



**HAL**  
open science

# Conception d'un système visuel à base d'optique freeform et de microécran courbe

Simon Charrière

► **To cite this version:**

Simon Charrière. Conception d'un système visuel à base d'optique freeform et de microécran courbe. Optique / photonique. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2021. Français. NNT : 2021MULH4589 . tel-03891451

**HAL Id: tel-03891451**

**<https://theses.hal.science/tel-03891451v1>**

Submitted on 9 Dec 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE HAUTE-ALSACE  
UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

# THESE

Pour l'obtention du grade de  
**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE HAUTE-ALSACE**  
**ÉCOLE DOCTORALE : Mathématiques, Sciences de l'information et de l'ingénieur (ED 269)**  
Discipline : Electronique, Optronique et Systèmes

Présentée et soutenue publiquement

par

**Simon CHARRIÈRE**

Le deux décembre deux mil vingt et un.

---

## **Conception d'un système visuel à base d'optique freeform et de microécran courbe.**

---

Sous la direction du Prof. Olivier Haeberlé

Jury : Prof. Hugues GIOVANNINI, Aix-Marseille Université (Rapporteur)  
Dr. HdR Thierry LÉPINE, Université Paris Saclay et IOGS St Etienne (Rapporteur)  
Prof. Sylvain LECLER, INSA Strasbourg (Examineur)  
Prof. Yvan SORTAIS, Université Paris Saclay (Examineur)  
Dr. Rose-Marie SAUVAGE, DGA (Examineur)  
Dr. Stéphane NICOLAS, CEA-Leti (Co-Encadrant de thèse)  
Dr. Bertrand SIMON, Université Paris Saclay et IOGS Bordeaux (Co-Encadrant de thèse)  
Prof. Olivier HAEBERLÉ, Université de Haute Alsace (Directeur de thèse)  
M. Pierre JOLY, CEA-Leti (Invité)

## REMERCIEMENTS

---

Après trois ans de travail, de nombreuses personnes m'ont aidé dans mon travail, au point que j'espère ne pas trop en oublier. Quoiqu'il en soit, ces trois ans ont été source de nombreuses rencontres, débats et découvertes qui m'ont d'abord été offertes par l'équipe qui m'a précédée sur le travail de la courbure, Christophe Gaschet et Bertrand Chambion avant tout. Les deux m'ont beaucoup encouragé et amicalement guidé pour reprendre leur travail à la fois optique et microélectronique.

Suite aux départs de Christophe et de Bertrand, Fabien Zuber et Stéphane Nicolas ont été les ponts qui ont permis la continuité de ce travail sur la courbure. A un autre membre indispensable de l'équipe courbure, Gilles Lasfargues, merci pour toutes les heures passées à se battre pour les bonding, good game. Enfin, je remercie David Henry qui a assuré une continuité importante au fil de ces trois ans, mais aussi pour sa confiance.

Merci à Olivier Haeberlé et Bertrand Simon qui ont suivi avec beaucoup d'assiduité mes travaux malgré toutes les urgences qu'ils ont eu à gérer. Ils m'ont tous les deux permis à la fois de prendre un peu de hauteur par rapport aux détails et ont proposé des pistes de solutions et de réflexions pertinentes. J'en profite pour remercier aussi le ministère de l'enseignement supérieur pour toutes ces occasions magnifiques de franches rigolades les jeudi matin lorsqu'Olivier ou Bertrand nous narraient la concrétisation de certaines politiques...

Je remercie aussi chaudement mes tuteurs CEA, Pierre Joly et Stéphane Nicolas qui n'ont pas économisé leurs efforts pour répondre à mes questions, parfois au-delà de mes espérances. Cela a été très enrichissant de travailler avec vous au quotidien et de pouvoir m'appuyer sur vos expériences et talents respectifs. Tous les fruits de nos discussions et calculs n'apparaissent pas dans ce manuscrit, qui serait alors beaucoup plus épais. Même si ce n'est pas écrit, vous m'avez beaucoup enrichi.

Pour tous les conseils avisés et les discussions autour de la conception optique, merci à Florence Rigal. Merci aussi à Fred Sermet pour son expertise en mécanique et son aide à la conception des éléments optomécaniques.

Au-delà du CEA été de l'équipe de thèse, merci à Rose-Marie Sauvage pour la participation à la fois financière et technique. Et merci aussi à Cyrille Rossat de *Microoled* pour ses conseils et son aide.

Merci aussi aux nombreuses personnes du LAIP et au-delà qui m'ont été de multiples façon, parfois simplement autour d'un café, même à parler de bien autre chose, parce que la courbure n'est pas le centre du monde : Nacer, Laura, Stéphane, Gabrielle, Olivier, Laurent, Nadia, Lucas, Patrick, Natacha, Yann, Stéphanie, Tony...

Enfin, évidemment, un immense merci à Camille pour toute sa patience lorsque je revenais la tête dans les calculs et qui a su prendre le temps de m'écouter, et même de m'épouser !

# 1 TABLE DES MATIERES

<b>Remerciements</b> .....	<b>ii</b>
<b>1 Table des matières</b> .....	<b>iii</b>
<b>2 Liste des acronymes</b> .....	<b>ix</b>
<b>3 Introduction</b> .....	<b>x</b>
<b>1 Perception visuelle, systèmes visuels et microécrans</b> .....	<b>1</b>
1.1 La perception visuelle .....	1
1.1.1 Brève description de la vision.....	1
1.1.2 Quelques caractéristiques de la vision humaine .....	2
1.1.2.1 Rôle de la rétine.....	2
1.1.2.2 Mouvements oculaires et rôle du cerveau.....	4
1.2 Les microécrans.....	6
1.2.1 Définitions et applications.....	6
1.2.1.1 Head-Mounted Display .....	6
1.2.1.2 Viseurs électroniques.....	7
1.2.1.3 Head-Up Display .....	8
1.2.1.4 Systèmes de projection .....	9
1.2.2 Fonctionnement d'un microécran .....	10
1.2.2.1 La microélectronique .....	10
1.2.2.2 Caractéristiques d'un microécran.....	10
1.2.2.3 Différentes technologies .....	11
1.2.2.3.1 Les cristaux liquides .....	12
1.2.2.3.2 Les MEMS .....	13
1.2.2.3.3 Les microLED et microOLED.....	14
1.2.2.3.4 Comparaison des différentes technologies .....	14
1.3 Systèmes optiques visuels.....	15
1.3.1 Définition générale .....	15
1.3.2 L'optique pour un système visuel .....	15
1.3.2.1 De l'objet à la rétine : principes fondamentaux .....	15
1.3.2.2 Systèmes visuels étudiés dans cette thèse.....	18
1.3.2.2.1 Le point de départ : système HMD .....	18
1.3.2.2.2 Le choix de système : viseur .....	19
1.3.2.2.3 Remarques sur les HUD.....	20
1.3.2.2.4 Remarques sur les projecteurs .....	20
1.3.2.3 Remarques sur la notion de Form Factor .....	20
1.4 Perspectives de recherche pour les microécrans .....	21
1.4.1 Microécran idéal.....	21
1.4.1.1 Densité de pixel .....	22
1.4.1.2 Encombrement .....	22
1.4.1.3 Consommation électrique.....	22
1.4.1.4 Contraste.....	23
1.4.1.5 Haute luminance.....	23
1.4.1.6 Cône d'émission.....	23
1.4.1.7 Couleurs .....	24
1.4.1.8 Durée de vie, coût et réalisme.....	24
1.4.2 MicroLED et microOLED, perspectives.....	25
1.5 Conclusion .....	25
<b>2 Théorie de conception optique : optique sur l'axe et optique hors-axe</b> .....	<b>27</b>
2.1 Fondamentaux de conception optique.....	27



2.1.1	Notions élémentaires.....	27
2.1.2	Fonction d'aberration pour l'optique sur l'axe.....	30
2.1.2.1	Construction de la fonction d'aberration, avec symétrie.....	30
2.1.2.2	Expression mathématique des aberrations.....	33
2.1.2.2.1	Aberrations géométriques.....	33
2.1.2.2.2	Aberrations chromatiques.....	34
2.1.2.3	Utilisation de la fonction d'aberration.....	35
2.2	Optique hors-axe et freeform.....	37
2.2.1	Optique Hors-axe et théorie des aberrations nodales.....	37
2.2.1.1	Du tolérancement à l'optique hors-axe.....	37
2.2.1.2	Détails sur les aberrations en hors-axe.....	41
2.2.1.2.1	Aberration sphérique.....	41
2.2.1.2.2	Coma.....	41
2.2.1.2.3	Astigmatisme.....	43
2.2.1.2.4	Courbure de champ.....	46
2.2.1.2.5	Distorsion.....	49
2.2.2	Optique freeform pour corriger les aberrations hors-axe.....	50
2.2.2.1	Description des surfaces freeform.....	50
2.2.2.2	Correction des aberrations.....	51
2.2.2.2.1	Analyse des aberrations.....	52
2.2.2.2.2	Rôle optique des différents dioptries d'un système.....	52
2.2.2.2.3	Méthode de conception.....	53
2.2.2.2.4	Les limites du freeform.....	54
2.3	Conclusion.....	54
<b>3</b>	<b>Apports de la courbure aux systèmes visuels et hors-axe.....</b>	<b>57</b>
3.1	Etat de l'art sur la courbure en optique.....	57
3.1.1	Analyse paraxiale.....	57
3.1.2	Courbure de meilleur foyer.....	58
3.1.2.1	Courbure de champ uniquement.....	58
3.1.2.2	Courbure, champ et astigmatisme.....	61
3.1.2.3	Evolution de la courbure de meilleur foyer.....	62
3.1.3	Gain en compacité.....	62
3.2	Apports de la courbure aux systèmes visuels.....	63
3.2.1	Eye Relief et lentille monocentrique.....	63
3.2.2	Courbure et champ de vue.....	64
3.2.2.1	Courbure de point de départ.....	64
3.2.2.2	Augmentation du champ de vue.....	65
3.2.3	Gain en flux lumineux.....	67
3.2.3.1	Source des pertes lumineuses.....	67
3.2.3.2	Augmentation de l'étendue géométrique.....	68
3.2.3.3	Gain en flux lumineux total.....	69
3.2.3.3.1	GFL sur la surface totale, influence de la flèche.....	70
3.2.3.3.1.1	Flèche négligée.....	70
3.2.3.3.1.2	Flèche considérée.....	71
3.2.3.3.2	Recherche de la forme idéale du microécran.....	73
3.2.3.3.3	Microécran non lambertien.....	74
3.2.3.4	Compromis avec le Gain en Flux Lumineux.....	78
3.2.4	Distorsion.....	79
3.2.4.1	Calcul de la distorsion dans le cas courbe.....	79
3.2.4.2	Distorsion et courbure optimale.....	81
3.2.4.3	Déformation mécanique par la courbure.....	85
3.2.4.4	Distorsions et réalités augmentée.....	85
3.2.5	Conclusion.....	86

---

3.3	Apports de la courbure aux systèmes hors-axe .....	86
3.3.1	Correction de la courbure de champ en hors-axe .....	87
3.3.1.1	Liens avec les méthodes usuelles .....	87
3.3.1.2	Modification de la courbure en hors-axe .....	88
3.3.1.2.1	Courbure sphérique et courbure biconique .....	88
3.3.1.2.2	Courbures alternatives .....	89
3.3.2	Critères de sélection du point de départ.....	90
3.3.2.1	Présentation des systèmes.....	92
3.3.2.2	Classement des systèmes.....	93
3.3.2.2.1	Classement avec les trois filtres.....	93
3.3.2.2.2	Analyse du troisième critère et nouveau classement .....	94
3.3.2.2.3	Optimisations complètes de trois systèmes .....	96
3.3.2.2.3.1	Système a.....	97
3.3.2.2.3.2	Système b.....	99
3.3.2.2.3.3	Système g.....	105
3.3.2.3	Discussion et conclusion .....	108
3.3.2.3.1	Analyse du critère n°1 .....	108
3.3.2.3.2	Analyse du critère n°2 .....	109
3.3.2.3.3	Analyse du critère n°3 .....	109
3.3.2.3.4	Conclusion et perspectives .....	110
3.3.3	Conclusion .....	111
3.4	Conclusion.....	111
<b>4</b>	<b>Mise en courbure d'un microécran.....</b>	<b>113</b>
4.1	Du capteur d'image au microécran .....	113
4.2	Mise en courbure : de la théorie à la pratique.....	114
4.2.1	Modèle ANSYS .....	114
4.2.1.1	Modélisation du microécran Izumi .....	114
4.2.1.2	Résultats des simulations .....	116
4.2.2	Procédé de courbure .....	118
4.2.2.1	Courbure de capteurs .....	118
4.2.2.2	Courbure de microécrans.....	119
4.2.3	Déformation mécanique .....	120
4.2.3.1	Présentation du problème .....	120
4.2.3.2	Quantification de la déformation mécanique .....	121
4.2.3.3	Conclusions sur la déformation mécanique .....	122
4.2.3.4	Conséquences sur la conception optique .....	123
4.2.4	Validation expérimentale du modèle.....	123
4.2.4.1	Matériel et méthode.....	124
4.2.4.2	Résultats expérimentaux.....	126
4.2.4.3	Discussions .....	129
4.2.4.4	Conclusion .....	133
4.2.5	De l'OLED au GaN.....	133
4.2.5.1	Simulation de GaN uniformément réparti .....	134
4.2.5.1.1	Présentation du modèle .....	134
4.2.5.1.2	Résultats de simulation .....	134
4.2.5.2	Simulation de GaN pixélisé.....	135
4.2.5.2.1	Présentation du modèle.....	135
4.2.5.2.2	Test sur une limite du modèle .....	136
4.2.5.2.3	Résultats de simulation .....	137
4.2.5.2.4	Conclusion et perspectives .....	138
4.3	Procédé et résultats.....	139
4.3.1	Avant courbure.....	139
4.3.1.1	Réception des wafers.....	139

---

---

4.3.1.2	Dépôts du Hardcoat .....	140
4.3.1.3	Amincissement et découpe .....	140
4.3.2	Après courbure .....	140
4.4	Conclusion .....	141
<b>5</b>	<b>Démonstrateurs de systèmes visuels avec microécran courbe .....</b>	<b>143</b>
5.1	Le choix du démonstrateur .....	143
5.1.1	Raisonnement menant au choix du démonstrateur .....	143
5.1.2	Présentation d'autres systèmes de viseur .....	144
5.1.2.1	Viseur réflectif de Bauer .....	144
5.1.2.2	Viseur X-pro 2 .....	145
5.1.3	Cahier des charges .....	146
5.1.3.1	Raisonnement général .....	146
5.1.3.2	Qualité image et système visuel .....	147
5.1.3.2.1	Modélisation en trois temps .....	147
5.1.3.2.2	Evaluation de la qualité image et modèle d'œil .....	149
5.1.3.2.3	Simulation des mouvements de l'œil .....	151
5.1.3.3	Cahiers des charges complets .....	153
5.1.3.3.1	Viseur augmenté, MVF .....	153
5.1.3.3.2	Voie directe, MVF .....	154
5.1.3.3.3	Viseur électronique, EVF .....	155
5.2	Design avec microécrans plan et courbe .....	157
5.2.1	EVF .....	157
5.2.1.1	Système de référence : microécran courbe .....	157
5.2.1.2	Microécran plan .....	158
5.2.1.2.1	Épaisseur limitée à 28 mm .....	158
5.2.1.2.2	Épaisseur non limitée .....	159
5.2.1.2.3	Asphérisation de dioptries .....	160
5.2.1.2.3.1	Coniques et asphériques .....	160
5.2.1.2.3.2	Système de qualité image équivalent par asphérisation .....	161
5.2.1.2.4	Ajout d'une lentille .....	162
5.2.1.2.4.1	Lentille de champ sans épaisseur limitée .....	162
5.2.1.2.4.2	Lentille de champ et conique .....	163
5.2.1.2.5	Conclusion .....	164
5.2.2	MVF .....	164
5.2.2.1	Premiers résultats .....	164
5.2.2.2	Voie directe, compensation .....	165
5.2.2.3	Résultat final .....	166
5.2.2.3.1	Présentation générale .....	166
5.2.2.3.2	Qualité image .....	167
5.2.2.3.3	Volume .....	168
5.2.2.3.4	Flux entrant dans la pupille .....	169
5.2.2.3.5	Remarques sur l'écart à la forme de base .....	170
5.2.2.4	Compensation du système final .....	170
5.3	Tolérancement et optomécanique .....	172
5.3.1	Présentation du tolérancement .....	172
5.3.2	Tolérancement EVF .....	173
5.3.2.1	Tolérancement de microécran courbe .....	174
5.3.2.1.1	Erreurs de forme et de position du microécran courbe .....	174
5.3.2.1.2	Tolérances et profondeur de foyer .....	175
5.3.2.2	Tolérancement de l'EVF complet .....	177
5.3.3	Tolérancement MVF .....	178
5.3.3.1	Difficulté du tolérancement en <i>freeform</i> .....	178
5.3.3.2	Fabrication de dioptries <i>freeform</i> .....	179

5.3.3.3	Tolérancement mené pour le MVF .....	180
5.3.4	Optomécanique .....	182
5.3.4.1	Optomécanique EVF .....	182
5.3.4.2	Optomécanique MVF .....	182
5.4	Réalisations pratiques et caractérisations .....	183
5.4.1	Caractérisation des dioptries <i>freeform</i> .....	184
5.4.2	Caractérisation du prototype complet .....	184
5.4.2.1	Test visuel .....	184
5.4.2.1.1	Description du test .....	184
5.4.2.1.2	Résultats .....	185
5.4.2.2	Mesure de MTF .....	185
5.4.2.3	Relecture critique de la mesure de FTM, suite à la soutenance de thèse .....	188
5.4.2.3.1	Erreur fondamentale .....	188
5.4.2.3.2	MTF théorique de référence – erreur liée à la diffraction .....	189
5.4.2.3.3	MTF théorique de référence et méthode ‘stated edge’ .....	189
5.4.2.3.4	Erreur expérimentale – gestion du fond continu .....	189
5.4.2.3.5	Méthode qui aurait fonctionné .....	190
5.4.2.4	Conclusions et perspectives .....	191
5.5	Conclusion .....	191
<b>6</b>	<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>193</b>
6.1	Conclusion générale et perspectives techniques .....	193
6.1.1	Conclusion générale .....	193
6.1.2	Perspectives techniques .....	194
6.2	Perspectives sur la Réalité Augmentée .....	195
6.2.1	L’utilité de la Réalité Augmentée .....	195
6.2.1.1	L’aspect écologique .....	195
6.2.1.2	L’aspect humain .....	195
6.2.1.2.1	Les promesses pédagogiques .....	195
6.2.1.2.2	L’augmentation de l’humain .....	196
6.2.2	Conclusion personnelle .....	196
<b>1</b>	<b>Annexe – Comparaison des viseurs d’appareils photographiques .....</b>	<b>198</b>
<b>2</b>	<b>Annexe - Compromis dans les systèmes visuels .....</b>	<b>199</b>
2.1	Compromis intrinsèques aux microécrans .....	199
2.2	Compromis liés aux systèmes optiques .....	199
<b>3</b>	<b>Annexe – Utilisation didactique de Zemax OpticStudio .....</b>	<b>200</b>
3.1	Utilisation générale du logiciel .....	200
3.2	Exemple d’utilisation : décalage de pupille .....	200
3.3	Exemple d’utilisation : contrôle de géométries <i>freeform</i> .....	203
3.3.1	Minimiser les tilts des miroirs .....	203
3.3.2	Contrôler les écarts de distances entre les miroirs .....	203
3.3.3	Contrôler les rayons de courbure des dioptries .....	204
3.3.4	Contrôler le volume du système .....	204
3.3.5	Contrôler l’obstruction des rayons par les dioptries .....	205
3.4	Calcul numérique de la distorsion .....	207
3.5	Optimisation d’un système optique <i>freeform</i> .....	209
3.5.1	Méthode générale .....	209
3.5.2	Analyse des aberrations : Full-Field Displays .....	210
3.5.3	Optimisation en <i>freeform</i> .....	211
<b>4</b>	<b>Annexe - Polynômes de Zernike .....</b>	<b>213</b>
4.1	Définition mathématique .....	213
4.1.1	Généralités et définitions .....	213
4.1.2	Visualisation des premiers Polynômes .....	214

---

4.2	Utilisation en conception optique .....	214
4.2.1	Description des surfaces .....	215
4.2.2	Autres éléments importants pour la conception optique.....	215
<b>5</b>	<b>Annexe - Courbure optimisant le flux .....</b>	<b>216</b>
5.1	Rappel du chapitre 3.....	216
5.2	Le calcul.....	216
<b>6</b>	<b>Annexe - Déformation mécanique .....</b>	<b>218</b>
6.1	Le choix d'une surface de référence courbe .....	218
6.1.1	Généralités .....	218
6.1.2	Surfaces biconique et sphéro-cylindrique.....	218
6.2	Présentation des coordonnées $u v w$ .....	219
6.3	Détermination des écarts mécaniques .....	220
<b>7</b>	<b>Annexe - Courbure de foyer avec distorsion .....</b>	<b>222</b>
7.1	Rappel des éléments du chapitre 3 .....	222
7.2	Calcul .....	222
7.2.1	Cas du rayon $y_p = 0$ .....	223
7.2.2	Cas du rayon $y_p = Y_p / Y_p = 1$ .....	223
<b>8</b>	<b>Annexe - Systèmes optiques .....</b>	<b>224</b>
8.1	Résultat final, système courbe .....	224
8.1.1	Données numériques du systèmes.....	224
8.1.2	Qualité image sur les configurations alternatives .....	226
8.2	EVF.....	227
8.2.1	Système courbe .....	227
8.2.2	Systèmes plans .....	227
8.2.2.1	Trois lentilles sphériques, 28 mm .....	227
8.2.2.2	Trois lentilles sphériques, sans limite d'épaisseur .....	227
8.2.2.3	Trois lentilles, deux coniques, 28 mm .....	228
8.2.2.4	Quatre lentilles asphériques, 28 mm .....	228
8.2.2.5	Quatre lentilles, sans limite d'épaisseur .....	229
8.2.2.6	Quatre lentilles, 28 mm et deux coniques .....	229
<b>9</b>	<b>Tests visuels .....</b>	<b>230</b>
<b>10</b>	<b>Table des figures .....</b>	<b>231</b>
<b>11</b>	<b>Références .....</b>	<b>233</b>
<b>12</b>	<b>Résumé.....</b>	<b>240</b>
	Résumé.....	240
	Abstract.....	240

---

## 2 LISTE DES ACRONYMES

---

AIM – aerial image modulation

AR – réalité augmentée

CCD – Charge Coupled Device

Cd – Candela

CEA-Leti – Commissariat à l’Energie Atomique et alternative, Laboratoire d’Electronique et de Technologie de l’Information

CDM - Camera de Mesure

CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor

DBG – Dicing Before Grinding

EB – Eye Box

EQE – External Quantum Efficiency

ER – Eye Relief

EVF – Electronic ViewFinder

GaN – Gallium Nitride (Nitrure de Gallium)

HC – HardCoat

HMD – Head-Mounted Display

HUD – Head-Up Display

ISO – International Organization for Standardization

LAIP - Laboratoire d'assemblage et d'intégration pour la photonique

LCOS – Liquid Cristal On Silicon

LED – Light Emitting Diode

MEB – Microscopie Electronique à Balayage

MEMS – Micro ElectroMechanic Systems

MF – Merit Function

MTF – Modulation transfer function

MVF – Mixed ViewFinder

NAT – Nodal Aberration Theory

OLED – Organic Light Emitting Diode

PSF – Point Spread Function

ROI – Region Of Interest

Sag - sagital

SR – Stress-Release

T-LCM – Transmissive-Liquid Cristal Microdisplays

TMA - three mirror anastigmat

ZOS - zemax opticstudio

## 3 INTRODUCTION

---

### *Conception d'un système visuel à base d'optique freeform et de microécran courbes.*

Le titre de la thèse, comme souvent, peut sembler abscond, mais en expliquant le contexte de cette thèse, il peut s'éclaircir. Avant ce travail, Christophe Gaschet avait effectué sa thèse dont l'objet était d'explorer et de quantifier les avantages procurés par la mise en courbure d'un capteur d'images. Son travail s'est concentré sur le gain en compacité offert par la courbure, et il a conçu un démonstrateur très performant, démontrant l'intérêt d'une telle approche.

Suite à ce résultat, une question s'est posée : à quel point la courbure de microécrans peut-elle rendre plus compacts les systèmes de Réalité Augmentée (RA) ? Pour y répondre, ce projet de thèse a été lancé : concevoir un système visuel (de RA) avec un microécran courbe. Le but est alors d'étudier les apports de la courbure aux systèmes visuels, en particulier vis-à-vis de la compacité. Puis, au fil de l'exploration du sujet, l'optique freeform a été ajoutée pour mieux préciser le type de système étudié.

Pourtant, cette question peut *a priori* paraître saugrenue pour le lecteur qui n'est pas familier avec la Réalité Augmentée : pourquoi chercher à les développer et à les rendre plus compact ?

La Réalité Augmentée est un concept ancien qui consiste à ajouter de l'information au réel. Si ce concept est ancien, il est aussi perçu comme un concept du futur, pourtant il est déjà bien présent : un GPS guidant une personne en affichant sur un écran la direction à prendre ou en l'énonçant dans une oreillette sont des exemples actuels de RA. Le développement de la RA passe par le développement d'algorithmes, mais surtout par le développement de moyens matériels réalisant l'interface entre l'utilisateur et ces algorithmes. De l'analyse de ce marché, il ressort que la RA serait plus largement déployée si nous avions des moyens techniques plus fluides pour l'utiliser, comme celles des célèbres œuvres de fiction *Minority Report* ou *Iron Man*.

Ainsi, l'objectif officieux de ces développements consiste surtout à rendre réels ces systèmes fictifs. Et l'un des principaux obstacles à leur concrétisation est le poids et le volume des dispositifs de RA. C'est pour cela que la courbure a été perçue comme une occasion de rendre ces systèmes plus compacts. Selon les résultats, nous pourrions peut-être la transformer en un produit commercial innovant et rémunérateur.

Cet objectif ambitieux constitue un défi scientifique et technique, nécessitant d'abord une compréhension fine du système visuel humain et de son interaction avec un système optique utilisant un microécran. Le 1<sup>er</sup> chapitre développe les trois pôles fondamentaux au fondement de ce travail : la vision humaine, les microécrans et les systèmes optiques visuels. Le 2<sup>ème</sup> chapitre présente la théorie de la conception optique, utile pour la compréhension du reste de la thèse. Le 3<sup>ème</sup> chapitre détaille les apports de la courbure de microécrans aux systèmes optiques visuels et freeform. Le 4<sup>ème</sup> chapitre contient les travaux en lien avec la mise en courbure des microécrans. Enfin, le 5<sup>ème</sup> chapitre est la synthèse de tous les enseignements précédents, mis à profit pour réaliser des systèmes optiques, dont l'un a été fabriqué et assemblé, ce qui a permis de réaliser la caractérisation d'un démonstrateur utilisant un microécran courbe.

Au-delà du défi scientifique et technique que constitue ce travail de recherche, des remarques en lien avec l'utilisation de la RA sont présentées à la fin du manuscrit, pour s'interroger sur le sens de la recherche dans certains domaines, dont la RA est un exemple, à mon sens, emblématique.

# 1 PERCEPTION VISUELLE, SYSTEMES VISUELS ET MICROECRANS

---

L'objectif de ce premier chapitre est d'introduire trois points : la perception visuelle, les systèmes optiques visuels, et les microécrans. Ce trinôme constitue les trois pôles à prendre en compte pour comprendre l'ensemble de la thèse. Je commence par décrire la perception visuelle. Si on peut vite penser que l'on sait comment fonctionne la vision humaine, la décrire précisément permet de mieux prendre en compte les besoins de l'utilisateur lors de conception des systèmes optiques. Puis, je détaille ce qu'est un microécran, ainsi que les technologies existantes. Ensuite, j'explique ce qu'est un système optique visuel, en particulier, ceux qui utilisent des microécrans et leurs applications. Enfin, je présente, dans le cadre des systèmes visuels quelques perspectives d'avenir pour deux technologies de microécrans.

## 1.1 LA PERCEPTION VISUELLE

La perception visuelle est parfois résumée à sa partie immédiatement visible, l'œil. Pourtant, il existe des personnes qui sont aveugles, avec des yeux en bon état [1]. Ce phénomène est alors expliqué par l'endommagement de leur cortex visuel, aire du cerveau dédiée à la vision. Je commence donc par décrire l'œil, puis le cerveau pour dresser les contours de la perception visuelle. Puis, je présente certaines caractéristiques importantes de la perception visuelle.

### 1.1.1 Brève description de la vision

L'anatomie de l'œil, présentée à la Figure 1.1, est connue de longue date, et il existe de nombreuses références sur le sujet. Souvent, la vision est expliquée par analogie aux appareils photographiques, car dans les deux cas, ces systèmes ont pour but d'obtenir des images. J'utiliserai moi (ou nous utiliserons nous) aussi cette comparaison, afin d'en montrer les limites. Ainsi, en résumé, l'œil correspond à l'objectif photographique associé au capteur, et le cerveau correspond à l'ordinateur qui traite les images. Mais comme le souligne B. Walker [2], entre l'œil et l'appareil photographique, c'est bien l'œil qui est premier, les appareils photographiques en sont les copies.

Un appareil photographique utilise un objectif pour focaliser l'image sur le capteur. Celui-ci est constitué de lentilles alignées les unes derrière les autres, qui gèrent la convergence des rayons, et d'un diaphragme, utile pour gérer la quantité de lumière entrante. Pour l'œil, les éléments gérant la convergence des rayons sont : la cornée, les humeurs aqueuse et vitrée, ainsi que le cristallin. La cornée ainsi que les humeurs apportent la majorité de la puissance optique, tandis que le cristallin permet, grâce à la contraction par les muscles ciliés, de gérer la distance de mise au point. L'iris, quant à lui, est l'élément correspondant au diaphragme de l'appareil photo, qui détermine la quantité de lumière entrant dans l'œil.

La rétine correspond au capteur d'image de l'appareil photographique, c'est là que les rayons convergent pour former l'image. Il ne reste plus qu'à « l'enregistrer ». Dans le cadre de cette thèse, axée sur la courbure de matrices CMOS, il est utile de préciser que la rétine est justement un capteur courbe biologique illustrant ce que la courbure apporte à un système optique. Cette surface, très complexe, est composée de



nombreuses couches de cellules, dont les plus connues sont les cônes et les bâtonnets, analogues aux pixels. Globalement, la rétine a pour fonction de convertir la lumière en un signal électrique pour le cerveau. Ce message est transmis via le nerf optique, et « traité » par le cerveau pour accomplir la *fonction visuelle*.

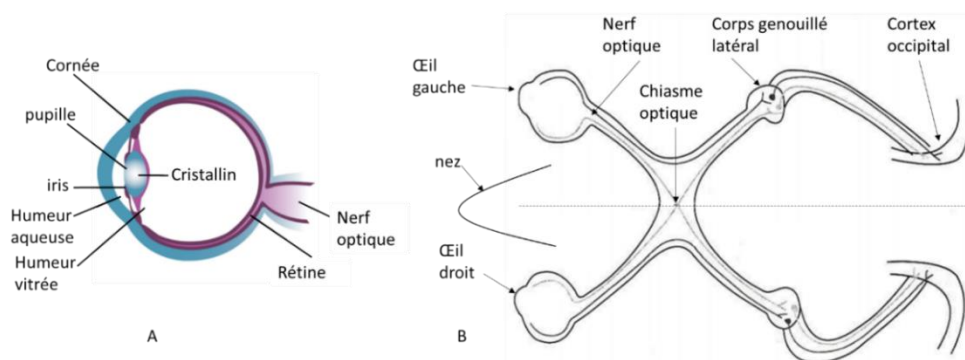


Figure 1.1 - A : Structure générale de l'œil. B : Coupe du circuit visuel primaire. Schémas de [3] et [4].

La comparaison avec l'appareil photographique doit être désormais mise de côté pour mieux cerner les spécificités du système visuel. Toutefois, ce thème est trop vaste pour être abordé exhaustivement ici. Parmi ces points d'intérêt majeurs, on peut citer : les mécanismes de mouvement de l'œil, du cristallin et de la pupille, les réactions chimiques dans la rétine, la transmission de l'information jusqu'au cortex occipital, le fonctionnement ophtalmologique et ses pathologies. Ce travail étant bien décrit dans la littérature, les références suivantes nous semblent complémentaires [3,5–10], [11,12].

### 1.1.2 Quelques caractéristiques de la vision humaine

#### 1.1.2.1 Rôle de la rétine

Si la comparaison avec l'appareil photographique n'est plus adaptée pour comprendre les spécificités de la vision, c'est qu'en détail, les deux systèmes fonctionnent très différemment. En particulier, il y a des différences importantes entre un capteur électronique et la rétine. Les pixels d'un capteur CMOS (ou CCD) forment une matrice captant le flux lumineux de façon homogène sur toute son étendue, tandis que la rétine a une répartition spatiale inhomogène de ses « pixels », qui ne sont pas tous identiques [13]. Les cônes, responsables de la vision des couleurs et à haute luminance<sup>1</sup>, sont principalement concentrés dans une zone spécifique de la rétine, la fovéa. Il s'agit d'une zone, de petite surface par rapport à celle de la rétine, qui nous permet de visualiser les détails fins. Le reste de la rétine comporte presque exclusivement des bâtonnets, responsables de la vision par faible luminance ainsi que de la perception des mouvements et des motifs, et ne perçoit pas les couleurs. La Figure 1.2 illustre la répartition moyenne des cônes et bâtonnets sur la rétine.

<sup>1</sup> Luminance : grandeur radiométrique correspondant à la puissance lumineuse émise par une surface par unité de surface apparente et par unité d'angle solide ( $W/m^2/sr$ ). Elle correspond à la sensation visuelle humaine de luminosité.

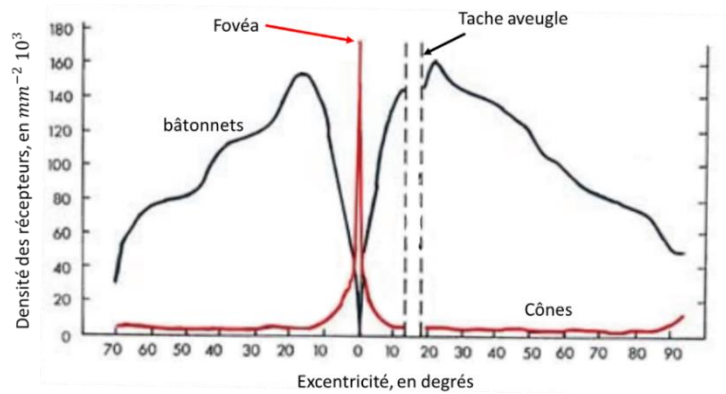


Figure 1.2 - Répartition des récepteurs sur la rétine, cône et bâtonnets, issu de [13,14].

Cette répartition des récepteurs permet à l’œil d’être exceptionnel pour la gestion de la dynamique : la luminance nécessaire pour « saturer » la rétine, c’est-à-dire l’éblouir, est très élevée, tandis qu’une très faible luminance suffit à utiliser notre système visuel. Cet écart correspond à la dynamique. Elle est aussi aidée par la pupille qui s’ouvre ou se ferme, de 2 mm à 8 mm [15], selon les conditions d’éclairage, comme dans un objectif photo.

Dans le domaine de la photographie, la dynamique se donne en diaphragmes : augmenter d’un diaphragme double la surface de la pupille, et donc la quantité de lumière entrant dans l’objectif. Un capteur numérique autorise en moyenne jusqu’à 15 diaphragmes de dynamique, tandis que l’œil en autorise jusqu’à 24 [16]. Comme il s’agit de doubler le flux lumineux entrant, un appareil photographique moderne fonctionne avec un flux normalisé allant de 1 à  $2^{15} = 3\,268$ , tandis que l’œil va de 1 à  $2^{24} = 16\,777\,216$  ! Quotidiennement, nous sommes capables de voir du clair de lune ( $0.01\text{ cd/m}^2$ ) au plein soleil ( $10\,000\text{ cd/m}^2$ ), soit 6 décades au cours d’une journée. Plusieurs études ont même montré qu’il était possible de détecter quelques photons, voire un seul photon, à l’œil nu [17,18]. En revanche, l’œil a besoin de temps pour utiliser toute sa dynamique, on considère qu’il faut 30 minutes environ pour passer de la vision de jour à celle de nuit [19].

La dynamique du système visuel est obtenue, en grande partie, par l’utilisation des cônes et des bâtonnets. Cette répartition a une autre conséquence importante pour les système optiques visuels: l’acuité visuelle est excellente au niveau de la fovéa, mais se dégrade rapidement au-delà comme le montre la Figure 1.3 A.

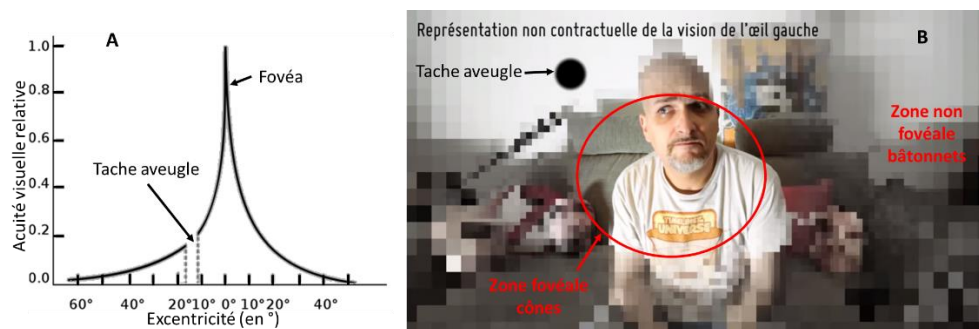


Figure 1.3 – A : acuité visuelle relative en fonction de l'excentricité. B : représentation schématique de la vision de l’œil gauche, capture d’écran de la vidéo de e-penser [11].

La perte en acuité en fonction du champ (Figure 1.3 B) est alors compensée par des mouvements rapides des yeux, qui balayent continuellement la scène à observer. Les fonctions avancées des aires visuelles du cerveau reconstituent une image complète, sur tout le champ de vue, pour fournir la perception d’une image homogène.

Le champ visuel humain est composé de plusieurs zones différentes, et asymétriques, à cause du nez qui bloque une partie du champ. En considérant l'ensemble du champ, nous pouvons voir jusqu'à 180° horizontalement. Toutefois, et c'est peut-être là une différence fondamentale par rapport aux appareils photographiques, les aires visuelles n'ont pas toutes le même rôle. **Contrairement à l'appareil photographique, le système visuel ne produit pas d'image à proprement parler, mais fournit les signaux nécessaires à la perception de notre environnement.**

Ainsi, les zones périphériques ne fournissent pas une image nette, mais permettent, par exemple, de détecter un évènement (essentiellement liée au mouvement). Lorsque cela arrive, nous avons le réflexe de tourner notre regard en direction du mouvement. On peut résumer en disant que la fovéa fournit une observation détaillée des objets, tandis que l'aire externe sert principalement à la perception des motifs spatio-temporels, et les grands champs sont sensibles aux mouvements et aux variations d'intensité lumineuse, jouant ainsi un rôle essentiel lorsque la luminosité est faible [20–22], [22].

Toutefois, la transition entre le champ central et les grands champs est continue, et la frontière entre ces zones est forcément un choix arbitraire. Pour donner un ordre d'idée, la macula se trouve de 0° à 17°, zone considérée comme « champ central », avec la fovéa au centre, de 0 à 5°. Au-delà, se trouvent les zones externes. Mais avec les mouvements de l'œil, on considère les grands champs à partir de 60°, car la macula n'y a pas accès [21].

### 1.1.2.2 Mouvements oculaires et rôle du cerveau

Le seuil des 60° à partir duquel on considère le grand champ est très variable en fonction des individus, comme de nombreuses informations sur le système visuel. Les mouvements oculaires explorent le champ visuel par plusieurs moyens : d'abord une rotation des yeux dans leur orbite, puis une rotation de la tête, et enfin, le corps entier, pour s'approcher ou s'aligner. Lors d'expérimentations, certains sujets ont tendance à n'utiliser que la rotation des yeux jusqu'à des angles d'environ 40°, et tournent la tête au-delà, tandis que d'autres ont tendance à tourner la tête dès 5-10° [23,24].

