

Joseph Hormière

Instruments d'optique ophtalmique



Collection « Optique et Vision »
dirigée par Caroline Kovarski

Instrument d'optique ophtalmique

Joseph Hormière

Ingénieur diplômé de l'École supérieure d'optique,
Docteur-ingénieur,
Professeur à l'Institut et centre d'optométrie (Bures-sur-Yvette)



11, rue Lavoisier
75008 Paris

Chez le même éditeur

La malvoyance chez l'enfant : cadre de vie et aides techniques

collection « Optique et vision »

Kovarski C., coord., 2010

Les anomalies de la vision chez l'enfant et l'adolescent

collection « Optique et vision »

Kovarski C., coord., 2010

Éclairage d'intérieur et ambiances visuelles

collection « Optique et vision »

Damelincourt J.-J., Zissis G., Corbé C., Paule B., 2010

Traiter la presbytie

collection « Optique et vision »

A.-N. Gilg, 2009

L'opticien-lunetier : guide théorique et pratique

C. Kovarski, coord., 2009

Atlas anatomo-clinique d'ophtalmologie

H. Offret, M. Labetoulle, O. Offret, 2005

Œil et médecine interne —

Modifications oculaires dans les maladies systémiques

F. Tischendorf, C. Meyer, C. Spraul, 2005

Contactologie

B. Barthélémy, Th. Thiébaud, 2005

Sobotta – Atlas d'anatomie

– tome 1, « Tête, cou, membre supérieur »

– tome 2, « Tronc, viscères, membre inférieur »

R. Putz, R. Pabst, coord., 5^e édition, 2010



© LAVOISIER, 2010

ISBN : 978-2-7430-1278-6

ISSN : 2105-9624

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er}-juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code pénal art. 425).

Je tiens à remercier :

- les sociétés NIDEK et ZEISS, pour les documents qu'elles ont bien voulu me confier ;
- mes élèves et étudiants dont les incompréhensions, doutes et questions m'ont amené à réfléchir et chercher à mieux expliquer ;
- mes collègues, pour les échanges fructueux que j'ai pu avoir avec eux.

Ce livre est dédié à ma compagne Chantal qui m'a trop souvent vu, au loin sur ma petite île, les yeux fixés sur un seul paysage : l'écran de mon ordinateur.

Avant-propos

L'œil humain est un petit objet de la taille d'une bille, où se trouvent associés milieux transparents, diffusants et opaques. Il joue à la fois le rôle de capteur de lumière et de système formateur d'image. Mais s'il laisse entrer les photons, source précieuse d'information, il ne les laisse pas facilement ressortir, ce qui rend difficile l'observation de ses *entrailles*.

On a coutume de le comparer :

- à une chambre noire, parce que l'uvée, qui le tapisse intérieurement, est comme une peau de raisin noir, et que la pupille, ouverte comme un trou de serrure sur la chambre antérieure, est noire ;
- ou mieux encore, à un appareil photographique, parce qu'il comporte une optique à focale variable permettant la conjugaison d'un plan objet avec le détecteur, la rétine, ainsi qu'un diaphragme d'ouverture variable, l'iris, qui joue à la fois un rôle dans l'importance de l'éclairement rétinien et dans la géométrie de la tache de diffusion de l'image défocalisée d'un point.

Toutefois ces modèles photographiques ont leurs limites car :

- d'un point de vue spatial, autant l'image argentique, ou numérique, se doit d'être aussi ressemblante que possible à l'objet, dans ses formes, ses détails, ses couleurs et sur un champ de bonne largeur, une image idéale (aux aberrations près), et stable (sage comme une image) durant le temps d'exposition – ce qui nécessite des optiques rigides dont le nombre de dioptries dépasse souvent la vingtaine –, autant l'image rétinienne ne peut qu'être inachevée, du fait des imperfections du système optique de l'œil (nombre de dioptries insuffisant pour garantir une bonne qualité d'image, transparence plus ou moins correcte des milieux), et fait, en comparaison avec la précédente, figure de monstre, puisqu'elle est, de plus, analysée par un capteur dont la résolution varie de façon extrême entre le centre et la périphérie et qui change sans cesse de position avec le déplacement du point de fixation ; inachèvement donc de l'image rétinienne en ce que certaines de ses parties peuvent ne pas passer au peigne fin de la fovéa et ne garder ainsi qu'une mauvaise définition ;

