

# Optique

## Fondements et applications

*Avec 250 exercices et problèmes résolus*



# Optique

## Fondements et applications

*Avec 250 exercices et problèmes résolus*

José-Philippe PÉREZ

*Professeur à l'université de Toulouse, UPS-IRAP*

Avec la collaboration de

Éric Antérrieu

*Ingénieur à l'IRAP*

*Ce livre a reçu en 2007 le prix Arnulf-Françon  
décerné par la Société Française d'Optique.*

*7<sup>e</sup> édition*

**DUNOD**

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--



© Dunod, Paris, 2004, tirage corrigé 2011, 2020 pour la nouvelle présentation

© Masson, Paris, 1984, 1991, 1994, 1996

Dunod Éditeur, 11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

EAN 978-2-10-080783-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	xiv
<b>Les grands noms de l'optique</b> . . . . .	xviii
<b>Constantes physiques, notations et symboles</b> . . . . .	xxvi
<b>Description de l'ouvrage</b> . . . . .	xxix
<b>L'optique en vingt questions</b> . . . . .	xxxiv
<b>1. Introduction à l'optique. Notion de rayon lumineux</b>	
I. — Introduction historique . . . . .	1
II. — Principe d'Huygens . . . . .	2
III. — Diffraction. Rayon lumineux . . . . .	4
IV. — Construction d'Huygens . . . . .	5
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	7
<b>2. Fondements de l'optique géométrique</b>	
I. — Loi fondamentale de l'optique des rayons lumineux . . . . .	9
II. — Lois de Snell-Descartes . . . . .	12
III. — Principe de Fermat . . . . .	18
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	23
<b>3. Formation des images en optique géométrique</b>	
I. — Image d'un point en optique géométrique . . . . .	28
II. — Stigmatisme approché. Cas d'un système centré . . . . .	33
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	36
<b>4. Approximation de Gauss. Dioptré sphérique</b>	
I. — Tracé des rayons lumineux dans un dioptré sphérique . . . . .	37
II. — Dioptré sphérique dans l'approximation de Gauss . . . . .	39
III. — Vergence d'un dioptré sphérique . . . . .	40
IV. — Relation de conjugaison d'un dioptré sphérique . . . . .	41
V. — Matrices de réfraction et de translation . . . . .	44
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	47

<b>5. Éléments cardinaux des systèmes centrés</b>	
I. — Matrice de transfert d'un système centré . . . . .	48
II. — Vergence . . . . .	49
III. — Matrice de conjugaison . . . . .	50
IV. — Éléments cardinaux . . . . .	52
V. — Détermination des éléments cardinaux . . . . .	55
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	57
<b>6. Formules de conjugaison et constructions</b>	
I. — Relation homographique ou règle <i>abcd</i> . . . . .	59
II. — Formules de Descartes . . . . .	60
III. — Formules de Newton . . . . .	62
IV. — Constructions géométriques . . . . .	63
V. — Discussion graphique . . . . .	66
VI. — Application au dioptre sphérique . . . . .	67
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	69
<b>7. Œil. Instruments d'optique. Pupilles et diaphragmes</b>	
I. — L'œil . . . . .	71
II. — Caractéristiques optiques des instruments . . . . .	76
III. — Diaphragmes et pupilles . . . . .	78
IV. — Résolution théorique . . . . .	80
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	82
<b>8. Lentilles. Application à la loupe</b>	
I. — Lentilles épaisses . . . . .	84
II. — Application à la loupe . . . . .	87
III. — Lentilles minces . . . . .	88
IV. — Application à la projection sur un écran . . . . .	91
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	93
<b>9. L'aberration chromatique et l'achromatisme. Doublets de lentilles minces</b>	
I. — L'aberration chromatique . . . . .	97
II. — L'achromatisme . . . . .	99
III. — Doublets de lentilles minces . . . . .	100
IV. — Oculaires . . . . .	104
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	106
<b>10. Aberrations géométriques des systèmes centrés</b>	
I. — Classification des aberrations géométriques . . . . .	107
II. — L'aberration sphérique . . . . .	108
III. — L'aberration de coma . . . . .	110
IV. — L'astigmatisme et la courbure de champ . . . . .	111
V. — Distorsion . . . . .	113
VI. — Calcul des aberrations . . . . .	113
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	115

**11. Association de deux systèmes centrés. Microscope composé**

I. — Association de deux systèmes centrés . . . . .	117
II. — Le microscope composé . . . . .	118
III. — Différents types de microscopes . . . . .	121
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	126

**12. Systèmes centrés dioptriques afocaux. Télescope réfracteur**

I. — Propriétés des instruments afocaux . . . . .	129
II. — Exemples simples de systèmes afocaux . . . . .	130
III. — Télescope réfracteur ou lunette astronomique . . . . .	132
IV. — Lunettes terrestres . . . . .	136
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	138

**13. Miroirs et cavités optiques**

I. — Rappels sur les miroirs . . . . .	140
II. — Miroirs sphériques dans l'approximation de gauss . . . . .	142
III. — Cavités optiques . . . . .	148
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	152

**14. Systèmes catadioptriques. Télescope réflecteur**

I. — Télescope réflecteur . . . . .	155
II. — Systèmes catadioptriques équivalents à un miroir . . . . .	162
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	166

**15. Photométrie. Photodétecteurs**

I. — Grandeurs photométriques . . . . .	170
II. — Conservation de l'étendue optique . . . . .	174
III. — Sources lumineuses . . . . .	176
IV. — Photodétecteurs . . . . .	180
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	188

