

Cours

Lydéric Bocquet  
Jean-Pierre Faroux  
Jacques Renault

# Toute la Thermodynamique, la Mécanique des fluides et les ondes mécaniques

Cours et exercices corrigés

MPSI-PCSI, MP-PC-PSI

*L'intégrale*

DUNOD

# Table des matières

## Chapitre 1

### Avant-propos

V

### Notes historiques

IX

## Première partie – Thermodynamique

### Le langage de la thermodynamique

1

1. Système	2
2. Système isolé. Système ouvert; système fermé	3
3. Système homogène, système inhomogène	4
4. États d'un système	4
5. Paramètres (ou variables) d'état	5
6. Paramètres externes, paramètres internes	6
7. État d'équilibre	7
8. Équilibre thermique	9
9. Température	10
10. Paramètres extensifs; paramètres intensifs	10
11. Additivité	11
12. Équilibre local	11
13. Transformation	11
14. Transformations particulières	12
15. Transformation infinitésimale	12
16. Transformation réversible	12
17. Transformation irréversible	13
18. Transformation quasi statique	14
19. Travail	16
20. Transfert thermique; chaleur	16

## Chapitre 2

21. Transformation adiabatique	16
22. Thermostat	17
23. Entropie	17
24. Expression d'un bilan	17

## Un système modèle : le gaz parfait

1. Hypothèses de la théorie cinétique	19
2. Pression cinétique	22
3. Température cinétique. Équation d'état	26
4. Énergie d'un gaz parfait monoatomique ; énergie interne	27
5. Généralisation à tous les gaz parfaits	28
6. Notions sur les capacités thermiques molaires des gaz	29
7. Lois de Gay-Lussac et de Charles	33
8. Mélange des gaz parfaits	34
9. Masse volumique et densité des gaz	37
Exercices	38

## Chapitre 3

## Éléments de statique des fluides

1. L'état fluide	40
2. La notion de pression	42
3. Équation d'état et propriétés thermoélastiques	45
4. Équilibre mécanique d'un fluide	47
5. Cas d'un fluide incompressible et homogène dans le champ de pesanteur	49
6. Équilibre d'un fluide compressible dans le champ de pesanteur	52
7. Poussée d'Archimède	54
Exercices	55

## Chapitre 4

## Gaz réels

1. L'équation de Van der Waals	58
2. Gaz réels et équation de Van der Waals	62
3. Température absolue. Échelle internationale	64
4. Mesure pratique des températures	67
Exercices	71

## Chapitre 5

## Diffusion

1. Systèmes hors d'équilibre	73
2. Diffusion moléculaire. Étude macroscopique	74

## Chapitre 6

3. Théorie moléculaire de la diffusion gazeuse	81
4. Diffusion et mouvement brownien	85
Exercices	85

## Bilans d'énergie. Premier principe de la thermodynamique

1. Diverses formes de transfert d'énergie	89
2. Premier principe de la thermodynamique	93
3. Capacités thermiques. Enthalpie	96
4. Résultats concernant les capacités thermiques massiques	99
5. Calorimétrie	102
Exercices	106

## Chapitre 7

<b>Étude énergétique des gaz</b>	108
1. Détentes d'un gaz	108
2. Compression quasi statique d'un fluide	113
3. Transformation adiabatique d'un fluide	117
4. Compression adiabatique quasi statique d'un gaz parfait	117
5. Mesure du coefficient $\gamma$	121
6. Cycle de Carnot d'un gaz parfait	125
Exercices	127

## Chapitre 8

<b>Transferts thermiques</b>	128
1. Introduction	128
2. Conduction thermique	129
3. Convection	137
4. Rayonnement	140
5. Rayonnement d'équilibre thermique	143
6. Corps noir	146
7. Bilans thermiques. Résistance thermique	150
8. Conclusions	153
Exercices	154

## Chapitre 9

<b>Second principe de la thermodynamique</b>	157
1. Phénomènes irréversibles	157
2. Le second principe de la thermodynamique. Entropie	159
3. Identité thermodynamique	164
4. Interprétation statistique de l'entropie	165

5. Le troisième principe de la thermodynamique	171
Exercices	172

## Chapitre 10

<b>Exemples de bilans entropiques</b>	175
---------------------------------------	-----

1. Bilans entropiques et irréversibilité	175
2. Transfert thermique et variations d'entropie	177
3. Variations d'entropie d'un gaz parfait	180
4. Entropie de mélange	184
Exercices	

