

Premiers cycles • Licence

JOSÉ-PHILIPPE PÉREZ

# Thermodynamique

Fondements et applications

*Avec 250 exercices  
et problèmes résolus*

*3<sup>e</sup> édition*

MASSON  
SCIENCES

DUNOD



# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	viii
<b>Les grands noms de la thermodynamique</b> . . . . .	xi
<b>Constantes physiques, notations et symboles</b> . . . . .	xiv
<b>Description de l'ouvrage</b> . . . . .	xvii
<b>La thermodynamique en vingt questions</b> . . . . .	xx
<b>1. De la dynamique à la thermodynamique</b>	
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
<b>2. Théorie cinétique des gaz parfaits de Maxwell</b>	
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
<b>3. Facteur de Boltzmann</b>	
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



<b>15. Interprétation statistique de l'entropie</b>	
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
<b>16. Gaz parfaits de fermions et de bosons</b>	
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
<b>17. Très basses températures. Troisième principe de la thermodynamique</b>	
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
<b>18. Rayonnement thermique</b>	
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
<b>19. Couplage de phénomènes irréversibles. Effets thermoélectriques</b>	
I. — Forces thermodynamiques . . . . .	376
II. — Théorie de Onsager . . . . .	378
III. — Effets thermoélectriques . . . . .	380
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	389
<b>20. Thermométrie et calorimétrie</b>	
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

3<sup>e</sup> édition

# 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>

