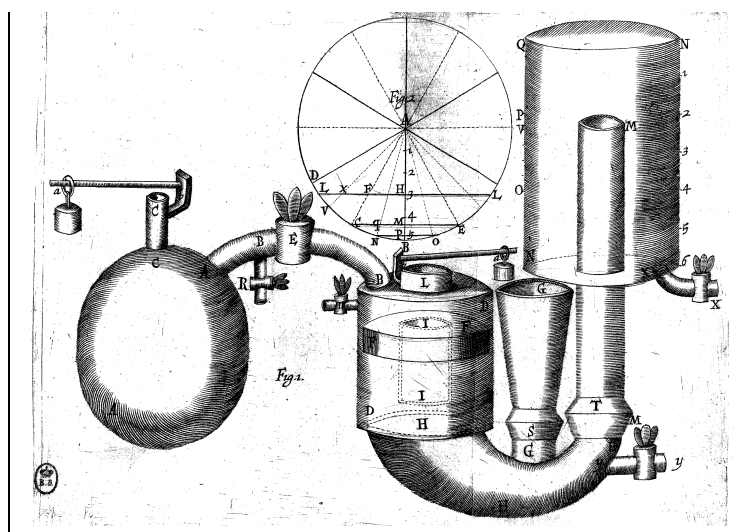


Emergence du concept d'énergie

On peut situer l'introduction de l'idée d'énergie au moment où Leibniz introduit à partir de 1686 l'expression de la « force vive », et discute plus généralement la notion cartésienne de conservation de la quantité de mouvement dans un système mécanique. On sait que cette question sera d'ailleurs à l'origine d'un long débat. Entre le moment où d'Alembert (1717-1783) clos ce débat autour de la question des forces vives¹ au milieu du siècle en affirmant finalement, par un changement de point de vue, qu'on a eu tort de s'interroger sur la définition, l'expression, le statut ontologique des forces motrices, la considération des « causes motrices », et qu'il vaut mieux « n'envisager uniquement que le mouvement qu'elles produisent »² ; entre ce moment donc, et celui où Thomas Young (1773-1829)³, au thème VIII *Vis viva and energy* de son cours de 1807 introduit le terme « Energie » avec le sens moderne qu'on lui connaît, on assiste à une évolution sensible des modes de pensée.

Nous allons ici rappeler quelques points importants de cette histoire de la pensée sur cette question, mais il ne faudrait pas oublier – nous n'en parlerons pas, car ce n'est pas notre propos – que l'émergence de ce concept s'est faite de pair avec celle des techniques, et plus précisément des machines à vapeurs, essentiellement en Angleterre depuis l'avènement de la science moderne. Les grands noms seront Toricelli (1608-1647), Papin (1647-1714), Savery (1650-1715), Newcomen (1663-1729), ou Watt (1736-1819) qui, par leurs travaux de techniciens ou d'ingénieurs, vont s'appliquer à imaginer des machines « pour lever l'eau par la force du feu », à rendre un homme capable de faire autant que mille »⁴, et à augmenter ce qui s'appellera plus tard le rendement.



La Machine de Denis Papin (1707)

Il y aurait donc là-dessus, dans le cadre de ce séminaire, si cela n'a pas encore été fait, à entendre des propos de spécialistes de l'histoire des techniques qui nous parleraient de ce qu'on a appelé les machines atmosphériques, puisqu'elles fonctionnaient grâce à la pression qu'exerce

¹ Voir à ce sujet l'analyse de P. Costabel : *La question des forces vives*, Cahier d'histoire et de philosophie des Sciences n°8, 1993 ; *Jean d'Alembert, savant et philosophe : portrait à plusieurs voix*, Costabel et al, p.377-393.

² Jean Le Rond d'Alembert, *Encyclopédie de Diderot et d'Alembert* (1765), article Mécanique, Paris, 1785.

³ Thomas Young, 1807, reed. 1845, *A lecture on natural philosophy and the mechanical arts*, thème VIII *Vis viva and energy*, p.57-61.

⁴ Denis Papin, *Nouvelle manière pour lever l'eau par la force du feu*, Paris, 1707, p.5..

l'atmosphère sur des pistons appuyant sur un vide dont l'existence même était discutée⁵.

LA QUESTION DE L'INVARIANCE

« Dieu a créé la matière avec le mouvement et le repos de ses parties, et (...) conserve maintenant en l'univers, par son concours ordinaire, autant de mouvement et de repos qu'il y en a mis en le créant. Car, bien que le mouvement ne soit qu'une façon en la matière qui est mue, elle en a partout une certaine quantité qui n'augmente et ne diminue jamais. »⁶

C'est Descartes (1596-1651) qui écrit ces mots en 1644 à l'article 36 du second tome des *Principes de Philosophie*, et il poursuit :

« lorsqu'une partie de la matière se meut deux fois plus vite qu'une autre, que cette autre est deux fois plus grande que la première, nous devons penser qu'il y a tout autant de mouvement dans la plus petite que dans la plus grande (...) le créateur (...) conserve incessamment en cette matière une égale quantité de mouvement. »

On le voit par ces mots de Descartes, est en jeu l'idée de se donner un invariant qui soit susceptible de pouvoir caractériser le mouvement des corps. Ce choix de Descartes de chercher une loi de conservation, ne sera pas discuté ; ce qui va conduire à discussion, voire à conflit, c'est plutôt de savoir quelle est la quantité qui se conserve. Leibniz (1646-1716), et d'autres, à partir des idées de Descartes, reprendront la réflexion sur cette question de la conservation d'une quantité dans la nature, et de sa caractérisation, au travers d'échanges, de controverses, de polémiques, sur ce qu'il convient d'appeler la question des forces vives. Nous parlerons plus en détail, dans la cadre de l'émergence du concept d'énergie, des recherches qui se sont déroulées dans la continuité de ce débat dans la seconde partie du 18^{ème} siècle, avec une interrogation quant aux modes d'explications en physique et en chimie.