## Chapitre 11

<b>Machines thermiques</b>	188
----------------------------	-----

1. Les différents types de machines thermiques	188
2. Les moteurs thermiques	190
3. Machines frigorifiques	196
Exercices	199

## Chapitre 12

<b>Changements de phase des corps purs</b>	201
--	-----

1. Nomenclature	201
2. Règle des phases	202
3. Corps pur diphasé en équilibre	203
4. Équilibre liquide-vapeur	207
5. Équilibre liquide-solide. Courbe de fusion	214
6. Retards aux changements de phase	215
7. Polymorphisme	216
8. Chaleurs massiques le long de la courbe de saturation	217
Exercices	219

## Chapitre 13

<b>Potentiels thermodynamiques d'un système</b>	222
---	-----

1. Évolution monotherme	222
2. Évolution monotherme et monobare	224
3. Évolutions isothermes isobares et isothermes isochores	226
4. Corps pur en équilibre sous deux phases	228
Exercices	

## Chapitre 14

<b>Fonctions thermodynamiques</b>	233
-----------------------------------	-----

1. Fonctions thermodynamiques	233
-------------------------------	-----

2.	Coefficients calorimétriques	236
3.	Application aux fluides	240
4.	Obtention expérimentale d'une fonction thermodynamique	244
5.	Potentiel chimique	245
6.	Systèmes thermodynamiques	250
	Exercices	256

## Chapitre 15

	<b>Approche thermodynamique du paramagnétisme et du ferromagnétisme</b>	258
1.	Introduction du facteur de Boltzmann	258
2.	Facteur de Boltzmann	261
3.	Aimantation	265
4.	Paramagnétisme	268
5.	Ferromagnétisme	273
	Exercices	278

## Deuxième partie – Mécanique des fluides

## Chapitre 16

	<b>Écoulement d'un fluide. Viscosité</b>	280
1.	Le modèle du fluide. Rappel	280
2.	La notion de pression	282
3.	Écoulements laminaires. Écoulements turbulents	283
4.	Forces de viscosité	285
5.	Nombre de Reynolds	288
6.	Modèle du fluide parfait. Notion de couche limite	292
	Exercices	294

## Chapitre 17

	<b>Descriptions du fluide en mouvement</b>	296
1.	Descriptions du fluide en mouvement	296
2.	Régimes laminaires : trajectoires, lignes de courant, filet de fluide	300
3.	Les deux modes de bilan	301
4.	La conservation de la masse et l'équation de continuité	303
5.	Le cas des écoulements irrotationnels; le potentiel des vitesses	306
6.	Grandeurs cinétiques et énergétiques d'un élément de fluide	310
	Exercices	312

## Chapitre 18

### Bilans en mécanique des fluides. Exemples

1. Volume et surface de contrôle 315
  2. Bilan dans des écoulements unidimensionnels 316
  3. Bilan de masse 318
  4. Bilan de quantité de mouvement 319
  5. Bilans énergétiques 322
  6. Bilan de moment cinétique 326
  7. Étude d'une situation d'intérêt : le ressaut hydraulique 328
  8. Théorème de transport de Reynolds 330
- Exercices 330

## Chapitre 19

### Dynamique du fluide parfait ; équation d'Euler ; relation de Bernoulli

1. Équation d'Euler 338
  2. Décompte des équations ; les conditions aux limites 340
  3. Cas de l'écoulement stationnaire pour un fluide incompressible :  
la relation de Bernoulli 341
  4. Aspect qualitatif de la relation de Bernoulli 344
  5. Pression en des points remarquables 345
  6. Relations de Bernoulli généralisées 348
  7. Un exemple de relation de Bernoulli généralisée 349
- Exercices 352

## Chapitre 20

### Notions sur la dynamique des écoulements visqueux et incompressibles

1. Forces de viscosité sur un élément de fluide 358
  2. Équation de Navier-Stokes 360
  3. Quelques applications 362
- Exercices 368

## Troisième partie – Ondes mécaniques

## Chapitre 21

### Oscillateurs harmoniques couplés

1. L'oscillateur harmonique à une dimension 371
2. Système de deux oscillateurs couplés 374
3. Cas de deux oscillateurs identiques 378

4. Un exemple de couplage en électricité	383
5. Système de $N$ oscillateurs harmoniques couplés	386
Exercices	387

**Chapitre 22**

<b>Chaîne d'oscillateurs. Ondes longitudinales dans les solides</b>	393
1. Chaîne infinie d'oscillateurs	393
2. Milieux continus. Équation d'onde de d'Alembert	399
3. Ondes longitudinales dans un solide isotrope	401
4. Complément sur l'élasticité des solides isotropes	404
5. Obtention directe de l'équation de propagation des ondes longitudinales dans une tige	405
6. Aspect énergétique	406
Exercices	407

