

Sylvain Houard

Optique

Une approche expérimentale et pratique

| Préface de Luc Dettwiler



de boeck

Table de matières

Préface	XIX
Avant-propos.....	XXI
1 Lumière et couleurs	1
1.1 Synthèse additive.....	2
1.1.1. Synthèse additive bichrome, ou les vertus d'une pyramide hexagonale	2
1.1.2. Synthèse trichrome.....	3
1.1.3. Synthèse additive et télévision	4
1.1.4. Couleurs complémentaires.....	5
1.1.5. Ombres colorées	5
1.2 Spectre de la lumière blanche.....	6
1.2.1. Genèse des couleurs selon Descartes	6
1.2.2. Newton et le concept de lumière blanche hétérogène.....	8
1.3 Vision des objets colorés et absorption sélective.....	13
1.3.1. Hexagone harmonique des couleurs	13
1.3.2. Synthèse soustractive	16
1.3.3. Courbes énergétiques de transmission	18
1.3.4. Phénomènes d'absorption sélective dans la Nature	19
1.4 Colorimétrie.....	23
1.4.1. Caractérisation physique des couleurs.....	23
1.4.2. Diagrammes chromatiques	25
1.5 Anomalies de la vision colorée.....	28
1.5.1. Approche historique	28
1.5.2. Mécanisme de la vision colorée : cônes et pigments colorés	29
1.5.3. Héritéité et statistiques.....	32
1.5.4. Vision colorée des daltoniens	32
1.5.5. Théories alternatives	33
Annexe 1.....	36
1. Réponse à l'énigme	36
2. Construction des diagrammes chromatiques RGB (ou RVB) et XYZ	36
2 Réflexion et réfraction de la lumière	39
2.1 Lois de la réflexion et de la réfraction	40
2.1.1. Approche expérimentale	40

2.1.2.	Loi de la réfraction	41
2.1.3.	Démonstrations de la loi de la réfraction	43
2.1.4.	Phénomène de réflexion totale	45
2.2	Mirages optiques	46
2.2.1.	Mirages inférieurs.....	46
2.2.2.	Mirages supérieurs	51
2.2.3.	Réfraction atmosphérique.....	53
2.3	Halos atmosphériques	55
2.3.1.	Prisme au minimum de déviation	55
2.3.2.	Halos atmosphériques	56
2.4	L'arc-en-ciel	59
2.4.1.	Généralités, approche historique	59
2.4.2.	Théorie géométrique de Descartes	59
2.4.3.	Théorie géométrique de Newton.....	61
2.4.4.	L'arc-en-ciel et son observation	62
2.4.5.	Arcs-en-ciel primaire et secondaire.....	63
2.4.6.	Ordre des couleurs et arcs d'ordres supérieurs	64
2.5	Communications par fibre optique.....	64
2.5.1.	Introduction	65
2.5.2.	Structure d'une fibre – Propagation par réflexion totale.....	65
2.5.3.	Dispersion modale et codage	66
2.5.4.	Fibres à gradient d'indice et fibres monomodes	67
Annexe 2	69
1.	Surface d'onde et principe des ondelettes secondaires.....	69
2.	Tracé de rayons lumineux dans une couche à gradient d'indice	70
3.	Ordre des couleurs dans les arcs-en-ciel primaire et secondaire.....	71
3	Formation des images	73
3.1	Le miroir plan.....	74
3.1.1.	Image d'un objet ponctuel.....	74
3.1.2.	Image d'un objet étendu	74
3.1.3.	Champ d'un miroir	75
3.2	Images multiples et jeux de miroirs.....	75
3.2.1.	Miroirs plans parallèles placés en regard.....	75
3.2.2.	Miroirs plans à angle droit	76
3.2.3.	Miroirs plans faisant un angle de 60°	77
3.2.4.	Une séance au musée de la magie à Blois	77
3.3	Objet et image	78
3.4	Stigmatisme approché – Conditions de Gauss.....	80
3.4.1.	Aberration sphérique – Caustique	80
3.4.2.	Conditions de Gauss	81

