



**sciences de
l'ingénieur**

- Cengel
- Boles
- Lacroix

Thermodynamique

Une approche pragmatique

 de boeck

Table des matières

Chapitre 1

GÉNÉRALITÉS ET PRINCIPES FONDAMENTAUX	1
1.1 La thermodynamique et l'énergie	2
1.2 Les unités	4
1.3 Les systèmes et les volumes de contrôle	6
1.4 Les variables thermodynamiques d'un système	8
1.5 La masse volumique et la masse volumique relative	8
1.6 Les états et l'équilibre d'un système	9
1.7 Les évolutions et les cycles	10
1.8 Le principe zéro de la thermodynamique et les échelles de température	12
1.9 La pression	14
1.9.1 La variation de la pression en fonction de la profondeur	16
1.10 Le manomètre	18
1.10.1 D'autres dispositifs de mesure de la pression	21
1.11 Le baromètre et la pression atmosphérique	21
1.12 La méthode de résolution de problèmes	25
Étape 1 : L'énoncé du problème	25
Étape 2 : Le schéma	25
Étape 3 : Les hypothèses et les approximations	25
Étape 4 : Les lois physiques	26
Étape 5 : Les variables thermodynamiques	26
Étape 6 : Les calculs	26
Étape 7 : La validation et la discussion	26
1.12.1 Les logiciels de calcul	26
1.12.2 Le logiciel EES	27
1.12.3 Remarque à propos des chiffres significatifs	28
Problèmes	30

Chapitre 2

L'ÉNERGIE, SES FORMES, SA CONVERSION ET SA TRANSMISSION	39
2.1 Introduction	40
2.2 Les formes d'énergie	40
2.2.1 Les formes d'énergie macroscopique	41
2.2.2 Les formes d'énergie microscopique : l'énergie interne	42
2.2.3 L'énergie nucléaire	44
2.2.4 L'énergie mécanique	45
2.3 Le transfert d'énergie par la chaleur	47
2.3.1 L'histoire de la chaleur	49
2.4 Le transfert d'énergie par le travail	49
2.4.1 Le travail électrique	52
2.5 Les formes de travail mécanique	53
2.5.1 Le travail d'un arbre	53
2.5.2 Le travail d'un ressort	54
2.5.3 Le travail d'une déformation élastique	54
2.5.4 Le travail sur une pellicule de liquide	55
2.5.5 Le travail d'élévation ou d'accélération d'un corps	55
2.5.6 Les autres formes de travail	57
2.6 La première loi de la thermodynamique	57
2.6.1 Le bilan d'énergie	58
2.6.2 La variation de l'énergie totale d'un système ($\Delta E_{\text{système}}$)	59
2.6.3 Les phénomènes de transfert d'énergie (E_{in} et E_{out})	59
2.7 Le rendement des conversions d'énergie	65
2.7.1 Le rendement des dispositifs mécaniques et électriques	69
2.8 L'énergie et l'environnement	72
2.8.1 L'ozone et le smog	74
2.8.2 Les pluies acides	74
2.8.3 L'effet de serre et les changements climatiques	75
Sujet particulier	78
Problèmes	84

Chapitre 3

LES PROPRIÉTÉS DES SUBSTANCES PURES 95

3.1 Une substance pure	96
3.2 Les phases d'une substance pure	96
3.3 Les changements de phase d'une substance pure	97
3.3.1 Le liquide comprimé et le liquide saturé	97
3.3.2 La vapeur saturée et la vapeur surchauffée	98
3.3.3 La température et la pression de saturation	99
3.3.4 Quelques conséquences de la dépendance entre T_{sat} et P_{sat}	100
3.4 Les diagrammes de phase	101
3.4.1 Le diagramme température-volume ($T-v$)	101
3.4.2 Le diagramme pression-volume ($P-v$)	102
3.4.3 Le diagramme $P-v$ qui inclut la phase solide	103
3.4.4 Le diagramme pression-température ($P-T$)	106
3.4.5 La surface $P-v-T$	106
3.5 Les tables de variables thermodynamiques	107
3.5.1 L'enthalpie : une combinaison de variables thermodynamiques	108
3.5.2 Les états de liquide saturé et de vapeur saturée	108
3.5.3 Un mélange liquide-vapeur à saturation	110
3.5.4 Une vapeur surchauffée	113
3.5.5 Un liquide comprimé	114
3.5.6 L'état de référence et les valeurs de référence	115
3.6 L'équation d'état d'un gaz parfait	117
3.6.1 Peut-on considérer la vapeur d'eau comme un gaz parfait ?	119
3.7 Le facteur de compressibilité : l'écart du comportement des gaz parfaits	120
3.8 Les autres équations d'état	124
3.8.1 L'équation d'état de Van der Waals	124
3.8.2 L'équation d'état de Beattie-Bridgeman	125
3.8.3 L'équation d'état de Benedict-Webb-Rubin	125
3.8.4 L'équation d'état du viriel	126
Sujet particulier	128
Problèmes	132

