besoin du concept d'énergie ?

Pour démarrer ma présentation, je voudrais citer l'exemple d'un grand pédagogue. Richard Feynman, physicien de premier plan (prix Nobel en 1965 pour ses travaux sur l'électrodynamique quantique) est aussi connu pour la grande clarté de ses cours mais surtout pour sa capacité à captiver son auditoire. Il faisait de ces enseignants qui racontent la science. Il utilisait l'histoire dans son enseignement de manière à la présenter comme une aventure.

Personnellement, les enseignants qui m'ont donné le goût de la chimie et sont ceux qui parlaient de son histoire. Loin du catalogue de réactions, ils ont su me convaincre que l'histoire de la chimie est une véritable enquête policière, et il serait temps qu'on l'enseigne comme telle. C'est donc une bonne nouvelle que les nouveaux programmes mettent fortement l'accent sur l'histoire des sciences et je vais essayer d'énumérer quelques bénéfices qui nous, enseignants, pouvons en tirer.

Pour cela, je m'appuierai principalement sur un exemple : l'histoire de l'énergie, qui occupe une place importante dans le programme de tronc commun en 1ère.

Une occupation stérile ?

Pourquoi faire de l'histoire des sciences ? Quel intérêt y a-t-il à aller déterrer des théories périmées, souvent fausses de notre point de vue ? A priori, on pourrait voir l'histoire des sciences comme un fétichisme un peu stérile pour les vieux livres.

Mais en réalité faire de l'histoire des sciences ce n'est pas s'intéresser à des sciences mortes, c'est tout le contraire : c'est parler de la science au moment où elle se fait, c'est montrer la connaissance qui se construit comme un processus dynamique et pas un bloc monolithique qui s'imposerait tout d'un coup. C'est montrer que la science c'est aussi des débats, des croyances, des controverses, et aussi beaucoup de passion. C'est d'ailleurs ce qu'on trouve au tout début du préambule du programme de première :

« L'histoire des sciences raconte une aventure de l'esprit humain ... »

Humain, c'est-à-dire imparfait, faillible. Les savoirs que nous transmettons ne sont qu'une tentative d'appréhender le réel. Ils sont appelés à évoluer, à être réfutés par ce que c'est comme ça qu'évolue la science.

En étudiant l'histoire on s'aperçoit à quel point l'image austère des savants est une construction. On y trouve multitude de personnages hauts en couleur, de gens plein de fantaisie, de passionnés. Je crois que c'est ce qui m'a rendu la science plus fréquentable.

1. Stimuler la curiosité

Pourquoi a-t-on eu besoin du concept d'énergie ?

L'intérêt de poser la question de cette manière est de stimuler l'intérêt des élèves en montrant qu'un concept scientifique ne tombe pas du ciel, on le construit pour répondre à un problème bien concret. Et c'est d'autant plus important de le faire qu'en soi l'énergie est un concept extrêmement abstrait.

En réalité, dans la physique d'aujourd'hui nous n'avons aucune connaissance de ce qu'est l'énergie. Pour nous, c'est « quelque chose qui se conserve » mais on ne peut pas en dire grand-chose de plus. C'est un invariant qui permet une mise en relation mathématique de grandeurs physiques.

Problème : si on aborde la question directement par cet angle, on risque très vite de perdre nos élèves ...

Un problème concret et très ancien

C'est là que l'histoire peut servir de déclencheur pour stimuler la curiosité. S'il est difficile de définir l'énergie, on peut au moins l'enraciner dans des choses très concrètes, des problèmes qui se posent depuis très très longtemps ...

Déjà, on peut commencer par rappeler que les premières sources d'énergies disponibles pour améliorer les conditions de vie étaient les efforts développés par les êtres vivants. L'énergie humaine bien sûr, puis au Néolithique, on commence à cultiver la terre et domestiquer les animaux pour effectuer certaines tâches. On pourrait bien sûr citer d'autres exemples : l'énergie du vent (bateau à voile, moulin à vent) de l'eau ou du feu.

Mais dans l'Antiquité, un pas très important a été franchi.

