

Premiers cycles • Licence

JOSÉ-PHILIPPE PÉREZ

Thermodynamique

Fondements et applications

*Avec 250 exercices
et problèmes résolus*

3^e édition

MASSON
SCIENCES

DUNOD

Table des matières

Avant-propos	viii
Les grands noms de la thermodynamique	xi
Constantes physiques, notations et symboles	xiv
Description de l'ouvrage	xvii
La thermodynamique en vingt questions	xx
1. De la dynamique à la thermodynamique	
I. — Énergie mécanique	1
II. — Échange d'énergie par travail	3
III. — Système fermé, système ouvert	7
IV. — Description d'un système en thermodynamique	8
V. — État stationnaire et état d'équilibre	11
VI. — Bilan global d'une grandeur extensive	15
VII. — Bilan local d'une grandeur extensive	17
<i>Exercices et problèmes</i>	21
2. Théorie cinétique des gaz parfaits de Maxwell	
I. — Gaz parfait et hypothèses statistiques	25
II. — Pression	26
III. — Énergie interne d'un gaz parfait. Température	28
IV. — Limites du modèle du gaz parfait	30
V. — Distribution maxwellienne des vitesses	31
<i>Exercices et problèmes</i>	38
3. Facteur de Boltzmann	
I. — Distribution des particules dans un champ extérieur	42
II. — Loi de distribution de Boltzmann	45
III. — Approximation continue	48
IV. — Énergie interne d'un gaz parfait	50
V. — Énergie interne des solides	54
<i>Exercices et problèmes</i>	56

4. Phénomènes de transport

I. — Libre parcours moyen. Durée moyenne de collision	60
II. — Section efficace	62
III. — Transport par les molécules	65
IV. — Transport de quantité de mouvement. Viscosité	69
<i>Exercices et problèmes</i>	71

5. Diffusion de particules

I. — Mise en évidence de la diffusion. Loi de Fick	73
II. — Équation de diffusion	75
III. — Interprétation microscopique de la diffusion	79
IV. — Influence d'un champ extérieur sur la diffusion	80
V. — Applications	82
<i>Exercices et problèmes</i>	85

6. Premier principe de la thermodynamique : l'énergie

I. — Historique sur l'énergie	89
II. — Premier principe de la thermodynamique	90
III. — Échange d'énergie par chaleur	92
IV. — Bilan énergétique et applications	93
<i>Exercices et problèmes</i>	98

7. Deuxième principe de la thermodynamique : l'entropie

I. — Le deuxième principe de la thermodynamique	103
II. — Énoncés historiques du deuxième principe	105
III. — Identité fondamentale	106
IV. — Variation d'entropie d'un gaz parfait	109
V. — Exemples de phénomènes irréversibles	111
VI. — Signification fondamentale de l'entropie	118
VII. — Bilan entropique local	119
<i>Exercices et problèmes</i>	120

8. Fonctions thermodynamiques

I. — Fonctions thermodynamiques des systèmes divariants	127
II. — Coefficients calorimétriques	130
III. — Exemples de systèmes divariants	135
IV. — Étude générale des systèmes thermodynamiques	138
<i>Exercices et problèmes</i>	142

9. Gaz réels. Applications aux détente

I. — Compressibilité des gaz réels	148
II. — Équations d'état des gaz réels	153
III. — Application aux détente	157
IV. — Liquéfaction d'un gaz réel	163
<i>Exercices et problèmes</i>	166

10. Machines thermiques

I. — Classification des machines thermiques	172
II. — Machines dithermes	172
III. — Exemples de cycles moteurs	177
IV. — Exemples de réfrigérateurs et de pompes à chaleur	185
<i>Exercices et problèmes</i>	188

11. Diffusion thermique

I. — Mise en évidence expérimentale. Loi de Fourier	192
II. — Équation de la diffusion thermique	194
III. — Interprétation microscopique	198
IV. — Applications	201
V. — Échanges thermiques conducto-convectifs	205
<i>Exercices et problèmes</i>	209

12. Évolution, équilibre et stabilité des systèmes thermodynamiques

I. — Systèmes mécaniques conservatifs	214
II. — Potentiels thermodynamiques	215
III. — Transformations monothermes	219
IV. — Transformations monothermes et monobares	222
V. — Stabilité de l'équilibre thermodynamique	225
VI. — Application à la chimie	226
<i>Exercices et problèmes</i>	230

13. Thermodynamique des systèmes ouverts

I. — Expression du premier principe	233
II. — Expression du deuxième principe	237
III. — Exergie pour les systèmes ouverts	240
IV. — Potentiel chimique	241
V. — Bilans énergétique et entropique locaux	243
<i>Exercices et problèmes</i>	246

14. Transitions de phase d'un corps pur

I. — Mise en évidence et interprétation qualitative	250
II. — Étude expérimentale	252
III. — Équilibre d'un corps pur sous plusieurs phases	256
IV. — Transitions de première espèce	259
V. — Équilibre liquide-vapeur d'un corps pur	263
VI. — Retards aux transitions de phase	265
VII. — Transitions de phase d'ordre élevé	267
<i>Exercices et problèmes</i>	271