Chapitre 4

L'ANALYSE ÉNERGÉTIQUE DE SYSTÈMES FERMÉS 141

4.1 Le travail de frontière déformable	142
4.1.1 L'évolution polytropique	146
4.2 Le bilan d'énergie dans les systèmes fermés	148
4.3 Les chaleurs massiques	152

4.4 L'énergie interne, l'enthalpie et les chaleurs massiques des gaz parfaits	153
4.4.1 Les relations entre les chaleurs massiques d'un gaz parfait	155
4.5 L'énergie interne, l'enthalpie et les chaleurs massiques des solides et des liquides	160
4.5.1 Les variations de l'énergie interne	161
4.5.2 Les variations de l'enthalpie	161
Sujet particulier	164
Problèmes	169

Chapitre 5

LA CONSERVATION DE LA MASSE ET DE L'ÉNERGIE DANS LES SYSTÈMES OUVERTS 185

5.1 La conservation de la masse	186
5.1.1 Le débit massique et le débit volumique	186
5.1.2 Le principe de conservation de la masse	187
5.1.3 Le bilan de masse dans les évolutions avec écoulements en régime permanent	189
5.1.4 Les écoulements incompressibles	189
5.2 Le travail d'écoulement et l'énergie totale d'un écoulement	191
5.2.1 L'énergie totale d'un écoulement	192
5.2.2 Le transfert d'énergie par l'écoulement	193
5.3 L'analyse énergétique de systèmes avec écoulement en régime permanent	195
5.4 Les machines et les dispositifs fonctionnant avec des écoulements en régime permanent	198
5.4.1 Les tuyères et les diffuseurs	198
5.4.2 Les turbines et les compresseurs	201
5.4.3 Les soupapes d'étranglement	204
5.4.4 a) Les chambres de mélange	205
5.4.4 b) Les échangeurs de chaleur	206
5.4.5 Les écoulements dans les conduits	208
5.5 L'analyse énergétique de systèmes avec écoulements en régime transitoire	210
Sujet particulier	214
Problèmes	218