Pour arriver à reconstituer une image à une fréquence d'environ  $30 \text{ image/s}$ , en balayant environ  $60^\circ$  de champ avec la macula d'environ  $17^\circ$ , et en considérant un mouvement des yeux en spirale pour analyser toute la scène, il faudrait une vitesse de mouvements des yeux d'environ  $v = \frac{D_{ang}}{t} = 2360^\circ/\text{s}$ . Pourtant, dans la littérature, les valeurs trouvées pour les vitesses maximales des saccades oculaires sont de l'ordre de  $400^\circ/\text{s}$ , ce qui en fait déjà l'un des mouvements les plus rapides du corps humain [25]. Il est donc impossible que l'œil balaye la totalité de la scène pour reconstituer une image nette. En fait, les saccades oculaires ne se font pas de manière préétablie, mais se font en fonction des détails d'intérêt de la scène, en sautant d'une zone d'intérêt à une autre. Par ailleurs, il existe aussi un mouvement oculaire continu, servant à la poursuite d'une cible. Comme la poursuite dépend de la vitesse de l'objet, l'image perçue n'est jamais statique. Le fonctionnement de la perception visuelle sur ce point est donc incomparable à celle d'un appareil photographique ou d'une caméra qui ont une fréquence de rafraichissement indépendante de l'objet. A noter, par ailleurs, qu'il n'y a pas de traitement visuel de l'information pendant les saccades, car le temps de réponse des neurones est trop faible pour la vitesse ces saccades, mais il est bien présent dans les mouvements continus de poursuite [26].

Ainsi, non seulement le cerveau « calcule » partiellement l'image reconstituée, à la fois pour la netteté et pour les couleurs, mais en plus, il discrimine les éléments d'intérêts du fond, en même temps qu'il explore la scène, et ce, en continu, comme le montre la Figure 1.4.



Figure 1.4 - Visualisation de l'observation d'une peinture. Les points marquent les arrêts du regard sur un détail, le temps d'arrêt est indiqué en ms. Les points sont reliés dans l'ordre d'observation. Issue de [25].

Tout ce qu'on a vu jusqu'à présent traite, évidemment, du système visuel, mais j'ai laissé de côté un point important : nous avons deux yeux. La vision bilatérale permet de percevoir, par exemple, la profondeur, grâce à la parallaxe et à la disparité binoculaire. Deux phénomènes en particulier sont importants pour comprendre le fonctionnement de la vision bilatérale : la convergence et l'accommodation. Ces deux phénomènes sont fonction de la distance à l'objet observé.

L'accommodation correspond à la compression du cristallin par les muscles ciliaires, pour faire le focus sur l'objet. Ce sont les cônes dans la fovéa qui envoient le signal de compression aux muscles ciliaires. Toutefois, si la luminance est inférieure à  $0.01 \text{ cd.m}^{-2}$ , les cônes n'envoient plus de signal [27]. L'accommodation n'est possible, par définition, que lorsque l'objet se situe entre le punctum proximum et le punctum remotum. La distance entre l'œil et ces deux points varie beaucoup avec l'âge (pour un œil emmétrope) : entre 7 et 25 cm pour le punctum proximum (point le plus proche que l'on peut voir distinctement), et l'infini pour le punctum remotum (point le plus loin que l'on peut voir distinctement). Pour passer de l'un à l'autre, l'accommodation prend environ 1 seconde. Puis, l'œil a une légère oscillation autour de la position estimée d'accommodation, avec une fréquence d'environ 5 Hz [27].

La convergence correspond à la rotation de chaque œil pour que les deux lignes de vision se croisent sur l'objet désiré. Si de nombreux travaux ont étudié ce phénomène, certaines hypothèses sur les interactions entre la convergence et les saccades oculaires restent à vérifier. Il semble que l'œil directeur se fixe le premier sur la cible, et que l'autre œil converge ensuite vers ce même point [28]. C'est la convergence est directement liée à la vision binoculaire, qui permet d'évaluer la profondeur et le relief, d'abord grâce à la disparité binoculaire, ensuite grâce à la parallaxe [29].

En plus des tâches que le cerveau réalise en continu dont nous avons déjà parlé, il analyse de nombreux indices dans les scènes. Certains sont exploités, par exemple, pour réaliser les trompe-l'œil, ce sont les indices picturaux : taille relative des objets, hauteur dans le champ visuel, perspective, ombres, clairs obscurs, brillance, reflet, transparence entre autres. Mais d'autres sont plus généraux : la parallaxe, la convergence et l'accommodation, certaines aberrations comme le chromatisme secondaire [30], mais aussi la présence d'humains (visages ou des indices humains comme des pas dans le sable), ainsi que tous les indices non-visuels (sonores, olfactifs, ...). Tout ceci, se faisant sans relâche, et à une fréquence d'environ 30 images par seconde !

La complexité de la perception visuelle a été brièvement abordée. Cette présentation a permis de mieux comprendre les caractéristiques de la perception visuelle. Dans le cadre de ce travail, l'ensemble œil-cerveau, qui forme la perception visuelle, correspond au capteur d'image. Il faut maintenant présenter le système permettant de produire l'image à observer, composé du microécran, ainsi que du système optique.

## 1.2 LES MICROECRANS

### 1.2.1 Définitions et applications

Un microécran est un écran miniature, produisant une image destinée à être visualisée à travers un système optique. Si l'on peut donner des tailles caractéristiques pour définir un microécran, environ inférieur à 50 mm de diagonale [31], c'est moins la taille que son utilisation conjointe avec un système optique qui caractérise ce type d'écran [32]. La Figure 1.5 montre les dimensions d'un microécran.

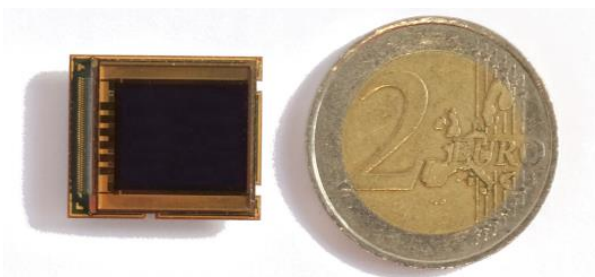


Figure 1.5 - Illustration d'un microécran Izumi avec une pièce pour donner l'échelle.

Ces écrans sont utilisés dans plusieurs types de dispositifs assez différents comme les viseurs électroniques, les *Head-Mounted Displays*, les *Head-Up Displays*, ou encore les pico-projecteurs [33]. Tous ces systèmes ont en commun l'objectif de faire voir une image à un utilisateur. Je décris les principales applications des microécrans, afin d'en rendre plus concret leur usage.

La classification de ces dispositifs est relativement complexe, mais ils permettent tous d'ajouter de l'information visuelle dans le réel. Plutôt que des catégories étanches, les applications sont plutôt à placer sur un axe de virtualité, appelé *virtuality continuum*, ou continuum de virtualité [34]. Nous les présentons ici selon leur aspect matériel plutôt qu'applicatif.

#### 1.2.1.1 Head-Mounted Display

Les Head-Mounted Displays (HMD), illustrés par la Figure 1.6, traduit littéralement par « écrans portés sur la tête », sont des dispositifs portatifs qui permettent d'afficher une image dans son champ de vision, et peuvent être monoculaires (figure 1.6 A) ou binoculaires (figures 1.6 B et C).



Figure 1.6 – HMD de divers types. A – Google Glass : lunettes monoculaire de RA ; B – Microsoft Hololens : casque binoculaire de RA ; C – Oculus Quest : casque de réalité virtuelle

Du côté totalement virtuel du spectre, il y a les casques de réalité virtuelle. Développés principalement, pour des applications de simulation ou des jeux vidéo, ils ont surtout pour but d'être « immersifs », c'est-à-dire de plonger l'utilisateur dans ce monde virtuel. Ils ont donc généralement de grands champs de vue (> 60 °), une résolution assez poussée (full HD), une électronique rapide (> 60 Hz) et de nombreux capteurs (détection du regard, du mouvement des doigts, de la position, caméras, ...). Si cette catégorie a encore quelques améliorations en ligne de mire, ces dispositifs sont aujourd'hui au point, et commercialisés.

Plus au milieu du spectre, on trouve les dispositifs de video see-through et de Réalité Augmentée (RA). Contrairement à la réalité virtuelle, ils ne coupent pas la vision du réel, mais y ajoutent de l'information. Le video see-through ressemble à un casque de réalité virtuelle, mais des caméras enregistrent le réel pour le ré-afficher sur un écran, avec de l'information en plus. C'est un dispositif qui ressemble beaucoup aux viseurs électroniques, mais, contrairement aux viseurs, il est souvent binoculaire. Les dispositifs de RA font plutôt référence aux systèmes permettant de voir directement le réel, tout en y superposant de l'information, et la binocularité y est moins systématique. Par ailleurs, certains systèmes embarquent aussi des capteurs pour modifier l'affichage en temps réel, selon le comportement de l'utilisateur, comme par exemple la direction de son regard, ou un geste de la main. C'est notamment le cas du casque Hololens de Microsoft.

### 1.2.1.2 Viseurs électroniques

Les viseurs électroniques sont les dispositifs de visée dont sont équipés un nombre croissant d'appareils photographiques. Il s'agit d'un système optique, souvent compact, qui retransmet en direct l'image vue par le capteur de l'appareil photographique, ou de la caméra, et ce, avant même d'avoir déclenché l'enregistrement de l'image. Ces viseurs remettent en cause la longue domination des viseurs reflex sur le marché des appareils photographiques haut de gamme, en particulier par le confort apporté par l'anticipation du rendu de l'image. La Figure 1.7 montre un exemple d'EVF.



Figure 1.7 – Viseur électronique du Sony RX 100.

Le but d'un viseur n'est pas d'enregistrer une image, mais de laisser l'utilisateur voir le réel afin qu'il règle et contrôle son outil. Si une simple « fenêtre » peut suffire à viser l'objet d'intérêt, les designs se sont diversifiés pour permettre un contrôle plus poussé de l'outil. Par exemple, le viseur peut aussi servir à d'autres tâches [35] :

- Cadrer la scène pour définir les limites de l'image ;
- Régler la mise au point pour définir quelle partie de la scène doit être nette ;
- Déterminer l'exposition du capteur en réglant les paramètres de l'appareil (ouverture, temps d'exposition, ISO) ;
- Pré-visualiser l'image pour avoir un retour sur les réglages actifs avant de prendre le cliché ;
- Servir d'interface homme-machine pour lui permettre de gérer les réglages (format d'image, paramètres de fonctionnement, aspect ratio, options d'image etc).

On peut classer les viseurs en trois familles : la visée optique, la visée électronique et la visée mixte. La visée optique correspond à une vision directe du réel, par l'intermédiaire du système optique. De nombreuses variantes ont existé, et elles ne sont quasi plus que de deux types : le viseur reflex et le viseur « *coupled rangefinder* », typique de la marque Leica. La visée électronique, à l'inverse de la visée directe, coupe la vision du réel pour la remplacer par une image émise par un microécran [35]. Ce type de visée, longtemps marginale, émerge rapidement grâce aux progrès sur la qualité des écrans. Le dernier type, la visée mixte, est la plus récente, et consiste en une combinaison des deux. Mis au point en particulier par la marque *Fujifilm*, pour son modèle *X-pro*, cette visée permet de choisir entre regarder le réel, c'est-à-dire être en visée optique, regarder uniquement le microécran, c'est-à-dire être en visée électronique, ou de regarder le réel en ajoutant des informations numériques à l'image, c'est-à-dire être en RA.

La visée optique a l'avantage de profiter des qualités du système visuel (dynamique, rapidité, passivité du système), et de ne pas déformer l'image du réel à la visée. La visée électronique permet principalement de pré-visualiser les réglages et d'ajouter de l'information partout sur l'image. La visée mixte profite des avantages des deux et appartient donc déjà aux technologies de RA, mais sans être un HMD.

Un viseur intégrant la RA présente des différences importantes par rapport à un viseur seulement optique ou électronique. Il doit combiner deux voies optiques afin de voir le réel, tout en y superposant l'image du microécran. Cette nouvelle contrainte nécessite un élément additionnel : le combineur (*combiner* en anglais). Cet élément optique permet de placer le microécran hors du champ de vision de l'utilisateur, pour éviter qu'il n'obstrue la vision directe, tout en assurant que l'image issue de ce même microécran apparaisse dans le champ de vision. Dans la version la plus simple, le combineur consiste en un simple miroir partiellement réfléchissant orienté à 45°, c'est notamment le cas des *Google Glass*. Mais de nombreuses variantes existent pour améliorer la qualité image, augmenter le champ ou encore rendre le système plus compact. Une revue des possibilités, datant d'il y a 16 ans, donne un aperçu de la diversité des systèmes imaginés pour la RA [36].

La plupart des éléments communs aux viseurs et aux HMD sont dus au fait que ce sont des systèmes visuels. Parmi les points communs, on trouve : la présence d'un microécran, la projection d'une image virtuelle, la présence d'une EB (Eye Box, « boîte à œil » zone où l'œil voit l'image), le spectre d'émission adapté à l'humain, une qualité image adaptée à l'humain, et une compacité aussi faible que possible. Ainsi, la conception d'un viseur utilisant la RA, permet de se concentrer sur la plupart des points optiques importants, qui se retrouvent aussi dans les systèmes HMD de RA. L'annexe 1 présente en complément des points importants de comparaison entre les différents viseurs d'appareils photographiques.

### 1.2.1.3 Head-Up Display

Les Head-Up Displays (HUD), littéralement « écrans tête haute », visent le même objectif que les HMD, mais au lieu de porter le dispositif sur la tête, celui-ci est par exemple incrusté dans un cockpit d'avion. L'objectif est d'afficher des informations directement dans le champ de vision du pilote, afin de lui éviter de détourner

le regard. Ce système se trouve aussi dans les voitures pour afficher la vitesse directement sur le pare-brise. Ces deux exemples sont présentés dans la Figure 1.8.



Figure 1.8 – Tableau de bord HUD. Gauche : avion de chasse F-16 ; droite : Peugeot 5008

Les systèmes HUD ont beaucoup de points communs avec les HMD ou les viseurs : une Eye Box est présente, la projection de l'image se fait dans les mêmes conditions, etc.

Mais ils présentent un cahier des charges très différents, car ils ne sont pas portés par l'utilisateur, mais installés dans un cockpit ou sur un tableau de bord. Ceci implique que les contraintes en termes d'encombrement ou de masse ne sont pas du même ordre de grandeur. Par ailleurs, le dimensionnement du système est aussi très différent du fait que le système se situe relativement loin de l'utilisateur (plusieurs dizaines de centimètres). Par conséquent, les dimensions de l'EB sont plus grandes que celles d'un HMD. Dans ces conditions, ces systèmes sont forcément binoculaires, contrairement aux HMD ou aux viseurs. Enfin, une autre différence est la nécessité que l'image soit visible dans toutes les conditions d'éclairage, même face au soleil. Ainsi, une contrainte importante pour ces applications est d'émettre de très hautes luminances

#### 1.2.1.4 Systèmes de projection

Les pico-projecteurs sont des projecteurs qui affichent une image sur un écran, comme ceux installés dans de nombreuses salles de réunions. Le terme « pico » est utilisé pour indiquer l'aspect très compact du dispositif, comme illustré à la Figure 1.9. Ils utilisent donc des microécrans. Ce système est assez différent des précédents puisque c'est le seul conçu pour que l'image soit vue par plusieurs utilisateurs en même temps. Le pico-projecteur est donc simplement un projecteur mobile.



Figure 1.9 – Pico projecteur philips PicoPix PPX 3610

Afin de projeter l'image sur un écran, il faut qu'elle y soit focalisée, et donc qu'elle soit réelle. Cette caractéristique est liée à l'absence d'EB, pour que plusieurs personnes voient l'image sur l'écran : il se comporte comme un écran ordinaire qui diffuse le flux lumineux dans toutes les directions.



## 1.2.2 Fonctionnement d'un microécran

### 1.2.2.1 La microélectronique

La microélectronique consiste, comme l'électronique, à transmettre de l'information, mais avec une réduction d'échelle, à l'échelle micrométrique. Si l'électronique et la microélectronique sont des disciplines très proches, la miniaturisation a des conséquences importantes sur la réalité de la conception des dispositifs. Par exemple, il peut y avoir des effets de champs ou des effets quantiques qui ne sont plus négligeables à ces échelles. Pour illustrer le type de composants issus de la microélectronique, il y a : des capteurs d'image, des écrans, des micro-pistons, des micro-moteurs, des capteurs biologiques, des calculateurs informatiques, etc.

C'est un composant en particulier qui a lancé la filière : le transistor. Ce composant est un interrupteur purement électronique. Puis, la découverte des matériaux semi-conducteurs (ni isolant, ni conducteur) a permis de créer des circuits électroniques en gravant des sillons dans la matière. Si le silicium est omniprésent dans la filière, c'est qu'il est semi-conducteur, peu cher et abondant. On le débarrasse de ses impuretés en formant de grands cylindres de silicium pur, puis, on les découpe en tranches ou « galettes », ce sont les wafers. Un wafer standard mesure aujourd'hui 30 cm. La microélectronique emploie des machines, des outils et des matériaux coûteux. De façon à obtenir des produits à des prix raisonnables, il est nécessaire de produire en masse les composants. D'où l'importance de la dimension des wafers : plus ils sont grands, plus on peut produire de composants en une seule étape, réduisant ainsi les coûts.

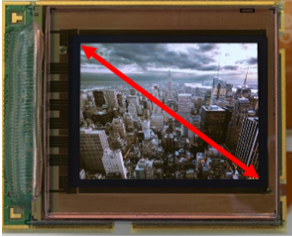
En parallèle de l'agrandissement des wafers, la filière a réussi à réduire continuellement la taille des composants, et en particulier celle des transistors. De quelques centimètres à son invention en 1947, la surface des transistors est aujourd'hui de quelques dizaines de nanomètres, suivant les objectifs fixés par la loi de Moore, énoncée en 1965. En réduisant leur taille, on a pu en placer toujours plus dans des surfaces équivalentes, augmentant ainsi la puissance de calcul.

La filière a réussi à produire de très nombreux composants, mais dans ce travail, nous ne nous intéressons qu'aux microécrans. Ces composants sont constitués de nombreuses parties qui ne sont pas uniquement constitués de transistors. Je ne décompose pas le fonctionnement des microécrans jusqu'au niveaux fondamentaux de chaque couche, mais j'en présente l'essentiel pour en comprendre le fonctionnement.

### 1.2.2.2 Caractéristiques d'un microécran

Les technologies de microécran sont complexes, et d'excellents ouvrages décrivent leurs multiples détails de fonctionnement [37,38], [39]. Je me contente ici de décrire les paramètres d'usage des microécrans pour en extraire les caractéristiques fonctionnelles. Je présente ensuite les différentes technologies de microécrans.

Pour ce travail, nous avons utilisé un microécran fabriqué par Microoled, une entreprise française, issue du CEA-Leti. Ce modèle, dont je mets ici son tableau de spécifications (Figure 1.10), servira d'exemple.



Product type	0.61" 5.4M dots AMOLED microdisplays
Number of pixels	1300 x 1044 x 4 sub-pixels (5.43M dots) for full color versions 2600x2088 (5.43M pixels) for monochrome versions
Sub-pixel pitch	9.4 μm x 9.4 μm (Sub-pixel pitch 4.7 μm x 4.7 μm)
Brightness	Typ. 200 cd/m <sup>2</sup> Max. 250 cd/m <sup>2</sup> for full color (RGBB) Typ. 300 cd/m <sup>2</sup> Max. 400 cd/m <sup>2</sup> for full color (RGBW)
Contrast	Typ. 10 000:1
Power consumption	250 mW (Typ.) *10 bit digital RGB interface, video mode
Video interface	Standard RGB digital parallel video input 3x10 bits

Figure 1.10 - Gauche : image du microécran izumi de Microoled. La flèche rouge indique la diagonale de la zone active du microécran ; droite : caractéristiques du microécran.

On trouve dans ce tableau : la dimension de la zone active (0.61" = 15.5 mm), le nombre de pixels et de sous-pixels, la surface d'un pixel, la luminance, le contraste, la puissance électrique et l'interface vidéo.

La dimension de la zone active, affichée sur la Figure 1.10, est inférieure à la dimension mécanique totale du composant. Cette valeur se retrouve à partir du nombre et de la taille des pixels. Si ces informations peuvent paraître redondantes, la dimension du microécran donne une information sur le champ de vue du système, dont nous reparlons plus loin, tandis que le nombre et la taille des pixels donnent des informations sur la résolution de l'image pour l'utilisateur.

Chaque pixel est composé de quatre sous-pixels, deux bleus, un vert et un rouge, ce qui permet de générer une image couleur. Il est possible de choisir un modèle où l'image serait en nuance de gris, et chaque sous-pixel joue alors le rôle d'un pixel entier. On augmente ainsi la résolution, au détriment de la couleur.

La luminance ainsi que le contraste sont des paramètres liés à puissance lumineuse émise par chaque pixel. La luminance est la quantité radiométrique à laquelle l'œil humain est sensible, il s'agit du flux lumineux par unité de surface apparente, par unité d'angle solide (W/m<sup>2</sup>/sr ou cd/m<sup>2</sup>). C'est la valeur qui permet de savoir si l'image fournie par le microécran sera visible par rapport à un fond ambiant. Plus l'éclairage ambiant est fort, plus la luminance maximale doit être forte, de 100 à ~100 000 cd/m<sup>2</sup> dans certains cas.

Le contraste est le rapport entre la luminance maximale d'un pixel (blanc) par rapport à la luminance minimale (pixel noir). C'est un paramètre important pour connaître la dynamique du microécran.

La puissance électrique et l'interface vidéo ne sont pas des paramètres optiques, mais des caractéristiques de fonctionnement du système utiles pour dimensionner notamment la batterie d'un système portable.

Le choix d'un microécran doit tenir compte des exigences liées à l'application. La diversité des technologies de microécran permet de satisfaire à la variété des besoins. En revanche, certaines limites techniques ne permettent pas, à ce jour, de toujours trouver un modèle de microécran adapté précisément à une application. Ces limites stimulent une concurrence technique et industrielle sur de nombreux points de recherche. Dans la mesure où les perspectives pour les microécrans dépassent le cas d'usage présenté ici, nous présentons l'état actuel des avancées afin de dégager les critères importants à considérer.

### 1.2.2.3 Différentes technologies

Le microécran *Izumi* utilise la technologie OLED (Organic Light Emitting Diode) pour le fonctionnement des pixels. Mais il en existe de nombreuses autres. On peut classer les microécrans en deux grandes catégories :

les émissifs et les modulateurs. Chaque pixel d'un microécran émissif est une source de lumière, et ils sont pilotés individuellement, tandis qu'un microécran modulateur utilise une source de lumière générale, qui est modulée par un contrôle de transmittance de chaque pixel. Dans tous les cas, il y a donc un contrôle électrique au niveau du pixel afin de contrôler l'image affichée. Globalement, il existe cinq principales technologies de microécrans, qui connaissent chacune de nombreuses déclinaisons : cristaux liquide réfléchissants (LCOS), cristaux liquides transmissifs (T-LCM), Micro ElectroMechanic Systems (MEMS), Organic LED (OLED) et LED [40–43].

Les technologies en jeu sont très différentes les unes des autres, ce qui explique une grande diversité des performances et caractéristiques. Malgré les différences, il existe un schéma commun de fonctionnement général. On distingue trois parties : la zone active, où se situent les pixels, la zone de traitement du signal et du contrôle des pixels, ainsi que la zone dite de *bonding*, réalisant les connexions électriques des pixels, comme illustré à la Figure 1.11. Aujourd'hui, la plupart des microécrans utilisent des matrices CMOS pour contrôler l'état de chaque pixel.

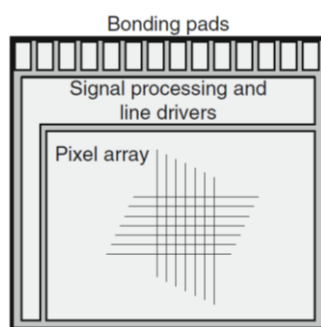


Figure 1.11 – Schéma récapitulant les parties principales d'un microécran, issue de [32]

### 1.2.2.3.1 Les cristaux liquides

Les technologies à base de cristaux liquides (LCOS – Liquid Cristal On Silicium et T-LCM – transmissive Liquid Cristal Microdisplays) sont de type modulateur. Le principe général est simple : une source de lumière éclaire tous les pixels et le contrôle électrique oriente les cristaux liquides pour obtenir le flux désiré. La couleur est obtenue par filtrage spectral après les cristaux liquides. Ces cristaux ont deux particularités : ils sont orientables avec la tension et ils polarisent linéairement la lumière. Ainsi, une première couche de cristaux reste toujours fixe et polarise la lumière linéairement, à  $0^\circ$ . La seconde couche de cristaux, pilotée électriquement, régule le flux du pixel. Si elle est orientée à  $90^\circ$ , le flux étant déjà polarisé à  $0^\circ$ , il est complètement coupé : le pixel est noir. Si elle est orientée à  $0^\circ$ , il n'est pas coupé : le pixel est blanc. Chaque position intermédiaire offre autant de modulation du flux lumineux, comme illustré à la Figure 1.12.

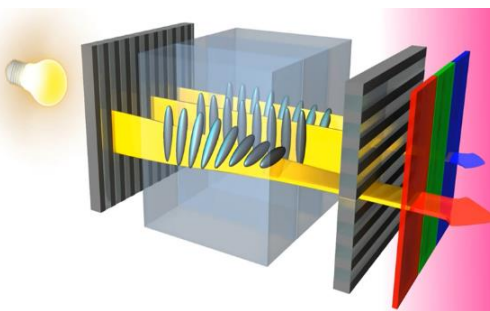


Figure 1.12 - Illustration d'un pixel à cristaux liquides. On voit les orientations différentes entre les trois sous-pixels pour réguler le flux lumineux de chaque couleur.

La différence entre les LCOS et T-LCM est simplement liée à la position de la source par rapport au pixel : les LCOS fonctionnent en réflexion, tandis que les T-LCM fonctionnent en transmission, comme l'illustre la Figure 1.13.

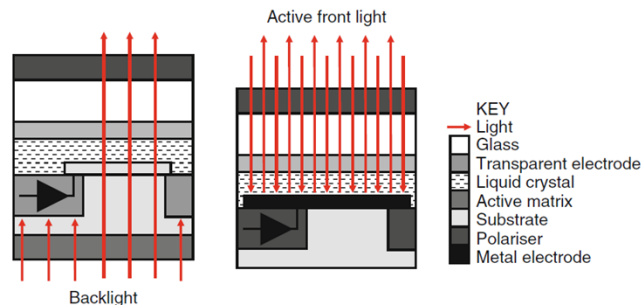


Figure 1.13 - Gauche : pixel T-LCM, en transmission, Droite : pixel LCOS, en réflexion. Issue de [40]

Cette technologie possède de nombreux atouts, en particulier le fait qu'elle soit bien maîtrisée et peu chère, car ancienne. Elle permet aussi d'obtenir des luminances très élevées grâce à la source lumineuse de grande surface. La limite en luminance est surtout due à la puissance électrique disponible.

En revanche, la consommation électrique de cette technologie reste un désavantage majeur puisque l'éclairage est toujours maximal. De plus, la présence de cet éclairage général impose aussi une épaisseur minimale qui peut être incompatible avec certaines applications.

### 1.2.2.3.2 Les MEMS

Les microécrans MEMS sont nés de la technologie Micro ElectroMechanical Systems (MEMS) développée dès 1967 [44]. Les MEMS permettent d'orienter des éléments (micro miroirs ou laser par exemple) de façon à rediriger la lumière de chaque pixel de sorte à afficher une image. La diversité des écrans MEMS est telle qu'il est difficile de tous les présenter ici. J'en présente un, qui est utilisé pour réaliser des microécrans : la technologie Scanning Laser [42]. Il s'agit, dans ce cas, d'utiliser trois lasers, rouge, vert et bleu, capables d'une modulation d'intensité rapide. Chaque pixel ayant besoin d'une couleur spécifique, leurs faisceaux sont modulés en intensité puis mélangés pour en obtenir un unique de la bonne couleur. Ce dernier se réfléchit alors sur un miroir MEMS, qui bouge mécaniquement pour balayer la totalité de l'image, et ainsi « peindre » l'image, pixel à pixel. Il s'agit donc de tracer 60 images par secondes, en balayant tous les pixels de chaque image. L'intensité des pixels est gérée par un contrôle de la largeur de l'impulsion, c'est-à-dire le temps que le pixel reste actif. Deux pixels MEMS sont illustrés à la Figure 1.14.

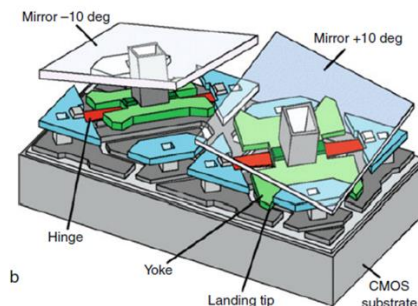


Figure 1.14 – Représentation de deux pixels MEMS. Schéma issu de [42].

Dans ses avantages et inconvénients, les systèmes MEMS ressemblent beaucoup aux cristaux liquides : peu chers, bien maîtrisés, capable d'obtenir des luminances très élevées. Mais la consommation électrique, ainsi que le volume minimal du système ne peuvent être réduits au-delà de certains seuils.

### 1.2.2.3.3 Les microLED et microOLED

Les technologies microLED et microOLED permettent justement de pallier ce dernier inconvénient. En ordre de grandeur, la consommation électrique d'un écran microOLED se situe aux alentours de  $10 \text{ W/m}^2$ , tandis qu'un écran à cristaux liquide consomme environ  $44 \text{ W/m}^2$  [45]. Ces écrans sont composés de LED (Light Emitting Diode) microscopiques, qui jouent chacune le rôle d'un pixel, et dont l'épaisseur totale est inférieure à  $1 \mu\text{m}$  [46]. Le fonctionnement d'un pixel est donc juste celui d'une LED, miniaturisée à la taille d'un pixel ( $>10 \mu\text{m}$  de côté). L'intensité lumineuse de chaque pixel est directement contrôlée par la tension appliquée au pixel. Les écrans microLED et microOLED ont pour différence principale le matériau électroluminescent : organique pour les microOLED, inorganique pour les microLED. Mais même au sein des deux grands types de microécran, le matériau électroluminescent a une influence majeure sur les caractéristiques d'un modèle de microécran. Il est par exemple possible d'avoir des matériaux émettant en couleur, ou des matériaux émettant de la lumière blanche, couplée à une matrice de filtre colorés. Les matériaux peuvent avoir une influence sur la luminance maximale du microécran : les microécrans microLED à base de GaN (Nitrure de Gallium) ont par exemple démontré la possibilité d'émettre une luminance maximum de  $1\,000\,000 \text{ cd/m}^2$ , sans dégradation du matériau [47]. Les microOLED peuvent aussi monter haut en luminance, mais au prix de la durée de vie des matériaux organiques, bien que certains travaux aient réussi à améliorer les luminances de sortie de microécrans OLED [48].

De façon générale, les écrans émissifs microLED ou microOLED ont l'avantage d'être beaucoup plus simples dans leur conception que les autres types de microécrans. Cette simplicité permet à la fois d'éviter la gestion d'éléments mobiles, d'être les composants les plus compacts, mais aussi d'être économes en énergie puisque chaque pixel n'émet que le juste nécessaire.

En revanche, ces dispositifs posent un certain nombre de problèmes techniques: si les écrans microOLED sont déjà fortement industrialisés, les écrans microLED ne sont encore que des composants de laboratoire. Pour les microécrans à base de GaN (Nitrure de Gallium), la couleur rouge n'est, à ce jour, pas maîtrisée. Et si ces microLED sont au point pour les applications d'éclairage pour lesquelles la miniaturisation n'est pas un enjeu majeur, les pixels de quelques micromètres de côté ne permettent pas aujourd'hui d'atteindre des performances satisfaisantes. Il reste encore beaucoup d'étapes de développement avant d'obtenir des microécrans LED industrialisés. Les microécrans OLED, en revanche, sont déjà commercialisés, et ont surmonté la plupart de leurs limites, comme le problème de l'encapsulation pour éviter l'oxydation du matériau organique qui limitait leur durée de vie. Aujourd'hui, les microOLED ont encore une limite majeure liée à l'obtention de hautes luminances, sans sacrifier la durée de vie. C'est ce dernier point qui, tout en persévérant dans les recherches sur les microOLED, pousse à étudier d'autres solutions techniques, comme les microLED à base de GaN [33,48]. Sur ce sujet, j'ai co-écrit une publication avec T. Maindron, D. Vaufrey, C. Le Maoult, B. Ben Bakir et A. Ndiaye, qui est une review comparative des microLED et des microOLED. A ce jour, elle est encore en cours de rédaction, et devrait être publiée dans *Light, Science and Applications*.

### 1.2.2.3.4 Comparaison des différentes technologies

Le Tableau 1.1 reprend certains points clefs permettant de comparer les technologies de microécran.

Caractéristiques	LCOS	T-LCM	OLED	LED	MEMS
Haute luminance	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
Maturité	OK	OK	OK	Non	Moyenne pour microécran
Coûts	Faible	Faible	Moyen à faible	-	?
Couleur	Filtre	Filtre	Filtre ou direct	Non maîtrisé	Laser
Encombrement	Fort	Fort	Faible	Faible	Intermédiaire

Tableau 1.1 - Résumé général des comparaisons entre les différentes technologies de microécrans.

## 1.3 SYSTEMES OPTIQUES VISUELS

### 1.3.1 Définition générale

Je considère qu'un système optique visuel (système visuel en abrégé) est un dispositif au travers duquel l'utilisateur peut directement visualiser une image avec son œil. Quelques exemples rendront cette définition plus concrète : les lunettes de vue, la loupe, le viseur de fusil ou d'appareil photographique, ou encore l'oculaire de microscope sont des systèmes visuels. En revanche, un écran observé directement, comme une télévision, n'utilise pas de système optique et n'est donc pas considéré ici comme un système visuel.

Les systèmes visuels servent, in fine, à améliorer les conditions d'observation d'un objet, le plus souvent en agrandissant l'objet. Par exemple, la loupe ou le viseur de fusil servent à agrandir l'image pour percevoir des détails trop petits à l'œil nu ; les lunettes de vue corrigent la vision ; les oculaires servent à observer l'image formée par un objectif. Si, selon les systèmes, les caractéristiques varient, certains principes sont partagés par tous les systèmes visuels, en particulier parce qu'ils doivent tous être adaptés à la perception visuelle.

De nombreux autres paramètres entrent en jeu dans la conception d'un système visuel : l'ouverture, la qualité image, la résolution, l'encombrement, le flux lumineux, etc. Ces éléments seront abordés dans le chapitre 2.

### 1.3.2 L'optique pour un système visuel

#### 1.3.2.1 De l'objet à la rétine : principes fondamentaux

Lorsqu'on parle de systèmes visuels, il y a une évidence très importante : il faut que l'utilisateur puisse voir l'image. Il s'agit alors de s'assurer que ce qui sort du système optique puisse être focalisé sur la rétine.

Pour mieux voir les détails d'un objet, il est naturel de s'en approcher, charge à l'œil d'accommoder correctement. Mais à partir du *Punctum Proximum*, l'accommodation ne peut pas être plus proche. Pour voir des détails plus petits, une solution consiste à utiliser une loupe. Ainsi, les rayons lumineux sortant du système optique doivent apparaître comme s'ils provenaient de l'objet, tel qu'il serait s'il était plus grand, comme illustré à la Figure 1.15.

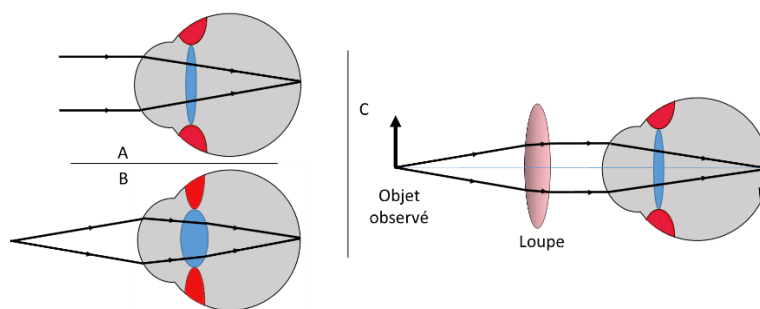


Figure 1.15 – A : œil accommodant pour un objet à l’infini. B : Œil accommodant pour un objet proche. C : Œil derrière une loupe.

L’exemple de la loupe permet de définir certains points communs à ces systèmes, liés à leur utilisation avec les yeux. Ainsi, toujours dans le cadre de ces systèmes, je détaille, quelques points fondamentaux pour comprendre le fonctionnement des systèmes visuels.

La distance de projection est la distance entre l’utilisateur et l’image virtuelle. Cette distance doit être comprise entre le *Punctum Proximum* et le *Punctum Remotum* (de ~25 cm à l’infini). Cette distance a des conséquences concrètes pour l’utilisateur, car son œil travaille dans les conditions d’accommodations imposées par le système, ce qui peut être plus ou moins fatiguant. Il est généralement dit qu’un œil au repos accommode à l’infini. Cette affirmation pousse à faire en sorte que les rayons lumineux en sortie, pour un même champ, soient parallèles. Toutefois, certains travaux remettent en cause cette affirmation, après avoir mesuré des distances d’accommodation de quelques mètres pour un œil plongé dans le noir [49].

Le champ de vue, est l’angle maximal au-delà duquel un objet n’est pas imagé par le système optique. Le champ est donc un paramètre fondamental, définissant la quantité d’information passant par le système, à chaque image. Plus le champ est grand, plus l’utilisateur peut avoir d’informations par image, mais plus le système optique est complexe et difficile à concevoir.

La position des yeux sur le visage et la configuration d’utilisation du système visuel imposent des contraintes de positions relatives. Celles-ci sont exprimées par la notion d’Eye Box (EB). L’EB correspond au volume dans l’espace où placer son œil pour voir correctement l’image [50]. Plus ce volume est grand, plus l’observation est confortable, à l’inverse, si le volume est très petit, il peut être compliqué de voir l’image, comme dans un trou de serrure. Cependant, l’EB peut être, en première approximation, simplifiée: il s’agit du diamètre de la pupille de sortie. Ce chiffre, simple et rapide à quantifier, représente déjà une partie importante de l’EB. Elle correspond donc à la surface, orthogonale à l’axe optique, où l’œil peut se déplacer par translation et voir l’image. Mais il faut encore définir la distance à laquelle est définie cette pupille pour savoir où placer son œil, c’est ce que recouvre la notion de Eye Relief, ou tirage d’œil en français. Ces deux chiffres offrent une vision déjà assez complète de la Eye Box exacte d’un système, et sont illustrés sur la Figure 1.16.

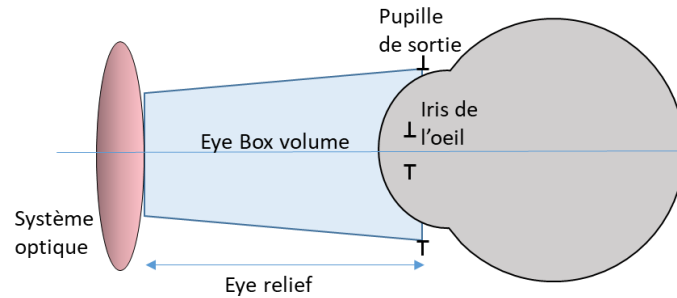


Figure 1.16 - Schéma de Eye Box. Tant que l'iris se situe dans le volume bleu, l'image est perçue. Le volume de la EB peut être, au premier ordre, décrit par la valeur du Eye Relief, et le diamètre de la pupille de sortie.

Ces quelques notions permettent donc d'appréhender des caractéristiques fondamentales des systèmes visuels. La présence de l'œil impose que la pupille de sortie soit physiquement accessible par l'œil, et qu'il soit possible d'accommoder sur l'image virtuelle. J'utilise l'exemple d'une lentille simple, donc une loupe, pour rappeler les liens entre les différentes grandeurs. La Figure 1.17 permet de les illustrer.

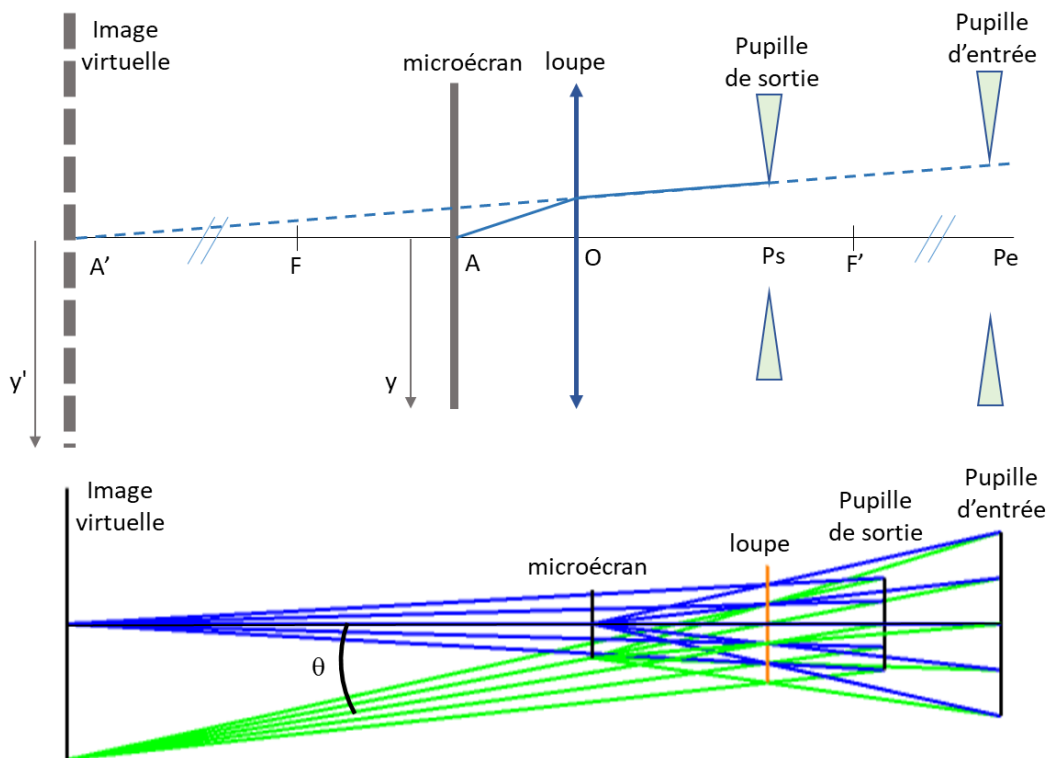


Figure 1.17 – Haut : loupe agrandissant l'image du microécran, avec les positions des différentes surfaces. Les couples conjugués sont de la même couleur : microécran-image virtuelle, pupille de sortie et pupille d'entrée. Bas : tracé de rayon avec le logiciel ZOS pour un système équivalent, et illustration du champ.

