



中法工程师学院预科教学系列丛书

Preparatory Cycle Textbooks Series of Sino-French Institute of Engineering

丛书主编：王彪 Jean-Marie BOURGEOIS-DEMERSAY

〔法〕Océane GEWIRTZ 著

Optique ondulatoire, Électromagnétisme, Relativité restreinte, Diffusion

波动光学、电磁学、相对论、扩散(法文版)



科学出版社

中法工程师学院预科教学系列丛书

Preparatory Cycle Textbooks Series of Sino-French Institute of Engineering

丛书主编: 王彪 Jean-Marie BOURGEOIS-DEMERSAY

**Optique ondulatoire, Électromagnétisme,
Relativité restreinte, Diffusion**

波动光学、电磁学、相对论、扩散
(法文版)

〔法〕 Océane GEWIRTZ 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了波动光学、电磁学、狭义相对论以及扩散机制,内容涵盖了物理基础、实验及应用的各个环节,并且附有与课程内容紧密结合的练习题,能有效地加深读者对物理知识和原理的理解。编写模式新颖,借鉴了现有的法国工程师教育的相关教材,吸收了法国工程师精英培养模式教学体系的精髓,并结合中国学生的实际情况进行编写。

本书可作为中法合作办学单位的预科和专业教材,也可作为其他相关专业的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

波动光学、电磁学、相对论、扩散: 法文 / (法) 格维尔茨(Gewirtz, O.) 著. —北京: 科学出版社, 2020.1

(中法工程师学院预科教学系列丛书/王彪等主编)

ISBN 978-7-03-062291-4

I. ①波… II. ①格… III. ①物理光学-高等学校-教材-法文②电磁学-高等学校-教材-法文③相对论-高等学校-教材-法文④扩散-高等学校-教材-法文 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 203396 号

责任编辑: 罗 吉 / 责任校对: 杨聪慧
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2020 年 1 月第一次印刷 印张: 33

字数: 782 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

高素质的工程技术人才是保证我国从工业大国向工业强国成功转变的关键因素。高质量地培养基础知识扎实、创新能力强、熟悉我国国情并且熟悉国际合作和竞争规则的高端工程技术人才是我国高等工科教育的核心任务。国家长期发展规划要求突出培养创新型科技人才和大力培养经济社会发展重点领域急需的紧缺专门人才。

核电是重要的清洁能源，在中国已经进入快速发展期，掌握和创造核电核心技术是我国核电获得长期健康发展的基础。中山大学地处我国的核电大省——广东，针对我国高素质的核电工程技术人才强烈需求，在教育部和法国相关政府部门的支持和推动下，2009年与法国民用核能工程师教学联盟共建了中山大学中法核工程与技术学院（Institut Franco-Chinois de l'Energie Nucléaire），培养能参与国际合作和竞争的核电高级工程技术人才和管理人才。教学体系完整引进法国核能工程师培养课程体系和培养经验，其目标不仅是把学生培养成优秀的工程师，而且要把学生培养成各行业的领袖。其教学特点表现为注重扎实的数理基础学习和全面的专业知识学习；注重实践应用和企业实习以及注重人文、法律管理、交流等综合素质的培养。

法国工程师精英培养模式起源于 18 世纪，一直在国际上享有盛誉。中山大学中法核工程与技术学院借鉴法国的培养模式，结合中国高等教育的教学特点将 6 年的本硕连读学制划分为预科教学和工程师教学两个阶段。预科教学阶段专注于数学、物理、化学、语言和人文课程的教学，工程师阶段专注于专业课、项目管理课的教学和以学生为主的实践和实习活动。法国预科阶段的数学、物理等基础课的课程体系和我国相应的工科基础课的教学体系有较大的不同。前者覆盖面更广，比如数学教材不仅包括高等数学、线性代数等基本知识，还包括拓扑学基础、代数结构基础等。同时更侧重于知识的逻辑性和解题的规范化，以利于学生深入理解后能充分保有基础创新潜力。

为更广泛地借鉴法国预科教育的优点和广泛传播这种教育模式，把探索实践过程中取得的成功经验和优质课程资源与国内外高校分享，促进我国高等教育基础学科教学的

改革，我们在教育部、广东省教育厅和学校的支持下，组织出版了这套预科基础课教材，包含数学、物理和化学三门课程多个阶段的学习内容。本教材主要适用于法国工程师教育预科阶段数学、物理、化学课程的学习。它的编排设计富有特色，采用了逐步深入的知识体系构建方式；既可作为中法合作办学单位的专业教材，也非常适合其他相关专业作为参考教材，方便自学。

