

SCIENCES SUP



Cours et exercices corrigés

Licence • Classes prépas • IUT/BTS

THERMODYNAMIQUE

Bases et applications

2^e édition

*Jean-Noël Foussard
Edmond Julien
Stéphane Mathé*

536-10.1

DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	X
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 • NOTIONS FONDAMENTALES	3
1.1 La notion de système	3
1.1.1 Définition	3
1.1.2 Les différents types de systèmes	4
1.1.3 Description de l'état d'un système	5
1.1.4 Caractère intensif ou extensif d'une variable	8
1.1.5 Homogénéité et hétérogénéité d'un système	8
1.2 Évolution d'un système	9
1.2.1 État de repos et état d'équilibre d'un système	9
1.2.2 La notion de transformation	11
1.3 L'outil mathématique	14
1.3.1 Différentielle et forme différentielle	14
1.3.2 Fonction d'état et grandeur de transformation	15
1.3.3 La notion de fonction homogène	16
1.4 Les systèmes thermoélastiques physiques	17
1.4.1 Équations d'état	17
1.4.2 Les coefficients thermoélastiques	18
1.5 Le modèle du gaz parfait	19
1.5.1 Approche expérimentale du gaz parfait	19
1.5.2 Définition du gaz parfait	20
1.5.3 Mélange de gaz parfaits	23
Exercices	24
Solutions des exercices	30

CHAPITRE 2 • TRAVAIL ET CHALEUR	38
2.1 L'échange de travail avec l'extérieur.....	38
2.1.1 Préliminaires	38
2.1.2 Les travaux mécaniques.....	39
2.1.3 Les autres travaux	42
2.2 L'échange de chaleur avec l'extérieur.....	43
2.2.1 La notion de chaleur	43
2.2.2 La notion de source thermique	44
2.2.3 L'échange de chaleur.....	45
2.2.4 Capacités calorifiques d'un corps pur	46
2.2.5 Capacités calorifiques d'un mélange.....	47
Exercices.....	49
Solutions des exercices	51
CHAPITRE 3 • LE PREMIER PRINCIPE	57
3.1 Le premier principe et l'énergie interne	57
3.1.1 Énoncé du premier principe.....	57
3.1.2 Premier principe et transformation ouverte	58
3.1.3 Conséquence du premier principe	58
3.1.4 La notion d'énergie interne d'un système	59
3.1.5 L'énergie interne, fonction d'état.....	60
3.2 Application au gaz parfait.....	61
3.2.1 La loi de Joule.....	61
3.2.2 Conséquences pour le gaz parfait	62
3.2.3 Conditions de validité d'une formule.....	64
3.2.4 La transformation polytropique réversible.....	65
Exercices.....	68
Solutions des exercices	72
CHAPITRE 4 • LA FONCTION ENTHALPIE	82
4.1 Cas des systèmes fermés.....	82
4.1.1 La fonction enthalpie	82
4.1.2 Les cas classiques	83

4.2	Introduction aux systèmes ouverts	85
4.2.1	Bases de l'étude d'un écoulement	85
4.2.2	La notion de bilan	87
4.2.3	Le travail de transvasement	88
4.2.4	Le bilan énergétique	88
4.2.5	La détente de Joule et Thomson	91
	Exercices	92
	Solutions des exercices	96
	CHAPITRE 5 • LE DEUXIÈME PRINCIPE	100
5.1	Les insuffisances du premier principe	100
5.1.1	Transformation cyclique monotherme	100
5.1.2	La notion de qualité de l'énergie	101
5.1.3	Le niveau de transfert de la chaleur	102
5.2	Le deuxième principe	102
5.2.1	Relation de définition de l'entropie	102
5.2.2	Bilan entropique et deuxième principe	104
5.2.3	Conséquences du deuxième principe	105
5.2.4	Spontanéité d'une transformation	106
5.3	Entropie et système thermoélastique	107
5.3.1	L'équation fondamentale de Gibbs	107
5.3.2	Entropie et variables d'état	107
5.3.3	Qu'est-ce que l'entropie ?	109
5.4	Les fonctions dérivées de l'entropie	112
5.4.1	Énergie libre et enthalpie libre	112
5.4.2	Énergie libre par rapport à l'ambiance	113
5.4.3	Enthalpie libre par rapport à l'ambiance	114
	Exercices	115
	Solutions des exercices	119
	CHAPITRE 6 • THERMODYNAMIQUE DU CORPS PUR	124
6.1	Notions de base sur le corps pur	124
6.1.1	Changements d'état d'un corps pur	124
6.1.2	Enthalpie libre molaire d'un corps pur	128