« Descartes (...) a dit que Dieu conserve dans le monde la même quantité de mouvement. »⁷ C'est ce qu'écrit Leibniz en mars 1686 dans les *Acta Eruditerum*, et qui est reproduit en septembre de la même année dans la *Nouvelle République des Lettres*, dans un article intitulé *Démonstration courte d'une erreur considérable de M. Descartes, et de quelques autres touchant une loi de la nature selon laquelle ils soutiennent que Dieu conserve toujours dans la matière la même quantité de mouvement, de quoi ils abusent même dans la mécanique*. Il paraît intéressant de consulter ce Mémoire de Leibniz dans la *Nouvelle République des Lettres*, car il est immédiatement suivi d'une réponse d'un cartésien en la personne de l'Abbé Catelan⁸. Leibniz admet avec Descartes qu'il est raisonnable de supposer que la même force motrice est conservée dans la nature ; il admet également avec Descartes qu'un poids de 4 livres tombant d'une hauteur de 1 acquiert la même force qu'un poids d'1 livre tombant d'une hauteur 4. Ce qu'il conteste, c'est que cette force motrice soit représentée par la quantité de mouvement. Il prend l'exemple de la chute d'un corps, et montre alors que, supposer une force proportionnelle à la vitesse est en contradiction avec la proportionnalité démontrée par Galilée (1564-1642) entre le carré de la vitesse acquise par un corps en chute libre avec la hauteur parcourue. Il montre finalement que la contradiction est levée si l'on accepte de supposer que la force est proportionnelle au carré de la vitesse, ou ce qui revient au même, à la hauteur parcourue. Ce n'est donc pas la quantité de mouvement qui est conservée, mais mv , ou ce qui revient au même tout en étant plus général, car cela s'applique alors au cas de la chute des corps, mais également à l'étude importante des chocs, mv^2 .

Dans un écrit de 1692 *Essay de dynamique sur les lois du mouvement, où il est montré qu'il ne se conserve pas la même quantité de mouvement, mais la même force absolue, ou bien la même*

⁵ Steven Shapin et Simon Schaffer, *Léviathan et la pompe à air : Hobbes et Boyle entre science et politique*, traduit de l'anglais par Thierry Piélat avec la collaboration de Sylvie Barjansky, Paris La Découverte, 1993.

⁶ Descartes, *Les principes de philosophie*, principe n°36, *Que Dieu est la première cause du mouvement, et qu'il en conserve toujours une égale quantité en l'univers*.

⁷ Leibniz, in *Nouvelles de la République des Lettres*, sept.1686, p.996.

⁸ Catelan, in *Nouvelles de la République des Lettres, Courte remarque de M. l'Abbé Catelan où l'on montre à Mr. G. G. Leibniz le paralogisme contenu dans l'objection précédente*, sept.1686, p.1000.

*quantité de l'action motrice*⁹, Leibniz, s'appuyant probablement sur son travail qu'est le calcul différentiel et intégral, s'applique non seulement à distinguer la statique de la dynamique, mais aussi à proposer par un mode d'intégration de passer de la statique, où les déplacements considérés sont infiniment petits, à la dynamique. En statique, considérant des durées infinitésimales, on peut identifier force et quantité de mouvement ; Leibniz parle alors de *force morte* ; en dynamique, on rend compte d'un gain ou d'une perte de vitesse par sommation. Leibniz parle alors de *force vive*.

Ces travaux de Leibniz seront source de polémiques. On trouvera des partisans de Descartes avec Fontenelle (1657-1757), Mac Laurin (1698-1746) ou Mairan (1678-1771) ; des partisans de Leibniz avec König (1712-1757) ou Euler (1707-1783). Un des arguments avancés par les cartésiens sera de dire – c'est d'ailleurs ce que l'abbé Catelan notamment avait écrit – qu'il fallait considérer le problème, non pas en ne considérant que l'espace, mais également en prenant en compte le temps. C'est ce que fera Boscovitch (1711-1787) qui, partant d'un point de vue assez novateur, remarquera que, si l'intégration de la force sur l'espace est proportionnelle au carré de la vitesse, en revanche, l'intégration sur le temps est proportionnelle à la vitesse.¹⁰ La controverse est donc bien, comme ce sera souvent souligné, affaire de langage : les uns parlent le langage du temps, les autres parlent le langage de l'espace. Au-delà de cela, comme Pierre Costabel le remarque¹¹, le mode d'intégration sur l'espace, proposé par Boscovitch lorsqu'il étudie les variations de la force en fonction de l'espace, porte en lui-même les germes de la notion de travail. C'est dans ces traces, où l'on considère l'importance du temps, que d'Alembert, dans le *Discours Préliminaire au Traité de Dynamique*, réexaminera la question. Partant de la nécessité de trouver une expression générale de la force, qui soit valable quel que soit le mouvement considéré – équilibre dans la choc, mouvement arrêté par un obstacle fixe, mouvement retardé par un ressort -, il reprendra finalement l'idée que, si à l'équilibre, il y a bien conservation de la quantité de mouvement, en dynamique la question se pose différemment. Prenant le cas du mouvement retardé par un ressort, il précisera alors que « la quantité de mouvement que le corps perd à chaque instant est proportionnelle au produit de la résistance par la durée infiniment petite de l'instant » ; il précise que c'est naturel « car un obstacle n'est tel qu'en tant qu'il résiste (...) et c'est la somme des résistances qui est l'obstacle vaincu. »¹²

On peut remarquer ici que d'Alembert préférera toujours parler de mouvement plutôt que de force, ce dernier terme relevant plutôt, selon lui, de la métaphysique que de la physique. Il se situe ici, par cette prise de position, dans un certain style français. Déjà Etienne-François Geoffroy (1672-1731) avait en effet, dans une lettre à Sloane (1660-1752) datée de 1715, émis des réserves vis-à-vis de ces forces occultes : « on a du mal à s'accoutumer au terme d'attraction, qui semble nous ramener aux qualités occultes. »¹³

A partir des années 1770 sont mis en relation les concepts de force vive et de chaleur. C'est cette inter-relation qui, nous le savons, contribuera au 19^{ème} siècle, à faire émerger le concept d'énergie tel qu'on le connaîtra jusqu'à la relativité restreinte. Dans la période qui précède, on voit naître des interrogations quant à la nature de la chaleur et à la possibilité de sa mesure. On voit, dans l'Histoire de l'Académie Royale des Sciences de 1730¹⁴, qui précède un Mémoire de Réaumur (1683-1757) intitulé *Règles pour construire des thermomètres dont les degrés soient comparables*, écrite l'idée selon laquelle, dans ce domaine de la chaleur, il est douteux qu'« on puisse arriver à [une] connaissance exacte, tant il est arrêté qu'il restera toujours beaucoup d'obscurité dans nos lumières »¹⁵, qu'il soit possible de dépasser nos simples sensations afin d'accéder à une connaissance, et qu'une telle préoccupation soit simplement légitime.