我们衷心希望，本套教材能为我国高素质工程师的教育和培养做出贡献！



中方院长 法方院长

中山大学中法核工程与技术学院

2016 年 1 月

前言

本系列丛书出版的初衷是为中山大学中法核工程与技术学院的学生编写一套合适的教材。中法核工程与技术学院位于中山大学珠海校区。该学院用六年时间培养通晓中英语三种语言的核能工程师。该培养体系的第一阶段持续三年，对应着法国大学的预科阶段，主要用法语教学，为学生打下扎实的数学、物理和化学知识基础；第二阶段为工程师阶段，学生将学习涉核的专业知识，并在以下关键领域进行深入研究：反应堆安全、设计与开发、核材料以及燃料循环。

本丛书物理化学部分分为以下几册，每册书分别介绍一个学期的物理课程，化学课程内容则独立成册。

第1册：质点力学（大一第二学期）；

第2册：电学、几何光学、两体系统的力学和刚体力学（大二第一学期）；

第3册：热力学（大二第二学期）；

第4册：基础化学（大一第二学期，包括原子和溶液化学）和化学物理（大二第二学期，包括晶体学、化学动力学和热力学）；

第5册：波动光学、电磁学、相对论、扩散。

除了因中国学生的语言障碍对某些物理学科的课程进度做了调整以外，在中法核工程与技术学院讲授的科学课程内容与法国预科阶段的课程内容一致。

每册书都采用相同的教学安排：首先讲授课程，然后进行难度逐步加深的习题训练（概念性问题、知识应用练习、训练练习、深度训练练习或难题）。

和其他教材不同的是，为了让学生在学习过程中更加积极主动，本书设计了一系列问题（用符号  表示），答案则在书中用手写体标记以强调应由学生（在课堂上）填写完成。学生可以通过课程知识应用练习（用符号  标记）自行检查是否已掌握新学的方程和概念，并有机会接触真实器件或解决来源于日常生活中的一些问题。书中还有很多插图，有助学生对词汇和概念的理解，所谓“一图胜过千言”。

每一章书的后面是附录，收集了法语词汇、物理专业术语，以及物理学史、物理学发展史等相关内容。读者还可以在附录中找到和课程有关的视频链接目录。

该丛书是为预科阶段循序渐进的持续的学习过程而设计的。譬如，曾在力学里介绍过的概念，在后续的几何光学或热力学部分会对其进一步深入讲解，习题亦如是。为了证明一些原理（如最小作用原理）或结论（如对称性）的普遍适用性，相关习题会在物理的不同学科领域以不同形式出现。

最后值得指出的是，该丛书物理化学的内容安排是和数学的内容安排紧密联系的。学生可以利用已学到的数学工具解决物理问题，如微分方程、偏微分方程或极限展开。当这些内容在数学课程中没有展开阐述的时候，书中也会在附录部分对其做详细介绍，例如圆锥曲线。

得益于中法核工程与技术学院学生和老师们意见与建议，该丛书一直在不断地改进中。我的同事赖侃、滑伟、何广源、胡杨凡、韩东梅和康明亮博士仔细核读了该书的原稿，并作了精准的翻译。刘洋和熊涛两位博士也对力学部分提出了中肯的意见。最后，本书的成功出版离不开中法核工程与技术学院两位院长，王彪教授（长江特聘教授、国家杰出青年基金获得者）和 Jean-Marie BOURGEOIS- DEMERSAY 先生（法国矿业团首席工程师），一直以来的鼓励与大力支持。请允许我对以上同事及领导表示最诚挚的谢意！

Océane GEWIRTZ

法国里昂（Lyon）高等师范学校的毕业生，
通过法国会考取得教师职衔的预科阶段物理老师

Avant-propos

Cet ouvrage est à l'origine destiné aux élèves-ingénieurs de l'Institut franco-chinois de l'énergie nucléaire (IFCEN), situé sur le campus de l'université Sun Yat-sen à Zhuhai, dans la province du Guangdong en Chine du sud. Cet institut forme en six années des ingénieurs en génie atomique trilingues en chinois, français et anglais. La première partie du curriculum s'étend sur trois ans et correspond aux classes préparatoires aux grandes écoles, avec un enseignement en français de bases solides dans tous les domaines des mathématiques, de la physique et de la chimie. La deuxième partie du curriculum constitue le cycle d'ingénieur, qui permet aux élèves de se spécialiser dans le nucléaire et d'approfondir les domaines-clés que sont la sûreté, la conception et l'exploitation des centrales, les matériaux pour le nucléaire et le cycle du combustible.

