

中法工程师学历教育系列教材

# OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

## 几何光学 (法文版)

Yves Dulac

Adeline Minet-Ferguson 著

段 斐



科学出版社

中法工程师学历教育系列教材

# 几何光学

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

(法文版)

Yves Dulac

Adeline Minet-Ferguson 著

段斐



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书分四章。第一章论述贯穿整个几何光学课程的费马定理,这是本书介绍的第一个变分概念,其普遍性十分重要。第二章讨论重要的近轴光学近似,并引出无球差性和严格或近似消球差性的概念及光感受器,由此对图像的形成进行处理。第三章分析高斯近似下的中心系统,并定义基平面,从而将中心光学系统简化为六个横向平面。第四章介绍一些实验室常见的光学仪器:放大镜,目镜,显微镜,望远镜,平行光管,有限取景器,固定前取景器。

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几何光学上的科学思想。

### 图书在版编目(CIP)数据

几何光学: 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 978-7-03-037690-9

I. ①几… II. ①杜… III. ①几何光学-教材-法文 IV. ①O435

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 118273 号

丛书策划: 匡 敏 余 江  
责任编辑: 余 江 张丽花 / 责任校对: 胡小洁  
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>

安泰印刷厂印刷

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: 10 1/2

字数: 168 000

定价: 26.00 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!

熊璋

北京航空航天大学中法工程师学院院长

2013年5月



Le quatrième et dernier chapitre propose l'étude de quelques instruments d'optique courants, utilisés dans nos laboratoires : lunettes, oculaires, microscopes, lunettes, collimateur, viseur à distance finie, viseurs à frontale fixe.

## Structure et mode d'emploi de l'ouvrage

Le manuel présenté ici est de facture traditionnelle. Il est divisé en quatre « 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 principe de Fermat qui gouverne l'ensemble du cours d'optique géométrique. C'est le premier concept variationnel que nous rencontrerons : il permet de démontrer les lois de Descartes, le théorème de propagation rectiligne de la lumière dans les milieux optiques linéaires homogènes et isotropes, le théorème du retour inverse et celui d'indépendance des rayons lumineux, tous théorèmes vus dans certains enseignements comme des principes. La généralité du principe de Fermat est mise en valeur.

Dans un deuxième chapitre, on traite de l'importante approximation de l'optique paraxiale, dans le cas de la réfraction dioptrique et de la réflexion sur un miroir. Cela permet de dégager les notions de stigmatisme et d'aplanétisme rigoureux ou approché, en liaison avec le récepteur lumineux. La formation des images peut alors être abordée, indépendamment des phénomènes de diffraction. La formulation des relations de conjugaison et de grandissements se fait à la mode de Descartes et à celle de Newton.

Dans le troisième chapitre, on traite de façon générale des systèmes centrés dans le cadre de l'approximation de Gauss. Les plans cardinaux sont définis, permettant de réduire un système optique à six plans transverses, quelle que soit sa complexité réelle.

On en déduit l'étude particulièrement importante en pratique des lentilles minces ou épaisses.



Le quatrième et dernier chapitre propose l'étude de quelques instruments d'optique courants, utilisés dans nos laboratoires: loupes, oculaires, microscopes, lunettes, collimateur, viseur à distance finie, viseurs à frontale fixe.

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.

De nombreux graphiques, dessins et autres images illustrent abondamment le 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, des 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 (ECPk). 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 franco-chinoise des auteurs de ce manuel est constituée de deux enseignants français et d'une enseignante chinoise.

Pour la partie française, 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 professeure de physique à l'ECPk, 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 géométrique a été précieuse dans la rédaction de ce manuel.

Pour la partie chinoise Duan Fei (段斐), Ingénieur de l'INSA de Rennes,



spécialiste entre autres d'optique. Cette jeune professeure chinoise connaît aussi le système universitaire français, pour y avoir fait des études pendant de longues années. Elle a apporté au manuel sa connaissance des mentalités chinoises et sa longue expérience du tutorat au laboratoire d'optique des étudiants chinois de l'ECPk. Sa contribution à ce manuel est donc précieuse, dans le cadre du partenariat interculturel avec la France qui prévaut à BeiHang.

