

Le calorique : un modèle historique utile à l'enseignement scientifique

(suite et fin)

Résumé La théorie du calorique peut-elle être utile aux enseignants à la fois pour faire de l'histoire des sciences et aider à comprendre de nombreux concepts scientifiques des programmes de collège et de lycée ? Cet article montre comment cette théorie imparfaite peut non seulement remplir ce rôle mais plus encore.

Mots-clés Lavoisier, Laplace, calorique, histoire des sciences, épistémologie, enseignement scientifique.

Abstract **Caloric: a historical model useful for science education**

Can the caloric theory be useful to teachers both for doing science history and helping to understand many scientific concepts in middle and high school curricula? This article shows how this flawed theory can not only fulfill this role but more.

Keywords Lavoisier, Laplace, caloric, history of science, epistemology, science teaching.

La transition collège-lycée

Précédemment, nous avons montré comment la théorie du calorique permettait d'introduire les concepts de combustion et de chaleur au collège, et plus particulièrement leur application au transfert de celle-ci en classe de troisième. En classe de seconde, le calorique permet d'illustrer la modélisation et la mathématisation d'un concept, tout en mettant en valeur la démarche d'investigation, l'erreur et l'usage fructueux d'un modèle imparfait [1]. Dans cette seconde partie, nous allons montrer que la théorie de Lavoisier peut servir à illustrer d'autres exigences des programmes de lycée : la controverse scientifique et les premières approches du premier principe de la thermodynamique. Dans chaque cas, nous commencerons par situer historiquement cette problématique avant de montrer comment elle s'adapte à l'enseignement scientifique.

Illustrer la controverse scientifique sur la nature de la chaleur

À la parution du *Traité élémentaire de chimie* publié en février 1789, Lavoisier possède une synthèse assez large de ses travaux qu'il livre au public. Le calorique, devenu un fluide matériel impondérable (ou au poids difficilement mesurable)⁽¹⁾, y est totalement intégré [2] et rapidement accepté par la communauté scientifique française qui le diffuse, que ce soit à l'École polytechnique (1794), à l'École normale de l'An III (1795), ainsi que dans les programmes des Écoles centrales (1797) [3]. Le calorique semble d'ailleurs être en mesure de produire des explications satisfaisantes sur le fonctionnement des machines thermiques. Pour Sadi Carnot (1796-1832), « *la production de la puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle du calorique mais à son transport d'un corps chaud à un corps froid c'est-à-dire à son rétablissement d'équilibre, équilibre supposé rompu par quelque cause que ce soit, par une action chimique, telle que la combustion, ou par toute autre. Nous verrons bientôt que ce principe est applicable à toute machine mise en mouvement par la chaleur* » [4]. Chez Carnot, en 1824, le calorique s'écoule et se rétablit (il s'échange et se conserve).

Mais ce modèle, s'il gagne majoritairement les suffrages des chimistes et des physiciens, ne fait pas pour autant l'unanimité et se trouve sujet à controverse. Dès 1797, le calorique est attaqué non seulement sur l'idée de sa conservation mais aussi de sa représentation particulière. Humphry Davy (1778-1829), Benjamin Thompson (1753-1814), puis James Joule (1818-1889) vont montrer que le calorique ne peut se conserver puisque la chaleur peut être produite à partir d'un travail dissipatif, notamment par le frottement de deux morceaux de glace [5]. Les avis sont donc partagés.

De son côté, Jean-Baptiste Fourier (1768-1830) tente (depuis 1808) de trouver des explications à la propagation de la chaleur. Il utilise une approche intéressante : il s'exonère de chercher sa nature véritable et élabore une théorie de propagation de celle-ci, quelle que soit sa nature, propagation se faisant d'un corps chaud vers un corps froid. Après 1822, Fourier a réussi à proposer une explication de la propagation d'un fluide « *de manière phénoménologique* »⁽²⁾ sans qu'il soit nécessaire d'en connaître la nature véritable. Cette approche à son tour sera vivement discutée à l'Académie des sciences, notamment par ses figures les plus remarquables et peut-être (devenues) un peu trop conservatrices : Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), Pierre-Simon Laplace (1749-1827) et Siméon-Denis Poisson (1781-1840) (*figure 1*). Le débat est donc contemporain, à la fois sur la nature véritable de la chaleur, mais aussi sur sa propagation et sa conservation.