**16. Appareil photographique ou caméra**

I. — Description de l'appareil photographique . . . . .	191
II. — Caractéristiques d'un objectif photographique . . . . .	193
III. — Résolution et mise au point . . . . .	195
IV. — Éclairement du plan image . . . . .	198
V. — Exemples d'objectifs photographiques . . . . .	198
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	200

**17. Équation iconale. Fibres optiques**

I. — Équation iconale . . . . .	202
II. — Fibres optiques à gradient d'indice . . . . .	206
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	211

**18. Vibrations monochromatiques. Vibrations quasi monochromatiques**

I. — Vibrations monochromatiques . . . . .	214
II. — Vibrations quasi monochromatiques . . . . .	216
III. — Addition de vibrations monochromatiques . . . . .	219
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	223

**19. Ondes progressives et ondes stationnaires**

I. — Ondes progressives. Équation de propagation . . . . .	226
II. — Onde plane et onde sphérique . . . . .	229
III. — Ondes monochromatiques planes . . . . .	231
IV. — Ondes monochromatiques quasi planes . . . . .	232
V. — Aspect énergétique de la propagation . . . . .	232
VI. — Ondes stationnaires . . . . .	235
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	238

**20. Ondes lumineuses. États de polarisation**

I. — Propagation de la lumière dans le vide . . . . .	242
II. — Propagation de la lumière dans un milieu matériel . . . . .	243
III. — Intensité d'une onde lumineuse . . . . .	246
IV. — Réflexion et réfraction d'une onde . . . . .	248
V. — États de polarisation des ondes lumineuses . . . . .	250
VI. — Production d'une lumière polarisée . . . . .	256
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	260

**21. Diffraction : principe d'Huygens-Fresnel. Approximation de Fraunhofer**

I. — Principe d'Huygens-Fresnel . . . . .	262
II. — Diffraction de Fraunhofer par un diaphragme plan . . . . .	264
III. — Importance de l'approximation de Fraunhofer . . . . .	269
IV. — Diffraction par une ouverture rectangulaire . . . . .	270
V. — Applications . . . . .	274
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	278

**22. Interférence de deux ondes. Cohérence mutuelle**

I. — Superposition de deux ondes monochromatiques . . . . .	282
II. — Cohérence mutuelle . . . . .	286
III. — Systèmes interférentiels . . . . .	289
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	295

**23. Cohérence temporelle et cohérence spatiale**

I. — Longueur et largeur de cohérence . . . . .	299
II. — Degré de cohérence temporelle . . . . .	304
III. — Degré de cohérence spatiale . . . . .	309
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	314

**24. Franges d'égale inclinaison ou anneaux d'Haidinger**

I. — Interférence avec une lame d'épaisseur constante . . . . .	318
II. — Anneaux d'Haidinger . . . . .	321
III. — Applications . . . . .	326
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	328

**25. Franges d'égale épaisseur ou franges de Fizeau**

I. — Franges de Fizeau . . . . .	331
II. — Applications . . . . .	335
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	338

**26. Spectromètre à prisme**

I. — Étude générale du prisme . . . . .	340
II. — Spectromètre à prisme . . . . .	343
III. — Prisme magnétique . . . . .	346
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	348

**27. Réseaux plans. Spectromètres à réseaux**

I. — Définition et réalisation des réseaux plans . . . . .	351
II. — Diffraction de Fraunhofer par un réseau de fentes . . . . .	352
III. — Propriétés des réseaux . . . . .	357
IV. — Spectromètres à réseau . . . . .	358
V. — Différents types de réseaux plans . . . . .	361
VI. — Extension aux réseaux tridimensionnels . . . . .	363
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	368

**28. Interférence d'ondes multiples. Interféromètre de Fabry-Pérot**

I. — Interférence d'ondes multiples issues d'une lame . . . . .	372
II. — Interféromètre de Fabry-Pérot . . . . .	375
III. — Filtres interférentiels . . . . .	378
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	379

**29. Lasers. Applications à l'holographie et l'optique non linéaire**

I. — Émission de lumière par les atomes . . . . .	382
II. — Fonctionnement des lasers . . . . .	383
III. — Différents types de lasers . . . . .	385
IV. — Propriétés des faisceaux lasers . . . . .	387
V. — Holographie . . . . .	389
VI. — Optique non linéaire . . . . .	393
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	397

**30. Optique de Fourier**

I. — Systèmes optiques linéaires . . . . .	400
II. — Approximation de Fresnel de la diffraction . . . . .	402
III. — Formation des images en éclairage cohérent . . . . .	408
IV. — Filtrage en éclairage cohérent . . . . .	414
V. — Formation des images en éclairage incohérent . . . . .	418
VI. — Filtrage en éclairage incohérent . . . . .	426
VII. — Application à l'interférométrie . . . . .	431
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	436

**31. Faisceaux gaussiens**

I. — Propagation d'un faisceau gaussien . . . . .	446
II. — Faisceau gaussien et faisceau sphérique . . . . .	451
III. — Applications . . . . .	460
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	463

**32. Propagation de la lumière dans les milieux anisotropes**

I. — Théorie électromagnétique des milieux anisotropes . . . . .	466
II. — Milieux uniaxes . . . . .	475
III. — Lames cristallines . . . . .	481
IV. — Biréfringence provoquée . . . . .	486
V. — Mesure d'une biréfringence . . . . .	490
VI. — Production et analyse d'une lumière polarisée . . . . .	493
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	497

