

SOMMAIRE

INTRODUCTION <i>Gabriel Gohau</i>	p. 1
---	------

L'ÉMERGENCE DU CONCEPT D'ÉNERGIE ET SON CONCEPT

Introduction <i>Muriel Guedj</i>	p. 17
Chapitre I : Émergence du concept d'énergie <i>Arnaud Mayrargue</i>	p. 21
Chapitre II : La conservation de la force et la critique du concept d'énergie par Faraday <i>Bahram Djenab</i>	p. 49
Chapitre III : Résonances théologiques de la notion d'énergie <i>François Euvé</i>	p. 65
Chapitre IV : La chaleur de la Terre <i>Gabriel Gohau</i>	p. 83

LA THERMODYNAMIQUE ET LES TRANSFORMATIONS DE LA PHYSIQUE

Introduction <i>Muriel Guedj</i>	p. 99
Chapitre V : Du concept de travail vers celui d'énergie : l'apport de William Thomson <i>Muriel Guedj</i>	p. 103

Chapitre VI : Le débat Mécanisme/Energétisme
vu à travers l'œuvre de Pierre Duhem p. 127
Paul Brouzeng

Chapitre VII : La mécanique chimique
de Pierre Duhem : application ou transformation
de la thermodynamique p. 143
Pierre-Michel Vauthelin

Chapitre VIII : L'état de la physique vers 1900 p. 157
Michel Paty

Chapitre IX : Les conceptions sur la physique
au tournant des XIX^e et XX^e siècles p. 195
Michel Paty

ÉNERGIE ET BIOLOGIE : DE LA VIE À LA PENSÉE

Introduction p. 237
Danièle Ghesquier-Pourcin

Chapitre X : Auguste Chauveau (1827-1917) et
l'essor de l'énergétique dans la physiologie
française au tournant du siècle p. 243
Jean-Gaël Barbara

Chapitre XI : L'énergie et le vivant : les colloïdes
du protoplasme, acteurs de la vie
et de son évolution p. 261
Danièle Ghesquier-Pourcin

Chapitre XII : Énergétique de la fibre nerveuse :
Julius Bernstein et la théorie membranaire p. 275
Jean-Claude Dupont

Chapitre XIII : Charles Féré (1852-1907) et
l'énergétique du système nerveux p. 291
Stéphanie Dupouy

Chapitre XIV : Thermodynamique et historicité
de l'évolution chez les Néolamarkiens français p. 307
Laurent Loison

Chapitre XV : La naissance des sciences de l'esprit
au tournant du XX^e siècle p. 323
Angèle Kremer Marietti

L'ÉNERGIE DANS L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES

Introduction p. 343
Gabriel Gohau

Chapitre XVI : La réforme de l'enseignement
secondaire de 1902 : une nouvelle ère pour
l'enseignement des sciences ? p. 347
Renaud d'Enfert

Chapitre XVII : L'introduction du principe
de l'énergie dans l'enseignement secondaire
français, vu à travers quelques manuels p. 361
Muriel Guedj

BIBLIOGRAPHIE p. 383

**Energie, Science et Philosophie
au tournant des XIX^e
et XX^e siècles**

*Sous la direction de
Danièle Ghesquier-Pourcin
Muriel Guedj
Gabriel Gohau
Michel Paty*

*Jean-Gaël Barbara, Daniel Becquemont,
Anastasios Brenner, Paul Brouzeng,
Renaud D'Enfert, Bahram Djenab,
Jean-Claude Dupont, Stéphanie Dupouy,
François Euvé, Danièle Ghesquier-Pourcin,
Gabriel Gohau, Muriel Guedj,
Leonid Heller, Angèle Kremer-Marietti,
Olivier Lahbib, Laurent Loison,
Arnaud Mayrargue, Michel Niqueux,
Michel Paty, Jean-Jacques Szczeciniarz,
François Vatin, Pierre- Michel Vauthelin,
Franck Dominique Vivien*

Introduction

*Gabriel Gohau*¹

L'année 1895 correspond, pour le propos du présent volume, à deux événements majeurs. Le 15 novembre la Revue générale des sciences pures et appliquées publie sous le titre « La déroute de l'atomisme contemporain » la traduction d'un texte du chimiste allemand Wilhelm Ostwald proposant de substituer à l'étude de la matière celle de l'énergie, puisque « ce que nous savons et disons de la matière (est) déjà compris dans l'idée d'énergie ».

On y lit que

« la matière est une invention, assez imparfaite d'ailleurs, que nous nous sommes forgée pour représenter ce qu'il y a de permanent dans toutes les vicissitudes. La réalité effective, celle qui fait effet sur nous, c'est l'énergie ».

Quand on reçoit un coup de bâton, affirme l'auteur, on ne ressent pas le bâton mais son énergie. D'ailleurs, nos sensations

« correspondent à une différence d'énergie entre nos organes des sens et le milieu qui les entoure² ».

Le chimiste précise, au passage, que son propos concerne les problèmes de la science positive et non les questions morales ou religieuses. Le titre original en allemand, « Le dépassement du matérialisme scientifique », ne visait pas le matérialisme philosophique ajoute la direction de la revue.