Il est intéressant de montrer que cette théorie du calorique, décriée en son temps et rejetée face à la théorie du phlogistique, a finalement remplacé, dans l'ordre des choses, celle qu'elle a supplantée. C'est à présent la théorie du calorique que les scientifiques tentent de faire évoluer, de modifier, afin d'incorporer les résultats d'expériences contradictoires et de sauver un modèle qui fonctionne⁽³⁾. Cette approche est caractéristique des « crises scientifiques » au sens de Kuhn, avec cette idée que c'est par la controverse et l'interrogation des modèles et des théories que le débat scientifique avance, débat dont le dénouement conduit à la constante validation, à l'amélioration ou à la disparition du modèle ou de la théorie remis en question [6].



Figure 1 - S.-D. Poisson (1781-1840) et J. Fourier (1768-1830). La controverse sur la nature de la chaleur oppose Fourier à Poisson, Lagrange et Laplace à l'Académie des sciences. Fourier, afin de convaincre, développe non seulement un arsenal mathématique poussé (équation et transformée de Fourier), mais fait également de Laplace non plus un opposant mais un juge suprême qui permettra de faire accepter sa théorie anti-newtonienne de la chaleur. © Wikimedia.

Dans l'enseignement scientifique de lycée, les programmes indiquent que le débat scientifique a « une place importante pour l'histoire raisonnée des sciences [...]. L'histoire du savoir scientifique est une aventure humaine [qui] permettra d'interroger la dimension sociale et culturelle de la construction du savoir scientifique [...]. Des controverses, parfois dramatiques, agitent la communauté scientifique » [7].

En évoquant la théorie du calorique, c'est bien cette dimension scientifique et culturelle que l'on met en évidence. L'identification d'une « crise » sur la nature véritable de ce que l'on nomme calorique ou chaleur, et qui interroge les modèles établis en cherchant à savoir s'ils décrivent une réalité ou une approche satisfaisante mais imparfaite de cette réalité. Comprendre l'indécision entre une chaleur apparentée à un fluide ou une chaleur apparentée à un ensemble de particules (que l'on pourrait considérer se comporter comme un fluide) est plus simple que comprendre la dualité onde-particule, qui est une autre controverse qui agite aussi à la même époque la communauté des savants vers 1815. Proposer un exemple de controverse avec le calorique sera donc plus abordable pour les élèves et montrer comment les théories scientifiques ont une influence sur le développement des technologies sera aussi plus aisé. Car comprendre les mécanismes d'échange de chaleur, c'est comprendre la « machine de Carnot », c'est-à-dire le fonctionnement des machines thermiques, machines à vapeur en tête, et donc voir des applications et des implications directes de cette recherche et de son influence sur la société (révolution industrielle, bouleversement des moyens de transport). C'est donc aussi pour l'enseignant avoir une illustration de ce qu'on appelle en épistémologie une approche internaliste et externaliste de la science [8]. L'histoire des sciences montre sa vocation à former à la fois les étudiants et les enseignants.

Première, terminale : comprendre le premier principe de la thermodynamique

La suite de la controverse sur la nature du calorique, qui va progressivement disparaître au profit du concept moderne de chaleur (chaleur qui deviendra à son tour énergie thermique), va permettre d'élaborer à partir de 1840 les concepts fondamentaux de la thermodynamique. C'est à la suite des travaux de Hermann von Helmholtz (1821-1894), Julius Mayer (1814-1878), James Joule (1818-1889), Rudolph Clausius (1822-1888), Sadi Carnot et de Lord Kelvin (1824-1907) qu'une véritable théorie mathématique voit le jour.

Il est donc possible d'introduire au lycée la naissance de la thermodynamique à l'aide de ce fil rouge qu'auront été les réactions de combustion depuis le collège, la tentative des scientifiques d'en trouver une explication exacte, et l'usage d'une théorie transitoire, charnière, qui fut celle du calorique. Celle-ci peut d'ailleurs permettre un glissement cohérent de l'usage des termes calorique et chaleur (impropres tous les deux) vers ceux plus rigoureux d'énergie et d'énergie thermique puisqu'en classe de première, il est question d'évoquer « la conversion de l'énergie stockée, le pouvoir calorifique massique et l'énergie libérée au cours de la réaction de combustion ». Ces trois items sont des notions qui peuvent se suivre en lien avec les réflexions sur le calorique dont l'approfondissement se fait l'année suivante.

