

中法工程师学历教育系列教材

OPTIQUE
ONDULATOIRE

波动光学 (法文版)

Yves Dulac
Adeline Minet-Ferguson 著



科学出版社

中法工程师学历教育系列教材

波动光学

OPTIQUE ONDULATOIRE

(法文版)

Yves Dulac Adeline Minet-Ferguson 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书分六章。首先论述干涉和衍射现象中的标量光振动概念，并证明两个完全相干波的菲涅耳干涉公式，由此引出亮度和对比度的概念。接着对实际光源的研究，介绍空间和时间上相干性的概念。证明迈克尔逊干涉情况下的局部定理。通过傅里叶变换研究远场衍射下的惠更斯定理，从而研究光栅光谱。最后阐述琼斯公式下的光偏振矢量理论。

本书主要针对参与中法联合培养的高等院校学生。通过本书，学生可以更好地了解法国工程师大学校预科班的老师是如何用法语表达他们在波动光学上的科学思想。

图书在版编目(CIP)数据

波动光学：法文/(法)杜拉克(Dulac, Y.)等著. —北京：科学出版社，2013

中法工程师学历教育系列教材

ISBN 978-7-03-037688-6

I. ①波… II. ①杜… III. ①物理光学-教材-法文 IV. ①O436

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 118279 号

丛书策划：匡 敏 余 江
责任编辑：余 江 / 责任校对：宣 慧
责任印制：闫 磊 / 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>

北京市文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 5 月第 一 版 开本：720×1000 B5

2013 年 5 月第一次印刷 印张：17 1/2

字数：280 000

定价：39.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

北京航空航天大学中法工程师学院
工程师教材融合编委会

主 任 熊 璋

副主任 于黎明 徐 平

编 委 (按拼音排序)

艾迪列娜·米内 马克·波利

麦尔勒·贵龙姆 萨日娜

王 梅 伊夫·杜拉克

殷传涛 张 巍

张心婷

编 辑 (按拼音排序)

卞文佳 陈 辉 陈 威 陈晓径

崔 敏 段 斐 方 乐 林立婷

马纪明 牛 薇 宋 萌 唐宏哲

田 原 王乐梅 王 敏 王 峥

王竹雅 于 雷 于 珊 张 莉

张 澎 张晓雯

丛 书 序

我国《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》明确提出，要“适应国家经济社会对外开放的要求，培养大批具有国际视野、通晓国际规则、能够参与国际事务和国际竞争的国际化人才”，为此教育部于2010年启动了“卓越工程师教育培养计划”，并把培养国际化工程人才作为我国高等工程教育发展的战略重点之一。通过与国际高水平大学开展人才培养合作，借鉴国外先进经验，引入国外优质教育资源并结合自身优势，面向国家发展战略需求，建立植根于本土的工程师学历教育体系，是培养具有国际竞争力工程师人才的重要途径，也是贯彻落实“人才强国”战略、提升我国国际竞争力的重要举措。

采用精英培养模式的法国工程师学历教育对法国乃至世界经济、社会发展起到了重要的推进作用，许多工程师院校在世界范围内享有盛誉。为此，近年来我国许多大学对这种培养模式进行了深入研究，并成立了多家中法合作的工程师培养机构。这些具有国际化教育目标与理念的办学机构与项目，已经成为我国高等工程教育的重要组成部分，取得的成功经验深刻影响着我国高等工程教育改革与创新进程。

作为我国教育部批准的第一家中法教育合作培养通用工程师人才的教育机构，北京航空航天大学中法工程师学院于2005年由北京航空航天大学与法国中央理工大学集团合作建立，在创立和实施我国的国际通用工程师学历教育过程中，通过借鉴法国工程师培养理念，引进国外优质教育资源，结合北京航空航天大学自身优势，建立了卓越工程师培养本-硕统筹课程体系，赢得了国内外教育界、工业界的广泛认同与赞誉，并通过了法国工程师职衔委员会（CTI）和欧洲工程教育EUR-ACE体系的认证，成为迄今为止国内唯一一家具有在本土颁发法国和欧洲工程师文凭资质的办学机构，培养出来的毕业生得到了用人单位的普遍欢迎和高度评价。