**Chapitre 23**

<b>Vibrations transversales d'une corde</b>	412
1. Corde tendue. Modélisation	413
2. Équation générale du mouvement de la corde	413
3. Approximation des petites amplitudes	414
4. Vibrations transversales. Équation d'ondes de d'Alembert	415
5. Ondes transverses. Solution générale	416
6. Conditions initiales sur une corde infinie	416
7. Réflexion d'un ébranlement transversal à une extrémité fixe	418
8. Corde tendue fixée à ses deux extrémités	419
9. Oscillations forcées. Résonances	422
10. Validité de l'approximation linéaire	424
11. Aspect énergétique	426
12. Réflexion et transmission à une discontinuité	427
Exercices	429

**Chapitre 24**

<b>Ondes acoustiques dans les fluides</b>	435
1. Introduction	435
2. Propagation des ondes acoustiques dans un fluide	436
3. Aspect énergétique	439
4. Célérité des ondes acoustiques dans les gaz	442
5. Célérité des ondes acoustiques dans les liquides	446
6. Effet Doppler	447
Exercices	449

## Chapitre 25

## Ondes acoustiques planes et sphériques.

### Tuyaux sonores

- |  |     |
|--|-----|
|  | 453 |
| 1. Ondes acoustiques planes                                  | 453 |
| 2. Ondes sphériques  | 458 |
| 3. Propagation dans une conduite cylindrique. Tuyaux sonores | 460 |
| 4. Modes propres. Résonance                                  | 464 |
| 5. Célérité d'une onde de choc dans une conduite             | 469 |
| Exercices  | 471 |

### Appendice 1

474

### Appendice 2

481

### Formulaire

494

### Réponses aux exercices

497

### Index

513

Lydéric Bocquet  
Jean-Pierre Faroux  
Jacques Renault

# TOUTE LA THERMODYNAMIQUE, LA MÉCANIQUE DES FLUIDES ET LES ONDES MÉCANIQUES

## Cours et exercices corrigés

L'originalité de cet ouvrage tient dans le fait qu'il couvre, en un seul volume, tout le cours de thermodynamique des deux années de prépa, ainsi que le programme de mécanique des fluides et celui portant sur les ondes mécaniques. Ainsi, durant tout son cursus, le lecteur pourra s'y référer pour apprendre, s'entraîner et réviser, et ce jusqu'au jour des concours qui portent, comme chacun sait, sur les enseignements prodigués en Sup ET en Spé.

Tout a été conçu ici dans un but d'efficacité maximale :

- le cours est énoncé clairement et de manière exhaustive, avec toute la rigueur requise pour en faire un complément idéal de celui du professeur ; en outre, afin de faciliter l'accès pédagogique aux nouvelles notions abordées, chaque chapitre comporte une introduction qualitative signalant les prérequis et dégageant les objectifs ;
- de nombreux exercices types d'application, tous entièrement résolus, jalonnent l'exposé afin d'illustrer méthodologiquement les concepts présentés dans le déroulement du cours ;
- une rubrique « Savoir-faire » signale les résultats essentiels que l'élève doit pouvoir retrouver sans hésiter ;
- chaque chapitre se termine par des exercices classés par ordre de difficulté, dont toutes les réponses sont données à la fin du livre ;
- enfin, de précieux appendices et un index très riche complètent le tout.

Utile en toute circonstance – y compris pour les TIPE – et offrant une vision globale du programme, nécessaire pour bien apprendre et pour mieux comprendre, cet ouvrage deviendra vite le compagnon fidèle des élèves des filières MPSI-PCSI, MP-PC-PSI. Il intéressera également les étudiants de premier cycle universitaire et les candidats aux concours de recrutement des professeurs.

COURS

LYDÉRIC BOCQUET

est professeur  
à l'université  
Claude Bernard (Lyon 1).

JEAN-PIERRE FAROUX

est professeur  
à l'université  
Pierre-et-Marie Curie  
(Paris 6).

JACQUES RENAULT

est professeur au lycée  
du Parc à Lyon.



9 782100 055685

ISBN 2 10 005568 2

<http://www.dunod.com>

MATHÉMATIQUES

PHYSIQUE

CHIMIE

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INFORMATIQUE



DUNOD