En classe de terminale, les transferts thermiques sont représentés à l'aide de la formule de la thermochimie :

$$Q = m \times C_m \times \Delta T$$

L'introduction de cette formule pourra se faire comme le modèle mathématique abouti de la notion de transfert d'énergie thermique qui fut initié par les recherches de Lavoisier et Laplace durant l'hiver 1782-1783 et qui ont permis



Figure 2 - Lazare Carnot (à gauche), élève de l'École du génie de Mézières, membre de l'Académie des sciences, élu pour ses travaux sur les machines et qui poursuivit ses recherches sur les machines thermiques après la chute de l'Empire (1815). Son fils, Nicolas (à droite, dit Sadi), étudia ce domaine à l'École polytechnique mais fut également influencé par les travaux de son père [13]. © Wikipedia.

l'écriture de leur célèbre *Mémoire sur la chaleur*. Un retour sur ce mémoire permettra d'introduire le calorimètre nécessaire aux mesures (rappelons que le mot est inventé par Lavoisier pour désigner un appareil qui mesure le calorique, c'est-à-dire la chaleur) [9], et aussi la signification des coefficients apparaissant dans l'équation, les capacités thermiques massiques, que l'on appelait du temps de Lavoisier chaleur spécifique, chaleurs qui furent mesurées par Lavoisier et Laplace pour plusieurs substances.

Une fois la formule introduite, illustrée par un contexte historique avec ses limites, approchée ensuite par sa forme moderne, il devient plus simple d'expliquer que cette formule permet d'évaluer la variation d'énergie d'un système par transfert thermique, que ce soit de l'extérieur vers l'intérieur si l'on chauffe ce système, ou de l'intérieur vers l'extérieur dans le cas d'une transformation chimique exothermique⁽⁴⁾. Cette approche permet donc de comprendre qu'au cours d'une transformation physique ou chimique l'énergie d'un système évolue.

Cette énergie qui évolue est rattachée aux quantités d'énergie cinétique et potentielle d'un système de telle sorte que dans un état initial 1, on écrit $U_1 = E_{c1} + E_{p1}$. Si l'on sait à présent que ces énergies doivent prendre en compte la somme de toutes les interactions possibles entre les espèces composant le système, on voit que l'exemple du gaz parfait permet de se ramener à $U = E_c$ (car $E_p = 0$). Il est encore possible de rattacher ce résultat moderne à la définition historique de Lavoisier et Laplace : « Dans l'hypothèse que nous examinons, la chaleur est la force vive qui résulte des mouvements insensibles des molécules d'un corps ; elle est la somme des produits de la masse de chaque molécule par le carré de sa vitesse » [10]. La chaleur de Lavoisier et Laplace, par l'intermédiaire de l'énergie cinétique, se rattache à l'énergie interne.

Pour la transformation isochore consistant à chauffer un gaz parfait, on utilise dans les programmes la formule $\Delta U = m \times C_m \times \Delta T$; ce qui conforte l'idée précédente de relier la variation

d'énergie interne au transfert d'énergie thermique. Comme les élèves auront étudié l'effet d'une augmentation de température sur un gaz, ce qui provoque sa dilatation, il sera également possible de montrer que la dilatation d'un gaz parfait est en mesure de donner un travail utile : si la dilatation se déroule dans un récipient indéformable fermé par un piston, la dilatation du gaz provoque un déplacement du piston. Le déplacement du piston correspond à une force exercée au cours d'un déplacement, donc à un travail que l'on pourra rendre utile si l'on peut associer ce déplacement à un mouvement moteur. Il est donc possible de relier la valeur d'un travail W à la variation d'énergie interne d'un système, et finalement d'arriver à l'expression globale du premier principe : $\Delta U = W + Q$.

Une aide historique remarquable : Carnot et Clausius

Généralement, lorsqu'on évoque l'histoire de la thermodynamique, ce n'est pas le nom de Lavoisier auquel on pense. Mais l'on ne peut détacher les travaux calorimétriques de Lavoisier et Laplace du travail de Carnot que les historiens et les scientifiques considèrent comme l'un des fondateurs de cette thermodynamique moderne, car Carnot emploie dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu* la théorie du calorique qui lui fut enseignée à l'École polytechnique : « Partout où il existe une différence de température, partout où il peut y avoir rétablissement d'équilibre du calorique, il peut y avoir aussi production de puissance motrice » [11]. Il est intéressant de constater que Carnot évoque dans la même phrase l'idée de chaleur et de puissance motrice, c'est-à-dire de travail, faisant en 1824 un lien qui restait à formaliser et à théoriser (figure 2). Un autre physicien dont les travaux peuvent aider à comprendre ce premier principe est Rudolf Clausius (1822-1888). Pour le premier principe, il écrit dans sa *Théorie mécanique de la chaleur* : « Si nous faisons la somme du contenu de chaleur et du contenu d'œuvre, cette somme sera notre quantité U ou l'énergie du corps⁽⁵⁾. Au lieu du mot énergie, nous

pourrions donc employer l'expression, à la vérité un peu plus longue, contenu de chaleur et d'œuvre du corps » [12]. Cette citation historique a son importance ; elle montre que l'usage de la lettre U est déjà établi en 1868 et que les physiciens ont compris que les échanges d'énergie se font bien sous deux formes : chaleur d'un côté, et ce que Clausius appelle œuvre de l'autre, et que l'on appellera plus tard travail.