**33. Polarisation rotatoire ou biréfringence circulaire**

I. — Mise en évidence expérimentale et lois de biot . . . . .	499
II. — Interprétation de la polarisation rotatoire . . . . .	502
III. — Applications . . . . .	508
IV. — Polarisation rotatoire en lumière blanche . . . . .	509
V. — Polarimètres et saccharimètres . . . . .	511
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	514

**34. Introduction au traitement numérique des images et à la couleur**

I. — Différents types de traitement numérique . . . . .	516
II. — Transformations ponctuelles . . . . .	517
III. — Transformations locales . . . . .	520
IV. — Transformations globales . . . . .	523
V. — Codage et compression . . . . .	529
VI. — Représentation colorée des images . . . . .	531
<i>Exercices et problèmes</i> . . . . .	537

<b>Annexe 1. Rappels mathématiques</b> . . . . .	539
I. — Rappels de trigonométrie . . . . .	539
II. — Diamètres apparents . . . . .	540
III. — Division harmonique . . . . .	541
IV. — Fonctions hyperboliques . . . . .	542
V. — Développements limités au voisinage de zéro . . . . .	544
VI. — Nombres complexes . . . . .	546
VII. — Matrices . . . . .	548
VIII. — Tabulations de fonctions . . . . .	553
<b>Annexe 2. Analyse de Fourier</b> . . . . .	555
I. — Séries de Fourier de fonctions périodiques . . . . .	555
II. — Transformation de Fourier . . . . .	559
III. — Extension au cas des distributions . . . . .	565
<b>Annexe 3. Simulation en optique</b> . . . . .	572
I. — Structures de données et fonctions de base . . . . .	572
II. — Systèmes optiques centrés . . . . .	577
III. — L'œil . . . . .	583
IV. — Propagation dans les milieux non homogènes . . . . .	589
V. — Faisceaux Gaussiens . . . . .	597
VI. — Facteurs de visibilité en optique ondulatoire . . . . .	599
<b>Réponses aux vingt questions</b> . . . . .	607
<b>Solutions des exercices et problèmes</b> . . . . .	609
<b>Bibliographie</b> . . . . .	683
<b>Index</b> . . . . .	685



*« Si la science s'achève et doit s'achever en formules d'actes, la création de la science est œuvre d'art. »*

*Paul Valéry, Vues,  
Éditions de la Table Ronde, Paris, 1948*

## Avant-propos

Ce cours est issu, d'une part d'un enseignement d'optique en licence (L1, L2 et L3) de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, et d'autre part des critiques des leçons d'oral de l'agrégation de physique dont on sait que le niveau de référence est celui des classes de préparation aux Grandes Écoles et des deux premières années de la licence de physique à l'Université. Il tient compte donc des programmes de ces formations.

Volontairement, nous avons découpé ce cours en leçons, ce qui nous a paru avoir plusieurs avantages : l'introduction, dont la fonction principale reste de motiver l'auditoire, permet aussi de commenter le titre du thème étudié, en situant éventuellement les nouveaux concepts dans leur contexte historique ; ensuite, sont développées les quelques idées principales à transmettre avec exemples simples, ordres de grandeur et applications ; enfin, dans la conclusion, on rappelle les principaux résultats et on annonce une extension éventuelle du point de vue initial.

Nous avons tenté de rendre compatibles le respect des programmes et la nécessaire actualisation de l'enseignement de l'optique, tant sur le plan scientifique que sur le plan pédagogique.

Mise à part l'organisation en leçons, que l'on a souhaitées suffisamment autonomes, l'originalité peut être résumée en quelques points.

(1) – L'optique géométrique est présentée comme de l'optique ondulatoire pour les très faibles longueurs d'onde. Cependant, la pratique de l'enseignement nous conduit à exposer l'optique géométrique avant de développer l'optique ondulatoire, techniquement plus complexe. En outre, afin de souligner l'analogie entre l'optique géométrique et la mécanique, nous avons mis en avant « la loi fondamentale de l'optique géométrique », sans évidemment renoncer au principe variationnel de Fermat.

(2) – Une fois les fondements de l'optique géométrique et l'approximation de Gauss précisés, nous présentons toute l'optique géométrique en nous appuyant sur les possibilités offertes par le calcul matriciel, non seulement pour établir les résultats généraux, mais aussi pour étudier concrètement les instruments. Bien qu'elle soit exclue par certains programmes, cette méthode, convenablement employée, présente pour nous plusieurs avantages :

- (i) elle permet de souligner le caractère linéaire de l'approximation de Gauss,
- (ii) l'accès à la matrice de transfert d'un système optique centré quelconque, soit par une voie analytique, soit par une voie expérimentale, permet de déterminer, de façon systématique et sûre, les éléments cardinaux. On applique alors les relations de conjugaison et on vérifie, par la construction, les résultats établis algébriquement. Dans ces conditions, les trois méthodes, matricielle, algébrique et géométrique, sont complémentaires,

(iii) en optique électronique et, plus généralement, dans la construction des accélérateurs de particules, le calcul matriciel est d'un emploi banal et indispensable, lorsqu'on désire connaître les propriétés dispersives et les aberrations géométriques,

(iv) dans les sources intenses et cohérentes que sont les lasers, la technique matricielle est nécessaire pour étudier la stabilité des cavités optiques,

(v) enfin, même en optique ophtalmique, on utilise le calcul matriciel pour modifier les caractéristiques de l'œil en vue de corriger ses défauts.

