

# 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 télescope**

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. Télécopes 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 télescope 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 télécopes . . . . .	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 décentrement	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 ophthalmoscope direct. . . . .	426
2.4.2. Réfractomètre et ophthalmoscope 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>
--------------------------------	------------