

---

# Thermodynamique de l'ingénieur

---



Olivier Cleynen



# Table des matières

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>1</b> | <b>Notions fondamentales</b>                              | <b>9</b>   |
| 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      | Un peu d'histoire : mesurer le degré de chaleur . . . . . | 28         |
| 1.8      | Exercices . . . . .                                       | 30         |
| <br>     |   |            |
| <b>2</b> | <b>Les systèmes fermés</b>                                | <b>37</b>  |
| 2.1      | Pourquoi utiliser un système fermé ? . . . . .            | 39         |
| 2.2      | Conventions de comptabilité . . . . .                     | 41         |
| 2.3      | Le premier principe dans un système fermé . . . . .       | 43         |
| 2.4      | Quantifier le travail avec un système fermé . . . . .     | 44         |
| 2.5      | Quantifier la chaleur avec un système fermé . . . . .     | 58         |
| 2.6      | Un peu d'histoire : le moteur compound . . . . .          | 59         |
| 2.7      | Exercices . . . . .                                       | 61         |
| <br>     |   |            |
| <b>3</b> | <b>Les systèmes ouverts</b>                               | <b>67</b>  |
| 3.1      | Pourquoi utiliser un système ouvert ? . . . . .           | 69         |
| 3.2      | Conventions de comptabilité . . . . .                     | 70         |
| 3.3      | Le premier principe dans un système ouvert . . . . .      | 72         |
| 3.4      | Quantifier le travail avec un système ouvert . . . . .    | 77         |
| 3.5      | Quantifier la chaleur avec un système ouvert . . . . .    | 84         |
| 3.6      | Exercices . . . . .                                       | 85         |
| <br>     |   |            |
| <b>4</b> | <b>Le gaz parfait</b>                                     | <b>91</b>  |
| 4.1      | Définition . . . . .                                      | 93         |
| 4.2      | Propriétés des gaz parfaits . . . . .                     | 98         |
| 4.3      | Énergie et température . . . . .                          | 101        |
| 4.4      | Transformations élémentaires réversibles . . . . .        | 105        |
| 4.5      | Exercices . . . . .                                       | 118        |
| <br>     |   |            |
| <b>5</b> | <b>Liquides et vapeurs</b>                                | <b>125</b> |
| 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        |
| <b>6</b>  | <b>Cycles thermodynamiques</b>                          | <b>167</b> |
| 6.1       | Conventions de signe . . . . .                          | 169        |
| 6.2       | Transformer chaleur et travail . . . . .                | 171        |
| 6.3       | Rendement des cycles . . . . .                          | 179        |
| 6.4       | Exercices . . . . .                                     | 184        |
| <b>7</b>  | <b>Le second principe</b>                               | <b>195</b> |
| 7.1       | Le second principe . . . . .                            | 197        |
| 7.2       | Le second principe et les machines thermiques . . . . . | 199        |
| 7.3       | Le cycle de Carnot . . . . .                            | 204        |
| 7.4       | L'échelle de température thermodynamique . . . . .      | 215        |
| 7.5       | Efficacité maximale des machines . . . . .              | 220        |
| 7.6       | Exercices . . . . .                                     | 223        |
| <b>8</b>  | <b>L'entropie</b>                                       | <b>229</b> |
| 8.1       | Le concept de l'entropie . . . . .                      | 231        |
| 8.2       | Définition . . . . .                                    | 233        |
| 8.3       | Les variations d'entropie . . . . .                     | 236        |
| 8.4       | Prédire le sens des transformations . . . . .           | 248        |
| 8.5       | L'entropie, le temps, et l'univers . . . . .            | 255        |
| 8.6       | Exercices . . . . .                                     | 258        |
| <b>9</b>  | <b>Cycles moteurs à vapeur</b>                          | <b>263</b> |
| 9.1       | Pourquoi utiliser un moteur à vapeur ? . . . . .        | 265        |
| 9.2       | Critères d'évaluation des moteurs . . . . .             | 266        |
| 9.3       | Composants des installations à vapeur . . . . .         | 268        |
| 9.4       | Cycles moteurs à vapeur . . . . .                       | 277        |
| 9.5       | Exercices . . . . .                                     | 288        |
| <b>10</b> | <b>Cycles moteurs à gaz</b>                             | <b>291</b> |
| 10.1      | Performance des moteurs à gaz . . . . .                 | 293        |
| 10.2      | Motorisations à pistons . . . . .                       | 297        |
| 10.3      | Composants des turbomachines . . . . .                  | 302        |
| 10.4      | Les configurations des turbomachines . . . . .          | 308        |
| 10.5      | Modification des cycles des turbomachines . . . . .     | 316        |
| 10.6      | Exercices . . . . .                                     | 323        |

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Annexes</b>                                       | <b>329</b>     |
| A1    Abaques de vapeur . . . . .                    | 330            |
| A2    Pression indiquée et pression réelle . . . . . | 339            |
| A3    Conventions de notation . . . . .              | 340            |
| A4    Construction de ce livre . . . . .             | 341            |
| A5    Réutilisation de ce livre . . . . .            | 342            |
| <br><b>Bibliographie</b>                             | <br><b>343</b> |

---

# 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. Les conditions de sa ré-utilisation sont détaillées en annexe [A5](#).

---

Ce document est édité par un groupe de travail *Framabook* en vue de sa publication sous forme de livre début 2015. Un wiki de travail est mis à disposition à l'adresse [dokuwiki.framabook.org/doku.php?id=framabookthermodynamique](http://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](mailto: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, Nicolas Horny, Arnaud Gallant*. 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<sup>e</sup> siècle pour que débute 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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 avions. 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 effrayable.

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.