为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，我们在北京市教委和科学出版社的支持下，组织出版了这套《中法工程师学历教育系列教材》，其中包括由法国著名预科教师和法国工程师学院一线教师领衔编写的法文版、英文版和中文版的预科数学、物理、工业科学教材，以及适合工程师培养阶段的专业教材。本套教材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。

希望本套教材能为我国卓越工程师的教育培养作出贡献！



北京航空航天大学中法工程师学院院长

2013年5月

Structure et mode d'emploi de l'ouvrage

Le manuel présenté ici est de facture traditionnelle. Il est divisé en six « chapitres » qui exposent le cours. Ce qu'on appelle traditionnellement mais conventionnellement « cours » est l'ensemble des concepts, des méthodes et résultats généraux que les enseignants estiment nécessaires à la poursuite de l'étude des thèmes proposés.

La table des matières initiale permet d'avoir une vision rapide et globale des thèmes abordés. On y reconnaîtra l'introduction progressive du concept de vibration lumineuse, scalaire d'abord, pour la compréhension des phénomènes d'interférence et de diffraction.

On travaille d'abord avec des sources lumineuses ponctuelles et monochromatiques, avec des ondes totalement cohérentes. La formule de Fresnel d'interférence à deux ondes est alors démontrée et utilisée pour mettre en place les notions de luminosité et de contraste.

On s'intéresse ensuite aux sources réelles et on met en place les notions de cohérence temporelle et de cohérence spatiale. Le théorème de localisation est démontré dans le cas de l'interférence de Michelson : il permet de bien comprendre les conditions nécessaires d'éclairage et de projection des dispositifs interférentiels.

La diffraction à l'infini est étudiée dans le cadre du théorème d'Huygens et est formulée en termes de transformée de Fourier de dimension 2. Cela permet d'étudier des pupilles diffractantes très diverses et de comprendre aisément leur figure de diffraction.

On passe alors naturellement à l'étude la transparence réseau, ce qui permet de comprendre la spectroscopie à réseaux qui fait l'objet d'un chapitre spécial.

Le cours s'achève sur la théorie vectorielle de la polarisation de la lumière, dans le cadre du formalisme de Jones.

Chaque chapitre est précédé d'une introduction qui situe les enjeux,



donnant les « mots-clés » à connaître.

La décomposition en paragraphes et sous-paragraphes vise à renforcer la lisibilité du texte et à accélérer son accessibilité. Le plan de l'ouvrage est rigoureux et la construction de l'ensemble est progressive. Les concepts sont construits pas à pas, la complexité allant naturellement en augmentant au fur et à mesure de l'avancée des chapitres.

Les démonstrations mathématiques sont traitées en typographie MathType, bien adaptée au symbolisme mathématique.

De nombreux graphiques, dessins et autres images illustrent abondamment le propos. On en expliquera la raison dans l'avant-propos.

La composition de l'ensemble se veut tout de même aérée pour une bonne intelligibilité.

Des exercices d'application directe du cours assurent une compréhension améliorée des concepts étudiés. Ils font appel à des dispositifs courants dans différents domaines de la physique.

À la fin de l'ouvrage, une série de problèmes de longueurs variées, testés auprès d'étudiants chinois de cycle bachelor, font appel à l'ensemble des connaissances présentées dans cet ouvrage.

Ces problèmes transversaux résument nombre des méthodes exposées.

Avant-propos

L'origine de ce manuel est originale et fait suite à la décision des autorités chinoises de créer à l'Université BeiHang de Pékin, un Institut Sino-Français d'Ingénierie, le 北航中法工程师学院 connu en France sous le nom d'École Centrale de Pékin. Il s'agissait de former en langue française de jeunes étudiants chinois issus du 高考 pour les amener au niveau international du Master en Ingénierie et au niveau français du diplôme d'ingénieur reconnu par la Commission des Titres d'Ingénieur (la CTI).

Engagé en septembre 2005, ce processus a vu son premier aboutissement lors de la première cérémonie de remise des diplômes franco-chinois (Master et diplôme d'Ingénieur CTI) au Palais du Peuple de Pékin (le 人民大会堂), le 07 janvier 2012.