6.1.3	Le phénomène de vaporisation	129
6.1.4	Le phénomène de l'ébullition	131
6.2	Aspect thermodynamique	132
6.2.1	Caractérisation de l'état d'équilibre	132
6.2.2	La notion de variance	133
6.2.3	La relation fondamentale de Clapeyron	134
6.2.4	Représentation graphique	138
6.2.5	Les retards aux transitions de phases	140
6.2.6	Transformations allotropiques du corps pur	142
	Exercices	143
	Solutions des exercices	148
CHAPITRE 7 • LES FLUIDES RÉELS		159
7.1	Les isothermes d'Andrews	159
7.1.1	Évolution isotherme d'un fluide réel	159
7.1.2	La règle des moments	161
7.2	Équation d'état des fluides réels	162
7.2.1	L'équation de Van der Waals	162
7.2.2	L'équation de Redlich-Kwong	163
7.2.3	L'équation de Peng-Robinson	165
7.3	Calcul des fonctions thermodynamiques des fluides réels	168
7.3.1	La notion de grandeur résiduelle	168
7.3.2	Expression des grandeurs résiduelles	170
7.3.3	Équations d'état et grandeurs résiduelles	172
7.4	Les diagrammes thermodynamiques	173
7.4.1	Grandeurs relatives à un fluide homogène	173
7.4.2	Les diagrammes entropique et enthalpique	175
	Exercices	176
	Solutions des exercices	178
CHAPITRE 8 • LES MACHINES THERMIQUES		184
8.1	Notions préliminaires	184
8.1.1	Définitions	184
8.1.2	Les différents types de machines dithermes	185

8.2 Les machines dithermes motrices	187
8.2.1 Généralités	187
8.2.2 La machine de référence de Carnot	188
8.2.3 Améliorations de la machine de Carnot	191
8.2.4 La notion de rendement isentropique	196
8.3 Les machines dithermes réceptrices	198
8.3.1 Généralités	198
8.3.2 Les machines réceptrices à fluide liquéfiable	199
Exercices	201
Solutions des exercices	209
CHAPITRE 9 • GRANDEURS DE RÉACTION	216
9.1 Notions préliminaires	216
9.1.1 La notion d'équation bilan	216
9.1.2 Conditions d'étude des échanges d'énergie	218
9.1.3 La notion d'avancement de réaction	219
9.1.4 Grandeur de réaction	220
9.2 Enthalpie et énergie interne de réaction	222
9.2.1 Réaction isotherme et isobare	222
9.2.2 Enthalpie de réaction et température	223
9.2.3 Réaction isotherme et isochore	224
9.2.4 Relation entre les deux grandeurs de réaction	225
9.3 Détermination des grandeurs de réaction	226
9.3.1 La notion d'état standard	227
9.3.2 La notion d'enthalpie standard de formation	228
9.3.3 Combinaison de réactions, la loi de Hess	228
Exercices	231
Solutions des exercices	235
BIBLIOGRAPHIE	242
INDEX	243

AVANT-PROPOS

L'enseignement de la thermodynamique macroscopique rencontre des difficultés inhérentes à la nature même du sujet. C'est en effet l'une des rares disciplines scientifiques qui s'appuie sur un nombre très restreint de principes dont découlent, en toute logique, les différentes lois de la thermodynamique. De ce fait, la démarche thermodynamique est très difficile à faire admettre à un étudiant généralement trop enclin à la réduire à la simple utilisation de formules dont il a, bien souvent, oublié les conditions d'application.

Des installations courantes comme le chauffe-eau solaire ou la climatisation de locaux font appel à la thermodynamique. Cet ouvrage a pour objectif d'exposer les bases fondamentales de thermodynamique que doit maîtriser tout futur ingénieur pour les mettre en œuvre lors de la conception ou de l'amélioration d'un procédé.

L'expérience que nous avons de cet enseignement nous a appris que très souvent l'étudiant reste perdu et surtout passif face à un exposé traditionnel mais nécessaire de cette discipline. Nous avons essayé d'éviter, dans la mesure du possible, cet écueil en adoptant un exposé simple et pratique des différentes notions et des conséquences qui en découlent. Des exemples, en cours de chapitre, illustrent les concepts abordés afin de montrer que la thermodynamique n'a pas qu'un côté théorique. Des exercices d'application directe des notions étudiées sont proposés en fin de chaque chapitre avec l'arrière-pensée d'apporter au lecteur des compléments d'information ou d'attirer son attention sur des points particuliers.

Remerciements. Cet ouvrage s'inspire directement de l'enseignement de thermodynamique donné aux élèves de 1^{re} année de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse ainsi qu'aux élèves suivant en 2^e année de ce même institut la préorientation « Ingénierie chimique et biochimique et environnement ». Cet enseignement, coordonné par Jean-Noël Foussard est en fait le fruit du travail incessant de toute une équipe au sein de laquelle les discussions et les remarques enrichissantes ont toujours été fort nombreuses. Nous tenons donc à remercier pour cet apport Hubert Debellefontaine, Pierre Massé et Bernard Talayrach.

Nous tenons également à adresser nos plus vifs remerciements à toute l'équipe des Éditions Dunod pour leur aide et plus particulièrement à Dominique Decobecq pour son suivi attentif et les précieux conseils qu'il nous a prodigués tout le long de la rédaction et de la mise en forme de cet ouvrage.