(3) – L'analogie entre l'optique et la mécanique est soulignée ; on insiste à la fois sur l'intérêt fondamental de cette analogie (origine de la mécanique ondulatoire) et sur son intérêt technique, notamment en analysant les trajectoires lumineuses dans les lentilles et les fibres optiques à gradient d'indice.

(4) – La linéarité des équations de Maxwell rend l'addition de plusieurs champs électromagnétiques banale. Aussi, la diffraction d'une onde par un diaphragme est-elle présentée avant l'interférence de deux ondes, ce qui permet d'insister sur le caractère irrémédiable de la diffraction et surtout de traiter confortablement le cas important des fentes d'Young placées devant une lentille.

(5) – Une place suffisante est réservée à la cohérence. Une fois introduits les concepts de longueur de cohérence temporelle et de largeur de cohérence spatiale, des démonstrations simplifiées du théorème de Wiener et Kintchine et du théorème de van Cittert et Zernike sont proposées. Les applications à la spectrométrie et à la synthèse d'ouverture permettent alors de montrer que l'étude de la cohérence n'est pas un thème purement académique.

(6) – Les principaux types de spectromètres sont présentés : celui à prisme, d'intérêt plutôt historique, avec son extension moderne au prisme magnétique, celui à réseau, très utilisé de nos jours, et celui de Fabry-Pérot comme application de l'interférence à ondes multiples.

(7) – En marge des programmes mais dans l'actualité, nous donnons un aperçu sur le fonctionnement des lasers et sur l'application de ces sources à l'holographie et à l'optique non linéaire.

(8) – Nous développons ensuite, sans formalisme inutile, les résultats fondamentaux de la formation des images en éclairage cohérent et en éclairage incohérent, notamment leurs applications au traitement d'image. Nous pensons qu'ainsi les étudiants pourront suivre sans difficulté un cours spécialisé sur l'optique de Fourier. En outre, nous établissons les éléments essentiels sur les faisceaux gaussiens utiles aujourd'hui dans l'utilisation des lasers comme sources de lumière ; nous en profitons pour relier la règle *abcd* bien connue de l'optique des faisceaux gaussiens à celle moins connue de l'optique géométrique matricielle.

(9) – Nous présentons aussi l'aspect vectoriel des ondes lumineuses en donnant les différents modes de représentation des états de polarisation (matrices de Jones, paramètres de Stokes, sphère de Poincaré). Nous étudions alors la propagation de la lumière dans les milieux anisotropes, ainsi que la polarisation rotatoire.

(10) – Enfin, nous donnons un aperçu sur le traitement numérique des images et sur la couleur.

Cette édition contient trois développements supplémentaires :

i) les nouveaux microscopes (champ proche, à effet tunnel, à force atomique), pour lesquels la résolution spatiale est bien meilleure que la longueur d'onde du rayonnement utilisé,

ii) la diffraction par les réseaux cristallins,

iii) la simulation en optique.

Dans cette dernière, présentée en annexe 3, on a rassemblé et développé quelques expérimentations informatiques (gestion automatique des systèmes optiques dans l'approximation de Gauss, tracé de rayons, traitement numérique des aberrations, dans l'œil notamment, corrections de la myopie, trajectoire des rayons lumineux dans les fibres optiques).

L'ouvrage s'adresse essentiellement aux étudiants des trois premières années post baccalauréat : licence L1, L2, L3, CPGE, premières années INSA, IUT. En raison des nombreux exercices et problèmes, qui décrivent des situations physiques concrètes, avec leurs solutions détaillées données à la fin de l'ouvrage ou sur le site <http://webast.ast.obs-mip.fr/people/perez/index.html>, les étudiants ont à leur disposition un document suffisamment détaillé sur l'optique qui leur permettra de préparer efficacement leurs examens ou concours.

Son découpage en leçons structurées et quasi autonomes devrait intéresser aussi les candidats aux concours de recrutement de l'enseignement secondaire (CAPES, agrégations, etc.).

Bien que certains thèmes, parfois répertoriés en optique, aient été insérés dans l'ouvrage d'électromagnétisme de la collection (c'est le cas de la dispersion et de l'absorption), notre objectif était de rassembler, dans *un seul* volume, tous les éléments indispensables à une acquisition des connaissances actuelles de l'optique. Ainsi conçu, l'ouvrage s'adresse à tous ceux ou celles qui, au-delà des programmes d'examens ou de concours, s'intéressent à l'optique.

Ce livre doit beaucoup aux étudiants de la licence de physique (L1, L2, L3), et de l'agrégation, ainsi qu'à certains collègues de l'Observatoire Midi-Pyrénées, des universités et des classes préparatoires. Je les remercie pour leurs remarques et commentaires constructifs.

J.-Ph. Pérez  
Octobre 2011



# Les grands noms de l'optique

## Ernst Abbe

Opticien et industriel allemand, né à Eisenach en 1840 et mort à Iéna en 1905. Recruté par K. Zeiss, il améliore les performances de microscopes fabriqués industriellement, notamment par la correction des aberrations chromatiques (cf. nombre d'Abbe ou constringence). Ses recherches sur le stigmatisme le mènent à la condition des sinus sur l'aplanétisme. Celles sur le pouvoir de résolution le conduisent, comme professeur, à élaborer la théorie ondulatoire de la formation des images dans les instruments d'optique (cf. filtrage des fréquences spatiales dans l'expérience d'Abbe). Avec Zeiss, il fonde la Société d'Instruments d'Optique d'Iéna, dont il devient le directeur, à la mort de son associé.