1^{er} siècle avant JC : machine d'Anticythère, premier calculateur analogique. Machine très sophistiquée, plus vieux mécanisme à engrenage connu. On n'en connaît pas l'inventeur, mais certains pensent qu'Archimède pourrait en être à l'origine.

Le pas important, c'est la construction des premières machines, dans le but d'automatiser certaines tâches ... ou simplement suppléer à nos propres défaillances, de faire des choses qu'on n'était pas capable de faire nous-même.

Il y a donc depuis longtemps des constructeurs de machines, et la science est née de question techniques, que l'on a quelque fois tendance à négliger, à mépriser, et qui n'apparaissent pas forcément toujours dans nos cours.

Héron d'Alexandrie : constructeurs de machines très célèbre, qui a toute sa place dans un cours de physique. Héron cherchait notamment à utiliser les propriétés physiques de la vapeur d'eau. Il inventa une machine appelée éolipyle, si on veut l'ancêtre de la machine à vapeur. C'est une expérience que l'on peut facilement reproduire avec peu de moyens avec des élèves et qui permet d'aborder de nombreux problèmes scientifiques. Autre exemple : la fontaine de Héron ...

Avènement de la mécanique

La Mécanique avec un grand M doit beaucoup à la petite mécanique, à celle des bricoleurs géniaux, des ingénieurs, des inventeurs. Au 17^e siècle il y a une mode de la construction d'automates, qui font beaucoup fantasmer et sont très présents dans l'imaginaire collectif. Or, c'est au même moment qu'on situe les débuts de la philosophie mécaniste avec Descartes, et également la naissance de la mécanique classique en tant que science.

Pour Descartes, expliquer un phénomène, c'est le ramener à des considérations de figures et de mouvements, c'est lui donner une **représentation spatiale**. Comprendre un phénomène c'est donner à voir son mécanisme. Pour Descartes, la science par excellence, c'est la géométrie. En fait tout est machine, jusqu'aux êtres vivants.

Et Dieu dans tout ça ? Justement, c'est ce que Descartes cherche à évacuer, il cherche à éliminer toute forme de finalisme et d'action à distance (scolastique) : seules les actions de contact sont tolérées. Dieu garde un rôle important, mais comme condition initiale : c'est lui qui met en route l'horlogerie ...

La physique newtonienne, la recherche d'un invariant

Newton, dans sa jeunesse avait beaucoup étudié Descartes. Mais il est aussi imprégné par une tradition occulte, c'est aussi un grand mystique, et c'est peut-être ce qui va lui permettre de faire une transgression très importante par rapport à Descartes : il va réhabiliter l'action à distance.

Mais dans le fond le projet reste le même : réduire l'ensemble des phénomènes à de la mécanique, sauf que celle de Newton est fondée sur des forces centrales. La méthode s'avère très efficace car elle permet de mathématiser les phénomènes et donc de les prévoir : mouvement des astres, etc.

Au 18^e siècle, la science est en grande partie newtonienne. Elle s'appuie très souvent sur l'attraction à distance, et sur une ontologie corpusculaire pour expliquer toutes sortes de phénomènes et de découvrir des permanences, des immuabilités dans les lois de la nature.

On en arrive à l'idée qu'il existe en mécanique un invariant, sauf qu'on n'est pas d'accord sur son expression : **querelle des forces vives**. Cette querelle oppose Leibniz aux cartésiens, puis aux newtoniens sur une question qui paraît simple en apparence : qu'est-ce qui se passe quand deux objets entrent en collision ?

- Pour les cartésiens, c'est la quantité de mouvement mv qui se conserve
- Pour Leibniz, c'est une grandeur qu'il appelle la force vive (**mais pas une force centrale**) mv^2

En réalité, ce n'est pas une simple querelle technique sur un exposant. Derrière cette opposition, ce qui se joue ce sont des présupposés philosophiques très différents.