Variables cachées et interactions intermoléculaires : ouverture vers le supérieur

Le premier principe de la thermodynamique a conduit à étudier des corps spécifiques : soit incompressibles (solides et liquides), soit des gaz parfaits. En observant les transformations de ces corps non plus du côté de leur variation de volume mais à pression constante, il est possible d'aller un peu plus loin en étudiant des transformations à pression constante pour lesquelles $dU = \delta Q_p$. C'est le cas des changements d'état : « Ces trois états d'un même corps dépendent de la quantité de calorique qui lui est combinée [...]. Les molécules de tous les corps de la nature [sont] dans un état d'équilibre entre l'attraction, qui tend à les rapprocher et les réunir, et les efforts du calorique, qui tend à les écarter » [14a]. La description dans le *Traité élémentaire de chimie* d'un changement d'état par l'interprétation du calorique permet de comprendre intuitivement plusieurs idées : que c'est bien l'accumulation ou la perte d'une grandeur conceptuelle – le calorique pour Lavoisier, l'énergie pour nous aujourd'hui – qui permet d'expliquer les changements d'état, et que c'est bien l'accumulation de cette grandeur qui permet de distinguer les corps chauds des corps froids.

Ensuite, en évoquant l'idée d'une accumulation de calorique qui provoque la dispersion de la matière, Lavoisier donne un exemple qui permet de comprendre ce qu'est l'agitation thermique : « La moindre augmentation de chaleur qu'ils recevraient en écarterait sur-le-champ les parties et les disperserait » [14b]. Dans ce même ordre d'idée, l'opposition calorique/affinité décrit les deux types de composantes de l'énergie interne d'un système : les forces de cohésion que l'on pourra rattacher aux forces de Van der Waals et aux ponts hydrogène par opposition aux forces de répulsion. Ayant maintenant une représentation simple des forces qui interviennent dans la cohésion de la matière et les changements d'état, il est encore possible d'étudier l'influence des forces de pression sur le système grâce à l'analyse de Lavoisier : « S'il n'existait que ces deux forces [affinité et calorique], les corps ne seraient liquides qu'à un degré indivisible du thermomètre, et ils passeraient brusquement de l'état de solide à celui de fluide élastique aériforme [...]. S'il n'en est pas ainsi, c'est qu'une troisième force, la pression de l'atmosphère, met obstacle à cet écartement [...] » [14c] (voir encadré 1).

Jusqu'ici, avec Lavoisier, nous avons pu mettre en lumière l'idée de conservation, l'énergie interne, la chaleur, l'énergie ou agitation thermique donnant lieu à des répulsions, les oppositions avec les forces d'attraction, l'énergie cinétique. Nous avons été en mesure de présenter ce qu'était un modèle imparfait issu de l'expérience, de le relier à une grandeur mesurable et de relier ces mesures à une loi mathématique et au calcul. À partir de l'étude de la notion d'un modèle mathématique, un modèle de la thermochimie aussi simplement écrit (par les élèves) que $Q = k \times T$, discutable et perfectible, il est possible d'arriver à comprendre la formulation mathématique moderne des échanges d'énergie thermique en thermo- chimie et celle d'énergie à l'aide du premier principe.

Encadré 1

Un exemple d'usage de l'histoire des sciences au lycée avec Lavoisier

Formateurs, inspecteurs pédagogiques et enseignants ont déjà balisé le chemin des différentes actions et activités qu'il est possible d'envisager en classe à l'aide de l'histoire des sciences [15]. Ils se sont également interrogés sur la finalité de ces pratiques et sur leur efficacité. Il n'en est pas moins vrai que la place même de l'histoire des sciences au sein d'un enseignement scientifique interroge et demande à être définie. En fait, de manière globale, l'histoire des sciences peut être introduite à n'importe quel endroit d'un cours et sous n'importe laquelle de ses formes multiples : situation déclenchante, anecdote scientifique, contextualisation d'un exercice, analyse d'un concept par le biais d'un document historique, d'une séance de travaux pratiques, etc. L'apport de l'histoire des sciences doit être cependant ciblé et utile. Ainsi une chronologie en début de cours pour situer un événement de l'histoire des sciences n'a pas forcément un intérêt pour le cours. À l'inverse, aider à la compréhension d'un concept en mettant en lumière son évolution représente un bon moyen d'aider à la compréhension d'une définition [16].