⁹ Leibniz, cité par Costabel, *La question des forces vives*, op. cit. 1, p.17.

¹⁰ Ibid., p.51-52. Boscovich, *De viribus vivis dissertatio*, 1745.

¹¹ Ibid., p.52.

¹² D'Alembert, *Traité de Dynamique*, 1758, p.XXI.

¹³ Hans Sloane, British Museum, MSS 4044, f 30 ; cité par I. Bernard Cohen, Isaac Newton, Hans Sloane and the Académie Royale des Sciences, in *L'aventure de la science : Mélanges Alexandre Koyré* (Paris, 1964) I, p.100.

¹⁴ Histoire Royale de l'Académie des Sciences (HARS par la suite), 1730, p.9-30, Mémoire p.452-509

¹⁵ Ibid, p.17.

D'Alembert s'interroge dans l'*Encyclopédie*¹⁶ quant à la nature de la chaleur et sa mesure ; il serait vain de vouloir s'en former une autre idée que celle de la sensation qu'elle excite en nous, et il serait absurde de vouloir comparer nos sensations, et donc la sensation de chaleur, à l'aide de nombres. Réaumur était physicien, mais il était également chimiste, et nous allons voir cette question de la chaleur peu à peu être discutée par les chimistes à un moment où ces derniers se posent des questions quant au statut même de la Chimie, sa mathématisation, et plus généralement, la définition même de la chimie. En effet, pour les Encyclopédistes, tel Venel (1723-1775) qui rédige l'article « Chymie »¹⁷ en 1753, le chimiste doit « mettre bas la robe », et surtout ne pas soumettre la chimie à un système. Par cette proclamation, Venel avait probablement pour objet la nécessité de distinguer la Chimie de l'Alchimie. La science, dont l'« utilité absolue » est un fait incontestable, et ici la chimie a pour objet, selon les Encyclopédistes, de favoriser l'acquisition de connaissances pratiques, d'observations, de savoir-faire, en utilisant un langage courant. A la Physique de rechercher les causes ultimes ; à la Chimie de produire, notamment des médicaments, pour le bien des hommes. Tels devraient être les rôles respectifs que devraient jouer la Chimie et la Physique

Mais, pour cela, le statut social du chimiste doit être réévalué, car sa fonction est trop souvent méprisée : « Cette distinction [entre les *arts libéraux* et les *arts mécaniques*], écrit Diderot à l'article Arts, quoique bien fondée, a produit un mauvais effet, en avilissant des gens très-estimables & très-utiles, & en fortifiant en nous je ne sais quelle paresse naturelle, qui ne nous portoit déjà que trop à croire que donner une application constante & suivie à des expériences & à des objets particuliers, sensibles & matériels, c'étoit déroger à la dignité de l'esprit humain ; & que de pratiquer ou même d'étudier les *arts mécaniques*, c'étoit s'abaisser à des choses dont la recherche est laborieuse, la méditation ignoble, l'exposition difficile, le commerce déshonorant »¹⁸

La Chimie est de plus un Art, et cet artisan qu'est le chimiste se doit, par sa grande expérience, son habitude, son habileté, « son coup d'œil » de savoir estimer précisément une température, et ce sans le recours à l'instrument qu'est le thermomètre, qui ne peut conduire qu'à des mesures artificielles. On le voit, pour Diderot (1713-1783), d'Alembert, ou Venel, le chimiste, « artiste fou » des Lumières doit être, par son expérience, plus précis que tout instrument de mesure. La Chimie ne doit et ne peut être mathématisée

On sait que ce point de vue de la Chimie des Lumières de cette période conduira à un échec puisque, dans ce domaine, il n'a pas contribué à sortir d'un certain obscurantisme. Contrairement aux vœux des Encyclopédistes, « le chimiste le plus éclairé » n'a pas réussi à perfectionner l'« art chimique ». La rupture sera totale au moment où la chimie subira des mutations profondes, fécondes et essentielles pour l'essor de la chimie moderne avec des savants tels, en France, Lavoisier (1743-1794) ou Berthollet (1748-1822). C'est alors la théorie qui, à partir de cette période, inspire et commande la pratique. On constate un renouvellement complet d'une chimie vieillie ; il s'accompagne de questionnements nombreux d'ordre conceptuels qui, dans le cas de la chaleur, seront initiés en Angleterre et en Ecosse. Grâce aux travaux de Black (1728-1799), qui travaille dans le nouveau domaine de la calorimétrie, il va d'abord être possible, dans les années 1760, de distinguer ces deux concepts que sont la chaleur et la température, à partir de la supposition implicite de la conservation de la chaleur. Des mesures, lors des changements d'état de la matière conduisent en effet Black à définir la notion de chaleur latente qui permet de découpler chaleur et température :

« J'imaginai qu'au cours de l'ébullition, de la chaleur est absorbée par l'eau et entre dans la composition de la vapeur produite, de la même manière que de la chaleur est absorbée par la glace lors de la fusion et entre dans la composition de l'eau résultante. Et, de même que l'effet observable de la chaleur dans ce dernier cas consiste, non pas à échauffer les corps environnants, mais à transformer la glace en eau ; de même, dans le cas de l'ébullition, la chaleur absorbée n'échauffe pas les corps environnants, mais transforme l'eau en vapeur. Dans

¹⁶ Jean Le Rond d'Alembert, op.cit. n.2, article Thermoscope.

¹⁷ Ibid, article Chymie.