- Descartes, puis Newton : nature morte, physique débarrassée des qualités. La matière n'est que de l'étendue. Les choses sont animées par des lois qui leurs sont extérieures. Monde totalement déterministe : la nature est une grande Machine.
- Leibniz : force immanente aux choses, mais son sens chez Leibniz n'est pas le même que chez Newton. La force vive est une activité contenue par l'objet en mouvement et cédée à un autre objet. La nature est une machine, mais une machine vivante. Il y a bien quelque chose qui se conserve dans la nature, que l'on peut appeler conventionnellement du nom de « force ». Pour certains, Leibniz est le premier philosophe à imaginer quelque chose comme l'énergie, et il inspirera les sciences dynamistes dont on parlera après.

Autre aspect important chez Leibniz :

Egalité de la cause et de l'effet.

On voit aussi qu'il est difficile, dans un premier temps, de comprendre ce qu'est une force, de la distinguer de la vitesse, et aujourd'hui de l'énergie.

2. Enrichir la culture du citoyen

Il faut insister sur le fait que la science fait partie de la culture, au même titre que la littérature, le théâtre, la peinture. Et surtout dans l'enseignement de tronc commun qui ne s'adresse pas forcément à de futurs scientifiques, mais néanmoins à des futurs citoyens qui auront à faire face à des enjeux scientifiques. Il faut réhabiliter la science dans un monde qui en a peur, qui s'en méfie.

Fin du 18^e début 19^e siècle : révolution industrielle, mutation technologique qui va complètement transformer la société, et les rapports humains. Le monde dans lequel on vit aujourd'hui en est encore l'héritier pour une grande partie.

- Cette révolution industrielle repose en grande partie sur la découverte de la « force motrice du feu » et la machine à vapeur, dont le premier modèle vraiment utilisable a été élaboré par James Watt. C'est le début du chemin de fer, mais aussi l'explosion de toutes sortes d'industries : textile, sidérurgie, etc.

C'est aussi l'époque où l'on commence à creuser le sol pour trouver du charbon, ressource qui devient un pilier de l'économie ; un peu plus tard ce sera l'or noir le pétrole, une ressource stratégique, qui sera l'enjeu de nombreux conflits... et ce n'est pas fini ...

Sur le plan scientifique, la chaleur pose des problèmes car elle est difficilement réductible à l'attraction newtonienne.

- Magnétisme : peut paraître plus anecdotique, mais c'est un autre caillou dans la chaussure des newtoniens ... le phénomène est popularisé à la fin du 18^e avec expériences de Mesmer sur ses patients.
- Electricité : pile de Volta, qui en passant va permettre à la chimie de faire un bond conceptuel ... Sur l'histoire de l'électricité, il y a aussi beaucoup d'aventures à raconter.

Ces phénomènes vont provoquer une crise de la science newtonienne parce qu'il est difficile d'en rendre compte en termes de forces centrales.

Autre question importante de l'époque, qui montre bien ce problème d'économiser la « force » : le mouvement perpétuel est-il possible ?

Nous allons voir que cette question sera presque systématiquement le point de départ de ceux qui ont élaboré la loi de conservation de l'énergie.

3. Favoriser la compréhension

3^e bénéfique de l'histoire des sciences : favoriser la compréhension.

Quel était le problème de ceux qui ont inventé l'énergie ? Quelles ont été les obstacles qu'ils ont dû surmonter pour construire ce concept ?

Faire cet effort c'est précisément faire ce qu'on fait tous les jours avec nos élèves. Que se passe-t-il dans l'esprit de quelqu'un à qui on parle de la conservation de l'énergie ? Qu'est-ce que ça peut soulever comme interrogations, difficultés. Ce que Bachelard appelle les obstacles épistémologiques. Or, Bachelard dit que les obstacles que doivent surmonter nos élèves pour comprendre une notion sont précisément ceux qu'on dû surmonter les savants auparavant.

Dans le monde germanique, un courant philosophique prétend expliquer tous les problèmes que la mécanique newtonienne est incapable d'expliquer. C'est la *Naturphilosophie*, représentée notamment par Schelling, un peu le versant scientifique du romantisme germanique.