La collection se décline en plusieurs volumes dont chacun représente un semestre de cours en sciences physiques, l'enseignement de la chimie étant regroupé dans un volume particulier :

- Volume 1 : mécanique du point (semestre 2) ;
- Volume 2 : électrocinétique, optique géométrique, mécanique des systèmes de deux points matériels et mécanique du solide (semestre 3) ;
- Volume 3 : thermodynamique (semestre 4) ;
- Volume 4 : chimie générale (atomistique et chimie des solutions au semestre 2) et chimie physique (cristallographie, cinétique chimique et thermochimie au semestre 4) ;
- Volume 5 : optique ondulatoire, électromagnétisme, relativité restreinte et phénomènes de diffusion.

Les contenus scientifiques qui sont abordés à l'IFCEN correspondent au programme des classes préparatoires en France, si ce n'est que la progression diffère quelque peu en raison des difficultés langagières que présentent, pour un public chinois, certains domaines de la physique.

Chaque volume suit une progression identique : tout d'abord un exposé du cours, suivi d'exercices classés par ordre de difficulté croissante (questions de cours, exercices d'application directe, exercices d'entraînement, exercices d'approfondissement ou problèmes).

Dans le souci de rendre plus actif l'élève pendant son apprentissage, le cours suit une présentation qui diffère d'autres ouvrages : de nombreuses questions sont posées, précédées d'un ✎ ; les réponses sont indiquées en police manuscrite pour bien souligner qu'il appar-

tient à l'élève de remplir cette partie. Les exercices d'application directe du cours, précédés d'un $\triangleleft$, permettent à l'élève de vérifier qu'il maîtrise les formules et les concepts nouvellement acquis. Ils donnent aussi l'occasion d'étudier des dispositifs réels ou de résoudre des problèmes tirés de la vie quotidienne. De nombreuses illustrations facilitent l'acquisition du vocabulaire et des concepts, suivant l'adage bien connu qu'une image vaut mille mots.

À la fin de chaque chapitre, l'élève trouvera des annexes qui concernent le français et les difficultés lexicales, ainsi que l'histoire et le développement de telle ou telle branche de la physique. Le lecteur pourra aussi trouver une webographie comprenant des animations ou des films en lien avec le cours.

La collection a été conçue pour un apprentissage continu et progressif sur l'ensemble du cycle préparatoire. Par exemple, des notions sont d'abord introduites dans le cours de mécanique, pour être reprises et approfondies plus tard en optique géométrique ou en thermodynamique. Il en va de même pour les exercices, qui peuvent apparaître de façons différentes dans des domaines distincts de la physique, dans le but de démontrer l'universalité de certains principes (comme le principe de moindre action) ou de certains raisonnements (recherche des symétries).

Il faut enfin noter que la progression du cours de physique-chimie se fait en lien étroit avec celle du cours de mathématiques, également disponible dans la même collection. Les élèves pourront donc appliquer aux sciences physiques les outils mathématiques qu'ils auront assimilés préalablement, comme les équations différentielles, les équations aux dérivées partielles ou les développements limités. Lorsqu'elles ne sont pas développées en cours de mathématiques, certaines notions font l'objet d'annexes détaillées, à l'exemple des coniques.

Les volumes de cette collection sont en constante évolution, grâce aux remarques et aux suggestions des élèves et des professeurs de l'institut. J'ai plaisir à mentionner mes collègues les docteurs Lai Kan, Hua Wei, He Guangyuan, Hu Yangfan, Han Dongmei et Kang Mingliang, pour la qualité de leur traduction et la relecture minutieuse des manuscrits. Le volume de mécanique a aussi profité des commentaires avisés des docteurs Liu Yang et Xiong Tao. Enfin, la collection n'aurait pas pu voir le jour sans les encouragements et le soutien constant des deux directeurs de l'institut, le professeur Wang Biao, doyen de la faculté de physique et d'ingénierie, et M. Jean-Marie Bourgeois-Demersay, ingénieur général des mines. Qu'ils en soient tous ici remerciés !