Le second, en fait chronologiquement le premier, des deux événements évoqués, s'attaque plus directement aux racines philosophiques de la science. Revenant de Rome, Ferdinand Brunetière, directeur de la *Revue des Deux Mondes*, publie dans son périodique, dans la livraison de janvier-février 1895, sous le titre « après une visite au Vatican », un article qui annonce la banqueroute de la science, en reprenant une expression utilisée dans la précédente décennie par son ami l'écrivain Paul Bourget, lui aussi hostile à l'importance prise par la science. La science a, selon eux, échoué non seulement à résoudre mais simplement à poser les mystères qui préoccupent l'homme, tant sur son origine que sur sa conduite et sa destinée. Ses productions ont-elles rendu l'humanité plus heureuse ? A voir la laideur de nos banlieues industrielles ou les conditions des mineurs on a tout lieu d'en douter. Le littérateur vise un illustre chimiste, Marcellin Berthelot qui prétend que le monde est aujourd'hui « sans mystère », et que c'est « la science qui établit les bases inébranlables de la morale »³. Pourtant adversaire, comme Ostwald, de l'atomisme, Berthelot est un défenseur intransigeant du matérialisme qu'attaque son collègue allemand. C'est dire que les pensées se croisent et se répondent en un imbroglio en cette fin de siècle.

La science et la religion affichent leurs prétentions concurrentes à expliquer le monde et à répondre aux interrogations morales. Berthelot, qui répond énergiquement à Brunetière, n'est pas isolé, il a ses amis qui lui offrent un banquet à Saint-Mandé, le 4 avril 1895, à l'initiative de Georges Clemenceau, qui était médecin avant de devenir un homme politique, pour le féliciter de la vigueur de sa réplique. Il a aussi pour ami Ernest Renan qui avait écrit dans *l'Avenir de la science* en 1848 (le texte fut publié seulement en 1890) que celle-ci est la vraie religion, car elle seule « peut dire à l'homme le mot de sa destinée et lui enseigner le moyen d'atteindre la fin ». Il est aussi soutenu par Hippolyte Taine qui préconise le rattachement des sciences morales aux sciences naturelles. Le combat est rude, et il laissera des traces dans le siècle suivant : la philosophe mystique Simone Weil qualifiera plus tard ces trois esprits de pitoyable trilogie.

Ce combat, d'ailleurs, ne surgit pas dans ces années 1890. Brunetière nous dit en effet, en 1896, que, vingt-cinq ou trente ans auparavant,

« une doctrine, qui affectait les allures d'une religion de la matière, régnait presque souverainement, en philosophie, sous le nom de positivisme, et en art et en littérature, sous les noms de réalisme ou de naturalisme »⁴.

Ce sont donc toutes ces pensées qui sont dénoncées par les adversaires de la science — lesquels, tout au long du demi-siècle savent aussi trouver des alliés dans le camp même des savants. Tout le monde a encore en mémoire un célèbre avertissement lancé vingt ans plus tôt par le physiologiste allemand Emil Du Bois Reymond. Dans un discours tenu à Leipzig, en 1872, ce dernier s'interrogeait

sur « les limites de la connaissance de la nature ». *Ignorabimus*, disait-il à propos de sept énigmes : la nature et la matière de la force, l'origine du mouvement, la finalité de la nature, la première apparition de la vie, l'apparition des sensations et de la conscience, l'origine du langage et la question du libre-arbitre.

Pourtant les connaissances avaient progressé au fil de la seconde moitié du siècle. Le problème des origines avait reçu un début de réponse scientifique dans la théorie évolutionniste de Charles Darwin (1859). Et la physique avait fait un bon en avant grâce au concept d'énergie, qui constitue le sujet du présent volume. Mais, précisément, les critiques d'Ostwald montrent que cette question n'est pas sans conséquences philosophiques puisqu'elle remet en cause le matérialisme scientifique et l'atomisme. D'une certaine manière le chimiste rejoint le physiologiste quand il reprend à son compte une formule de Kirchoff : substituer à la prétendue explication de la Nature la description des faits. Adepte de ce qu'on pourrait nommer le phénoménisme, sorte de cousin du positivisme, il refuse de forger des entités explicatives.

Le matérialisme physique se proposait au contraire comme une explication. Plus exactement, le mécanisme, avec lequel on le confond volontiers, pouvait passer pour une façon de réunir les phénomènes de la nature sous une commune bannière. La matière était formée de particules, les atomes. Et la théorie cinétique des gaz expliquait la température et la pression de la matière diluée. Matière et mouvement étaient les entités d'une physique dont Descartes avait donné les bases. Le concept d'énergie, en trouvant un équivalent au travail et à la chaleur, ne contredisait pas le modèle mécanique.

