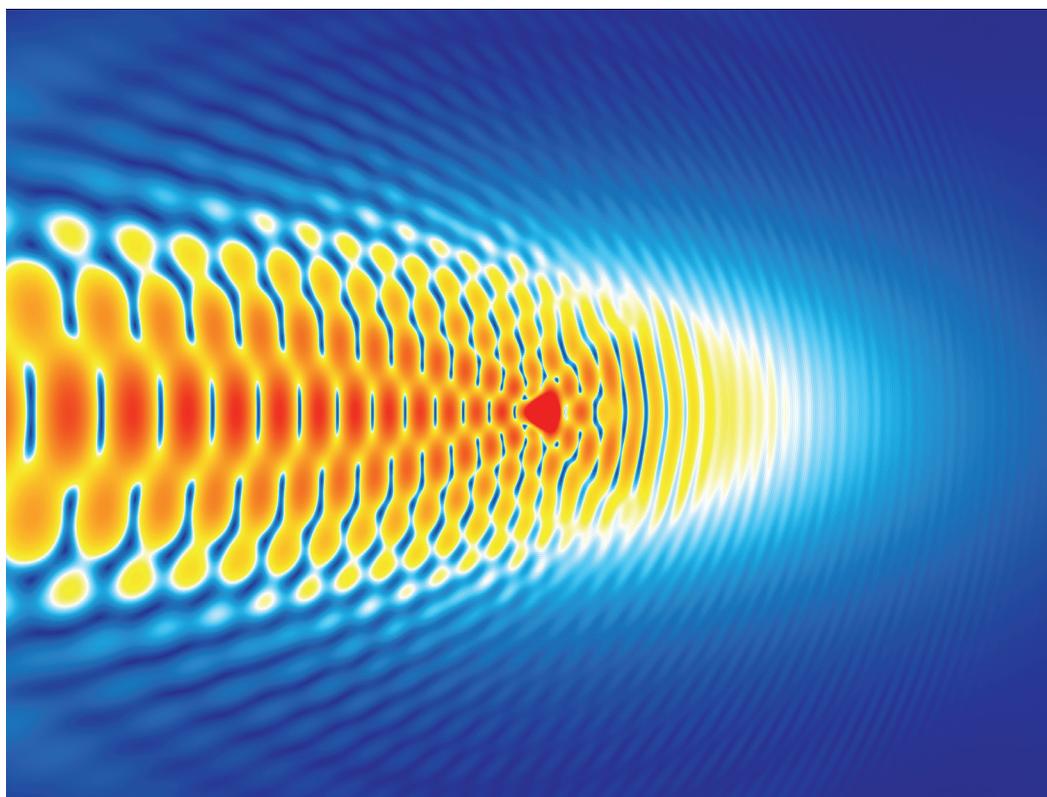


Germain Chartier

# Manuel d'optique

*2<sup>e</sup> édition*



**L**avoisier  
hermes

# Manuel d'optique

2<sup>e</sup> édition

Germain Chartier

The logo features a red square containing a white letter 'L'. To the right of the square, the word 'Lavoisier' is written in a black serif font. A horizontal line is drawn under 'Lavoisier', and the word 'hermes' is written in a black cursive font below the line.

**L**avoisier  
hermes

## Chez le même éditeur

Signaux optiques (Collection Information numérique)  
GALLION Philippe, 2018

Introduction à l'optique électromagnétique  
BERNARDOT Frédéric, 2018

Nano-optique du solide (Traité EGEM, série optoélectronique)  
JACQUIER Bernard (Coord.), 2012

Holographie numérique  
LI Jun-Chang, PICART Pascal, 2012

Matériaux artificiels : ingénierie de dispersion des micro-ondes à l'optique  
(Micro et nano électronique et systèmes, RTA)  
VANBÉSIEN Olivier, 2012

Propagation guidée (Traité EGEM, série électronique et micro-électronique)  
PASQUET Daniel, 2011

Télécommunications optiques sans fil (Collection Télécom)  
BOUCHET Olivier, 2011

L'optique dans les instruments (EGEM, série Optoélectronique)  
GOURE Jean-Pierre (Coord.), 2011

*Direction éditoriale : Jean-Marc Bocabeille*

Pour plus d'informations sur nos publications :



[newsletters.lavoisier.fr/9782746249059](https://newsletters.lavoisier.fr/9782746249059)

© 2020, Lavoisier, Paris ISBN : 978-2-7462-4905-9  
(ISBN : 978-2-86601-634-0 1<sup>re</sup> édition)

# Avant-Propos et Remerciements

Ce Manuel d'Optique est une réédition de celui qui était paru en 1997, c'est à dire une quarantaine d'années après que les lasers, telle une lumière magique, étaient venus éclairer le paysage trop tranquille de la Physique et en particulier de l'Optique vers la fin de la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Traduit en anglais il a été réédité aux USA en 2004 par Springer, sous le titre *Introduction to Optics*.

