

PRÉFACE

La Thermodynamique est une partie de la Science qui a des rapports avec pratiquement toutes les autres. En effet, que les phénomènes soient physiques, chimiques, biologiques, géologiques, cosmiques, ils s'accompagnent d'effets thermiques parfois si insignifiants qu'on n'en tient alors pas compte, d'autres fois au contraire si importants qu'ils sont au centre des faits que la Science doit expliquer et que la Technique doit appliquer. La Thermodynamique fait partie intégrante de notre monde, mais elle sévit également au sein de l'infiniment petit ou, au contraire, de l'infiniment grand. Quand on feuillette les nombreux ouvrages de Thermodynamique de nos bibliothèques, on n'a pas toujours l'impression de jeter un œil sur une même partie de la Science tant les approches, les manières d'exposer les notions, les domaines d'intérêt abordés, sont variés. Variés, ils le sont par l'infinie diversité des systèmes auxquels on applique les règles d'étude de la Thermodynamique (ne cherche-t-on pas à appliquer ces règles à la sociologie, à la philosophie). Variés, ils le sont aussi par la pluralité des sensibilités propres des auteurs. Quoi qu'il en soit ces ouvrages de Thermodynamique apparaissent en général aux étudiants comme rébarbatifs et leur fréquentation pénible. C'est vrai que des notions comme « l'enthalpie » et surtout « l'entropie » sans parler d'autres fonctions thermodynamiques paraissant encore moins fréquentables, peuvent sembler mystérieuses, théoriques voire ésotériques, en tout cas en dehors du monde pratique. Avez-vous déjà vu un « entropie-mètre » ? Non ! Alors ? L'usage très important de l'écriture mathématique, indispensable dans la plupart des cas, effraie aussi quelque peu le lecteur potentiel de ces ouvrages.

Le livre qui nous occupe n'a pas du tout la même allure et sa lecture ne devrait guère en être difficile, même pour un lecteur que les approches théoriques des faits réels indisposent. La Mathématique se fait très discrète, ne s'imposant que dans des relations simples. D'abord précisons qu'il s'agit d'un ouvrage d'initiation n'exposant que ce qu'il est indispensable de connaître pour effectuer des calculs simples sur des machines thermiques courantes : moteurs volumétriques à combustion interne, turbines à gaz, compresseurs, installations à vapeur d'eau pour la production d'énergie mécanique, machines frigorifiques. Comme on le voit il s'agit, là, d'un ouvrage de thermodynamique technique s'intéressant aux seules machines thermiques. Reconnaissons que la Thermodynamique est ici au service immédiat de la compréhension des règles de fonctionnement des appareils de notre monde technique. Si l'on veut bien comprendre le fonctionnement de ces appareils, aller plus loin que la stricte description, sans plus, des phénomènes dont ils sont le siège, si l'on veut enfin appliquer la règle générale : « *On ne connaît bien quelque chose que quand on sait la calculer* » alors l'usage du présent ouvrage peut être d'un très grand intérêt.

Les auteurs exposent sans doute assez peu de notions thermodynamiques, juste celles, nous l'avons dit, qui sont indispensables, mais leur présentation est, au fil des pages, éclairée, illustrée par de très nombreux exemples, 81 au total. Je ne connais pas d'ouvrage de ce genre qui offre une telle variété d'applications des notions présentées. Ce devrait être, pour le lecteur studieux, un parcours quasiment ludique lui faisant parcourir, au travers des exemples proposés, des questions posées — auxquelles il peut chercher lui-même la réponse avant de la découvrir présentée par les auteurs — les propriétés des fluides, des systèmes thermiques puis des machines thermi-

ques courantes. La présentation et l'usage des principaux diagrammes thermodynamiques complètent heureusement l'ensemble. Ayant bien assimilé les notions exposées dans cet ouvrage, les lecteurs pourront alors aborder l'étude de traités plus vastes et plus complexes.