On voit avec le Tableau 1.2 qu'une fois que trois grandeurs sont connues : le champ de vue côté image, la taille de l'image virtuelle, et la taille du microécran, le grandissement et la focale sont connus. Ensuite, il suffit de connaître la position de l'œil par rapport à la loupe pour connaître la position de la pupille de sortie, ce qui fixe immédiatement la position de la pupille d'entrée. Ces paramètres suffisent à entièrement fixer les conjugaisons images et pupillaire.

De plus, on remarque aussi que si le grandissement augmente, la focale diminue. Comme on ne peut pas avoir de focale petite devant le diamètre de la loupe, le champ d'une loupe ne peut pas être très grand. Pour augmenter le champ, il est donc nécessaire de complexifier le système. Je ne détaille pas plus, cette



petite analyse permet déjà d'introduire les notions élémentaires de conception optique. Le chapitre 2 permettra d'aller plus loin sur ces notions.

Elément	Distance à la loupe	Caractéristique	Déduit par l'équation
Champ de vue	-	$\theta'$	-
Image virtuelle	<b>OA'</b>	$y'$	$y' = \tan(\theta') OA'$
Microécran	OA	<b>y</b>	-
Grandissement	-	m	$m = y'/y \rightarrow OA = OA'/m$
Focale	-	$f = f'$	$f' = OAOA'/(OA-OA')$
Pupille de sortie	<b>OPs</b>	-	-
Pupille d'entrée	OPe	-	$OPe = f'OPs/(f' - OPs)$

Tableau 1.2 – Relations entre les grandeurs de la loupe. Les grandeurs en gras sont les données d'entrée du système, donné par le cahier des charges.

Les points abordés précédemment sont récapitulés sur la Figure 1.18, avec les trois éléments essentiels pour les systèmes visuels: le microécran, la lentille et enfin, l'œil. Chacun de ces trois éléments représente une partie de la thèse : le microécran représente les aspects microélectronique, la loupe représente la conception optique et l'observation représente la perception visuelle.

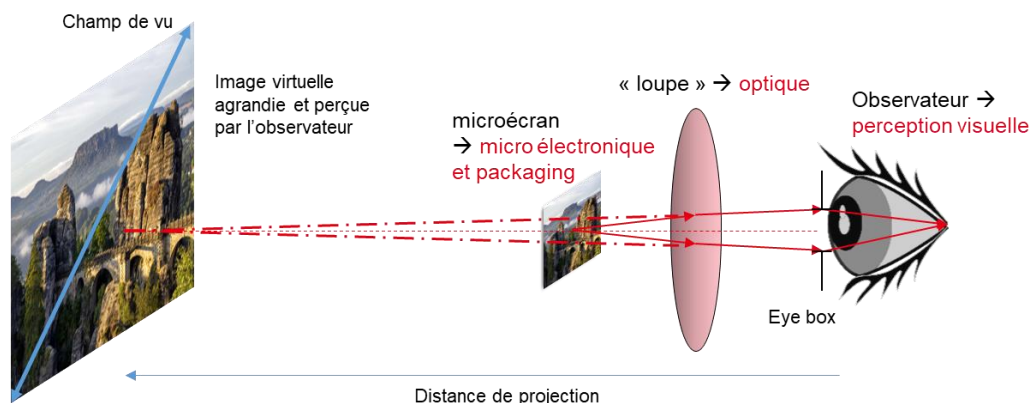


Figure 1.18 - Résumé de ce qui est à mettre en place pour un système optique visuel : microécran, optique et utilisateur. Les définitions précédentes sont aussi sur le schéma : champ de vue, Eye Box, image virtuelle, et distance de projection.

### 1.3.2.2 Systèmes visuels étudiés dans cette thèse

Cette thèse étudie des systèmes optiques utilisant des microécrans. J'exclue donc les lunettes de tir, les lunettes de vue ou les oculaires par exemple. Historiquement, le point de départ de cette thèse est la volonté du CEA-Leti d'étudier les apports de la courbure des microécrans aux systèmes de HMD dédiés à la réalité augmentée (RA).

Dans l'ensemble de cette partie, je présente les systèmes visuels principaux en expliquant brièvement les limites de chacun. L'annexe 2 complète des réflexions en présentant les compromis majeurs qui doivent être fait en lien avec les systèmes visuels et plus particulièrement les systèmes de RA.

#### 1.3.2.2.1 Le point de départ : système HMD

Les HMD sont perçus comme un futur marché très prometteur [51]. C'est pourquoi de nombreuses équipes de recherches et entreprises essaient de développer un démonstrateur qui pourrait rencontrer un fort succès commercial. Il en existe déjà de nombreux à ce jour, dont certains garantissent déjà une qualité

image très élevée à l'utilisateur ainsi que de nombreuses options, mais aucun n'a encore rencontré le succès escompté. Ceci s'explique en partie par l'aspect encombrant des dispositifs assurant la meilleure qualité optique.

Pour être portables, les HMD doivent être aussi légers et fins que possible. Ainsi, une sorte de course à la miniaturisation s'est engagée, tout en recherchant toujours plus de capteurs et d'autonomie électrique. L'optique est centrale, puisque ce sont fondamentalement des systèmes visuels, et doit résoudre certains défis : augmenter la résolution image sans trop augmenter la taille de l'optique, augmenter la luminance maximale sans trop consommer d'énergie, augmenter l'interaction avec l'environnement sans trop complexifier l'optique, ni mettre trop de capteurs.

Mais, il s'avère très difficile, voire impossible, de résoudre l'ensemble de ces défis uniquement par l'optique. D'autres domaines physiques sont aussi en jeu, comme des batteries ayant une meilleure densité énergétique, un codage plus adapté, des capteurs consommant moins d'énergie, etc.

Finalement, j'ai décidé de ne pas concevoir un système de HMD car il y a encore de trop nombreux défis non résolus, qui ne concernent pas tous l'optique des systèmes, comme l'acceptabilité du design global, ou la gestion de l'électronique embarquée.

#### 1.3.2.2.2 Le choix de système : viseur

Dans l'optique de montrer les apports de la courbure des microécrans à un système de RA, et d'en faire un démonstrateur, nous avons choisi de nous concentrer sur la conception de viseurs.

Du point de vue optique, les caractéristiques techniques des viseurs sont très proches de celles des HMD, comme je l'ai présenté au 1.2.1. Mais en parallèle des caractéristiques optiques communes, les viseurs ont moins de contraintes de conception que les HMD.

Les dispositifs HMD peuvent être utilisés pour de très nombreuses applications, nécessitant parfois des spécifications très diverses, en particulier sur le champ de vue. Et celui-ci est souvent perçu comme un paramètre qui pourrait toujours être plus élevé. Pour les viseurs, le champ de vue des appareils commerciaux semble satisfaisant. Il s'agit d'un bon compromis entre le champ et la résolution.

Le viseur présente également l'avantage de nécessiter des luminances compatibles pour les écrans OLED actuels. En RA, la luminance de la scène impose à l'image virtuelle une luminance minimale, sans quoi elle sera invisible. Mais le fait de porter le viseur à son œil, permet de ne garder que la luminance de la scène et d'éliminer celle provenant de champs supérieurs, diminuant ainsi la luminance maximale requise.

S'il est possible d'envisager de créer un viseur binoculaire, ces dispositifs sont aujourd'hui définis en tant que monoculaires. Cela évite, par exemple, d'insérer un mécanisme pour régler l'écart interoculaire, ou de gérer les problématiques de conflits de perception, comme le conflit entre la convergence et l'accommodation [52].

De plus, comme les HMD sont portés sur la tête, il faut concevoir une méthode pour aligner les systèmes optiques avec la ligne de vue de l'utilisateur, tandis que les viseurs sont un sous-système des appareils photographiques ou des caméras. Donc, c'est l'utilisateur qui ajuste la position du viseur à la main, ce qui dispense de prévoir ce mécanisme.

Comme le viseur n'est qu'un moyen de contrôler le boîtier photographique, il n'y a pas besoin d'adapter de façon poussée l'image à l'environnement, hormis la luminance de l'écran selon la luminosité de la scène. Cette adaptation se fait déjà couramment sur les dispositifs commerciaux, et ne nécessite pas de capteurs

ou de calculateurs avancés pour contrôler le microécran, contrairement à un système de suivi du regard par exemple.

Les HMD ont souvent la forme de paires de lunettes ou de casque, ce qui impose de placer l'électronique dans des endroits éloignés du regard (branches de lunettes, arrière du crâne ou boîtier externe). Les viseurs incluent leur électronique directement dans le boîtier photographique, ce qui réduit la difficulté d'intégration électronique du démonstrateur.

En conclusion, travailler sur les viseurs permet de confronter la courbure de microécrans à de nombreux points critiques des systèmes HMD dédiés à la RA, mais sans s'encombrer de nombreuses contraintes annexes de ces systèmes.

### 1.3.2.2.3 Remarques sur les HUD

Les HUD ont besoin de microécrans capables d'émettre de très fortes luminances, de l'ordre de  $100\,000\text{ cd/m}^2$ , en particulier parce qu'ils doivent être visibles même en plein soleil, et que la EB doit être grande pour inclure les deux yeux quel que soit l'utilisateur [53].

Et, comme on l'a abordé dans la présentation des différentes technologies, cela implique que les microécrans à cristaux liquides sont parmi les plus indiqués pour cet usage. Or, comme nous le verrons dans le chapitre sur la courbure, nos procédés de mise en courbure sont conçus pour les microécrans émissifs. Ainsi, étudier plus en détails les HUD, pour aller jusqu'à créer un démonstrateur, aurait probablement mené à un système inutilisable en pratique, puisque trop peu lumineux, en utilisant un microécran OLED.

### 1.3.2.2.4 Remarques sur les projecteurs

Les systèmes de projection ont une conception très éloignée de celle des viseurs. En particulier, il n'y a pas d'EB. Leur conception est donc beaucoup plus proche d'un système imageur que d'un système visuel. L'impact de la courbure sur ces systèmes serait donc mieux évalué à partir du travail de C. Gaschet que du mien [54].

## 1.3.2.3 Remarques sur la notion de Form Factor

La compacité des systèmes optiques est considérée comme un point clef pour l'adoption de ces systèmes par le grand public. Le terme anglophone pour décrire la compacité d'un système est le *form factor*. Le but de ce concept est de définir une méthode de quantification de la compacité du système. Par exemple, pour les systèmes HMD, l'idéal serait d'avoir un système qui ait le même *form factor* qu'une paire de lunettes de vue. Toutefois, s'il est possible de comparer les *form factors* de différents systèmes dans l'absolu, il est important de les rapporter aux fonctions de chaque système. Sans la prise en compte de la différence de fonctionnalité entre deux systèmes commerciaux, la Figure 1.19 montre un cas où le jugement est biaisé.



Figure 1.19 – Comparaison de deux systèmes de RA par rapport à leur compacité uniquement.

Afin de comparer des systèmes comparables, il est donc nécessaire de s'interroger sur la notion de compacité : quelle est la compacité minimale pour un système donné ? Ainsi, il faut définir un *form factor* en fonction du stimulus visuel donné par le système de RA. Autrement dit, il faut se placer du point de vue de l'utilisateur qui perçoit une certaine image et souhaite, tout en percevant exactement la même chose, avoir le système le plus compact possible.

La notion de stimulus visuel est préférée à celle d'image dans cette partie car cette dernière pourrait être interprétée de façon réductrice: le stimulus visuel correspond à l'ensemble des éléments perçus par l'utilisateur, produisant une expérience sensitive ; tandis que l'image pourrait être interprétée selon certains critères seulement, comme la qualité image, le champ de vue ou la résolution. Or, certains critères ne sont pas facilement quantifiables, et l'utilisateur n'a pas toujours conscience de certaines fonctions qui pourtant affectent l'expérience sensitive. Par exemple, certains systèmes sont améliorés par des éléments qui sont conçus pour ne pas être remarqués, comme un système de suivi du regard pour réaliser de la fovéation<sup>2</sup>. Un tel système n'est pas perçu par l'utilisateur, mais contribue au stimulus visuel et diminue la compacité totale.

La remarque principale est qu'il est difficile de comparer des systèmes différents entre eux, puisqu'il est délicat de connaître l'ordre de priorité des différents critères de conception. Une manière pratique de fonctionner consiste expliciter ces critères, puis à définir le type de solution technologique utilisée, et enfin, à calculer la compacité minimale adaptée à ce système précis. En procédant ainsi, on a deux avantages :

- D'abord, on définit une référence adaptée au type de système en cours de conception. On peut alors dire à quel point son propre système est proche de sa limite théorique.
- Puis, on permet aux autres systèmes de comparer qualitativement leur proximité au stimulus visuel de ce système. Ainsi, deux systèmes proches par rapport au stimulus peuvent être comparés pour choisir le meilleur design.

Le chapitre 5 reprend ces notions sur la compacité en fonction des caractéristiques du système, en présentant des systèmes visuels conçus pendant ce travail de thèse, et en le comparant à d'autres systèmes de la littérature.

## 1.4 PERSPECTIVES DE RECHERCHE POUR LES MICROECRANS

Maintenant que le cadre de la thèse est posé, je présente les perspectives de recherches pour les microécrans. Je l'aborde d'abord en réfléchissant à ce qui caractériserait un microécran idéal. Puis, j'apporte des éléments sur les recherches actuelles sur les microécrans.

### 1.4.1 Microécran idéal

Les caractéristiques idéales pour un microécran destiné à un viseur, sont déjà proches de ce que fournit la technologie actuelle, preuve en est : les appareils photographiques haut de gamme sont de plus en plus équipés d'un viseur électronique plutôt que d'un viseur reflex. Toutefois, dans le cadre de la RA, ce n'est pas le cas. Les caractéristiques du microécran idéal pour la RA sont très ambitieuses par rapport à la technologie actuelle, même si elles ne sont pas si nombreuses. Globalement, on peut dire qu'il faudrait que le microécran soit compact, avec une grande densité de pixel, économe en énergie électrique, mais aussi très lumineux, en couleur, et d'un coût de fabrication abordable.

---

<sup>2</sup> Fovéation : dégrader certaines caractéristiques de l'image où l'utilisateur ne se concentre pas, pour diminuer la quantité de calculs numériques.

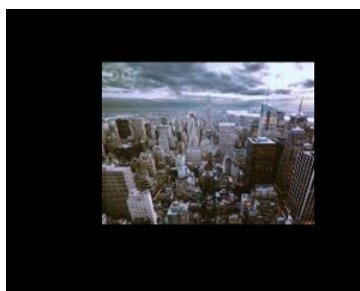
### 1.4.1.1 Densité de pixel

La densité de pixel est le nombre de pixels pour une surface donnée. Lorsqu'on pose le cahier des charges d'un système optique, on définit un champ de vue, ainsi qu'une focale, ce qui impose les dimensions du microécran selon la formule (valable pour un système foyer-infini) :  $y' = f' \tan(\theta)$ , avec  $y'$  la diagonale du microécran,  $f'$  la focale du système, et  $\theta$  le champ de vue diagonal. Si la taille du microécran est fixée, la densité de pixel par degré dépend alors de la taille des pixels. Plus ils sont petits, plus la densité est élevée, ce qui permet des hautes résolutions. Aujourd'hui, des pixels de moins de 10  $\mu\text{m}$  sont possibles, mais réduire leur taille à environ 1  $\mu\text{m}$  demeure un défi.

Cependant, plus les pixels sont petits, plus il est difficile de concevoir un système optique ayant la qualité image suffisante pour en tirer profit. Et s'il est impossible de donner la taille idéale dans l'absolu, on peut avancer que des pixels de 1  $\mu\text{m}$  de côté seraient utiles à certains systèmes optiques actuels, ce qui signifie que les sous pixels mesureraient 0,5  $\mu\text{m}$  de côté.

### 1.4.1.2 Encombrement

La thématique de l'encombrement est liée à la densité de pixel, puisque la surface minimale du microécran est celle de la zone active, donnée par le cahier des charges. En revanche, le microécran idéal aurait une épaisseur très faible, et dépasserait très peu de la zone active. La Figure 1.20 met en image (en noir) toutes les parties qui pourraient, idéalement, être supprimées du système pour réduire l'encombrement du composant.



*Figure 1.20 - Microécran Izumi de Microoled. Toutes les zones différentes de la zone active sont couvertes d'un cache pour visualiser tout l'espace qui, idéalement, pourrait être économisé.*

Ces caractéristiques n'améliorent pas la partie optique du système, mais l'encombrement général. En effet, un microécran qui aurait une densité exceptionnelle, mais qui aurait une partie électronique très volumineuse donnerait un prototype final plus volumineux que nécessaire.

### 1.4.1.3 Consommation électrique

Les microécrans sont très souvent utilisés dans des systèmes embarqués: appareil photographique, caméra, HMD ou même pico-projecteur. Plus l'écran est économe en énergie, plus la batterie peut être légère, et le système confortable. En revanche, il existe des limites théoriques à la consommation minimale: l'écran ne peut pas consommer moins d'énergie que l'énergie lumineuse requise pour afficher l'image. Ainsi, il est clair que plus le microécran doit être lumineux, plus il consommera d'énergie. Le microécran idéal aurait surtout comme caractéristique de convertir toute l'énergie électrique en énergie lumineuse utile. Nous précisons « utile », car les rendements de conversion électron-photon sont déjà quasi maximaux pour certains écrans OLED [46]: c'est le rendement quantique interne. En revanche, une partie des photons ne contribue pas à l'image finale. Ils peuvent être bloqués à cause d'un saut d'indice trop fort entre le matériau

et l'air (indice optique entre 2,4 et 3,5 selon les technologies et les longueurs d'onde [55]), ou être absorbés par le matériau parce qu'émis dans une mauvaise direction par exemple. Le rendement quantique externe permet de quantifier le nombre de photon sortant effectivement du composant pour une unité d'énergie électrique [45]. C'est bien cette dernière quantité qui, idéalement, s'approcherait des 100 %, alors qu'aujourd'hui, elle est plutôt aux alentours de 20 % [46].

#### 1.4.1.4 Contraste

Les photons qui ne sont pas émis dans la direction utile à l'image, au mieux sont juste perdus pour le rendement quantique externe, au pire, peuvent dégrader les performances du microécran. Ce point est particulièrement sensible sur la notion de contraste. Le contraste étant défini comme le rapport entre la luminance d'un pixel blanc, sur la luminance d'un pixel noir, si un pixel noir émettait 0 cd/m<sup>2</sup>, le contraste serait infini. Mais en pratique, le phénomène de *cross-talk* (*diaphonie*) limite les valeurs de contraste. Il s'agit simplement de photons émis par un pixel, qui apparaissent comme étant émis par un pixel voisin, suite à des réflexions multiples dans le composant, ou par absence de blocage entre les pixels, comme illustré à Figure 1.21. Le microécran idéal n'aurait aucun *cross-talk* et pourrait donc avoir un contraste infini.

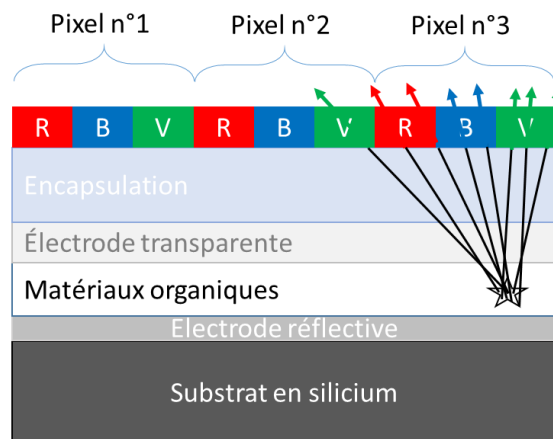


Figure 1.21 – Phénomène de *cross-talk* entre deux pixel. Le rayon à l'extrême gauche des rayons émis apparaît dans le pixel n°2 alors qu'il aurait dû apparaître au pixel n°3.

#### 1.4.1.5 Haute luminance

Selon les applications, les hautes luminances ne sont pas toujours nécessaires. Pour les systèmes de viseur, la luminance des microécrans semble aujourd'hui adaptée. En revanche, pour les systèmes de réalité augmentée, celle-ci est, dans de nombreux cas, bien trop faible. En effet, c'est par rapport à la luminosité de la scène que la luminance du microécran doit être définie. Par ailleurs, il existe de nombreuses causes de pertes lumineuses dans l'optique elle-même, que le microécran doit donc compenser.

De façon générale, les contraintes sur la taille des pixels et leur consommation électrique s'opposent à leur capacité à émettre de hautes luminances. On peut parler de densité énergétique, en comparant la luminance émise par rapport à la surface du pixel.

#### 1.4.1.6 Cône d'émission

Le cône d'émission d'un microécran correspond au diagramme d'émission moyen de ses pixels. Il s'agit de l'intensité d'émission lumineuse d'un pixel en fonction de l'angle d'émission. Un écran destiné à être regardé directement, comme une télévision par exemple, a besoin d'un cône d'émission très large, pour

que l'image apparaisse identique quel que soit l'angle avec lequel on la regarde. En revanche, pour un microécran, le cône d'émission idéal ne devrait pas être trop large. Pour le comprendre, il faut faire appel à certaines notions d'optique (comme la notion de pupille) qui seront détaillées par la suite. De manière concise, tout rayon lumineux entrant dans le diaphragme d'ouverture du système optique passera à travers tout le système. Et la pupille d'entrée est l'image de ce diaphragme dans l'espace d'entrée. La réciproque étant qu'un rayon ne passant pas par le diaphragme n'entrera jamais dans le système optique. C'est pourquoi, si le cône d'émission est trop grand, l'énergie au-delà de la portion sélectionnée par la pupille, ne contribuera pas à former l'image virtuelle pour l'utilisateur, et sera perdue. Le seul moyen de faire passer plus de lumière dans le système optique consiste à augmenter la luminance du système. En revanche, si le cône d'émission est trop étroit, le système optique ne pourra pas être exploité à son plein potentiel, puisqu'il manquera des rayons pour remplir de façon homogène la pupille [55].

### 1.4.1.7 Couleurs

Un microécran idéal serait capable d'obtenir toutes les couleurs visibles. En pratique, à partir de 3 couleurs primaires, on obtient un gamut (ensemble des couleurs que le système est capable de reproduire) suffisamment large pour reproduire correctement la plupart des couleurs, mais qui ne les couvre pas toutes. Ces notions de colorimétries deviennent rapidement assez pointues et nous n'entrerons pas plus loin dans les détails.

Si la plupart des technologies de microécrans maîtrisent l'émission de trois longueurs d'onde complémentaires pour obtenir un large gamut, les microécrans GaN n'en sont pas encore capables [56], en particulier avec des problèmes dans le rouge. En revanche, pour les microécrans OLED, la couleur s'obtient souvent en filtrant la lumière blanche avec des matrices colorées. Si cette méthode fonctionne, elle a l'inconvénient de causer d'importantes pertes en flux lumineux.

Le microécran idéal aurait donc des pixels qui émettraient directement avec le bon spectre, et ne nécessiteraient donc pas de filtrage. La notion de « bon » spectre est ici comprise comme étant adaptée à sensibilité spectrale de la perception visuelle : un pixel émettant dans l'ultraviolet, même avec un rendement quantique externe de 100% et un cône d'émission idéal, n'aurait aucun intérêt puisqu'on ne verrait rien.

Enfin, on peut aussi relier la notion de gamut à la densité énergétique, car plus on a de longueurs d'onde émises par le microécran, plus, pour un pixel, les sous-pixels couleurs sont petits, augmentant ainsi encore plus la difficulté de miniaturisation des pixels. Pour cette raison, il est possible de considérer qu'un microécran d'avenir, à défaut de couvrir tout le gamut humain, serait capable de produire 3 couleurs complémentaires, sans filtrage.

### 1.4.1.8 Durée de vie, coût et réalisme

Le critère de la durée de vie cherche à se prémunir des excellentes performances qui se feraient au détriment de la durabilité. Par exemple, les OLED peuvent atteindre des luminances très élevées, mais au détriment de leur durée de vie. Si les performances se dégradent nécessairement à l'usage, le microécran idéal conserverait des performances élevées longtemps. Et ses performances devraient être indépendantes de ce qui est affiché. Par exemple, les tubes cathodiques s'abîmaient s'ils affichaient la même image trop longtemps, c'est pourquoi les écrans de veille ont été inventés, ce qui représente une contrainte d'usage.

Le coût est aussi un paramètre important, puisqu'un prix inabordable revient à dire que le produit est inexistant.

Enfin, le réalisme est surtout là pour nous rappeler que rien n'est parfait. Le microécran idéal n'existera jamais, et si certaines technologies promettent des révolutions prochaines, il est possible qu'elles n'aboutissent jamais.

### 1.4.2 MicroLED et microOLED, perspectives

Les qualités des écrans OLED sont telles que de nombreux produits en utilisent depuis plusieurs années. Mais comme nous l'avons vu au-dessus, ces écrans ne sont pas dépourvus de défauts. C'est pourquoi la technologie des microLED est en cours de développement, afin de fournir un produit plus abouti. Si les LED inorganiques à base de GaN sont déjà bien maîtrisées pour les applications d'éclairage, lorsqu'on cherche à en réduire la taille pour les utiliser comme des pixels individuels, de nombreuses limitations techniques apparaissent, réduisant leur efficacité. Parmi les limites encore très fortes de cette technologie, on peut citer la maîtrise de la couleur rouge, et verte dans une moindre mesure, le maintien du rendement quantique externe lorsqu'on diminue la dimension des pixels de GaN, et la consommation électrique des pixels.

Comme indiqué à la partie 1.2.2.3.3, une publication avec T. Maindron, D. Vaufrey, S. Charrière, C. Le Maout, B. Ben Bakir et A. Ndiaye, est en cours de rédaction. Il s'agit d'une review comparative des microLED et des microOLED.

## 1.5 CONCLUSION

Le cadre de la thèse a été posé en détaillant les trois parties essentielles à la compréhension de ce travail : le microécran est l'objet observé, le système optique adapte et transmet l'information, et l'utilisateur perçoit les images. Si la compréhension du fonctionnement de ces trois parties est importante, leur articulation est aussi un point essentiel.

L'objectif de mes recherches est de comprendre les améliorations que la courbure d'un microécran peut apporter aux systèmes optiques visuels. Le chapitre 2 présente les notions fondamentales en conception optique, qui éclaireront les apports théoriques démontrant l'influence de la courbure sur les systèmes visuels, au chapitre 3. Une fois ces aspects théoriques présentés, nous détaillerons les méthodes pratiques de mise en courbure du microécran (chapitre 4), ainsi que les systèmes optiques conçus au bout des 3 ans de thèse dans le chapitre 5.





## 2 THEORIE DE CONCEPTION OPTIQUE : OPTIQUE SUR L'AXE ET OPTIQUE HORS-AXE

---

### 2.1 FONDAMENTAUX DE CONCEPTION OPTIQUE

#### 2.1.1 Notions élémentaires

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux systèmes visuels, utilisant un microécran et proches de l'œil, comme décrit au chapitre 1. De façon générale, les systèmes imageurs ont pour but fondamental de produire l'image d'un objet sur un certain champ de vue : là où les rayons se focalisent, une image se forme. Voyons maintenant les notions élémentaires permettant de comprendre comment un système optique forme des images.

La lumière est une onde électromagnétique, dont le comportement physique est décrit par les équations de Maxwell. Dans ce travail, je n'utilise pas ce formalisme, mais celui de l'optique géométrique, plus simple, qui suffit aux développements. L'optique géométrique est l'un des plus anciens modèles permettant de décrire la lumière. Historiquement, les savants utilisant ce cadre n'avaient pas les moyens théoriques de justifier cette modélisation, mais en constataient l'efficacité. Depuis le travail de Maxwell, il est possible de justifier la validité de ce modèle en négligeant la longueur d'onde dans l'équation Eikonal ( $\lambda \rightarrow 0$ ). En déroulant les équations, le chapitre 3 de [57] y est intégralement consacré, on retrouve la description géométrique des rayons lumineux. Cette approximation découle du fait que localement, le champ électromagnétique se comporte comme une onde plane. Chaque rayon correspond alors à la propagation d'une onde plane. Cette modélisation géométrique trouve ses limites typiquement lorsque l'onde n'est plus plane, comme dans les phénomènes de diffraction par exemple [57].

La lumière, modélisée par des rayons lumineux, se propage en ligne droite dans un milieu homogène, et chaque rayon est infiniment fin. Lorsqu'une scène est éclairée, chaque surface élémentaire des objets la réfléchit, et la disperse dans toutes les directions. Le système optique peut être vu comme l'outil permettant de « trier » les rayons entrants : les rayons d'un même point objet sont reconcentrés sur un même point image, reconstituant ainsi une image de l'objet.

Le champ de vue, abordé au chapitre 1, est l'angle maximal, au-delà duquel le système ne capte plus d'information. C'est donc l'ensemble des points de la scène dont le système perçoit des rayons.

En parallèle du champ de vue, il y a une autre notion fondamentale : l'ouverture du système. En bref, il s'agit du diamètre de la pupille du système. Concrètement, il correspond à un trou de diamètre réglable : les rayons au-delà du diamètre limite sont arrêtés par la pupille, les autres contribuent à former l'image.

Pour bien les distinguer, prenons deux cas extrêmes : un système peu ouvert (pupille de 2 mm de diamètre), avec 10° de champ, puis avec 0° de champ, et ouvert (25 mm de diamètre). Ces systèmes, représentés sur la Figure 2.1, illustrent la différence entre le champ et l'ouverture. L'objet est à l'infini, donc tous les rayons d'un même point du champ sont parallèles entre eux, du côté objet. Le champ a été défini en angle, et a pour conséquence de modifier la taille de la surface image entre les deux cas. En revanche, l'ouverture est uniquement contrôlée par le diamètre de la pupille, petit dans le premier cas, et grand dans le second.

Comme l'ouverture est plus grande, le second système est plus lumineux, car plus de rayons convergent alors sur le champ central.

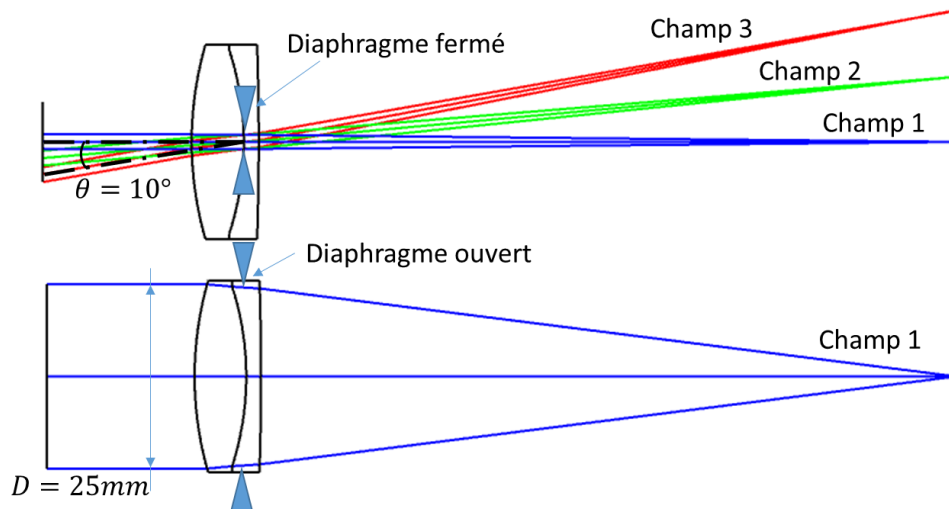


Figure 2.1 - Champ et ouverture. Haut : système fermé, 10° de champ. Trois champs sont représentés, une couleur par champ. Bas : système ouvert, 0° de champ. Tous les rayons proviennent du même objet à l'infini car ils sont parallèles entre eux, et se focalisent au même point.

Mais que se passerait-il si la taille de la surface image du second cas était égale à la première ? Dans ce cas, le champ serait égal entre les deux systèmes. En effet, la pupille ne permet que de régler l'ouverture, tandis que la taille de la surface image ne permet que de fixer le champ. Les notions de champ et d'ouverture sont donc indépendantes, comme on le voit avec la Figure 2.2 où l'on affiche des vues en coupe des systèmes de la Figure 2.1. Au niveau des diaphragmes des deux systèmes, tous les champs sont confondus et ils ont le même diamètre que le diaphragme lui-même. Au niveau des surfaces images les champs sont bien individualisés : comme le premier système a trois champs, on voit trois points, et un seul sur le second système.

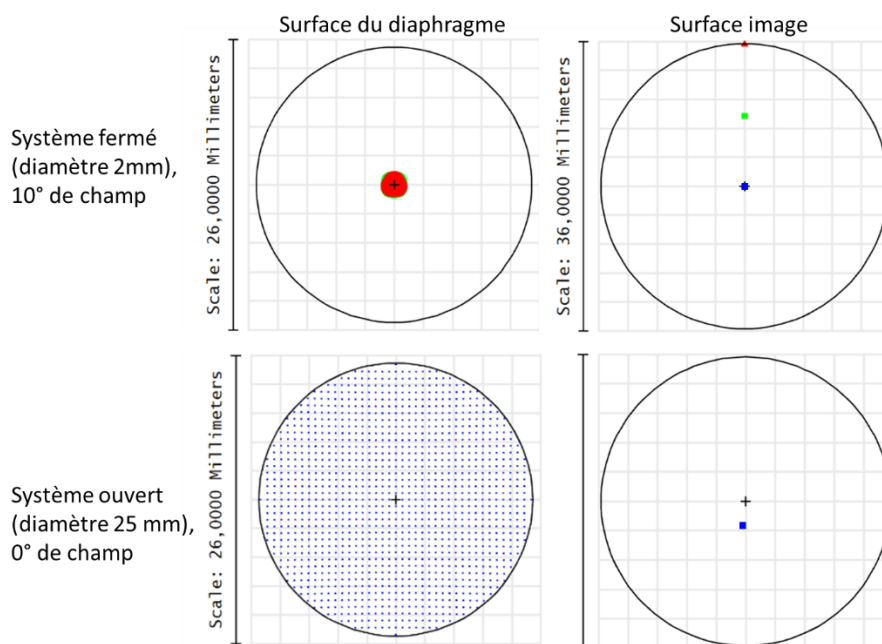


Figure 2.2 – Empreinte du faisceau pour les systèmes précédents. Colonne gauche : surface de la pupille, le diamètre donne la valeur de l'ouverture. Colonne droite : surface image avec les champs distincts.

Maintenant que la distinction champ – ouverture est clarifiée, abordons quelques autres principes fondamentaux de conception optique. L’un des plus fondamentaux est le principe de moindre action de Fermat : pour aller d’un point A à un point B à travers un système optique, la lumière prendra le chemin de durée minimale. C’est pour cette raison que les rayons vont tout droit dans un milieu d’indice optique homogène. Puis, lorsqu’un rayon rencontre un dioptre séparant deux milieux d’indice différents, du principe de Fermat, on peut déduire les lois de Snell-Descartes, illustrées sur la Figure 2.3 :

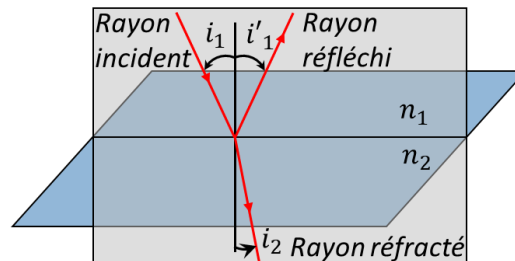


Figure 2.3 - Illustration des phénomènes de réfraction et réflexion entre deux milieux d’indice différents. Les notations sont celles utilisées pour les équations de Snell-Descartes.

$$i_1 = i'_1, \quad 2.1$$

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2). \quad 2.2$$

Cette loi, étudiée au lycée, est au cœur de la conception optique, car elle permet de contrôler le trajet de chaque rayon au sein du système, jusqu’à les focaliser au point image désiré. Ce qui compte, pour un rayon, c’est son angle d’incidence sur le dioptre. La conception optique consiste donc à optimiser chacun de ces angles pour diriger les rayons comme désiré. Ce contrôle est fait en ajustant la courbure des surfaces, les épaisseurs et les indices optiques. Ainsi, en fonction de l’ouverture, les rayons n’ont pas le même angle d’incidence pour un même dioptre, et ils changent alors de direction, comme illustré sur la Figure 2.4 :

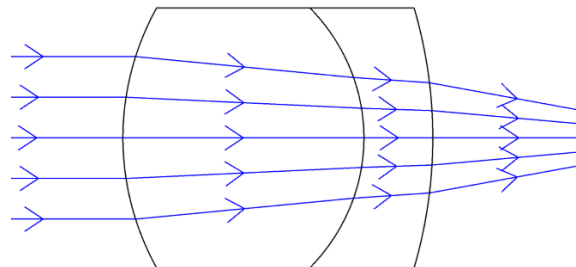


Figure 2.4 - Illustration d’un doublet de lentille, avec un seul champ, dont on voit 5 rayons d’ouverture. A noter que dans ce cas, comme le doublet est collé, il n’y a que 3 dioptres. A chaque dioptre, les rayons changent de direction : parallèles entre eux en entrée, ils convergent vers un point unique en sortie.

Lorsqu’un système fait parfaitement converger les rayons de chaque point du champ vers un unique point image, on dit qu’il est stigmatique. Le but de la conception optique est d’obtenir des images nettes, et donc de s’approcher au plus près des conditions de stigmatisme. En réalité, plus le système est ouvert, et le champ grand, plus on s’écarte du stigmatisme. Cet écart est dû à l’impossibilité avec quelques dioptres d’être stigmatique sur l’ensemble des points d’un champ. C’est ce qu’on appelle les aberrations. Il s’agit d’un écart géométrique entre la position qu’aurait dû avoir un rayon pour former une image parfaite, et sa position réelle. Si on affiche l’ensemble des positions des rayons lumineux sur la surface image, on obtient un « spot diagram », c’est-à-dire une représentation discrète de la tache image pour ce champ. Et plus la

tache image est grosse, plus l'image est floue car chaque point image se mélange avec les points voisins. La Figure 2.5 montre le principe des aberrations :

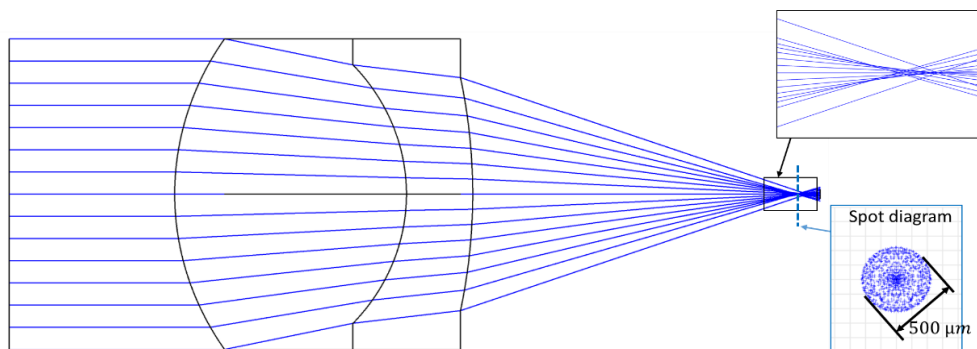


Figure 2.5 - Défaut de convergence d'un système optique, après optimisation. En fonction de l'ouverture, les rayons ne convergent pas au même point. Le spot diagram montre en coupe les positions des rayons.

Nous avons présenté les bases de la conception optique pour comprendre la suite. Plusieurs références très complètes sont conseillées au lecteur désireux d'aller plus loin sur ces notions [58,59].