3.5	Étude du dioptré plan dans les conditions de Gauss	82
3.5.1.	Stigmatisme approché dans les conditions de Gauss	82
3.5.2.	Exercice d'application	83
4	Lentilles minces dans les conditions de Gauss	85
4.1	Propriétés des lentilles sphériques minces dans les conditions de Gauss	86
4.1.1.	Classification des lentilles minces	86
4.1.2.	Foyer principal image et distance focale image d'une lentille mince	86
4.1.3.	Foyer principal objet d'une lentille mince	89
4.1.4.	Foyers secondaires	90
4.1.5.	Propriété du centre optique O	91
4.1.6.	Image d'un objet non ponctuel	92
4.1.7.	Formules de conjugaison et de grandissement	97
4.1.8.	Lentilles accolées – Théorème des vergences	99
4.1.9.	Lentille convergente ou lentille divergente ?	99
4.2	L'œil humain	99
4.2.1.	Historique	100
4.2.2.	Structure de l'œil	100
4.3	Défauts de la vision et lunettes correctrices	103
4.3.1.	Bref historique des lunettes	103
4.3.2.	<i>Punctum proximum</i> et <i>punctum remotum</i>	104
4.3.3.	Puissance d'accommodation	105
4.3.4.	Myopie	105
4.3.5.	Hyperopie ou hypermétropie	107
4.3.6.	Presbytie	108
4.3.7.	Astigmatisme	109
4.3.8.	Influence de la distance œil-verre correcteur	112
5	Miroirs sphériques dans les conditions de Gauss	113
5.1	Propriétés optiques	114
5.1.1.	Classification	114
5.1.2.	Stigmatisme rigoureux	114
5.1.3.	Foyers principaux et secondaires	114
5.1.4.	Image d'un objet non ponctuel	116
5.1.5.	Relations de conjugaison – Formules de grandissement linéaire	119
5.2	Applications	120
5.2.1.	Miroir de dentiste	120
5.2.2.	Miroir de maquillage	121
5.2.3.	Rétroviseur grand angle	122
6	Aberrations d'une lentille sphérique mince Influence des diaphragmes sur la qualité des images	125
6.1	Aberrations chromatiques	126
6.1.1.	Approche expérimentale	126

6.1.2.	Doublets achromatiques minces	128
6.2	Aberrations géométriques	129
6.2.1.	Aberrations de Seidel du 3 ^e ordre	129
6.2.2.	Aberration de sphéricité.....	131
6.2.3.	Coma – Relation d'Abbe.....	134
6.2.4.	Courbure de champ et astigmatisme	135
6.2.5.	Distorsion	137
6.3	Formation d'une image de bonne qualité	140
6.3.1.	Règles générales	140
6.3.2.	Fonctionnement d'un projecteur de diapositives	141
6.4	Influence des diaphragmes sur la qualité des images	141
6.4.1.	Approche expérimentale.....	141
6.4.2.	Définitions générales.....	143
6.4.3.	Champ de contour.....	144
6.4.4.	Rôle d'une lentille de champ	144
7	Instruments d'optique	147
7.1	De la camera obscura au téléobjectif : l'appareil photographique	148
7.1.1.	Approche historique : <i>camera obscura</i> , daguerréotype.....	148
7.1.2.	Appareil standard à focale fixe.....	149
7.1.3.	Principe du téléobjectif	152
7.2	Le microscope	153
7.2.1.	Approche historique : microscopes de Hooke et de Van Leeuwenhoek	153
7.2.2.	Principe du microscope composé à deux lentilles.....	155
7.2.3.	Puissance et grossissement.....	155
7.2.4.	Normes et standardisation.....	157
7.2.5.	Profondeur de champ.....	157
7.2.6.	Exemples d'observation	157
7.2.7.	Objectif.....	158
7.2.8.	Oculaire.....	161
7.2.9.	Développements récents en microscopie : microscopie électronique et microscopie	163
7.2.10.	Cahier expérimental.....	163
7.3	Lunette astronomique	168
7.3.1.	Approche historique	168
7.3.2.	Propriétés optiques	169
7.3.3.	Limite des grandes lunettes réfractrices	176
7.3.4.	De la théorie à la pratique : construction d'une lunette astronomique d'initiation	177
7.4	Télescopes	178
7.4.1.	Télescopes classiques	178
7.4.2.	Télescopes aplanétiques.....	183
7.4.3.	L'ère des grands télescopes.....	184
7.4.4.	Développements récents I : optique adaptative.....	185
7.4.5.	Développements récents II : interférométrie stellaire	187