*A la suite de Richard Feynman*

Parmi tous les auteurs d'ouvrages destinés à l'enseignement de la physique, Richard Feynman est celui qui a apporté le plus d'idées originales. La façon qu'avait ce prix Nobel de Physique de « voir » et de « raconter » la Physique a certainement considérablement influencé les enseignants des générations qui l'ont suivi.

En écrivant ses livres Richard Feynman pensait à des étudiants, avant de penser à la matière qu'il décrivait. Dans sa préface des *Lectures on Physics*; il le précise clairement :

*The special problem we tried to get at with these lectures was to maintain the interest of the very enthusiastic and rather smart students coming out of the high-schools and into Caltech.*

L'attitude de Feynman à l'égard de la place des mathématiques dans l'enseignement de la physique est bien résumée par G.Delacôte dans sa préface à l'édition française du Cours de Feynman :

*A aucun moment l'outillage mathématique ne vient entraver la compréhension des phénomènes physique. Bien au contraire, cet outillage est conçu pour répondre aux problèmes que se pose le physicien, il en résulte que le lecteur découvre à la fois les grands problèmes de physique et les outils mathématiques indispensables pour les résoudre le plus simplement possible.*

C'est en essayant de suivre le plus possible cette approche *feynmannienne* de l'enseignement de la Physique que j'avais essayé d'écrire l'ouvrage original. Pour cette nouvelle édition j'ai bien évidemment gardé la même attitude que j'ai également demandé d'adopter aux nombreux auteurs qui ont bien voulu m'aider à enrichir le Manuel d'Optique.

Un auteur est toujours flatté quand son éditeur, arguant du succès d'un de ses ouvrages, lui demande de procéder à une nouvelle édition. Cette fierté est rapidement suivie d'une inquiétude quant à savoir ce que la nouvelle édition va pouvoir apporter pour susciter le même intérêt que la précédente et tenir compte du développement de la discipline.

Pour m'aider à résoudre cette difficulté je me suis adressé à deux de mes anciens élèves, Raphaël CLERC, professeur à l'Université de Saint Etienne et à l'Institut d'Optique (Graduate School) et à Guy VITRANT, directeur de Recherche au CNRS à Grenoble-INP. Je tiens à les remercier très sincèrement ici pour l'aide amicale, affectueuse et surtout très efficace qu'ils m'ont apportée au cours des nombreuses réunions de travail que nous avons eues. Leur très bonne insertion dans la Communauté des opticiens leur a permis de me recommander les chercheurs et enseignants-chercheurs auxquels j'ai demandé de relire, de modifier voire de réécrire des parties importantes de cette nouvelle édition.

J'ai donc demandé à de nombreux collègues de bien vouloir collaborer à cette nouvelle édition, pratiquement tous ont immédiatement accepté. Les seuls refus étaient dus à un engagement contractuel avec un autre éditeur ou à des charges trop lourdes au sein de la Communauté scientifique.

La plupart des fichiers électroniques de l'édition précédente étant devenus obsolètes, en particulier en ce qui concerne les figures, de nombreuses parties ont dû être saisies à nouveau, entraînant un important et délicat travail de relecture et de vérification. Je suis très reconnaissant envers Grenoble-INP, établissement où j'ai effectué la plus grande partie de ma carrière, qui a bien voulu choisir deux étudiants de seconde année de l'Ecole d'Ingénieurs PHELMA et les rémunérer pour qu'ils relisent les différents chapitres.

Je tiens à remercier chaleureusement ces deux étudiants, Cyprien Beaufort et Jean Michel Pichonat, pour la rigueur et la minutie dont ils ont fait preuve. Pendant plus d'une année la collaboration entre ces jeunes scientifiques et le vieux professeur a été parfaitement harmonieuse et efficace, sans l'aide de Jean-Michel et de Cyprien cette nouvelle édition n'aurait pas pu être menée à son terme. Je ne doute pas qu'ils feront une brillante carrière de chercheurs et/ou d'ingénieurs.

On trouvera par ailleurs la liste complète des personnes qui ont collaboré à cette nouvelle édition, je leur suis très reconnaissant pour le travail, souvent conséquent, qu'ils ont fourni. Compte tenu du nombre important de physiciens qui ont ainsi contribué à cette réédition, j'ai décidé que les droits d'auteur correspondants seraient versés à la Société Française d'Optique.