Il existait pourtant, de longue date, une autre façon de concevoir la chaleur, sous la forme du concept de feu. La question du feu, nous dit Hélène Metzger,

« s'est posée impérieusement depuis qu'il y a des philosophes et des chimistes et elle a reçu multitude de réponses différentes. Rappelons les deux principales : pour les uns, le feu est un élément comme un autre qui entre dans la composition de la plupart des corps que la chimie étudie ; pour les autres, le feu est un phénomène provoqué, comme l'explique Descartes, par les mouvements de la matière subtile.⁵ »

Présentant Hermann Boerhaave, l'historienne nous dit l'hésitation de celui-ci entre les deux solutions. Dans un premier temps,

« nous croyons instinctivement que Boerhaave va aboutir à l'hypothèse du fluide calorique que Lavoisier et ses successeurs ont considéré comme un corps simple, impondérable ».

Toutefois si, pour le « professeur de Leyde (...) le feu restera bien un élément matériel », on peut dire, en examinant certains de ses propos, qu'

« au lieu de nous faire penser au fluide calorique, [son feu] nous semblera ressembler à la matière subtile cartésienne ; pour parler plus exactement, le feu (ou la chaleur) ne sera ni uniquement un corps ni uniquement le mouvement de n'importe quel corps, mais le mouvement communiqué au reste de la matière par les atomes d'un élément spécifique auquel les chimistes ont réservé le nom de feu ».

Chez Stahl, au contraire, la matière du feu appartient à ce qu'à la suite de Becher il nomme des terres. Il en

distingue trois, en les assimilant aux principes de Paracelse : sel, soufre et mercure. La première est la terre vitrifiable qui forme la base des métaux et celle des minéraux, donc aussi des pierres, graviers et cailloux. La deuxième est la terre sulfureuse ou phlogistique, et la troisième est la terre mercurielle, fluide, qui donne aux métaux leur éclat. La terre sulfureuse est la matière du feu. Le principe sulfureux, dit Stahl, cité par Hélène Metzger

« est non seulement un être approprié au mouvement igné et même celui qui y semble uniquement destiné ; mais encore, à parler raisonnablement, ce principe est le feu corporel, la vraie matière du feu, le vrai principe de son mouvement dans toutes les combinaisons inflammables ».

Comme on l'a dit plus haut, le mécanicisme qui dominera longtemps la pensée scientifique délaissera le concept de feu-élément. Il n'est malgré tout pas indifférent de noter que le fondateur de la chimie moderne, Antoine-Laurent Lavoisier, est encore un adepte du calorique. Et plus curieusement, sans doute, un de ses adversaires, le naturaliste Jean-Baptiste Lamarck, oppose à ce qu'il nomme la théorie pneumatique de Fourcroy, le disciple de Lavoisier, fondée sur les gaz, une théorie pyrotique dont l'élément-clef est précisément le feu. Et c'est un feu tout aussi subtil que le calorique de Lavoisier, puisque c'est un fluide qu'il nomme « incontenable », c'est-à-dire qui traverse toutes les parois matérielles composées des autres éléments — car il faut préciser que Lamarck refuse les éléments de la nouvelle chimie au profit des anciens éléments (terre, eau, air, et feu) d'Empédocle.

Abandonnons à la fois les polémiques des années 1890 sur la prétendue faillite de la science et cette amorce d'un historique de l'élément-feu, et situons-nous résolument

dans l'entre-deux de ces deux époques pour en venir à ce qui fait l'objet de cet ouvrage. Le thème en est l'énergie, sa naissance et les premiers développements de l'énergétique. A l'origine, un séminaire, tenu à l'initiative de Danièle Ghesquier-Pourcin et dirigé, outre celle-ci, par Gabriel Gohau, Muriel Guedj et Michel Paty. Ce séminaire, qui a débuté le 22 mars 2004, s'est poursuivi pendant les deux années universitaires suivantes, jusqu'au 2 juin 2006, dans les locaux de l'Equipe de recherches REHSEIS, du CNRS et de l'Université Paris VII-Diderot, sur la dalle des Olympiades, rue Nationale, à Paris-13^e. Les 35 interventions, présentées en 16 séances, sont regroupées en 2 volumes et 32 textes présentés dans un ordre logico-chronologique.

Si l'on consulte les dictionnaires de langue, pour comprendre quand naît le concept d'énergie, notamment le *Robert historique*, on aboutit aux observations suivantes, qu'il faut prendre avec les réserves d'usage, les lexicographes ne saisissant pas nécessairement les premières occurrences des concepts. Le terme « energy » (entendu comme concept scientifique) apparaît en langue anglaise en 1851. Il est repris en français comme « énergie » en 1854. Le dérivé « energetics » en anglais date de 1852. Energétique, en français, attendra 1868. « Thermodynamics » est de 1850 environ tandis que l'adjectif « thermo-dynamic » est forgé en 1849 (par William Thomson), repris en 1851 par Rankine. L'équivalent français date de 1862. Le mot « énergétisme » ne vient qu'en 1901. Cela laisse apparaître une antériorité britannique, notamment écossaise, et des étapes dans le cheminement qui conduit à l'énergétisme tel qu'il sera défendu par Ostwald dans les années 1890 (cf. ci-dessus).