Annexe 7	190
1. Éléments cardinaux d'un système centré épais	190
2. Puissance d'un système centré épais	191
8 Interférences lumineuses	193
8.1 Principe d'interférences de Thomas Young	194
8.1.1. Approche historique	194
8.1.2. Interférences observées avec une cuve à ondes	194
8.1.3. Interprétation et forme des franges	194
8.2 Expériences historiques	196
8.2.1. Expérience des trous puis des fentes d'Young	196
8.2.2. Miroirs de Fresnel	199
8.2.3. Dispositifs à division du front d'onde	202
8.3 Interférences non localisées à deux ondes totalement cohérentes – Dispositifs à division du front d'onde	203
8.3.1. Formule fondamentale des interférences à deux ondes	203
8.3.2. Franges sombres et franges brillantes – Ordre d'interférence p	206
8.3.3. Allure générale des franges d'interférences	206
8.3.4. Calcul de la différence de marche – Équation des franges au voisinage de l'axe	207
8.3.5. Dispositif des fentes d'Young à deux lentilles	208
8.3.6. Longueur de cohérence spatiale ℓ_s du dispositif des fentes d'Young	208
8.3.7. Interférences de deux ondes planes	210
8.3.8. Généralisation	210
8.3.9. Détermination d'une longueur d'onde à l'aide des miroirs de Fresnel	211
8.4 Interférences lumineuses dans la Nature	212
8.4.1. Coloration des lames minces	212
8.4.2. Arcs surnuméraires de l'arc-en-ciel	218
8.5 Interféromètre de Michelson	223
8.5.1. Introduction historique	223
8.5.2. Schéma de principe	224
8.5.3. Nécessité d'une lame compensatrice	225
8.5.4. Interféromètre de Michelson en lame d'air : franges d'égale inclinaison, ou franges d'Haidinger	225
8.5.5. Applications	229
8.5.6. Interféromètre de Michelson en coin d'air – Franges d'égale épaisseur ou franges de Fizeau	231
8.6 Interféromètre de Fabry-Pérot	235
8.6.1. Fonctionnement – Interféromètre à ondes multiples	235
8.6.2. Applications	237
8.7 Interféromètres de Mach-Zehnder et de Sagnac	239
Annexe 8	241
1. Propriétés des ondes	241
1.1 Généralités	241
1.2 Onde plane	241
1.3 Onde plane progressive	242
1.4 Onde plane progressive harmonique	242
1.5 Onde électromagnétique plane, progressive harmonique (OEMPPH)	243

1.6 Indice de réfraction	243
1.7 Rayon lumineux, déphasage et chemin optique	243
1.8 Existence d'un déphasage supplémentaire.....	244
2. Anneaux de Newton	244
2.1 Loi de croissance des anneaux brillants observés par réflexion.....	244
2.2 Périodicité des anneaux sombres	244
2.3 Évolution de l'écartement des anneaux avec m	245
2.4 Comparaison du nombre d'anneaux observés dans l'air et dans l'eau	245
2.4.1. Nombre d'anneaux sombres observés dans l'air.....	245
2.4.2. Nombre d'anneaux sombres observés dans l'eau.....	245
3. Interféromètre de Michelson en lame d'air à faces parallèles : calcul de la différence de marche	246
4. Interféromètre de Fabry-Pérot : calcul de l'amplitude complexe et de l'intensité transmises dans une direction d'angle d'émergence i	247
9 Polarisation de la lumière.....	249
9.1 Approche historique.....	250
9.1.1. Les étonnantes propriétés du cristal de spath.....	250
9.1.2. Étienne Malus et la polarisation par réflexion vitreuse	252
9.1.3. Young, Fresnel et la transversalité des ondes lumineuses.....	252
9.2 Polarisation rectiligne de la lumière	252
9.3 Dichroïsme et filtres polariseurs.....	253
9.4 Loi de Malus	255
9.5 Polarisation par diffusion	256
9.5.1. Polarisation du ciel – Diffusion Rayleigh	256
9.5.2. Expérience de diffusion de la lumière	258
9.5.3. Mécanisme de polarisation par diffusion.....	259
9.5.4. Langage des abeilles et polarisation du ciel : travaux de Karl von Frisch (1886-1982)	263
9.6 Polarisation par réflexion – Angle de Brewster	266
9.7 Biréfringence.....	268
9.7.1. Anisotropie du cristal de spath – Axe optique	268
9.7.2. Faisceaux ordinaire et extraordinaire	269
9.7.3. Prisme de Nicol.....	271
9.8 Interférences en lumière polarisée.....	271
9.9 Couleurs des lames cristallines	273
9.9.1. Lignes neutres	273
9.9.2. Couleurs des lames minces biréfringentes	274
9.9.3. Lame quart d'onde et polariseur circulaire	278
9.10 Pouvoir rotatoire.....	280
9.10.1. Polarisation chromatique rotatoire : lame de quartz perpendiculaire et expérience d'Arago.....	280
9.10.2. Activité optique – Substances lévogyres et dextrogyres – Travaux de Biot et Pasteur	281
9.10.3. Polarimètre de Laurent – Pouvoir rotatoire des sucres	282
9.11 Cristaux liquides.....	285
9.11.1. Biréfringence d'un cristal liquide	285