## 2.1.2 Fonction d'aberration pour l'optique sur l'axe

### 2.1.2.1 Construction de la fonction d'aberration, avec symétrie

Les aberrations sont donc des écarts en position des rayons lumineux sur la surface image. Cette définition correspond à la façon dont on les perçoit, mais ce n'en est que la conséquence. La cause des aberrations est fondamentalement liée au principe de Fermat : les rayons d'un même point du champ n'ont pas eu le même chemin optique<sup>3</sup> à parcourir pour atteindre le point image. En définissant le front d'onde comme la surface composée des points en phase depuis la source (i.e. ayant parcouru le même chemin optique), un système stigmatique a donc un front d'onde sphérique. Et les systèmes réels ont des fronts d'onde déformés, non sphériques.

Cette autre façon de définir les aberrations n'est pas anodine, c'est elle qui permet de comprendre la notion de fonction d'aberration, notée  $W$ . Cette fonction correspond à la somme des écarts  $\Delta$ , représentée à la Figure 2.6, tout le long du système optique, dioptre par dioptre. On obtient ainsi la valeur totale des aberrations pour un système, en fonction du rayon considéré.

Mais si l'écart  $\Delta$  est positif dans certain cas (comme sur la Figure 2.6), dans d'autres, il peut être négatif. Ainsi, sommer ces écarts pour chaque dioptre permet de compenser les aberrations de l'un, par les aberrations de l'autre, et au total aboutir à un système proche du stigmatisme. Cette démarche résume le travail d'un ingénieur en conception optique : optimiser les formes des dioptres pour obtenir un front d'onde sphérique en sortie, en compensant les déformations de l'un par celles d'un autre. Pour réussir ce travail, la fonction d'aberration est la clef mathématique permettant de comprendre les aberrations et de les corriger.

<sup>3</sup> Chemin optique : distance parcourue par la lumière pendant la durée de son trajet dans un milieu.

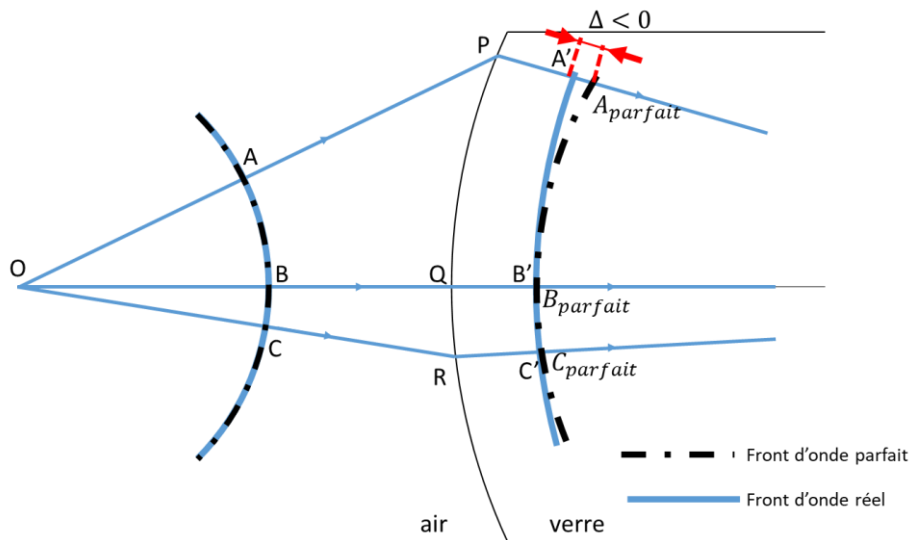


Figure 2.6 - Aberrations sous forme de front d'onde. Le point source  $O$  crée un front d'onde sphérique centrée en  $O$  et passant par  $A$ ,  $B$  et  $C$ . Après réfraction sur le dioptre de la lentille aux points  $P$ ,  $Q$  et  $R$ , les rayons changent de direction : un autre front d'onde, passant par  $A'$ ,  $B'$  et  $C'$ , est formé. Celui-ci est déterminé par la loi de Snell-Descartes.  $\Delta$  représente l'écart entre le front d'onde réel (bleu) et le front d'onde sphérique idéal (pointillés noir), autre visualisation des aberrations. On remarque qu'aux points  $B'$  et  $C'$ , l'écart est quasi nul.

Pour obtenir la forme explicite de la fonction d'aberration, il faut calculer le chemin optique pour un rayon réel (avec aberrations donc), et faire la différence par rapport à une référence. Dans notre exemple, nous étudions un cas d'imagerie sur l'axe par un dioptre à symétrie de révolution, autour de l'axe optique. Dans ce cas, la référence est le rayon qui n'est pas dévié, et qui ne comporte donc pas d'aberration, c'est celui qui est confondu avec l'axe optique :

$$ref = OQ + QB = OQ + QB' \quad 2.3$$

Il est donc évident, pour le rayon sur l'axe, que la fonction d'aberration est nulle. Quant au rayon de forte aberration  $\Delta$ , il suffit de faire la différence entre son chemin optique et celui de la référence pour avoir la valeur explicite de  $\Delta$ . Pour un dioptre sphérique, on obtient alors :

$$\Delta = ([OP] + [PA']) - ([OQ] + [QB']). \quad 2.4$$

Finalement, pour obtenir la fonction d'aberration complète, il suffit de calculer des différences de distance selon le même modèle. Introduisons maintenant les notations permettant d'aboutir à la forme explicite de la fonction d'aberration.

Chaque rayon d'un système optique est décrit de façon unique par quatre coordonnées : deux coordonnées de champ  $(x', y')$ , et deux coordonnées d'ouverture  $(x_p, y_p)$ . Les coordonnées de champ sont les coordonnées cartésiennes du point d'intersection entre le rayon et la surface image, normalisées par les coordonnées du champ maximal. Les coordonnées d'ouverture sont les coordonnées cartésiennes de position du rayon dans le plan de la pupille de sortie, normalisées par l'ouverture maximale. Elles sont toutes illustrées par la Figure 2.7.

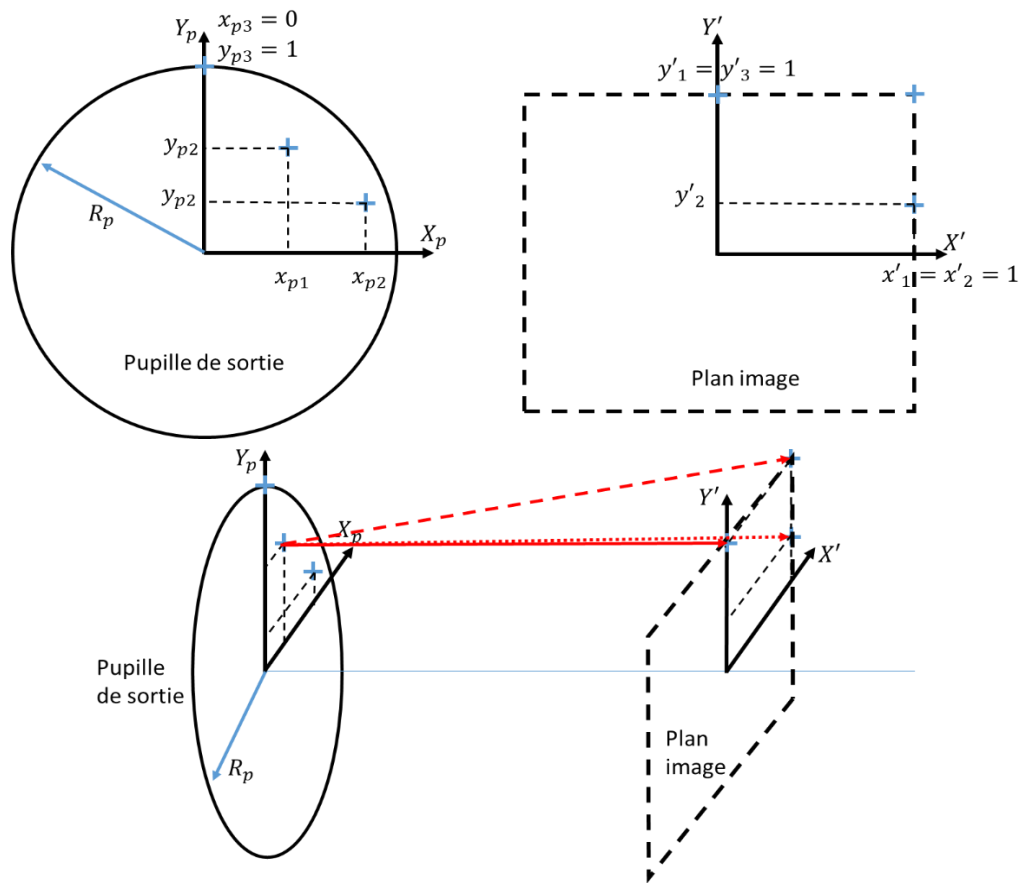


Figure 2.7 - Définitions de coordonnées des rayons. Les paires de coordonnées définissent deux points dans l'espace, reliés par un unique rayon. Depuis le même point dans la pupille, on peut définir plusieurs rayons.

La fonction d'aberration dépend du rayon, elle est donc une fonction des quatre variables :  $x_p, y_p, x'$  et  $y'$ .

Par ailleurs, dans un premier temps, nous nous limitons aux systèmes sur l'optique sur l'axe, qui est à symétrie de révolution. Ainsi, tourner un rayon autour de l'axe optique ne doit pas modifier la fonction d'aberration, puisque par symétrie, elle définit un autre rayon au comportement identique. Cette condition est importante car elle implique que la fonction d'aberration ne peut pas comporter toutes les combinaisons des variables, seules celles qui respectent cette symétrie sont possibles. Celles-ci sont [60] :

$$x'^2 + y'^2, \tag{2.5}$$

$$x_p^2 + y_p^2, \tag{2.6}$$

$$x_p x' + y_p y'. \tag{2.7}$$

De plus, toujours par symétrie, on peut enlever la dépendance en  $x'$ . Puis, en changeant les coordonnées pupillaires du système cartésien vers le système polaire, on obtient une nouvelle expression de la fonction d'aberration en fonction de  $y', \rho$  et  $\varphi$  [61] :

$$W(x', y', x_p, y_p) = W(y', x_p, y_p) = W(y', \rho, \varphi). \tag{2.8}$$

En développant géométriquement les différences de chemin optique, par un développement de Taylor sur cette somme, et en supprimant tous les termes qui ne correspondent pas à la condition de symétrie, on obtient le résultat recherché, la fonction d'aberration :

$$W(y', \rho, \varphi) = \sum_{m,n,p} W_{klm} y'^k \rho^l \cos^m(\varphi). \quad 2.9$$

Avec  $y$  étant la coordonnée de champ normalisée,  $\rho$  la coordonnée pupillaire normalisée et  $\varphi$  l'azimut dans la pupille. De plus, les coefficients  $m$ ,  $n$ ,  $p$  et  $k$  sont liés par les relations :

$$k = 2p + m, \quad 2.10$$

$$l = 2n + m. \quad 2.11$$

L'équation 2.8 peut être développée au 3<sup>e</sup> ordre, ce qui revient à utiliser le développement limité du sinus de l'angle d'incidence des rayons sur un dioptre au 3<sup>e</sup> ordre :

$$\sin(\theta) = \theta - \frac{\theta^3}{3}, \quad 2.12$$

Avec  $\theta$ , l'angle d'incidence entre un rayon et un dioptre. Et finalement, on obtient :

$$W(y', \rho, \varphi) = W_{000} + W_{200}y'^2 + W_{400}y'^4 + W_{020}\rho^2 + W_{111}y'\rho \cos(\varphi) + W_{040}\rho^4 + W_{131}y'\rho^3 \cos(\varphi) + W_{222}y'^2\rho^2 \cos(\varphi)^2 + W_{220}y'^2\rho^2 + W_{311}y'^3\rho \cos(\varphi) + \text{ordres supérieurs} \quad 2.13$$

Exprimée ainsi, la fonction d'aberration correspond à l'écart en chemin optique pour chaque rayon après intersection avec un dioptre, par rapport au rayon de référence, et est fonction de la position des rayons dans la pupille et dans le champ. La fonction d'aberration est donc homogène à une longueur.

## 2.1.2.2 Expression mathématique des aberrations

### 2.1.2.2.1 Aberrations géométriques

La fonction d'aberration 2.13 permet d'obtenir les aberrations dites géométriques. Elles sont à distinguer des aberrations chromatiques, qui seront abordées dans la partie suivante, mais qui sont aussi indirectement obtenues par cette équation.

L'approximation du 3<sup>e</sup> ordre de la fonction d'aberration est la somme de 10 termes, selon l'équation 2.13. Chaque terme est composé de deux parties : un coefficient d'aberration, homogène à une longueur, et les variables. La notation adoptée est celle de Hopkins, où les indices associés au coefficient donnent directement la dépendance de l'aberration. Les 5 premiers termes ne correspondent qu'à des décalages entre le front d'onde de référence et le front d'onde réel, comme des pistons, tilt ou defocus [62] et dépendent simplement de l'onde de référence choisie. Les aberrations du 3<sup>e</sup> ordre sont les 5 derniers termes. Ces termes correspondent à des écarts de front d'onde qui dégradent la qualité image.

L'équation 2.13 est valide pour un seul dioptre. Le théorème de Gouy permet de déduire la valeur totale d'une aberration en sommant la contribution de chaque dioptre, pour cette aberration, au 3<sup>e</sup> ordre. Ce qui est remarquable est que la valeur des coefficients d'aberrations se calcule à partir de seulement deux rayons à tracer : les rayons marginal et principal, représentés à la Figure 2.8. La somme des caractéristiques



géométriques de ces deux rayons pour chaque dioptré, est nommée somme de Seidel, et sont les expressions explicites des coefficients  $W_{klm}$  de l'équation 2.13 [63]. Ainsi, en connaissant les coefficients d'aberrations, on connaît précisément la fonction d'aberration.

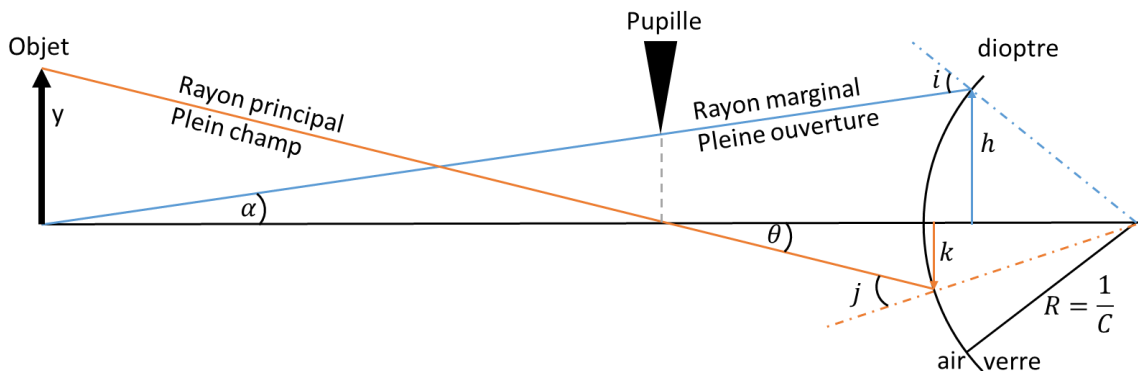


Figure 2.8 – Description des grandeurs fondamentales pour la description des coefficients d'aberrations. Ces deux rayons sont les seuls dont on ait besoin pour ce calcul. Le rayon principal passe par le centre de la pupille, et le rayon marginal passe par le bord de la pupille.

$$\text{Aberration sphérique} \quad W_{040} = - \sum \frac{1}{8} (ni)^2 h \Delta \left( \frac{\alpha}{n} \right) \quad 2.14$$

$$\text{Coma} \quad W_{131} = - \sum \frac{1}{2} (ni)(nj) h \Delta \left( \frac{\alpha}{n} \right) \quad 2.15$$

$$\text{Astigmatisme} \quad W_{222} = - \sum \frac{1}{2} (nj)^2 h \Delta \left( \frac{\alpha}{n} \right) \quad 2.16$$

$$\text{Courbure de champ} \quad W_{220} = - \sum H^2 C \Delta \left( \frac{1}{n} \right) \quad 2.17$$

$$\text{Distorsion} \quad W_{311} = \sum - \frac{1}{2} \frac{j}{i} \left( (nj)^2 h \Delta \left( \frac{\alpha}{n} \right) + H^2 C \Delta \left( \frac{1}{n} \right) \right) \quad 2.18$$

Avec  $H = ny\alpha$  l'invariant de Lagrange, l'opérateur  $\Delta$  sert à marquer la différence pour ces paramètres avant et après le dioptré :  $\Delta \left( \frac{\alpha}{n} \right) = \frac{\alpha_i}{n_i} - \frac{\alpha_{i+1}}{n_{i+1}}$ , avec  $i$  indiquant l'espace d'entrée du dioptré où les angles sont calculés [63], et les autres grandeurs sont définies à la Figure 2.8. Désormais, nous nommerons les aberrations de façon équivalente par leur nom ou par la valeur de leur coefficient (coma ou  $W_{131}$ ) [58].

Ces aberrations sont celles du 3<sup>e</sup> ordre, mais on peut les définir pour tous les ordres supérieurs, sans limite [63]. L'intérêt de connaître ces aberrations primaires est d'en déduire de nombreuses conséquences sur les méthodes de design optique. Il nous faut encore comprendre l'origine des aberrations chromatiques pour ensuite illustrer l'utilité des sommes de Seidel pour créer un système optique.

#### 2.1.2.2.2 Aberrations chromatiques

Les aberrations chromatiques sont dues à la dépendance en longueur d'onde des indices optiques des matériaux : la réfraction d'un rayon est calculée selon la longueur d'onde qu'il porte. En conséquence, toutes les aberrations géométriques (monochromatiques) ont un équivalent chromatique : sphérochromatisme, coma chromatique, astigmatisme chromatique, etc [64].

Pour prendre en compte le chromatisme, il faut considérer une sphère de référence par longueur d’onde d’intérêt, souvent les deux plus extrêmes. Les aberrations chromatiques proviennent de la comparaison entre les deux, c’est-à-dire leur différence en chemin optique. En développant au second ordre cette différence, on obtient les deux formes principales de chromatisme : le chromatisme axial et le chromatisme latéral. Le premier est un défaut de mise au point, et le second est un grandissement chromatique, comme illustré à la Figure 2.9.

Les équations 2.19 et 2.20 donnent les sommes de Seidel équivalentes pour le chromatisme.

Chromatisme axial 
$$\delta_\lambda W_{020} = \sum \frac{1}{2} (n_i) h \Delta \left( \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right) \quad 2.19$$

Chromatisme latéral 
$$\delta_\lambda W_{111} = \sum (n_j) h \Delta \left( \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right) \quad 2.20$$

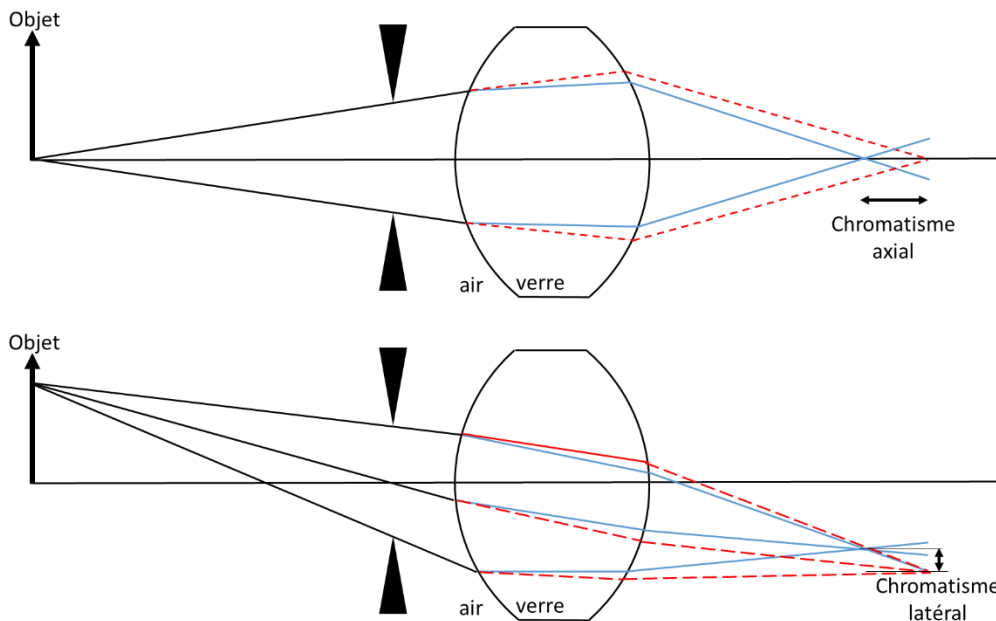


Figure 2.9 – Chromatisme axial et latéral pour une lentille simple, entre des longueurs d’onde bleue et rouge.

### 2.1.2.3 Utilisation de la fonction d’aberration

Les aberrations du 3<sup>e</sup> ordre permettent, notamment, de comprendre un point crucial dans les designs optiques en général, mais particulièrement pour les systèmes visuels : l’influence de la position de la pupille. Un système visuel impose d’avoir la pupille loin du premier dioptré, pour avoir un dégagement oculaire (*Eye Relief*, ER) assez grand pour placer son œil, même avec des lunettes. Pour comprendre cette influence, on peut prendre l’exemple d’une lentille simple et étudier les aberrations du système en déplaçant la pupille. On visualise aisément dans les schémas de la Figure 2.10 que ce déplacement modifie les aberrations du système. Lorsque la pupille est en amont, les aberrations sont bien plus importantes qu’en aval.

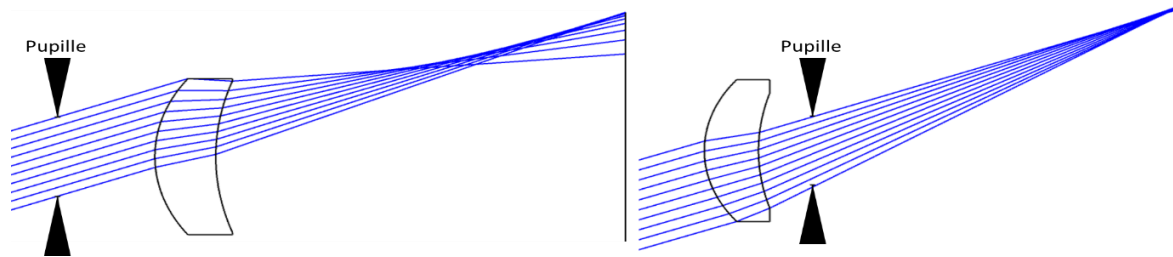


Figure 2.10 – Deux positions de pupille pour une même lentille sélectionnent des rayons différents pour un même champ. A gauche, on perçoit de très grandes aberrations, à droite, le point image est bien focalisé.

Dans son livre sur les systèmes optiques, Welford, étudie les déplacements de pupilles, à ouverture constante et il en déduit les variations d’aberration lorsque la pupille est déplacée [58]. On en présente ici les principaux résultats. En se référant à la Figure 2.11, on peut visualiser que, lorsque l’étude se fait à ouverture constante, un unique rayon marginal définit  $h$ ,  $i$  et  $\alpha$ . Ainsi, quelle que soit la position de la pupille, les coefficients  $W_{040}$ ,  $W_{020}$ ,  $W_{220}$  et  $H$  ne varient pas. En revanche, plus on éloigne la pupille, plus les valeurs de  $k$ , de  $j$  et  $\theta$  augmentent. Le phénomène intéressant est que les aberrations évoluent en dépendant des aberrations de départ, et pas toujours linéairement. Par exemple,  $W_{131}$  varie linéairement par rapport à  $W_{040}$ ,  $W_{222}$  varie quadratiquement par rapport à  $W_{040}$  et linéairement par rapport à  $W_{131}$  comme le montre les équations 2.21 à 2.28.

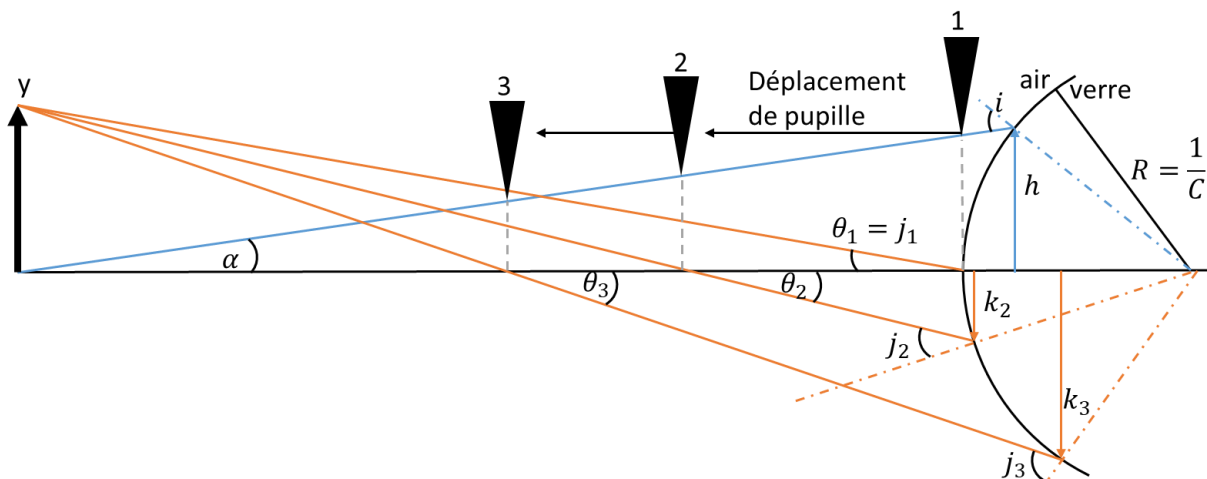


Figure 2.11 – Décalage de pupille, à ouverture constante. (1) pupille au sommet du dioptre, donc  $k_1$  est nul, et n’apparaissent pas. (2) pupille éloignée, donne  $k_2$  et  $j_2$ . (3) pupille plus éloignée :  $k_2 < k_3$  et  $j_2 < j_3$ .

Les équations données ci-après sont issues du cours de T. Lépine, et sont démontrée dans Welford [58]. La première équation est le paramètre utilisé pour décrire le déplacement de la pupille. La normalisation permet de s’affranchir de la conjugaison pupillaire d’un espace à l’autre. Comme il s’agit d’étudier une variation, il faut d’abord définir une référence, ici la position où la pupille est sur le dioptre, 1 sur la Figure 2.11. Donc quand la pupille s’éloigne du dioptre,  $\Delta k$  augmente.

$$\Delta E = \frac{\Delta k}{h} \tag{2.21}$$

$$\Delta W_{040} = 0 \tag{2.22}$$

$$\Delta W_{131} = 4\Delta E W_{040} \tag{2.23}$$

$$\Delta W_{222} = 2\Delta E W_{131} + 4\Delta E^2 W_{040} \quad 2.24$$

$$\Delta W_{220} = 0 \quad 2.25$$

$$\Delta W_{311} = \Delta E(3W_{222} + 2W_{220}) + 3\Delta E^2 W_{131} + 4\Delta E^3 W_{040} \quad 2.26$$

$$\Delta(\delta W_{020}) = 0 \quad 2.27$$

$$\Delta(\delta W_{111}) = 2\Delta E \delta W_{020} \quad 2.28$$

Un exemple concret d'utilisation de ces équations est donné dans l'annexe 3 « Utilisation didactique de ZOS ». J'y montre une façon d'utiliser ces équations pour la mise en place d'un système visuel : on utilise l'éloignement de la pupille du dioptré pour corriger les aberrations du système.

Ces équations soulignent l'importance de la position de la pupille dans un design optique. Et l'éloignement de la pupille dans le cas des systèmes visuels s'inscrit dans ce cadre. Cette caractéristique complexifie la conception de ces systèmes en rendant difficile, voire impossible, une astuce classique de design : l'utilisation de la symétrie. En effet, un système symétrique voit toutes les aberrations d'ordre impair par rapport au champ s'annuler, car elles sont d'abord positives puis négatives, mais de même valeur, ou inversement.

Ainsi, on comprend que la position de la pupille imposée par l'œil est une cause majeure des spécificités du design optique de système visuels. C'est pourquoi, la conception de systèmes visuels avec microécrans courbes ne peut reprendre directement les conclusions de la thèse de Christophe Gaschet, qui étudiait, juste avant ce travail, le design de systèmes optiques avec capteurs courbes [54]. Cet aspect est repris plus en détail dans le chapitre 3.

Un autre point crucial distinguant ce travail de celui de C. Gaschet est lié à la symétrie de révolution. En effet, s'il étudiait des systèmes de capteurs d'image, j'étudie ici des systèmes dédiés à la RA, qui doivent donc joindre deux voies optiques, la vision du réel et la vision du microécran. Il est possible d'étudier des systèmes de RA tout en préservant la symétrie de révolution, mais ces systèmes sont très limités en performance [65]. Ainsi, dans cette thèse, nous étudions des systèmes sans symétrie de révolution. Ils sont nommés « systèmes hors-axe » puisque l'axe optique est désormais composé de plusieurs segments. Or, pour corriger les aberrations des systèmes hors-axe, la méthode la plus efficace est d'utiliser des surfaces optiques avec beaucoup plus de degrés de libertés que l'optique conventionnelle, sur l'axe : c'est l'optique *freeform*.

## 2.2 OPTIQUE HORS-AXE ET FREEFORM

### 2.2.1 Optique Hors-axe et théorie des aberrations nodales

#### 2.2.1.1 Du tolérancement à l'optique hors-axe

Nous avons vu au chapitre 1 que pour les systèmes de RA, l'optique hors-axe s'impose par rapport à l'optique sur l'axe. Si un miroir plan permet aussi de créer une optique « par segment », il ne crée pas les conditions d'un système hors d'axe qui nécessitent de l'utiliser pour la correction des aberrations. Mais c'est aussi cette idée qui permet de compacter les systèmes optiques. Cette partie cherche donc à présenter les variations qu'apporte l'aspect hors-axe et le cadre théorique développé pour les comprendre.

En résumé, le cadre théorique est donné par la Théorie des Aberrations Nodales (NAT, acronyme anglais). Développée par R. Shack et K. Thompson dans les années 1980, elle a d'abord été pensée pour comprendre les modifications qui surviennent lorsqu'un système optique n'est pas parfaitement aligné et centré, c'est une partie du tolérancement [66–68]. Nous illustrons ce point par la Figure 2.12, montrant l'influence des désalignement et décentrement sur le plan image. Quatre rayons, le principal, le marginal et ceux partant du pied ou du haut de l'objet et passant le centre de la lentille mince, suffisent à étudier ces variations.

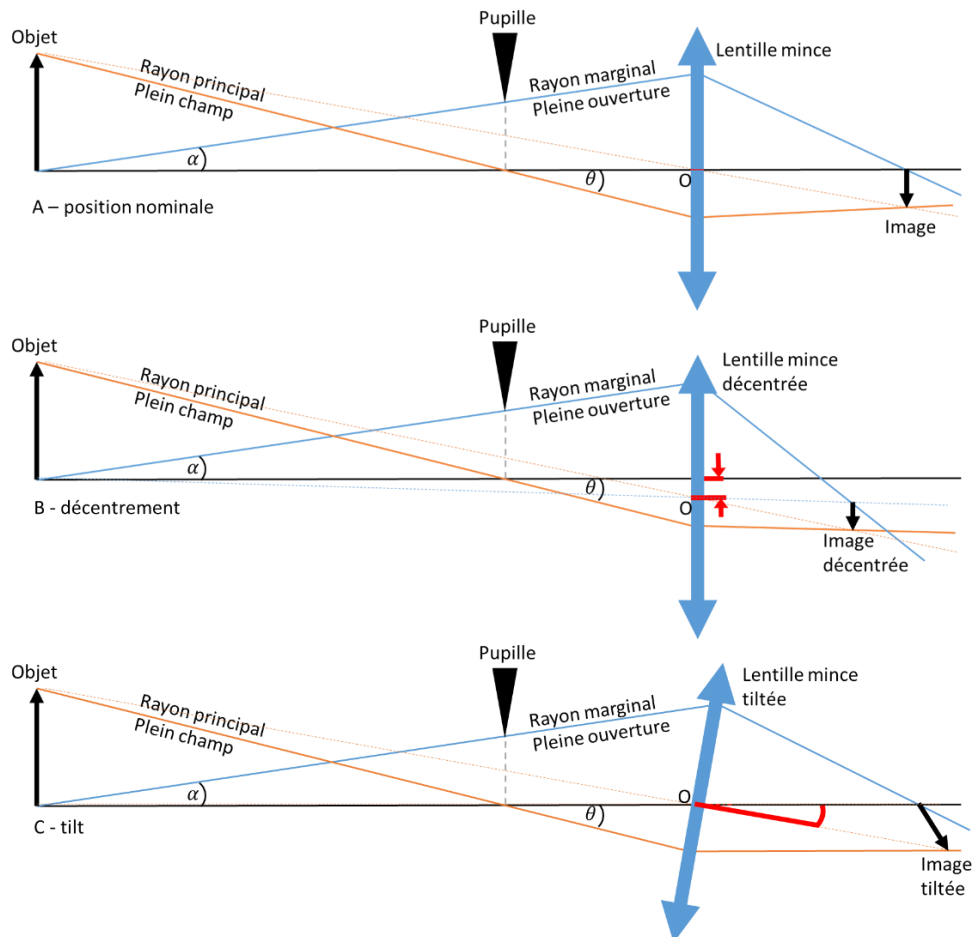


Figure 2.12 – Effet du décentrement et du tilt sur un système optique simple.

Dans les cas qui nous intéressent, au lieu d'être liés à des défauts lors de la fabrication, les décentrement et les tilts sont volontairement placés de sorte que le microécran et les dioptries de la voie associée n'obstrue pas la voie de vision de la scène réelle. Historiquement, c'est d'abord l'étude du tolérancement de l'alignement des optiques qui a motivé l'émergence de la NAT. Ce n'est que dans un second temps que la NAT a été détournée de son usage initial pour étudier les conséquences d'une introduction volontaire de tilt et décentrement [69]. Voyons maintenant comment, dans ce cas, la fonction d'aberration est modifiée. La suite du chapitre abordera la manière de gérer le design optique dans ces conditions.

Dans la partie sur l'axe, on pouvait utiliser une simplification majeure : la symétrie de révolution. Or, par définition, l'optique hors-axe brise cette symétrie, ce qui force à repenser les simplifications réalisées sur la fonction d'aberration. Plutôt que de revenir à l'équation 2.8, l'astuce consiste à reprendre l'équation 2.9, qui inclue les simplifications issues de la symétrie, puis à introduire des vecteurs prenant en compte les asymétries. De cette façon, la NAT reste très proche de la théorie classique, tout en la généralisant.

La première étape consiste donc à introduire une réécriture de la fonction 2.9, sous forme vectorielle, plutôt que scalaire [66]. Pour cela, contrairement aux systèmes sur l'axe où on utilise un seul angle (qu'on avait nommé  $\varphi$ ) pour décrire l'azimut dans la pupille, en hors-axe, deux angles,  $\varphi$  et  $\theta$ , sont utilisés pour représenter l'angle d'azimut dans le plan image et dans le plan de la pupille de sortie, respectivement, comme illustré à la Figure 2.13.

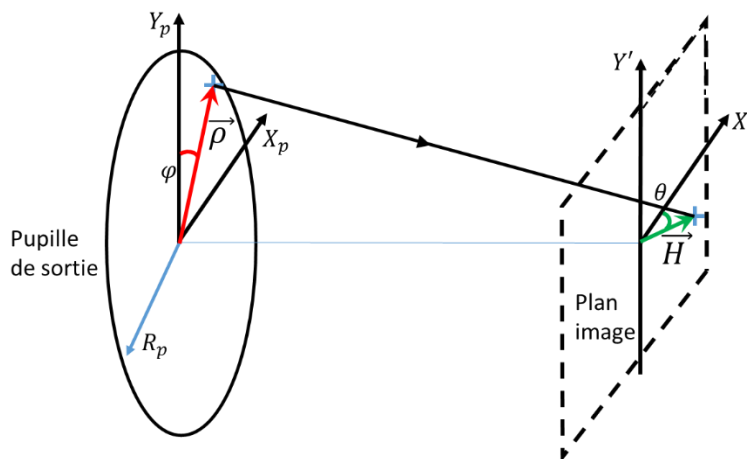


Figure 2.13 – Les deux angles nécessaires à la description des rayons pour les systèmes hors d'axe. A noter le changement de nom pour reprendre la notation de Thompson : le champ est noté  $\vec{H}$  et non plus  $y'$ .

On introduit le produit vectoriel entre le champ et l'ouverture, sous la forme [66] :

$$\vec{H} \cdot \vec{\rho} = H\rho \cos(\theta - \varphi) \quad 2.29$$

Avec cette notation vectorielle, on peut réécrire la fonction d'aberration :

$$W(\vec{H}, \vec{\rho}, \varphi) = \sum_i \sum_{m,n} W_{klm} \vec{H}_i^{2p+m} \vec{\rho}_i^{2n+m} \cos^m(\varphi_i) \quad 2.30$$

$$W(\vec{H}, \vec{\rho}, \varphi) = \sum_i \sum_{m,n} W_{klm} (\vec{H}_i^{2p} \vec{\rho}_i^{2n}) (\vec{H}^m \vec{\rho}^m \cos^m(\varphi_i)) \quad 2.31$$

$$W(\vec{H}, \vec{\rho}, \varphi) = \sum_i \sum_{m,n} W_{klm} ([\vec{H}_i \cdot \vec{H}_i]^p [\vec{\rho}_i \cdot \vec{\rho}_i]^n) (\vec{H}^m \vec{\rho}^m \cos^m(\varphi_i)) \quad 2.32$$

$$W(\vec{H}, \vec{\rho}, \varphi) = \sum_i \sum_{p,m,n} W_{klm,j} [(\vec{H} \cdot \vec{H})^p (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^n (\vec{H} \cdot \vec{\rho})^m] \quad 2.33$$

Avec  $i$  variant sur le nombre de dioptries,  $p, m, n$  variant jusqu'à l'infini, et avec les relations entre paramètres donnée par les équations 2.10 et 2.11. Comme il ne s'agit que d'une réécriture, la fonction d'aberration signifie exactement la même chose, sous forme vectorielle ou scalaire. On peut donc comparer les deux formes d'écriture, ce qui permet de visualiser les nouvelles écritures des aberrations :

$$W(y, \rho, \varphi) = W_{000} + W_{200} y^2 + W_{400} y^4 + W_{020} \rho^2 + W_{111} y \rho \cos(\varphi) + W_{040} \rho^4 + W_{131} y \rho^3 \cos(\varphi) + W_{222} y^2 \rho^2 \cos^2(\varphi) + W_{220} y^2 \rho^2 + W_{311} y^3 \rho \cos(\varphi) \quad 2.34$$

$$W(\vec{H}, \vec{\rho}) = W_{000} + W_{200}(\vec{H} \cdot \vec{H}) + W_{400}(\vec{H} \cdot \vec{H})^2 + W_{020} \vec{\rho} \cdot \vec{\rho} + W_{111}(\vec{H} \cdot \vec{\rho}) + W_{040}(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 + W_{131}(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})(\vec{H} \cdot \vec{\rho}) + W_{222}(\vec{H} \cdot \vec{\rho})^2 + W_{220}(\vec{H} \cdot \vec{H})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + W_{311}(\vec{H} \cdot \vec{H})(\vec{H} \cdot \vec{\rho}) \quad 2.35$$

Ainsi, les coefficients  $W_{klm}$ , définissant l'amplitude d'une aberration spécifique, selon la notation de Hopkins, ne sont pas modifiés, car ce n'est qu'une réécriture. Maintenant, pour prendre en compte les tilts et décentremets, il faut introduire de nouvelles notions :

- Une référence commune à toutes les surfaces afin de mesurer la hauteur de chaque champ pour l'ensemble du système, notée  $\vec{H}$  au lieu de  $y'$  précédemment. Cette référence est le centre du plan image gaussien, obtenu par tracé du rayon *Optical Axis Ray* (OAR), ou rayon d'axe optique. Il s'agit du rayon passant par le centre de chaque dioptré et pupille. Sur l'axe, tous les segments sont parallèles entre eux et forment l'axe optique, en hors-axe, le OAR peut donc être composé de segments non parallèles.
- Un vecteur, noté  $\vec{\sigma}_j$ , localisant les axes optiques locaux, i.e. centres de symétrie, des dioptrés  $j$ .
- Un vecteur, noté  $\vec{H}_{Aj}$ , mesurant la hauteur de chaque champ à partir du vecteur  $\vec{\sigma}_j$

La somme des deux vecteurs  $\vec{\sigma}_j$  et  $\vec{H}_{Aj}$ , donne le vecteur  $\vec{H}$ , qui est équivalent à la mesure traditionnelle de la hauteur d'un champ, ce qu'on peut représenter graphique à la Figure 2.14 :

$$\vec{H} = \vec{\sigma}_j + \vec{H}_{Aj} \quad 2.36$$

Figure 2.14 – Principaux vecteurs permettant d'introduire l'asymétrie, illustration reprise de [66]

En insérant l'équation 2.36 dans la fonction d'aberration, on obtient la formulation générale de la fonction d'aberration, capable donc de prendre en compte les tilts et décentremets :

$$W(y_i, \rho_i, \varphi_i) = \sum_{j,p,m,n} W_{klm,j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot (\vec{H} - \vec{\sigma}_j)]^p (\rho \cdot \rho)^n ((\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \rho)^m \quad 2.37$$

De ce résultat, on peut déduire plusieurs conséquences fondamentales pour la conception des systèmes :

- La fonction d'aberration reste, au 3<sup>e</sup> ordre, la somme des contributions de chaque dioptré. En effet, pour obtenir sa forme générale, nous n'avons pas remis en cause le principe de Fermat, à l'origine de ce résultat.
- Les coefficients  $W_{ijk}$  ne sont pas modifiés par les tilts et décentrement. Les changements qui ont lieu dans la fonction d'aberration n'ont pas eu lieu au niveau de ces coefficients. Ils sont donc toujours uniquement définis par des quantités paraxiales.

