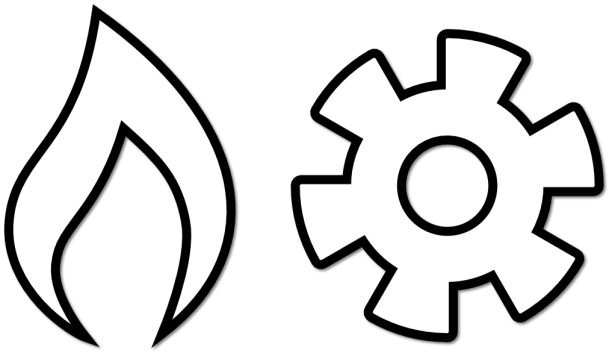
Thermodynamique de l'ingénieur



Olivier Cleynen

CC BY SA

Table des matières

1 Notions fondamentales **9**
1.1 Notion d'énergie . . . 11
1.2 L'énergie mécanique . . . 16
1.3 Le travail . . . 18
1.4 La chaleur . . . 21
1.5 Le chaud et le froid . . . 25
1.6 Un peu d'histoire : mesurer le degré de chaleur . . . 27
1.7 Exercices . . . 30

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 . . . 43
2.5 Quantifier la chaleur avec un système fermé . . . 57
2.6 Un peu d'histoire : le moteur compound . . . 58
2.7 Exercices . . . 60

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 . . . 69
3.4 Quantifier le travail avec un système ouvert . . . 74
3.5 Quantifier la chaleur avec un système ouvert . . . 81
3.6 Un peu d'histoire : degré et quantité de chaleur . . . 82
3.7 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 Un peu d'histoire : les questionnements de Lavoisier et Laplace . . . 116
4.6 Exercices . . . 118

5 Liquides et vapeurs **125**
5.1 Ébullition et liquéfaction . . . 127
5.2 Description qualitative des propriétés de l'eau . . . 132
5.3 Quantification des propriétés de l'eau . . . 139
5.4 Transformations élémentaires réversibles . . . 147
5.5 Un peu d'histoire : le cheval-vapeur . . . 157

5.6 Exercices 159

6 Cycles thermodynamiques **165**
6.1 Conventions graphiques 167
6.2 Transformer chaleur et travail 169
6.3 Rendement des cycles 177
6.4 Un peu d'histoire : le nombre de temps moteur 183
6.5 Exercices 186

7 Le second principe **197**
7.1 Le second principe 199
7.2 Le second principe et les machines thermiques 201
7.3 Le cycle de Carnot 206
7.4 L'échelle de température thermodynamique 217
7.5 Efficacité maximale des machines 222
7.6 Un peu d'histoire : le rêve de Rudolf Diesel 225
7.7 Exercices 228

8 L'entropie **233**
8.1 Le concept de l'entropie 235
8.2 Définition 237
8.3 Les variations d'entropie 240
8.4 Prédire le sens des transformations 252
8.5 L'entropie, le temps, et l'univers 258
8.6 Un peu d'histoire : l'aventurier Rumford 261
8.7 Exercices 262

9 Cycles moteurs à vapeur **267**
9.1 Pourquoi utiliser un moteur à vapeur ? 269
9.2 Critères d'évaluation des moteurs 270
9.3 Composants des installations à vapeur 273
9.4 Cycles moteurs à vapeur 282
9.5 Un peu d'histoire : de la turbine à vapeur à la turbine à gaz 293
9.6 Exercices 297

10 Cycles moteurs à gaz **301**
10.1 Pourquoi utiliser un moteur à gaz ? 303
10.2 Critères d'évaluation des moteurs à gaz 304
10.3 Moteurs alternatifs 308
10.4 Composants des turbomachines 314
10.5 Les configurations des turbomachines 322
10.6 Modification des cycles des turbomachines 329
10.7 Un peu d'histoire : le Napier Nomad 335
10.8 Exercices 337

Annexes **343**
A1 Abaques de vapeur 344
A2 Pression indiquée et pression réelle 353
A3 Conventions de notation 354
A4 Construction de ce livre 355
A5 Réutilisation de ce livre 356

Bibliographie **357**

Ce document est placé sous licence Creative Commons CC-BY-SA. Les conditions de sa ré-utilisation sont détaillées en annexe A5.

Ce document est actuellement édité par un groupe de travail *Framabook* en vue de sa publication sous forme de livre début 2015.

Olivier Cleynen a construit et rédigé l'ouvrage, et réalisé la plupart des schémas. Ses plus vifs remerciements vont aux personnes suivantes pour leurs contributions :

- Philippe Depondt a écrit quatre sections historiques (§1.6, §3.6, §4.5, §8.6) ;
- Nicolas Horny a effectué une relecture critique des aspects techniques et scientifiques de l'ouvrage ;
- Christophe Masutti et Mireille Bernex ont particulièrement contribué à la finalisation de l'ouvrage ;
- 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, Thibault Mattera, Arnaud Gallant.*
- De nombreuses autres personnes, en publiant leurs photos et figures sous licence libre, ont contribué à illustrer le livre, sans y être toutefois associées.

Toutes les erreurs restantes dans le présent document sont le fait d'Olivier Cleynen. Vous pouvez envoyer vos retours d'expérience, signalements, critiques et autres, toujours très vivement appréciés, à l'adresse olivier.cleynen@ariadacapo.net.