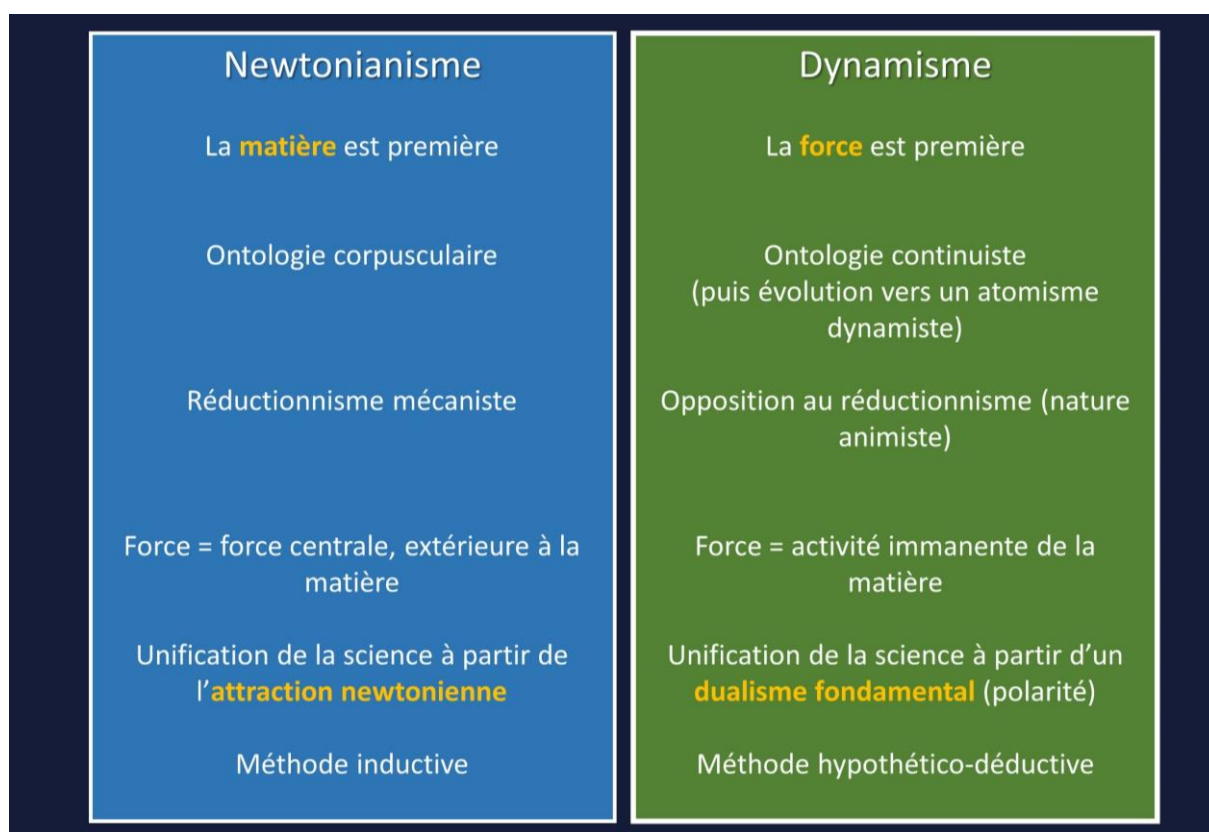
Ce courant est héritier du dynamisme de Leibniz et de Kant et on peut essayer de le résumer en quelques mots : la nature n'est pas une mécanique, c'est un organisme vivant traversé par des flux, des forces. Mais les Naturphilosophen n'entendent pas le terme de force dans le même sens que les newtoniens (le terme qu'ils emploient est le terme Kraft) : il s'agit d'une activité qui anime la matière, une espèce de polarité, un flux si on veut. Et cette force peut prendre différentes formes : elle peut être de nature électrique, magnétique, chimique, mécanique ou bien une force de chaleur. Et ces forces sont interconvertibles : on peut transformer la force mécanique en force électrique, la force chimique en force de chaleur, etc.

La Naturphilosophie s'appuie également sur une méthode spéculative dans laquelle l'intuition prime sur l'observation. L'expérience a un statut particulier, très différent de ce qu'on trouve dans la science « classique » : expérience cruciale. Alors ça questionne le schéma classique qu'on trouve dans les livres de physique (observer, analyser, réaliser, valider).