Cette entreprise audacieuse a nécessité des solutions innovantes, fondées sur un apprentissage accéléré de la langue française, apprentissage nécessaire à l'étude des sciences mathématiques et physiques exposées en français.

L'équipe des auteurs de ce manuel est constituée de deux enseignants français, Yves Dulac ancien professeur au Lycée Louis le Grand de Paris, coordonnateur de l'enseignement de physique au cycle préparatoire de l'École Centrale de Pékin, et d'une jeune professeur de physique à l'École Centrale de Pékin, Adeline Minet-Ferguson, titulaire également d'un diplôme d'Ingénieur de l'École Centrale de Paris, partenaire historique de l'École Centrale de Pékin. Adeline Minet-Ferguson connaît donc parfaitement les exigences d'une École d'Ingénieur «à la française». Son expérience d'enseignement du cours d'optique ondulatoire a été précieuse dans la rédaction de ce manuel.

Cette équipe française doit remercier tout particulièrement le Directeur chinois de l'Institut, Xiong Zhang dont l'impulsion a été décisive pour l'écriture de ce manuel. Sans lui, cet ouvrage n'aurait pas pu voir le jour. Nous devons



remercier aussi les deux Directeurs-adjoints chinois Yu Li Ming (于黎明), et Xu Ping (徐平) qui nous ont constamment encouragés.

Ce manuel a été testé depuis plus de six ans maintenant et constitue donc une base mathématique solide pour la poursuite de ce cursus international d'études scientifiques.

Une illustration abondante en tableaux, dessins, graphiques, images permet de faire appel à la mémoire visuelle, laquelle est particulièrement aigüe chez les étudiants chinois.

Notre expérience commune de plus de six ans dans ce domaine nous a apporté de précieuses lumières.

Nous espérons donc que ce manuel sera de grande utilité aux étudiants chinois engagés dans un processus de coopération universitaire sino-française.

Table des matières

丛书序

Structure et mode d'emploi de l'ouvrage

Avant-propos

1 VOCABULAIRE DE L'OPTIQUE ONDULATOIRE OBSERVATIONS COURANTES MODÉLISATION ET THÉORIE SCALAIRE DE LA LUMIÈRE	1
1.1 SOURCES DE LUMIÈRE	2
1.2 PROPAGATION DE LA LUMIÈRE	5
1.3 LA LUMIÈRE ET LES OBSTACLES	5
1.4 RÉCEPTION DE LA LUMIÈRE ET INTERPRÉTATION: INTENSITÉ ET COULEUR	10
1.5 MODÉLISATION DES SOURCES LUMINEUSES: THÉORIE ONDULATOIRE DE LA LUMIÈRE	11
1.6 MODÉLISATION DE LA PROPAGATION DE LA LUMIÈRE	18
1.7 MODÉLISATION DE LA RÉCEPTION DE LA LUMIÈRE PAR L'ŒIL	24
Exercices d'application du chapitre 1	30
2 INTERFÉRENCES IDÉALES ONDES TOTALEMENT COHÉRENTES	36
2.1 DISPOSITIFS PRATIQUES D'INTERFÉRENCES IDÉALES À DEUX ONDES	37
2.2 ONDES TOTALEMENT COHÉRENTES, INTERFÉRENCES	43
2.3 ÉTUDE COMPLÈTE DES BI-MIROIRS DE FRESNEL, ORDRES DE GRANDEUR	45
2.4 AUTRES DISPOSITIFS INTERFÉRENTIELS, PHÉNOMÈNES PARTICULIERS	56
2.5 L'INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON	62