9.11.2. Applications aux écrans LCD	28
9.12 Photoélasticité	28
Annexe 9	28
1. Construction de Huygens	28
2. Différents états de polarisation d'une onde électromagnétique monochromatique.....	29
3. Échelle des teintes de Newton entre polariseurs croisés ou parallèles.....	29
4. Principe de l'analyseur à pénombre.....	29
10 Diffraction	29
10.1 Approche historique.....	29
10.1.1. Les observations de Grimaldi	29
10.1.2. La diffraction au XVII ^e siècle	29
10.1.3. Les travaux d'Augustin Fresnel.....	29
10.1.4. Théories ultérieures.....	29
10.2 Approche expérimentale	29
10.2.1. Diffraction d'ondes à la surface de l'eau	29
10.2.2. Diffraction de la lumière.....	30
10.3 Traitement physique de la diffraction	30
10.3.1. Principe de Huygens	30
10.3.2. Principe de Huygens-Fresnel.....	30
10.3.3. Diffraction de Fresnel et diffraction de Fraunhofer	30
10.4 Diffraction de Fraunhofer par une fente	30
10.4.1. Frange centrale brillante	30
10.4.2. Position angulaire des premiers minima d'intensité.....	30
10.4.3. Calcul de l'intensité diffractée.....	30
10.5 Diffraction par une ouverture circulaire.....	30
10.6 Pouvoir de résolution d'un instrument d'optique – Critère de Rayleigh	30
10.7 Interférences et diffraction : dispositif des fentes et des trous d'Young	30
10.8 Diffraction de Fraunhofer d'une onde plane.....	31
10.8.1. Transparence ou transmittance complexe d'une pupille plane	31
10.8.2. Théorème de Huygens-Fresnel	31
10.8.3. Amplitude complexe de l'onde diffractée en M	31
10.8.4. Pupille composée et théorème de translation	31
10.8.5. Diffraction par une ouverture rectangulaire	31
10.8.6. Diffraction par une fente	31
10.8.7. Théorème de Babinet	31
10.9 Réseaux de diffraction.....	31
10.9.1. Définitions	31
10.9.2. Formule fondamentale des réseaux.....	31
10.9.3. Calcul de l'intensité diffractée.....	31

