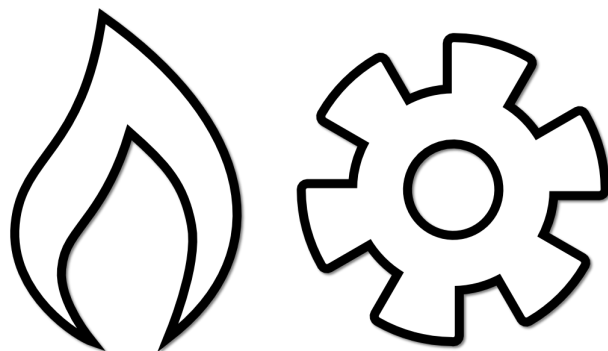

Thermodynamique de l'ingénieur



Olivier Cleynen



Table des matières

1	Notions fondamentales	9
1.1	Démarche	11
1.2	Notion d'énergie	12
1.3	L'énergie mécanique	17
1.4	Le travail	19
1.5	La chaleur	22
1.6	Le chaud et le froid	26
1.7	Exercices	28
2	Les systèmes fermés	35
2.1	Pourquoi utiliser un système fermé ?	37
2.2	Conventions de comptabilité	39
2.3	Le premier principe dans un système fermé	41
2.4	Quantifier le travail avec un système fermé	42
2.5	Quantifier la chaleur avec un système fermé	56
2.6	Un peu d'histoire : le moteur compound	57
2.7	Exercices	59
3	Les systèmes ouverts	65
3.1	Pourquoi utiliser un système ouvert ?	67
3.2	Conventions de comptabilité	68
3.3	Le premier principe dans un système ouvert	70
3.4	Quantifier le travail avec un système ouvert	75
3.5	Quantifier la chaleur avec un système ouvert	82
3.6	Exercices	83
4	Le gaz parfait	89
4.1	Définition	91
4.2	Propriétés des gaz parfaits	96
4.3	Énergie et température	99
4.4	Transformations élémentaires réversibles	103
4.5	Exercices	117
5	Liquides et vapeurs	123
5.1	Ébullition et liquéfaction	125
5.2	Description qualitative des propriétés de l'eau	130
5.3	Quantification des propriétés de l'eau	137

5.4	Transformations élémentaires réversibles	145
5.5	Un peu d'histoire : le cheval-vapeur	156
5.6	Exercices	158
6	Cycles thermodynamiques	165
6.1	Conventions de signe	167
6.2	Transformer chaleur et travail	169
6.3	Rendement des cycles	177
6.4	Exercices	182
7	Le second principe	191
7.1	Le second principe	193
7.2	Le second principe et les machines	196
7.3	Le cycle de Carnot	199
7.4	L'échelle de température thermodynamique	206
7.5	Efficacité maximale des machines	210
7.6	Exercices	213
8	L'entropie	217
8.1	Définition	219
8.2	Les variations d'entropie	221
8.3	Prédire le sens des transformations	234
8.4	L'entropie et l'univers	240
8.5	Exercices	242
9	Cycles moteurs à vapeur	247
9.1	Pourquoi utiliser un moteur à vapeur ?	249
9.2	Critères de performance	250
9.3	Composants des installations à vapeur	252
9.4	Cycles moteurs à vapeur	259
9.5	Exercices	271
10	Cycles moteurs à gaz	275
10.1	Performance des moteurs à gaz	277
10.2	Motorisations à pistons	281
10.3	Composants des turbomachines	286
10.4	Les configurations des turbomachines	292
10.5	Modification des cycles des turbomachines	300
10.6	Exercices	307

Annexes	313
A1 Abaques de vapeur	314
A2 Pression indiquée et pression réelle	323
A3 Conventions de notation	324
 Bibliographie	 325

Objectifs

Donner à l'étudiant/e les moyens de décrire et de quantifier :

- le comportement des fluides lors des transferts de chaleur et de travail ;
- le principe de fonctionnement des moteurs et réfrigérateurs ;
- les principales caractéristiques des moteurs de l'industrie.

Le livre est abordable avec un niveau Baccalauréat, et peut servir d'appui pour aborder ensuite un cours de mécanique des fluides ou de conception motorisation. Il n'est pas destiné à la préparation d'un concours *prépa*, mais il peut servir pour consolider ou re-visiter les notions qui y sont abordées.



Ce document est placé sous licence Creative Commons CC-BY-SA.

La copie, la redistribution, et la modification sont encouragées, sous seules conditions d'attribution de l'auteur et de conservation de cette licence. Le texte intégral de la licence est accessible à l'URL <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.fr>. De nombreuses illustrations d'auteurs divers sous licences compatibles sont intégrées à ce document ; leurs licence et auteur sont indiquées dans chaque cas.

