

Avant-propos

J'ai rédigé ce livre pour répondre à un manque d'ouvrages couvrant la totalité du programme d'optique : cours, travaux dirigés et pratiques des Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles (CPGE), des Ecoles d'Ingénieurs, des Facultés des Sciences, de Médecine et de Pharmacie. Il résulte d'une expérience d'enseignement d'optique depuis 1985, au Département de Physique de l'Université Ibn Tofaïl, Faculté des Sciences de Kénitra, Maroc.

L'optique était considérée, jusqu'à la fin du XIX^e siècle, comme une branche de la physique qui s'intéresse aux phénomènes qui impressionnent l'œil grâce à la lumière ; la rétine étant le détecteur de la lumière. L'apparition de nouveaux dispositifs qui transforment les ondes lumineuses en un signal électrique, chimique ou thermique, comme la cellule photoélectrique, les photopiles et les capteurs photographiques CCD et CMOS, a permis à cette discipline d'élargir son domaine spectral depuis les ondes millimétriques jusqu'aux rayons X en passant par le spectre visible par l'être humain. L'optique s'intéresse à la propagation et à la détection de toutes ces ondes électromagnétiques.

L'avènement du laser et la possibilité de transporter l'information le long de fines fibres de verre a permis à l'optique de devenir un outil indispensable dans divers domaines, notamment la recherche scientifique, la médecine et la technologie de communication.

L'optique peut être structurée en trois blocs lorsque la cause des phénomènes observés est la lumière :

- **Optique géométrique** : construite entre le XI^e et le XVIII^e siècle.
Elle est considérée comme un modèle simplifié permettant d'expliquer, entre autres, la formation des images produites par des systèmes dioptriques, catadioptriques et catoptriques centrés en s'appuyant sur deux principes :
 - Le principe de propagation rectiligne : dans un milieu homogène, transparent et isotrope, la lumière se propage en ligne droite.
 - Le principe de retour inverse : le trajet suivi par la lumière ne dépend pas du sens de propagation.La validité des lois de l'optique géométrique suppose que la dimension de l'ouverture traversée par la lumière est grande devant la longueur d'onde de la lumière.
- **Optique physique** ou **ondulatoire** : développée au XIX^e siècle.
Après avoir construit sa théorie électromagnétique, Maxwell a considéré la lumière comme une forme d'énergie électromagnétique qui se propage, c'est-à-dire c'est la propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui varient dans l'espace et dans le temps.
En s'appuyant sur cette nature ondulatoire de la lumière, l'optique physique permet d'expliquer les phénomènes d'interférences obtenus lorsque deux ou plusieurs vibrations lumineuses se superposent et donnent une vibration résultante dont l'amplitude fluctue avec la différence de phase des ondes superposées. Elle permet aussi d'expliquer les phénomènes de diffraction observés lorsque la largeur de l'ouverture traversée par l'onde lumineuse est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière.
- **Optique quantique** : élaborée au XX^e siècle.
Elle s'intéresse à l'ensemble des phénomènes physiques faisant intervenir l'interaction lumière-matière.
Pour interpréter l'éjection d'électrons par un métal (du Zinc) soumis à l'action d'un rayonnement électromagnétique (UV), Einstein a associé à l'onde lumineuse un caractère corpusculaire. Chaque corpuscule, baptisé photon, transporte une énergie $W = h\nu$ (h est la constante de Planck).
C'est ainsi que des phénomènes comme l'absorption ou l'émission de

la lumière par la matière ne peuvent être expliqués que dans le cadre quantique.

La lumière a donc un double aspect :

- un aspect ondulatoire mis en évidence dans les phénomènes d'interférences, de diffraction et de polarisation de la lumière ;
- un aspect corpusculaire mis en évidence dans les phénomènes résultant de l'interaction lumière-matière.

Seul le caractère ondulatoire de la lumière sera considéré dans ce livre.

J'ai volontairement limité le contenu de cet ouvrage en évitant de détailler inutilement certaines démonstrations théoriques. Mais j'ai illustré le cours et les exercices par des représentations graphiques et des courbes réalisées par des logiciels généraux ; et par des images prises de sites Web dont les références sont données sous forme de notes de bas de page.

