

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<sup>e</sup> 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<sup>er</sup>-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'Encyclopaedia 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 autokéromètre). 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
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>469</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>471</b>





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.

**Instrument 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, **Instrument 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