¹⁸ Diderot, op.cit. n.2, article Arts.

les deux cas, nous ne percevons pas sa présence en tant que cause d'échauffement ; elle est dissimulée ou latente, et je lui donnerai le nom de chaleur latente. »¹⁹

C'est une étape importante, car Black a pu ainsi définir ce nouveau concept de chaleur, qui devient alors une grandeur mesurable, et non plus comme précédemment une simple sensation. Rupture essentielle avec les conceptions de Venel et Diderot dans la manière de concevoir l'élaboration de la Chimie. Rupture essentielle pour l'élaboration du concept d'énergie.

Autour de ce domaine de la chaleur, s'est longtemps posée la question de sa matérialité éventuelle. Ce problème de la chaleur, central en chimie dans une perspective causale, s'appuie dans les années 1800, sur le concept de calorique, introduit par Lavoisier comme résultant de ses critiques sur le phlogistique, concept important de la théorie sur la chaleur alors en vigueur, et plus généralement sur l'analyse chimique et le rôle des gaz mis en évidence au travers du développement de la chimie pneumatique. De ce concept, Lavoisier en a fait un des fondements des modes d'explications possibles de tel ou tel phénomène. On peut d'ailleurs remarquer que son *Traité élémentaire de chimie*, dans lequel il propose la nouvelle « nomenclature » de la chimie en 1789, commence par une analyse de ce concept. Réfléchir sur la notion de calorique conduit bien naturellement à examiner et la place de ce concept dans un raisonnement de type causal, et le mode d'élaboration de ce concept de calorique. Il faut pour cela revenir aux premières réflexions de Lavoisier de 1766. Il privilégie une vision de physicien dans ses réflexions sur le calorique, et plus précisément il adopte délibérément un point de vue mécaniste pour décrire et « penser » le calorique. Quelques années plus tard, en 1777, au travers de mémoires lus à l'Académie des sciences, Lavoisier précise ses conceptions sur le calorique, à partir de la critique du point de vue alors adopté par les chimistes sur la chaleur. Becher (1635-1682) et son élève, Stahl (1660-1734), au 18^e siècle, avaient proposé une théorie dans laquelle l'élément central était la notion de phlogistique ; ils avaient pu expliquer nombre de réactions chimiques, notamment les réactions de « calcination » des métaux. La combustion d'un corps s'expliquait alors par la libération de phlogistique, fluide « subtil » supposé préalablement contenu dans ce corps. Lavoisier analyse ce point de vue dans un Mémoire au titre évocateur : *De la combinaison de la matière du feu avec les fluides évaporables*²⁰. Il suppose que le feu est une matière ; mais il affirme que cette matière, loin de se libérer lors de la combustion d'un corps, se combine tout au contraire, pour s'unir avec ce corps. Il reprend ensuite l'idée que la lumière et la chaleur sont intimement liées. Au travers de ce point de vue, on retrouve dans les travaux de Lavoisier des filiations et références, qui se situent chez des physiciens tels Euler (1707-1783), et des chimistes tels Meyer (1723-1762) qu'il a auparavant étudiés. Cependant, si Lavoisier rejoint ce dernier en considérant que la lumière et la chaleur ont une origine commune, il s'en distingue aussitôt en critiquant la méthode de travail approximative de celui-ci. Il indique en effet, dès 1773, dans ses *Opuscules*, que Meyer avait dû introduire, pour rendre compte des réactions chimiques, un principe, l'*acidum pingue*, qui, s'il était un principe très proche de la matière de la lumière et du feu, était néanmoins comparable au phlogistique de Stahl quant à ses propriétés. Selon Lavoisier, l'introduction de ce principe n'était en rien justifiée, et :

« ce chimiste s'est un peu abandonné à la propension qu'ont tous ceux qui croient avoir découvert un nouvel agent, et l'appliquent indistinctement à tout. »²¹

Lavoisier critique donc ici la méthode de travail de Mayer. Il lui oppose une rigueur dans les raisonnements à partir d'hypothèses clairement définies permettant de rendre compte de ses expériences, même si, quelques années plus tard, il admettra la possibilité de se laisser aller à quelques intuitions et de se livrer « aux conjectures » ; ainsi, écrira-t-il en 1777, que « tout fluide aériforme est un combiné de la matière du feu avec un fluide. »²² Il poursuivra en affirmant que, finalement seule l'expérience et le temps permettront de trancher entre les différents points de vues. En fait, le choix entre ces différents points de vue est discutable,

¹⁹ Black, cité par Halbwachs, in *Histoire de la chaleur*, CUIDE 6, N°17 septembre 1980, p.71.

²⁰ Lavoisier, *Œuvres*, Paris, Imprimerie Impériale, Paris, 1862-1864, Tome 2, Mémoires de physique et de chimie, 1777, p. 212 à 224.

²¹ Lavoisier, *Opuscules de physique et de chimie*, Paris, 1773, p.65 ; *Œuvres*, Tome 1, p. 485.

²² Lavoisier, op.cit. n.20, *De la combinaison de la matière du feu avec les fluides évaporables*, p. 212 à 224.

puisqu'en dernier ressort, ce n'est pas la seule expérience en tant que telle qui permet de choisir ; le sens que l'on donne à l'expérience et l'interprétation que l'on propose interviennent de manière déterminante. Probablement, Lavoisier n'avait-il pas à ce moment de cadre théorique à opposer à Stahl et au phlogistique, ou à Mayer et l'acidum pingue. Probablement également n'était-il pas satisfait par cet argument puisque, comme nous le verrons plus loin, il reviendra sur le sujet quelques années plus tard et avancera d'autres arguments plus convaincants.

LE CALORIQUE EXISTE-T-IL ?

Dans le mémoire *De la combinaison de la matière du feu avec les fluides évaporables*²³ se trouve une description du calorique qui présente de nombreuses analogies avec ce qu'écriront tant Young que Fresnel quelques années plus tard lorsqu'ils s'attacheront à décrire un autre fluide subtil, l'éther optique. Pour Lavoisier, qui semble alors reprendre une hypothèse émise par Boerhaave (1668-1738), la planète que nous habitons est environnée de toutes parts d'un fluide très-subtil qui pénètre tous les corps sans exception qui la composent ; ce fluide qu'il appelle fluide igné, matière du feu, de la chaleur et de la lumière, tend à se mettre en équilibre dans tous les corps, mais il ne les pénètre pas tous avec une égale facilité²⁴. Enfin, ce fluide existe tantôt dans un état de liberté, tantôt sous forme fixe, et combinée avec les corps.