Une autre conséquence fondamentale de cette forme généralisée de la fonction d'aberration est la présence de nœuds (*nodes* en anglais) d'où la théorie des aberrations nodales (ou NAT) tire son origine. Pour la comprendre, il faut détailler un peu plus les aberrations obtenues par cette expression généralisée.

## 2.2.1.2 Détails sur les aberrations en hors-axe

Comme nous l'avons remarqué à la partie précédente, les coefficients d'aberrations  $W_{klm}$  ne changent pas en hors-axe. Ce sont les dépendances en champs des aberrations qui changent car ce sont elles qui incluent l'asymétrie, selon la somme vectorielle 2.36. Voyons en détails l'écriture généralisée des aberrations.

### 2.2.1.2.1 Aberration sphérique

L'expression de l'aberration sphérique généralisée est :

$$W = \sum W_{040j} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 \quad 2.38$$

La somme se fait sur tous les dioptries du système, numéroté  $j$ . La dépendance est uniquement une dépendance en ouverture, qui ne sont pas modifiées par les asymétries, c'est-à-dire que l'aberration ne dépend pas du vecteur  $\vec{\sigma}_j$ . Pour être plus précis, le cadre théorique de la NAT a comme hypothèse de départ que les systèmes sont proches d'une ouverture sphérique. En conséquence, l'aberration sphérique ne voit pas de changement entre un système symétrique ou asymétrique, car cette aberration est indépendante du champ.

Pour plus de détails sur l'aberration sphérique, le lecteur peut lire les descriptions classiques pour un système centré [58].

### 2.2.1.2.2 Coma

L'expression de la coma, issue de la fonction d'aberration 2.37, peut-être simplifiée suivant le calcul suivant :

$$\begin{aligned} W &= \sum W_{131j} (\vec{H} - \vec{\sigma}_j \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) = \left( \left( \sum W_{131j} \vec{H} - \sum W_{131j} \vec{\sigma}_j \right) \cdot \vec{\rho} \right) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \\ &= \left( \left( W_{131} \vec{H} - \sum W_{131j} \vec{\sigma}_j \right) \cdot \vec{\rho} \right) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \end{aligned}$$

Avec  $\sum W_{131j} = W_{131}$ , par définition du coefficient d'aberration.

Il est à noter qu'il y a des opérations vectorielles spécifiques qui ont été définies par Shack et Thompson, et détaillées notamment dans l'annexe A de la thèse de Thompson [66]. Nous en reprenons ici directement les développements. Pour comprendre en détails les calculs repris ici, il vaut mieux s'y reporter.

En définissant  $\frac{\sum W_{131j} \vec{\sigma}_j}{W_{131}} = \frac{\vec{A}_{131}}{W_{131}} = \vec{a}_{131}$ , on obtient l'expression finale de la coma :

$$= W_{131} \left( (\vec{H} - \vec{a}_{131}) \cdot \vec{\rho} \right) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}). \quad 2.39$$

A noter qu'il s'agit de produits scalaires, donnant donc un scalaire en fonction du champ. De cette expression, plusieurs conséquences importantes sont à noter.



Si le coefficient de coma est nul :

On a donc  $W_{131} = 0$ . Pour un système symétrique, cela signifie bien que la coma est nulle, mais ce n'est pas le cas pour un système asymétrique pour lequel la coma a quand même une contribution :

$$\begin{aligned} W &= \left( [W_{131}\vec{H} - \sum W_{131j}\vec{\sigma}_j] \cdot \vec{\rho} \right) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \\ &= - \left( \sum (W_{131j}\vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho} \right) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) = -(\overrightarrow{A_{131}} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \neq 0 \end{aligned}$$

Or, la somme des  $W_{131j}$  est nulle, ici, la prise ne compte de l'asymétrie modifie cette somme qui n'est donc plus nulle. Cette conclusion pourrait sembler contradictoire avec l'équation 2.39, mais en réalité, cette dernière n'est valide que si  $W_{131}$  n'est pas nul, car sinon, on ne peut pas normaliser  $\overrightarrow{A_{131}}$ .

Dans les cours sur les aberrations géométriques, on apprend que la coma varie linéairement en fonction du champ. Pourtant, il ne s'agit là que du cas particulier de la coma à symétrie de révolution. Ce que montrent ces équations, c'est la généralisation de la coma, et on découvre qu'elle comporte aussi une composante constante en champ. Ce nouveau terme ne doit pas être classé comme une nouvelle aberration, il ne s'agit que de la généralisation de ce qu'est la coma.

Apparition du concept de nœud :

Comme indiqué précédemment, c'est du concept de nœud que tire le nom de la théorie des aberrations nodales, c'est dire s'il est important ! Il semble, historiquement, que ce fut un des grands étonnements lors de la mise en place de la théorie.

Le nœud, est un « point » dans l'espace, où une aberration s'annule, en fonction du champ. Ce concept est déjà présent pour les systèmes symétriques, mais il est tellement évident qu'il n'a alors jamais été défini : les nœuds sont tous situés sur l'axe optique. Or, lorsque la symétrie est brisée, la position d'annulation d'une aberration n'a plus de raison, *a priori*, d'être confondue avec le nœud d'une autre aberration. Pour trouver la position d'un nœud, il faut rechercher les conditions d'annulation de la coma généralisée :

$$W_{131} \left( (\vec{H} - \overrightarrow{a_{131}}) \cdot \vec{\rho} \right) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) = 0 \tag{2.40}$$

Si le système est symétrique,  $\overrightarrow{a_{131}} = 0$ , et le nœud se situe à la position d'annulation du champ, donc sur l'axe optique. Sinon, le nœud se situe à la position d'annulation de  $\vec{H} - \overrightarrow{a_{131}}$ . Il y a donc un simple décalage dans l'espace de la position d'annulation de la coma en fonction du champ.

Orientation et amplitude de l'aberration :

Puisque les aberrations sont maintenant conçues vectoriellement, on peut définir pour chaque vecteur son amplitude et son orientation. Pour l'orientation, il est pertinent d'introduire une nouvelle notation, qui définit la dépendance en champ de la coma. C'est donc selon ce vecteur que la coma est orientée :

$$\overrightarrow{H_{131}} = \vec{H} - \overrightarrow{a_{131}} \tag{2.41}$$

En se souvenant que par définition  $\overrightarrow{a_{131}} = \frac{\overrightarrow{A_{131}}}{W_{131}} = \frac{\sum W_{131j}\vec{\sigma}_j}{W_{131}}$ , on voit que le vecteur  $\overrightarrow{a_{131}}$  est directement relié au vecteur  $\vec{\sigma}_j$ . En conséquence, on peut reprendre la Figure 2.14, et l'adapter au niveau du système en prenant en compte la contribution de chaque dioptré, afin de montrer graphiquement à la fois la position du nœud, et l'orientation de la coma, comme sur la Figure 2.15.

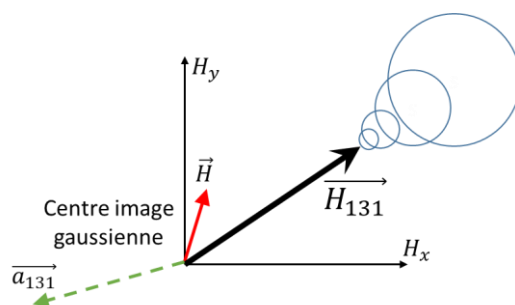


Figure 2.15 – Orientation de la coma. Si les tilts et décentrement changent,  $\vec{a}_{131}$  peut changer en norme et en direction, modifiant complètement la forme de la coma totale.

L'amplitude correspond à la norme du vecteur :

$$\|W_{131} ((\vec{H} - \vec{a}_{131}) \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})\| = W_{131} \|\vec{H}_{131}\| \quad 2.42$$

Pour illustrer par un cas particulier, l'ajout des coefficients Z7 et Z8 de Zernike au niveau de la pupille conduit à l'obtention d'une coma constante en champ, illustrée à la Figure 2.16. Pour l'afficher, j'utilise l'outil d'analyse de ZOS « Full-Field Aberration ». Brièvement, il s'agit de la décomposition du front d'onde pour chaque point du champ. Je donne plus de précision à son propos dans l'annexe « utilisation didactique de ZOS ».

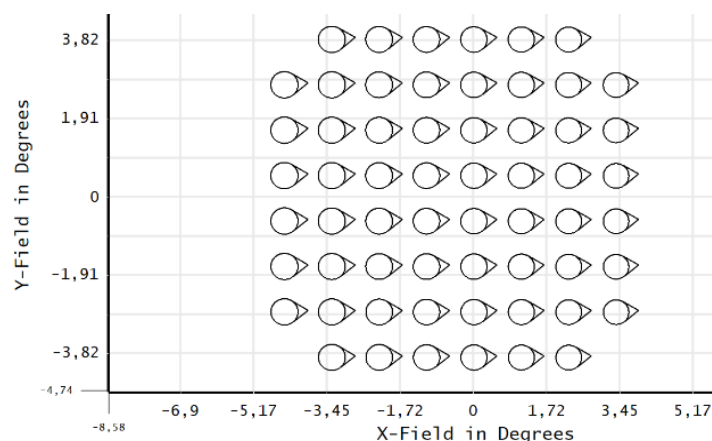


Figure 2.16 – Illustration d'une coma constante en champ.

### 2.2.1.2.3 Astigmatisme

La courbure de champ et l'astigmatisme sont couramment traités ensemble car ces deux aberrations ont la même dépendance en champ. L'aspect hors-axe ne change pas la proximité entre les deux aberrations. Thompson les présente directement ensemble. Pour bien identifier leur différence, je les présente l'une après l'autre, en commençant par l'astigmatisme. L'expression de l'astigmatisme correspond à :

$$\begin{aligned} W &= \sum W_{222,j} ([\vec{H} - \vec{\sigma}_j] \cdot \vec{\rho})^2 \\ &= \left[ \sum W_{222,j} \vec{H}^2 - 2\vec{H} \left( \sum W_{222,j} \vec{\sigma}_j \right) + \sum W_{222,j} \vec{\sigma}_j^2 \right] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \end{aligned} \quad 2.43$$

En reprenant la même méthode que pour l'analyse de la coma, nous pouvons définir deux vecteurs, et leur normalisation, pour simplifier l'expression 2.43 :

$$\overrightarrow{a}_{222} = \overrightarrow{A}_{222} / W_{222} = \left( \sum W_{222j} \overrightarrow{\sigma}_j \right) / W_{222} \quad 2.44$$

$$\overrightarrow{b}_{222}^2 = \overrightarrow{B}_{222}^2 / W_{222} - \overrightarrow{a}_{222}^2 = \left( \sum W_{222j} \overrightarrow{\sigma}_j^2 \right) / W_{222} - \overrightarrow{a}_{222}^2 \quad 2.45$$

Ce qui permet de reprendre l'équation 2.43 sous la forme :

$$W = W_{222} (\overrightarrow{H}_{222}^2 + \overrightarrow{b}_{222}^2) \cdot \vec{\rho}^2 \quad 2.46$$

Avec, de façon similaire à la coma, la définition du vecteur de champ pour l'astigmatisme :

$$\overrightarrow{H}_{222}^2 = (\vec{H} - \overrightarrow{a}_{222})^2 \quad 2.47$$

Les termes  $\overrightarrow{H}_{222}^2$  et  $\overrightarrow{b}_{222}^2$  sont des vecteurs au carré, et ce sont bien toujours des vecteurs. Voir [66] pour la définition des vecteurs au carré.

Recherche des nœuds pour l'astigmatisme :

La recherche des nœuds pour l'astigmatisme est riche d'enseignements pour en comprendre son fonctionnement. Il faut donc trouver la valeur de  $\vec{H}$  pour laquelle l'équation 2.46 est nulle. Comme  $W_{222}$  est déterminé par les valeurs paraxiales, et que l'ouverture est indépendante, la condition s'écrit :

$$\overrightarrow{H}_{222}^2 + \overrightarrow{b}_{222}^2 = (\vec{H} - \overrightarrow{a}_{222})^2 + \overrightarrow{b}_{222}^2 = 0. \quad 2.48$$

Selon les propriétés de ces vecteurs, on peut résoudre cette équation comme s'il s'agissait de scalaires, et on obtient :

$$\vec{H} = \overrightarrow{a}_{222} \pm i \overrightarrow{b}_{222} \quad 2.49$$

L'équation 2.49 montre qu'il y a deux positions en fonction du champ où l'astigmatisme s'annule. C'est ce que Shack a nommé « l'astigmatisme binodal ». Géométriquement, ceci implique que la position des deux nœuds de l'astigmatisme est trouvée par la somme et la différence des vecteurs  $\overrightarrow{a}_{222}$  et  $\overrightarrow{b}_{222}$ , comme on le voit sur la Figure 2.17. Une conséquence directe de ce désalignement est que l'on ne peut plus caractériser le système selon les orientations sagittales et tangentielles. C'est pourquoi Thompson introduit les notions de surfaces N et P pour Négative et Positive, faisant référence au nœud à partir duquel les surfaces sont définies. En allant dans les ordres supérieurs, certaines aberrations font apparaître plus de nœuds (coma elliptique : 3 nœuds ; astigmatisme du 5<sup>e</sup> ordre : 4 nœuds).

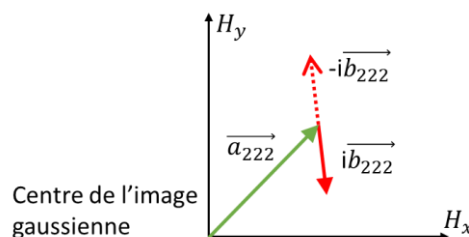


Figure 2.17 – Illustration des positions des deux nœuds de l'astigmatisme.

La découverte de ce comportement binodal a été, comme le note Thompson dans sa thèse, la première compréhension théorique de certaines figures obtenues lors de l'analyse du tolérancement de systèmes

centrés. Et un système centré parfait est simplement un cas particulier où les vecteur  $a_{222}$  et  $b_{222}$  sont nuls, et donc les deux nœuds sont confondus sur l'axe.

Amplitude et orientation de l'astigmatisme :

Le calcul de l'amplitude et de l'orientation se fait de façon similaire à la coma, mais en étudiant cette fois deux vecteurs décrivant le comportement de l'astigmatisme, nommés vecteurs nodaux  $\vec{N}_1, \vec{N}_2$ . Ils se déduisent en réécrivant l'équation 2.46 avec l'astuce :

$$(\vec{H} - \vec{a}_{222}) + \vec{b}_{222} = (\vec{H} - \vec{a}_{222}) - i^2 \vec{b}_{222} + i \vec{b}_{222} (\vec{H} - \vec{a}_{222}) - i \vec{b}_{222} (\vec{H} - \vec{a}_{222})$$

$$W = W_{222} \left( (\vec{H} - \vec{a}_{222}) + i \vec{b}_{222} \right) \left( (\vec{H} - \vec{a}_{222}) - i \vec{b}_{222} \right) \cdot \rho^2 \quad 2.50$$

Et on en déduit :

$$\vec{N}_1 = (\vec{H} - \vec{a}_{222}) + i \vec{b}_{222} \text{ et } \vec{N}_2 = (\vec{H} - \vec{a}_{222}) - i \vec{b}_{222}$$

Ces vecteurs nodaux sont définis pour chaque point du champ, et dépendent bien de l'asymétrie du système. L'amplitude de l'astigmatisme est donnée par le produit des normes des vecteurs nodaux. L'orientation de la ligne d'astigmatisme pour chaque point du champ est donnée par l'orientation du vecteur  $(\vec{N}_1 \vec{N}_2)^{1/2}$ . Autrement dit, des vecteurs  $a_{222}$  et  $b_{222}$  on déduit l'amplitude et l'orientation de l'astigmatisme pour chaque point du champ.

Si le coefficient d'astigmatisme est nul :

Dans ce cas,  $W_{222} = 0$  et, comme pour la coma, l'équation 2.46 n'est plus valide car la division par  $W_{222}$  ne peut plus se faire. En revenant à l'équation 2.43, on obtient :

$$W = \left( -2\vec{H} A_{222} + B_{222}^2 \right) \cdot \rho^2 \quad 2.51$$

Cette équation montre l'apparition d'un astigmatisme linéaire en champ. On distingue trois cas :

- Si le vecteur  $A_{222}$  est nul, alors la dépendance en champ disparaît, et on obtient un astigmatisme constant en champ, dont les caractéristiques sont déterminées par le vecteur  $B_{222}$  (Figure 2.18).
- Si le vecteur  $B_{222}$  est nul, alors l'astigmatisme linéaire ne comporte qu'un seul nœud et est centré sur l'axe optique local.
- Dans le cas général où ni  $A_{222}$  ni  $B_{222}$  ne sont nuls, il s'agit d'un astigmatisme linéaire en champ, dont les caractéristiques sont déterminées par ces deux vecteurs (Figure 2.18).

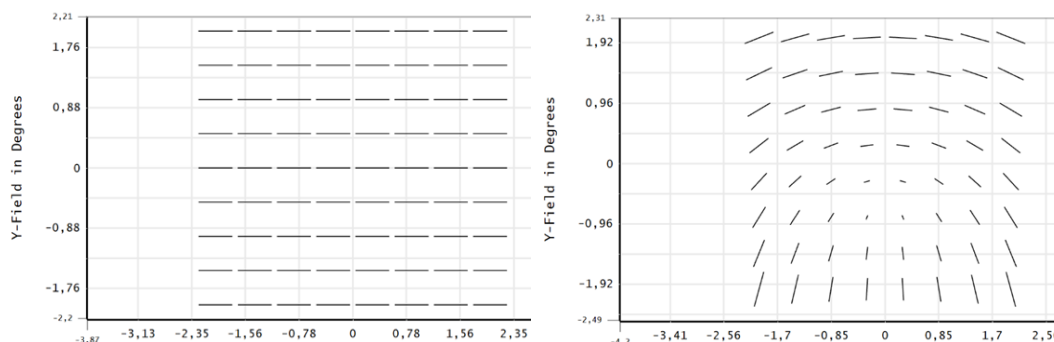


Figure 2.18 – Full-field displays décrivant deux types d'astigmatisme. Gauche : astigmatisme constant en champ. Droite : astigmatisme linéaire en champ.

Si le coefficient d'astigmatisme n'est pas nul :

Dans ce cas,  $W_{222} \neq 0$ , on peut donc utiliser directement l'équation 2.46, pour étudier deux cas particuliers.

- D'abord, si le vecteur  $a_{222} = 0$ . Dans ce cas, l'astigmatisme reste binodal selon l'équation 2.49. Toutefois, il présente alors une symétrie planaire autour de l'axe optique local.
- Ensuite, si le vecteur  $b^2_{222} = 0$ . L'astigmatisme binodal disparaît car les deux nœuds se confondent. On a alors un astigmatisme variant avec le carré du champ, décentré selon le vecteur  $a_{222}$ .

Enfin, il reste le cas général, déjà étudié plus haut.

L'astigmatisme généralisé peut être représenté par des traits avec l'outil « full-field displays », comme à la Figure 2.19, mais peut aussi être représentée sous forme de surface, comme à la Figure 2.20.

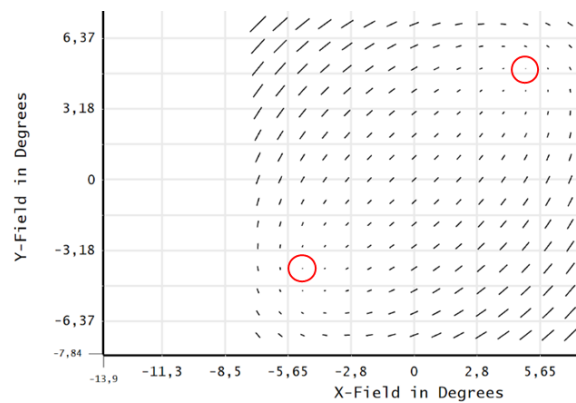


Figure 2.19 – Astigmatisme binodal avec les deux nœuds en rouge dans le champ.

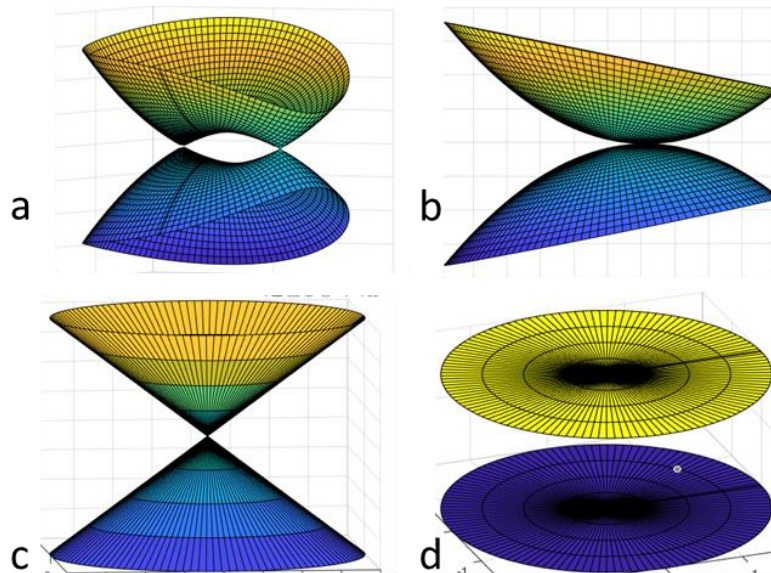


Figure 2.20 – Visualisation des surfaces N et P pour quatre formes d'astigmatisme remarquables : (a) binodal ; (b) quadratique décentré ; (c) linéaire ; (d) constant. Issu de [66].

#### 2.2.1.2.4 Courbure de champ

La courbure de champ s'analyse selon un modèle proche de l'astigmatisme puisque leur dépendance en champ est similaire. De même que pour les équations précédentes, sa nature ne change pas : elle ne dégrade pas la qualité image si la focalisation se fait sur une surface courbe. Pour la déterminer il faut ajouter un terme de défocus dans l'expression de la courbure de champ, de la même façon que l'on procède

pour les calculs sur l'axe. Par ailleurs, on introduit aussi l'expression de l'astigmatisme, de sorte à prendre directement en compte leur dépendance similaire en champ :

$$W = W_{020}(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \sum W_{220,j} \left( (\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot (\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \right) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \sum W_{222,j} \left( [\vec{H} - \vec{\sigma}_j] \cdot \vec{\rho} \right)^2 \quad 2.52$$

On introduit la surface médiale, définie comme  $W_m = W_{220} + \frac{1}{2}W_{222}$ . En développant l'expression précédente sous forme scalaire, et en utilisant la relation  $\cos(\phi)^2 = \frac{1}{2}(1 + \cos(2\phi))$ , on obtient :

$$W = W_{020}\rho^2 + W_m H^2 \rho^2 + \frac{1}{2}W_{222}H^2 \rho^2 \cos(2\phi). \quad 2.53$$

En écrivant 2.53 sous forme vectorielle, et en introduisant le vecteur de perturbation on obtient :

$$W = W_{020}(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + W_m \left( (\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot (\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \right) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \sum W_{222,j} [\vec{H} - \vec{\sigma}_j]^2 \cdot \vec{\rho}^2 \quad 2.54$$

L'étude de l'astigmatisme est équivalente à celle du dernier terme. Il n'a été introduit que pour définir la surface médiale. On n'étudie donc dans cette partie que les propriétés de la surface médiale, associée au défocus. A la surface de meilleure focalisation, on considère donc que la fonction d'aberration est nulle :

$$0 = W_{020} + \sum W_{m,j} \vec{H} \cdot \vec{H} - 2\vec{H} \left( \sum W_{m,j} \vec{\sigma}_j \right) + \sum W_{m,j} \vec{\sigma}_j \cdot \vec{\sigma}_j \quad 2.55$$

Avec le même type de normalisation que dans les exemples précédents :

$$\vec{a}_m = \vec{A}_m / W_{220} = 1/W_m \sum W_{m,j} \vec{\sigma}_j, \quad 2.56$$

$$b_m = B_m / W_m - \vec{a}_m \cdot \vec{a}_m = 1/W_m \sum W_{m,j} \vec{\sigma}_j \cdot \vec{\sigma}_j - \vec{a}_m \cdot \vec{a}_m, \quad 2.57$$

$$\vec{H}_m = \vec{H} - \vec{a}_m. \quad 2.58$$

On peut simplifier l'équation 2.55 sous deux formes, selon que la notation utilisée :

$$-W_{020} = W_m \vec{H} \cdot \vec{H} - 2\vec{H} \vec{A}_m + B_m \quad 2.59$$

$$-W_{020} = W_m (\vec{H}_m \cdot \vec{H}_m + b_m). \quad 2.60$$

L'équation 2.60 montre que la courbure de champ hors-axe dépend encore du champ au carré. La différence se situe en réalité dans le terme  $b_m$ , qui inclue à la fois le vecteur  $\vec{a}_m$  et le scalaire  $B_m$ , qui influencent la forme de la surface focale hors-axe, et en particulier la position de son centre.

#### Recherche du centre de courbure de champ :

Le centre de la surface médiale est défini par le point où le défocus annulant l'aberration est minimal. Le déplacement du sommet est lié aux désalignements  $\vec{\sigma}_j$  qui définissent le vecteur  $\vec{A}_m$  et le scalaire  $B_m$ . Comme on le voit dans les équations 2.59 et 2.60, le scalaire  $B_m$  (ou sa normalisation  $b_m$ ) s'ajoute directement au défocus, et contrôle ainsi le défocus du sommet de la surface médiale. Par ailleurs, le

vecteur  $A_m$  (ou sa normalisation  $a_m$ ) contrôle l'orientation et le décentrement de la position du centre de courbure comme l'indique l'équation 2.58.

Selon que  $W_m$  est nul ou non, on utilise l'équation 2.59 ou 2.60. Si  $W_m = 0$ , l'absence de défaut pour la surface médiale correspond à  $B_m = 0$ . Si  $W_m \neq 0$ , l'absence de défaut se caractérise par  $b_m = 0$ . Comme la normalisation de  $B_m$  fait intervenir le vecteur  $a_m$ ,  $B_m = 0$  n'implique pas  $b_m = 0$ . Ces différents cas sont illustrés par la Figure 2.21.

Pour calculer le défaut induit par  $b_m$ , on considère que  $H_m = 0$  dans l'équation 2.60 pour se placer au centre champ. Puis on introduit l'expression du défaut et on obtient :  $\delta z_m = -8(f\#)^2 W_m b_m$ .

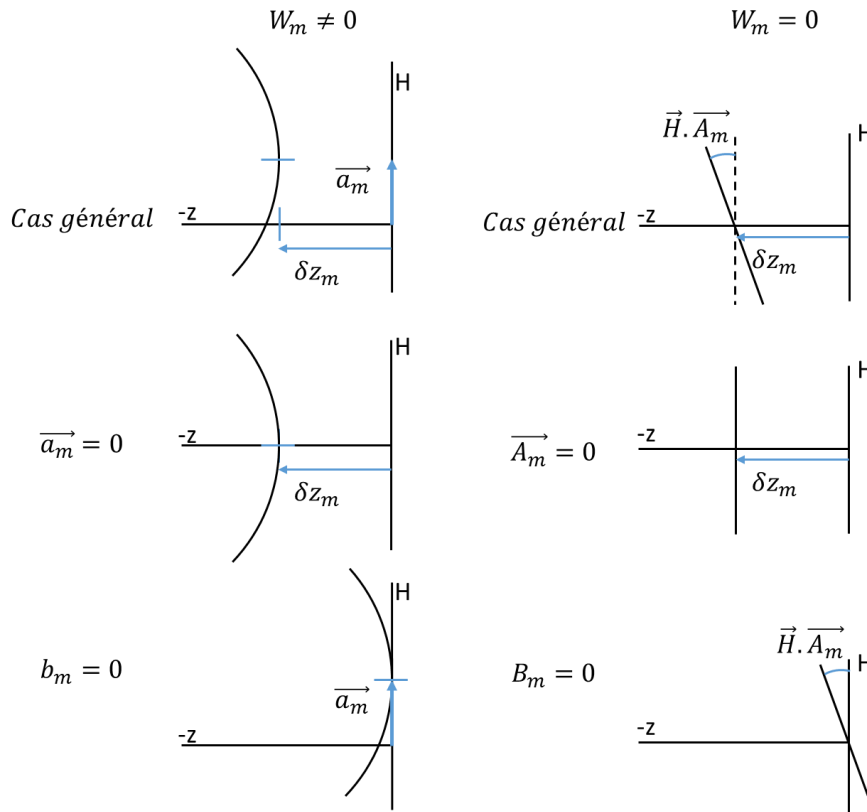


Figure 2.21 – Surface médiale dans différents cas particuliers.

Analyse de la courbure :

L'équation 2.59 montre que la dépendance de la courbure de champ reste quadratique avec le champ, comme pour les systèmes sur l'axe. Le défaut  $W_{020}$  est la somme de 3 termes : la variable de champ au carré, le produit scalaire entre le champ et le déplacement latéral  $\vec{A}_m$  et  $B_m$ . Pour évaluer le type de forme que produit la courbure de champ hors-axe, je calcule le défaut obtenu en fonction du champ. Le but est de comparer le défaut obtenu entre deux points du champ qui sont à la même distance du centre de la surface médiale, mais qui ne sont pas colinéaires. On a donc  $\vec{H}_1 = H e^{i\theta}$  et  $\vec{H}_2 = H e^{i\theta+\pi/2}$ . On choisit  $\theta$  de sorte que le champ  $H_1$  soit colinéaire au vecteur  $A_m$ .

$$\text{Défaut H1} \quad -W_{020} = W_m \vec{H}_1 \cdot \vec{H}_1 - 2 \vec{H}_1 \vec{A}_m + B_m = W_m H^2 - 2 H \|A_m\| + B_m \quad 2.61$$

$$\text{Défaut H2} \quad -W_{020} = W_m \vec{H}_2 \cdot \vec{H}_2 - 2 \vec{H}_2 \vec{A}_m + B_m = W_m H^2 - 0 + B_m \quad 2.62$$

Ces calculs montrent que pour deux points du champ de même norme, mais orientés orthogonalement, le défocus n'est pas le même. Dans les deux cas, il s'agit d'un défocus proche d'une sphère, puisque quadratique en champ, mais en fonction de l'orientation du champ, il ne s'agit pas de la même sphère.

A partir de ce résultat, on retrouve bien le cas d'un système centré, puisque si  $A_m$  et  $B_m$  sont nuls, le défocus est égal dans les deux cas. Toutes les positions intermédiaires entre  $\vec{H}$  et  $\vec{A}_m$  sont des transitions entre les deux cas précédents, dépendant au carré du champ, ainsi que du déphasage entre les deux vecteurs. In fine, ce qui se dessine par cette équation est une forme définie par des rayons de courbure selon l'axe de  $\vec{A}_m$  et son orthogonal, et une transition entre les deux. Nous reviendrons sur ce point au chapitre suivant.

#### Courbure et astigmatisme :

Lorsqu'on juxtapose les termes caractéristiques de la courbure de champ et de l'astigmatisme, on voit la grande proximité entre les deux aberrations :

$$\begin{aligned} \vec{A}_{222} &= \sum W_{222j} \vec{\sigma}_j ; & \vec{B}_{222}^2 &= \sum W_{222j} \vec{\sigma}_j^2 \\ \vec{A}_m &= \sum W_{m,j} \vec{\sigma}_j ; & B_m &= \sum W_{m,j} \vec{\sigma}_j \cdot \vec{\sigma}_j \end{aligned}$$

Ces vecteurs et ce scalaire contrôlent la forme des aberrations. Ils sont définis à partir des mêmes  $\vec{\sigma}_j$  mais pas à partir des mêmes amplitudes (coefficients d'aberrations). Les deux aberrations sont donc dans la même direction, mais elles peuvent être d'amplitude (et de sens) différent.

Ainsi, dans le cas général, la surface de meilleure focalisation étant liée à la somme des meilleures surfaces pour les deux aberrations, la forme de la surface image peut prendre des formes variées, difficiles à décrire, mais illustrées à la Figure 2.22

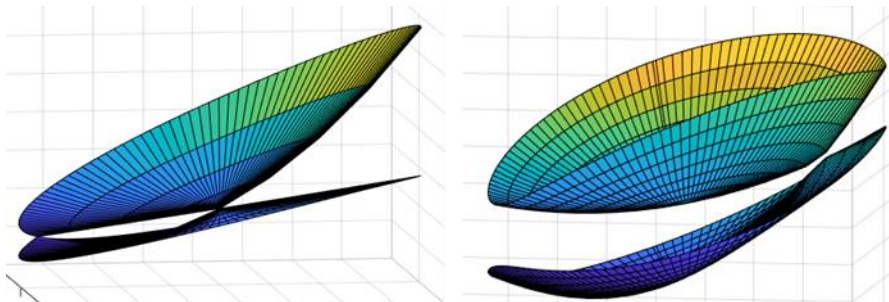


Figure 2.22 – Cas général avec astigmatisme et courbure de champ

Les chapitres 3 et 5 apportent des précisions plus concrètes sur les formes de courbure de surface image.

#### 2.2.1.2.5 Distorsion

Comme la distorsion dépend du champ au cube, les équations sont plus fastidieuses à établir que pour les autres aberrations, mais ce sont des méthodes similaires qui sont appliquées pour l'étudier. L'ensemble des calculs peut se trouver dans la référence [66]. Nous ne donnons ici que son expression de départ, issue de la fonction d'aberration 2.37, ainsi qu'une rapide description du comportement nodal.

$$W = \sum W_{311,j} (\vec{H} - \vec{\sigma}_j \cdot \vec{H} - \vec{\sigma}_j) (\vec{H} - \vec{\sigma}_j \cdot \vec{\rho})$$

Toujours selon le principe que l'aspect hors-axe ne change pas la nature des aberrations, comme la distorsion usuellement étudiée, la distorsion généralisée se manifeste par un écart entre la position nominal



d'un point du champ et sa position réelle, mais pas par une augmentation du diamètre RMS des *spots diagram*. Pour cette raison, cette aberration est souvent corrigée numériquement.

Après simplification de son expression, on trouve que la distorsion généralisée possède trois nœuds, dont la répartition dans l'espace est proche de celle de l'astigmatisme. Deux nœuds se trouvent de façon similaire, grâce à une solution complexe, et le troisième nœud se situe entre les deux.

De même que pour les aberrations précédentes, si le coefficient d'aberration est nul, la distorsion généralisée n'en est pas pour autant nulle, il lui reste des dépendances en champ et en ouverture.

Maintenant que nous avons décrit les aberrations dans le cas des systèmes asymétriques, voyons comment les corriger.

## 2.2.2 Optique freeform pour corriger les aberrations hors-axe

Maintenant que les détails de la NAT ont été exposés, je présente les généralités à saisir pour comprendre comment utiliser cette théorie dans la pratique. Il ne s'agit ici que d'un aperçu, qui est détaillé de façon plus concrète à travers des exemples aux chapitres 3 et 5, et dans l'annexe « utilisation didactique de ZOS ».

### 2.2.2.1 Description des surfaces freeform

L'histoire de l'optique *freeform* est expliquée de façon assez générale dans [70]. En bref, une première définition considère qu'une optique est *freeform* dès lors qu'elle n'a pas de symétrie de révolution. Ainsi, les surfaces anamorphiques, ou des portions excentrées d'asphères sont considérées *freeform*. La définition retenue par J. Rolland *et al.* est : une surface sans symétrie de révolution, nécessitant au moins trois axes indépendant pour être fabriquée [70]. Cette dernière définition exclut par exemple les surfaces asphériques excentrée.

De nombreuses descriptions mathématiques des dioptrés ont été proposées afin de corriger les aberrations hors-axe. Le défi consiste à en trouver une qui ait assez de degrés de libertés pour contrôler le dioptré, tout en étant efficace à optimiser, et dont l'usage soit bien adapté à la correction des aberrations. De nombreuses méthodes et comparaison existent dans la littérature, avec des cas d'usage [71–76]. Plusieurs articles de revue essayent de donner une vue globale pour se repérer dans l'ensemble des techniques disponibles [71,77]. Je ne présente ici qu'une vue d'ensemble des avantages et les inconvénients des principales méthodes.

#### Global ou local :

Un premier classement des méthodes peut se faire selon qu'elles soient globales ou locales. Pour les méthodes globales, modifier un coefficient modifie l'ensemble de la surface. Avec les méthodes locales, en revanche, il est possible que de ne modifier que certaines portions d'un dioptré. Par conséquent, ces dernières sont intéressantes pour une modification ponctuelle d'un dioptré [78], ou pour gérer des dioptrés avec de très fortes pentes [77].

Les méthodes globales, quant à elles, sont donc plus adaptées lorsque les contraintes en pente sont moins marquées et qu'une fonction optique unique est réalisée par le dioptré. Elles ont notamment l'avantage de pouvoir être directement reliées aux aberrations du système, et ainsi rendre leur correction plus adaptée.

#### Orthogonalité des fonctions :

Plusieurs polynômes classiques pour le design *freeform* ont pour propriété d'être orthogonaux (Zernike, Q-polynomial, Chebyshev, Legendre). Ceci confère une indépendance entre leurs coefficients. Ainsi, on peut

ajouter un nouveau coefficient à optimiser sans craindre de redondances qui auraient pour effet de modifier ceux déjà en place. En revanche, tous ne sont pas orthogonaux, afin de gagner en souplesse et complexité dans la description de la surface (NURBS Non Uniform Rational Basis Splines), ou pour conserver une description locale de la surface (RBF, Radial Basis Function).

Autres remarques utiles :

Selon le logiciel de conception optique utilisé, certaines méthodes peuvent ne pas être présentes ce qui force l'utilisateur à créer ses propres outils pour utiliser ces fonctions. C'est par exemple le cas des RBF avec le logiciel ZOS, version 2021.

La plupart des méthodes polynomiales fonctionnent selon le même schéma : une forme de départ, appelée base, est définie, et on y ajoute un polynôme décrivant l'écart à la base. Cette dernière peut être une sphère, un tore, ou une asphère par exemple.

Certaines méthodes apportent certes des contrôles précis des surfaces, mais ajoutent de la complexité lors du choix des variables, de la définition de la fonction de mérite ou encore de l'optimisation des surfaces. C'est notamment le cas des NURBS [75].

Enfin, il faut avoir conscience que le choix de la méthode de description n'est pas sans conséquences. En comparant deux méthodes, des résultats différents peuvent être obtenus, avec des performances différentes. Mais, de façon pratique, c'est aussi au niveau de la fabrication et de la caractérisation des surfaces que certaines méthodes peuvent être plus adaptées que d'autres, simplement parce que l'interlocuteur les utilise déjà usuellement. C'est notamment le cas des polynômes de Zernike qui sont très répandus. Le Tableau 2.1 présente une synthèse des caractéristiques essentielles des méthodes de description des surfaces *freeforms*.

<i>Nom</i>	<i>Type de fonction</i>	<i>Global / Local</i>	<i>Orthogonal</i>	<i>Avantage</i>	<i>Remarque</i>
<i>Zernike</i>	<i>Polynomiale</i>	<i>Global</i>	<i>Oui</i>	<i>Lié aux aberrations</i>	<i>Très utilisé</i>
<i>Q-polynomial</i>	<i>Polynomiale</i>	<i>Global</i>	<i>Oui</i>	<i>Orthonaux en gradient</i>	<i>Non accessible nativement, ZOS</i>
<i>Legendre</i>	<i>Polynomiale</i>	<i>Global</i>	<i>Oui, en gradient</i>	<i>Adapté à la description de surface optique</i>	-
<i>Q-Legendre</i>	<i>polynomiale</i>	<i>Global</i>	<i>Oui, en gradient</i>	<i>Adapté à une pupille rectangulaire</i>	-
<i>Polynôme XY</i>	<i>Polynomiale</i>	<i>Global</i>	<i>Non</i>	<i>Simple à utiliser</i>	<i>Très utilisé</i>
<i>Radial Basis Function</i>	-	<i>Local</i>	<i>Non</i>	<i>Beaucoup de degré de liberté</i>	<i>Non accessible nativement, ZOS</i>
<i>NURBS</i>	<i>Spline</i>	<i>Local</i>	<i>Non</i>	<i>Beaucoup de degré de liberté</i>	<i>Très complexe</i>

Tableau 2.1 – Adapté de [77] donnant une vue globale sur la description de surfaces *freeform*.

