

**Histoire de la
thermodynamique classique**

De Sadi Carnot à Gibbs

Robert Locqueneux

536-12.1

BELIN

Table des matières

Préface	7
Avant-propos.....	10
Préambule.....	12
CHAPITRE 1. De la puissance motrice du feu au second principe.....	21
1. Brève histoire de la machine à vapeur avant 1824	21
1.1. L'invention des machines atmosphériques	21
1.2. Des machines atmosphériques à la machine à double effet de Watt (Extrait 2)	26
2. Les <i>Réflexions sur la puissance motrice du feu</i> de Carnot (Extrait 3).....	28
2.1. La constitution d'une expérience de pensée	29
2.2. La mathématisation des phénomènes thermiques dans les <i>Réflexions sur la puissance motrice du feu</i>	39
3. Le <i>Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur</i> de Clapeyron (Extrait 4).....	45
3.1. La description des cycles réalisant l'effet maximum	45
3.2. La recherche d'une théorie des effets de la chaleur sur les substances	47
4. W. Thomson : terminer le mémoire de Clapeyron.....	53
EXTRAIT 1 : DENIS PAPIN, <i>Recueil des machines</i>	59
EXTRAIT 2 : FRANÇOIS ARAGO, <i>Notice historique sur les machines à vapeur</i>	62
EXTRAIT 3 : SADI CARNOT, <i>Réflexions sur la puissance motrice du feu</i> ..	65
EXTRAIT 4 : ÉMILE CLAPEYRON, <i>Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur</i>	85

CHAPITRE 2. De la conversion des forces à la conservation de l'énergie 104

1. Leibniz, Kant, la <i>Naturphilosophie</i> et le dynamisme.....	104
1.1. Leibniz.....	104
1.2. Kant.....	107
1.3. La « <i>Naturphilosophie</i> ».....	109
2. Robert Mayer et la <i>Naturphilosophie</i>	113
3. Les recherches expérimentales de Joule.....	114
4. Helmholtz et la « Conservation de la force ».....	122
EXTRAIT 5 : JULIUS ROBERT MAYER. <i>Remarques sur les forces de la nature inanimée</i>	129
EXTRAIT 6 : JAMES PRESCOTT JOULE. <i>Mémoire sur les effets calorifiques des courants magneto-électriques, et sur l'équivalent mécanique de la chaleur</i>	131
EXTRAIT 7 : JAMES PRESCOTT JOULE. <i>Mémoire sur les changements de température produits par la condensation et la raréfaction de l'air</i>	135
EXTRAIT 8 : HERMANN HELMHOLTZ. <i>Mémoire sur la conservation de la force</i>	138
EXTRAIT 9 : HERMANN HELMHOLTZ. <i>Revue générale du développement des sciences dans les temps modernes</i>	150
EXTRAIT 10 : WILLIAM THOMSON. <i>Sur les antécédents mécaniques du mouvement, de la chaleur et de la lumière</i>	152

CHAPITRE 3. Le second principe des théories mécanique ou dynamique de la chaleur 161

1. Le Mémoire de Clausius, « Sur la force motrice de la chaleur », 1850	161
1.1. La théorie de Carnot et l'équivalence de la chaleur et du travail..	162
1.2. La formalisation mathématique du principe de l'équivalence de la chaleur et du travail	163
1.3. Revisiter le principe de Carnot : le second principe	168
1.4. Déterminer la fonction de Carnot	169
1.5. Dernières remarques	173
2. La théorie dynamique de la chaleur selon W. Thomson.....	175
2.1. Le contexte.....	175
2.2. La théorie	176
3. Le Mémoire de Clausius, « Sur une autre forme du second principe », 1854.....	182
3.1. Principe de l'équivalence de la chaleur et du travail.....	182
3.2. Principe de l'équivalence des transformations.....	184
4. Le cheminement de Clausius : des « valeurs d'équivalence des transformations » à l'entropie.....	189
4.1. Des « valeurs d'équivalence des transformations » à l'entropie en passant par le concept de « disrégation »	189