La première partie de l'ouvrage est consacrée à l'émergence du concept d'énergie. Avant d'évoquer l'œuvre de Sadi Carnot, nous avons cru devoir remonter au siècle précédent, en voyant comment Leibniz conçoit son concept de « force vive ». Puis avant de passer par le contexte géologico-théologique, notamment en Ecosse, où les discussions sur la création du monde et son avenir — conservation ou déchéance du monde — occupent les esprits, nous nous arrêtons quelque peu aux critiques de Faraday.

Puis nous en arrivons à la naissance de l'énergie, avec la formulation de l'équivalent mécanique de la chaleur, qui amorce la deuxième partie sur la thermodynamique : du travail à l'énergie. En physique, le nouveau concept s'installe, en prenant le contre-pied de la synthèse antérieure qui avait prétendu tout unifier sous la forme de l'énergie mécanique. Il se présente comme un flux, non plus comme un mouvement de particules. Cette étape essentielle permet de rappeler le contexte dans lequel le concept de travail s'est substitué à celui de force et aussi de suivre pas à pas la construction du concept d'énergie, en rappelant que l'équivalent mécanique de la chaleur n'est pas identique à la conservation de l'énergie et que les étapes restantes méritent un examen détaillé. Les rôles de William Thomson (Lord Kelvin) et d'Ostwald sont mis en évidence.

Sous la forme de l'énergie potentielle, la révolution énergétique atteint la chimie. Les forces qui maintiennent les atomes dans les molécules et l'énergie qui s'échange lors des réactions chimiques sont de nature potentielle. Les lois de la thermodynamique chimique, telles que les formule Pierre Duhem, reflètent cet état de choses.

Et la partie se termine par deux mises au point utiles sur la physique au tournant du siècle, la première sur son contenu, celui de la physique classique et celui de la nouvelle physique ; la seconde sur ses aspects épistémologiques. Notamment les critiques de la vieille mécanique par les programmes énergétiste et électromagnétique.

En biologie (cette discipline occupe la troisième partie), l'énergie des aliments est aussi de nature potentielle. En montrant qu'elle obéit aux lois de la thermodynamique, les biologistes rompent avec le concept de force vitale spécifique. Au cours du métabolisme, l'énergie se conserve et se dégrade comme dans les phénomènes physiques. Les études portant sur l'énergie musculaire (travaux de Chauveau) et nerveuse (Berstein), auxquelles on peut associer l'énergie psychique de Charles Féré, sont symptomatiques de cette application de l'énergétique au vivant. Parce que l'énergie se présente sous forme de flux, elle s'échange à travers des membranes. La théorie membranaire de Julius Berstein en est un exemple. Mais le cas le plus paradigmatique est la théorie colloïdale qui, au niveau intra-cellulaire, se substitue à la théorie protoplasmique faisant intervenir la « matière » des molécules géantes, des « micromères » ou des granulations cytoplasmiques récemment découvertes. Et qui devient la théorie colloïdo-enzymatique après « l'observation » que les enzymes sont des colloïdes.

Il n'est jusqu'aux néo-lamarckiens qui, dans leur volonté de « physicaliser » la biologie évolutionniste, utiliseront la thermodynamique comme clef d'intelligibilité des mécanismes transformistes, notamment leur irréversibilité. Le cas de Le Dantec servira d'exemple.

A la marge de la biologie, quand Dilthey s'efforce d'opposer les sciences de l'esprit aux sciences de la

nature, il ouvre un champ dont l'exploration se poursuivra au long des premières décennies du XX^e siècle avec toute une cohorte de philosophes qui travailleront à la promotion de la psychologie comme science positive.

Mais avant de poursuivre les étapes de cette extension du concept, nous proposons à cet endroit, qui ferme le premier volume, une courte partie sur l'enseignement des sciences. Le tournant du siècle correspond à une importante réforme de l'enseignement secondaire. En 1902, le législateur décide que les sciences qui ont considérablement progressé doivent désormais, au même titre que les humanités classiques, faire partie de la culture. Ainsi, les « humanités scientifiques » (selon l'expression utilisée par Louis Liard) ont pour mission d'adapter l'enseignement au « monde moderne » industrialisé en questionnant les méthodes d'enseignement. En particulier la méthode inductive, centrée sur l'observation et l'expérience, remet en cause la méthode déductive. Il était donc tentant de voir la part prise par la notion d'énergie dans cette novation, singularité significative des épistémologies à la fois positivistes et scientistes de l'époque, montrant que l'histoire de l'enseignement des sciences participe de l'histoire des sciences.