Cette description conduit à s'interroger quant à la méthode employée par Lavoisier pour justifier l'existence du calorique. Elle est intéressante en ce qu'à la fois, elle pose la question de la définition de la notion de preuve, et qu'elle révèle dans le même temps des faiblesses dans le raisonnement. Lavoisier ne semble d'ailleurs pas l'ignorer, puisqu'il se propose de prouver « l'existence de la matière du feu dans tous les fluides aériformes »²⁵ ; pour cela, il suffit « que partout il explique tout ce qui arrive dans les expériences de physique et de chimie ; ce sera presque l'avoir démontré. »²⁶ Nous voyons apparaître des lacunes dans la rigueur de la démonstration tentée pour prouver l'existence du calorique. Dans le *Mémoire sur la combustion en général*, qu'il lit la même année 1777 à l'Académie des sciences, Lavoisier reprend la même notion de calorique faisant appel, comme pour occulter ses faiblesses, aux écrits de « Franklin, Boerhaave, et une partie des philosophes de l'antiquité »²⁷, et envisage le rapport que ce fluide impondérable peut entretenir avec la matière pondérable, ici du point de vue du chimiste :

« J'ajouterai, écrit-il en empruntant le langage de la chimie, que ce fluide est le dissolvant d'un grand nombre de corps ; qu'il se combine avec eux de la même manière que l'eau se combine avec les sels. »²⁸

Probablement Lavoisier n'a-t-il pas encore trouvé de modèle mécanique pour rendre compte des interactions entre le calorique et la matière. Ce n'est que six ans plus tard, dans un autre Mémoire important, *Réflexions sur le phlogistique pour servir de suite à la théorie de la combustion et de la calcination*, présenté à l'Académie des sciences en 1785, qu'il tente une explication mécanique, d'ailleurs assez brève ; et ce après avoir fait une critique approfondie du système de Stahl (1660-1734) au travers de laquelle il tente de démontrer notamment que « le phlogistique de Stahl est un être imaginaire dont il a supposé gratuitement l'existence »²⁹. Dans le système de Stahl, la calcination des métaux (c'est-à-dire l'oxydation) s'explique par une libération du phlogistique contenu dans ces métaux ; mais, en raisonnant de la sorte, on ne peut rendre compte de l'augmentation de poids des métaux calcinés qu'en supposant le phlogistique

²³ Ibid, Mémoires de physique et de chimie, 1777, p. 212 à 224.

²⁴ Cajori, *On the history of Caloric*, ISIS, vol. IV, 1921-1922, p. 483. Selon Cajory, on trouve cette idée de substance matérielle chez Lucrèce. Fox, *The caloric theory of gases from Lavoisier to Regnault*, Oxford, 1971. Heilbron, *Weighing imponderables and other quantitative science around 1800*, HSPS 24-1, 1993.

²⁵ Lavoisier, op.cit. n.20, 1777, *Mémoire sur la combustion des chandelles dans l'air atmosphérique*, p.193.

²⁶ Lavoisier, op.cit. n.20, *De la combinaison de la matière du feu avec les fluides évaporables*, p. 212.

²⁷ Lavoisier, op.cit. n.20, p. 228 .

²⁸ Ibid., p. 228.

²⁹ Ibid, *Réflexions sur le phlogistique pour servir de suite à la théorie de la combustion et de la calcination*, p.640. Voir aussi R. J. Morris, *Lavoisier and the caloric theory*, BJHS, Vol. VI, 1972, p.1-38. Laugier, *De l'alchimie de l'antiquité à la chimie de Lavoisier*, BUP n°756, p.1095-1115.

plus léger que l'air ; alors, sa présence dans une substance la fait paraître plus légère. Inversement, pour rendre compte d'autres expériences, le phlogistique ne doit pas avoir de poids. De même, dans certaines expériences, la phlogistique représente la matière de la chaleur, dans d'autres, non. Parfois, le phlogistique peut passer librement à travers les pores des vaisseaux, parfois non. La doctrine de Stahl se trouve donc être en contradiction avec elle-même dans un grand nombre d'explications en chimie. Cela conduit Lavoisier à formuler la conclusion suivante :

« Les chimistes ont fait du phlogistique un principe vague qui n'est point rigoureusement défini, et qui par conséquent, s'adapte à toutes les explications dans lesquelles ont veu le faire entrer ; tantôt ce principe est pesant, tantôt, il ne l'est pas ; tantôt, il est le feu libre, tantôt il est le feu combiné avec l'élément terreux ; tantôt, il passe à travers les pores du vaisseau, tantôt ils sont impénétrables par lui ; il explique à la fois la causticité et la non causticité, la diaphanéité et l'opacité, les couleurs et l'absence de couleurs. C'est un véritable Protée qui change de forme à chaque instant. »³⁰

Du point de vue de la méthode, dans tous les cas, la démonstration de Lavoisier se développe à partir de l'analyse de compte-rendu d'expériences, comme s'il s'agissait également de souligner la faiblesse de l'argumentation donnée dans la doctrine de Stahl. Cette manière de procéder constitue donc une méthode que Lavoisier emploie à la fois pour critiquer d'autant plus facilement la doctrine du phlogistique, ainsi que pour tenter de prouver, ou tout au moins de justifier, l'existence du calorique. Il le souligne d'ailleurs dans sa conclusion :

« il est temps de ramener la chimie à une manière de raisonner, plus rigoureusement (...) de distinguer ce qui est de fait et d'observation d'avec ce qui est systématique et hypothétique. »³¹