Voici une proposition pour un exercice de fin de chapitre de niveau terminale-première année d'études supérieures. L'histoire des sciences intervient pour illustrer l'évolution des idées et des termes utilisés en chimie, et aussi pour que l'apprenant puisse évaluer s'il a bien compris et assimilé les notions et définitions du cours.

La description des états de la matière selon Lavoisier (1789)

Dans son célèbre ouvrage, le *Traité élémentaire de chimie*, Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794), donne la description des trois états de la matière en expliquant à l'échelle des molécules comment concevoir l'état solide, liquide et gazeux à l'aide de deux « forces » :

« Nous venons de voir que le même corps devenait solide ou liquide, ou fluide aériforme, suivant la quantité de calorique dont il était pénétré ou, pour parler d'une manière plus rigoureuse, suivant que la force répulsive du calorique était égale à l'attraction de ses molécules, ou qu'elle était plus forte ou plus faible qu'elle [...]. Ces trois états d'un même corps dépendent de la quantité de calorique qui lui est combinée [...]. Les molécules de tous les corps de la nature [sont] dans un état d'équilibre entre l'attraction [l'affinité], qui tend à les rapprocher et les réunir, et les efforts du calorique, qui tend à les écarter » [17].

Questions :

1. Citer un exemple d'interaction intermoléculaire responsable de l'attraction/cohésion de la matière.
2. Citer un exemple d'interaction dispersive.
3. Situer chronologiquement les découvertes de ces interactions.
4. Montrer à l'aide de l'extrait de texte que les concepts d'affinité et de calorique utilisés au XVIII^e siècle essayaient déjà de rendre compte des observations faites quant à la stabilité de la matière et aux causes de ses changements d'état bien avant la découverte des interactions citées dans les questions 1 à 3.

Il est aussi possible de relever que le passage d'une formule comme $Q = k \times T$ à $\Delta U = m \times C_m \times \Delta T$ relève à la fois du perfectionnement d'un modèle mathématique mais aussi de la compréhension véritable d'un système chimique en identifiant ce que l'on pourrait appeler ses paramètres sensibles qui, lorsqu'ils sont cachés par la variation d'un autre paramètre aux effets plus remarquables, peuvent échapper à la modélisation. Ainsi, ce que l'on croyait une constante peut s'avérer être une variable, variable que l'on pourrait qualifier de cachée pour faire le lien avec cette expression utilisée en mécanique quantique⁽⁶⁾ (voir encadré 2).

Encadré 2

Un exemple de « variables cachées » dans la loi des gaz parfaits

Les variables cachées dans la loi de Boyle-Mariotte

Au lycée, la loi des gaz parfaits peut s'introduire de manière successive, à la fois par le biais d'une modélisation mais aussi en utilisant l'idée de paramètres sensibles⁽⁷⁾ à une expérience ou de variables cachées contenues dans l'expression perfectible de la loi.

La loi de Boyle-Mariotte peut être un bon point de départ. Sous sa forme $P \times V = k$, elle peut être utilisée pour en montrer la validité, mais l'on peut aussi montrer que c'est un modèle incomplet avec ses limites expérimentales. L'histoire des sciences et les expériences ont montré par la suite, grâce à Guillaume Amontons (1663-1705) notamment, que cette loi ne s'entendait qu'à température constante. La température peut donc être considérée comme un paramètre sensible de l'expérience et la loi être alors modifiée en $P \times V = k(T)$, la température étant une variable cachée dans la loi de Boyle-Mariotte. En évoquant par la suite les lois d'Avogadro-Ampère et celle de Gay-Lussac, il est possible d'introduire toutes les variables de la loi des gaz parfaits. Ainsi, on sait que le modèle deviendra par la suite $P \times V = k \times T$. Et que de nouveau, k est une constante qui inclut une autre variable cachée, n .

par Lavoisier qui, dans la liste des modèles imparfaits qu'il a utilisés pour progresser dans sa recherche scientifique, a montré que ce n'est pas parce qu'un modèle est inexact qu'il n'est pas utile. Utile donc à introduire les notions nouvelles du XIX^e siècle, soit avec le langage ancien, soit avec leurs explications modernes : travail, énergie thermique, énergie cinétique, entropie, interactions de Van der Waals, etc.

Utile à situer l'évolution de la théorie de la chaleur car le calorique coexiste avec le modèle qui le précède et ceux qu'il annonce. À partir des années 1820, il participe par son imperfection à la naissance de la thermodynamique puisqu'il sert de concept fondamental aux travaux de Carnot.