## George Airy

Physicien anglais, né à Alnwick (nord-est de l'Angleterre) en 1801 et mort à Londres en 1892. Après des études à Cambridge, il devient professeur dans cette université, puis directeur de l'Observatoire de Greenwich. C'est lui qui proposa, le premier, une interprétation rigoureuse de l'arc-en-ciel. Il est essentiellement connu pour le calcul de la figure de diffraction donnée par une ouverture circulaire.

## François Arago

Astronome et opticien français, né à Estagel, dans le Roussillon, en 1786, et mort à Paris en 1853. Polytechnicien, il est nommé à 23 ans professeur à l'École Polytechnique, succédant ainsi à G. Monge, afin d'y enseigner la géodésie. Il oriente ses travaux de recherche vers l'optique, notamment dans le but d'améliorer la précision des observations en astronomie. Il s'intéresse alors à la nature ondulatoire et polarisée de la lumière ; dans ce contexte, il découvre la polarisation rotatoire du quartz, ainsi que les conditions d'obtention des franges d'interférence en lumière polarisée. Très influent, il entreprend une carrière politique qui le conduit à rédiger le décret d'abolition de l'esclavage dans les colonies françaises.

## Jacques Babinet

Physicien français, né à Vienne en 1794 et mort à Paris en 1872. Polytechnicien, professeur de mathématiques, puis astronome, Jacques Babinet montre de grandes qualités de vulgarisateur scientifique et d'expérimentateur, dans le domaine de l'optique. Il est surtout connu pour sa contribution en optique ondulatoire, notamment pour le théorème relatif à la diffraction de la lumière par des écrans complémentaires, lequel porte son nom, et pour l'instrument qui permet de mesurer la biréfringence d'un cristal, appelé compensateur de Babinet.

**Friedrich Bessel**

Mathématicien et astronome allemand né à Minden (en Allemagne occidentale) en 1784 et mort à Königsberg (en Russie) en 1846. Remarqué pour ses qualités en mathématiques, par son professeur, l'astronome H. Olbers, il se détourne du commerce pour l'astronomie. Il calcule la trajectoire de la comète de Halley, ce qui lui permet de prendre la responsabilité de la construction de l'observatoire de Königsberg et d'en devenir le directeur. Il est surtout connu pour l'étude des fonctions mathématiques, dites de Bessel, lesquelles jouent un rôle majeur en physique, notamment dans le calcul de la figure de diffraction de Fraunhofer donnée par les pupilles circulaires des télescopes. On lui doit aussi la méthode de Bessel de détermination de la distance focale d'une lentille convergente, ainsi que diverses contributions pour améliorer la qualité des images données par les télescopes.

**Gerd Binnig**

Physicien allemand, né à Frankfurt en 1947. Après des études à Frankfurt, il commence une carrière de chercheur aux laboratoires IBM de Zurich, sous la direction de H. Röhrer. Avec Röhrer, il construit le premier microscope à effet tunnel, ainsi que le premier microscope à force atomique, dont les performances, en terme de résolution, sont de l'ordre du dixième de nanomètre. Tous deux sont récompensés par le prix Nobel en 1986.

**Jean-Baptiste Biot**

Physicien français, né à Paris en 1774 et mort à Paris en 1862. Polytechnicien, professeur au Collège de France, puis professeur d'astronomie à l'Université de Paris, on lui doit de nombreuses contributions dans des domaines très divers : planétologie, acoustique, thermodynamique, électromagnétisme (loi de Biot et Savart), optique. Mais ce sont ses découvertes en optique anisotrope qui le rendent célèbre, notamment le pouvoir rotatoire des liquides et des cristaux, avec la construction du premier saccharimètre.

**William Laurence Bragg**

Physicien anglais, né à Adelaïde en Australie en 1890 et mort à Ipswich (ville du sud-est de l'Angleterre) en 1971. Après des études à Cambridge, il est rapidement associé aux travaux scientifiques de son père Williams Henry Bragg. Il interprète les clichés de diffraction des rayons X par les cristaux, comme une réflexion de ce rayonnement par certains plans réticulaires du cristal, selon la « relation de Bragg ». Il mène alors, avec son père, des travaux sur la détermination des caractéristiques des cristaux, par diffraction des rayons X ; ces travaux furent récompensés par le prix Nobel de physique en 1915, attribué aux Bragg, père et fils. En 1937, après la mort de Rutherford, il succède à ce dernier, à la direction du laboratoire Cavendish de Cambridge.

**René Descartes**

Philosophe, mathématicien et physicien français, né à La Haye-Descartes (Touraine) en 1596 et mort à Stockholm en 1650. Il publie en 1637 un essai, « Dioptrique », dans lequel figure la loi de la réfraction.

**Albert Einstein**

Physicien allemand, naturalisé suisse puis américain, né à Ulm (Allemagne) en 1879 et mort à Princeton (États-Unis) en 1955. Il est considéré, avec Newton, comme le plus grand physicien de tous les temps. Cependant, ses qualités exceptionnelles ne furent remarquées, ni au collège, ni à l'université. En optique, ses contributions sont l'interprétation de l'effet photo-électrique, pour laquelle il reçoit le prix Nobel en 1921, celle de l'expérience de Michelson-Morley, par extension du principe de relativité,

et celle de l'émission stimulée. Il est surtout connu pour la théorie de la relativité restreinte qu'il publie en 1905 et qu'il généralise en 1916, en prenant en compte la gravitation. Son influence en cosmologie est considérable.