Exercices d'application du chapitre 2	67
3 INTERFÉRENCES RÉELLES ONDES PARTIELLEMENT	
COHÉRENTES	74
3.1 ONDES PARTIELLEMENT COHÉRENTES	75
3.2 SOURCE PONCTUELLE, LARGE SPECTRALEMENT, COHÉRENCE	79
3.3 SOURCE MONOCHROMATIQUE, LARGE SPATIALEMENT, COHÉRENCE	92
3.4 L'INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON EN COIN D'AIR	101
3.5 MICHELSON EN LAME D'AIR À FACES PARALLÈLES	104
3.6 SOURCE LARGE SPATIALEMENT ET SPECTRALEMENT	107
Exercices d'application du chapitre 3	110
4 DIFFRACTION À L'INFINI D'UNE ONDE PLANE DIFFRACTION	
DE FRAUNHOFER	123
4.1 GÉNÉRALITÉS SUR LA DIFFRACTION, VOCABULAIRE	124
4.2 DIFFRACTION À L'INFINI D'UNE ONDE PLANE	130
4.3 INTERPRÉTATION DES EXPÉRIENCES, PRINCIPE DE HUYGENS-FRESNEL	132
4.4 DIFFRACTION DE FRAUNHOFER PAR DES PUPILLES USUELLES	137
4.5 TRANSPARENCE DE LA PUPILLE PLANE ET FIGURE DE DIFFRACTION	154
4.6 TRANSFORMATION DE LA PUPILLE ET FIGURE DE DIFFRACTION	158
Exercices d'application du chapitre 4	166
5 RÉSEAUX DE DIFFRACTION	190
5.1 RÉSEAUX DE DIFFRACTION, MOTIF DE BASE ET RÉPÉTITION DE MOTIFS	191
5.2 FIGURE DE DIFFRACTION À L'INFINI PAR LE RÉSEAU PAR TRANSMISSION	198
5.3 SPECTROSCOPIE À RÉSEAU PLAN PAR TRANSMISSION	206
Exercices d'application du chapitre 5	211



6	POLARISATION DE LA LUMIÈRE	215
6.1	MODÈLE VECTORIEL DE LA LUMIÈRE, ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE	216
6.2	INTERPRÉTATION GÉOMÉTRIQUE DE LISSAJOUS DE LA POLARISATION	221
6.3	INTENSITÉ LUMINEUSE DES VIBRATIONS VECTORIELLES	223
6.4	REPRÉSENTATION GÉOMÉTRIQUE D'UNE LUMIÈRE POLARISÉE OU NON	224
6.5	POLARISEURS RECTILIGNES	226
6.6	POLARISEURS ET ANALYSEURS TOURNANTS, LOI DE MALUS	231
6.7	LAMES CRISTALLINES ANISOTROPE, LAMES DEMI-ONDE, LAMES QUART D'ONDE	233
	PROBLÈMES DE RÉVISIONS	237

1 VOCABULAIRE DE L'OPTIQUE

ONDULATOIRE

OBSERVATIONS COURANTES

MODÉLISATION ET THÉORIE

SCALAIRE DE LA LUMIÈRE

Dans ce premier chapitre, on s'intéresse aux principes de base qui gouvernent la propagation des rayons lumineux dans un milieu linéaire, homogène et isotrope.

Mais pour cela, il faut d'abord donner quelques indications sur ce qu'est la lumière, sur ce que sont les sources lumineuses. On donne les caractéristiques « évidentes » de la lumière, intensité et couleur. On dit un mot sur la géométrie des sources lumineuses, leur caractère généralement surfacique, parfois quasi-ponctuel et ponctuel dans l'idéal.

Le deuxième paragraphe traite de l'idée de propagation de la lumière le long de certains chemins, les rayons lumineux.

Dans le troisième paragraphe, on définit les différents types d'interaction entre lumière et matière : réflexion métallique, réflexion diffuse, diffraction par réflexion, réfraction dioptrique, transmission diffuse, diffraction par transmission, absorption. On citera donc Descartes, Snell, Fraunhofer, Rayleigh.

Le quatrième paragraphe fournit le vocabulaire de la perception lumineuse par les récepteurs usuels, en particulier l'œil. Intensité, éclaircissement, couleur, contraste sont les mots clés.

Le cinquième paragraphe établit le modèle de la vibration scalaire monochromatique à la source.

Pulsation, fréquence, couleur associée, bande spectrale, profil spectral sont ainsi proprement définis.



Le sixième paragraphe pose les bases de la propagation lumineuse dans un milieu donné : vitesse de la lumière dans ce milieu, indice de ce milieu, homogénéité, isotropie, dispersion éventuelle. On donne alors l'outil du formalisme complexe pour le calcul commode de l'intensité lumineuse en un point.