Certes, le phlogistique présente moult faiblesses comme Lavoisier le remarque. Il n'empêche ; on observe également une grande fragilité dans l'élaboration par Lavoisier de ce nouveau fluide subtil qu'est le calorique. Tout comme on pourra, 30 ans plus tard, remarquer une même faiblesse dans l'élaboration d'un autre fluide subtil par Fresnel : l'éther lumineux, milieu supposé être le support à la propagation de la lumière. La similitude est frappante quant aux arguments utilisés par les deux savants. Mais revenons au calorique. Pour Lavoisier, l'existence du calorique est à admettre, en tant que cause de la chaleur, et dont l'absence est la cause du froid. Par contre, il faut très probablement entendre la cause matérielle au sens aristotélicien, puisqu'elle désigne finalement ce qui est condition nécessaire de l'apparition d'un produit dans la nature. Ce fluide, dont il suppose a priori la possibilité qu'il existe, se loge entre les « particules » du corps, les écarte et occupe la place laissée. Lavoisier est bien conscient des problèmes que posent ses hypothèses. Certes, reconnaît-il, c'est une hypothèse que de supposer l'existence d'un tel fluide, mais c'est la seule, selon lui, qu'il est obligé de formuler, et qui plus est, les partisans du phlogistique ne sont, sur ce point, guère plus rigoureux. Ici, à la différence de Fresnel qui éprouvera pourtant les mêmes difficultés à prouver l'existence de l'éther, Lavoisier ne justifie pas son hypothèse au nom d'un critère de simplicité ou de fécondité de sa théorie, comme le fera Fresnel, mais au nom de la nécessité. C'est une différence d'approche dont on peut cependant trouver la raison dans le fait que Lavoisier, au contraire de Fresnel, tentait d'élaborer un concept – le calorique – qu'il souhaitait substituer à un autre concept – le phlogistique – dont les fondements étaient eux-mêmes très fragiles. Lavoisier ne manquera pas d'ailleurs de le faire remarquer. Au contraire, le système de Newton, malgré ses faiblesses dans le domaine de l'Optique, faisait figure de théorie solidement constituée, et pouvait donc supporter la comparaison. Fresnel ne donne pas les raisons de cette nécessité, qui est présentée comme une sorte d'évidence, de même que l'existence du calorique en tant que cause de la chaleur n'est elle aussi pas justifiée. C'est pourtant une question importante que Hume (1711-1776) avait formulée ainsi :

³⁰ Ibid., p. 654.

³¹ Ibid., p.640.

« Il n'est pas de question qui, en raison de son importance autant que de sa difficulté, ait causé plus de discussions chez les philosophes, tant anciens que modernes, que celle de l'efficace des causes, c'est-à-dire de la qualité qui fait qu'elles sont suivies de leurs effets. »³²

De même, d'où vient la nécessité qui unit le calorique à la chaleur, c'est-à-dire la cause à l'effet ? quelle est la nature de cette « connexion nécessaire » ? En fait, nous pouvons penser qu'ici Lavoisier comme d'autres savants auparavant, s'inspire implicitement des idées de Hume, qui avait introduit cette fameuse relation de « connexion » à partir des ressemblances entre relations. La connexion nécessaire est « la détermination par laquelle nous nous sentons poussés à passer de l'idée de l'une à celle de l'autre »³³. La cause est

« un objet antérieur et contigu à un autre, et tel que tous les objets ressemblant au premier soient placés en de pareilles relations d'antériorité et de contiguïté vis-à-vis des objets ressemblant au second. »³⁴

Les idées de nécessité ne sont pas inhérentes aux objets considérés, et Hume avait avancé l'idée originale de leur attachement à l'esprit : la nécessité est quelque chose qui existe dans l'esprit, pas dans les objets ; en effet, la seule considération de deux objets, ou de deux actions quelconques, si étroite qu'en soit la relation, ne pourrait donner a priori l'idée d'une connexion entre eux. C'est donc dans la détermination de l'esprit à penser d'un objet à un autre que réside la nécessité qui unit les causes et les effets. Aucun lien nécessaire n'est révélé par l'expérience en tant que telle. Celle-ci ne peut nous informer que sur l'efficace des causes, c'est-à-dire la qualité qui fait qu'elles sont suivies de leurs effets. Cette idée d'efficacité ne peut en aucun cas être dérivée de la raison, mais plutôt de l'expérience, qui elle-même ne nous apprend rien quant à la structure interne ou le principe opérant des objets. Là réside d'ailleurs, selon Hume, la force de la science newtonienne, laquelle ne prétend pas remonter aux principes premiers, aux essences, et rechercher les qualités originelles ultimes de la nature humaine. On le sait, cette question de la causalité sera résolue d'une toute autre manière par Kant, qui considérera que les lois de la physique reposent sur des a priori. Kant « sauvera » le concept de cause en affirmant que celui-ci est établi a priori avant toute expérience. Nous voyons que ce critère de nécessité, mis en avant par Lavoisier, demandait à être explicité. Cette référence aux idées de David Hume, qui ont très probablement été source d'inspiration pour Lavoisier, se retrouvent dans la démarche que ce dernier adopte pour rendre compte des phénomènes. C'est donc le mode d'explication en physique et en chimie qui se trouve ici interrogé³⁵.

Analyser les modes d'explication en sciences suppose résolue la question du concept d'explication. Le problème maintes fois évoqué du pourquoi et/ou du comment des phénomènes trouve probablement une de ses origines ici, puisque sont interrogés les modes différents de registre d'explication. Encore faut-il avoir réfléchi à la notion de causalité, celle-ci étant parfois considérée comme un des fondements possible d'un raisonnement de type explicatif. Surgit alors une autre question, qui est celle de la diversité dans la définition de cette notion liée à tel ou tel courant philosophique, et qui s'inscrit dans un contexte historique particulier.

Il faut donc supposer que les molécules du corps solide considéré sont retenues par une force d'attraction, « quelle que soit la cause, et une loi générale de la nature, à laquelle toute la matière paraît soumise. »³⁶ Le niveau d'explication de Lavoisier, même s'il fait intervenir des forces, reste, contrairement à ce que fera Fresnel, qualitatif et même approximatif : il poursuit sa démonstration en confondant finalement matière et force, pour conclure sur le fait que ces « deux forces, le fluide igné, la matière du feu » et l'attraction s'équilibrent. C'est grâce à l'existence supposée de ces deux forces, et en considérant la pesanteur et l'atmosphère que Lavoisier peut alors rendre compte des changements d'états de la matière.