- d'un point de vue temporel, il n'y a pas de temps d'exposition de la rétine, qui pourrait être déterminé par un obturateur palpébral, mais simplement des temps de réaction photo-chimio-électrique qui diffèrent selon la partie de l'image traitée (forme, contraste, détail, couleur) et le lieu où s'effectue ce traitement.

Alors, par delà toute assimilation de l'œil à un instrument d'optique classique, on le considérera comme un élément du système visuel, le premier de la chaîne, celui qui traite au tout début l'information lumineuse. Traitement imparfait et incomplet.

La connaissance même et la compréhension du fonctionnement de la vision ne peut s'affranchir de l'étude de ce premier composant. Sans œil pas d'image rétinienne, et sans image rétinienne pas d'image mentale, sinon quelques vagues fantômes (phosphènes ou autres), parfois en habit d'Arlequin, ou bien les multiples images qui se font et défont au détour des rêves.

L'exploration de l'œil dans son volume, à des fins de simple observation (anatomie, physiologie, diagnostic), ou de caractérisation (mesures géométriques, optiques) présente de multiples intérêts et dans divers domaines.

Quelques exemples :

- Optométrie Biométrie de l'œil, Évaluation des amétropies.
- Contactologie Observation de la cornée, Test de la fluorescéine.
- Ophtalmologie Cicatrisation postopératoire de la cornée, cataracte, décollement de rétine, DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge)
- Physiologie Mécanisme de l'accommodation

Cette exploration nécessite toute une instrumentation spécifique.

Nous insisterons surtout dans ce livre sur les appareils d'optique les plus importants et les principes qu'ils mettent en œuvre. Autant que possible nous rappellerons les phénomènes physiques qui entrent en jeu et la façon dont on les caractérise. Enfin quelques éléments d'Histoire des Techniques permettront de mieux suivre les progrès, et parfois aussi les impasses, de l'instrumentation.

Il ne s'agit pas bien sûr d'être exhaustif, ni de livrer des modes d'emploi, mais d'accéder à la *logique interne* de chaque instrument, pour mieux en comprendre le fonctionnement. À cette fin, un rôle important a été donné aux figures géométriques, avec tracés de rayons, et aux calculs. En outre l'utilisation des brevets d'invention, depuis quelques années facilement accessibles par l'Internet, a permis de varier les exemples et d'aborder ce domaine souvent absent dans la littérature technique et scientifique, mais ô combien utile et passionnant pour qui veut comprendre l'évolution de l'instrumentation. Si ces brevets ne correspondent pas nécessairement aux instruments réels, ils ont l'avantage de présenter la diversité des principes mis en œuvre, en fonction des composants existant à un moment donné.

* * * * *

Ce livre est issu d'un cours intitulé « Instruments » fait en maîtrise des sciences et techniques (optométrie, optique physiologique et optique de contact), puis en licence d'optique professionnelle, à la faculté des sciences Paris-Sud Orsay. Il en est

une extension. Il nécessite un niveau de type bac + 2 et pourra intéresser tous les spécialistes de la vision souhaitant approfondir leur compréhension d'instruments qu'ils peuvent être amenés à utiliser régulièrement.

Comment définir les instruments d'optique ophtalmique ?

On dira, dans une première approche, qu'il s'agit d'instruments mettant en œuvre la lumière visible, éventuellement proche visible (ultraviolette, infrarouge), à des fins d'observation de l'œil et de ses annexes, ou de mesure des caractéristiques géométriques directes (épaisseurs, longueurs, rayons de courbure) et indirectes (vergences) non seulement de l'œil, mais encore des dispositifs destinés à compenser les amétropies oculaires (verres, lentilles, implants).