Océane Gewirtz

Ancienne élève de l'École normale supérieure de Lyon, professeur en classes préparatoires,
agregée de sciences physiques

Table des matières

序	i
前言	iii
Avant-propos	v
Première partie Optique ondulatoire	1
Chapitre 1 Introduction aux ondes	3
1.1 Mise en évidence sur deux exemples	3
1.1.1 La corde vibrante	3
1.1.2 L'équation des télégraphistes	7
1.1.3 Solution : les ondes progressives	9
Chapitre 2 Introduction à l'optique ondulatoire	13
2.1 Sources de lumière	14
2.1.1 Source de lumière blanche	14
2.1.2 Lampe spectrale	16
2.1.3 Laser	18
2.2 Récepteurs de lumière	19
2.2.1 L'œil	20
2.2.2 La photodiode	21
2.2.3 Le capteur CCD	21
2.3 Le modèle scalaire de la lumière	22
2.3.1 La vibration lumineuse	24
2.3.2 Vibration monochromatique	25
2.3.3 Profil des raies spectrales	25
2.3.4 Éclairement et intensité	29
2.3.5 Différence de phase entre deux points	32
2.3.6 Chemin optique	33
2.3.7 Surface d'onde	34
Chapitre 3 Interférences	43
3.1 Superposition d'ondes lumineuses	43
3.1.1 Éclairement	43
3.1.2 Contraste	46
3.1.3 Longueur de cohérence temporelle	47

3.1.4	Figure d'interférences	49
3.2	Dispositifs à division du front d'onde	53
3.2.1	Miroirs de Fresnel	54
3.2.2	Trous d'Young	55
3.2.3	Interféromètre de Michelson	72
3.3	Dispositifs à division d'amplitude	82
3.3.1	Montages avec une source large : théorème de localisation	82
3.3.2	Montages avec une source polychromatique	86
Chapitre 4	Diffraction	97
4.1	Principe de Huygens-Fresnel	97
4.1.1	Mise en évidence	97
4.1.2	Énoncé	99
4.2	Diffraction de Fraunhofer d'une onde plane	101
4.2.1	Montage expérimental	101
4.2.2	Amplitude de l'onde diffractée	102
4.2.3	Diffraction par une fente rectangulaire	104
4.2.4	Diffraction par un trou circulaire	111
4.2.5	Propriétés de la figure de diffraction	112
4.2.6	Limite de résolution spatiale d'un instrument d'optique	117
4.2.7	Apodisation	120
4.3	Étude des fentes d'Young	121
4.3.1	Éclairement	121
4.3.2	Fente source et critère de cohérence	123
4.4	Réseaux	124
4.4.1	Différence de marche	124
4.4.2	Éclairement	125
4.4.3	Utilisation en lumière polychromatique	128
4.4.4	Applications	131
4.4.5	Filtrage spatial	133
Chapitre 5	Polarisation	139
5.1	Propagation de la lumière dans le vide	139
5.2	États de polarisation des OPPH	141
5.2.1	Polarisation rectiligne	142
5.2.2	Polarisation circulaire	142
5.2.3	Polarisation elliptique	144
5.2.4	Décomposition	145
5.3	Production d'une lumière polarisée	146
5.3.1	Polarisation par dichroïsme	146
5.3.2	Polarisation par réflexion	147
5.3.3	Polarisation par diffusion	148
5.3.4	Polarisation par biréfringence	149

Deuxième partie Électromagnétisme 153

Chapitre 6 Sources du champ électromagnétique 155

6.1	Charge et distribution de charges	156
6.1.1	Définition	156
6.1.2	Propriétés	157
6.1.3	Cas d'une distribution de charge	157
6.1.4	Modélisations	160
6.1.5	Vocabulaire	162
6.2	Charges en mouvement	163
6.2.1	Intensité du courant électrique	163
6.2.2	Densité de courant	163
6.3	Conservation de la charge	166
6.3.1	Conséquences en régime permanent	167
6.4	Conduction électrique dans un conducteur ohmique	169
6.4.1	Loi d'Ohm locale	169
6.4.2	Modèle de Drüde	169
6.4.3	Forme intégrale de la loi d'Ohm	171
6.4.4	Bilan énergétique - effet Joule	172
6.5	Effet Hall	173

Chapitre 7 Champ électrostatique 175

7.1	Loi de Coulomb	175
7.2	Cas d'une distribution continue de charges	179
7.3	Symétries et invariances	180
7.4	Propriétés structurelles du champ électrostatique	184
7.5	Flux de $\vec{E}$ et théorème de Gauss	188
7.6	Formulation locale du théorème de Gauss	189
7.7	Conséquences du théorème de Gauss	192
7.8	Exemples de calculs	195
7.8.1	Plan infini uniformément chargé en surface	195
7.8.2	Condensateur plan	196
7.8.3	Noyau atomique : modèle d'une boule uniformément chargée en volume	199