La cinquième partie de l'ouvrage, située en début du second volume, est consacrée à l'énergétisme en relation avec la Russie, pays où il s'est particulièrement développé grâce à l'influence de Marx et d'Engels, de Mach et d'Ostwald. Les exemples retenus s'étalent sur une longue période et, bien entendu, les auteurs ne disposent pas du même contenu du concept en 1860 qu'en 1920. Ainsi, lorsque Marx et Engels, s'intéressent, dans les années 1850-1870, à la thermodynamique naissante, ils s'efforcent d'interpréter cette science à la lumière de leurs propres

conceptions des rapports entre la science et la société. C'est dans ce cadre que Podolinsky s'intéresse au rendement énergétique du travail et à la façon de l'améliorer. Ostwald et Mach vont influencer la Russie par l'intermédiaire de Bogdanov et occuper les pensées du peintre Malévitch, chez qui le concept est en quelque sorte « matérialisé » et sort franchement de la science. Pour Maxime Gorki, auteur notamment d'*Une Confession* (1908), l'énergie est psychophysique, elle émane du peuple et permet la réalisation de miracles.

Un dernier groupe de problèmes, qui correspond à la sixième partie : dans quelle mesure cette « révolution » (si c'en est une) a-t-elle des répercussions sur la pensée philosophique, qui elle-même subit à la même époque une profonde mutation. L'idéalisme hegelien qui jouait un rôle éminent pendant la première moitié du XIX^e siècle a cédé la place à des courants multiples plus ou moins issus des succès de la science triomphante. En France Félix Ravaisson, Emile Boutroux et d'autres se préoccupent de la « contingence des lois de la nature ». Les idées kantienne reviennent renforcées avec l'Ecole de Marbourg en Allemagne, et en France, le néo-criticisme de Renouvier et plus tard de Léon Brunschwig.

Mais les échecs de la science classique newtonienne invitent à mettre en relief ses limites. Brunetière dans les dernières années du siècle, dénonce la banqueroute de la science. C'est dans cet esprit que certains scientifiques s'efforcent de réduire leurs ambitions en déclarant, dans la lignée du comtisme, qu'ils cherchent à décrire plutôt qu'à interpréter la nature. L'énergétique répond à leur demande. Ostwald nomme énergétisme cette interprétation minimaliste de la nature. Sous ce nom d'énergétisme nous avons retenu, dans une première division de

l'ultime partie de l'ouvrage, quatre textes. D'abord, évidemment celui sur le monisme d'Ostwald. Mais aussi la vision phénoméniste de la science qui prend en charge les nouveaux concepts, contre le rationalisme mécaniciste. Des savants qui ont joué un rôle dans le développement de la thermodynamique, tels Duhem ou Mach, vont s'efforcer de participer à cette nouvelle philosophie. Sous le nom d'économie de pensée, Mach affirme le caractère conventionnel de la science, qui achoppe à découvrir la nature des choses et doit se contenter de cerner son fonctionnement.

La seconde division de cette partie est consacrée à ce qu'on nommera la science et la pensée. Le premier auteur présenté est le type des représentants de l'époque joignant de solides connaissances scientifiques, dans le domaine des mathématiques, appliquées aux sciences économiques et sociales, à de profondes réflexions philosophiques. Parti d'une perspective énergétiste, nourrie de la thermodynamique naissante, Augustin Cournot se dirigea plus tard vers le vitalisme.

Autre figure de même stature, Herbert Spencer dont l'évolutionnisme tient une place importante à côté des idées de Darwin. Et puis n'oublions pas Nietzsche : il a lu Helmholtz dans sa jeunesse et sa conception de la vie énergétique en porte la marque. Plus intéressé par la biologie que par la physique, Henri Bergson s'appuie aussi sur les nouvelles idées pour développer son thème de l'énergie spirituelle. Anti-intellectualiste, à la recherche d'une philosophie de la vie, il met l'accent sur la vie instinctive, inconsciente et sur l'intuition. Son élan vital est tout entier fondé sur la spontanéité, comme aussi toute la philosophie de l'action, représentée par Le Roy, qui joue un rôle important dans cette conception dynamiste qui

cherche à se dégager du carcan des idées mécanistes et du vieux matérialisme.

Pourtant celui-ci n'est pas réduit à l'impuissance. De Marx et Engels à Lénine, le matérialisme dialectique revendique sa place sur l'échiquier des adversaires du spiritualisme. Et naturellement, le matérialisme classique vit encore de beaux jours avec le succès des rééditions successives de *Force et Matière* de Büchner.

Nous laisserons le dernier mot à un scientifique. Le concept de masse-énergie d'Albert Einstein permet de réconcilier la matière (sous la forme de sa masse) et l'énergie, et donc de répondre à l'alternative entre les deux concepts que lançait Ostwald dans la citation qui ouvre cette introduction. Il offre une clôture, au moins provisoire, au problème.

Reste à se demander comment tous les courants qui agitent les pensées de l'époque se fécondent ou s'engendrent. Nous sommes partis de la naissance du concept d'énergie pour arriver aux arts et lettres et finalement à la philosophie. Tout se tient, bien sûr, comme le note Brunetière (cf. ci-dessus). Mais avons-nous démontré, au long de nos exposés, ce rôle essentiel de l'énergie ?

Dans une perspective assez voisine de la nôtre, Jean-Claude Pont a organisé en 2002, à Genève un colloque intitulé 'Pour comprendre le XIX^e siècle', qui recensait l'état de l'histoire et de la philosophie des sciences à la fin du siècle.