Reste à préciser ce que signifie le terme « instrument ».

Si l'on s'en tient à la définition du *Petit Robert*, il s'agit d'un « objet fabriqué servant à exécuter quelque chose, à faire une opération ». *L'Encyclopoedia Universalis*, dans l'article OPTIQUE-Optique Instrumentale de A. Arnulf, précise la définition pour ce qui concerne l'optique :

« On appelle "instrument d'optique" tout système formant l'image d'un objet sur un ou plusieurs récepteurs sensibles à la lumière et dont le rôle est de percevoir ou d'exploiter cette image. Par exemple, une lunette comporte plusieurs lentilles formant l'image et un récepteur associé, généralement l'œil ; la cinématographie fait intervenir deux instruments, la caméra de prise de vues et le projecteur, et quatre récepteurs, les émulsions négative et positive, l'écran de projection et l'œil.

Tout instrument d'optique met donc en jeu trois éléments fondamentaux : l'objet, le système optique et le récepteur (ou les récepteurs). »

Entre la première définition par trop générale et la seconde, limitant les instruments d'optique à des instruments imageurs, on supposera que les instruments étudiés sont des associations de composants optiques, mécaniques, et éventuellement électroniques, destinés à utiliser la lumière pour l'exploration d'objets oculaires qui ne sont pas directement accessibles à notre sens de la vue, ou bien dont certains détails ne nous sont pas directement perceptibles, mais aussi pour effectuer des mesures, le plus souvent dimensionnelles. On supposera en outre qu'un instrument d'optique est un objet fabriqué, le plus souvent en série — ce qui le différencie de l'expérience montée sur banc d'optique —, et que son évolution est doublement guidée par l'amélioration de ses performances et de la commodité de son utilisation.

Les instruments d'optique ophtalmique ont été séparés en deux catégories : les instruments formateurs d'images et les instruments de mesure. La distinction peut sembler discutable, car certains appareils imageurs sont associés à des mesures effectuées sur les images qu'ils fournissent (comme par exemple les tomographes à optique cohérente) et certains appareils de mesure exploitent l'image d'un objet élémentaire, afin d'en tirer la mesure d'une caractéristique particulière de l'œil (analyse de l'image d'un cercle réfléchi par la cornée dans un autokératomètre). Cependant, elle nous a semblé pertinente, car les qualités requises pour ces deux types d'instruments sont bien souvent différentes.

Joseph Hormière, juin 2010

Table des matières

Chapitre 1

Caractéristiques des instruments d'observation

1. Relation image/objet	2
1.1 Grandissement transversal	3
1.2. focale	4
1.3. Puissance	4
1.4. Grossissement	5
2. Champs en largeur et profondeur	6
2.1. Champ en largeur	6
2.2. Champ en profondeur	8
3. Photométrie	9
4. Résolution	10

Chapitre 2

L'œil : objet et instrument

1. L'œil-objet	11
1.1. Milieux optiques	12
1.1.1. Transparence et opacité	12
1.1.2. Phénomènes optiques	13
1.2. Transparence	17
1.3. Modélisation optique	19
1.3.1. Œil de Gullstrand et œil de Le Grand	20
1.3.2. Œil réduit	23
1.4. Image d'un point de l'œil	23
1.4.1. Points de Bravais d'un système centré	23
1.4.2. Cas de l'œil	24
1.4.3. Points transversaux	25
1.5. Instruments d'observation de l'œil	26
2. L'œil-instrument	27
2.1. Spécificité	27
2.2. Vergence et focales	27

2.3. Accommodation	27
2.4. Images rétinienne et diamètres apparents	29
2.5. Résolution	31
2.6. Champs visuels	33
2.7. L'œil et l'oculaire	33