### **Charles Fabry**

Physicien français, né à Marseille en 1867 et mort à Paris en 1945. Élève de l'École Polytechnique, il passa l'agrégation en 1889, pour se consacrer à l'enseignement et à la recherche. Il fut professeur au lycée Saint-Louis, puis assistant de Pérot, à Marseille. C'est là qu'il construisit l'interféromètre à ondes multiples, en collaboration avec Pérot ; sa publication majeure sur le fonctionnement de l'instrument date de 1897. Il devint professeur à la Sorbonne en 1921 et Directeur de l'Institut d'Optique à Paris. Ses travaux concernent principalement la spectroscopie et ses applications à la métrologie et à l'astrophysique. C'est lui qui démontra le rôle majeur de l'ozone dans l'absorption du rayonnement ultraviolet. Passionné par l'enseignement, il écrivit plusieurs ouvrages de physique, à destination des étudiants mais aussi d'un public plus large.

### **Michael Faraday**

Physicien et chimiste anglais, né à Southwark en 1791 et mort à Hampton Court en 1876. Garçon de courses chez un bibliothécaire, il devient autodidacte en lisant de nombreux ouvrages scientifiques, notamment de chimie. Employé dans un laboratoire de chimie comme apprenti, il se révèle rapidement expérimentateur de génie. Il devient alors directeur du laboratoire et professeur de chimie. Ses contributions remarquables furent d'abord l'énoncé des lois de l'électrochimie et la découverte du benzène en 1824. En 1854, il énonce la célèbre loi de l'induction, puis la nature discontinue de la charge électrique et sa propriété d'être conservative.

### **Pierre de Fermat**

Mathématicien et physicien français, né à Beaumont de Lomagne en 1601 et mort à Castres en 1665. Sa contribution en optique est le principe variationnel qui donne, la trajectoire des rayons lumineux dans un milieu isotrope quelconque.

### **Hippolyte Fizeau**

Opticien français, né en 1819 à Paris et mort à Festé-sous-Jouarre en 1896. Il fut le premier à mesurer la vitesse de la lumière par une expérience de laboratoire ; il montra expérimentalement, dès 1850, que la composition des vitesses, dans le cas de la lumière se propageant dans un milieu liquide en mouvement, n'était pas de nature newtonienne. Il découvrit la possibilité de mesurer le diamètre des étoiles à partir de méthodes interférométriques liées à la synthèse d'ouverture. Enfin, il étendit à l'optique l'effet Doppler, c'est-à-dire le décalage de fréquence mesuré par un observateur en mouvement par rapport à la source.

### **Léon Foucault**

Physicien français, né à Paris en 1819 et mort à Paris en 1868. Scientifique autodidacte et inventeur de talent, il apporte des contributions importantes dans de multiples domaines, notamment en optique pour corriger les miroirs de leurs aberrations géométriques et pour mesurer avec précision la vitesse de la lumière. Il est surtout connu pour ses apports en mécanique : il met en évidence, de façon spectaculaire, l'influence de la rotation de la Terre sur le comportement d'un pendule simple (pendule de Foucault) et invente le gyroscope. En électromagnétisme, il introduit les courants induits dans la matière, appelés depuis courants de Foucault. Il devient membre de l'Académie des Sciences en 1865.

### **Joseph Fourier**

Mathématicien et physicien français, né en 1768 à Auxerre et mort en 1830. Alors qu'il était préfet de l'Isère, il remporte le prix de l'Académie des Sciences pour son traitement mathématique de la diffusion thermique, par les séries trigonométriques. Il est le premier à avoir établi le caractère irréversible de la diffusion thermique. La décomposition d'un signal variable en ses composantes sinusoïdales est devenue essentielle dans toutes les branches de la physique ; elle est connue aujourd'hui sous le nom d'analyse de Fourier.

### **Joseph Fraunhofer**

Opticien allemand, né à Straubing en 1787 et mort à Munich en 1827. Il étudia la diffraction de la lumière par les réseaux, qu'il fabriqua lui-même, et utilisa ces derniers comme spectromètres pour obtenir le spectre du Soleil, ce qui lui permit d'établir une classification spectrale des étoiles.

### **Augustin Fresnel**

Ingénieur et physicien français, né à Chambray ou Broglie dans l'Eure en 1788 et mort de la tuberculose à Ville d'Avray (région parisienne) en 1827. Bien que chétif et « attardé pour apprendre à lire », il entre à l'École Polytechnique où il se fait remarquer par ses professeurs Monge et Poisson. Très vite, il se penche sur les problèmes fondamentaux qui se posent sur la nature de la lumière. Il est conduit à approfondir les expériences d'Young ; il s'oppose alors aux idées de Newton en défendant l'interprétation ondulatoire de Huygens. Il étudie également la diffraction à distance finie, ainsi que la polarisation de la lumière et sa propagation dans les milieux cristallins. Il présente un mémoire complet sur ce dernier sujet à l'Académie des Sciences en 1823. Parallèlement à cette activité de physicien, il est connu comme ingénieur pour être à l'origine des lentilles à échelons, utilisées dans les phares ; ces lentilles, formées d'anneaux de verre concentriques, sont capables de produire des faisceaux lumineux à la fois intenses et directionnels.