Dans son introduction, Jean-Claude Pont s'interroge :

« L'histoire de la pensée vit dans la seconde moitié du XIX^e siècle des modifications profondes qui concernent l'espace mental dans son ensemble. Une partie de la responsabilité en incombe aux mouvements qui bouleversent la science jusque

ENERGIE, SCIENCE ET PHILOSOPHIE

dans ses fondements. Parallèlement, on note un changement dans la vision que les savants, les philosophes, les écrivains ont de leur rapport au monde⁶ »

Et après avoir qualifié le mouvement de « mutation sans égale dans l'aventure intellectuelle de notre espèce », il ajoute :

« Le système causal de ce mouvement est complexe et mobilise probablement la totalité de l'aire intellectuelle. Certaines de ces causes sont bien identifiées, d'autres, plus cachées, tiennent peut-être à l'esprit du temps ».

Mais il refuse prudemment d'analyser le phénomène, en le renvoyant à un travail ultérieur. Nous avons tenté d'aller plus loin en cherchant à voir ce que la mutation devait au concept d'énergie. Le choix des articles doit permettre au lecteur d'en suivre l'investigation et de se faire une idée personnelle de l'hypothèse que nous avons cherché à tester.

¹ REHSEIS, (CNRS / Paris 7), COFRHIGEO.

² Lecourt D.,(1973).

³ Berthelot M., (1885) Préface.

⁴ Pont J.-C., et al. (2007), p.XXXVII.

⁵ Metzger H., (1930).

⁶ Pont J.-C. et al., (2007), p. XIV.

L'EMERGENCE
DU CONCEPT D'ENERGIE
ET SON CONTEXTE

Introduction

*Muriel Guedj*¹

Ce premier chapitre est dédié à l'émergence du concept d'énergie ou plutôt à l'émergence du principe de conservation de l'énergie car c'est véritablement autour de l'idée de conservation que se construit l'énergie, la recherche d'invariant servant notamment de guide. La pluralité du contexte fait de cette émergence un objet complexe dont il est difficile de saisir les divers éléments constitutifs indépendamment les uns des autres.

Ainsi l'évolution des techniques, avec en particulier le perfectionnement des machines, croise les travaux des ingénieurs qui abordent les questions de rentabilité en mobilisant les concepts de la dynamique, ces derniers étant eux-mêmes en lien avec d'autres domaines théoriques tels que l'électricité ou les sciences de la chaleur.

Cet enchevêtrement a pour conséquence de lier des phénomènes naturels et des objets techniques à des concepts, des expérimentations et des pratiques issus de domaines divers. Dans le réseau dense ainsi constitué, nous avons privilégié l'éclairage de quelques points, qui ressortent de l'ensemble.

Une première étape permet de clarifier le contexte théorique du début du XIX^e siècle à la croisée de deux domaines de la philosophie naturelle qui s'ignorent jusque-là : la mécanique et les sciences de la chaleur.

Lors des processus physiques et en particulier lors du mouvement, quelque chose se conserve dans la nature : s'agit-il de la quantité de mouvement, de la force vive ou d'une autre grandeur ? Le débat qui oppose Leibniz à Descartes et qui porte le nom de *querelle des forces vives* engage à préciser les concepts impliqués et est assurément l'un des fils conducteurs qui mène vers la conservation de l'énergie.

D'autre part, la question de la chaleur par le biais de l'étude des gaz, la météorologie, la thermométrie et les « machines à feu » a pour conséquence, en passant du feu au calorique, la mise en place d'un principe quantitatif indiquant l'impossibilité dans la nature de détruire ou de créer le calorique. Ainsi, la nature de la chaleur, la possibilité de son renouvellement ou au contraire sa perte inéluctable sont des problèmes qui agitent divers champs scientifiques. Ces questions sont débattues, en particulier, par les géologues qui s'attachent à rendre compte de l'évolution de la Terre en explicitant un schéma directionnel.

Finalement, on se trouve face à deux domaines, la mécanique et les sciences de la chaleur, pour deux principes de conservation jugés indépendants jusqu'à ce que la nature de la chaleur soit interrogée : « et si la chaleur était l'expression d'un mouvement ? » Cette question qui jette un pont entre les sciences de la chaleur et la mécanique, entre les concepts de chaleur et de force vive mène à l'acceptation d'un *équivalent mécanique de la chaleur* qui constitue le lien entre les divers domaines et qui est également la brique fondamentale à l'origine de la conservation de l'énergie. Les travaux de Sadi Carnot témoignent parfaitement de cet aspect.

Le deuxième élément de ce vaste réseau, que l'on souhaite spécifier, concerne les liens entre des doctrines théologiques développées dans la première moitié du XIX^e siècle et les visions du Monde qui en sont issues.

Cet arrière-plan théologique nous renvoie à la philosophie écossaise dont le terreau fut particulièrement propice à la naissance de la thermodynamique. Ainsi, les conceptions autour de la création du monde et de son devenir sont à l'origine de l'adoption d'un point de vue statique, immuable et conservatif ou au contraire de l'adoption d'un monde en perpétuelle évolution inexorablement condamné à la dégradation, à moins qu'une restauration d'origine divine ou naturelle ne soit envisageable. Point de vue sur le monde mais également point de vue sur une société qui interroge ses structures et son devenir avec ces mêmes termes de conservation, d'évolution ou de dégradation.