Chapitre 3

Loupe et téléloupe

1. Généralités	37
1.1. Historique	37
1.2. Définition	38
1.3. Principe	39
1.4. Différents types	40
2. Caractéristiques	40
2.1. Puissance	40
2.2. Grossissement	42
2.3. Champs en largeur	43
2.4. Champ en profondeur	45
2.5. Résolution	46
2.6. Clarté	46
3. Observation de l'œil avec une loupe	46
4. Téléloupes ou loupes binoculaires	46
4.1. Système de Galilée	46
4.1.1. Principe	46
4.1.2. Modification de la frontale	49
4.1.3. Grossissement réel et grossissement commercial	53
4.2. Système de Kepler	54
4.2.1. Principe	54
4.2.2. Prisme de Schmidt-Pechan	55
4.2.3. Condition de réalisation d'une téléloupe de type Kepler	57
4.3. Champ en largeur	59
4.4. Champ en profondeur	61
4.5. Résolution	62
4.6. Clarté	62
4.7. Réglages des téléloupes	63

Chapitre 4

Microscope avec lampe à fente

1. Généralités	65
1.1. Historique	66
1.2. Principe	67
1.3. Définition	69
1.4. Différents types	69
2. Lampe à fente	69

2.1.	Éclairage de Köhler-Vogt	70
2.2.	Réglages de la fente	70
2.3.	Caractéristiques de la source	73
2.4.	Filtres et diffuseur	75
2.4.1.	Filtre UV	75
2.4.2.	Filtre anticalorique	75
2.4.3.	Filtres colorés	75
2.4.4.	Filtre gris (densité neutre)	76
2.4.5.	Filtre polarisant	76
2.4.6.	Diffuseur	76
2.5.	Compromis ouverture-profondeur de champ	77
3.	Microscope	77
3.1.	Spécificité.	77
3.2.	Objectifs spéciaux	77
3.3.	Grossissement du microscope.	79
3.4.	Champs	80
3.4.1.	Champ en largeur.	80
3.4.2.	Champ en profondeur	81
3.5.	Microscope stéréoscopique	83
3.5.1.	Modèle Greenough-Czarski	83
3.5.2.	Modèle télescopique à objectif commun	86
3.5.3.	Convergence et stéréoscopie.	87
3.6.	Photométrie.	88
3.7.	Limite de séparation	89
4.	Éclairages	91
4.1.	Éclairage diffus	91
4.2.	Éclairage focalisé.	91
4.2.1.	Éclairage direct classique	93
4.2.2.	Éclairage direct et observation spéculaire	93
4.2.3.	Éclairage indirect par diffusion latérale	93
4.2.4.	Éclairage indirect par rétrodiffusion.	93
4.2.5.	Éclairage indirect par réflexion interne cornéenne	93
5.	Applications particulières	95

Chapitre 5

Ophtalmoscope

1.	Généralités	97
1.1.	Historique	97
1.2.	Principe	99
1.2.1.	Éclairage et observation	100
1.2.2.	Ophtalmoscope direct/indirect	101
1.3.	Les premiers ophtalmoscopes.	103
1.3.1.	Ophtalmoscope de Helmholtz (1851)	103
1.3.2.	Ophtalmoscope de Ruete (1852)	105
1.3.3.	Ophtalmoscope binoculaire de Giraud-Teulon (1861)	107
1.4.	Définition	109