15. Interprétation statistique de l'entropie	
I. — État macroscopique et état microscopique	276
II. — Entropie statistique	279
III. — Entropie d'un gaz parfait monoatomique	285
IV. — Distribution de Boltzmann	287
V. — Interprétation des bilans énergétique et entropique	294
<i>Exercices et problèmes</i>	299
16. Gaz parfaits de fermions et de bosons	
I. — Distribution grand-canonique	303
II. — Systèmes de particules identiques indépendantes	308
III. — Gaz parfait de fermions	314
IV. — Gaz parfait de bosons	320
V. — Gaz parfait d'atomes	327
<i>Exercices et problèmes</i>	332
17. Très basses températures. Troisième principe de la thermodynamique	
I. — Procédés de liquéfaction des gaz atmosphériques	339
II. — Troisième principe ou postulat de Nernst-Planck	342
III. — Le refroidissement entre 1 et 0 K	345
IV. — Propriétés des corps aux très basses températures	350
<i>Exercices et problèmes</i>	354
18. Rayonnement thermique	
I. — Lois expérimentales du rayonnement	356
II. — Hypothèses de Planck et conséquences	358
III. — Étude thermodynamique du rayonnement	363
IV. — Flux de rayonnement et applications	366
<i>Exercices et problèmes</i>	371
19. Couplage de phénomènes irréversibles. Effets thermoélectriques	
I. — Forces thermodynamiques	376
II. — Théorie de Onsager	378
III. — Effets thermoélectriques	380
<i>Exercices et problèmes</i>	389
20. Thermométrie et calorimétrie	
I. — Thermométrie	392
II. — Différents thermomètres	395
III. — Calorimétrie	401
IV. — Mesure des capacités thermiques	406
V. — Mesure des enthalpies de transition de phase	408
<i>Exercices et problèmes</i>	411

21. Tension superficielle

I. — Forces de tension superficielle	413
II. — Formule de Laplace et loi de Jurin	416
III. — Applications	420
IV. — Méthodes de mesure de la tension superficielle	421
V. — Étude thermodynamique	427
<i>Exercices et problèmes</i>	431

22. Astrothermodynamique

I. — Équilibre mécanique d'une planète ou d'une étoile	435
II. — Matière et rayonnement sans gravitation	439
III. — Systèmes autogravitants en l'absence de rayonnement	443
IV. — Thermodynamique de l'Univers en expansion	454
<i>Exercices et problèmes</i>	458

Annexe 1. Dérivées et différentielles

I. — Différentielle d'une fonction de deux variables	461
II. — Forme différentielle et différentielle	462

Annexe 2. Intégrales et approximation de Stirling

I. — Intégrales	465
II. — Approximation de Stirling	468

Annexe 3. Loïs de probabilité

I. — Langage des probabilités	470
II. — Probabilités	471
III. — Variables aléatoires	473
IV. — Loïs de probabilité	475

Annexe 4. Multiplicateurs de Lagrange

Annexe 4. Multiplicateurs de Lagrange	482
---	-----

Annexe 5. Simulation en thermodynamique

I. — Le gaz bidimensionnel	484
II. — Réversibilité microscopique et irréversibilité	493
III. — Tendance vers la loi normale	499
IV. — Diffusion et marche au hasard	502

Réponses aux vingt questions

Réponses aux vingt questions	506
--	-----

Solutions des exercices et problèmes

Solutions des exercices et problèmes	509
--	-----

Bibliographie

Bibliographie	575
-------------------------	-----

Index

Index	577
-----------------	-----



José-Philippe Pérez

THERMODYNAMIQUE

Fondements et applications

avec 250 exercices

et problèmes résolus

Cet ouvrage rassemble, dans un seul volume, les fondements de la thermodynamique ainsi que ses diverses applications. Il est divisé en trois parties. Dans la première, on propose d'abord une analyse microscopique simple et on s'appuie largement sur l'équation-bilan d'une grandeur extensive pour exprimer les deux premiers principes de la thermodynamique.

La deuxième partie présente des compléments (diffusion thermique, systèmes ouverts, transitions de phases, etc.) et développe l'interprétation statistique de l'entropie.

La dernière, contient de nombreux approfondissements (gaz parfaits de fermions et de bosons, très basses températures, rayonnement, relations d'Onsager, etc.).

L'ensemble se termine par un chapitre sur l'astrothermodynamique et par une annexe sur l'intérêt de la simulation et sa mise en œuvre en thermodynamique.

Ce manuel s'adresse plus particulièrement aux étudiants de DEUG, d'IUT, des INSA, des classes préparatoires et de licence. Aussi comporte-t-il de nombreuses illustrations et près de 250 exercices et problèmes résolus dont la moitié, précisément celle qui offre une ouverture supplémentaire, est corrigée sur le site web de l'auteur. Par sa présentation historique, didactique, voire épistémologique, l'ouvrage intéressera également les candidats au CAPES et à l'agrégation.

JOSÉ-PHILIPPE PÉREZ
est agrégé de physique et docteur-ès-sciences. Professeur à l'université Paul-Sabatier, il enseigne notamment en DEUG, en maîtrise et à l'agrégation. Il effectue ses activités de recherche à l'Observatoire Midi-Pyrénées, dans le domaine de la formation des images.

Le cours de Physique de José-Philippe Pérez

Mécanique	avec 300 exercices et problèmes résolus
Électromagnétisme	avec 300 exercices et problèmes résolus
Optique	avec 250 exercices et problèmes résolus
Thermodynamique	avec 250 exercices et problèmes résolus
Relativité	avec 150 exercices et problèmes résolus

MATHÉMATIQUES

PHYSIQUE

CHIMIE

ÉLECTRONIQUE

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INFORMATIQUE

SCIENCES DE LA VIE

SCIENCES DE LA TERRE



ISBN 2 10 005554 2



<http://www.dunod.com>