Dans les années 1850, la formalisation du principe de conservation de l'énergie portera encore la trace de ces convictions théologiques ; les corrélations établies notamment par Joule et Thomson entre croyances religieuses et travaux scientifiques témoignent de ce fait. Bien que la connexité entre science et religion y soit aussi un fil conducteur, c'est dans une perspective quelque peu différente que s'inscrivent les travaux scientifiques de Faraday. Révélateurs d'une imbrication entre conviction religieuse et approche scientifique, ses travaux reposent sur des principes qualifiés de « méta-scientifiques » afin d'une part de souligner l'origine des principes et d'autre part d'indiquer leur démarcation vis-à-vis de cette origine. Ainsi, « l'économie dans la nature », traduction de la manifestation d'un Dieu gérant le système parfait qu'il a créé, apparaît comme un principe fondateur à

partir duquel les autres principes, notamment celui associé à la conservation, peuvent s'articuler. Il apparaît alors essentiel d'appréhender l'ensemble des concepts scientifiques mobilisés par Faraday (ceux de force, de puissance et de chaleur notamment) en regard de ce cadre spécifique afin d'interpréter les réticences exprimées par cet auteur relativement à *l'équivalent mécanique de chaleur*. Ici encore s'entrecroisent domaine théologique et domaine théorique.

¹ SPHERE, REHSEIS : Recherches Epistémologiques et Historiques sur les Sciences Exactes et les Institutions Scientifiques. Université de Montpellier, IUFM.

Chapitre I

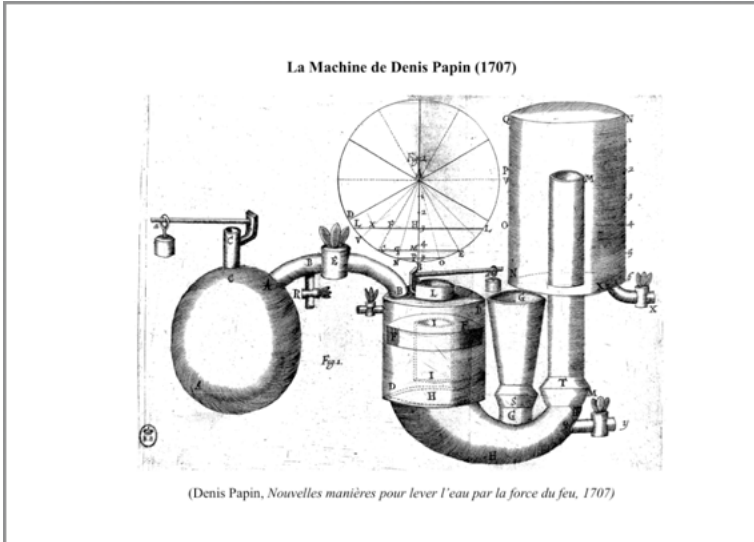
Emergence du concept d'énergie

*Arnaud Mayrargue*¹

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) clôt ce débat autour de la question des forces vives² 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 »³ ; entre ce moment donc, et celui où Thomas Young (1773-1829)⁴, 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 mille⁵, et à augmenter ce qui s'appellera plus tard le rendement.

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 l'atmosphère sur des pistons appuyant sur un vide dont l'existence même était discutée⁶.

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. »⁷

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 le 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 XVIII^e 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. »⁸ C'est ce qu'écrit Leibniz en mars 1686 dans les *Acta Eruditorum*, 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 Catelan⁹. 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 et 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^2 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 quantité de l'action motrice¹⁰, 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.¹¹ 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 remarque¹², 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 le 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. »¹³

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. »¹⁴

A partir des années 1770 sont mis en relation les concepts de force vive et de chaleur. C'est cette interrelation qui, nous le savons, contribuera au XIX^e 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 1730¹⁵, 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 beau-
coup d'obscurité dans nos lumières »¹⁶,

qu'il soit possible de dépasser nos simples sensations afin d'accéder à une connaissance, et qu'une telle préoccupation soit simplement légitime. D'Alembert s'interroge dans l'*Encyclopédie*¹⁷ 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 »¹⁸ 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 »¹⁹

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'instru-

ment 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 conceptuel 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 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. »²⁰

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 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 XVIII^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*²¹. 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. »²²

Lavoisier critique donc ici la méthode de travail de Meyer. 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. »²³ Il poursuivra en affirmant que, finalement, seule l'expérience et le temps permettront de trancher entre les différents points de vue. En fait, le choix entre ces différents points de vue est discutable, 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*²⁴ 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 facilité²⁵. 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 »²⁶ ; 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. »*²⁷

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 »²⁸, 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. »*²⁹

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 »*³⁰.