2. Caractéristiques	109
2.1. Lentilles associées aux ophtalmoscopes	109
2.1.1. Lentilles compensatrices et ophtalmoscope direct	109
2.1.2. Lentille ophtalmoscopique et ophtalmoscope indirect	110
2.2. Grossissement	113
2.2.1. Grossissement de l'ophtalmoscope direct	114
2.2.2. Grossissement de l'ophtalmoscope indirect	115
2.2.3. Comparaison des deux grossissements	116
2.3. Champs en largeur	117
2.3.1. Champ de l'ophtalmoscope direct	117
2.3.2. Champ de l'ophtalmoscope indirect	121
2.3.3. Comparaison des deux champs	124
2.4. Champs en profondeur	125
2.4.1. Profondeur de champ d'un ophtalmoscope direct	125
2.4.2. Profondeur de champ d'un ophtalmoscope indirect	127
2.4.3. Comparaison des profondeurs de champ	127
2.5. Pouvoir séparateur	128
2.5.1. Pouvoir séparateur de l'ophtalmoscope direct	128
2.5.2. Pouvoir séparateur de l'ophtalmoscope indirect	128
2.5.3. Comparaison des pouvoirs séparateurs	129
2.6. Photométrie	130
3. Ophtalmoscopes directs	130
3.1. Éclairage	131
3.1.1. Élimination du reflet cornéen	131
3.1.2. Mise en forme du faisceau d'éclairage	132
3.1.3. Utilisation de réticules	133
3.1.4. Filtres	133
3.2. Disque de Rekoss	133
3.2.1. Fonction de compensation	134
3.2.2. Examen complet de l'œil	134
4. Ophtalmoscopes indirects	135
4.1. Élimination des reflets gênants	136
4.2. Élimination de la lumière diffusée	137
4.3. Ophtalmoscope binoculaire indirect	138
5. Lentilles ophtalmoscopiques	141
5.1. Caractéristiques générales des lentilles ophtalmoscopiques	141
5.2. Lentilles ophtalmoscopiques classiques	142
5.3. Lentilles ophtalmoscopiques pour biomicroscope	145
5.3.1. Systèmes de contact	147
5.3.2. Systèmes sans contact	149
5.3.3. Grossissement et champs	152
5.3.4. Observation binoculaire	154

Chapitre 6

Autres instruments imageurs

1. Appareils photographiques	156
1.1. Grandissement	156

1.2.	Champs	157
1.2.1.	Champ en largeur	157
1.2.2.	Champ en profondeur	157
1.3.	Éclairages et filtres	159
1.4.	Traitement des images	159
1.5.	Exemples de systèmes photographiques	160
1.5.1.	Photographie avec une lampe à fente	160
1.5.2.	Rétinographe (Fundus camera)	160
1.5.3.	Photographie Scheimpflug	162
2.	Microscopes	164
2.1.	Biomicroscope	164
2.2.	Microscope opératoire	164
2.3.	Microscope spéculaire	166
2.3.1.	Limites de l'observation de l'endothélium cornéen au biomicroscope	166
2.3.2.	Microscopie spéculaire	167
2.3.3.	Caractéristiques des microscopes spéculaires	169
2.4.	Microscope confocal	172
2.4.1.	Microscopie biologique classique	172
2.4.2.	Principe de base (Minsky)	172
2.4.3.	Résolution du microscope confocal	176
2.5.	Microscope confocal à balayage	178
2.5.1.	Disque de Nipkow	179
2.5.2.	Balayage par miroirs oscillants	180
2.6.	Exemples d'applications	180
3.	Ophtalmoscope à balayage laser	182
3.1.	L'appareil de Pomerantzeff	182
3.2.	L'appareil de Sabban	184
3.3.	Ophtalmoscope à balayage laser et à optique adaptative	186
4.	Tomographe à cohérence optique	188
4.1.	Rappels sur la cohérence en optique	188
4.1.1.	Émission de la lumière	189
4.1.2.	Interféromètre de Michelson	189
4.1.3.	Cohérence spatiale	191
4.1.4.	Cohérence temporelle	192
4.2.	Application de la cohérence partielle à la tomographie	193
4.2.1.	Principe optique	193
4.2.2.	Diode superluminescente	194
4.2.3.	Résolution de l'OCT	195
4.3.	Instruments	195

Chapitre 7

Caractéristiques des instruments de mesure

1.	Généralités	201
1.1.	Observation, comparaison et mesure	201
1.2.	Grandeurs en optique ophtalmique	203

1.3. Vocabulaire de la métrologie	203
2. Qualités des instruments de mesure	205
2.1. Fidélité et justesse	205
2.2. Sensibilité	207
2.3. Précision	207
3. Types d'erreurs	208
3.1. Erreurs d'étalonnage	208
3.2. Erreurs d'acquisition des données	208
3.3. Erreurs d'analyse des données	208
4. Évaluation classique des erreurs	209
5. Évaluation statistique	210