10.9.4. Dispersion en lumière polychromatique – Spectroscopie à réseaux	320
10.9.5. Pouvoir dispersif D et pouvoir de résolution intrinsèque R – Critère de Rayleigh	321
10.9.6. Spectroscopie appliquée à l'astrophysique.....	323
10.10 Diffraction et transformée de Fourier	327
10.10.1. Série et transformée de Fourier	327
10.10.2. Optique de Fourier	329
10.10.3. Diffraction et formation des images	331
10.11 Diffraction et filtrage spatial	332
10.11.1. Expérience d'Abbe et filtrage passe bas	332
10.11.2. Strioscopie et filtrage passe haut	335
10.12 Arc-en-ciel (épilogue)	336
Annexe 10	339
1. Épurateur de faisceau	339
2. Détermination de longueurs d'onde avec un réseau par transmission	340
2.1 Réseau peu dispersif à 80 traits/mm et ordre $m = 1$	340
2.2 Réseau plus dispersif à 300 traits/mm	340
11 Le laser et ses applications	341
11.1 Approche historique.....	342
11.2 Fonctionnement du laser	344
11.2.1. Présentation	344
11.2.2. Processus d'émission et d'absorption.....	345
11.2.3. Inversion de population	346
11.2.4. Pompage optique.....	347
11.2.5. Rôle de la cavité optique	351
11.3 Holographie.....	354
11.3.1. Hologramme par transmission d'un objet ponctuel – Disposition axiale de Gabor.....	354
11.3.2. Hologrammes par transmission de Leith-Upatnieks	356
11.3.3. Approche mathématique.....	358
11.3.4. Hologrammes épais – Holographie par réflexion	361
11.3.5. Réalisation expérimentale d'un hologramme	364
11.3.6. Applications de l'holographie	366
11.4 Applications commerciales, industrielles et technologiques du laser.....	367
11.4.1. Applications commerciales : graveur et lecteur de CD et DVD	368
11.4.2. Métrologie	371
11.4.3. Soudage, perçage, découpage	374
11.4.4. Applications médicales.....	375
11.4.5. Vélométrie laser Doppler	376
11.5 Applications en physique fondamentale	378
11.5.1. Fusion thermonucléaire et laser Mégajoule.....	378
11.5.2. Spectroscopie et lasers femtoseconde.....	378
11.5.3. Lasers et manipulation des atomes.....	379
11.6 Conclusion.....	380

Annexe 11	382
1. Coefficients d'Einstein et loi de Planck	382
2. Conduction électrique et théorie des bandes dans les semi-conducteurs	382
 Bibliographie	 385
 Index	 389

«... à se comprendre, dans le langage courant. Cette formulation s'applique, naturellement et à plus forte raison, à cette branche de la physique qu'est l'optique, et tout particulièrement à ce livre qui en propose une présentation illustrée et globale au niveau du premier cycle universitaire. « Le paysage se déchiffre et s'illustre. On voit. Tel paraît bien être le privilège de la connaissance humaine », écrivait Teilhard de Chardin. Cela signifie alors approfondir l'unité dans un champ de la connaissance – comme « embrasser du regard », « dresser un tableau », « offrir un panorama »... À sa parution, l'ouvrage de Sylvain Houard – que je présente à ce jour que réviseur scientifique pour les éditions de Belin – titre aussi une certaine unité des connaissances fondamentales en optique, dont il rassemble les plans théoriques, expérimental, historique, technologique et technique : telle est sa grande force, ainsi que son originalité, reposant sur plusieurs points qui méritent d'être soulignés.

En effet, maintenant, l'enseignement de l'optique présente plusieurs difficultés (que Sylvain Houard a bien senties dans sa pratique professionnelle) : son caractère abstrait lié à la multiplicité des approches des phénomènes lumineux (optique géométrique, interférences, diffraction, polarisation) et à leur imitation ; la rigueur dévouante comme certains cas de diffraction et d'interférences (ce qui est normal : ne sont-ils pas à l'origine des premiers paradoxes ayant suscité la révolution conceptuelle due à la mécanique quantique ?) ; enfin le caractère critique de certains réglages nécessaires pour observer ces phénomènes – d'où le fait que certains sont surprenants et méconnus du grand public, lesquels ne sont pas vus couramment. Du coup, cette discipline est redoutée des étudiants en physique ; elle est quelque peu contradictoire : l'optique classique est souvent considérée dans le même temps comme une discipline vieillotte et poussiéreuse, donc terne et démodée.

En fait, même avant la découverte des effets fabuleux de l'optique quantique, que d'efforts méconnus et de talents d'ingéniosité déployés, au XIX^e siècle notamment, afin de pénétrer les arcanes de l'optique dite classique. Cette histoire passionnante, ainsi que non désinvolte, est un excellent antidote contre le sentiment d'ennui que certains étudiants semblent éprouver devant

les cours d'optique. Alors Sylvain Houard s'est documenté méthodiquement sur l'histoire de cette science : il en donne assez d'éléments tout au long de son livre pour que ses lecteurs puissent appréhender le cheminement de la problématique de chaque chapitre – tant sur la théorie que pour diverses applications – et mesurer le caractère cumulatif des progrès du savoir, qui a fait dire au célèbre auteur d'*Optique* : « Si j'ai vu plus loin, c'est en montant sur les épaules de géants ».