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 vu 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 GÉNÉRALITÉS SUR LA LUMIÈRE PRINCIPE DE FERMAT LOIS

<b>DE DESCARTES</b> .....	1
1.1 GÉNÉRALITÉS SUR LA LUMIÈRE .....	1
1.2 NOTION DE RAYON LUMINEUX .....	10
1.3 APPROXIMATION DE L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE ET PRINCIPE DE FERMAT .....	14
1.4 LOIS DE DESCARTES POUR LES DIOPTRÉS ET LES MIROIRS .....	17
Exercices d'application du chapitre 1 .....	22

### 2 DIOPTRÉS ET MIROIRS SPHÉRIQUES STIGMATISME ET

<b>APLANÉTISME DANS L'APPROXIMATION DE GAUSS</b> .....	35
2.1 DIOPTRÉ SPHÉRIQUE: STIGMATISME ET APLANÉTISME APPROCHÉS .....	35
2.2 DIOPTRÉ SPHÉRIQUE: CONSTRUCTIONS GÉOMÉTRIQUES DE BASE .....	47
2.3 DIOPTRÉ PLAN .....	51
2.4 MIROIR SPHÉRIQUE .....	51
2.5 MIROIR PLAN .....	55
Exercices d'application du chapitre 2 .....	55

### 3 SYSTÈMES CENTRÉS FOCAUX DANS L'APPROXIMATION DE GAUSS

3.1 DÉFINITIONS ET PROPRIÉTÉS DES SYSTÈMES CENTRÉS FOCAUX .....	66
3.2 UTILITÉ GÉOMÉTRIQUE DES PLANS CARDINAUX .....	70



3.3	UTILITÉ ANALYTIQUE DES PLANS CARDINAUX.....	73
3.4	SYSTÈMES CENTRÉS FOCaux USUELS.....	79
3.5	STIGMATISME ET APLANÉTISME APPROCHÉS DES LENTILLES MINCES.....	82
3.6	FORMULAIRE PRATIQUE POUR LES LENTILLES MINCES DANS L'AIR.....	84
3.7	CONSTRUCTIONS GÉOMÉTRIQUES DE BASE POUR LES LENTILLES MINCES.....	86
3.8	DOUBLET DE LENTILLES MINCES DANS L'AIR.....	89
3.9	INTÉRÊT DES PLANS CARDINAUX.....	92
3.10	ÉTUDE PLUS PARTICULIÈRE D'UN DOUBLET AFOCAL.....	93
	Exercices d'application du chapitre 3.....	98
<b>4</b>	<b>INSTRUMENTS D'OPTIQUE.....</b>	<b>105</b>
4.1	L'ŒIL.....	106
4.2	GÉNÉRALITÉS SUR LES INSTRUMENTS SUBJECTIFS, ASSOCIÉS À L'ŒIL.....	111
4.3	ÉTUDE D'UNE LOUPE.....	113
4.4	ÉTUDE D'UN OCULAIRE.....	115
4.5	ÉTUDE D'UN MICROSCOPE.....	117
4.6	ÉTUDE D'UNE LUNETTE AUTOCOLLIMATRICE.....	120
4.7	ÉTUDE D'UN COLLIMATEUR.....	124
4.8	ÉTUDE D'UN VISEUR À FRONTALE FIXE.....	125
	Exercices d'application du chapitre 4.....	131
	<b>PROBLÈMES DE RÉVISION.....</b>	<b>137</b>

# 1 GÉNÉRALITÉS SUR LA LUMIÈRE

## PRINCIPE DE FERMAT, LOIS DE DESCARTES

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 de la dualité onde-corpuscule, on présente les premiers éléments de l'aspect ondulatoire de la lumière et on relie la couleur à la longueur d'onde dans le vide de la lumière. L'ordre de grandeur des longueurs d'onde du spectre visible est alors donné. L'indice d'un milieu linéaire, homogène et isotrope est défini tout comme le phénomène de dispersion qui en découle.