4.2. Des « Valeurs d'équivalence des transformations » à l'entropie, un chemin sans détour.....	193
5. Dernières remarques sur les travaux de Carnot, Clapeyron et Clausius	196
EXTRAIT 11 : RUDOLF CLAUSIUS. <i>Sur la force motrice de la chaleur et les lois qui s'en déduisent pour la théorie même de la chaleur</i>	197
EXTRAIT 12 : WILLIAM THOMSON. <i>Deux mémoires sur la théorie dynamique de la Chaleur</i>	216
EXTRAIT 13 : RUDOLF CLAUSIUS. <i>Sur une autre forme du second principe de la théorie mécanique de la chaleur</i>	220
EXTRAIT 14 : RUDOLF CLAUSIUS. <i>Le second principe de la théorie mécanique de la chaleur</i>	236
EXTRAIT 15 : CAMILLE FLAMMARION. <i>La fin du monde</i>	250
CHAPITRE 4. Interpréter les grandeurs et les principes de la thermodynamique	254
1. La contribution de Rankine à la théorie de la chaleur.....	255
1.1. L'élaboration d'une science de l'énergie.....	255
1.2. Les réflexions de Rankine sur les méthodes en physique.....	259
2. « Une espèce de mouvement qu'on nomme chaleur ».....	262
2.1. Le modèle de Krönig.....	262
2.2. La schématisation d'un gaz idéal par Clausius.....	263
2.3. Des états de la matière selon Clausius.....	264
2.4. Quelques difficultés à rendre compte du comportement d'un gaz idéel.....	266
2.5. Introduction des probabilités dans le modèle du gaz idéal par Clausius.....	271
3. De la distribution des vitesses dans un état de chaos moléculaire aux lois des gaz parfaits dans la théorie dynamique des gaz de Maxwell	274
3.1. L'analogie mécanique du gaz parfait chez Maxwell.....	274
3.2. L'analogie mécanique de Maxwell rend-elle compte du comportement du gaz réel ?.....	278
3.3. La conversion de Maxwell à la réalité des analogies mécaniques	279
4. Boltzmann et la naissance de la physique statistique.....	281
4.1. Un essai d'interprétation mécanique du second principe.....	281
4.2. L'interprétation statistique du second principe.....	283
5. Du dénombrement statistique de Boltzmann et de la quantification de l'énergie.....	285
5.1. Un pari risqué : la quantification de l'énergie.....	285
5.2. Le dénombrement statistique de Planck peut-il être justifié ?.....	290
5.3. Le modèle de Jeans (1910).....	291
5.4. Une dernière tentative de justification par Ehrenfest.....	292
5.5. Épilogue.....	294
6. L'énergétisme contre les constructions mécaniques de l'Univers.....	294
EXTRAIT 16 : RUDOLF CLAUSIUS. <i>Sur la nature du mouvement auquel nous donnons le nom de chaleur</i>	299
EXTRAIT 17 : JAMES CLERK MAXWELL. <i>La chaleur</i>	308

EXTRAIT 18 : MAX PLANCK. <i>Autobiographie scientifique</i>	318
EXTRAIT 19 : WILHELM OSTWALD. <i>La déroute de l'atomisme</i> <i>contemporain</i>	326
EXTRAIT 20 : MARCEL BRILLOUIN. <i>Pour la matière</i>	333
EXTRAIT 21 : WILHELM OSTWALD. <i>Lettre sur l'énergétique</i>	338
CHAPITRE 5. L'accomplissement de la thermodynamique	345
1. Duhem : réflexions sur la physique	346
1.1. Pierre Duhem : de la critique de la philosophie mécaniste à la recherche d'une intelligibilité aristotélicienne du monde,	346
1.2. La physique des principes	348
2. La thermodynamique phénoménologique	351
3. La mécanique statistique selon Gibbs	357
EXTRAIT 22 : PIERRE DUHEM. <i>Évolution des théories physiques</i>	361
EXTRAIT 23 : PIERRE DUHEM. <i>Introduction à la mécanique chimique</i>	363
EXTRAIT 24 : PIERRE DUHEM. <i>Commentaire aux principes</i> <i>de la thermodynamique</i>	365
EXTRAIT 25 : PIERRE DUHEM. <i>Traité d'énergétique,</i> <i>ou Thermodynamique générale</i>	367
EXTRAIT 26 : PIERRE DUHEM. <i>Le potentiel thermodynamique</i> <i>et ses applications à la mécanique chimique et à l'étude</i> <i>des phénomènes électriques</i>	371
EXTRAIT 27 : J.-WILLARD GIBBS. <i>Comptes rendus et analyses</i> <i>par Pierre Duhem</i>	383
CHAPITRE 6. Mécanistes et énergétistes sur les ailes du rêve	388
1. Ludwig Boltzmann	389
2. Wilhelm Ostwald	390
3. Pierre Duhem ou l'art de couper les ailes du rêve	392
4. Épilogue : le triomphe de l'atomisme	393
EXTRAIT 28 : LUDWIG BOLTZMANN. <i>Leçon inaugurale tenue</i> <i>à Leipzig en novembre 1900</i>	395
EXTRAIT 29 : WILHELM OSTWALD. <i>L'énergie</i>	399
EXTRAIT 30 : PIERRE DUHEM. <i>Physique de croyant</i>	406
Bibliographie	409
Index des noms	415

Avant-propos

L'ambition de ce livre est de montrer comment et dans quels contextes la thermodynamique a été élaborée. Notre histoire ne se limite pas à une voie étroite qu'auraient tenue ceux qui, vus à partir des exposés les plus récents de cette « discipline » ont contribué à son progrès : une histoire qui laisserait de côté les « fausses routes où plusieurs savants se sont égarés » ; elle n'est pas un inventaire chronologique de l'acquisition des vérités, mais une histoire dans laquelle nous avons, illusoirement sans doute, cherché à ressusciter le passé. Ainsi avons-nous tenté de mettre le lecteur dans les situations des savants du passé pour qu'il les accompagne dans leurs interrogations et qu'il se penche avec la même sympathie sur des voies de recherche qui n'ont pas laissé de traces dans nos cours et sur celles qui se sont révélées fécondes : nous avons mis sur un même pied la tentative d'interprétation du second principe faite par Rankine et celles de Clausius ou de Boltzmann.