Ce livre est structuré en treize chapitres et a pour objectifs :

- d'introduire la notion d'onde électromagnétique et sa propagation dans un milieu homogène, transparent et isotrope ;
- de retrouver les lois de Snell-Descartes de réflexion et de réfraction en se basant sur le principe de Fermat ;
- d'examiner les conditions d'émergence de la lumière dans un prisme et de transmission à travers une fibre optique ;
- d'établir les conditions de stigmatisme rigoureux d'un système optique ;
- d'expliquer la formation des images en optique géométrique dans les conditions d'approximation de Gauss ;
- de modéliser un système optique centré en déterminant ses éléments cardinaux ;
- de préciser le principe de fonctionnement de quelques instruments d'optique ;
- d'étudier les phénomènes d'interférences lumineuses à deux ondes par division du front d'onde et à deux ondes ou à ondes multiples par division d'amplitude ;

- de préciser le principe de fonctionnement des interféromètres de Michelson et de Fabry-Pérot ; et l'intérêt pratique d'une cavité optique, d'un filtre interférentiel et d'une couche antireflet ;
- d'interpréter les phénomènes de diffraction de type Fraunhofer d'une onde lumineuse plane en s'appuyant sur le principe de Huygens-Fresnel ;
- d'étudier les différents états de polarisation d'une vibration lumineuse et d'introduire la notion de biréfringence de milieux anisotropes ;
- de mesurer des distances focales de lentilles minces et les diamètres de fils fins à l'aide d'un microscope optique ;
- d'apprendre à utiliser un goniomètre et déterminer avec précision l'indice de réfraction d'un prisme ;
- de réaliser, à l'aide de fentes fines, des phénomènes d'interférences et de diffraction et mesurer la longueur d'onde d'un laser Hélium-Néon.

A la fin de chaque chapitre, des exercices et des problèmes d'examens sont proposés avec des corrigés très détaillés. Ils permettent à l'étudiant de tester ses connaissances et d'approfondir les différentes notions abordées dans le cours.

Je serai très reconnaissant aux lecteurs de ce livre qui me feront part de leurs critiques et suggestions.

hamid.najib@uit.ac.ma

Table des matières

1	LUMIERE - MILIEUX DE PROPAGATION	15
1.1	Onde électromagnétique	15
1.2	Onde lumineuse - Source de lumière	15
1.3	Milieu de propagation	17
1.4	Equations de Maxwell	17
1.5	Equation de propagation d'une OEM	18
1.6	Surface d'onde	18
1.7	Onde plane progressive	19
1.8	Onde sphérique progressive	20
1.9	Structure d'une onde plane progressive	21
1.10	Onde monochromatique	21
1.11	Indice de réfraction	24
1.12	Chemin optique	26
1.13	EXERCICES RESOLUS 1	28
	Exercice 1.1 : Propagation des ondes électromagnétiques . . .	28
	Exercice 1.2 : Onde monochromatique - Photon	33
2	PRINCIPES ET LOIS	35
2.1	Principe de Fermat	35
2.2	Rayon lumineux - Faisceau lumineux	36
2.3	Principes de l'optique géométrique	37
2.4	Surfaces optiques	38

2.5	Lois de Snell-Descartes	38
2.6	Angle de réfraction limite	41
2.7	Angle d'incidence critique	41
2.8	Réflexion totale	42
2.9	EXERCICES RESOLUS 2	42
	Exercice 2.1 : Principe de Fermat	42
	Exercice 2.2 : Filtre achromatique	45
	Exercice 2.3 : Indice de réfraction de l'air	46
	Exercice 2.4 : Incidence de Brewster	48
	Exercice 2.5 : Réfractomètre - Mesure de l'indice d'un liquide	48
	Exercice 2.6 : Déviation de la lumière par une goutte d'eau	50
	Exercice 2.7 : Déviation par une demi-boule	51
	Exercice 2.8 : Déviation par un cube	53
	Exercice 2.9 : Source placée au fond d'une cuve	54
	Exercice 2.10 : Réflexions sur deux miroirs	56
3	PRISME - FIBRE OPTIQUE	57
3.1	Prisme	57
3.2	Fibre optique	62
3.3	EXERCICES RESOLUS 3	65
	Exercice 3.1 : Réflexion totale à l'intérieur d'un prisme	65
	Exercice 3.2 : Prismes accolés	67
	Exercice 3.3 : Goniomètre - Spectromètre à prisme	70
	Exercice 3.4 : Fibre optique à saut d'indice	72
	Exercice 3.5 : Temps de réponse d'une fibre optique	73
4	APPROXIMATION DE GAUSS	75
4.1	Système optique centré	75
4.2	Points conjugués - Stigmatisme	76
4.3	Condition d'aplanétisme d'Abbe	79
4.4	Condition d'Herschel	79
4.5	Grandissement d'un système optique	80
4.6	Approximation de Gauss	80
4.7	Application au dioptre sphérique	81