Chapitre 8

Sphéromètre et radiuscope

1. Généralités	213
1.1. Mesure des rayons de courbure	213
1.2. Principe du sphéromètre	215
1.2.1. Calcul de la flèche	216
1.2.2. Incertitude dans la mesure du rayon de courbure au sphéromètre	217
1.3. Autres instruments de mesure de flèche	218
1.3.1. Sphéromètre à cylindre	218
1.3.2. Sphéromètre à billes	218
1.3.3. Cylindromètre ou toromètre	219
2. Radiuscope	221
2.1. Principe	221
2.2. Neutralisation de la seconde réflexion	223
2.3. Caractéristiques du radiuscope	224
2.3.1. Grossissement du microscope	224
2.3.2. Ouverture numérique de l'objectif	224
2.3.3. Champ	224
2.3.4. Déplacement de la platine	226
2.4. Précision des mesures	226
2.4.1. Erreurs dues à l'instrument	226
2.4.2. Erreurs dues à l'observateur	228
2.4.3. Erreurs dues à la lentille	230
2.5. Conclusions sur la précision de mesure d'un rayon de courbure au radiuscope	231
2.6. Cas des lentilles souples	232

Chapitre 9

Kératomètre

1. Généralités	234
1.1. Historique	234
1.2. Principe	236

1.2.1. Approche simplifiée par l'approximation paraxiale	236
1.2.2. Optique des faisceaux obliques	238
1.2.3. Zone de mesure	240
1.2.4. Dédoublément des images	242
1.3. Définition	244
1.4. Différents types	244
2. Modèle de Helmholtz	244
2.1. Dédoublément	244
2.2. Mesure d'un rayon de courbure	246
2.3. Un instrument à tout faire	247
3. Modèle de Javal-Schiötz	247
3.1. Dédoublément par biréfringence	248
3.2. Mesure d'un rayon de courbure	251
3.2.1. Formule du Javal	251
3.2.2. Mesure d'une cornée sphérique	253
3.3. Mesure de l'astigmatisme cornéen	255
3.4. Erreurs de mesure au Javal	258
4. Modèle de Sutcliffe	261
4.1. Principe du dédoublément	261
4.2. Mesure des rayons de courbure sur le Sutcliffe	264
5. L'appareil de Bausch et Lomb	265
5.1. Schéma d'ensemble	266
5.2. Principe du dédoublément	266
5.3. Principe de Scheiner	268
5.4. Mesure sur le kératomètre Bausch et Lomb	269
6. Modèle de Zeiss	269
6.1. Mires collimatées	270
6.2. Système télécentrique	271
6.3. Principe de l'appareil	272
7. Comparaison des kératomètres classiques	274
8. Autokératomètres	275
8.1. Mise au point automatique	275
8.2. Principe de la mesure	275
8.2.1. Centrage	275
8.2.2. Mesure en trois points	277
8.2.3. Mesure sur une ellipse	281
8.3. Instruments automatiques et capteurs	284
8.3.1. Appareil de Humphrey	285
8.3.2. Autokératomètres à capteurs de position ou d'image	287
9. Évolution des instruments automatiques	289