L'annexe « Polynômes de Zernike » présente plus de détails sur ces polynômes qui sont très largement utilisés, dans de nombreux domaines.

### 2.2.2.2 Correction des aberrations

Corriger les aberrations hors-axe dans un système optique requiert des surfaces *freeform*, et nous avons vu précédemment comment les décrire. Certains aspects pratiques permettant de corriger les aberrations

d'un systèmes *freeform* sont détaillés dans l'annexe « Utilisation didactique de ZOS ». Dans cette partie, je présente certains points clefs théorique de la correction des aberrations.

### 2.2.2.2.1 Analyse des aberrations

Pour savoir quelle aberration il faut corriger, encore faut-il pouvoir les identifier. Un outil a spécialement été conçu pour cela : les Full-Field Displays. Déjà utilisé pour décrire l'aberration de coma et d'astigmatisme (Figure 2.16 et Figure 2.18), plus de détails sont donnés dans l'annexe « utilisation didactique de ZOS ».

Le point clef pour analyser les systèmes optiques est d'avoir à la fois une vision globale et détaillée de la qualité image. Il existe de nombreux outils d'analyse d'un système optique qui sont présents nativement dans les logiciels de conception optique, mais l'important est surtout de comprendre les raisons pour utiliser un outil en particulier. Le Tableau 2.2 présente synthétiquement les points clefs, selon moi, de ces outils d'analyse. La MTF (Modulation Transfer Function) correspond à la transformée de Fourier de la PSF (Point Spread Function, fonction d'étalement du point). Pour plus de précisions, voir [54].

<i>Outil</i>	<i>Spot diagram</i>	<i>FFD</i>	<i>Energie encerclée</i>	<i>MTF</i>
<i>Directement issu du tracé de rayon ?</i>	<i>Oui</i>	<i>Selon les méthodes</i>	<i>Selon les méthodes</i>	<i>Non</i>
<i>Perd précision hors-axe ?</i>	<i>Non</i>	<i>Non</i>	<i>Selon les méthodes</i>	<i>Oui</i>
<i>Perd des informations sur les aberrations ?</i>	<i>Partiellement</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>
<i>Donne l'influence d'une surface sur les aberrations ?</i>	<i>Non</i>	<i>Non</i>	<i>Non</i>	<i>Non</i>
<i>Facilement relié à la taille des pixels ?</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>
<i>Utile tout au long du design ?</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>	<i>Sert surtout à la fin</i>	<i>Sert surtout à la fin</i>

Tableau 2.2 – Comparaison des caractéristiques des principales méthodes d'évaluation de la qualité image d'un système optique.

### 2.2.2.2.2 Rôle optique des différents dioptries d'un système

Dans les expressions des aberrations hors-axe, on voit que les vecteurs portant les asymétries ajoutent des contributions, dépendant du champ et de l'ouverture. Ainsi, selon la position d'un dioptrie dans le système optique, l'usage de méthodes *freeform* permettra, ou non, de corriger les aberrations souhaitées.

Ainsi, comme pour les systèmes symétriques, la distance entre un dioptrie et la pupille de son espace influence les aberrations que ce dioptrie peut corriger. Si cette distance est nulle, le dioptrie ne peut pas corriger les aberrations dépendantes en champ, mais il corrige celles constantes en champ. Et inversement, s'il est loin de sa pupille [79]. Ceci est dû à la définition d'une pupille, car c'est une surface où les empreintes de chaque champ sont identiques, donc un dioptrie à cet endroit appliquerait ses déformations sur tous les fronts d'onde de façon similaire.

Mais contrairement aux systèmes symétriques, il peut y avoir de la coma ou de l'astigmatisme constant en champ, par exemple, ce qui rend plus difficile la répartition *a priori* du besoin entre les surfaces pupillaires ou de champ. Dans le chapitre 5, nous discuterons plus en détails de ces aspects.

### 2.2.2.2.3 Méthode de conception

Le choix du point de départ est un élément qui peut être critique en optique. De nombreux travaux recherchent des méthodes pour obtenir des bons points de départ [76,79–82]. Un bon point de départ étant ici entendu comme un point de départ pouvant donner, rapidement, un système final entrant dans les spécifications du projet.

Depuis le point de départ, il faut obtenir un système remplissant les spécifications. De nombreuses méthodes existent. Une première consiste à créer un système symétrique similaire au système hors-axe souhaité, et à introduire les asymétries petit-à-petit dans le système. Si cette méthode peut fonctionner, les contributions hors-axe des aberrations n'ont aucune raison de correspondre à ce qui est obtenu sur l'axe. Ainsi, cette méthode n'est pas considérée comme pertinente.

Il est préférable de se placer directement dans une géométrie satisfaisante, puis de calculer les dioptries. Les méthodes divergent sur ce point. Les optiques destinées à l'éclairage, grâce à leurs contraintes moindres en termes de précision, peuvent utiliser des méthodes qui ne fonctionnent pas directement pour les systèmes d'imagerie [83]. D'autres méthodes ont donc été imaginées.

Une approche point à point a été développée par plusieurs auteurs, consistant à calculer l'orientation locale de chaque portion de dioptre pour les rayons provenant de chaque champ. Elles nécessitent souvent de faire plusieurs itérations [84,85].

Une méthode utilisant des réflecteurs cartésiens couplés, avec des écarts à la surface asphériques est décrite dans [81]. Elle permet d'obtenir un point de départ corrigé des aberrations du troisième ordre, hors-axe. Pour obtenir le système final, l'ajout de coefficients *freeform* est nécessaire afin de corriger les aberrations d'ordre supérieur.

La méthode *Simultaneous Multiple Surface* (SMS), développée initialement pour les systèmes d'éclairage, a été démontrée utilisable pour l'optimisation de système d'imagerie [86,87]. Le but est alors de calculer les dioptries non pas de façon séquentielle, mais simultanément, ce qui permet une meilleure efficacité en temps de calcul et en résultat final.

Volatier et Druart montrent dans [80] une méthode fondée sur le principe de Fermat consistant à résoudre un système d'équations différentielles. Cette méthode n'a pas besoin de faire de nombreuses itérations, et considère les rayons un à un, mais reste proche de l'esprit de la méthode SMS, puisqu'elle permet de calculer les dioptries de façon simultanée.

Une approche différente a été entreprise dans [79], puisqu'elle consiste à déterminer des critères objectifs pour comparer le potentiel de plusieurs points de départ. En effet, toutes les méthodes précédentes partent du principe que la géométrie est fixée, et cherchent uniquement à optimiser les formes des dioptries. Dans leur publication, Bauer *et al.*, évaluent selon trois critères toutes les possibilités de positions géométriques pour un système à 3 miroirs, avec la pupille sur le premier miroir. Le meilleur point de départ est celui pour lequel les aberrations sont le mieux réparties, de sorte à anticiper une correction conjointe des aberrations. Cette méthode est étudiée en détails dans le chapitre 3.

Pour l'optique sur l'axe, il existe de nombreuses bases de données de systèmes pouvant être utilisés comme point de départ. A ce jour, nous n'avons pas connaissance d'équivalent pour l'optique hors-axe. D'une part, elle est développée depuis beaucoup moins longtemps, d'autre part, sa diversité est potentiellement beaucoup plus grande puisque les contraintes de symétries ne s'appliquent plus, même si ce serait très utile à la communauté. Quoiqu'il en soit, si l'obtention d'un bon point de départ est une étape clef, ce n'est pas

pour autant l'aboutissement du travail : il faut encore optimiser le système jusqu'à remplir les critères du cahier des charges. Voyons maintenant comment optimiser un système *freeform*.

#### 2.2.2.2.4 Les limites du freeform

Lorsqu'un système est asymétrique, de nouvelles contributions des mêmes aberrations apparaissent. Il est possible de les corriger en décrivant les dioptries par des fonctions (polynômes de Zernike, RBF, NURBS, etc.) apportant plus de degrés de liberté, sans ajouter de nombreuses surfaces. Grâce à ces méthodes, des solutions tout à fait inédites à des vieux problèmes optiques peuvent être développées, et le potentiel de ces technologies est encore difficile à évaluer. Toutefois, le *freeform* a des limites.

D'abord, parce que ce n'est pas une solution ultime et absolue. C'est en particulier la raison pour laquelle nous avons présenté quelques méthodes pour choisir un bon point de départ. Cela signifie qu'il en existe des mauvais, qui ne mènent nulle part, même pour un système *freeform*.

Par ailleurs, dans le cas des lunettes de RA, la contrainte d'intégration mécanique dans une paire de lunette n'a jamais été réussie sans avoir un système final ressemblant à des « yeux de mouches ». Cette caractéristique esthétique a un impact concret sur l'acceptation de ces dispositifs. Rolland *et al.* ont récemment étudié le mélange l'optique *freeform* aux métasurfaces pour atteindre cet objectif [88].

Ensuite, il existe des limites pratiques lors de la conception. Les optimisations peuvent être très longues dans certains cas, menant à de vraies difficultés de conception pour comparer plusieurs chemins possibles, lors de la conception, mais aussi lors de l'analyse des tolérances du système. Par ailleurs, il y a des outils qui gagneraient à être développés, pour aider le concepteur à prendre plus de recul sur son système et permettre d'imaginer encore de nouvelles façons de faire, peut-être meilleures.

Enfin, il existe des limites pratiques lors de la fabrication des dioptries *freeform*. Il existe aujourd'hui de nombreuses méthodes de fabrication et de caractérisations des dioptries *freeform* [70], mais ces techniques souffrent encore de nombreuses lacunes, ne serait-ce qu'en temps de fabrication, menant à des coûts parfois très élevés.

## 2.3 CONCLUSION

Dans cette partie dédiée à la conception optique, nous sommes partis du principe de Fermat pour construire la fonction d'aberration pour les systèmes sur l'axe d'abord, hors-axe ensuite. En présentant la NAT, nous avons pu détailler les expressions et les caractéristiques des aberrations généralisées. Il y a trois grands résultats à garder en tête à propos de la NAT :

- La fonction d'aberration reste la somme des contributions de chaque dioptrie au 3<sup>e</sup> ordre.
- Les coefficients d'aberration se calculent de la même façon sur l'axe qu'en hors-axe.
- Il n'y a pas de nouvelle aberration, seulement une généralisation de leur dépendance en champ.

A partir de ces résultats, de nombreuses conséquences peuvent être tirées sur la manière de corriger des systèmes asymétriques. L'optique *freeform* est un moyen particulièrement adapté à ce but. Cependant, il existe de nombreuses façons de décrire les surfaces *freeform*, ainsi que de les utiliser pour obtenir un système optique optimal. D'abord, la sélection du point de départ est une clef majeure pour obtenir un bon résultat, ensuite, les méthodes d'optimisation doivent être précises et évaluées afin d'éviter de surcharger le système de variables qui se révèlent finalement inutiles. Enfin, si l'optique *freeform* est un outil très

puissant pour résoudre de façon novatrice des problèmes optiques difficiles, il existe tout de même des limites à l'usage de ce type de surfaces.

Si nous avons présenté ici les aspects théoriques, et repris l'état de l'art en optique, dans les chapitres suivants, nous abordons les apports de cette thèse à l'optique *freeform*, dans le cadre des systèmes visuels. Nous présenterons donc des systèmes réalisés pendant la thèse. Et pour compenser certaines limites de l'optique *freeform*, nous étudions l'apport des microécrans courbés à ces systèmes optiques. Le chapitre suivant détaille les apports de la courbure aux systèmes visuels et à l'optique *freeform*, tandis que le chapitre 4 présente les aspects techniques de la mise en courbure de ces microécrans. Finalement, le chapitre 5 présente les systèmes conçus pour les mettre en œuvre.



# 3 APPORTS DE LA COURBURE AUX SYSTEMES VISUELS ET HORS-AXE

---

Ce troisième chapitre vise à démontrer les apports de la courbure aux systèmes optiques visuels, ainsi qu'aux systèmes hors-axe. Il s'agit d'une compréhension théorique des apports de la courbure, qui seront ensuite confrontés lors du chapitre 5 aux résultats expérimentaux obtenus. Comme ces deux aspects sont indépendants, on peut les traiter séparément pour mieux les comprendre. Je suis parti du travail de Christophe Gaschet sur les capteurs courbes pour les élargir au cas des microécrans courbes. Si certaines réflexions sont directement liées à l'étude des systèmes visuels, elles ne sont pas spécifiques à ce cas, et peuvent être reprises dans le cas des capteurs.

## 3.1 ETAT DE L'ART SUR LA COURBURE EN OPTIQUE

### 3.1.1 Analyse paraxiale

Dans sa thèse, C. Gaschet introduit la notion de courbure et en déduit les diverses formes de surfaces images en revenant à une analyse paraxiale des systèmes optiques [54]. Il s'agit de calculer la conjugaison d'une sphère par les équations paraxiales. Selon le principe de retour inverse de la lumière, les analyses faites en travaillant à partir de la surface objet ou de la surface image sont identiques.

Lorsque la surface objet est plane, tous les points se trouvent, en première approximation, en une situation de conjugaison identique, puisqu'ils sont à une même distance du point focal objet. C'est pourquoi l'image reste plane. Lorsque l'objet est courbe, chaque point objet ne se situe plus à la même distance du point focal objet, donc la conjugaison varie pour chaque point objet et l'image paraxiale est courbe. Trois paramètres influencent la variation de conjugaison entre les points de l'objet courbe : les focales objet et image ( $f$  et  $f'$ ), la distance objet et le rayon de courbure de l'objet. A noter que le rayon infini est une surface plane.

Par le calcul, C. Gaschet a ainsi démontré que, selon les valeurs de ces trois paramètres, la forme de la surface image varie entre ellipsoïde, sphère, parabolôïde et hyperboloïde.

Pour illustrer, je présente le cas le plus complexe : la forme hyperbolique. Celle-ci apparaît lorsque la sphère objet ne se situe pas entièrement du même côté du point focal objet. Les deux points situés au niveau du plan focal (a et b, Figure 3.1) sont conjugués à l'infini, la portion située à gauche du plan focal forme une image réelle, et la portion située à droite forme une image virtuelle, comme l'illustre la Figure 3.1.



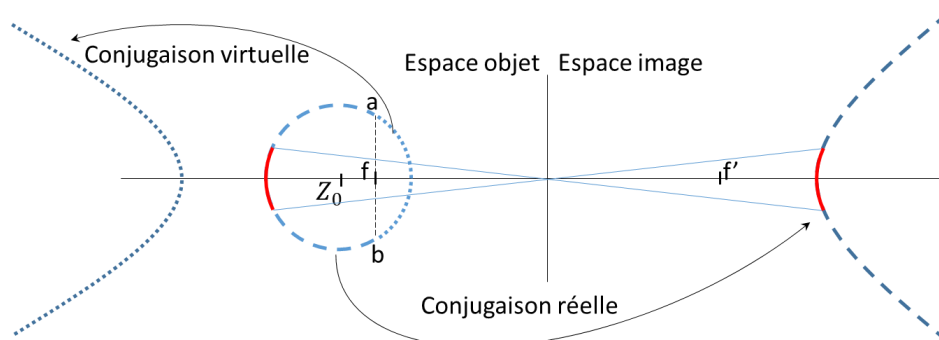


Figure 3.1 – Conjugaison de diverses portions d'un objet courbe, lorsque la distance entre  $Z_0$  (position du centre de l'objet) et le point focal objet  $f$  est inférieure au rayon  $R$ . L'image est hyperbolique : une portion d'image réelle, une autre virtuelle. Les points  $a$  et  $b$  situés au foyer, sont à l'infini.

Cette analyse paraxiale met en lumière deux points importants :

- Le rayon de courbure (au centre) de la surface image est égal à celui de la surface objet,
- La courbure de l'image est dans le même sens que la courbure de l'objet.

Ces résultats permettent dans un premier temps d'avoir une approche paraxiale, et donc simple, de l'apport de la courbure. Mais cette approche doit être complétée par l'étude de l'évolution de la courbure avec les aberrations, ainsi que par les divers paramètres du système.

### 3.1.2 Courbure de meilleur foyer

En revenant à la notion de qualité image, abordée au chapitre 2, on peut comprendre que la position optimale de chaque pixel du microécran est celle qui minimise la taille du spot diagram, c'est-à-dire le point de meilleure focalisation pour ce point du champ. L'ensemble des positions optimales de chaque pixel forme la courbure optimale, qui constitue alors le meilleur foyer. Ainsi, on comprend que l'étude paraxiale doit être complétée par l'analyse des aberrations du système optique étudié.

#### 3.1.2.1 Courbure de champ uniquement

Contrairement à ce que pourrait laisser penser l'analyse paraxiale, il est possible d'avoir un objet courbé et une image plane. Un exemple permet de comprendre ce lien, dû à l'aberration de courbure de champ, plutôt qu'à la conjugaison. Il existe un système optique qui ne possède que de la courbure de champ (autres aberrations négligeables) : la lentille monocentrique. Il s'agit d'une sphère de verre, avec le diaphragme au centre. La symétrie annule les aberrations du troisième ordre, sauf l'aberration sphérique, la courbure de champ, et l'aberration chromatique axiale. En monochromatique et à ouverture faible, la seule aberration qui ne soit pas négligeable est alors la courbure de champ.

Lorsque le microécran est courbé avec un rayon égal au chemin optique entre le microécran et le centre de la lentille monocentrique, la portion du système contrôlant la réfraction est alors identique pour chaque champ, à la déformation de la pupille près (lorsque le champ augmente, le diaphragme circulaire tend vers une ellipse aplatie). Quoiqu'il en soit, les rayons principaux de chaque champ peuvent alors être considérés comme l'axe optique, donc la distance de focalisation est constante pour tous les champs. Dit autrement : si la focalisation est bonne au centre, il faut avoir la même pour tous les champs, c'est-à-dire placer tous les points du champ sur une sphère.

La Figure 3.2 permet de visualiser la notion de courbure liée à la courbure de champ, mais ce n'est pas un système utilisable comme oculaire, puisqu'on ne peut pas placer son œil de sorte à voir tous les champs

en même temps. Pour cela, il faudrait placer son œil sur la pupille, qui est ici inaccessible physiquement. C'est la notion de EB (Eye Box) qui empêche son utilisation comme oculaire.

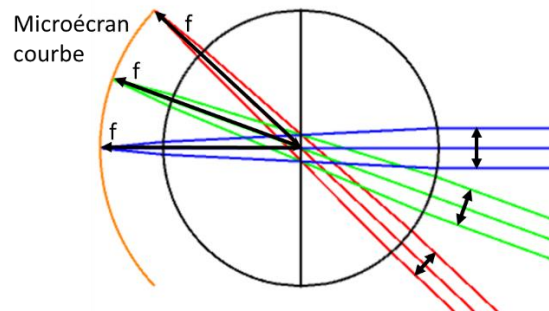


Figure 3.2 – Lentille monocentrique envoyant l'image d'un microécran à l'infini. Chaque champ est comme le champ central. Les flèches à droite marquent la diminution de l'ouverture avec le champ.

Lorsqu'il n'y a que de la courbure de champ, on parle alors plutôt de courbure de Petzval, qui est la meilleure surface de focalisation dans ce cas. La démonstration de la formule de la courbure de Petzval permet de visualiser la façon dont la courbure est obtenue. On suppose donc que la fonction d'aberration ne possède qu'une seule aberration : la courbure de champ. Le but est de calculer la défocalisation pour chaque point du champ tel que la fonction d'aberration s'annule. L'équation 3.1 est la fonction d'aberration contenant ces deux termes uniquement (notation du chapitre 2) :

$$W = W_{220} y'^2 (x_p^2 + y_p^2) + n' \frac{E_z R_p^2}{2 R^2} (x_p^2 + y_p^2) \quad 3.1$$

En annulant cette fonction, on en déduit la valeur de la défocalisation en fonction du champ. De cette expression, on remarque qu'elle correspond à l'approximation parabolique d'une sphère :

$$E_z = -2 \frac{R^2 W_{220}}{n' R_p^2 Y_{max}'^2} Y'^2 = \frac{1}{2} C Y'^2. \quad 3.2$$

En considérant  $C$ , la courbure de Petzval :

$$C = -\frac{4R^2}{n' R_p^2 Y_{max}'^2} W_{220} \quad 3.3$$

En introduisant l'invariant de Lagrange, écrit sous sa forme habituelle, et ensuite avec le lien entre les notations usuelles et celles utilisées précédemment, comme indiqué à la Figure 3.3, on trouve la forme connue de la courbure de Petzval :

$$H = n' \alpha' Y'_{max} = n' \frac{R_p}{R} Y'_{max} \quad 3.4$$

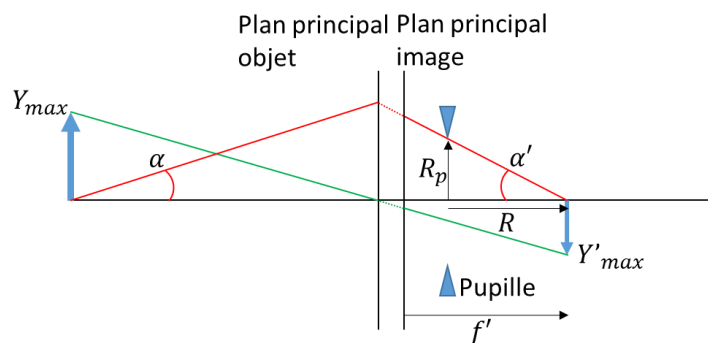


Figure 3.3 – Définition des paramètres pour l'invariant de Lagrange.

$$C_{petzval} = -\frac{4 n'}{H^2} W_{220} \quad 3.5$$

Pour obtenir la contribution de chaque dioptre à la courbure de Petzval, on utilise directement la somme de Seidel  $S_{IV}$ , ce qui donne [58] :

$$P = \sum \frac{1}{R_i} \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} n_i} = -\frac{C_{petzval}}{n} \quad 3.6$$

Le point important de ces développements est que la courbure de champ n'est pas une aberration qui dégrade la qualité image, mais une aberration qui déplace la position optimale de chaque pixel par un défocus : le meilleur foyer ne possède pas d'aberration.

Ainsi, on voit que pour corriger la courbure de champ, le plus simple consiste à courber la surface focale selon la courbure de meilleure foyer. C'était déjà la conclusion de J. Petzval lorsqu'il a découvert cette courbure. Depuis, ces travaux ont été utilisés à de nombreuses reprises, en particulier pour de la photographie de paysages, avec des objectifs utilisant des capteurs courbes. La Figure 3.4 présente quelques exemples historiques.

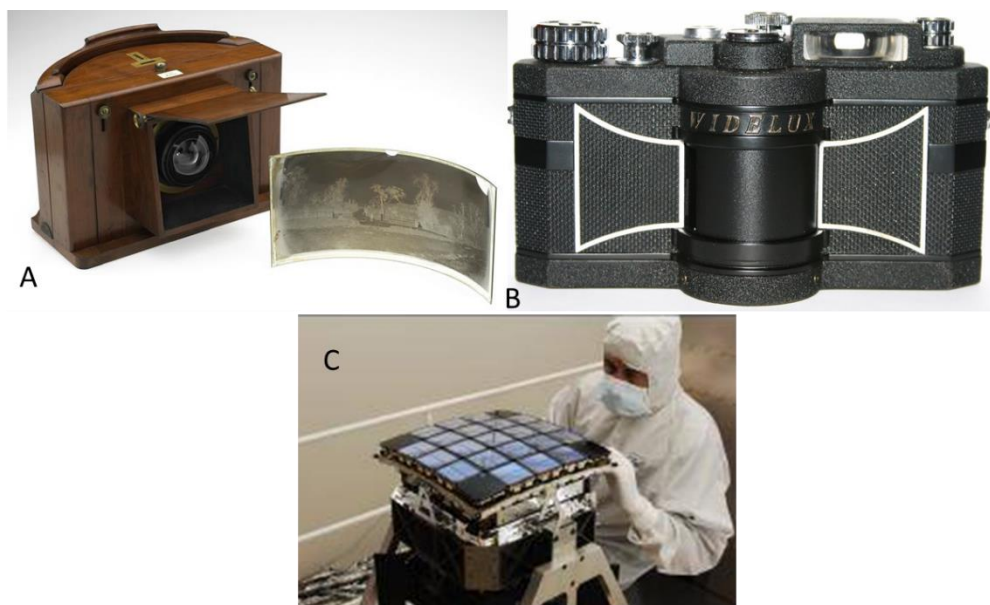


Figure 3.4 – Systèmes optiques avec capteur courbe. A : appareil photo à objectif monoculaire et plaque photographique cylindrique, 1861 [89]. B : Videlux F7 de Panon, l'objectif rotatif expose le film courbé en cylindrique par partie [90]. C : capteur du télescope Kepler : 42 CCD plans répartis sur une cale courbe [91].

### 3.1.2.2 Courbure, champ et astigmatisme

En présence uniquement d'astigmatisme, on introduit deux foyers spécifiques : le sagittal et le tangentiel. Le meilleur foyer, c'est celui pour lequel la taille du *spot diagram*, mesurée en écart RMS (*Root Mean Square*, ou écart des moindres carrés) est minimale. Dans le cas de l'astigmatisme, le meilleur foyer est le cercle de moindre confusion, et il est à mi-chemin entre les foyers sagittal et tangentiel. La démonstration se fait de façon similaire à celle de la courbure de Petzval.

Lorsque le système a de la courbure de champ et de l'astigmatisme, on obtient avec la même méthode de calcul un compromis quant à la position du meilleur foyer. En effet, si la courbure de champ ne fait que déplacer la position du meilleur foyer, l'astigmatisme dégrade la qualité image, déplaçant alors aussi le meilleur foyer. Ainsi, la meilleure courbure n'est plus celle de Petzval, mais une combinaison de l'astigmatisme et de la courbure de champ, donné par l'équation 3.7 :

$$C_{meilleurFoyer} = -\frac{4n \left( W_{220} + \frac{1}{2} W_{222} \right)}{H^2} \quad 3.7$$

Ainsi, pour corriger ces aberrations sans courber la surface focale, on a deux solutions :

- Annuler  $W_{220}$  et  $W_{222}$  simultanément.
- Obtenir que  $W_{220} = -1/2 W_{222}$

Mais ces deux solutions imposent des contraintes fortes sur le système : la première n'est pas facile à obtenir, c'est même toute la difficulté du calcul optique ; la seconde nécessite de garder relativement faibles les coefficients d'aberrations, sous peine d'avoir un astigmatisme dégradant trop la qualité image.

Ainsi, avoir la possibilité de courber le plan focal permet d'éviter de chercher à annuler la courbure de meilleur foyer, et ainsi diminuer les contraintes sur le système optique.

### 3.1.2.3 Evolution de la courbure de meilleur foyer

C. Gaschet a poursuivi l'analyse de la courbure de meilleur foyer en étudiant sa dépendance à la distance objet. Il a réalisé l'étude théorique d'une lentille simple avec la pupille située sur le premier dioptré pour en déduire l'expression de la courbure de meilleur foyer, en fonction de la position de l'objet. Son objectif est de déterminer les conditions pour faire varier la position de l'objet sans modifier la courbure de la surface image [54].

Il a déterminé que la forme de la courbure varie selon un polynôme d'ordre 2, en fonction de l'angle nommé  $\alpha$  sur la Figure 3.3, directement lié à la distance à l'objet. Les coefficients de ce polynôme sont fonction de l'épaisseur de la lentille, des courbures des deux dioptrés, des indices optiques, ainsi que de la hauteur d'incidence du rayon marginal sur le premier dioptré.

La conclusion est qu'il existe des conditions pour lesquelles la courbure varie moins fortement en fonction de la distance à l'objet, mais que pour obtenir un système optique avec peu d'évolution de la courbure, il est préférable de complexifier le système en ajoutant des lentilles.

### 3.1.3 Gain en compacité

Pour étudier la compacité en fonction de la courbure, Gaschet a étudié l'épaisseur d'un système à deux lentilles, en fonction de la courbure de Petzval. En partant de l'équation de Gullstrand :

$$V = V_1 + V_2 - dV_1V_2 \quad 3.8$$

Avec  $V_1$  la vergence de la première lentille, et  $V_2$  celle de la seconde. L'écart entre les deux lentilles est noté  $d$ . Or, en utilisant l'équation 3.6, on voit que la vergence, et donc la focale, d'une lentille est directement reliée à la courbure de Petzval, et la vergence totale est la somme des contributions de Petzval. En combinant les deux, on obtient l'expression de l'écart  $d$  entre les deux lentilles, en fonction des contributions de Petzval :

$$d = \frac{nP - V}{n^2P_1P_2} \quad 3.9$$

En ajoutant la valeur de la BFL (*Back Focal Distance*, ou tirage) du système, c'est-à-dire distance entre le dernier dioptré et le capteur, on obtient l'épaisseur totale (*Total Track*, TT) du système à deux lentilles :

$$TT = \frac{nP - V}{n^2P_1P_2} + \frac{V - nP_1}{nP_2V} \quad 3.10$$

La droite rouge montre les valeurs  $P_1 = -P_2$  sur la Figure 3.5 : ce sont les seules possibles lorsque la courbure n'est pas autorisée. Parmi ces combinaisons, l'épaisseur totale varie comme indiqué par la couleur.

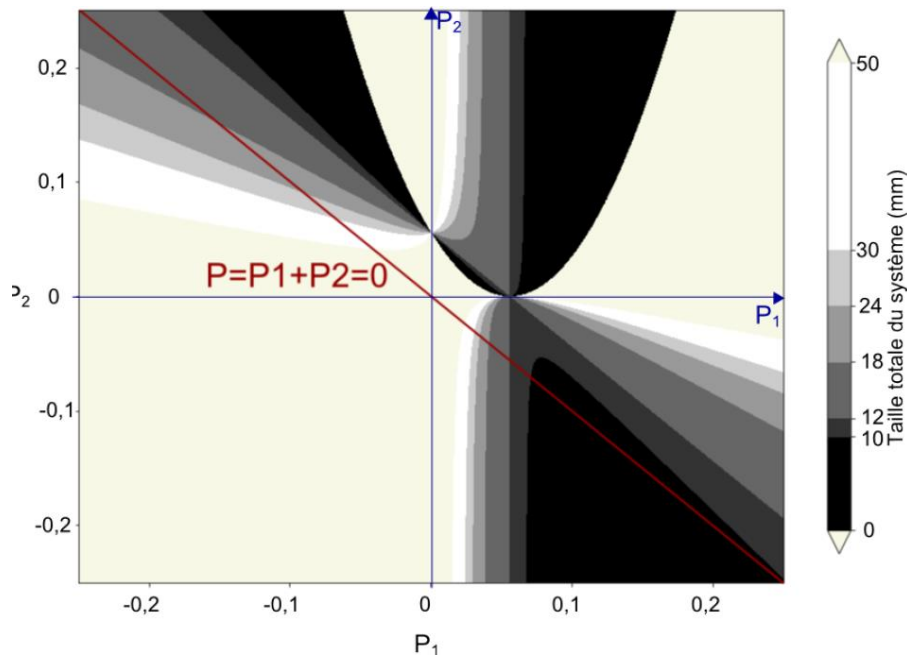


Figure 3.5 – Distribution de la distance totale du système (en couleur), en fonction des puissances des deux lentilles, pour une focale de 12 mm et un indice optique de  $n = 1.5$  pour les deux lentilles. Issu de [54].

La courbure permet de s'affranchir de cette limite en autorisant une courbure totale  $P$  non nulle, et libère alors d'autres combinaisons de lentilles pour une même épaisseur totale. Certaines combinaisons donnent des systèmes compacts avec une bonne qualité image, inaccessible sans la courbure.

Dans le cadre de cette thèse, les systèmes n'ont pas été recherchés en utilisant ce genre de graphes, puisque l'ajout d'éléments ou l'aspect hors-axe rendrait ces études trop complexes. En revanche, on perçoit concrètement comment la courbure peut améliorer un système optique par rapport à la compacité.

Maintenant que le cœur de l'état de l'art a été présenté, je m'intéresse à son utilisation dans le cas particulier de cette thèse : les systèmes visuels.

## 3.2 APPORTS DE LA COURBURE AUX SYSTEMES VISUELS

Le cadre de cette thèse n'est pas le même que celle de C. Gaschet, en particulier, je ne cherche pas à étudier la courbure en fonction de la position de l'objet, mais la courbure optimale du microécran pour obtenir une image virtuelle fixe, perçue par l'utilisateur. Dans ce cadre, je détaille les apports de la courbure que j'ai étudiés pour les systèmes visuels, même si certains s'étendent au-delà.

### 3.2.1 Eye Relief et lentille monocentrique

Comme je l'ai présenté dans le chapitre 1, les systèmes visuels ont pour caractéristique, contrairement aux systèmes capteur d'image, de devoir gérer la conjugaison image sans pouvoir décider de la position de la pupille. L'image du microécran doit être virtuelle, et la pupille de sortie doit être physiquement accessible par l'œil.

La présence du ER (*Eye Relief*) dans les systèmes visuels rend impossible l'usage de la lentille monocentrique, présentée au 3.1.2.1. Ce qui caractérise la lentille monocentrique est la présence d'une forte symétrie autour de la pupille du système. Or, pour un système visuel, une telle symétrie avec une

seule lentille rend la pupille de sortie physiquement inaccessible. L'exemple de la lentille simple donné au 1.3.2.1 illustre cette idée.

Le choix d'un point de départ pour un système visuel est un point qui a été discuté depuis longtemps, en particulier dans le domaine de la conception d'oculaires, pour l'astronomie ou la microscopie par exemple. Il en existe une grande diversité, aux caractéristiques très diverses. Le triplet de Hastings (Figure 3.6) est souvent appelé « monocentrique », mais il ne s'agit pas d'un système symétrique par rapport à la pupille.

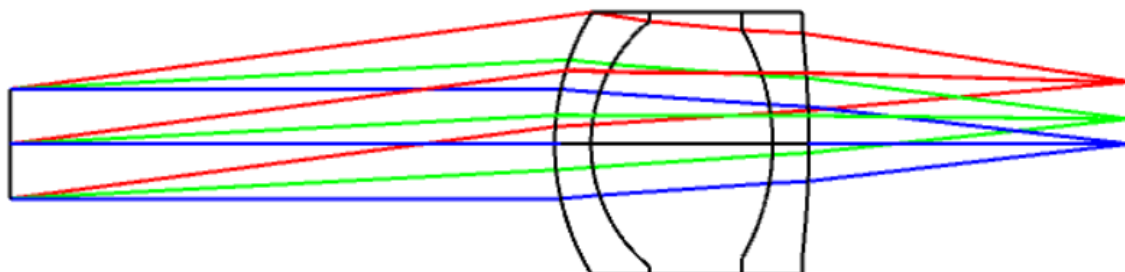


Figure 3.6 – Oculaire « triplet de Hasting », parfois nommé « oculaire monocentrique ».

L'importance de l'absence de symétrie peut être interprétée par la notion de décalage de pupille (*pupil shift*, relations entre aberrations lors d'un décalage de pupille, à ouverture constante) présentée au 2.1.2.3. La coma, l'astigmatisme et la distorsion peuvent augmenter lorsque la pupille est éloignée du système ; la courbure de champ reste constante. Et ces augmentations compliquent l'analyse de la courbure.

### 3.2.2 Courbure et champ de vue

#### 3.2.2.1 Courbure de point de départ

Un premier point important entre la courbure et le champ de vue, est l'importance de visualiser une image courbe. Comme nous l'avons décrit au chapitre 1, l'accommodation est un processus lent, et une image virtuelle plane a, par définition, une distance à l'œil différente entre deux champs. Si celui-ci est assez grand par rapport à la distance de projection, l'œil doit accommoder selon le champ observé. Une solution efficace pour éviter le problème est d'envoyer l'image à l'infini. Lorsque ce n'est pas ce que l'on souhaite, une solution consiste à courber l'image virtuelle, avec un rayon de courbure égal à la distance de projection.

Or, comme nous l'avons vu dans la partie précédente, au premier ordre, l'image virtuelle courbe est directement liée à un objet courbe. Comme on connaît la courbure de l'image virtuelle, on peut calculer avec les équations paraxiales la courbure du microécran associée au premier ordre. Et on a indiqué au 3.1.1 que le rayon de la surface objet est égal à celui de la surface image dans l'approximation paraxiale.

Ainsi, plus la distance de projection est faible, plus la courbure est forte, comme le montre la Figure 3.7.

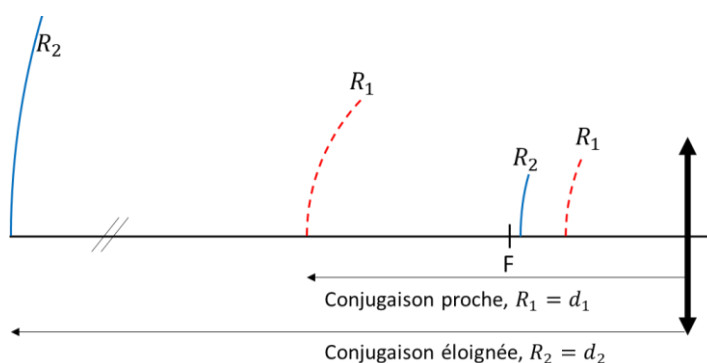


Figure 3.7 – Deux conjugaisons pour deux positions de l'image virtuelle, ce qui fixe les rayons de courbure.

En conclusion, avoir une image virtuelle courbe permet d'adapter le système au fonctionnement de l'œil, ce qui fixe la courbure paraxiale du microécran. C'est la courbure du point de départ.

### 3.2.2.2 Augmentation du champ de vue

Lorsque l'on conçoit un système optique avec un microécran courbe, il existe un autre phénomène qui doit être pris en compte : l'image virtuelle courbe induit une modification de la définition du champ de vue, comme illustré à la Figure 3.8.

Cet effet est aussi un argument utilisé pour les télévisions courbes : pour une même télévision, le champ de vue paraît plus grand. Si on peut s'interroger sur ce qu'un observateur décalé du centre de courbure verrait avec une télévision courbe, pour une image virtuelle, il n'y a qu'un seul observateur, donc cette question ne se pose pas.

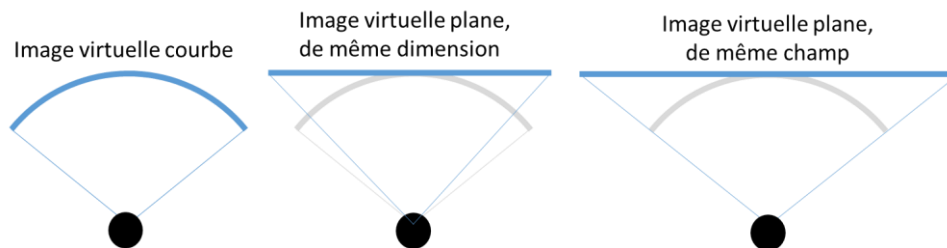


Figure 3.8 – Modification du champ de vue sous l'influence de la courbure de l'image virtuelle.

Cet effet avait déjà été abordé par C. Gaschet dans sa thèse [54]. Je le reprends ici pour quantifier l'augmentation de champ de vue. Prenons un système optique avec un microécran plan, en conjugaison foyer-infini. Le but est de quantifier la différence de dimension du microécran, pour avoir le même champ avec un microécran courbe, en fonction du rayon de courbure, selon la Figure 3.9.

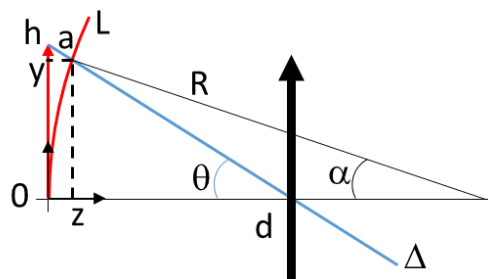


Figure 3.9 – Longueur d'arc donnant le même champ, en fonction de la courbure.  $L$  est la longueur d'arc formée par le microécran, variant avec le rayon de courbure  $R$ .  $h$  est la hauteur de référence du microécran plan, à laquelle compare  $L$ . Le point  $a$  est l'intersection entre la droite  $\Delta$  et le microécran courbe.

Le champ de vue est donné par l'angle  $\theta$ . La position du pixel extrémal sur le microécran courbe est donnée par le point  $a$ , à l'intersection entre la droite  $\Delta$  et la surface courbe. Pour déterminer la longueur d'arc  $L$ , on utilise la formule du périmètre :

$$L = \alpha R = \arcsin\left(\frac{y}{R}\right) R \quad 3.11$$

Il suffit donc de déterminer la coordonnée  $y$  du point  $a$  pour obtenir la formule explicite de  $L$ .

$$\text{Equation de } \Delta \quad y = -\frac{h}{d}z + h \quad 3.12$$



Equation du microécran courbe

$$y^2 + (z - R)^2 = R^2$$

3.13

En injectant 3.12 dans 3.13, on détermine la valeur explicite de  $y$ , en fonction des paramètres du problème. Je ne m'intéresse qu'au cas où le cercle formé par le microécran courbe est assez grand pour avoir deux intersections avec la droite  $\Delta$ , je ne garde que celle qui est physiquement représentative. Le cas sans solution réelle n'est pas considéré.

$$y_d(R) = \frac{h}{d^2 + h^2} \left( d^2 - Rd + \sqrt{d(dR^2 + 2Rh^2 - dh^2)} \right) \tag{3.14}$$

La variable principale de cette équation est le rayon de courbure du microécran. Puis, on utilise comme paramètre la distance entre le microécran et le système optique, pour visualiser la façon dont cela influence le résultat. Par ailleurs, j'utilise les dimensions du microécran *Izumi* (12.1 x 9.7 mm<sup>2</sup>) pour caractériser la dimension initiale du microécran,  $h$ . Ce n'est pas manquer de généralité que de fixer la valeur de  $h$ , car c'est en réalité le rapport  $h/d$  qui permet de visualiser l'influence du paramètre  $d$ . Ces valeurs ont donc été choisies pour être des multiples de  $h$ . Ces équation sont tracées et présentées à la Figure 3.10.