### **Dennis Gabor**

Physicien anglais, d'origine hongroise, né à Budapest en 1900 et mort à Londres en 1979. C'est en voulant corriger les aberrations géométriques des lentilles magnétiques, utilisées en microscopie électronique, qu'il imagine une méthode originale de reconstruction d'un front d'onde. Il montre qu'il est possible, en s'appuyant sur les phénomènes d'interférence, de restituer non seulement l'amplitude réelle d'une onde mais aussi sa phase. Cette invention, appelée holographie, lui valut le prix Nobel en 1971.

### **Wilhelm Haidinger**

Minéralogiste autrichien, né en 1795 à Vienne et mort en 1871 à Vienne. Il est l'auteur de travaux sur l'interférométrie lumineuse et le dichroïsme.

### **William Rowan Hamilton**

Mathématicien et physicien irlandais, né à Dublin en 1806 et mort près de Dublin en 1865. Enfant prodige puis étudiant génial, il impressionne, à 22 ans, l'Académie Royale d'Irlande, en présentant un exposé moderne sur la théorie des rayons lumineux. Ce travail est le point de départ d'une contribution capitale en dynamique qui s'achèvera en 1833 sur une remarquable analogie entre l'optique et la mécanique. Cette synthèse débouchera sur la relation de L. de Broglie et sur l'équation de Schrödinger en mécanique ondulatoire.

### **William Herschel**

Physicien allemand, né à Hanovre en 1738 et mort à Slough, à l'ouest de Londres, en 1822. Professeur de musique, il se passionne pour l'astronomie expérimentale, en autodidacte sans formation scientifique. La qualité optique des télescopes qu'il construit lui permet de découvrir la planète Uranus en 1781. Rendu ainsi célèbre, il peut se consacrer totalement à ses recherches en astronomie ; il découvre le satellite Titan d'Uranus et le rayonnement infrarouge du Soleil. En optique géométrique, c'est lui qui établit la condition de conservation du stigmatisme le long de l'axe des systèmes centrés, laquelle porte son nom.

### **Christian Huygens**

Mathématicien, astronome et physicien hollandais, né à La Haye en 1629 et mort en 1695. Il fut à l'origine de la théorie ondulatoire de la lumière et, à ce titre, s'opposa à la théorie corpusculaire de Newton. Il interpréta la propagation rectiligne de la lumière dans les milieux isotropes, en introduisant le concept de surface d'onde. Expérimentateur confirmé, il découvrit, avec les instruments d'optique qu'il mit lui-même au point (oculaire de lunette astronomique), les anneaux de Saturne ainsi que le satellite Titan.

### **Pierre Simon Marquis de Laplace**

Astronome, mathématicien et physicien français, né à Beaumont en Auge en 1749 et mort à Paris en 1827. Bien que professeur de mathématiques et homme politique, ses travaux en physique sont nombreux. Il signe diverses contributions sur la capillarité, la propagation du son dans l'air, l'évolution adiabatique des gaz ; en électromagnétisme, il est connu pour avoir établi l'équation de Laplace de l'électrostatique, la force de Laplace exercée par un champ magnétique sur un courant et le travail correspondant. Cependant, c'est sa publication sur la mécanique céleste, *Exposition du système du monde*, qui est la plus remarquable. On y trouve développée notamment sa conception d'un déterminisme rigoureux, à la base d'une physique totalement prédictive. Il devient membre de l'Académie des Sciences en 1783. Il fut ministre de l'Intérieur de Bonaparte, puis vice-président du Sénat sous Napoléon ; enfin, il devint marquis sous Louis XVIII.

### **Bernard Lyot**

Physicien français, né à Paris en 1897 et mort au Caire en 1952. Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité de Paris, puis assistant de Pérot à l'École Polytechnique, Bernard Lyot prépare sa thèse, à l'Observatoire de Meudon, sur la polarisation de la lumière solaire, diffusée par la Lune et les planètes. En 1930, il propose d'étudier la polarisation de la lumière émise par la couronne solaire, en utilisant un nouveau dispositif qu'il construit, le coronographe, ainsi qu'un filtre monochromatique adapté à l'analyse spectrale de la lumière polarisée.

### **Étienne Malus**

Physicien français, né à Paris en 1772 et mort à Paris en 1812. À la sortie de l'École Polytechnique, il participe à la campagne d'Égypte de Napoléon. Il est connu essentiellement pour ses travaux en optique géométrique (théorème de Malus sur l'orthogonalité des rayons lumineux aux surfaces d'onde dans les milieux isotropes), et sur la polarisation de la lumière par biréfringence (optique cristalline) et par réflexion (miroirs de Malus). Il meurt à quarante ans du choléra.

### **James Clerk Maxwell**

Physicien britannique, né en 1831 à Dumfriesshire (Écosse) et mort à Cambridge en 1879, d'un cancer à l'estomac. En 1857, il publie un article sur la constitution probable des anneaux de Saturne, ce qui le fait connaître de la communauté scientifique et l'incite à s'intéresser aux systèmes constitués d'un grand nombre de particules. Il établit alors les principaux résultats de la théorie cinétique des gaz. C'est ensuite comme professeur d'université au King's College de Londres qu'il travaille sur l'électro-

magnétisme, chez lui (!) assisté par son épouse. Sa contribution décisive sur les équations de l'électromagnétisme date de 1876. Il est ensuite nommé à Cambridge pour diriger la construction du célèbre « Cavendish Laboratory ».