Chapitre 6

LA DEUXIÈME LOI DE LA THERMODYNAMIQUE 237

6.1 La deuxième loi de la thermodynamique : introduction	238
--	-----

6.2 Les réservoirs thermiques	238	7.9.1 Les chaleurs massiques constantes (valeurs approximatives)	299
6.3 Les machines thermiques	239	7.9.2 Les chaleurs massiques variables (valeurs exactes)	300
6.3.1 Le rendement thermique	241	7.9.3 Les évolutions isentropiques dans les gaz parfaits	302
6.3.2 Peut-on récupérer Q_{out} ?	242	7.9.4 Les évolutions isentropiques dans les gaz parfaits : les chaleurs massiques constantes	302
6.3.3 La deuxième loi de la thermodynamique : l'énoncé de Kelvin-Planck	244	7.9.5 Les évolutions isentropiques dans les gaz parfaits : les chaleurs massiques variables	303
6.4 Les réfrigérateurs et les thermopompes	244	7.9.6 La pression et le volume massique relatifs	303
6.4.1 Le coefficient de performance du réfrigérateur	245	7.10 Le travail d'une évolution réversible avec écoulement en régime permanent	305
6.4.2 Le coefficient de performance de la thermopompe	246	7.11 L'optimisation du travail du compresseur	308
6.4.3 La deuxième loi de la thermodynamique : l'énoncé de Clausius	248	7.11.1 La compression étagée avec refroidissement	309
6.5 Les machines à mouvement perpétuel	249	7.12 Les rendements isentropiques de machines et de dispositifs avec écoulement en régime permanent	311
6.6 L'évolution réversible et l'évolution irréversible	251	7.12.1 Le rendement isentropique des turbines	312
6.6.1 Les irréversibilités	252	7.12.2 Le rendement isentropique des compresseurs et des pompes	314
6.6.2 Les évolutions réversibles intérieurement et extérieurement	253	7.12.3 Le rendement isentropique des tuyères	316
6.7 Le cycle de Carnot	253	7.13 Le bilan d'entropie	317
6.7.1 Le cycle de Carnot inversé	254	7.13.1 La variation d'entropie du système ($\Delta S_{système}$)	318
6.8 Les principes de Carnot	255	7.13.2 Les phénomènes de transfert d'entropie (S_{in} et S_{out})	318
6.9 L'échelle de température thermodynamique	256	Le transfert d'entropie par la transmission de chaleur	318
6.10 La machine de Carnot	258	Le transfert d'entropie par l'écoulement d'un fluide	319
6.10.1 La qualité de l'énergie	260	7.13.3 La production d'entropie ($S_{gén}$)	320
6.11 Le réfrigérateur et la thermopompe de Carnot	261	7.13.4 Le bilan d'entropie dans les systèmes fermés	320
Sujet particulier	263	7.13.5 Le bilan d'entropie dans les systèmes ouverts	321
Problèmes	267	7.13.6 La production d'entropie par la transmission de chaleur	327

Sujet particulier	328
Problèmes	336

Chapitre 7

L'ENTROPIE 279

7.1 L'entropie	280
7.1.1 Un cas particulier : l'évolution isotherme	282
7.2 Le principe d'accroissement de l'entropie	283
7.3 La variation d'entropie des substances pures	286
7.4 Les évolutions isentropiques	290
7.5 Les diagrammes $T-s$ et $h-s$	291
7.6 Qu'est-ce que l'entropie ?	292
7.6.1 La production d'entropie dans la vie quotidienne	294
7.7 Les relations thermodynamiques $T ds$	295
7.8 La variation d'entropie dans les liquides et les solides	296
7.9 La variation d'entropie des gaz parfaits	299

Chapitre 8

L'EXERGIE 357

8.1 L'exergie : l'énergie disponible	358
8.1.1 L'exergie de l'énergie cinétique et potentielle	359
8.2 Le travail réversible et l'irréversibilité	361
8.3 Le rendement selon la deuxième loi (η_{II})	364
8.4 La variation de l'exergie d'un système	367
8.4.1 L'exergie d'un système fermé	367
8.4.2 L'exergie d'un écoulement	368

8.5 Le transfert d'exergie par la chaleur, le travail et l'écoulement	371
8.5.1 Le transfert d'exergie par la chaleur (Q)	371
8.5.2 Le transfert d'exergie par le travail (W)	372
8.5.3 Le transfert d'exergie par l'écoulement d'une masse m	373
8.6 Le principe de diminution de l'exergie et l'exergie détruite	373
8.6.1 L'exergie détruite	374
8.7 Le bilan d'exergie dans les systèmes fermés	375
8.8 Le bilan d'exergie dans les systèmes ouverts	386
8.8.1 Le bilan d'exergie en régime permanent	386
8.8.2 Le travail réversible ($W_{\text{rév}}$)	387
8.8.3 Le rendement selon la deuxième loi de dispositifs avec écoulement en régime permanent	388
Sujet particulier	393
Problèmes	397

Chapitre 9

LES CYCLES DE PUISSANCE À GAZ	413
9.1 Des généralités à propos des cycles de puissance à gaz	414
9.2 À quoi sert le cycle de Carnot ?	415
9.3 Un aperçu du moteur à combustion interne	417
9.4 Le cycle Otto	418
9.5 Le cycle Diesel	424
9.6 Les cycles de Stirling et de Ericsson	426
9.7 Le cycle de Brayton	429
9.7.1 Le développement des turbines à gaz	432
9.7.2 L'écart entre le cycle réel de la turbine à gaz et le cycle idéal	434
9.8 Le cycle de Brayton avec régénération	436
9.9 Le cycle de Brayton avec refroidissement intermédiaire, réchauffage intermédiaire et régénération	437
9.10 Le cycle théorique de la propulsion par jet	441
9.10.1 Les avantages et les inconvénients de la turbine à gaz	445
9.11 Les cycles de puissance à gaz et la deuxième loi de la thermodynamique	446
Sujet particulier	449
Problèmes	453