³² Hume, *Traité de la nature humaine*, 1734, Ed. Félix Alcan, Paris, 1930, p.198. Deleuze, *Empirisme et subjectivité ; essai sur la nature humaine selon Hume*, PUF, 1953.

³³ Ibid., p.212.

³⁴ Ibid., p.213.

³⁵ Arnaud Mayrargue, Calorique et éther lumineux : rôle historique dans les modes d'explication, Bulletin de l'Union des Physiciens, n°860, janvier 2004.

³⁶ Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, Paris, 1789, p.3.

Pour asseoir cette notion de fluide igné, Lavoisier avance trois arguments dans les *Vues générales sur la formation et la constitution de l'atmosphère de la Terre*³⁷. Tout d'abord, l'existence de ces fluides est généralisable : autant les gaz ne peuvent s'échapper à travers les pores de verres ou de métaux, autant il existe des fluides plus subtils, qui échappent d'ailleurs à nos sens ; ce sont des fluides électriques et magnétiques, qui « constituent en quelque façon un quatrième mode d'existence des corps. »³⁸ Lavoisier affirme ensuite que l'existence de ces fluides n'est pas douteuse, puisqu'elle se démontre continuellement par des effets. Enfin, Lavoisier propose, pour donner des résultats quantitatifs, de reprendre les résultats de Newton en dotant la force de répulsion d'une loi : cette force agit en raison inverse du carré de la distance. On voit donc apparaître ici un début de mathématisation de la chimie. Ces trois arguments sont, selon Lavoisier, des raisons supplémentaires qui font

« voir, qu'au-delà des gaz, il existe un autre ordre de fluides plus subtils. »³⁹

Ces fluides peuvent être classés, et le fluide le plus subtil est désigné par les « physiciens » modernes sous le nom de calorique. Sa pesanteur est très petite, puisqu'elle échappe à tous les instruments de mesure. Enfin, il pénètre tous les corps, même les plus denses. Il existe d'autres fluides plus subtils que les gaz, mais moins que le calorique dans les domaines de l'électricité et du magnétisme, « et sans doute plusieurs autres qui nous sont encore inconnus. »⁴⁰

LAVOISIER, LAPLACE, ET LE *MEMOIRE SUR LA CHALEUR*

Malgré ces précisions, Lavoisier considère pourtant qu'il n'a pas atteint son objectif. Il est encore resté dans le domaine des conjectures et des hypothèses, au lieu de parvenir à l'acquisition de « quelques connaissances positives sur la nature des fluides. »⁴¹ On peut remarquer ces imperfections dans d'autres écrits de Lavoisier sur le sujet, notamment lorsqu'il collabore avec Laplace (1749-1827), avec qui il avait déjà travaillé à la construction en 1781 du fameux calorimètre à glace, ainsi qu'à l'évaluation, rendu possible grâce à l'existence de cet appareil, des chaleurs spécifiques de substances variées. Dans cette dynamique, il avait entrepris avec Laplace une réflexion sur la chaleur dont on retrouve la trace dans le *Mémoire sur la chaleur* qu'ils publient ensemble en 1783⁴². Ce Mémoire n'apporte rien que peu d'informations quant aux idées de Lavoisier et à l'évolution de sa pensée. Son importance est ailleurs. Il a en effet le mérite de faire le point sur les idées quant au calorique. Laplace et Lavoisier ayant des idées différentes sur le sujet, ce Mémoire se propose de les exposer.

Selon le premier point de vue, probablement celui de Lavoisier, la chaleur est un fluide répandu dans tout l'espace ; celui-ci pénètre plus ou moins les corps en fonction de leur disposition à le retenir :

« il peut se combiner avec eux, et, dans cet état, il cesse d'agir sur le thermomètre et de se communiquer d'un corps à l'autre, ce n'est que dans l'état de liberté, qui lui permet de se mettre en équilibre dans les corps, qu'il forme ce que nous nommons chaleur libre. »⁴³

L'autre point de vue défend l'idée que

« la chaleur n'est que le résultat de mouvements insensibles des molécules de la matière. »⁴⁴

³⁷ Lavoisier, op.cit. n.20, p. 804-811.

³⁸ Ibid., p. 804-811.

³⁹ Ibid., p. 807.

⁴⁰ Ibid., p. 810.

⁴¹ Ibid., p. 811.

⁴² Voir Guerlac, *Memoir on Heat*, introduction à la traduction du Mémoire sur la Chaleur, New York, 1981, p.VII-XVII

⁴³ Lavoisier, *Mémoire sur la chaleur*, lu le 28 juin 1783 à l'Institut, p.10.

⁴⁴ Ibid., p.10.

Cette matière est remplie de pores ou de petits vides qui laisse la possibilité aux particules de matière d'osciller.

« C'est ce mouvement intestin qui, suivant les physiciens dont nous parlons, constitue la chaleur. »⁴⁵

Nous retrouvons en fait ici sensiblement les idées avancées au 17^e siècle par Bacon. En effet, celui-ci supposait non pas que la chaleur est produite par le mouvement, l'agitation des corpuscules des corps :

« nous ne disons pas que la chaleur engendre le mouvement ou que le mouvement engendre la chaleur (bien que l'une et l'autre soient vraies dans certains cas), mais que la chaleur en son être même, c'est-à-dire la quiddité de la chaleur, est le mouvement et rien d'autre. »⁴⁶

Ce mouvement est la « forme » ou l'essence de la chaleur. Newton avait lui-même précisé ce point de vue dans les questions 18 et 28 de l'*Optique*. Il s'interrogeait d'abord pour savoir s'il existait un fluide très subtil qui, en vibrant, pouvait communiquer la chaleur, et si « ce milieu n'est-il pas le même que celui qui réfracte et réfléchit la lumière, qui la met dans des *accès de facile réflexion et de facile transmission*, et qui par ses vibrations chauffe les corps au foyer d'un miroir ardent ? Les vibrations de ce milieu ne contribuent-elles pas à la violence et à la durée de la chaleur qu'elles ont excitée ? »⁴⁷ Ce milieu « ne pénètre-t-il pas promptement tous les corps ? et en vertu de son élasticité, n'est-il pas répandu dans la vaste étendue des cieux ? »⁴⁸ Cependant, lorsqu'il faisait intervenir des considérations mécaniques, notamment la possibilité d'un freinage éventuel des astres à cause de l'existence de ce milieu, alors Newton mettait en cause son existence elle-même, et le rangeait alors résolument dans la catégorie des « êtres fictifs »⁴⁹ pour enfin conclure quant au caractère « insoutenable » de ces hypothèses. Donc, au travers de ce second point de vue, présenté par Lavoisier et Laplace dans leur Mémoire commun, la chaleur n'est pas un corps. C'est une « force vive » par ailleurs mesurable.