Au final, parce qu'il aura été parfaitement imparfait, le calorique aura tout au long de son existence contribué à entretenir le débat et la controverse scientifique, à jouer son rôle de modèle transitoire avant la construction de la thermodynamique, et à devenir aujourd'hui un exemple historique remarquable permettant d'aider à comprendre la thermodynamique et la thermochimie dans le cadre de l'usage de l'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique.

(1) Le calorique peut être considéré comme étant constitué de particules très petites ou comme étant un fluide subtil.

(2) La chaleur de Fourier « pénètre, comme la gravité, toutes les substances de l'univers », ce qui n'est pas sans rappeler pour Lavoisier que « la planète que nous habitons est environnée de toutes parts d'un fluide très subtil, qui pénètre, à ce qu'il paraît sans exception, tous les corps qui la composent, fluide que les chimistes modernes désignent sous le nom de calorique ». J. Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, F. Didot père et fils, Paris, 1822, p. 10 (Gallica); A.-L. Lavoisier, *Mémoires de Chimie*, t. I, s.n., 1805, p. 1-2 (Gallica). Pour une analyse du travail de Fourier, voir J. Dhombres, J.-B. Robert, *Fourier*, Belin, Paris, 1998, p. 322-362 ; 518-620.

(3) Un exemple illustrant cette approche est le développement du modèle quantique de l'atome initié par N. Bohr (1885-1962) à partir de 1913, modèle modifié à plusieurs reprises par les physiciens afin que les développements théoriques, les modélisations et les mesures spectroscopiques concordent. Cette approche semi-empirique mettra en évidence les insuffisances de la (première) théorie quantique et contribuera à son évolution.

(4) L'un des deux modèles de calorimètre de Lavoisier, conservé au musée du CNAM, possède une taille suffisante pour que puisse y être introduit le ballon à trois voies de la synthèse de l'eau et permette ainsi de mesurer les chaleurs dégagées durant cette expérience. M. Beretta, *The Arsenal of the Eighteenth-Century Chemistry: The laboratories of Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794)*, Brill, 2022, p. 232.

(5) Pour la notion de quantité d'œuvre, Clausius emploie la lettre W pour « Werke », qu'il distingue subtilement du mot « Arbeit ». Il s'agit en fait du travail qui est convertible en chaleur.

(6) En mécanique quantique, on parle de variables cachées lorsqu'on suppose que la théorie ne prend pas en compte des paramètres supplémentaires nécessaires à son exactitude : S. Ortolì, J.-P. Pharabod, *Le Cantique des Quantiques*, La Découverte, Paris, 2007, p. 53.

(7) Nous appelons paramètre sensible d'une expérience modélisée une grandeur dont l'effet est mesurable sur le résultat de l'expérience. Il arrive dans certaines expériences que tous les paramètres sensibles ne soient pas visibles. C'est le cas des oscillations du pendule pesant par exemple. On peut montrer que la période des oscillations est sensible à la longueur du fil. En se déplaçant à différentes latitudes, il sera de plus possible de montrer que la période varie avec celle-ci. Le physicien pourra alors créer un modèle *ad hoc*, issu de l'expérience et capable de rendre compte de ces observations et de les mathématiser. Mais tant que la théorie n'est pas établie ou que l'on manipule sur Terre, le champ de pesanteur reste une variable cachée du modèle, voire de la théorie si elle est incomplète. On voit alors le lien entre une démarche pragmatique de terrain qui permet d'obtenir des constructions mathématiques approchées mais satisfaisantes et un développement théorique qui, lui, doit aboutir à des lois sans failles. Dans l'histoire des sciences, les physiciens, les chimistes, selon leurs ressources et leurs limitations, ont utilisé ces deux approches.

[1] E. Jacques, Le calorique : un modèle historique utile à l'enseignement scientifique (première partie), *L'Act chim.*, 2022, 475, p. 54-59.

[2] A.-L. Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, in J.B. Dumas (éd.), *Œuvres de Lavoisier*, t. I, Imp. imp., Paris, 1864, p. 17 (Gallica).

[3] E. Jacques, Le calorique : un siècle d'évolution de l'invention à la disparition, *L'Act. Chim.*, 2022, 470, p. 45-51.

[4] S. Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, Bachelier, Paris, 1824, p. 6 (Gallica).