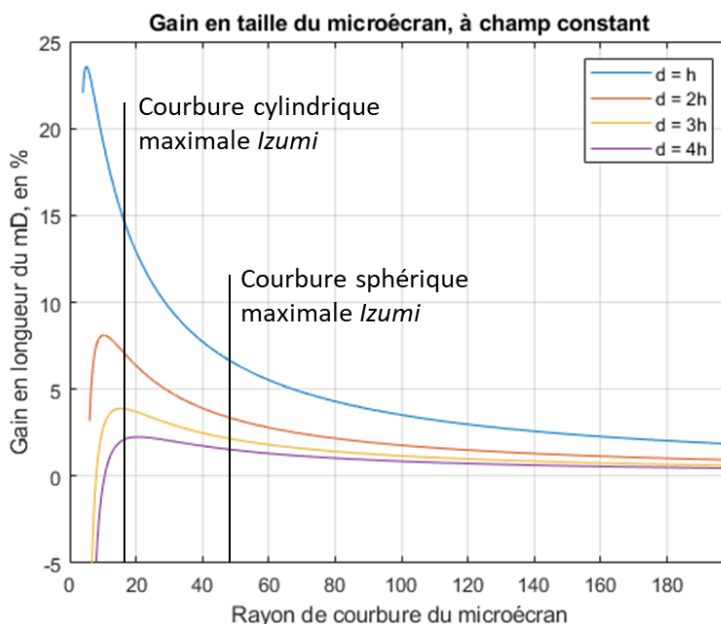


Figure 3.10 – Gain en taille du microécran, à champ constant, pour différentes distances entre le microécran et le système optique. Le trait noir indique la courbure maximale pour le microécran *Izumi*.

Ces courbes donnent plusieurs informations importantes. La première est la position du maximum, qui est liée à des courbures très agressives : 5,2 mm pour le cas  $d = h$  ; 20,4 mm pour le cas  $d = 4h$ . Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, mécaniquement ces courbures sont impossibles à atteindre en sphérique avec notre procédé de courbure. En réalité, les gains potentiels en champ de vue pour une courbure sphérique sont de l'ordre de 2 à 7 %.

Au-delà de ces chiffres, augmenter le champ de vue est certes souhaitable dans les systèmes de RA, mais cette technique ne permet pas de s'affranchir du compromis champ de vue / résolution (voir annexe 2), puisqu'elle ne change pas le nombre de pixels. L'intérêt n'est pas donc pas là.

L'intérêt de cette propriété est plutôt qu'à partir d'un certain microécran, la courbure permet d'ajuster finement le champ de vue (2 à 7 %) sans toucher à la focale.

A noter que tout ce qu'on a dit précédemment ne fonctionne que lorsque la courbure est concave. Si elle est convexe, le phénomène inverse se produit : le champ de vue diminue.

### 3.2.3 Gain en flux lumineux

#### 3.2.3.1 Source des pertes lumineuses

Dans cette partie, nous nous concentrons sur les pertes lumineuses dans les systèmes optiques, qui dégradent le contraste de l'image virtuelle. Tous les systèmes ont des pertes lumineuses, mais on n'étudie ici que les systèmes visuels.

Les sources des pertes lumineuses dans les systèmes visuels sont principalement :

- Pertes par diffusion,
- Pertes par absorption dans le matériau,
- Pertes aux interfaces,
- Présence de la EB,
- Couplage entre les diaphragmes de champ et d'ouverture et le microécran.

Les trois premières sources de perte sont communes à tous les systèmes optiques. Les pertes par absorption ou diffusion sont négligeables pour les systèmes imageurs.

L'outil le plus souvent utilisé pour décrire la luminosité d'un système optiques est l'ouverture (*f-number*, *F/#*). Ce paramètre ne prend pas en compte ces pertes et ne décrit donc pas la luminosité réelle du système. Plus le système est ouvert, plus les aberrations sont importantes, ce qui nécessite de le complexifier pour maintenir une qualité image satisfaisante. Mais en ajoutant des dioptries, on diminue la transmittance. En conséquence, il existe des cas où un système ouvert à  $F/1$  est finalement moins lumineux qu'un système ouvert à  $F/2$ . Ainsi, pour juguler les pertes par réflexion et réfraction, on peut soit ajouter des anti-reflets sur les dioptries ou diminuer le nombre de dioptrie. Un exemple est présenté au chapitre 5, partie 5.2.2.

Les pertes lumineuses liées à la EB (*Eye Box*) sont caractéristiques des systèmes visuels. La EB permet de regarder l'image virtuelle sans difficulté à aligner son œil avec le système. Par construction, la pupille de l'utilisateur est plus petite que la pupille du système. Autrement dit, une partie de la lumière du microécran ne permet pas à l'utilisateur de voir l'image, mais éclaire simplement son visage. Il y a donc un compromis entre la taille de la EB et la luminance de l'image.

La perte lumineuse due au couplage entre le microécran et les diaphragmes existe aussi pour les systèmes capteurs d'image. L'analyse proposée ici s'applique indifféremment aux systèmes avec capteurs ou avec microécran.

Pour quantifier le Gain en Flux Lumineux (GFL) obtenu par la courbure, je commence par en étudier l'impact au niveau d'un pixel, puis je calcule le gain à l'échelle de tout le microécran. Ce que j'étudie dans cette partie, c'est le couplage entre les pixels et la pupille d'entrée, nommée  $P_{mD}$ , pour pupille côté microdisplay., en supposant qu'il n'y a pas de vignettage.

Dans le chapitre 1, j'ai présenté la notion de cône d'émission, qui est au cœur des gains en flux lumineux par la courbure. La courbure ne modifie pas, *a priori*, le cône d'émission du microécran, mais elle a deux actions complémentaires qui peuvent augmenter la quantité de flux reçue par  $P_{mD}$  depuis le microécran :

- La surface apparente de la pupille du microécran ( $P_{mD}$ ) augmente du point de vue d'un pixel dans le champ,
- Une portion plus énergétique du flux lumineux est sélectionnée par la pupille.

J'étudie le premier point en supposant un microécran lambertien, ce qui permet de ne se concentrer que sur les calculs radiométriques liés à la surface apparente. Puis, j'étudie le cas d'un microécran non lambertien.

### 3.2.3.2 Augmentation de l'étendue géométrique

En radiométrie, la notion d'étendue géométrique permet de caractériser la quantité de flux émit d'une surface atteignant une autre surface. Ici, la surface émettrice est un pixel, la surface réceptrice est  $P_{mD}$ . Les deux paramètres influençant la surface apparente sont la distance entre les deux surfaces, et l'angle relatif entre les deux surfaces. Comme la Figure 3.11 permet de le visualiser avec la flèche, notée  $fl$ , la courbure permet d'une part de rapprocher le pixel de  $P_{mD}$  ( $d < D$ ) et d'autre part de réduire l'angle - entre les rayons et la normale au pixel.

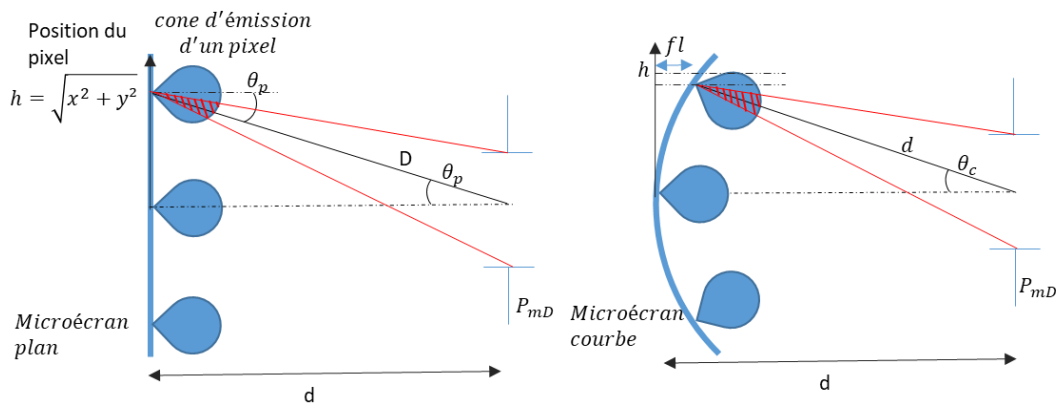


Figure 3.11 – Relation entre microécran et pupille d'entrée, dans le cas plan (gauche) et dans le cas courbe (droite). Les deux pixels sont représentés par leur indicatrices lumineuses, appelé cône d'émission. Ils représentent le même point du champ, donc la distance en arc est conservée.

A partir des méthodes usuelles de radiométrie, on peut calculer le flux émis par un pixel du champ, dans les cas plan et courbe. Ce calcul est fait avec l'hypothèse que le F/# du système est élevé (faible ouverture). Dans le cas plan, on a le résultat classique de la loi en cosinus puissance quatre :

$$F_p \left( \sqrt{x^2 + y^2} \right) \propto F_p(\theta) = L(\theta) \frac{S_{pix} \cos(\theta_p) \cdot S_{pup} \cos(\theta_p)}{\left( \frac{d}{\cos(\theta_p)} \right)^2} = L(\theta) \frac{S_{pix} S_{pup}}{d^2} \cos^4(\theta_p) \quad 3.15$$

Avec  $F_p$  le flux émit par un pixel issu d'un microécran plan,  $L(\theta)$  la luminance,  $S_{pix}$  la surface du pixel,  $S_{pup}$  la surface de la pupille et  $d$  la distance entre le pixel et la pupille d'entrée.

Dans le cas courbe, avec une courbure sphérique centrée sur la pupille d'entrée, les pixels sont orthogonaux à leur émission, donc la surface apparente est la surface du pixel elle-même. De plus, comme l'ouverture est faible et que le pixel est orienté vers la pupille, c'est la luminance centrale qui est sélectionnée, donc  $L(\theta) = L_0$ . Ainsi, le flux reçu par la pupille depuis le même pixel après courbure vaut :

$$F_c \left( \sqrt{x^2 + y^2} \right) \propto F_c(\theta) = L_0 \frac{S_{pix} \cdot S_{pup} \cos(\theta_c)}{d^2} \quad 3.16$$

Avec  $F_c$  le flux émit par un pixel issu d'un microécran courbe.

Pour calculer le Gain en Flux Lumineux (GFL), on fait le rapport entre les flux émit par un pixel du microécran plan et courbe, le premier servant de référence. Dans le cas général où on ne considère pas le microécran plan Lambertien :

$$GFL(h) = \frac{F_c}{F_p} = \frac{L_0 \cos(\theta_c)}{L(\theta) \cos^4(\theta_p)} \quad 3.17$$

Avec GFL le Gain en Flux Lumineux. On remarque qu'un microécran lambertien a une luminance constante avec l'angle,  $L(\theta) = L_0$ , ce qui réduit GFL. En première approximation, on peut aussi considérer  $\theta_c$  et  $\theta_p$  comme égaux, ce qui donne une approximation inférieure de GFL :

$$GFL(h) = \frac{1}{\cos^3(h/d)} \quad 3.18$$

Avec l'hypothèse lambertienne et en prenant en compte les angles exacts, on peut tracer les fonctions précédentes en fonction de  $d$ , l'écart entre le pixel et le centre du microécran, c'est la Figure 3.12 :

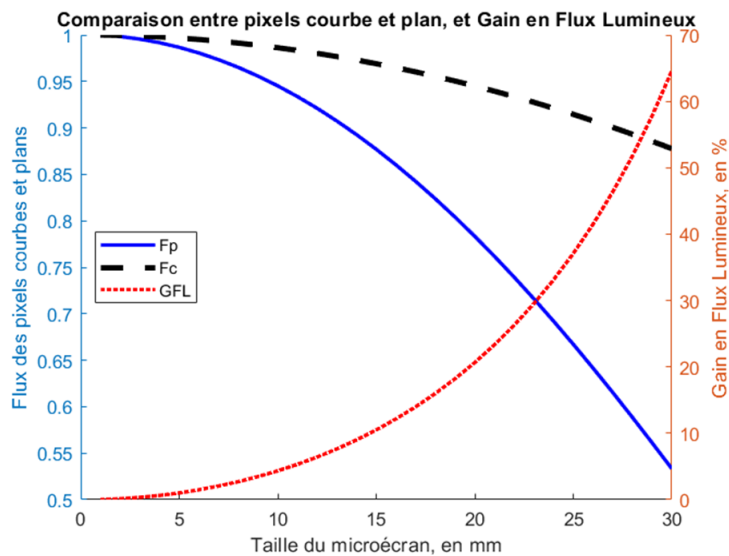


Figure 3.12 – Comparaison des flux reçus par la pupille sur un microécran courbe et plan, en fonction de l'écart entre le pixel considéré et le centre du microécran. Graphique tracé pour  $d = 60$  mm.

Pour les dimensions du microécran Izumi (12.1 x 9.7 mm), les pixels des coins ont un gain de 5 % de flux, et, le pixel central a un GFL nul puisqu'il se comporte de la même façon en plan ou courbé. Pour calculer le gain total en flux lumineux, il faut donc intégrer le gain obtenu par chaque pixel, sur toute la surface.

### 3.2.3.3 Gain en flux lumineux total

Pour étudier le cas général, le microécran n'est plus *a priori* centré sur la pupille, son rayon de courbure peut varier librement.

La courbure du microécran induit une flèche, qui rapproche les pixels de la pupille. Les valeurs typiques des flèches sont faibles par rapport à la distance entre le microécran et la pupille. Par exemple, pour un microécran Izumi avec un rayon de courbure de 60 mm, la flèche mesure au maximum 2,0 mm, or la distance entre le microécran et la pupille est rarement inférieure à plusieurs dizaines de millimètres. Il paraît donc raisonnable de simplifier dans un premier temps ces calculs en la négligeant.



$$F = S_{pup} L \int_{xmin}^{xmax} \int_{ymin}^{ymax} \frac{d}{D^4} \frac{R_c d + x^2 + y^2}{\sqrt{x^2 + y^2 + R_c^2}} dx dy \quad 3.23$$

La valeur du flux F a deux variables principales : la distance d et le rayon de courbure du microécran  $R_c$ .

### 3.2.3.3.1.2 Flèche considérée

Puisque la flèche apparaît au dénominateur, et est mise au carré, ainsi que dans le cosinus, sa faible valeur par rapport à la distance entre le microécran et la pupille pourrait avoir un impact non négligeable. On décide donc de ne pas négliger la flèche dans les calculs suivants pour voir la différence. Dans ce cas, c'est la distance  $D_c$  qui doit être prise en compte plutôt que la distance D.

$$D_c^2 = fl^2 + D^2 - 2dfl \quad 3.24$$

Avec l'expression de la flèche qui est :

$$fl = R_c \left( 1 - \cos \left( A \sin \left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R_c} \right) \right) \right) = -R_c \left( \sqrt{1 - \frac{(x^2 + y^2)^2}{R_c^2}} - 1 \right) \quad 3.25$$

Ainsi que les équivalents des termes 3.22 prenant en compte la flèche :

$$\cos(\theta_1) = \frac{d-fl}{D_c}, \cos(\theta_3) = \frac{R_c-fl}{\sqrt{x^2+y^2+(R_c-fl)^2}}, \sin(\theta_1) = \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{D_c}, \sin(\theta_3) = \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\sqrt{x^2+y^2+(R_c-fl)^2}}$$

On peut reprendre l'équation du flux :

$$F_{px} = \frac{L dS_{px} \cos(\theta_2) dS_{pup} \cos(\theta_1)}{D_c^2} \quad 3.26$$

Et on en déduit le résultat général :

$$F = S_{pup} L \int_{xmin}^{xmax} \int_{ymin}^{ymax} \frac{(d-fl) [(R_c-fl)(d-fl) + x^2 + y^2]}{D_c^4 \sqrt{x^2 + y^2 + (R_c-fl)^2}} dx dy \quad 3.27$$

Pour comparer les deux cas, avec et sans la flèche, on peut tracer les valeurs de flux, en fonction de la distance d, et superposer les deux modèles. Pour chaque abscisse donnant la distance entre la pupille et le microécran, le GFL est calculé pour des rayons de courbure allant de 12 mm à 1 000 mm, et on ne garde que le rayon donnant le meilleur GFL. La Figure 3.14 présente les résultats de ce calcul.

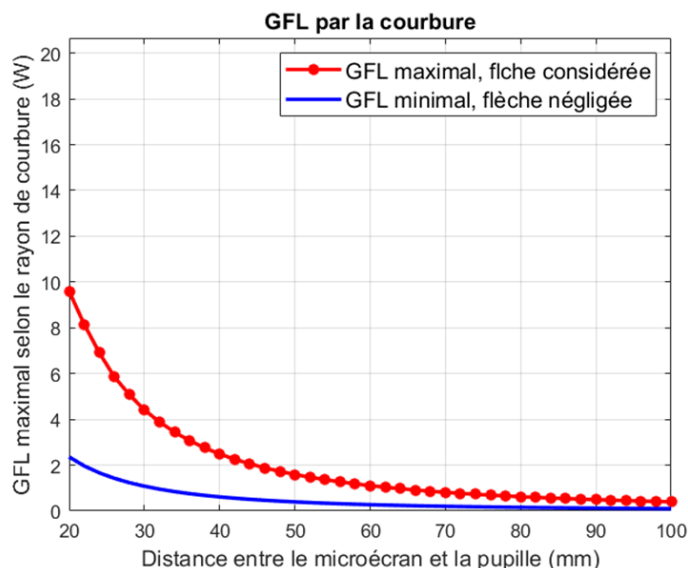


Figure 3.14 – Comparaison des GFL pour le cas où la flèche est négligée, et où elle est prise en compte.

La conclusion que nous pouvons tirer de cette comparaison est que la flèche n'est pas négligeable. Mais dans les deux cas, dès que la distance entre le microécran et la pupille est supérieure à 40 mm, le GFL obtenu en courbant un microécran lambertien est très faible.

Cependant, la Figure 3.14, en affichant les gains maximaux, perd une information : quels sont les rayons de courbure qui conduisent à ces gains ? Pour répondre à cette question, nous commençons par afficher le flux lumineux reçu par la pupille en fonction du rayon de courbure du microécran. La Figure 3.15 montre d'une autre manière que négliger la flèche n'est pas pertinent. Mais elle montre aussi la façon dont le flux reçu varie avec le rayon de courbure.

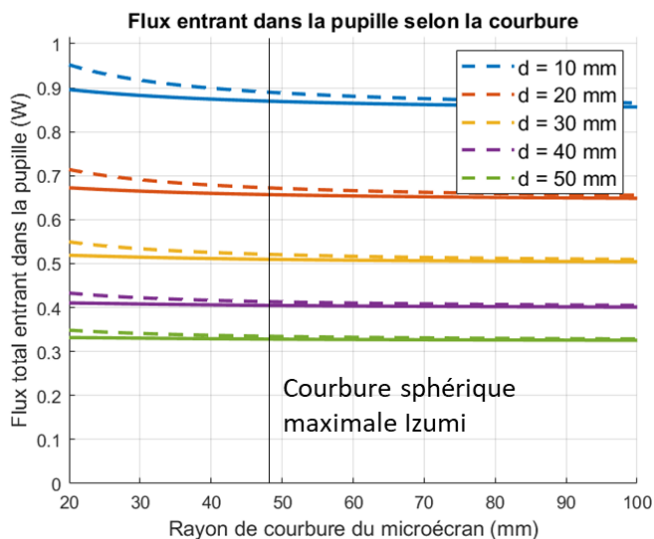


Figure 3.15 – Flux reçu par la pupille en fonction du rayon de courbure, pour différentes distances entre le microécran et la pupille. Lignes pointillées : flèche prise en compte ; lignes pleines : flèche négligée.

Les grands rayons de courbure tendent vers la valeur de flux reçu par la pupille depuis un microécran plan. Plus le microécran est courbe, plus la quantité de flux lumineux transmis à la pupille est importante. On constate, que le maximum de flux transmis pour une distance d peut être obtenu pour des valeurs non réalistes de courbure pour un microécran de cette dimension. Toutefois, ni la Figure 3.14, ni la Figure 3.15 ne donne le rayon de courbure pour lequel le GFL est maximal, c'est donc que ce présente la Figure 3.16.

On remarque en particulier que le fait de prendre en compte la flèche est important car cela change le rayon de courbure optimal du point de vue du flux lumineux.

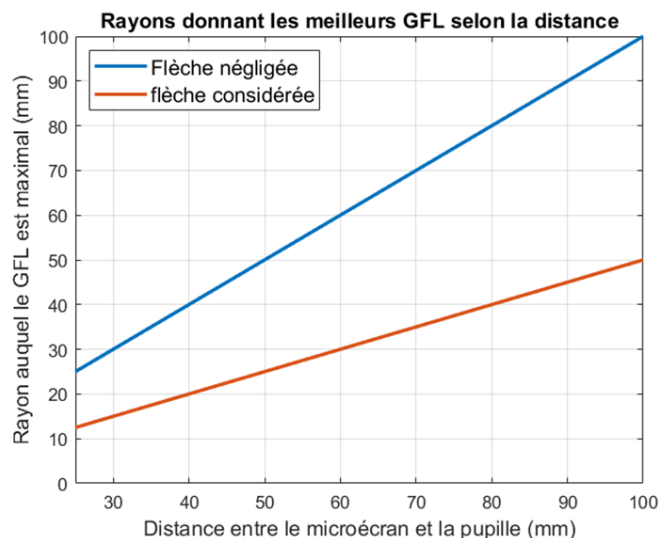


Figure 3.16 – Rayon de courbure donnant GFL maximal en fonction de la distance entre le microécran et la pupille, selon si l'on considère la flèche.

Les Figure 3.15 et Figure 3.16 montrent des valeurs différentes pour le rayon de courbure maximisant les GFL : la première indique que le rayon de courbure doit être égal à la distance entre le microécran et la pupille, la seconde indique que ce rayon doit être la moitié de la même distance. La différence entre les deux est en fait dû à l'impact de la flèche dans le calcul. Non seulement la flèche n'est pas négligeable, mais c'est en fait un élément important du calcul du GFL. Ainsi, pour maximiser le flux lumineux, il est préférable de courber le plus possible, car cela augmente la flèche. Sauf que, comme je le présente au chapitre suivant, il n'est pas possible de courber un microécran à n'importe quelle valeur, il y a des limites mécaniques. Dans le cas du microécran Izumi, le rayon de courbure sphérique maximal est de l'ordre de 47 mm. Je propose donc dans la suite de changer un peu de raisonnement : au lieu de partir des équations radiométriques et de chercher les maxima en faisant varier les paramètres, je cherche la forme idéale du microécran, celle qui maximise les critères en liens avec le flux lumineux

### 3.2.3.3.2 Recherche de la forme idéale du microécran

Jusqu'à présent, dans cette thèse ainsi que dans la littérature, c'est la forme sphérique qui est quasi toujours étudiée. Or, rien ne permet réellement d'affirmer que ce sont les formes sphériques qui sont optimales, ça pourrait être d'autres formes variant avec le carré du champ. En particulier, ce qui a été fait dans les parties immédiatement précédentes partait du principe que les formes seraient sphériques. Le but de cette partie est donc de construire l'équation de la meilleure forme de microécran, sans a priori.

Pour la calculer, nous pouvons chercher d'abord les conditions permettant à une forme d'être candidate au titre de la forme optimale. Physiquement, la courbure doit respecter deux critères :

- Être continue, sans point singulier
- Avoir un cône d'émission émettant perpendiculairement à la surface du pixel.

Par ailleurs, nous devons ajouter un critère favorisant la maximisation du flux tout en minimisant le risque de casse (courbure minimum). On recherche donc la plus petite courbure maximisant le flux entrant dans la pupille.



Les calculs sont présentés dans l'annexe « courbure optimisant le flux lumineux ». J'en ai déduit une équation différentielle régissant la forme optimale, mais je n'ai pas réussi à en extraire la forme explicite.

Maintenant que ces études ont été présentées, on comprend mieux comment la courbure peut apporter un gain en flux lumineux. Toutefois, le GFL obtenu dans le cas d'un microécran lambertien est de quelques pourcents, ce qui est très faible. La suite cherche donc une méthode pour évaluer le GFL dans le cas d'un microécran non lambertien.

### 3.2.3.3.3 Microécran non lambertien

Les écrans destinés à la visualisation directe sont conçus pour être aussi lambertien que possible, de sorte que tous les utilisateurs voient une image identique. En effet, une source lambertienne émet une luminance constante en fonction de la direction, donc, quelle que soit la position de l'observateur, un pixel Lambertien est perçu de façon identique. Pour les microécrans, l'aspect Lambertien est plutôt un défaut, car la pupille d'entrée ne sélectionne qu'une portion du flux émis par le pixel, ce qui implique que la portion non sélectionnée est perdue : il est préférable de ne pas émettre de luminance dans les directions non sélectionnées par la pupille.

Ainsi, la réorientation des pixels en direction de la pupille permet de sélectionner la portion la plus énergétique du cône d'émission des pixels. C'est ce qui est représenté dans la Figure 3.17 par la partie hachurée du diagramme d'émission.

A noter tout de même que l'on part ici du principe qu'à la normale au pixel, l'émission est maximale. S'il existe des exemples où ce n'est pas le cas, c'est une hypothèse raisonnable pour les microécrans, par construction.

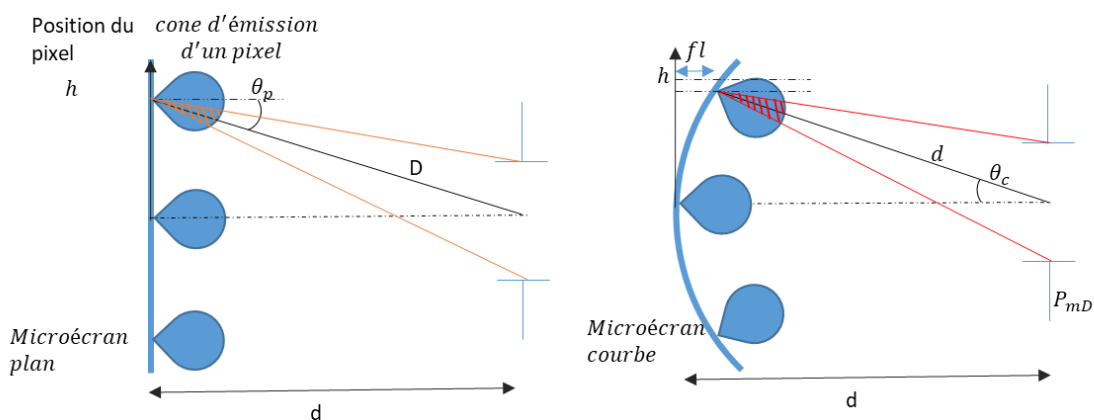


Figure 3.17 – Sélection de la portion la plus énergétique du diagramme d'émission grâce à la courbure.

Une seconde représentation a été utilisée afin de visualiser autrement le même problème. Dans un graphe  $y-\tan(\theta)$  (Figure 3.19), chaque point représente un rayon compris dans le plan représenté d'incidence, qui comprend l'axe optique. Chaque rayon est caractérisé par sa distance  $y$  à l'axe optique et son orientation angulaire par rapport à l'axe optique (pente  $\tan(\theta)$ ). Dans ce graph, on trace les limites qu'impose le diaphragme optique. Au-delà de ces limites, les rayons n'entrent plus dans le système. Cette méthode permet de formaliser l'effet de la courbure sur le Gain en Flux Lumineux. La Figure 3.18 représente les grandeurs géométriques pour un point du champ, qui sont utilisées pour la Figure 3.19.

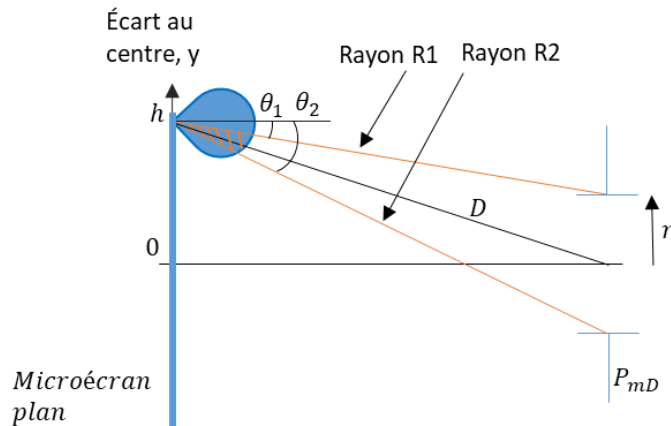


Figure 3.18 – Emission d'un pixel d'un microécran plan, à la distance  $D$  de la pupille, de rayon  $r$ . Deux rayons marginaux sont représentés et sont reportés sur le graphique de la Figure 3.19.

Les deux rayons R1 et R2 sont caractérisés par deux grandeurs : leur écart au centre du microécran,  $y = h$ , et l'angle  $\theta_x$  formé avec la normale à la surface du pixel. C'est selon ces deux grandeurs que l'on peut représenter ces deux rayons sous la forme d'un point sur la Figure 3.19. Les droites qui y sont représentées en rouge marquent les contours de la zone où les rayons lumineux n'entrent plus dans la pupille du système, cette énergie lumineuse est perdue.

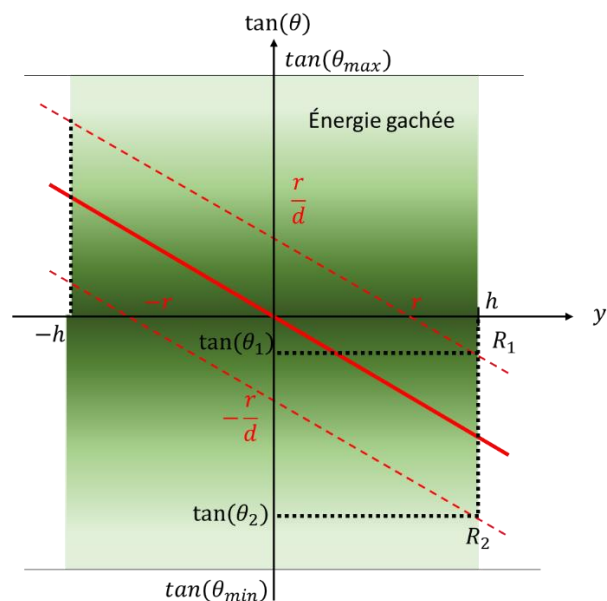


Figure 3.19 – Abscisse,  $y$  : distance du rayon à l'axe optique. Ordonnée,  $\tan(\theta)$  : tangente de l'angle entre le rayon et l'axe optique. La ligne rouge centrale correspond aux rayons passant par le centre de la pupille, en fonction de leur écart à l'axe optique. La droite pointillée à droite correspond aux rayons passant par le bord supérieur de la pupille, et la ligne pointillés gauche à ceux passant par le bord inférieur de la pupille.

Elles passent respectivement par les points R1 et R2 de la Figure 3.18. La couleur verte dégradée représente l'énergie lumineuse : plus l'angle des rayons est grand, plus l'énergie qu'ils portent est faible, et le vert désaturé. Pour  $|y| > h$ , le microécran n'émet plus de lumière.

Finalement, pour calculer l'énergie lumineuse entrant dans le système, il faut faire l'intégrale de l'énergie portée par chaque rayon entrant dans la pupille. C'est le parallélogramme formé par les lignes pointillées rouges et noires qui délimitent la zone de flux lumineux qui entre dans la pupille d'entrée. Les valeurs  $\theta_{\max}$  et  $\theta_{\min}$  sont fixées arbitrairement, pour représenter l'angle maximal d'émission des pixels. Ici, le microécran

est assez petit pour que les pixels de bord de champ arrosent toute la pupille de leur émission, mais pas de façon homogène.

Dans le cas du microécran courbe, le même type de graphe permet d'observer l'effet de la courbure. La Figure 3.20 montre pour le même pixel les rayons maximaux sélectionnés par la pupille. On utilise le même code couleur pour montrer la différence énergétique entre les rayons de cette figure et de la Figure 3.18, que pour la Figure 3.17. La sélection de la portion la plus énergétique du flux du microécran se manifeste sur la Figure 3.21 par une rotation du dégradé. En conséquence, on perçoit aisément pourquoi la quantité totale d'énergie passant dans la pupille est supérieure dans ce cas-là. Par ailleurs, si le microécran est lambertien, le dégradé serait en fait uniforme, et la redirection du flux n'aurait pas d'impact.

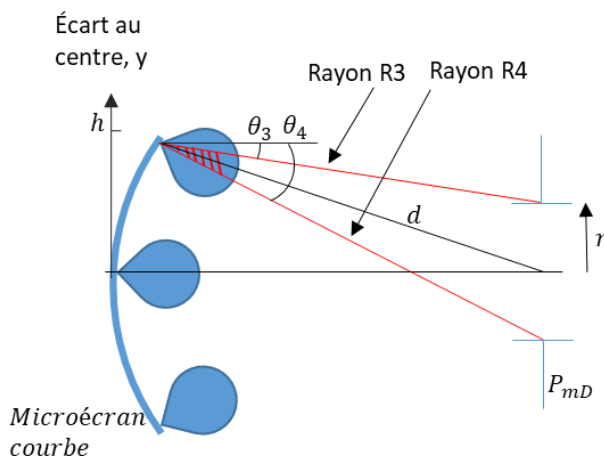


Figure 3.20 – Deux rayons du pixel maximal entrant dans la pupille.

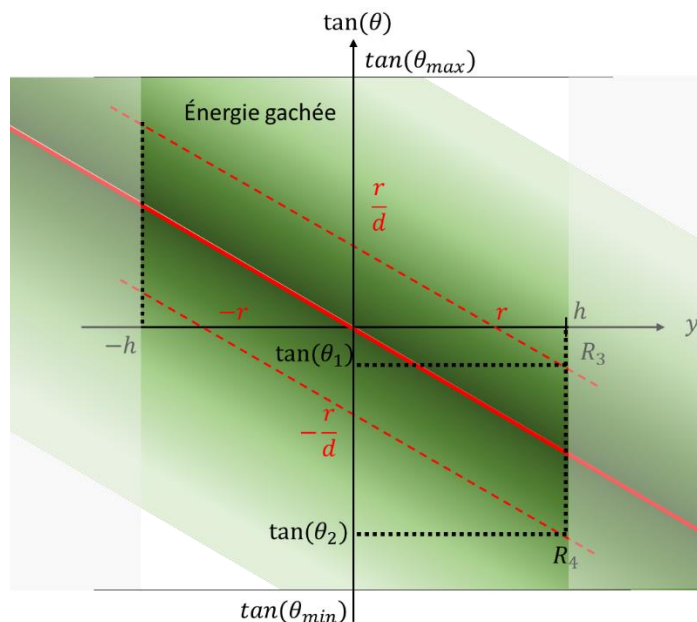


Figure 3.21 – La figure se lit de façon identique à la Figure 3.19. L'effet de la courbure du point de vue de l'émission des pixels se manifeste par une rotation.

Ainsi, il est clair que le flux total passant par la pupille est plus grand dans le cas courbe que le cas plan. Il un autre point est aussi amélioré : l'homogénéité de l'éclairage. Le parallélogramme formé des lignes rouges et noires pointillées, représentant la pupille, est beaucoup plus homogène par rapport au dégradé dans le cas courbe que le cas plan.

Pour quantifier ces observations, il était plus simple de passer par une simulation radiométrique du système avec ZOS, en mode Non Séquentiel<sup>4</sup>, plutôt que de calculer l'intégrale donnant le flux en fonction de l'énergie portée par chaque rayon. J'ai donc simulé un quart du microécran, courbe et plan, et mesuré le flux reçu par une pupille dans les deux cas.

Je modélise un microécran de surface  $12,1 \times 9,7 \text{ mm}^2$ , représentant le microécran *Izumi* utilisé en pratique. La pupille est située à 50 mm du microécran, et mesure 1 mm de rayon (cas d'ouverture faible). Le microécran plan a un rayon de courbure infini, et le microécran courbe a un rayon de 50 mm. La simulation prend en compte l'avancée par la flèche et l'orientation du pixel. Cette valeur de rayon de courbure est réalisable en pratique, bien qu'exigeante. Nous mesurons le flux reçu par la pupille dans le cas du microécran courbe et du microécran plan, pour divers types de cônes d'émission. Le GFL correspond à la différence relative entre les deux flux mesurés.

Le microécran est simulé par 30 pixels, de  $9,7 \mu\text{m}$  de côté, répartis en 3 lignes de 10 pixels, modélisant un quart de la puce. Cette répartition permet de ne pas en mettre autant que sur le vrai microécran ( $1,25 \cdot 10^6$ ). Comme le résultat est relatif entre le microécran plan et courbe, il suffit d'avoir un nombre assez grand de pixel pour être représentatif. Une étude de convergence a montré que 30 pixels suffisaient. Une seconde étude de convergence montre qu'avec  $10^7$  rayons émis pour chaque pixel, les résultats convergent.

Les pixels sont modélisés par des sources de types « source Radial » dans ZOS. Après avoir fixé leur position et orientation (à l'aide d'une macro en Basic), je fixe le nombre de rayons d'analyse ( $10^7$ ) et règle le cône d'émission en contrôlant l'intensité émise par les pixels en fonction de l'angle par rapport à sa normale, selon l'utilisation de la « source Radial ». La Figure 3.22 donne les types de cône d'émission utilisés pour ces simulations. Le premier est une émission lambertienne, dont l'intensité varie avec le cosinus l'angle. Les cônes d'émission suivants sont des puissances de cosinus. Plus la puissance est grande, plus le cône d'émission est étroit.

Pour chaque type d'émission, la légende de la Figure 3.22 donne le résultat de GFL obtenu. On peut remarquer que la valeur numérique obtenue pour le cas Lambertien correspond bien aux résultats trouvés précédemment. Le cône d'émission le plus étroit permet d'obtenir un GFL de 19 %.

*Par ailleurs, l'énergie lumineuse qui n'entre pas dans la pupille peut potentiellement devenir de la lumière parasite, dégradant la perception de l'image finale. Ainsi, plus on diminue les pertes lumineuses, plus on*

---

<sup>4</sup> Mode Non Séquentiel : Dans le mode séquentiel, les rayons interagissent séquentiellement avec les dioptries. Ce mode n'est pas une modélisation physique des systèmes, mais permet une conception efficace des systèmes. Dans le mode Non Séquentiel, lorsqu'un rayon croise un dioptre, l'interaction réelle est prise en compte, c'est-à-dire que les phénomènes physiques de réflexion, transmission et diffusion sont pris en compte.

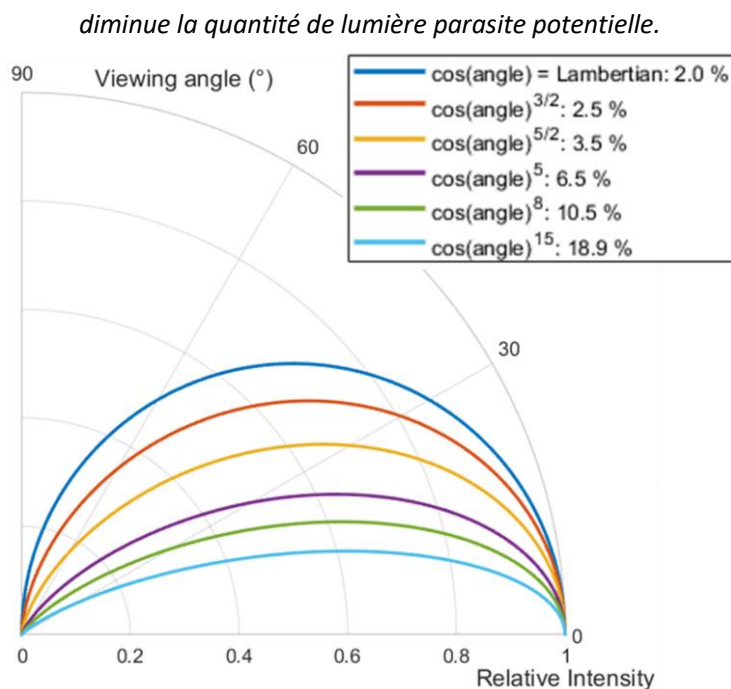


Figure 3.22 – GFL par simulation avec ZOS. Gauche : indicatrices d'émissions en intensité. Droite : valeurs de GFL.