Chapitre 8 Potentiel électrostatique 201

8.1	Définition	201
8.1.1	Cas d'une charge ponctuelle	202
8.1.2	Cas d'une distribution continue de charges	203
8.2	Équation de Poisson	203
8.3	Énergie potentielle	205
8.3.1	Travail des forces électrostatiques	205
8.3.2	Énergie potentielle d'une charge dans un champ extérieur	205

8.3.3	Énergie potentielle de constitution d'un système de charges	206
8.3.4	Application au cas du noyau atomique	207
8.4	Conséquences pour $\vec{E}$	208
8.4.1	Circulation de $\vec{E}$	208
8.4.2	Formule de Stokes	209
8.4.3	Rotationnel de $\vec{E}$	209
8.5	Cartes de champ	210
8.6	Méthode d'étude des champs et des potentiels	211
Chapitre 9	Dipôle électrostatique	213
9.1	Approximation dipolaire	213
9.2	Champ créé par un dipôle	214
9.2.1	Symétries	214
9.2.2	Potentiel à grande distance	215
9.2.3	Champ électrostatique à grande distance	215
9.2.4	Carte de champ	216
9.3	Actions d'un champ extérieur sur un dipôle	217
9.3.1	Cas d'un champ extérieur uniforme	217
9.3.2	Cas d'un champ extérieur non uniforme	219
9.4	Interactions en chimie	221
9.4.1	Dipôles permanents	221
9.4.2	Dipôle induit	222
Chapitre 10	Analogies avec le champ gravitationnel	225
Chapitre 11	Magnétostatique	227
11.1	Distributions de courant	228
11.1.1	Distribution volumique	228
11.1.2	Distribution surfacique	228
11.1.3	Distribution linéique	229
11.2	Loi de Biot et Savart	229
11.3	Symétries et invariances	231
11.4	Propriétés structurelles du champ magnétostatique	236
11.4.1	Équations de Maxwell du champ magnétostatique	236
11.4.2	Flux du champ magnétostatique	237
11.4.3	Circulation du champ magnétostatique	239
11.5	Exemples de calcul de champs magnétostatiques	240
11.5.1	Câble rectiligne infini	240
11.5.2	Solénoïde long	242
11.6	Cartes de champ	244
Chapitre 12	Dipôle magnétostatique	247
12.1	Modèle du dipôle magnétostatique	247

12.2	Champ du dipôle magnétostatique	248
12.2.1	Comparaison des dipôles électrostatique et magnétostatique	248
12.2.2	Action d'un champ magnétique extérieur sur un dipôle magnétique	250
12.3	Magnétisme dans la matière	251
12.3.1	Moment magnétique atomique	251
12.3.2	Magnéton de Bohr	253
12.3.3	Force d'adhérence d'un aimant	254
12.4	L'expérience de Stern et Gerlach	254
Chapitre 13	Équations de Maxwell	261
13.1	Postulats de l'électromagnétisme	261
13.1.1	Transformation galiléenne des champs	261
13.2	Les équations de Maxwell	262
13.2.1	Commentaires	263
13.2.2	Compatibilité avec la conservation de la charge	264
13.2.3	Potentiel vecteur et potentiel scalaire	265
13.2.4	Forme intégrale des équations de Maxwell	268
13.3	Aspects énergétiques	272
13.3.1	Puissance cédée par le champ électromagnétique à la matière	272
13.3.2	Équation locale de Poynting	272
13.3.3	Bilan intégral d'énergie	274
13.3.4	Équation de transport de Reynolds	274
13.3.5	Exemples	276
13.3.6	Approximation des régimes quasi-stationnaires	279
Chapitre 14	Conducteurs en régime variable	286
14.1	Influence de la fréquence sur le comportement d'un conducteur	286
14.1.1	Loi d'Ohm en régime variable	286
14.1.2	Aspects énergétiques	288
14.1.3	Charges dans un conducteur ohmique	288
14.1.4	Effet de peau	291
14.1.5	Conducteur parfait	297
Chapitre 15	Induction électromagnétique	299
15.1	Induction de Neumann	300
15.1.1	Champ électromoteur	300
15.1.2	Loi de Faraday	301
15.1.3	Auto-induction	303
15.1.4	Inductance mutuelle	305
15.1.5	Énergie magnétique	306
15.1.6	Cas d'un circuit non filiforme	308
15.1.7	Transformateur de tension	310
15.2	Induction de Lorentz	314