Le calorique : un modèle parfaitement imparfait

De 1755 à 1855, il aura fallu une centaine d'années pour que le concept de chaleur finisse par être appréhendé par les chimistes et les physiciens. Dans cette construction, depuis les approches fondatrices de Joseph Black (1728-1799) et Adair Crawford (1748-1795) en passant par les apports de Rumford et Davy, le concept de chaleur devait répondre à la fois aux expériences menées par les physiciens et par les chimistes, mais aussi permettre de comprendre comment la chaleur pouvait se manifester à la fois lors de changement d'état, ou/et de travail utile que ce soit lors d'une transformation physique ou au cours d'une réaction chimique. En posant les bases de la calorimétrie et de la thermochimie, Lavoisier et Laplace ont fait du concept de chaleur une grandeur d'échange dont ils n'ont pu maîtriser ni le fonctionnement exact ni la constitution. Ce modèle imparfait a durant plus de quarante ans guidé les chimistes et les physiciens à vouloir faire mieux et à en discuter la légitimité.

Le calorique est donc à présenter comme une théorie de transition : entre la théorie soustractive et émissive du phlogistique (perte du phlogistique, émission de lumière et de chaleur) et la théorie complexe de la thermodynamique. Face au phlogistique, le calorique introduit la notion d'accumulation (plus un corps est associé au calorique plus il se trouve dans un état agité, du solide au gaz), la notion d'agitation (cette accumulation produit une force de dispersion, séparation des molécules due à la force vive des particules), la notion d'échange de chaleur (la transformation chimique étudiée passant de l'état A à B échange de la chaleur avec un milieu). Mais que ce soit la théorie de la chaleur ou celle du calorique, l'une comme l'autre sont imparfaites et insuffisantes, nécessitant bien l'utilisation d'un concept plus vaste qu'est l'énergie.

Pour l'enseignant, le calorique se présente donc comme un outil pédagogique polyvalent, voire récurrent dans la construction scientifique à la fois sur le plan historique de la science, mais aussi des idées et des concepts. Il pourra tout aussi bien être utilisé comme l'un des concepts développés

[5] D. Fauque, P. Brouzeng, *Éléments d'histoire d'un concept disparu : le calorique*, *L'Act. Chim.*, **1994**, 180, p. 32-35.

[6] T. Kuhn, *La Structure des Révolutions scientifiques*, Flammarion, Paris, **2018**. Une fois la science normale définie par la communauté scientifique, l'apparition d'anomalies (tout d'abord négligées) qui deviennent impossibles à ignorer provoque une crise dont la réponse consiste à modifier cette science afin d'arriver à une nouvelle science normale.

[7] Programme d'enseignement scientifique de terminale générale, *Bulletin officiel de l'Éducation Nationale*, (https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/84/7/spe241_annexe_1158847.pdf).

[8] « Dans une perspective internaliste, on se place à l'intérieur même de l'œuvre scientifique pour analyser les démarches par lesquelles elle cherche à satisfaire aux normes spécifiques qui permettent de la définir comme science, et surtout pour apprécier le rapport qu'elle entretient avec la vérité [...]. Au contraire, dans une perspective externaliste, les événements scientifiques sont envisagés comme conditionnés par des intérêts économiques et sociaux. L'histoire des sciences est assimilée à une sociologie des sciences, ce qui implique de mettre en réserve, de suspendre toute interprétation spécifique de la prétention du discours scientifique à la vérité. Les théories sont examinées dans leur genèse et leur fonctionnement social, plutôt que du point de vue de leur validité », P. Mercader, *Internalisme versus Externalisme : un débat dépassé. La psychologie est-elle une science ?*, Presses Universitaires de Lyon, **2022**, p. 167.

[9] « Veut-on connaître la quantité de calorique qui se dégage de la combinaison de plusieurs substances ? On les amènera toutes à la température zéro, en les tenant un temps suffisant dans de la glace pilée : ensuite on fera le mélange dans l'intérieur du calorimètre, dans un vase également à zéro, et aura soin de les y conserver jusqu'à ce qu'elles soient revenues à la température zéro : la quantité d'eau recueillie sera la mesure du calorique qui se sera dégagé par l'effet de combinaison », in A.-L. Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, in J.-B. Dumas, *Œuvres de Lavoisier*, t. I, Imp. imp., Paris, **1864**, p. 290 (Gallica).

[10] P.-S. Laplace, A.-L. Lavoisier, *Mémoire sur la chaleur*, in J.-B. Dumas, *Œuvres de Lavoisier*, t. II, Imp. imp., Paris, **1862**, p. 286 (Gallica).

[11] Carnot, *op. cit.*, p. 7.

[12] R. Clausius, *Théorie mécanique de la chaleur*, tome I, Eugène Lacroix, Paris, **1868**, p. 298. Pour la notion de quantité de chaleur, c'est la lettre Q qui est utilisée.