Par exemple Oersted, l'un des principaux représentant de la Naturphilosophie (il a fondé une école à Copenhague pour diffuser ces idées). Celui-ci ne « découvre » pas le lien entre magnétisme et électricité comme on le lit souvent, il va chercher à le mettre en évidence, à partir de l'intuition qu'il a de ce lien.

Donc la Naturphilosophie de notre point de vue n'est pas une approche rigoureuse parce que justement très spéculative, voire mystique, et d'ailleurs elle sera très vite discréditée : à partir des années 1820 c'est un repoussoir. Mais ça ne l'a pas empêché d'être féconde puisque la création du concept d'énergie lui doit beaucoup.

Pour résumer : le dynamisme s'oppose au réductionnisme newtonien. Il y a quelque chose de vivant dans la nature qu'on ne peut pas réduire à une mécanique. Il y a aussi l'idée d'un primat de la force sur la matière, sachant que cette force n'a pas le même sens dans les deux camps. Cette idée est très importante parce qu'elle va ouvrir la porte à l'idée que la force doit se conserver.



Mais une intuition philosophique ne fait pas un concept scientifique, loin s'en faut. Elaborer le concept d'énergie va demander beaucoup d'efforts.

L'émergence du concept d'énergie

C'est vraiment dans les années 1840 qu'un pas décisif est franchi, et comme ça arrive souvent, ça viendra simultanément de plusieurs endroits différents. Tout simplement parce que cette idée de conservation des forces est dans l'air du temps. On sent plus ou moins confusément que quelque chose se conserve quantitativement tout en changeant de forme qualitative. Et surtout, on sent que ce lien est très prometteur et source de futures innovations.

L'anglais William Grove, par exemple, publie un livre dans les années 1840 intitulé « corrélation des forces physiques ». Ce n'est pas un savant : c'est un avocat et chimiste amateur. Ce qui l'intéresse ce n'est pas spécialement la philosophie ni même la théorie : c'est la science appliquée, la technologie. C'est par exemple lui qui met au point la première pile à combustible.

Mayer est un médecin allemand, également passionné de physique et de mécanique. Depuis l'enfance, il cherche à mettre au point une machine à mouvement perpétuel basé sur une roue à eau et une vis sans fin. Et comme ça ne marche, il en arrive à la conclusion qu'on ne peut pas demander à une machine de produire gratuitement du travail.

Après ses études de médecine, il s'engage sur un bateau en partance pour l'Indonésie. Il a plusieurs fois l'occasion de faire des saignées sur les hommes de l'équipage pour les soigner et il est frappé par une observation : le sang de ses malades est plus clair qu'en Europe. Il explique cette observation par le fait que le sang est plus riche en oxygène parce que sous les tropiques l'organisme a moins besoin de brûler les aliments pour maintenir sa température.

Mayer se demande alors comment démontrer l'équivalence entre la chaleur générée par le corps et les aliments brûlés. Mais il tombe sur un obstacle : en fait on peut également créer de la chaleur par d'autres moyens, par friction par exemple, donc en produisant un effort musculaire. Comment prendre en compte cette chaleur ?

De son enfance, Mayer retient qu'on n'a rien sans rien. **Il finit par en arriver à la conclusion que la production de chaleur par le corps humain et l'action musculaire sont de même nature, et ont une source commune : la consommation d'oxygène.**

En rentrant de son voyage il se met à étudier la physique et publie en 1842 un article sur l'équivalence entre la chaleur et le travail, dans lequel il calcule pour la première fois un équivalent mécanique de la chaleur. Mais son article est refusé car truffé de maladresses et d'erreurs scientifiques. Mayer ne possède des connaissances très rudimentaires en mathématiques et en physique.

Bref, une découverte si révolutionnaire soit elle doit être correctement énoncée et travaillée pour être acceptée par la communauté scientifique.