Entre ces deux hypothèses, les deux auteurs ne choisissent pas : « Nous ne déciderons pas entre ces deux hypothèses (...) peut-être ont-elles lieu toutes deux à la fois. »⁵⁰ Conséquence d'un compromis probable, les auteurs proposent simplement de changer, pour passer d'une hypothèse à l'autre, « les mots de chaleur libre, combinée et chaleur dégagée, de ceux de force-vive, perte de force-vive, et augmentation de force-vive. »⁵¹ Ainsi, puisque nous sommes ignorants quant à la nature de la chaleur, il faut donc n'en considérer que les effets. Celui qui est proportionnel à la cause, et facilement mesurable, « représentera la chaleur, de même qu'en dynamique, nous représentons la force par le produit de la masse par le carré de la vitesse. »⁵² En clair, cela veut dire qu'on peut associer la conservation des forces vives et la conservation de la chaleur en opérant ainsi une liaison entre force vive et chaleur. Par cette mise en relation remarquable entre chaleur et force vive, deux domaines jusque là étrangers, Lavoisier et Laplace préfigurent ainsi les travaux de la première moitié du 19^{ème} siècle concernant les transformations entre formes d'énergie.

L'IDEE D'ENERGIE

Les connaissances sur la chaleur et sur les gaz permettent également des avancées techniques : on assiste ainsi, en juin 1783 également, à l'envol du premier aérostat inventé par Montgolfier (1740-1810). L'engin puise son énergie dans la chaleur. L'envol des ballons, événement

⁴⁵ Ibid., p.10.

⁴⁶ Francis Bacon, *Novum Organum*, (1620), (réed. 1986), PUF, aphorisme 20, livre II, 222.

⁴⁷ Newton, *Optique*, 1704, réed. Paris, 1989, Christian Bourgeois, p. 301.

⁴⁸ Ibid., p.302.

⁴⁹ Ibid., p.317.

⁵⁰ Lavoisier, op.cit. n. 43, p.12.

⁵¹ Ibid., p.14, Halbwachs F., *Histoire de la chaleur*, in *CUIDE 6 Paris*, 1980.

⁵² Ibid., p.14.

considérable, va déclencher un engouement pour ce domaine de la science, qui s'accompagne du lancement de programmes de recherche théorique nationaux souvent secrets commandés par le gouvernement sur la nature de la chaleur. Il peut être intéressant de maîtriser le vol notamment pour surveiller les troupes adverses. La presse se fait l'écho de cet engouement. De nombreux articles du *Journal des Sçavans* font référence à l'envol des ballons entre 1783 et 1786. Pour magnifier leurs performances, on considère « ces vaisseaux » célestes portés par des Dieux. Grâce à cet événement, l'idée d'énergie dépasse alors le cercle des Savants pour acquérir notamment, avec les Lumières, une dimension métaphorique : elle va ainsi nourrir tant la philosophie, la littérature ou les beaux arts. « Energie et énergiques sont fort à la mode », écrit l'abbé Féraud (1725-1807) dans le *Dictionnaire critique de la langue française* (1787). Il est précédé par Georg Sulzer (1720-1779) qui, dans un mémoire *L'énergie dans les Beaux-Arts*⁵³ affirme que « l'énergie produit les vraies forces motrices de l'âme, et la fait passer du sentiment à l'action. » La référence à Leibniz est claire et, comme le fait remarquer justement Michel Delon⁵⁴, ses écrits seront source d'inspiration pour les encyclopédistes qui feront souvent des emprunts à Sulzer. L'énergie chez les Lumières va devenir également l'effort pour s'arracher aux ténèbres, la tension vers la lumière (fiat lux). La musique, écrit d'Alembert, n'est propre par sa nature qu'à rendre avec énergie les impressions vives ou les passions violentes. Avec l'envol des montgolfières, l'énergie prend l'aspect d'une aisance. Des revues non spécialisées reprennent le sujet : le *Journal de Paris* fait ainsi une part très importante à l'imaginaire qui laisse entrevoir une autre idée de l'énergie : on évoque Icare, dont n'a plus à « craindre le sort »⁵⁵ ; des poèmes célébrant cette découverte sont publiés. On y perçoit les multiples enjeux : il s'agit ainsi d'explorer de nouveaux espaces, puisque « Cook marche au fond des mers, Montgolfier vole aux Cieux », et également de dominer le monde : « Craignez-vous que quelque Anglais, hardi navigateur, de cette invention ne nous vole l'honneur. »⁵⁶ (28 VIII 1783). Citons enfin Snetlage (1743-1812), grand-oncle de Friedrich Engels (1820-1895), qui constate en 1794 dans le *Nouveau dictionnaire français* : « le mot d'énergie qui ne se disait ci-devant en français que de la force de la parole, de la diction et du style vigoureux a acquis sous le régime présent une amplification et une force d'action prodigieuse. Il paraît être devenu l'expression favorite de la nation française ainsi que la qualité qu'il désigne, sa qualité chérie (L'énergie de la liberté, l'énergie républicaine, l'énergie est à l'ordre du jour) ».

⁵³ Mémoires de l'académie de Berlin, 1765, p. 465-492.

⁵⁴ Michel Delon, *L'idée d'énergie au tournant des Lumières*, Paris.

⁵⁵ *Le Journal de Paris*, 10 IX 1783, p.1042.

⁵⁶ *Ibid*, 28 VIII 1783, par M. Gudin de la Brunellerie, p.989-990.