Ce document est édité par un groupe de travail *Framabook* en vue de sa publication sous forme de livre à l'automne 2014. Un wiki de travail est mis à disposition à l'adresse dokuwiki.framabook.org/doku.php?id=framabookthermodynamique, sur lequel vous pouvez participer à son amélioration. Vous pouvez également envoyer vos retours d'expérience, signalements, critiques et autres, toujours très vivement appréciés, directement à Olivier Cleynen à l'adresse olivier.cleynen@ariadacapo.net.

De nombreuses personnes, en corrigeant des erreurs ou proposant des améliorations, ont réduit l'entropie de ce document, parmi lesquelles : *Antoine L., Hamassala David Dicko, Kévin R., Florianne B., Julien D., Anthony Jouny, Thomas N., Amazigh.L.H, Victor D., Daniel C.-N., Pierrick Degardin, Arthur A., Ulrick M., Solène J., Florian Paupert, Gatien Bovyn, Mehdi Z., Jean-Bernard Marcon, Luc Benoit, Christophe Masutti, Thibault Mattera, Mireille BERNEX*. L'auteur leur adresse beaucoup de gratitude ! Toutes les erreurs restantes dans le présent document sont le fait d'Olivier Cleynen.

Introduction



La thermodynamique est l'étude de la conversion de l'énergie entre deux formes, chaleur et travail. Pourtant, ses débuts remontent bien avant que ces trois concepts ne soient établis : pendant longtemps il ne s'agissait que de se pencher sur *la nature de la chaleur*. Autrement dit, que veut dire « chaud » exactement ? Peut-on le mesurer ?

Les premières réflexions sur la nature de la matière et celle du feu datent de la Grèce antique et donnent déjà naissance à la théorie atomique. Mais il ne s'agit alors que de constructions philosophiques, plus fondées sur une vision spirituelle organisée du monde que sur de réels travaux d'observation.

Il faudra attendre le ^{xvii}e siècle pour que débutent de sérieux travaux de recherche sur ce sujet. C'est la température, dont on se fait plus facilement une idée que de la chaleur, qui est d'abord le centre d'intérêt. La conception du thermomètre soulève en effet de nombreux problèmes d'ingénierie et de physique : comment lier cette idée de « température » à un phénomène observable directement, de façon prévisible et reproductible ?

Pendant ces années et jusqu'en 1850, la thermodynamique reste à l'échelle macroscopique – il n'est pas encore question d'atome ou de molécule. Elle suscite beaucoup d'intérêt parce qu'elle aborde directement les phénomènes de frottement et de transfert de chaleur, qui ne se produisent jamais que dans un seul sens, et auxquels une vision mécanique newtonienne de l'univers ne peut fournir d'explication.

Le grand essor des machines thermiques, au début du ^{xix}e siècle, prend la science de court. Les premiers moteurs pompent l'eau hors des mines, mais la thermodynamique – qui ne porte alors même pas son nom – ne sait pas expliquer comment. Il faudra une trentaine d'années avant que la théorie ne rattrape la

pratique et que l'on établisse une vision cohérente de la thermodynamique permettant, par exemple, de prévoir le rendement d'un moteur.

En 1865, le physicien allemand Rudolf Clausius clôture près d'un siècle de tâtonnements en explicitant les grandes bases de ce que l'on commence à appeler « thermodynamique » : c'est ce que nous connaissons aujourd'hui sous le nom des deux principes. Il généralise, ce faisant, ses observations sur un ballon de gaz à l'univers tout entier. De leur côté, l'écossais James Clerk Maxwell et l'autrichien Ludwig Boltzmann réconcilieront la thermodynamique avec la physique des particules en travaillant au niveau microscopique. Au fur et à mesure du ^{xx}e siècle, le concept d'incertitude se fait accepter et la thermodynamique devient affaire de probabilités et de quantification du désordre ; elle sert même à poser les bases de la théorie de l'information.

Entre temps, la révolution industrielle a eu lieu. Délaissant la pompe à eau, le moteur thermique est passé à la propulsion des locomotives, puis des navires, automobiles, génératrices de courant et aéronefs. Notre mode de vie, dans lequel la force physiologique humaine n'a plus la moindre importance, montre à quel point nous sommes devenus dépendants de la puissance et de la précision que ce moteur permet. En somme, il est la raison pour laquelle notre environnement diffère tant de celui de nos ancêtres, et de celui que connaîtront nos descendants. La thermodynamique permet de comprendre le fonctionnement déroutant de cet engin à la fois banal et effroyable.

Au cours de cette série de dix chapitres sur la *thermodynamique de l'ingénieur*, nous passerons du comportement élémentaire des fluides à la théorie des moteurs – l'objectif étant de fournir à l'étudiant/e une bonne compréhension du fonctionnement des machines à chaleur et une base solide pour pouvoir aborder la conception moteur et la mécanique des fluides.