En abordant l'histoire de cette façon, nous pensons donner tout à la fois une leçon d'histoire et une leçon sur les pratiques scientifiques – persuadé que l'histoire d'une science contribue à une compréhension plus profonde de cette science par l'acquisition de l'esprit scientifique, cet esprit qu'on acquiert habituellement par la pratique de la recherche scientifique. En outre, présentée ainsi, l'histoire des sciences donne des clefs qui permettent une meilleure approche des textes des savants eux-mêmes. L'intérêt de la collection qui accueille cet ouvrage est de permettre la présentation d'un choix pertinent de textes qui sont dans la trame de l'histoire.

Cependant nous ne serions pas allés au bout de notre projet si nous avions fait abstraction des liens étroits qu'entretiennent les sciences et la philosophie à toutes les périodes de leurs évolutions et si nous avions négligé les relations de l'élaboration des sciences et le développement des techniques manufacturières.

Notre récit commence par la lente élaboration du second principe de la thermodynamique. Tout le monde sait que cette élaboration commence avant celle du premier ; aussi ce récit commence-t-il dans les années 1820 avec Sadi Carnot, qui a établi l'existence d'une fonction universelle qui relierait grandeurs thermiques et mécaniques dans les machines à vapeur si celles-ci avaient un fonctionnement idéal.

Pour ce faire, Carnot se fonde sur une vision du monde à laquelle la plupart des physiciens français adhèrent : la matière serait source de forces attractives et répulsives, la chaleur, la lumière, l'électricité étant des fluides impondérables différents, ou un même fluide diversement modifié, présupposant ainsi la matérialité de la chaleur et sa conservation. Même si la théorie de Carnot fut vite récusée, son domaine de validité étant très limité, elle se révéla féconde. C'est par la lecture de l'œuvre de Carnot telle que Clapeyron l'a revisitée que commencent les travaux de Clausius, de Thomson et de quelques autres, des travaux qui les amèneront à diverses formulations du second principe.

À cette conception de la matérialité de la chaleur à laquelle les physiciens français étaient attachés s'oppose celle de scientifiques des ères culturelles d'au-delà du Rhin et de la Manche : ceux-là considèrent que la matière est continue, divisible à l'infini et que la nature entière peut se réduire à des jeux de forces attractives et répulsives qui s'exercent dans l'espace. Nous montrons que cette vision du monde fut, elle-aussi, féconde, qu'elle est à l'origine du concept d'énergie et du principe de sa conservation.

C'est de ces deux héritages étrangers l'un à l'autre et sources de mutuelles incompréhensions, qu'est née la thermodynamique ; elle s'en est nourrie autant qu'elle a alimenté ces visions du monde, contribuant ainsi à leur évolution : la première, mécaniste, a souvent conduit à l'atomisme, la seconde, à diverses formes d'énergétisme.

Nous verrons aussi que, dans ses conséquences, la thermodynamique classique a substitué à l'idée de l'éternel retour des choses, héritée de la science classique, celle de la mort annoncée de l'Univers ; alors que la thermodynamique statistique restaure l'espoir de l'éternel retour.

Cette histoire des théories de la chaleur tient donc aux diverses grilles intellectuelles qui, à chaque époque permettent de penser les phénomènes où la chaleur doit être prise en compte. En ne voulant pas donner une vision partielle de l'activité scientifique nous ne nous sommes pas contenté de suivre les seules théories qui ont contribué positivement à la constitution d'un savoir censé être achevé, le nôtre, mais avons exploré des pistes qui furent abandonnées.

Notre histoire s'achève sur l'élaboration des thermodynamiques classiques, c'est-à-dire phénoménologique, et statistique : leurs élaborations ont alimenté les querelles du mécanisme (le plus souvent, atomistique) et de l'énergétisme. Nous montrerons que Boltzmann et Ostwald ne limitent pas à la science de la chaleur leurs convictions scientifiques, mais qu'ils veulent étendre leur manière de concevoir et d'interpréter la thermodynamique à la psychologie et aux sciences économiques et sociales, le récit de leurs élucubrations en ces domaines peut nous enseigner la prudence dans la foi que nous pouvons apporter aux péroraisons de quelques uns des « grands » scientifiques de notre temps.