La spécialisation des auteurs les a poussés à détailler davantage la thermodynamique des gaz et des machines thermiques qui exploitent les cycles thermodynamiques où les gaz évoluent. Les thermiciens et motoristes y trouveront amplement leur compte. Les frigoristes sont un peu moins bien partagés. Les changements d'état liquide \leftrightarrow vapeur ne sont exposés avec quelques détails que dans le cas de l'eau. Mais il est évident qu'à partir de ce cas spécifique, de ce « frigorigène »^{*} particulier, il est facile de dériver vers les autres frigorigènes. On trouve également au fil des pages l'exposé de quelques notions sur la cogénération, production simultanée, à partir d'un combustible unique, d'énergie mécanique et de chaleur exploitable pour le chauffage des bâtiments, la préparation d'eau chaude sanitaire et même la production de froid « climatique » par l'utilisation de machines à absorption où l'eau est, précisément, le frigorigène.

Remercions les auteurs F. DIETZEL et W. WAGNER de cette intéressante contribution. Saluons aussi la qualité de la traduction de J.-L. CAUCHEPIN à partir de l'allemand^{**}. L'éditeur a droit aussi à nos félicitations pour la qualité de son travail.

Palaiseau — Octobre 1998
Maxime DUMINIL

* Le frigorigène est le « fluide actif » du circuit frigorifique. L'eau, fluide actif des cycles moteurs, est également utilisable comme frigorigène pour des machines frigorifiques. Evidemment pas pour la production de basses températures, mais pour des usages à des températures supérieures à 0 °C (climatisation par exemple). L'eau est aussi un frigorigène exploitable dans les pompes à chaleur « haute température ».

** J.-L. Cauchepin qui nous a habitués, par les nombreuses traductions et adaptations qu'il a faites chez le même Editeur, à un travail toujours extrêmement sérieux.

TABLE DES MATIÈRES

Principaux symboles des grandeurs et unités utilisées dans l'ouvrage	1
1 Données fondamentales physico-chimiques	3
1.1 Dilatation des solides, des liquides et des gaz	3
1.1.1 Dilatation/contraction des solides	3
1.1.2 Dilatation/contraction des liquides	6
1.1.3 Dilatation/contraction des gaz	7
1.2 Grandeurs d'état des gaz	8
1.2.1 Volume, volume massique et masse volumique	8
1.2.2 Pression et sa mesure	10
1.2.3 Température et sa mesure	16
1.3 Capacité thermique massique, applications	20
1.3.1 Capacité thermique massique vraie et capacité thermique massique moyenne	21
1.3.2 Capacité thermique massique des solides, des liquides et des gaz	22
1.3.3 Application : température de mélange	23
1.3.4 Fusion et vaporisation	25
1.4 Lois des gaz, équation caractéristique des gaz parfaits	27
1.4.1 Loi de Boyle-Mariotte	27
1.4.2 Loi de Gay-Lussac	28
1.4.3 Loi de Charles	29
1.4.4 Équation caractéristique des gaz parfaits	30
1.4.5 Constante d'Avogadro, masse molaire, volume molaire, constante universelle des gaz	36
1.5 Énergie-chaleur et énergie-travail	38
1.5.1 Équivalence de la chaleur et du travail	39
1.5.2 Premier principe de la thermodynamique	41
1.5.3 Gaz et vapeurs, conversion de chaleur en travail	42
1.5.4 Relation entre travail extérieur, énergie interne et chaleur	44
1.5.5 Travail technique (travail de transvasement) et enthalpie	51
1.5.6 Capacités thermiques massiques c_p et c_v , capacités thermiques molaires C_{mp} et C_{mv} et exposant de l'adiabatique kappa	59