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 plus léger que l'air ; alors, sa pré-

sence 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 on veut 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. »³¹

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 »³²

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 pas non plus justifiée. C'est pourtant une question importante que Hume (1711-1776) avait formulée ainsi :

« 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. »³³

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 »³⁴.

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 se-
cond. »³⁵

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 tout 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 ré-

férence 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 interrogé³⁶.

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 possibles 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. »³⁷ 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.

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*³⁸. 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. »³⁹ 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 »⁴⁰. 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. »⁴¹

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. »⁴² 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, rendue 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 1783⁴³. Ce Mémoire n'apporte 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. »⁴⁴

L'autre point de vue défend l'idée que

« la chaleur n'est que le résultat de mouvements insensibles des molécules de la matière. »⁴⁵

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

« C'est ce mouvement intestin qui, suivant les ⁴⁶physiciens dont nous parlons, constitue la chaleur. »

Nous retrouvons en fait ici sensiblement les idées avancées au XVII^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. »⁴⁷

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 ? »⁴⁸

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 ? »⁴⁹

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 »⁵⁰ 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. »⁵¹

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. »⁵²

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. »⁵³

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 XIX^e 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 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*⁵⁴, affirme que « l'énergie produit les vraies forces motrices de l'âme, et la fait passer du sentiment à l'action. » La ré-

férence à Leibniz est claire et, comme le fait remarquer justement Michel Delon⁵⁵, 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 on n'a plus à « craindre le sort »⁵⁶ ; 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. »⁵⁷ (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) ».

- ¹ REHSEIS, Paris XII.
- ² Voir à ce sujet l'analyse de P. Costabel (1993), p.377-393.
- ³ Le Rond d'Alembert, J. (1765), article Mécanique.
- ⁴ Young, T. (1807), p.57-61.
- ⁵ Papin, D. (1707), p.5.
- ⁶ Shapin, S. et Schaffer, S. (1993).
- ⁷ Descartes, R., *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.
- ⁸ Leibniz, (1686), p.996.
- ⁹ Catelan, (1686), p.1000.
- ¹⁰ Leibniz, (1686).
- ¹¹ *Ibid.*, p.51-52. Boscovich, (1745).
- ¹² *Ibid.*, p.52.
- ¹³ D'Alembert, (1758), p.XXI.
- ¹⁴ Sloane H. , (1964) , p.100.
- ¹⁵ Histoire Royale de l'Académie des Sciences (1730), p.9, Mémoire p.452-509.
- ¹⁶ *Ibid.*, p.17.
- ¹⁷ Le Rond d'Alembert, article Thermoscope.
- ¹⁸ *Ibid.*, article Chymie.
- ¹⁹ Diderot, article Arts.
- ²⁰ Black, 1760-1765 (1803), vol. I, p. 157.
- ²¹ Lavoisier, (1777), p. 212 à 224.
- ²² Lavoisier, (1773), p.65 ; Œuvres, p. 485.
- ²³ Lavoisier,(1777), p. 212 à 224.
- ²⁴ *Ibid.*
- ²⁵ Cajori, (1921-1922), p. 483. Fox, (1971). Heilbron, (1993). Selon Cajory, on trouve cette idée de substance matérielle chez Lucrèce.
- ²⁶ Lavoisier, (1777), p.193.
- ²⁷ Lavoisier, (1773), p. 212.
- ²⁸ *Ibid.*, p. 228.
- ²⁹ *Ibid.*, p. 228.
- ³⁰ *Ibid.*, p.640. Voir aussi R. J. Morris, (1972), p.1-38. Laugier, (1993) p.1095 -1115.
- ³¹ *Ibid.*, p. 654.
- ³² *Ibid.*, p.640.
- ³³ Hume, ,(1734),p.198. Deleuze,(1953).
- ³⁴ *Ibid.*, p.212.
- ³⁵ *Ibid.*, p.213.
- ³⁶ Mayrargue (2004).
- ³⁷ Lavoisier (1789), p.3.
- ³⁸ Lavoisier, (1777), p. 804-811.

³⁹ *Ibid.*, p. 804-811.

⁴⁰ *Ibid.*, p. 807.

⁴¹ *Ibid.*, p. 810.

⁴² *Ibid.*, p. 811.

⁴³ Voir Guerlac, (1981), p.VII-XVII.

⁴⁴ Lavoisier, (1783), p.10.

⁴⁵ *Ibid.*, p.10.

⁴⁶ *Ibid.*, p.10.

⁴⁷ Bacon, Francis (1620), (réed. 1986), p., 222.

⁴⁸ Newton, (1704), réed.(1989), p. 301.

⁴⁹ *Ibid.*, p.302.

⁵⁰ *Ibid.*, p.317.

⁵¹ Guerlac (1989), p.12.

⁵² *Ibid.*, p.14.

⁵³ *Ibid.*, p.14.

⁵⁴ Mémoires de l'académie de Berlin, (1765), p. 465-492.

⁵⁵ Delon, Michel (1988).

⁵⁶ Le Journal de Paris, 10 IX (1783), p.1042.

⁵⁷ *Ibid.*, 28 VIII (1783), p.989-990.