Organisation de l'ouvrage

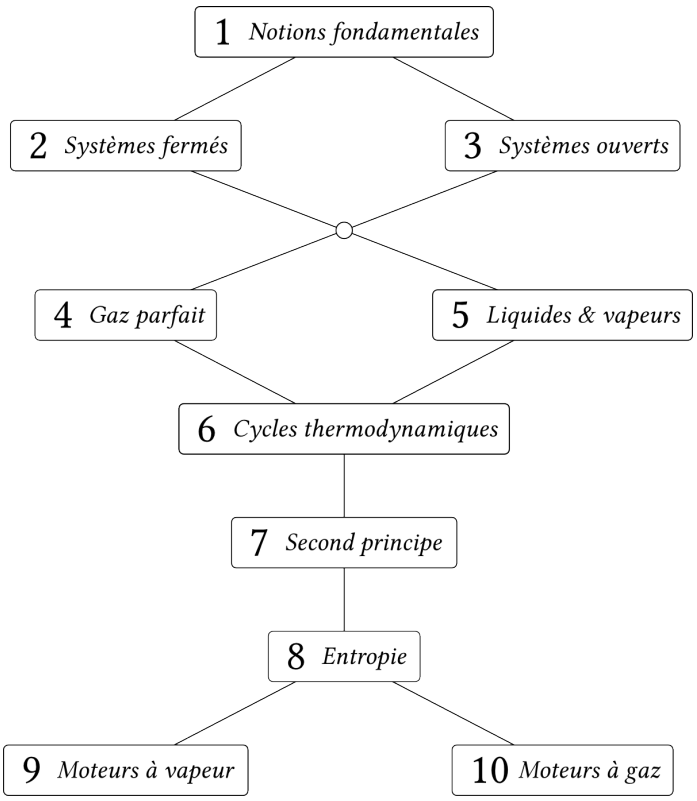
Ce livre a pour objectif de vous permettre de comprendre, décrire et quantifier le fonctionnement des machines thermodynamiques, c'est-à-dire les réfrigérateurs, les pompes à chaleur, et surtout les moteurs. Il est conçu pour être abordable en première année d'études supérieures et couvert en deux semestres environ. Il est destiné à de futur/es ingénieur/es curieux/ses de comprendre le pourquoi et le comment des machines qui les entourent et des équations qu'ils ou elles utilisent.

Il y a dix chapitres dans ce livre. Le chapitre 1 (*notions fondamentales*) recense les notions indispensables à notre étude.

Le chapitre le plus important est le chapitre 6 (*cycles thermodynamiques*) : c'est là que nous apprenons à transformer de la chaleur en travail et réciproquement. Cependant, pour pouvoir appliquer les concepts de ce chapitre à des cas concrets —par exemple pour pouvoir prédire par le calcul l'efficacité d'un moteur— nous avons besoin de plusieurs outils, auxquels sont consacrés les chapitres qui précèdent. Il nous faut d'abord disposer d'une méthode robuste de comptabilité de l'énergie : dans le chapitre 2 (*les systèmes fermés*) nous comptabilisons les transferts dans une quantité fixe de fluide, et dans le chapitre 3 (*les systèmes ouverts*) nous comptabilisons ces transferts dans un fluide en flux continu. Il nous faut également savoir prédire la température et quantifier l'énergie dans les fluides utilisés en pratique, ce que nous faisons pour l'air dans le chapitre 4 (*le gaz parfait*) et pour l'eau dans le chapitre 5 (*liquides et vapeurs*). Ainsi, à la fin du chapitre 6, vous saurez quantifier la transformation de chaleur et de travail au sein de tous types de machines.

Une particularité des machines thermodynamiques est qu'elles sont toutes très inefficaces. L'exploration des causes de ces inefficacités et la quantification de leurs limites théoriques font l'objet du chapitre 7 (*le second principe*). Cette exploration culmine avec le chapitre 8 où nous apprenons à nous servir de l'*entropie*, un extraordinaire et puissant concept physique, pour décrire les transformations dans nos machines.

Avec ces notions, vous serez à même de comprendre et quantifier le fonctionnement de deux grands types de moteurs utilisés dans l'industrie : les centrales à vapeur, décrites dans le chapitre 9 (*cycles moteurs à vapeur*), et les moteurs à combustion interne, décrits dans le chapitre 10 (*cycles moteurs à gaz*).



À la fin de chaque chapitre, une série de problèmes concrets est présentée. Ces exercices sont là pour votre entraînement, mais aussi pour votre motivation : ils présentent le type de problème que nous cherchons à résoudre avec le chapitre. Afin de vous permettre de vous former seul/e, la solution de chaque exercice est brièvement décrite en dernière page. Je vous conseille de ne jamais y avoir recours avant d'avoir transpiré au moins une heure, car une fois que l'on a lu la méthode de résolution, il est impossible de faire comme si l'on ne la connaissait pas !

Vous trouverez aussi à la fin de chaque chapitre une courte section historique. Ces petits éléments de contexte nous ont semblé, à moi-même et Philippe Depondt, pouvoir contribuer à votre culture de scientifique et d'ingénieur/e.

Enfin, le livre que vous avez entre les mains est véritablement *à vous* : il est publié sous une licence libre dont les termes sont détaillés en annexe A5. Il me paraît en effet important que vous puissiez non seulement le partager librement et gratuitement (en le photocopiant, en en faisant des copies numériques, etc.) mais aussi le remixant d'une façon ou d'une autre (en l'améliorant, le raccourcissant ou l'adaptant à d'autres formes par exemple) en fonction de vos besoins, vous appropriant ainsi véritablement son contenu.

Mon espoir est qu'après avoir utilisé ce livre, le son d'une turbomachine en fonctionnement ne puisse vous laisser ni perplexe ni insensible. Bon courage !

Olivier Cleynen
février 2015

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.

Thermodynamique – CC-BY-SA Olivier Cleynen