2	Changement d'état d'un gaz et sa représentation dans un diagramme p, v ou un diagramme T, s	65
2.1	Changement d'état isochore (à volume constant) dans un diagramme p, v	65
2.2	Changement d'état isobare (à pression constante) dans un diagramme p, v	67
2.3	Changement d'état isotherme (à température constante) dans un diagramme p, v	71
2.4	Changement d'état adiabatique (isentropique) (sans chaleur reçue ou évacuée) dans un diagramme p, v	73
2.5	Changement d'état polytropique dans un diagramme p, v	77
2.6	L'entropie et le diagramme température-entropie T, s (diagramme entropique)	82
2.6.1	Équations d'entropie	84
2.7	Les différents changements d'état dans le diagramme T, s	87
2.7.1	Changement d'état isochore (à volume constant) dans un diagramme T, s	87
2.7.2	Changement d'état isobare (à pression constante) dans un diagramme T, s	88
2.7.3	Changement d'état isotherme (à température constante) dans un diagramme T, s	90
2.7.4	Changement d'état adiabatique (isentropique) (sans chaleur reçue ou évacuée) dans un diagramme T, s	91
2.7.5	Changement d'état polytropique dans un diagramme T, s	93
2.8	Un exemple de diagramme entropique complet : celui de l'air	95
2.8.1	Résumé du diagramme T, s de l'air	98
2.8.2	Exemple d'utilisation d'un diagramme T, s de l'air	101
3	Cycles des différentes machines	103
3.1	Exemple de cycle d'un moteur alternatif à combustion interne du type à explosion	103
3.2	Du premier principe de la thermodynamique au second principe	108
3.2.1	Le second principe de la thermodynamique et le cycle de Carnot	110
3.3	Chaleur entrante valorisable et chaleur sortante dévalorisée dans un cycle de Carnot. Signification du cycle de Carnot. Cycle frigorifique	113
3.4	Cycles de machines génératrices d'énergie mécanique	115
3.4.1	Cycle de Beau de Rochas d'un moteur à combustion interne à pistons à allumage commandé (moteur à explosion)	116
3.4.2	Cycle de Diesel d'un moteur à combustion interne à pistons à allumage par compression (moteur Diesel)	120
3.4.3	Cycle de Sabathé	124
3.4.4	Cycle de Joule ou cycle à circuit ouvert simple d'une turbine à gaz élémentaire	125
3.5	Cycles de machines réceptrices d'énergie mécanique	132
3.5.1	Compresseurs à pistons	133
3.5.2	Compression multiétagée	138
3.5.3	Le compresseur à pistons dans le diagramme T, s	144

3.6	Cycle de Carnot tournant à gauche, machine frigorifique et pompe à chaleur	145
3.6.1	Cycle de Carnot tournant à gauche, coefficient de performance	146
3.6.2	Compléments sur la machine frigorifique.....	149
3.6.3	Compléments sur la pompe à chaleur	154
3.7	Pertes des moteurs à pistons et des turbines ; du rendement thermique au rendement effectif	155
3.7.1	Transformations réversibles et irréversibles	155
3.7.2	À propos des pertes par frottement, conduction thermique ou laminage	157
3.7.3	Pertes supplémentaires qui ont lieu au cours de la conversion d'énergie dans les moteurs à pistons et dans les turbines	158
3.7.4	Cas des machines à pistons	159
3.7.5	Cas des turbines à gaz	162
4	La vapeur d'eau	169
4.1	Grandeurs d'état p, v, t de l'eau de son état liquide à son état de vapeur surchauffée	170
4.2	Diagramme enthalpique h, p de la vapeur d'eau	176
4.3	Les diagrammes entropique T, s et de Mollier h, s de la vapeur d'eau	181
4.4	Les changements d'état de la vapeur d'eau	188
4.4.1	Changement d'état à volume constant (isochore).....	188
4.4.2	Changement d'état à pression constante (isobare).....	189
4.4.3	Changement d'état à température constante (isotherme).....	193
4.4.4	Changement d'état isentropique, changement d'état polytropique, surchauffe intermédiaire	194
4.4.5	Laminage.....	198
4.5	Cycle à vapeur de Clausius-Rankine	199
4.5.1	Représentation d'un cycle à vapeur dans un diagramme enthalpique et dans un diagramme de Mollier	200
4.5.2	Avantages d'un cycle à vapeur haute pression/haute température.....	203
4.5.3	Le cycle à vapeur dans les centrales thermiques nucléaires	204
4.6	Production simultanée d'énergie thermique et d'énergie électrique ou cogénération ou cycle combiné chaleur-force	207
4.7	Installations mixtes combinant une turbine à gaz et une turbine à vapeur	209
	Appendice	214
	Index alphabétique	223