4.8	Application au dioptre plan	84
4.9	Application au miroir sphérique	85
4.10	Application au miroir plan	86
4.11	EXERCICES RESOLUS 4	87
	Exercice 4.1 : Dioptre sphérique - Relations de conjugaison . .	87
	Exercice 4.2 : Foyers d'un dioptre sphérique	90
	Exercice 4.3 : Dioptre sphérique - Image d'un objet filiforme . .	92
	Exercice 4.4 : Œil - Goutte de larme	93
	Exercice 4.5 : Dioptre plan - Stigmatisme	94
	Exercice 4.6 : Lampe à faces parallèles	95
	Exercice 4.7 : Surfaces stigmatiques par réflexion	97
	Exercice 4.8 : Caractéristiques d'un miroir sphérique	99
	Exercice 4.9 : Grandissement d'un miroir sphérique	99
	Exercice 4.10 : Champ de vision d'un rétroviseur de voiture . .	101
	Exercice 4.11 : Objet entre deux miroirs plans	103
5	ASSOCIATION DE SYSTEMES	105
5.1	Éléments cardinaux	105
5.2	Relations de conjugaison	109
5.3	Association de deux systèmes centrés	111
5.4	Application aux lentilles	113
5.5	EXERCICES RESOLUS 5	120
	Exercice 5.1 : Système dioptrique centré	120
	Exercice 5.2 : Boule en verre	122
	Exercice 5.3 : Lentille épaisse biconcave	125
	Exercice 5.4 : Lentille plan-convexe	127
	Exercice 5.5 : Loupe de Stanhope	130
	Exercice 5.6 : Éléments cardinaux d'un système catadioptrique	131
	Exercice 5.7 : Système catoptrique	133
	Exercice 5.8 : Association de deux miroirs sphériques	135
	Exercice 5.9 : Grandissement d'une lentille mince convergente .	137
	Exercice 5.10 : Grandissement d'une lentille mince divergente .	138
	Exercice 5.11 : Prisme - Lentille mince	139
	Exercice 5.12 : Focométrie – Méthode de Bessel	140

Exercice 5.13 : Lentille mince biconvexe	143
Exercice 5.14 : Lentille mince biconcave	145
Exercice 5.15 : Association de deux lentilles minces	146
Exercice 5.16 : Doublet	148
Exercice 5.17 : Association de trois lentilles minces	149
6 ŒIL - VISION	151
6.1 Description de l'œil	151
6.2 Caractéristiques de l'œil	152
6.3 Défauts de l'œil - Tests de vision	154
6.4 Tests de vision	155
6.5 Sensibilité spectrale de l'œil humain	157
6.6 Daltonisme	160
6.7 EXERCICES RESOLUS 6	161
Exercice 6.1 : Eléments cardinaux d'un œil	161
Exercice 6.2 : Amplitude dioptrique de l'œil normal	164
Exercice 6.3 : Presbytie	165
Exercice 6.4 : Myopie	165
Exercice 6.5 : Hypermétropie	167
7 INSTRUMENTS D'OPTIQUE	169
7.1 Grandeurs caractéristiques d'un instrument	169
7.2 Exemples d'instruments d'optique	172
7.3 EXERCICES RESOLUS 7	178
Exercice 7.1 : Loupe	178
Exercice 7.2 : Latitude de mise au point d'une loupe	179
Exercice 7.3 : Microscope	181
Exercice 7.4 : Endoscope	184
Exercice 7.5 : Télescope de type Cassegrain	185
Exercice 7.6 : Télescope de Newton	187
Exercice 7.7 : Lunette de Galilée	189
Exercice 7.8 : Téléobjectif	190
Exercice 7.9 : Lunette astronomique	191