Je soutiens l'idée qu'un tel éclairage historique est tout à fait propre à communiquer la passion pour l'optique jusque dans « ses développements » actuels, d'autant qu'une partie d'entre eux se situe dans le prolongement de l'optique classique – tout en allant beaucoup plus loin qu'on l'aurait imaginé autrefois. Et justement les révolutions de l'optique du XX^e siècle, notamment le laser et les télécommunications par fibre optique, ne sont pas oubliées dans ce livre ; il sera donc une aide précieuse et originale pour l'étude des fondements de l'optique, ô combien nécessaire à la formation de base des physiciens. L'auteur montre l'aspect actuel de cette discipline, mais aussi son évolution : il replace sa genèse et ses progrès dans leur contexte historique et technique, allant même jusqu'à reproduire le papier des expériences historiques (en les adaptant au matériel courant d'aujourd'hui) et à dévoiler leurs pièges éventuels !

La présentation d'expériences, schémas et photographies à l'appui, est un autre point fort de ce livre : il ne s'agit pas de ne donner que des expériences historiques, mais présente (avec un bel souci d'équilibre) moult manipulations, classiques ou moins académiques, pouvant accompagner l'enseignement de l'optique. La plupart des ouvrages traitent soit de la théorie (donc ce sont des livres de cours), ou bien des aspects expérimentaux (alors ce sont des recueils de montages) ; dans son livre Sylvain Houard s'est donné la peine d'unir ces deux aspects, et on peut lui en savoir gré : ils vont de pair dans l'étude de cette discipline qui se développe surtout par ses applications. L'apprentissage de l'optique, science de la lumière, exige évidemment l'acquisition d'une connaissance visuelle des faits étudiés ! L'impressionnante collection de photographies réalisées par l'auteur permet – à l'instar de l'excellent *Atlas des phénomènes optiques* de M. Cagnet, M. Françon et J.-C. Thériet publié par les éditions Springer en 1962

Sylvain Houard

Optique

Une approche innovante de l'optique, à la fois expérimentale, technique, historique et pratique.

Cet ouvrage de référence présente l'ensemble des phénomènes optiques de manière agréable et détaillée.

Il s'appuie sur une iconographie extrêmement riche et un style clair et abordable.

Chaque découverte ou théorie est replacée dans son contexte historique. Plus de 500 photographies en couleurs d'expériences permettent d'illustrer les phénomènes optiques de manière visuelle et concrète, en relation avec le texte.

Publics

- Candidats au CAPES ou à l'Agrégation
- Étudiants du premier cycle universitaire
- Enseignants du secondaire ou du supérieur
- Astronomes amateurs et étudiants en médecine

Des explications techniques détaillées sont fournies, mais privilégient l'approche physique à un formalisme excessif. Une large place est ainsi faite aux phénomènes naturels (mirages, halos, arc-en-ciel, etc.) et aux applications scientifiques ou technologiques (télécommunications par fibre optique, verres correcteurs de la vision, microscope, lunette astronomique, télescope, interféromètres, lasers).

Un chapitre entier est consacré à la couleur et sa perception – sujet rarement abordé dans les ouvrages classiques.

L'auteur

Docteur en Sismologie, ancien chercheur au Commissariat à l'Énergie atomique, Sylvain Houard enseigne actuellement en seconde année de classes préparatoires, en section PSI, au lycée Saint-Louis à Paris.

Le réviseur scientifique

Professeur de Physique en PC* au Lycée Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, Luc Dettwiller est l'auteur de plusieurs livres d'optique ainsi que d'une soixantaine d'articles de recherche ou d'enseignement.

- Plus de 500 photos en couleurs
- De nombreuses expériences d'optique pour illustrer les phénomènes optiques
- Une approche innovante à la fois expérimentale, technique, historique et pratique

ISBN : 978-2-8041-6339-6



OPTI



de boeck

www.deboeck.com