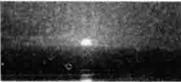
Le dernier paragraphe traite du récepteur oculaire, de son caractère quadratique lent, de sa sensibilité et de sa perception du contraste.

Une dizaine d'exercices permettent de s'entraîner à la manipulation des nouveaux concepts de ce chapitre.

1.1 SOURCES DE LUMIÈRE

1.1.1 Observations courantes, manifestations de la lumière

La lumière est historiquement liée au soleil qui nous éclaire, nous sortant de la nuit noire.



Le soleil

Il s'agit d'un phénomène de lumière naturelle.

Le soleil est un objet lumineux en lui-même : il est source de lumière, d'où son culte dans beaucoup de sociétés anciennes. C'est un éclairage direct.

Cependant la nuit sur Terre peut être claire : la Terre est éclairée par la lune. La lune n'est pas une source lumineuse mais elle peut renvoyer vers nous la lumière émise par le soleil. C'est le phénomène de réflexion qui crée un éclairage indirect.



Un feu de bois



Trois torches



Une bougie



Une allumette

L'homme a su petit à petit créer ses propres sources de lumière : qui ne s'est pas éclairé une nuit à la lueur d'un feu de bois, d'une torche, d'une bougie, d'une allumette. Les corps chauds émettent de la lumière.



Les technologies modernes ont créé la lampe à incandescence, la lampe à pétrole, à huile, l'ampoule, le néon, le projecteur et plus récemment le laser.



Lampe à incandescence



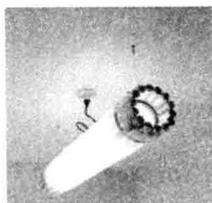
à pétrole



à huile du Shaanxi



à huile du Tibet



Tubes au néon



Projecteur



Lasers

Dans le monde animal, la nature a créé des animaux lumineux, les vers luisants, les lucioles.



Ver luisant



Luciole

Certaines substances minérales comme les composés phosphorés ou fluorés, parfois animales, peuvent emmagasiner de l'énergie lumineuse et la restituer après un temps plus ou moins long, sous des formes un peu différentes : ce sont les phénomènes de phosphorescence et de fluorescence.

La lumière permet de *voir, d'éclairer, d'illuminer*.

Une source, placée dans le coin d'une pièce *obscur*, permet de voir dans un autre coin de la pièce.

La lumière se *transporte*, se *propage* en suivant des chemins. Ces chemins sont appelés *rayons lumineux*.

Dans notre exemple, la lumière se propage dans *l'air*.

L'expérience montre que la lumière peut aussi se propager dans le *vide* (entre le Soleil et la Terre, il y a surtout du vide !).



Pierre fluorescente



Cristaux fluorescents



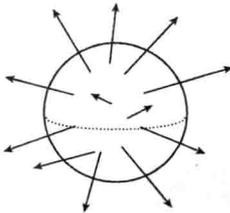
Jouets phosphorescents

Elle se propage également dans *l'eau*, dans le *verre* : ce sont des milieux *transparents*.

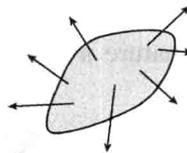
Elle est arrêtée par un écran noir, par une porte de bois fermée : ces objets sont *opaques*.

1.1.2 Rayons lumineux et géométrie des sources lumineuses

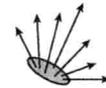
Les sources lumineuses *émettent* de la lumière par leur *surface*.



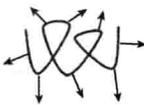
Surface sphérique émettrice



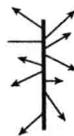
Surface quelconque émettrice



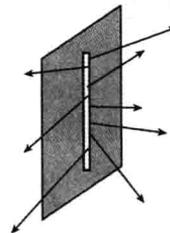
Surface élémentaire émettrice



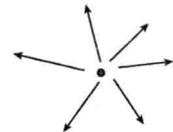
Filament lumineux



Segment lumineux



Fente lumineuse



Quasi-point lumineux

On dit que l'émission lumineuse est *surfactive*.

Le soleil est une source *large*, constituée d'une grande surface sphérique *émettrice*.

Par contre, le *filament* chaud d'une lampe à incandescence est une source *linéique*.

Le filament est presque un *fil*, une *courbe* mathématique, une *ligne*.