Des étudiants de Phelma à Grenoble au vieux bonhomme que je suis, on peut dire que des physiciens de 23 à 83 ans ont contribué à cette réédition.

L'idée de cette réédition est issue de conversations entre l'auteur et Mme Sylvie Cortès que je remercie vivement car elle a joué un grand rôle pour que le Manuel

d'Optique soit réédité, de même que M. Jean Marc Bocabeille, Directeur du département édition de Lavoisier SAS, qui a toujours été d'un contact agréable et surtout d'une grande efficacité.

Germain Chartier

## **LISTE alphabétique des auteurs qui ont participé à la réédition du Manuel d'Optique**

*La contribution de chaque auteur est précisée au début, ou au cours, de chacun des différents chapitres.*

- André Luc, Ingénieur CEA-Grenoble (Optique géométrique-capteur d'images)
- Broquin Jean Emmanuel, Professeur, Grenoble-INP, (Optique guidée)
- Carlotti Alexis, Astronome, Université des Alpes Grenoble, (Optique géométrique-Optique adaptative)
- Chavel Pierre, Directeur Recherche au CNRS, Institut d'Optique-Graduate School, Palaiseau, (Interférence, Diffraction)
- Clerc Raphaël, Professeur, Institut d'Optique Graduate School & Université de Saint Etienne, (Grandeurs et ordres de grandeur de l'optique, Ondes Electromagnétiques)
- Delaye Philippe, Directeur Recherche au CNRS, Institut d'Optique-Graduate School Palaiseau, (Optique non linéaire)
- Druon Frédéric, Directeur Recherche au CNRS, Institut d'Optique-Graduate School Palaiseau.(Amplification à dérive de fréquence ou CPA)
- Dubois Arnaud, Professeur, Institut d'Optique-Graduate School, Palaiseau (Interférence-Tomographie par OCT)
- Gaborit Gwenaël, Maître de conférences, Université Savoie Mont Blanc, (Biréfringence)
- Girard-Desprolet Romain Ingénieur R&D, STMicroelectronics (Optique géométrique-Capteurs d'images)
- Hello Patrice, Professeur, IN2P3-Université-Paris Sud Orsay, (Interférence-Interféromètre Virgo)
- Labeye Marie, Maitresse de Conférences à l'ENS-Paris, Chercheuse au Laboratoire PASTEUR (Processus d'Activation Sélectif par Transfert d'Énergie Uni-électronique ou Radiatif), École Normale Supérieure Paris.
- Lacot Éric, Professeur, Université Grenoble Alpes, (Laser)
- Laplatine Loïc, post-doctorant de la Fondation NanoScience, Aryballe CEA/Leti, Grenoble, (Lumière polarisée-lois de la réflexion-Plasmons de surface)
- Livache Thierry, Directeur Scientifique d'Aryballe Technologies, CEA Grenoble, (Lumière polarisée-lois de la réflexion-Plasmons de surface)
- Meyzonnette Jean Louis, Professeur, Institut d'Optique Graduate School Palaiseau, (Optique géométrique)
- Vitrant Guy, Directeur de Recherche CNRS, Grenoble-INP, (Indice de réfraction)

# Table des matières

Avant-propos.....	III
-------------------	-----

## Chapitre 1

Grandeurs et ordres de grandeur de l'Optique.....	1
---	---

1.1. Les principales applications des ondes électromagnétiques.....	1
1.2. Dualité onde-corpuscule.....	5
1.3. Qu'est-ce qu'une onde ?.....	7
1.4. Rayonnement dipolaire électrique.....	13
1.5. Détecteurs de lumière.....	21
1.6. Interférence, diffraction.....	33
1.7. Photométrie.....	41
1.8. Perception et reproduction des couleurs.....	51

## Chapitre 2

Ondes Electromagnétiques.....	55
-------------------------------	----

2.1. Le formalisme de l'électromagnétisme.....	55
2.2. Les principaux types d'ondes.....	60
2.3. Solution des équations de Maxwell pour des ondes harmoniques planes....	63

2.4. Structure d'une onde plane solution des équations de Maxwell .....	68
2.5. Ondes harmoniques quelconques .....	72
2.6. Ondes sphériques .....	75

### Chapitre 3

## Optique géométrique .....

3.1. Propagation géométrique de la lumière .....	87
3.2. Principe de Fermat.....	89
3.3. Trois composants simples .....	99
3.4. Lentilles minces .....	102
3.5. Systèmes centrés dans les conditions de Gauss.....	110
Annexe A Lentilles minces.....	124
Annexe B Prismes .....	130
Annexe C Gradients d'indice de réfraction, Optique corpusculaire.....	134
Annexe D Optique adaptative .....	144
Annexe E Capteurs d'Images.....	152