Chapitre 10

LES CYCLES DE PUISSANCE À VAPEUR	467
10.1 Le cycle de Carnot à vapeur	468
10.2 Le cycle de Rankine idéal	469
10.2.1 Le bilan énergétique et le rendement thermique du cycle de Rankine idéal	470
10.3 L'écart entre le cycle à vapeur idéal et le cycle réel	473
10.4 Comment peut-on accroître le rendement du cycle de Rankine ?	475
10.4.1 Diminuer la pression dans le condenseur	476
10.4.2 Chauffer la vapeur à haute température	476
10.4.3 Augmenter la pression dans la chaudière	477
10.5 Le cycle à resurchauffe	479
10.6 Le cycle à régénération	483
10.6.1 Le réchauffeur à mélange	483
10.6.2 Le réchauffeur à surface	485
10.6.3 D'où provient la chaleur qui alimente la chaudière ?	491
10.7 Le cycle de puissance à vapeur et la deuxième loi	492
10.8 Le cycle de cogénération	495
10.9 Le cycle combiné gaz-vapeur	499
Sujet particulier	501
Problèmes	505

Chapitre 11

LES CYCLES DE RÉFRIGÉRATION	521
11.1 Les machines frigorifiques	522
11.2 Le cycle de Carnot inverse	523
11.3 Le cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal	524
11.4 L'écart entre le cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal et le cycle réel	527
11.5 Les fluides frigorigènes	529
11.6 Les thermopompes	532
11.7 Les systèmes de réfrigération à compression de vapeur innovants	533
11.7.1 Le système de réfrigération en cascade	534

11.7.2 Le système de réfrigération à compression étagée	536
11.7.3 Les systèmes de réfrigération polyvalents munis d'un seul compresseur	538
11.7.4 La liquéfaction des gaz	539
11.8 Les cycles de réfrigération à gaz	540
11.9 Les systèmes de réfrigération à absorption	543
Sujet particulier	545
Problèmes	548

Chapitre 12

LES RELATIONS THERMODYNAMIQUES 561

12.1 Un aperçu des dérivées partielles et de leurs relations	562
12.1.1 Les dérivées partielles	563
12.1.2 Les relations entre les dérivées partielles	564
12.2 Les relations de Maxwell	566
12.3 L'équation de Clapeyron	567
12.4 Quelques relations thermodynamiques générales pour du , dh , ds , c_v et c_p	570
12.4.1 La variation de l'énergie interne	570
12.4.2 La variation de l'enthalpie	571
12.4.3 La variation de l'entropie	572
12.4.4 Les chaleurs massiques c_v et c_p	573
12.5 Le coefficient de Joule-Thompson	577
12.6 Les variations d'enthalpie, d'énergie interne et d'entropie des gaz réels	578
12.6.1 La variation de l'enthalpie des gaz réels	578
12.6.2 La variation de l'énergie interne des gaz réels	580
12.6.3 La variation de l'entropie des gaz réels	580
Sujet particulier	582
Problèmes	586

Chapitre 13

LES MÉLANGES GAZEUX 591

13.1 La composition d'un mélange gazeux : les fractions massique et molaire	592
13.2 Le comportement $P-v-T$ des mélanges de gaz parfaits et des mélanges de gaz réels	594
13.2.1 Les mélanges de gaz parfaits	595
13.2.2 Les mélanges de gaz réels	595

13.3 Les variables thermodynamiques de mélanges de gaz parfaits et de mélanges de gaz réels	598
13.3.1 Les mélanges de gaz parfaits	599
13.3.2 Les mélanges de gaz réels	602
Sujet particulier	606
Problèmes	611