[13] A.-M. Merle, *La naissance de la thermodynamique : Mémoire de Carnot*, *Cahiers de Fontenay*, **1980**, 18, p. 49-68.

[14] a) Œuvres de Lavoisier, A.-L. Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, Cuchet, Paris, **1789**, p. 17. b-c), *Ibid.*, p. 8.

[15] Pour ne citer que quelques exemples : X. Bataille, *Une séance... historique*, *L'Act. Chim.*, **2013**, 377, p. 28-32 ; D. Fauque, *L'enseignement de l'histoire des sciences dans les classes du secondaire*, *BUP*, **1989**, 712, p. 417-426 ; Histoire des sciences et enseignement de la chimie, *BUP*, **1993**, 751, p. 279-289 ; Un exemple d'activité documentaire en terminale scientifique : l'atome de Bohr, *BUP*, **1998**, 803, p. 1589-96 ; X. Bataille, M.-B. Mauhourat, M. Vigneron, *Du bon usage de la flèche comme symbole de la transformation chimique*, *L'Act. Chim.*, **2015**, 399, p. 44.

[16] A. Dumon, *Évolution historique des concepts d'acide et de base*, *L'Act. Chim.*, **2007**, 306, p. 40 ; A. Dumon, A. Laugier, *L'équation de réaction : approche historique et didactique de la modélisation de la transformation chimique*, *BUP*, **2004**, 98, p. 1131-1144 ; A. Dumon, *La prévision de l'évolution d'un système chimique*, *L'Act. Chim.*, **2021**, 459, p. 47-52.

[17] A.-L. Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, *Œuvres de Lavoisier*, tome premier, J.-B. Dumas (éd.), Paris, Imp. imp., **1864**, p. 21-26 (Gallica).

Eric JACQUES,

Vice-président du groupe SCF Histoire de la chimie, professeur de chimie en BTS, Lycée Louis-Vincent, Metz, doctorant en histoire des sciences, Archives Henri Poincaré, Université de Lorraine, Unité de Recherche sur les Sciences et les Techniques, Université Paris-Saclay, Orsay.

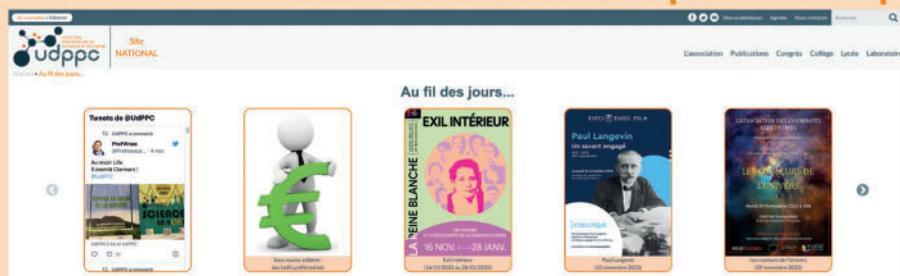
*Eric.Jacques@ac-nancy-metz.fr



L'Union des professeurs de physique et de chimie

Vous présente

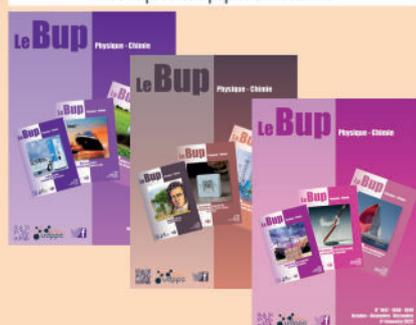
son nouveau site : <http://www.udppc.asso.fr>



L'association	Espaces collège et lycée
L'UdPPC ?, Tarifs, Enquêtes,	Actualités, Les journées..., Ressources
Charte graphique, Olympiades,	Espace labo
Partenaires, Positions, Nous soutenons	Actualités, Ressources
Publications	Divers
Le Bup, Nous avons lu,	Agenda, congrès, réseaux sociaux,
L'arpenteur du web, Appel aux auteurs,	Sites académiques
Parus au BO, Ressources	

mais l'UdPPC, c'est aussi...

...la publication numérique mensuelle avec impression papier trimestrielle



...la consultation du Bup en ligne par articles et par numéro avec BupDoc

Du 1^{er} janvier au 31 décembre 2023 :
 ♦ Pour tous : 1907 → 2018
 ♦ Pour les abonnés : 2019 → 2023



...un congrès organisé chaque année par une académie différente



Siège social et courrier : 42 rue Saint-Jacques - 75005 PARIS
 Tél. : 01 40 46 83 80 - secretariat.national@udppc.asso.fr