### Chapitre 4

## Lumière polarisée - Lois de la réflexion.....

4.1. Caractère vectoriel transversal de la vibration lumineuse .....	166
4.2. Analyseurs - Polariseurs.....	170
4.3. Réflexion - réfraction vitreuse.....	173
Annexe A Modes TE – modes TM .....	191
Annexe B Plasmons de surface.....	193
Annexe C Détermination d'une Polarisation .....	198

### Chapitre 5

## Biréfringence.....

5.1. Double réfraction.....	200
5.2. Le tenseur susceptibilité diélectrique .....	201
5.3. Ondes planes solutions des équations de Maxwell en milieu anisotrope ...	204

5.4. Constructions des faisceaux réfractés sur un dioptre anisotrope.....	210
5.5. Forme des surfaces caractéristiques .....	214
5.6. Biréfringence circulaire .....	218
5.7. Biréfringence induite .....	224
Annexe A Tracé de rayons dans des milieux anisotropes uniaxes .....	247
Annexe B Surfaces caractéristiques des milieux anisotropes .....	255
Annexe C Interférences en lumière polarisée-Lames de phase.....	263
Annexe D Cristaux liquides .....	274

## Chapitre 6

### Interférences .....

282

6.1. Montages à dédoublement d'un front d'onde .....	283
6.2. Montages à dédoublement d'amplitude .....	289
6.3. Interféromètre à deux ondes .....	298
6.4. Interféromètre de Perot-Fabry .....	306
6.5. Interférences dans des empilements de couches minces .....	317
6.6. L'interféromètre Virgo .....	326
Annexe A Compléments sur la cohérence.....	331
Annexe B Tomographie par cohérence optique.....	339

## Chapitre 7

### Diffraction.....

346

7.1. Postulat de Huygens-Fresnel .....	316
7.2. Diffraction de Fraunhofer .....	355
7.3. Diffraction de Fresnel.....	364
7.4. Réseaux de diffraction.....	368
7.5. Holographie.....	379
7.6. Optique diffractante et optique diffractive .....	388
7.7. Quelques mots de nanophotonique .....	389
7.8. Diffraction et traitement d'images.....	392
7.9. Speckle.....	399

<b>Chapitre 8</b>	
<b>Indice de réfraction</b> .....	408
8.1. Mécanismes physiques de la propagation dans un milieu matériel .....	408
8.2. Calcul de l'indice de réfraction.....	410
8.3. L'indice de réfraction est un nombre complexe .....	417
8.4. Indice de réfraction et populations des niveaux d'une transition DPE.....	422
Annexe A Rayonnement dipolaire électrique .....	424
Annexe B Formules de Kramers-Krönig .....	434
Annexe C .....	437

<b>Chapitre 9</b>	
<b>Laser</b> .....	444
9.1. Généralités .....	444
9.2. Le Processus d'amplification optique .....	454
9.3. Comment obtenir une inversion de population.....	477
9.4. Le résonateur Fabry-Pérot.....	483
9.5. Caractéristiques spectrales de la lumière produite par un lase.....	493
9.6. Dynamique de l'émission laser.....	499
9.7. Originalité de la lumière laser .....	511
Annexe A Interaction lumière-semiconducteurs .....	513
Annexe B Largeur spectrale d'une raie laser .....	519
Annexe C Amplification à dérive de fréquence (CPA) .....	521

<b>Chapitre 10</b>	
<b>Optique non linéaire</b> .....	528
10.1. Généralités sur les effets non linéaires en Physique .....	529
10.2. Polarisation non linéaire.....	537
10.3. Équations de propagation en milieu non linéaire .....	542
10.4. Phénomènes non linéaires d'ordre trois .....	552
10.5. Conclusion et bibliographie.....	560
Annexe A Génération d'harmoniques d'ordres élevés .....	562

<b>Chapitre 11</b>	
<b>Diffusions Raman-Brillouin-Rayleigh.....</b>	<b>565</b>
11.1. Présentation générale des interactions type Raman ou Brillouin.....	565
11.2. Introduction expérimentale de l'effet Raman .....	567
11.3. Étude théorique de l'effet Raman .....	574
11.4. Diffusion Brillouin .....	587
Annexe A Diffusion de la lumière par un milieu dispersé.....	599
 <b>Chapitre 12</b>	
<b>Optique Guidée .....</b>	<b>604</b>
12.1. Introduction.....	604
12.2. Fibres optiques.....	616
12.3. Photonique Intégrée .....	624
Annexe A Atténuation des fibres de silice.....	633
Annexe B Technologie des guides à fibre optique .....	635
Annexe C Technologie de la Photonique intégrée.....	641
<b>Index.....</b>	<b>648</b>