Chapitre 14

LES MÉLANGES GAZ-VAPEUR D'EAU ET LE CONDITIONNEMENT D'AIR 619

14.1 L'air sec et l'air atmosphérique	620
14.2 L'humidité absolue et l'humidité relative de l'air	621
14.3 Le point de rosée	623
14.4 La température de saturation adiabatique et la température du thermomètre humide	625
14.5 Le diagramme psychrométrique	627
14.6 Le bien-être et le conditionnement d'air	629
14.7 Les évolutions de conditionnement d'air	630
14.7.1 Le chauffage et le refroidissement à humidité constante ($\omega = \text{constante}$)	631
14.7.2 Le chauffage avec humidification	632
14.7.3 Le refroidissement avec déshumidification	634
14.7.4 Le refroidissement par évaporation	635
14.7.5 Le mélange adiabatique d'écoulements d'air	636
14.7.6 Les tours de refroidissement humide	639
Problèmes	642

Chapitre 15

LES RÉACTIONS CHIMIQUES 651

15.1 Les combustibles et la combustion	652
15.1.1 Les combustibles fossiles	652
15.1.2 La biomasse	653
15.1.3 La combustion	654
15.2 L'évolution de combustion	657
15.3 L'enthalpie de formation et l'enthalpie de combustion	662
15.4 L'analyse des systèmes réactifs à l'aide de la première loi	666
15.4.1 Les systèmes réactifs avec écoulement en régime permanent	666
15.4.2 Les systèmes réactifs fermés	667

15.5 La température de flamme adiabatique	671
15.6 La variation d'entropie dans les systèmes réactifs	673
15.7 L'analyse des systèmes réactifs au moyen de la deuxième loi	674
Sujet particulier	680
Problèmes	685

Annexe 1

TABLES ET DIAGRAMMES 695

Table A.1 Masse molaire, constante des gaz et point critique.	696
Table A.2 Chaleurs massiques de gaz parfaits.	697
Table A.3 Propriétés de substances liquides et solides et d'aliments.	700
Table A.4 Variables de la vapeur d'eau saturée : table de la température.	702
Table A.5 Variables de la vapeur d'eau saturée : table de la pression.	704
Table A.6 Variables de la vapeur d'eau surchauffée.	706
Table A.7 Variables de l'eau comprimée.	710
Table A.8 Variables de la glace et de la vapeur d'eau saturée.	711
Figure A.9 Diagramme $T-s$ de l'eau.	712
Figure A.10 Diagramme de Mollier de l'eau.	713
Table A.11 Variables du réfrigérant R-134a saturé : table de la température.	714
Table A.12 Variables du réfrigérant R-134a saturé : table de la pression.	716
Table A.13 Variables du réfrigérant R-134a surchauffé.	717
Figure A.14 Diagramme $P-h$ du réfrigérant R-134a.	719
Figure A.15 Diagramme généralisé de compressibilité de Nelson-Obert.	720
Table A.16 Propriétés de l'air à haute altitude.	721
Table A.17 Variables thermodynamiques de l'air à basse pression.	722

Table A.18 Enthalpie, énergie interne et entropie absolue de l'azote N_2 à 1 atm.	724
Table A.19 Enthalpie, énergie interne et entropie absolue de l'oxygène O_2 à 1 atm.	726
Table A.20 Enthalpie, énergie interne et entropie absolue du dioxyde de carbone CO_2 à 1 atm.	728
Table A.21 Enthalpie, énergie interne et entropie absolue du monoxyde de carbone CO à 1 atm.	730
Table A.22 Enthalpie, énergie interne et entropie absolue de l'hydrogène H_2 à 1 atm.	732
Table A.23 Enthalpie, énergie interne et entropie absolue de la vapeur d'eau H_2O à 1 atm.	733
Table A.24 Enthalpie, énergie interne et entropie absolue de l'oxygène monoatomique O à 1 atm.	735
Table A.25 Enthalpie, énergie interne et entropie absolue de l'hydroxyle OH à 1 atm.	735
Table A.26 Enthalpie de formation, fonction de Gibbs de formation et entropie absolue de substances à 1 atm et à 25 °C.	736
Table A.27 Propriétés de combustibles et d'hydrocarbures.	737
Figure A.28 Diagramme du facteur d'écart enthalpique.	738
Figure A.29 Diagramme du facteur d'écart entropique.	739
Figure A.30 Diagramme psychrométrique à 1 atm.	740

Annexe 2

LEXIQUE FRANÇAIS-ANGLAIS 741

Sources iconographiques 747

Index 749