A la même époque, mais à Manchester, James Joule va faire une découverte similaire à celle de Mayer. Mais contrairement à Mayer ses connaissances scientifiques sont solides. Fils d'un riche brasseur, il reçoit avec son frère l'enseignement de John Dalton, père de la théorie atomique. Et dans une ville comme Manchester, il va grandir au cœur de la révolution industrielle, au milieu de machines, de trains, etc.

Joule est surtout fasciné par l'électricité qu'il expérimente avec son frère en se donnant mutuellement des chocs électriques. La science n'est alors pour lui qu'un loisir mais il commence rapidement à étudier la faisabilité du remplacement de la machine à vapeur de la brasserie par le moteur électrique qui vient d'être inventé. Il commence à étudier les circuits électriques.

Par un raisonnement similaire à Mayer, il a l'intuition que la chaleur développée dans un circuit, et le travail effectué par un moteur électrique, par exemple, sont de même nature et ont pour source commune l'oxydation du zinc dans la batterie qui alimente le circuit. Donc la chaleur correspondrait à une perte de travail : effet Joule.

Mais Joule parvient à construire un dispositif qui va faire taire ses contradicteurs. Néanmoins ça va être très difficile pour lui de faire accepter son travail.

Helmholtz énonce en 1847 un principe de conservation fondé sur deux types de forces uniquement : la force vive et la force de tension. Dès lors, tout phénomène peut être interprété comme une

transformation de force vive en force de tension, ou bien de force de tension en force vive, dans une formulation très proche de notre principe de conservation de l'énergie.

William Thomson (futur Lord Kelvin) introduit définitivement le terme d'énergie en 1849

Clausius (1865) : L'énergie se conserve en quantité, mais sa répartition évolue de façon irréversible. Il y a donc une dissymétrie fondamentale, une flèche du temps qui jusque-là n'existait pas dans les équations (toutes étaient invariantes par changement de t en $-t$) : ce qui est chaud se refroidit, mais ce qui est froid ne se réchauffe pas spontanément ; une balle qui rebondit finit par s'arrêter, mais une balle au sol ne se met pas à sauter par elle-même.

En faisant ce travail de généalogie du concept d'énergie, on est à même d'en avoir une compréhension plus profonde, de mieux comprendre les difficultés de nos élèves et de mieux faire comprendre ce qu'est l'énergie. Muriel Guedj tire 8 caractéristiques de l'énergie à partir d'une étude historique, 8 caractéristiques indépendantes.

Le propre de l'énergie c'est d'être une grandeur nomade, dont la quantité se conserve.

4. Humaniser la science

Montrer les scientifiques, tels qu'ils sont, avec leurs faiblesses, leurs doutes, leurs échecs, mais aussi leur passion permet de rendre la science plus stimulante.

Personnages hors du commun également, inventeurs qui ont changé notre vie, etc. Par exemple Nikola Tesla, qui était un inventeur génial à qui on doit environ 700 inventions.

5. Développer l'esprit critique

Fonction très importante du cours de science : informer le citoyen de manière à l'armer contre des discours pseudos scientifiques.

Le mot énergie est victime d'une polysémie dans le langage quotidien : il désigne l'élan, la vitalité, la puissance. Si bien qu'on peut facilement l'incorporer à des théories plus ou moins fumeuses en leur donnant un vernis scientifique.

6. Travailler la méthode scientifique

Indissociable du point suivant : comment déceler un discours bidon ? Qu'est-ce qui sépare la science de la pseudo science ? Une grande partie de la philosophie des sciences est consacrée à cette question. Elle reste toujours en débat.

- Inférence inductive : vérifiabilité des théories par l'expérience. Ne constitue pas un critère de démarcation car les savants ne procèdent pas forcément comme ça (Oersted) et surtout l'induction n'est pas logiquement valide (dinde inductiviste de Russell).
- Falsificationisme (Popper) : une théorie scientifique doit pouvoir être falsifiable : elle doit être en mesure d'indiquer ce qui se passerait si elle était fausse...
- Kuhn : la vérité scientifique est ce sur quoi s'accorde une communauté (paradigme)
- Sociologie des sciences (science studies) : la science n'est qu'une croyance comme une autre.

7. Combattre les stéréotypes