8	INTENSITE LUMINEUSE	193
8.1	Eclairage - Intensité	193
8.2	Réflexion et réfraction	194
8.3	Composition d'ondes	196
8.4	EXERCICES RESOLUS 8	198
	Exercice 8.1 : Méthodes d'addition de vibrations	198
	Exercice 8.2 : Superposition de deux vibrations	202
9	INTERFERENCES A DEUX ONDES	205
9.1	Définition	205
9.2	Superposition de deux OPPM synchrones	205
9.3	Conditions d'interférences	206
9.4	Différence de marche optique	207
9.5	Ordre d'interférence	208
9.6	Contraste des franges	208
9.7	Division du front d'onde	210
9.8	Interférences par division d'amplitude	226
9.9	Lame à faces parallèles	226
9.10	Lame coin ou prismatique	230
9.11	Dispositif de Newton	231
9.12	Interféromètre de Michelson	232
9.13	Interféromètre de Mach-Zehnder	234
9.14	Spectroscopie par transformée de Fourier	235
9.15	Interféromètres LIGO et VIRGO	237
9.16	Tomographie par cohérence optique	238
9.17	EXERCICES RESOLUS 9	240
	Exercice 9.1 : Division du front d'onde	240
	Exercice 9.2 : Les fentes d'Young	244
	Exercice 9.3 : Déplacement de la source	246
	Exercice 9.4 : Miroir de Lloyd	247
	Exercice 9.5 : Frange achromatique	249
	Exercice 9.6 : Miroirs de Fresnel	251
	Exercice 9.7 : Biprisme de Fresnel	254
	Exercice 9.8 : Bilentille de Billet	257

Exercice 9.9 : Mesure d'une longueur d'onde	259
Exercice 9.10 : Mesure d'une distance stellaire	262
Exercice 9.11 : Fentes d'Young - Spectre continu	265
Exercice 9.12 : Lentilles de Meslin	266
Exercice 9.13 : Interférences par division d'amplitude	269
Exercice 9.14 : lame coin	270
Exercice 9.15 : Dispositif de Newton	272
Exercice 9.16 : Défilement des anneaux de Newton	273
Exercice 9.17 : Interféromètre de Michelson en lame d'air	277
Exercice 9.18 : Interféromètre de Michelson en coin d'air	282
Exercice 9.19 : Interféromètre de Michelson - Source ponctuelle	284
Exercice 9.20 : Longueur de cohérence	285
10 INTERFERENCES A ONDES MULTIPLES	291
10.1 Etalon de Fabry-Pérot	291
10.2 Cavité optique	298
10.3 Filtre interférentiel	299
10.4 Couche antireflet	300
10.5 EXERCICES RESOLUS 10	302
Exercice 10.1 : Interférences à ondes multiples	302
Exercice 10.2 : Interféromètre de Fabry-Pérot	305
Exercice 10.3 : Etalon de Fabry-Pérot	307
Exercice 10.4 : Couche antireflet	309
Exercice 10.5 : Interféromètre à séparatrice et miroir plan	312
Exercice 10.6 : Cavité à miroirs sphériques	316
Exercice 10.7 : Filtre interférentiel	318
11 DIFFRACTION DE FRAUNHOFER	321
11.1 Principe de Huygens-Fresnel	321
11.2 Classification des phénomènes de diffraction	322
11.3 Calcul de l'amplitude diffractée - Intensité	323
11.4 Diffraction par une ouverture rectangulaire	325
11.5 Diffraction par une fente	327
11.6 Diffraction par les fentes d'Young	328

11.7	Diffraction par un réseau plan	330
11.8	EXERCICES RESOLUS 11	331
	Exercice 11.1 : Diffraction par une ouverture rectangulaire . . .	331
	Exercice 11.2 : Diffraction par une fente fine	334
	Exercice 11.3 : Diffraction par deux fentes fines	336
	Exercice 11.4 : Diffraction par un réseau plan	338
	Exercice 11.5 : Diffraction par un trou circulaire	340
12	POLARISATION - BIREFRINGENCE	343
12.1	Etats de polarisation d'une OPPM	343
12.2	Polariseur - Analyseur	344
12.3	Biréfringence - Lamme demi-onde - Lamme quart d'onde	346
12.4	Echelle des teintes de Newton	347
12.5	EXERCICES RESOLUS 12	349
	Exercice 12.1 : Etat de polarisation d'une onde lumineuse . . .	349
	Exercice 12.2 : Action sur une lumière naturelle	350
	Exercice 12.3 : Décomposition d'une onde polarisée	351
	Exercice 12.4 : Lamme demi-onde	352
	Exercice 12.5 : Incidence de Brewster	354
13	TRAVAUX PRATIQUES D'OPTIQUE	355
13.1	TP Focométrie	355
13.2	TP Œil modélisé	359
13.3	TP Microscope optique	362
13.4	TP Goniomètre - Spectromètre à prisme	367
13.5	TP Interférences lumineuses	373
13.6	TP Diffraction lumineuse	376
	Bibliographie	379
	Index	381