Dans le deuxième paragraphe, on s'intéresse au concept de rayon lumineux, à sa tentative d'isolement et donc nécessairement à la diffraction. Ombre et pénombre sont également définies dans le cadre de l'approximation de l'optique géométrique.

Le troisième paragraphe précise l'approximation de l'optique géométrique et énonce le principe variationnel de Fermat, clé de voûte de l'ensemble de ce cours. La notion de surface d'onde et le théorème de Malus sont étudiés tout comme le théorème de propagation rectiligne, le théorème du retour inverse et le théorème d'indépendance des rayons lumineux.

On présente les dioptries et les miroirs et appliquant le principe de Fermat, on démontre les lois de Descartes-Snell relatives à la réfraction et à la réflexion.

On termine par l'équivalence formelle réfraction-réflexion, par changement de l'indice  $n$  en  $-n$ .

Une grosse vingtaine d'exercices permettent de s'entraîner à la



manipulation des nouveaux concepts de ce chapitre.

## 1.1 GÉNÉRALITÉS SUR LA LUMIÈRE

### 1.1.1 La lumière au sens populaire du terme et les sources lumineuses

La lumière est historiquement liée au soleil qui nous éclaire, nous sortant de la nuit noire. Il s'agit d'un phénomène de lumière naturelle.

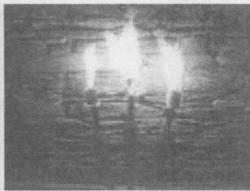
Le soleil est un objet lumineux en lui-même : il est source de lumière, d'où son culte dans beaucoup de sociétés anciennes. C'est un éclairage direct.

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.

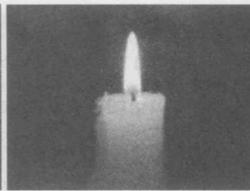
L'homme a su petit à petit créer ses propres sources de lumière : qui ne s'est pas éclairé une nuit à la lueur d'un feu de bois, d'une torche, d'une bougie, d'une allumette. Les corps chauds émettent de la lumière.



Un feu de bois



Trois torches



Une bougie



Une allumette

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



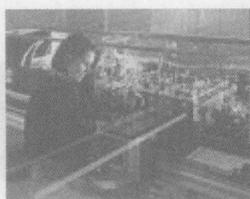
à huile du Tibet



Tubes au néon



Projecteur



Lasers

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



Ver luisant



Luciole

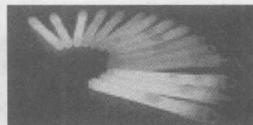
Certaines substances minérales comme les composés phosphorés ou fluorés, parfois animales peuvent emmagasiner de l'énergie lumineuse et la restituer après un temps plus ou moins long, sous des formes un peu différentes : ce sont les phénomènes de phosphorescence et de fluorescence.



Pierre fluorescente



Cristaux fluorescents



Jouets phosphorescents

### 1.1.2 Caractéristiques « évidentes » de la lumière

Nous sommes grâce à nos yeux, plus ou moins sensibles à deux caractéristiques essentielles de la lumière, son intensité et sa couleur.

Les mots pour dire ses caractéristiques sont typiquement :

- éclairement, clarté, ombre, pénombre, pâleur ... pour décrire l'intensité lumineuse.



- bleu, blanc, rouge ... pour décrire la couleur.



### 1.1.3 Dualité onde corpuscule

Nous allons tenter de quantifier ces caractéristiques.

L'histoire des sciences nous apprend qu'il a fallu beaucoup de temps pour comprendre, analyser, modéliser ces caractéristiques.