Chapitre 10

Topographe cornéen

1. Historique	292
2. Modèles géométriques de cornée	296
2.1. La cornée vue de face	296

2.2.	La cornée vue de profil	297
2.3.	La cornée vue en trois dimensions	297
3.	Représentations de la géométrie cornéenne	299
3.1.	Lignes de niveau	300
3.1.1.	Lignes de niveau par rapport à un plan de référence	300
3.1.2.	Lignes de niveau par rapport à une sphère de référence	302
3.2.	Courbures	305
3.2.1.	Courbures d'une cornée de révolution	306
3.2.2.	Courbures d'une cornée astigmatique	307
3.3.	Vergences	308
4.	Méthodes mises en œuvre	310
4.1.	Instruments de type Placido	311
4.1.1.	Principe de la topographie de type Placido	311
4.1.2.	Indétermination sur la position d'un point mesuré	311
4.1.3.	Rayon sortant d'un plan méridien	312
4.1.4.	Levée de l'indétermination sur la position d'un point mesuré	313
4.2.	Instruments utilisant des coupes optiques de la cornée	314
4.2.1.	Orbscan	314
4.2.2.	Pentacam	315
4.3.	Autres instruments de topographie cornéenne	317
4.3.1.	Photogrammétrie	317
4.3.2.	Rasterstereography et moirés	319
4.3.3.	Interférométrie	321
5.	Présentation des résultats	321
5.1.	Code de couleurs	321
5.2.	Carte de courbure axiale	322
5.3.	Carte de courbure tangentielle	323
5.4.	Carte des puissances réfractives (vergences)	323
5.5.	Carte d'élévation	324
5.6.	Carte d'irrégularités	324
5.7.	Carte de différences	324
5.8.	Valeur simulée de kératométrie	324
5.9.	Indice d'asymétrie de surface	324
5.10.	Indice d'asphéricité de surface (ou de facteur de forme)	325
5.11.	Indice de régularité de surface	325

Chapitre 11

Frontofocomètre

1.	Généralités	327
1.1.	Historique	328
1.1.1.	Mesure de courbure et vergence sphérométrique	328
1.1.2.	Effet sphérique	330
1.1.3.	Neutralisation	332
1.2.	Principe du frontofocomètre	333
1.2.1.	Vergence et vergence frontale image	333

1.2.2. Focométrie classique	334
1.2.3. Le premier frontofocomètre	336
1.2.4. Évolution de la focométrie	342
1.2.5. Principe des instruments automatiques	344
1.3. Définition.	352
2. Mesures	353
2.1. Vergences frontales.	353
2.1.1. Vergence frontale d'un verre sphérique.	353
2.1.2. Vergences frontales principales d'un verre astigmaté.	355
2.2. Centrage et décentremments	359
2.2.1. Centrage d'un verre sphérique	359
2.2.2. Centrage d'un verre astigmaté	360
2.2.3. Décentrement et prisme	360
2.3. Addition.	363
2.3.1. Mesure de l'addition sur un double foyer	364
2.3.2. Mesure de l'addition sur un progressif	365
2.4. Foyer ou infini sur l'axe (FOA ou IOA).	365
3. Frontofocomètres manuels	367
3.1. Frontofocomètre oculaire.	367
3.2. Frontoprojecteur.	368
3.3. Précision des frontofocomètres manuels.	370
3.3.1. Linéarité des graduations dioptriques	370
3.3.2. Erreur de mesure	371
4. Frontofocomètres automatiques	378
4.1. <i>Autolensmeter d'Acuity Systems</i>	379
4.2. <i>Humphrey Lens Analyzer</i>	379
4.3. Précision de l' <i>Autolensmeter</i> et du <i>Lens Analyzer</i>	383
4.4. Instruments actuels.	384
4.4.1. Principe simplifié de mesure	384
4.4.2. Fonctions et caractéristiques des frontofocomètres automatiques modernes	385
5. Conclusions.	387

Chapitre 12

Optomètre / réfractomètre

1. Définitions	389
2. Optomètres subjectifs	390
2.1. Examen de vue	390
2.1.1. Lunette d'essai	390
2.1.2. Réfracteur	396
2.2. Optomètres subjectifs	399
2.2.1. Optomètre de Badal.	400
2.2.2. Optomètre de Tscherning-Young	402
2.2.3. Optomètre laser	405
2.3. Optomètres objectifs 1 (skiascopes).	407
2.3.1. Historique	407
2.3.2. Skiascopie ou rétinoscopie ?	408