### **Albert Michelson**

Physicien américain d'origine polonaise, né à Strzelno en 1852 et mort en 1931. Expérimentateur de génie, il construisit un interféromètre, devenu désormais célèbre, pour mettre en évidence de très faibles chemins optiques, ce qui permit d'établir expérimentalement l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide. Il reçut le prix Nobel en 1907 pour cette dernière contribution. Il développa, en outre, la technique de la synthèse d'ouverture, imaginée par Fizeau, pour déterminer le diamètre apparent des étoiles par des méthodes interférométriques.

### **Isaac Newton**

Mathématicien, astronome et physicien anglais, né en 1642 à Woolsthorpe et mort en 1727 à Kensington. Il est considéré, avec Einstein, comme le plus grand physicien de tous les temps. Curieusement et comme ce dernier, il fut un élève moyen, qui ne révéla au collège aucune capacité exceptionnelle. C'est à Cambridge que l'on remarqua ses grandes possibilités. Plus influencé par Descartes que par Aristote, il publie en 1687 une synthèse magistrale de la mécanique, « Principia mathematica » ; il y énonce les fondements de la dynamique et relie, en introduisant la loi de la gravitation universelle, le mouvement des planètes et la chute des corps. En optique, il s'opposa à Huygens et à Hooke, adeptes d'une théorie ondulatoire de la lumière. Cependant, sa contribution dans cette discipline, publiée dans « Opticks », est, elle aussi, exceptionnelle : il interprète la décomposition spectrale de la lumière, à partir d'expériences conçues avec des prismes, et montre que la couleur blanche est un mélange des différentes couleurs spectrales ; il explique aussi la formation des images par des miroirs et suggère même la possibilité d'échanges entre lumière et matière.

### **Alfred Pérot**

Physicien français, né à Metz en 1863 et mort à Paris en 1925. À la sortie de l'École Polytechnique, il enseigne au lycée de Nancy, puis rejoint l'Université de cette ville, pour effectuer des travaux de recherche sous la direction de R. Blondlot, tristement célèbre pour sa prétendue découverte des rayons N (neutres). Il passe un doctorat à Paris en 1888 sur les constantes thermodynamiques et devient professeur à l'Université de Marseille. C'est là qu'il commence une collaboration fructueuse avec C. Fabry dans le domaine de l'interférométrie optique. La contribution de Pérot fut principalement d'ordre pratique et mécanique. Il dirigea ensuite le Conservatoire des Arts et Métiers, puis succéda à H. Becquerel comme professeur de physique à l'École Polytechnique. Enfin, il tenta, en vain, de vérifier la formule relativiste donnant le décalage vers le rouge du rayonnement émis par les étoiles.

### **John Strutt ou Lord Rayleigh**

Physicien anglais, né à Lanford Grove en 1842 et mort à Witham (Essex) en 1919. Ce fils d'aristocrate s'intéressa à un grand nombre de sujets en physique en travaillant de façon originale, chez lui en dehors de tout environnement universitaire. Ses contributions furent décisives dans de nombreux domaines : la propagation du son, l'hydrodynamique, la théorie ondulatoire de la lumière, la vision des couleurs, la diffusion de la lumière (interprétation du bleu du ciel), le rayonnement du corps noir, etc. Il succéda à Maxwell, en 1879, pour diriger le Cavendish Laboratory à Cambridge. Il obtint en 1904 le prix Nobel de physique pour la découverte de l'argon. Avec Maxwell et W. Thomson (Lord Kelvin), il est considéré comme l'un des trois plus grands physiciens britanniques du XIX<sup>e</sup> siècle.

### **Heinrich Röhrer**

Physicien suisse né à Buchs en 1933. Après des études à Zurich, il prépare une thèse sur la transition vers l'état supraconducteur. En 1963, il est recruté comme chercheur au laboratoire IBM de Zurich. En 1978, il accueille G. Binnig et l'encadre pour la construction du premier microscope à effet tunnel, ainsi que du premier microscope à force atomique, dont les performances, en terme de résolution, sont de l'ordre du dixième de nanomètre. Tous deux sont récompensés par le prix Nobel en 1986.

### **Willebrord Snell**

Astronome et mathématicien hollandais, né à Leyde en 1580 et mort dans cette même ville en 1626. Il est surtout connu en optique pour avoir découvert, en 1621, la loi de la réfraction que retrouva Descartes quelques années plus tard.

### **Thomas Young**

Médecin et physicien anglais, né à Milverstone en 1773 et mort à Londres en 1829. Bien que surdoué en langues (grec, latin, persan, hébreu, arabe, etc.), il s'intéressa à la physique et notamment à l'optique. Il fit des contributions remarquables dans l'étude de la vision, des phénomènes d'interférence et des couleurs.

### **Frederik Zernike**

Opticien néerlandais, né à Amsterdam en 1888 et mort en 1966. Il est à l'origine de deux contributions décisives en optique : la première, le contraste de phase, qui lui valut le prix Nobel en 1953, est à la base d'une technique qui permet d'observer des objets de phase faible, invisibles par l'imagerie habituelle ; la seconde est la synthèse d'ouverture, c'est-à-dire la relation entre la distribution spatiale d'intensité d'un objet et le contraste des franges d'interférence, que l'on obtient en utilisant un interféromètre éclairé par cet objet.