15.2.1	Changement de référentiel pour les champs électromagnétiques	314
15.2.2	Champ électromoteur de Lorentz	315
15.2.3	Force de Laplace	316
15.2.4	Étude des rails de Laplace générateurs	317
15.2.5	Étude des rails de Laplace moteurs	320
15.2.6	Haut-parleur	322
Chapitre 16	Analyse vectorielle	326
16.1	Introduction	326
16.2	Opérateurs	327
16.2.1	Gradient	327
16.2.2	Divergence	328
16.2.3	Laplacien	329
16.2.4	Rotationnel	329
16.2.5	Exemples et interprétation	330
16.3	Relations locales	330
16.3.1	Variation élémentaire	330
16.3.2	Relations entre opérateurs	331
16.3.3	Normale	332
16.3.4	Lignes de champ	332
16.4	Relations intégrales	333
16.4.1	Orientation	333
16.4.2	Circulation et flux	334
16.4.3	Théorème de Stokes	334
16.4.4	Théorème de Green-Ostrogradski	334
16.5	Champ dérivant d'un autre champ	334
16.5.1	Champ scalaire	334
16.5.2	Champ vectoriel	336
Troisième partie	Relativité restreinte	339
Chapitre 17	Les bases de la relativité restreinte	341
17.1	Une théorie nécessaire	343
17.1.1	La transformation classique des champs	344
17.1.2	L'invariance des équations de Maxwell	345
17.2	La transformation de Lorentz-Poincaré	346
17.3	Invariance de la vitesse de la lumière	348
17.4	Formalisme quadridimensionnel	349
Chapitre 18	Cinématique relativiste	353
18.1	Postulats	353
18.2	Conséquences de la transformation de Lorentz : distances et simultanéité	354
18.2.1	La notion de temps propre	354

18.2.2	Étude de la durée de vie des muons	358
18.2.3	La contraction des longueurs	359
18.2.4	La notion de simultanéité de deux événements	360
18.3	Causalité	362
18.4	Loi de composition des vitesses	363
Chapitre 19	Dynamique relativiste	366
19.1	Quantité de mouvement et énergie	366
19.2	Théorèmes généraux de la dynamique relativiste	368
19.2.1	Théorème du moment cinétique	368
19.2.2	Théorème de l'énergie cinétique	369
19.3	Lois de conservation	369
19.3.1	Lois de conservation de l'énergie et la quantité de mouvement	369
19.3.2	Lien entre quantité de mouvement et énergie	369
19.3.3	Particules de masse nulle	370
19.4	Collisions relativistes	370
19.4.1	Fusion de l'hydrogène	371
19.4.2	Effet Compton	372
Quatrième partie	Diffusion	375
Chapitre 20	Systèmes ouverts en régime stationnaire	377
20.1	Lois de la thermodynamique	377
20.1.1	Systèmes en écoulement	380
Chapitre 21	Diffusion de particules	386
21.1	Bilans de particules	387
21.1.1	Flux de particules à travers une surface	387
21.1.2	Bilans de particules	388
21.1.3	Loi de Fick	392
21.2	Équation de diffusion	393
21.2.1	Équation en trois dimensions	393
21.2.2	Conditions aux limites et condition initiale	393
21.2.3	Cas du régime stationnaire	396
21.3	Approche microscopique	398
21.3.1	Loi de Fick	400
Chapitre 22	Diffusion thermique	402
22.1	Bilans énergétiques	404
22.1.1	Flux thermique	404
22.1.2	Cas du flux conducto-convectif	405
22.1.3	Bilan énergétique : cas unidimensionnel	405
22.1.4	Cas général	406

22.2	Équation de diffusion	408
22.2.1	Loi de Fourier	409
22.2.2	Diffusion thermique en trois dimensions	409
22.2.3	Bilan entropique	411
22.2.4	Cas unidimensionnel	412
Cinquième partie Exercices		415
Chapitre 23	Analyse dimensionnelle	417
Chapitre 24	Optique géométrique	419
Chapitre 25	Introduction aux ondes	424
Chapitre 26	Interférences	428
Chapitre 27	Diffraction	444
Chapitre 28	Polarisation	453
Chapitre 29	Électrostatique	456
Chapitre 30	Magnétostatique	476
Chapitre 31	Équations de Maxwell	482
Chapitre 32	Induction	489
Chapitre 33	Relativité restreinte	495
Chapitre 34	Diffusion	501