2.3.3. La lueur oculaire	409
2.3.4. Définition, schéma de principe et méthode	410
2.3.5. Ombre, lumière et pénombre en skiascopie	411
2.3.6. Modèle géométrique de la skiascopie d'un œil sphérique	414
2.3.7. Vitesse de l'ombre	416
2.3.8. Skiascopie de l'œil astigmaté	419
2.3.9. Skiascopie et aberrations	421
2.3.10. Les différents skiascopes	423
2.3.11. Intérêt et limites de la skiascopie	424
2.3.12. Skiascopie dynamique	425
2.4. Optomètres objectifs 2 (réfractomètres)	425
2.4.1. Réfractomètre et ophtalmoscope direct	426
2.4.2. Réfractomètre et ophtalmoscope indirect	427
2.4.3. Réfractomètre à parallaxe	431
2.5. Réfractomètres automatiques	435
2.5.1. Les différents types d'appareils automatiques	436
2.5.2. Autokératoréfractomètres	439
2.5.3. Précision des autoréfractomètres	440
2.5.4. Caractéristiques des autokératoréfractomètres	444

Chapitre 13

Aberromètre

1. Aberrations	447
1.1. Stigmatisme	448
1.2. Approximation de Gauss	448
1.3. Classification des aberrations	448
1.3.1. Aberrations chromatiques	449
1.3.2. Aberrations d'ouverture	449
1.3.3. Aberrations de champ	451
1.4. Aberrations de l'œil	453
1.4.1. Aberration chromatique	454
1.4.2. Aberrations géométriques	454
2. Caractérisation des aberrations	456
2.1. Aberrations du troisième ordre	456
2.1.1. Développements limités	456
2.1.2. Aberration transversale du troisième ordre	457
2.2. Sommes de Seidel	458
2.3. Surface d'onde et polynômes de Zernike	459
2.3.1. Surface d'onde aberrante	459
2.3.2. Polynômes de Zernike	461
3. Aberrométrie	463
4. Aberromètre	464
Bibliographie	469
Index	471



L'œil humain est un petit objet de la taille d'une bille, où se trouvent associés milieux transparents, diffusants et opaques. Il joue à la fois le rôle de capteur de lumière et de système formateur d'image. L'exploration de l'œil dans son volume, à des fins de simple observation (anatomie, physiologie, diagnostic), ou de caractérisation (mesures géométriques, optiques), présente de multiples intérêts dans divers domaines (optométrie, contactologie, ophtalmologie, physiologie...). Cette exploration nécessite toute une instrumentation spécifique.

Instrumente d'optique ophtalmique utilise les outils de **l'optique géométrique** (tracés de rayons et calculs d'images), ainsi que **l'interprétation des phénomènes** étudiés par l'optique physique (interférence, diffraction et polarisation), afin de mieux **pénétrer la logique interne des différents appareils**.

En mettant l'accent sur **les principes optiques mis en œuvre**, ce livre technique et abondamment illustré présente les principaux instruments d'optique utilisés pour :

- **l'observation externe et interne de l'œil** (loupes et téléloupes, microscopes, ophtalmoscopes, tomographes à cohérence optique) ;
- **la mesure de ses caractéristiques géométriques et optiques** (kératomètres, topographes, réfractomètres) ;
- **la mesure des caractéristiques des verres et des lentilles compensatrices** (radiuscopes et frontofocomètres).

Une attention particulière a été portée sur la transition entre les instruments dits classiques, où l'utilisateur joue un rôle primordial dans les réglages, l'observation, la prise de mesures, et les instruments modernes automatiques, où cet utilisateur devient un simple manipulateur et où les opérations complexes qu'il effectuait auparavant sont prises en charges par des capteurs de flux ou d'image et des systèmes électroniques et informatiques.

Les exemples et exercices intégrés dans le texte permettent de préciser concrètement certaines valeurs numériques et de relativiser les résultats. De plus, des études de brevets apportent une description précise **d'instruments dans la phase de projet** et mettent en évidence leur originalité par rapport aux instruments existants.

Conçu pour les professionnels de l'optique, mais aussi les enseignants et les étudiants, **Instrumente d'optique ophtalmique** offre **un inventaire scientifique unique dans la littérature consacrée à l'optique**.

Joseph Hormière est ingénieur diplômé de l'École supérieure d'optique, docteur-ingénieur, et professeur à l'Institut et Centre d'Optométrie (Bures-sur-Yvette).

978-2-7430-1278-6



9 782743 012786