La théorie de la lumière s'est considérablement améliorée au cours des XIX<sup>ème</sup> et XX<sup>ème</sup> siècles: actuellement elle est sous une double forme.

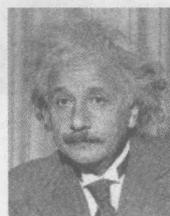
On dit que la lumière a un aspect dual, un aspect ondulatoire et un aspect corpusculaire.

Dans l'aspect ondulatoire, on associe la lumière à la propagation dans le vide ou dans la matière d'un champ électromagnétique (champ électrique  $\vec{E}(M,t)$  et champ magnétique  $\vec{B}(M,t)$ ). C'est la théorie de Maxwell.

Dans l'aspect corpusculaire, on associe à la lumière un écoulement, on dit en français des sciences, un flux de particules qu'on appelle des photons. La particularité de ces corpuscules est d'être de masse nulle, mais de quantité de mouvement non nulle. Ce n'est pas classique. Cela ressort de la mécanique quantique et relativiste à la fois. C'est la théorie d'Einstein et de Louis de Broglie.



Louis de BROGLIE  
1892-1987



Albert EINSTEIN  
1879-1955



James Clerk MAXWELL  
1831-1879

Certains aspects des phénomènes lumineux s'expliquent bien dans la théorie ondulatoire, d'autres dans la théorie corpusculaire.

Nous manipulerons dans ce cours la théorie ondulatoire.



### 1.1.4 Aspect ondulatoire de la lumière

Dans la théorie ondulatoire, on associe à la lumière le champ électrique  $\vec{E}(M,t)$  d'une onde électromagnétique. Dans cette onde, le champ magnétique  $\vec{B}(M,t)$  peut se déduire de  $\vec{E}(M,t)$ . On raisonnera donc sur le seul  $\vec{E}(M,t)$ .

En lumière « non polarisée » (nous traiterons le cas de la lumière polarisée au semestre 5), le caractère vectoriel ne s'exprime pas vraiment. Seule compte sa norme pour quantifier l'intensité lumineuse.

En optique des milieux linéaires (l'optique non linéaire sort largement du cadre de notre cycle préparatoire) on peut légitimement raisonner sur la norme  $E(M,t)$  du vecteur  $\vec{E}(M,t)$ . Ce dernier peut se décomposer en constituants indépendants variant temporellement de façon sinusoïdale, à  $M$  fixé. On parle de vibration monochromatique (on verra plus loin pourquoi).

$$E(M,t) = E_0(M,\omega) \cos(\omega t + \varphi(M))$$

Le facteur  $E_0(M,\omega)$  est appelé facteur d'amplitude et le facteur  $\cos(\omega t + \varphi(M))$  est appelé facteur de phase de la vibration monochromatique.

En optique des milieux isotropes (l'optique anisotrope sort aussi du cadre de notre cycle préparatoire), le modèle ondulatoire affirme que l'énergie lumineuse se propage suivant des trajectoires qu'on appelle des rayons lumineux.

Le champ  $\vec{E}(M,t)$  se propage le long de ses rayons lumineux.

Notons  $M$  le point courant du rayon  $(I)$  et  $d\ell(M)$  l'élément de longueur le long de  $(I)$ .

La théorie ondulatoire affirme que l'énergie lumineuse se propage avec la vitesse numérique  $v(M)$  en  $M$ .

La traduction usuelle de la propagation le long du rayon  $(I)$ , à la vitesse numérique  $v(M)$  de la lumière monochromatique, non polarisée, dans un milieu linéaire et isotrope est donnée ci-dessous.

Soient deux points  $M_1$  et  $M_2$  de  $(I)$ ,  $M_1$  étant en amont et  $M_2$  en aval dans le sens naturel de propagation (en pratique on va vers l'aval quand on s'éloigne de la source, comme dans une rivière qui va de sa source, au sommet de la MONTagne vers le fond de la VALlée).