### 3.2.3.4 Compromis avec le Gain en Flux Lumineux

Diminuer les pertes lumineuses est un aspect important pour le système de RA. D'abord parce que si la luminance du système global n'est pas assez élevée, l'utilisateur ne voit pas l'image projetée avec un contraste suffisant par rapport à l'arrière-plan ambiant. Mais aussi, parce que ces systèmes sont souvent des systèmes embarqués, à budget énergétique fixe. Simplement utiliser des microécrans plus puissants (en changeant de technologie par exemple) ne peut se faire sans augmenter la masse totale des batteries du système ou diminuer la durée d'utilisation du dispositif. Par ailleurs, pour obtenir des luminances élevées, la technologie principale à ce jour est le LCD, mais ceux-ci sont gênants pour miniaturiser les systèmes [53]. Ainsi, on voit bien l'importance des GFL dans les systèmes de RA.

Les calculs précédents démontrent que la courbure peut permettre de gagner en flux lumineux, jusqu'à environ 4 %, dans le cas d'un microécran lambertien. Le cas d'un microécran non lambertien a été étudié qualitativement, mais cela ne correspond pas aujourd'hui à la réalité technologique.

Malgré tout, à ce jour, avec des microécrans quasi lambertiens, les ordres de grandeurs des GFL obtenus par la courbure sont faibles. Mais il faut alors remarquer que les courbures caractéristiques permettant d'augmenter GFL sont aussi celles permettant d'augmenter le champ pour une même focale. Ces deux paramètres varient dans le même sens. Ainsi, bien que les gains ne soient pas gigantesques dans les deux cas, on peut obtenir des gains sur deux sujets en parallèle.

A cela, il faut ajouter les autres avantages de la courbure, comme les gains en qualité image, qui peuvent aussi tirer profit des formes intéressantes pour les GFL et le champ de vue. Nous continuons d'en aborder différents aspects dans la suite de ce chapitre.

Mais on peut aussi voir ces ordres de grandeurs de GFL comme une bonne chose. Si les GFL sont faibles pour les meilleures courbures, ils le sont aussi pour les pires. Par conséquent, si au lieu d'optimiser la courbure uniquement pour les GFL, on cherche à optimiser la courbure pour d'autres critères, les valeurs

de courbures pourraient ne plus être optimales pour les GFL. Mais alors, le flux lumineux ne serait pas détérioré de façon trop problématique, car, en relatif, on n'en perdrait que quelques pourcents.

En résumé, la courbure permet de gagner en flux lumineux, mais dans des ordres de grandeur assez faibles tant que les microécrans sont quasi lambertiens. En travaillant sur les cônes d'émission, l'intérêt de la courbure n'en sera qu'augmenté, mais alors, cela aura tendance à plus contraindre les courbures de Microécran, selon la distance entre le microécran et la pupille d'entrée du système. Dans le cas où le cône d'émission est très directif, pour une courbure donnée, si la distance entre la pupille d'entrée et le microécran est trop grande, alors une partie du flux n'entre pas dans la pupille et on perd du flux. Si la distance est trop petite, la pupille ne sera pas remplie par le flux émis par les pixel.

### 3.2.4 Distorsion

La distorsion est une aberration souvent traitée à part parce que dans la description de Seidel, elle est la seule à dépendre du cube du champ. Mais elle a aussi en commun avec la courbure de champ que ce n'est pas une aberration qui dégrade la qualité image à proprement parler, elle ne fait que déplacer la position optimale des pixels. Il suffit donc de changer de référence pour les annuler. Si pour la courbure de champ, la bonne référence est une surface image courbe, pour la distorsion, il s'agit plutôt d'une grille irrégulière par rapport à la grille de référence régulière. En pratique, on corrige la distorsion avec une contre-distorsion numérique de l'image affichée. Le fait que le système visuel tolère un certain niveau de distorsion et la possibilité de la compenser numériquement font qu'elle est parfois négligée durant la conception.

Pourtant, lorsqu'on courbe un microécran, on déforme la surface de référence et la notion de grille régulière de référence sur celle-ci n'est pas triviale. La notion de distorsion doit donc être précisée, dans sa définition et dans les valeurs qu'elle prend. Je présente ces changements dans la suite.

#### 3.2.4.1 Calcul de la distorsion dans le cas courbe

La mesure de la distorsion dans le logiciel ZOS n'est prévue que pour les surfaces images planes. Avec une lentille monocentrique, on peut visualiser l'erreur que provoque ce calcul nécessitant une projection. Par construction, ce système optique n'a pas de distorsion. Sur la Figure 3.23, les champs sont définis dans l'espace objet et sont équirépartis par pas de 5°. Une absence de distorsion se manifeste donc par le pas constant entre les champs sur la surface image. Lorsque la surface image est courbe, le pas est constant. Mais lorsque l'on projette les champs sur une surface plane, l'écart entre les champs n'est plus constant, et ZOS en déduit une distorsion de -42 %, alors qu'en pratique elle est nulle.

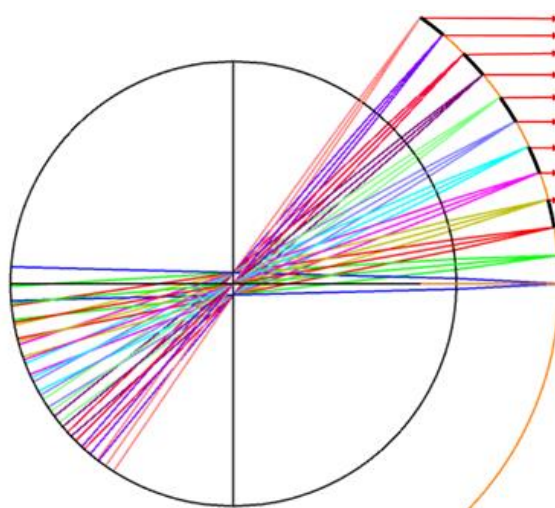


Figure 3.23 – Lentille monocentrique avec champs équirépartis. Sur la surface courbe, il n’y a pas de distorsion, contrairement à la surface plane.

Pour pallier cette limitation, Xu *et al.* définissent la distorsion en arc pour la conception optique de systèmes à surface image sphérique [92]. Il s’agit calculer les longueur d’arc sur la surface image plutôt que les longueurs projetées sur la surface paraxiale, qui ne peut plus être utilisée comme référence.

La première étape consiste à définir une nouvelle référence à partir du rayon principal paraxial, selon la Figure 3.24. En notant  $P'$  le point d’intersection entre le rayon principal paraxial et la surface courbe, on peut calculer la longueur d’arc,  $l_e$ , entre le centre de la surface courbe et le point  $P'$ . En pratique, pour définir le point  $P'$ , il faut considérer le point  $P$ , référence paraxiale usuelle pour calculer la distorsion plane et l’angle  $u$  de ce rayon par rapport à l’axe optique, et l’équation de la surface courbe. Dans leur travaux, Xu *et al.*, n’envisagent que les courbures sphériques. Des courbures biconiques, par exemple, complexifient la recherche des coordonnées de  $P'$ , mais ne changent rien à la méthode.

Puis, une seconde longueur d’arc,  $l_r$ , est calculée, cette fois à partir de  $Q$ , le point d’intersection entre le vrai rayon principal et la surface courbe. Ces grandeurs sont représentées sur la Figure 3.24.

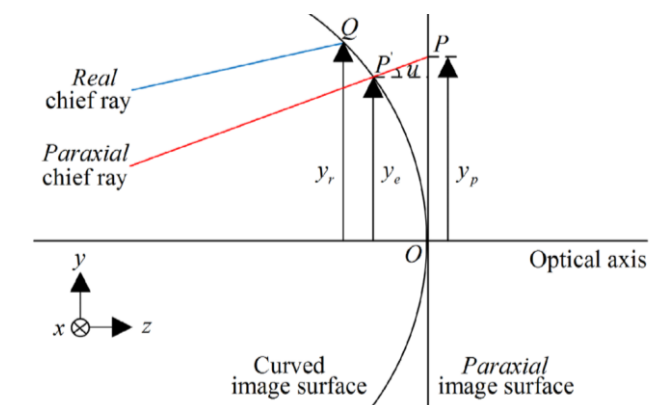


Figure 3.24 - Distorsion en arc, reprise de [92]. Les points  $P$  et  $Q$  sont obtenus directement dans les logiciels de conception optique. L’angle  $u$  est l’angle du rayon principal paraxial, duquel on déduit  $P'$ .

Enfin, à partir des coordonnées des points  $P'$  et  $Q$ , on peut calculer la valeur de la distorsion en arc, selon :

$$D_l = \frac{l_r - l_e}{l_e} \tag{3.28}$$

Avec  $l_r$  et  $l_e$  les longueurs d'arc de référence et réelle, obtenue selon :

$$l_r = \arcsin\left(\frac{y_r}{R}\right) R \quad 3.29$$

$$l_e = \arcsin\left(\frac{y_e}{R}\right) R \quad 3.30$$

Avec  $R$  le rayon de courbure de la surface image de référence.

Réaliser le calcul de la distorsion sur une surface courbe peut se faire directement dans la fonction de mérite de ZOS, ou bien en écrivant une macro calculant cette distorsion en arc dans chaque cas. La première méthode est fastidieuse, mais permet d'optimiser sur la valeur réelle de la distorsion. Comme elle alourdit la MF, nous ne calculons que quelques champs en bord d'image pour évaluer la distorsion. La seconde méthode permet seulement de faire une analyse fine de la valeur de la distorsion, mais sans l'optimiser.

Je décris dans l'annexe « utilisation didactique de ZOS » ces deux méthodes complémentaires afin que le lecteur puisse les reproduire. A noter que la distorsion est complexe à calculer, en particulier parce que la distorsion maximale ne se situe pas toujours au niveau du champ maximal.

Pour réaliser le calcul de la distorsion sur une surface biconique, il est nécessaire de calculer la longueur d'arc entre le point considéré et le centre de la surface. Ce calcul complexe n'a pas pu être mené avec exactitude. Mais il est toutefois possible d'utiliser deux types de simplifications.

La première consiste à ne pas calculer la distorsion pour n'importe quel point du champ, mais pour des points sur les deux axes de la surface biconique. En effet, sur ces axes, la surface est sphérique et on peut donc utiliser les méthodes simples de calcul de distance sur une sphère. Cette méthode ne permet en revanche pas de visualiser la distorsion pour hors de ces axes.

La seconde consiste à simplifier ce calcul en approximant une surface biconique par une surface sphéro-cylindrique, dont la distance entre n'importe quel point et le centre de la surface est plus simple à calculer, par construction. Tant que la surface n'est pas trop courbée, l'approximation fonctionne bien, mais au-delà d'un certain seuil, elle n'est pas valide. Cette méthode est détaillée avec plus de précision dans l'annexe « déformation mécanique ».

Enfin, une dernière méthode consiste à simuler une image au travers du système optique pour visualiser la distorsion, bien que cette méthode ne permette pas non plus de contrôler la distorsion, ni de la quantifier.

### 3.2.4.2 Distorsion et courbure optimale

Maintenant que j'ai présenté une manière de prendre en compte la distorsion avec une surface courbe, une autre façon de voir les choses peut prolonger la réflexion. La distorsion étant une aberration qui ne fait que déplacer la position du pixel, on peut se demander si elle influence la valeur de la courbure optimale. Cette question a surgi lorsque j'optimisais des systèmes optiques avec microécrans courbes. En cherchant à réduire la distorsion, la valeur du rayon de courbure s'écartait de sa valeur théorique.

Le calcul de la courbure de meilleur foyer est donné à l'équation de Welford 3.7. Mais ce calcul part du principe qu'il n'y a que de la courbure de champ et de l'astigmatisme pour en déduire la courbure optimale. Ces deux aberrations sont souvent analysées ensemble car elles ont la même dépendance en champ, mais qu'en est-il d'un système qui aurait à la fois de la courbure de champ, de l'astigmatisme et de la distorsion ?



A partir d'un des systèmes EVF présenté au chapitre 5, je montre que la distorsion a effectivement une influence sur la courbure optimale du microécran. Pour cela, j'optimise d'abord le système sans contrainte sur la distorsion, et en note le rayon de courbure du microécran. Puis, j'ajoute une contrainte sur la distorsion en arc et optimise de nouveau le système en augmentant progressivement le poids de la contrainte sur la distorsion, avec la courbure du microécran comme seule variable. Il s'agit donc d'un système fixé, et on observe la relation entre la courbure et la distorsion. La Figure 3.25 représente graphiquement cette relation.

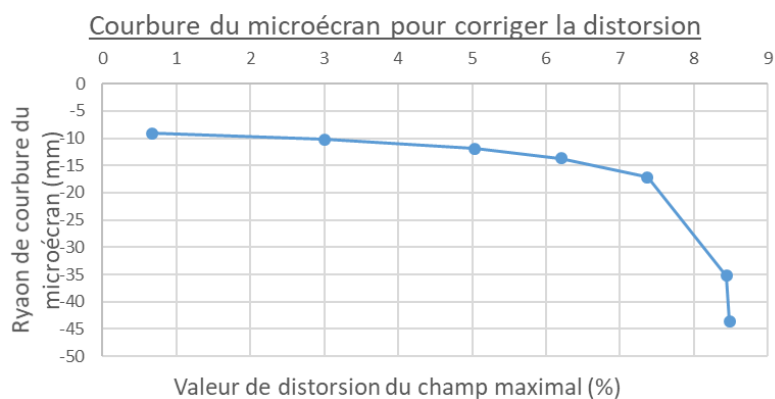


Figure 3.25 – Evolution de la courbure du microécran à mesure que la distorsion est corrigée.

La courbure passe de  $-44\text{ mm}$ , sans prise en compte de la distorsion, à  $-8\text{ mm}$  pour la correction maximale de cette dernière. Chaque point du graphique correspond à une optimisation. La courbure, à elle seule, permet de corriger la distorsion. En revanche, l'évolution de la qualité image, non présentée sur ce graphe se dégrade au fil des améliorations de la distorsion. La méthode présentée ne permet donc pas d'obtenir de systèmes de meilleure qualité, mais seulement de montrer que la courbure a une influence sur la distorsion.

Pour illustrer l'idée d'une courbure théorique tenant compte de la distorsion, on peut revenir aux tracés de rayons comme sur la Figure 3.26, illustrant la courbure de champ, la distorsion et le mélange des deux. La courbure de champ déplace les pixels selon l'axe optique, ce qui forme une courbure. La distorsion déplace les pixels dans le plan perpendiculaire à l'axe optique, ce qui étire l'image. Enfin, l'astigmatisme, non représenté sur la Figure 3.26, ajoute à ces deux déplacements, deux positions optimales, selon les plans sagittaux et tangentiels, qui imposent un compromis pour trouver le meilleur foyer. In fine, on s'attend à ce que la courbure optimale soit plutôt une forme d'asphérisation de la courbure de meilleur foyer, telle que calculée plus haut dans ce chapitre.

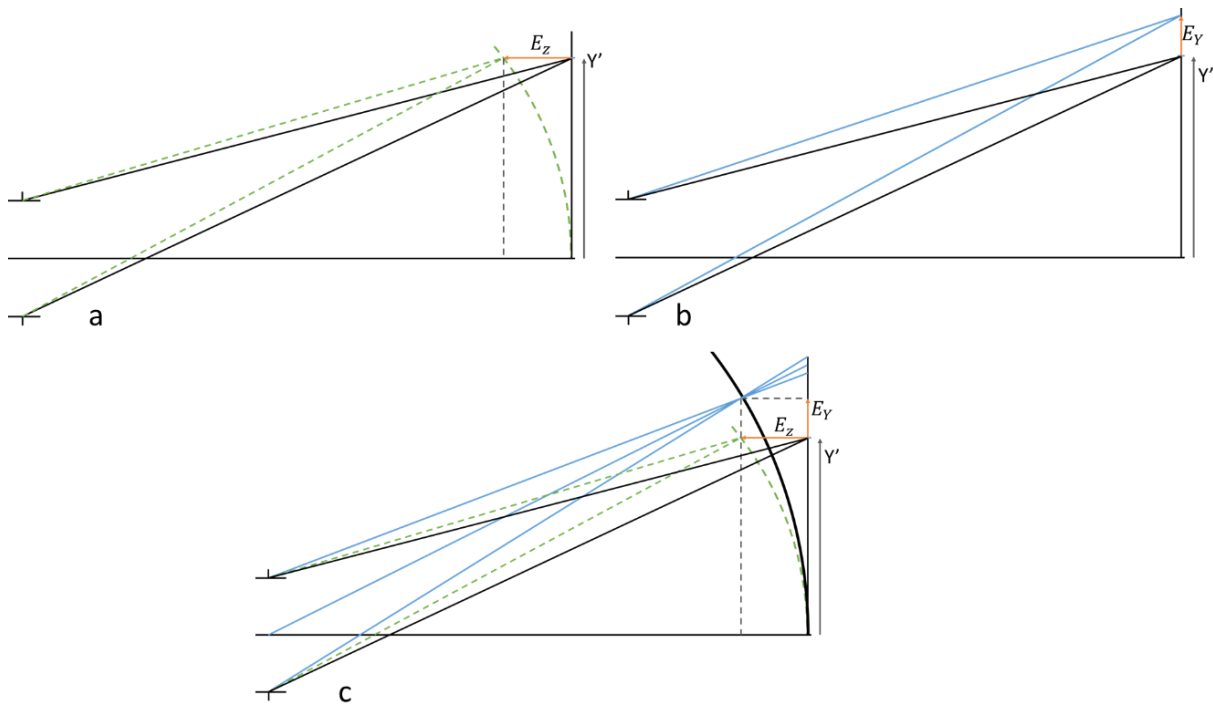


Figure 3.26 – Effet de la courbure de champ (a), de la distorsion (b) et de leur combinaison (c).

Par le calcul, il s'agit de partir de la fonction d'aberration en considérant les trois aberrations ( $W_{222}$ ,  $W_{220}$  et  $W_{311}$ ), et d'en déterminer les coordonnées du point image réel, par rapport au point image paraxial. Pour cela, on ajoute deux termes à la fonction d'aberration, les termes de défocus et de tilt, c'est l'équation 3.31. Dans ces termes, on a les inconnues  $E_y$  et  $E_z$  qui sont les écarts entre la position paraxiale du point image et la position minimisant la fonction d'aberration, donc le point de meilleur foyer. Ce calcul utilise l'hypothèse que les déplacements  $E_z$  et  $E_y$  sont petits par rapport à la distance  $R$  entre la pupille et l'image. En toute rigueur, le défocus devrait être compté selon le rayon principal, et ne serait donc parallèle à l'axe optique que dans le cas du champ central, mais avec cette approximation, la différence entre le défocus rigoureux et le défocus compris comme sa projection selon l'axe optique est négligeable.

Ce sont les valeurs que l'on cherche. Les détails du calcul sont présentés dans l'annexe « Courbure de meilleure foyer avec distorsion ».

$$W = W_{222}y'^2y_p^2 + W_{220}y'^2(x_p^2 + y_p^2) + W_{311}y'^3y_p + \frac{n}{2}E_z\left(\frac{R_p}{R}\right)^2(x_p^2 + y_p^2) + E_y n \frac{R_p}{R}y_p. \quad 3.31$$

Avec  $n$  l'indice optique.

La Figure 3.27 illustre de façon synthétique tous les paramètres. Ce que nous cherchons, ce sont les coordonnées du point M, qui donnent la position de meilleur foyer, en prenant en compte la distorsion.

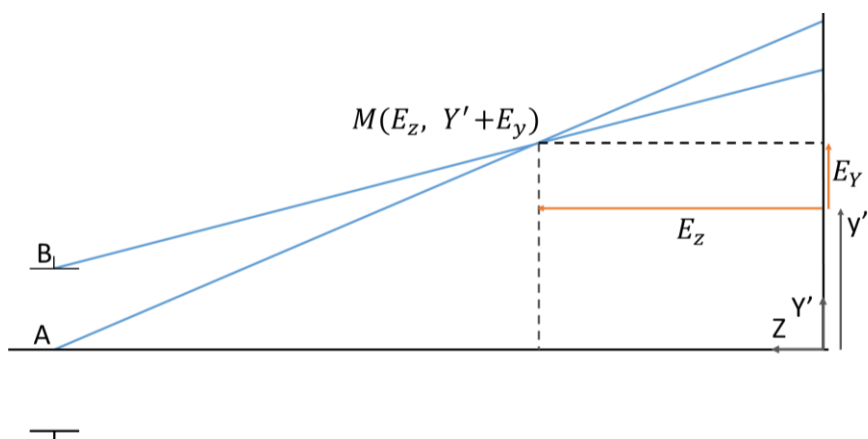


Figure 3.27 – Rayon principal et un des rayon d'ouverture maximale, du même champ. Ils focalisent en M, dont on cherche les coordonnées.

En utilisant les équations d'aberration transverses, on obtient dans le cas sagittal :

$$E_{z,sagittal} = -\frac{2R^2}{nR_p^2} W_{220} y'^2 \quad (3) \quad 3.32$$

Ce résultat est identique au cas classique : la distorsion ne joue pas de rôle pour la courbure sagittale.

Pour le cas tangentiel, on obtient :

$$\varepsilon_y = -\frac{R}{nR_p} \left[ 2(W_{220} + W_{222}) y'^2 y_p + W_{311} y'^3 + n \left( \frac{R_p}{R} \right)^2 y_p E_{z,tang} + \frac{nR_p}{R} E_{y,tang} \right] \quad 3.33$$

Or, le point M est le point où les aberrations s'annulent, donc  $\varepsilon_y = 0$ , pour tous les rayons d'ouverture. On peut donc prendre deux rayons en particulier, et résoudre l'équation 3.33 pour en déduire  $E_{z,tang}$  et  $E_{y,tang}$ .

Finalement, on obtient :

$$E_y = -\frac{R}{nR_p} W_{311} y'^3 \quad 3.34$$

$$E_z = -\frac{2R^2}{nR_p^2} (W_{220} + W_{222}) y'^2 \quad 3.35$$

Ces équations ne dépendent plus de  $y_p$ . Si elles en dépendaient, la position idéale du pixel varierait selon les rayons d'ouverture, ce qui ne correspond pas aux comportements des aberrations présentes.

Par ailleurs ces équations incluent la dépendance connue en astigmatisme et courbure de champ. Si la distorsion est nulle, seul le terme  $E_y$  s'annule, ce qui est cohérent les travaux de Welford.

De plus, le signe de la contribution de la distorsion  $E_y$  est opposé au signe de la distorsion elle-même (équation 2.34). Ainsi, lorsque la distorsion est positive, la courbure est plus forte puisque le point M est alors plus proche de l'axe optique que lorsque la distorsion est nulle. Inversement, lorsque la distorsion est négative, la courbure est moins agressive.

Une fois cette analyse faite, il est important de souligner que ces équations n'ont pas vocation à être utilisées en pratique car les rentrer dans la MF serait trop fastidieux et inutile. Fastidieux d'abord, parce

que ce calcul prendrait de nombreuses lignes et devrait être réalisés pour plusieurs points du champ. Inutile ensuite, parce que la méthode présentée auparavant qui consiste à considérer la distorsion remplit déjà ce rôle. Le but de cette analyse est simplement de montrer que la correction de la distorsion a une influence sur la courbure du système. Ce résultat est en soi intéressant car j'ai moi-même eu du mal à comprendre pourquoi mes systèmes changeaient autant lorsque je travaillais à diminuer la distorsion.

J'aurais par ailleurs souhaité déduire de ces équations une expression claire de la courbure en fonction du champ, de sorte à obtenir une vision plus simple de ce résultat. Mais je n'ai pas trouvé la solution mathématique à ce problème. Toutefois, comme il ne s'agit que d'une présentation différente du même résultat, cela ne change pas les conclusions présentées.

Enfin, j'ai essayé de trouver une méthode pour valider ces équations en les confrontant à des optimisations sur des systèmes optiques avec ZOS. En pratique, mes essais n'ont pas donné de résultat concluant, mais cela s'explique notamment par d'autres facteurs présents en plus dans ces systèmes. Il faudrait trouver un système qui n'aurait que de la distorsion, de la courbure de champ et de l'astigmatisme, et si possible au troisième ordre pour mener correctement cette validation.

La conclusion de cette partie n'est pas vraiment que cette nouvelle formule pour la courbure devrait toujours être utilisée plutôt que l'ancienne, mais plutôt que la courbure est le résultat d'un équilibre complexe que les études analytiques peinent à rendre compte. Si les formules donnant la courbure en fonction des aberrations sont pertinentes, elles ne devraient pas tant servir à prédire la valeur de la courbure d'un système qu'à analyser les phénomènes en jeu pour un système. En effet, lorsqu'un système tend vers une courbure très différente de celle prédite, le concepteur peut en déduire qu'il y a d'autres phénomènes en jeu par rapport aux paramètres pris en compte pour estimer la courbure. Dans mon cas, c'était la distorsion, mais la coma du troisième ordre, en déplaçant un peu le centroïde des taches images peut aussi avoir une influence, ainsi que les aberrations d'ordre supérieurs.

### 3.2.4.3 Déformation mécanique par la courbure

La mise en courbure d'une puce de silicium induit des contraintes dans le matériau. Pour en comprendre les détails, il faut avoir une certaine compréhension des méthodes de courbures ainsi que de la répartition des contraintes dans la puce, et c'est l'objet du chapitre suivant. Sans ces notions, il est délicat de décrire la déformation induite mécaniquement par la courbure. Au lieu de la présenter dans cette partie, nous le présentons donc à la fin du chapitre 4.

### 3.2.4.4 Distorsions et réalités augmentée

Au-delà des calculs de distorsion et des méthodes pour la corriger, cette partie veut élargir un peu les réflexions. Visualiser une image distordue au travers d'un système visuel peut avoir des effets assez divers en fonction des applications. Par exemple, un système de réalité virtuelle n'a pas les mêmes exigences qu'un système de réalité augmentée. Comme ce dernier superpose l'image virtuelle et l'image réelle, l'utilisateur compare visuellement la distorsion des deux. On considère généralement qu'une distorsion inférieure à ~3% est négligeable pour un système visuel [35]. Mais c'est plutôt la différence entre la distorsion des deux voies optiques qui compte, comme on le constate sur la Figure 3.28.

Ainsi, en RA, selon les applications, on peut imaginer tolérer une distorsion plus importante (6 %), mais avec un écart faible entre les deux voies optiques.

En réalité virtuelle, certains auteurs proposent d'utiliser la distorsion en barillet pour augmenter artificiellement le champ de vue [93]. Comme il ne s'agit que d'un effet optique, la résolution du microécran reste la même. L'avantage est que la distorsion dépend au cube du champ de vue, donc au centre champ, la résolution demeure celle du microécran. Plus on s'éloigne du centre, plus la résolution diminue, pour augmenter le champ de vue, mais si le champ est assez grand, l'utilisateur ne sera pas gêné par cet effet.

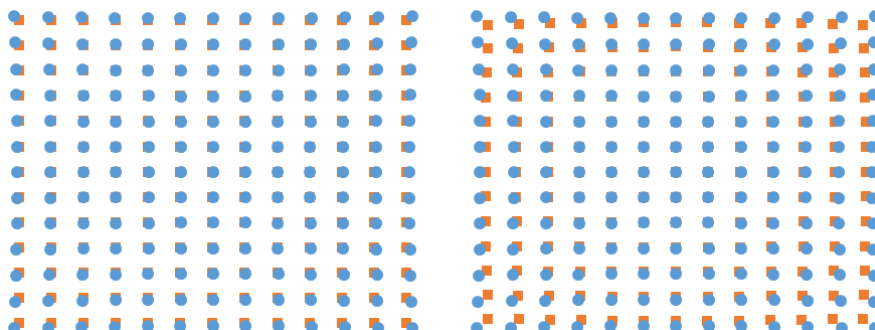


Figure 3.28 – Haut : en rouge, la grille de référence, sans distorsion, en bleu les points marquant une distorsion en coussinet de 3 %. Bas : superposition de distorsion en coussinet à 3 % et en barillet à 3 %

Je voudrais terminer cette partie sur la distorsion par deux remarques. D'abord, il est courant de modéliser un système optique visuel à l'envers de la propagation de la lumière, pour simuler le microécran comme on le ferait avec un capteur. Nous verrons cela plus en détails dans le chapitre 5. Mais, dans ce cas, la distorsion obtenue est l'opposée de la distorsion perçue par l'utilisateur. Il est important de prendre ce paramètre en compte pour éviter de faire l'opposé de ce qui est souhaité.

Enfin, lorsqu'on réalise la conception d'un système optique visuel, il faut toujours garder en tête que l'image ne sera pas enregistrée par un ordinateur, mais perçue par un utilisateur. Et ce dernier, selon l'usage du dispositif, peut s'habituer à l'image fournie et une distorsion qui serait gênante à la première utilisation peut rapidement être oubliée selon le besoin. C'est entre autres en ce sens que Sydney Ray note en conclusion de son explication sur la qualité image d'un système visuel que « the human visual system is somewhat tolerant » [35].

### 3.2.5 Conclusion

Cette réflexion conclut la partie présentant les apports de la courbure aux systèmes visuels. Nous avons commencé par présenter la nécessité de revisiter certains points à cause de la position singulière de la pupille dans les systèmes visuels, les rendant très asymétriques. Puis, le lien entre la courbure et le champ de vue a montré que la courbure peut permettre d'ajuster le champ de vue de quelques pourcents. Ensuite, les gains en flux lumineux ont été analysés, montrant jusqu'à 19 % de gain dans certaines conditions optimales. La condition la plus importante étant que le cône d'émission des pixels doit être étroit. Les microécrans lambertiens ne profitent que peu des GFL. Enfin, la courbure modifie la prise en compte de la distorsion, et c'est ce qui a été montré dans la dernière partie.

## 3.3 APPORTS DE LA COURBURE AUX SYSTEMES HORS-AXE

Il est pertinent d'étudier les avantages que la courbure apporte aux systèmes hors-axe indépendamment des systèmes visuels afin d'éviter de les mélanger. En réalité, les apports principaux ont été décrits précédemment, et cette partie en montre les conséquences pour les systèmes hors-axe.

### 3.3.1 Correction de la courbure de champ en hors-axe

#### 3.3.1.1 Liens avec les méthodes usuelles

Comme nous l'avons déjà abordé dans la partie 3.1.2.1, l'aberration de courbure de champ est une aberration particulière, dans le sens où les moyens à mettre en œuvre pour la corriger lui sont spécifiques. L'article de Meyzonnette et Runciman donne un aperçu des méthodes concrètes de correction de la courbure de champ [94]. Un moyen classique consiste à ajouter une lentille de champ, c'est-à-dire, une lentille très proche d'un plan image, parce qu'à cette position, elle affecte presque exclusivement la courbure de champ, sans modifier les autres aberrations.

La première utilisation de l'aberration de courbure consiste justement à corriger la courbure en contrôlant l'effet cumulé sur la surface focale, plutôt qu'en ajoutant une lentille. Dans cette partie, j'aborde la correction de la courbure de champ pour les systèmes hors-axes.

Revenons d'abord aux méthodes pour corriger la courbure de champ. Dans un de mes cours de conception optique à SupOptique, monsieur Debize avait donné un conseil pour corriger la courbure de champ, dans le cas où on souhaite diminuer la courbure, pour un système donné, donc sans ajouter de lentille de champ (ou en considérant qu'elle est déjà présente, mais n'est pas suffisante). Pour comprendre son conseil, il faut revenir à l'équation donnant la courbure de Petzval :

$$P = - \sum \frac{\varphi_i}{n_i} \quad 3.36$$

Avec  $\varphi_i$  la puissance du dioptré  $i$ , et  $n_i$  l'indice optique après le même dioptré. Donc, sans ajouter de lentilles, on n'a que deux moyens pour corriger la courbure de champ : modifier les rayons de courbure des dioptrés, ou modifier les indices optiques.

Son conseil est de regarder le signe de la courbure sagittale. Si elle est positive, il faut augmenter l'indice des lentilles convergentes et diminuer l'indice des lentilles divergentes, et inversement lorsqu'elle est négative. Autrement dit, **son conseil consiste à travailler sur les indices optiques, en fonction de la courbure résiduelle, plutôt que sur les rayons de courbure.**

Ce conseil peut s'expliquer par deux raisons majeures. D'abord, les rayons de courbure modifient fortement le système, tandis que les indices ont une influence plus restreinte. En outre, une modification des indices peut être contrôlée en adaptant légèrement les courbures, tant que les modifications sont graduelles. Travailler sur les indices optiques plutôt que sur les rayons de courbure permet donc d'utiliser le degré de liberté le moins usité des deux. De plus, ce travail sur les indices optiques n'est pas incompatible avec la correction des aberrations chromatiques, ou le choix des verres prend aussi en compte la constringence [94].

Lorsque le système est hors-axe, la courbure de champ est plus difficile à contrôler. D'abord, le fait cela implique généralement que les optiques sont *freeform*. Et, à ce jour, obtenir des optiques *freeform* est plus aisé à partir de plastiques optiques ou des miroirs, plutôt que des verres optiques [95]. Or, le choix des indices optiques et des constringences est plus faible pour les plastiques que pour les verres, ce qui limite la correction de la courbure de champ en jouant sur les plastiques optiques. Dans le cas des miroirs, puisqu'ils ont un indice optique de -1 et n'ont pas de dispersion chromatique, il est impossible de jouer sur les indices pour corriger la courbure de champ. Ainsi, pour les optiques hors-axe la courbure est encore plus intéressante, puisque les méthodes usuelles de correction sont plus délicates à mettre en œuvre.

Par ailleurs, certains systèmes *freeform* visent à minimiser le nombre de composants optiques. Ceci peut en faciliter l'assemblage, ou rendre le système plus compact. Dans ces cas, l'ajout d'une lentille de champ peut être délicat. Lorsque le système a une surface image intermédiaire réelle il est possible d'y ajouter un dioptre pour corriger des aberrations de champ, mais cela peut être insuffisant.

En pratique, pour corriger la courbure de champ sans courber le microécran (ou le capteur), il est nécessaire d'annuler le Petzvalien. Avec un microécran courbe, il suffit d'obtenir une valeur comprise dans la plage des courbures possibles. Ainsi, la contrainte sur la courbure de champ diminue, réduisant du même coup le travail à réaliser sur les indices.

### 3.3.1.2 Modification de la courbure en hors-axe

#### 3.3.1.2.1 Courbure sphérique et courbure biconique

Dans les parties précédentes, lorsque je présentais la courbure de microécran, il s'agissait de courbure sphérique. Or, l'optique hors-axe peut nécessiter des formes différentes.

En *freeform*, le plus souvent, on cherche d'abord à recentrer les nœuds des aberrations hors-axe sur le centre de l'image et à en réduire l'amplitude. Puis on termine la correction en utilisant soit des éléments à symétrie de révolution additionnels, soit avec des coefficients asphériques [96]. Il s'agit en fait, le plus souvent d'essayer de revenir à un système équivalent à un système centré, ce qui implique que la courbure de champ tend vers une forme sphérique. Toutefois, d'autres formes peuvent améliorer la correction des aberrations.

Un exemple de système simple montre que la courbure optimale peut ne pas être sphérique. Je prends un miroir orienté de sorte à rendre le système hors-axe, avec le diaphragme du système éloigné du miroir pour avoir un ER de 20 mm. Le système est modélisé en sens inverse pour faciliter la simulation. Le miroir est décrit comme par un polynôme de Zernike en frange (Fringe Zernike) selon la formule :

$$z = \frac{r^2/R}{1 + \sqrt{1 - r^2/R^2}} + \sum_{i=5}^{N=11} A_i Z_i(\rho, \phi) \tag{3.37}$$

Avec, un premier terme qui est la base sphérique de la surface, avec  $r$  la coordonnée du point de la surface dont on décrit le sag  $z$ , et  $R$  le rayon de courbure de la surface, qui est une variable. Le second terme est la somme de Zernike, avec  $N$  le nombre de coefficients de Zernike sélectionnés,  $A_i$  le coefficient du polynôme de Zernike  $i$  (en franges),  $r$  est la coordonnée radiale décrivant le point de la surface considéré,  $\rho$  et  $\phi$  sont les coordonnées polaires décrivant la surface.

Je mets en variables le rayon de courbure  $R$  et les coefficients Z5 (astigmatisme du 3<sup>e</sup> ordre) et Z7 (coma du 3<sup>e</sup> ordre) dans un premier temps, puis, une fois que le système est un peu amélioré, je mets les coefficients Z9 (aberration sphérique du 3<sup>e</sup> ordre) et Z11 (coma elliptique du 3<sup>e</sup> ordre) en variables, pour gagner un peu en qualité image.

Enfin, et c'est l'objet de la démonstration, la surface image a trois formes possibles : plane, sphérique et biconique. Les formes sphérique et biconique sont décrites par les équations de flèche suivantes :

sphérique 
$$z = \frac{r^2/R}{1 + \sqrt{1 - r^2/R^2}} \tag{3.38}$$

biconique

$$z = \frac{x^2/R_x + y^2/R_y}{1 + \sqrt{1 - x^2/R_x^2 + y^2/R_y^2}} \quad 3.39$$

Dans les cas sphérique et biconique, les rayons de courbure de l'image sont aussi des variables d'optimisation. La fonction de mérite est conçue pour optimiser sur la valeur RMS des spot diagram, en maintenant la focale. Plusieurs champs sont utilisés pour échantillonner l'espace, mais la qualité image n'est évaluée que pour le champ central et deux champs extrêmes (15° selon x et 15° selon y). La Figure 3.29 montre le système avec les trois formes de surface objet.

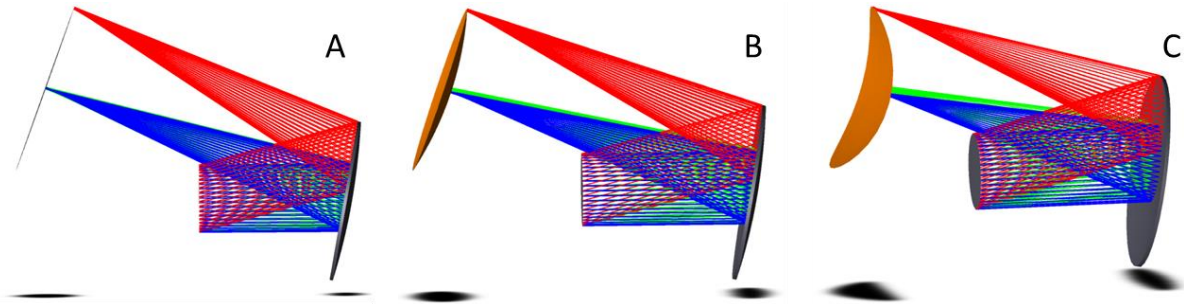


Figure 3.29 – Illustration des trois systèmes testés. A : microécran plan, B : microécran sphérique ; C : microécran biconique (presque cylindrique dans ce cas particulier).

Le Tableau 3.1 donne les valeurs RMS des *spots diagrams* pour les trois champs, dans chaque cas. Le cas de surface image plane est utilisé comme référence.

	Forme du microécran		
	plan	sphérique	biconique
rayons de courbure (mm)	<i>inf x inf</i>	47,7	19 x 335
champ	taille RMS du spot diagram (µm)		
central	124	105	115
x max, 15°	173	195	141
y max, 15°	230	211	183
moyenne RMS	181	177	149

Tableau 3.1 – Valeurs RMS des *spot diagrams* du champ central et des champ extrêmes, pour les trois formes de surface image. Les cases vertes marquent une amélioration de la qualité image par rapport à la référence, la case rouge marque une dégradation.

On voit que la forme biconique améliore la qualité image sur tout le champ, tandis que la forme sphérique donne un compromis où l'un des champs est dégradé. Il manque des degrés de libertés au système pour corriger de façon significative la qualité image. C'est ce degré de liberté qu'apporte la forme biconique.

### 3.3.1.2.2 Courbures alternatives

Une question émerge alors : existe-t-il d'autres formes de courbure qui amélioreraient la qualité image ?

Avant tout, il est à noter que la façon dont on définit une surface limite les formes qu'elle peut prendre. Pour éviter ces limites, il est possible d'optimiser la surface image point à point, ce qui affranchit d'une équation de *sag*. En procédant ainsi, on trouve la position optimale pour chaque point du champ, et donc la forme optimale. Je n'ai pas fait d'essai avec cette méthode, puisqu'en laissant assez de degrés de liberté à la surface image, on peut déjà avoir une approximation de la meilleure surface. J'ai donc optimisé avec



diverses définitions pour la surface image (ajout de coefficients de Zernike, polynôme XY, toroidal...). Si on peut encore gagner en qualité image (environ  $10\ \mu\text{m}$  de moins sur la moyenne RMS sur  $150\ \mu\text{m}$  pour le biconique), la surface image s'écarte peu de la forme biconique, bien qu'elle ne le soit pas rigoureusement. Mais cette observation n'est pas une preuve suffisante en elle-même.

Au-delà de ces limites mathématiques, à quel type de forme générale doit-on s'attendre pour un système hors-axe ? Comme on l'a dit, l'optimisation d'un système d'imagerie hors-axe cherche à faire disparaître les aberrations hors-axe, pour revenir à des cas à symétrie de révolution. De plus, la continuité en champ interdit les formes dont la courbure varierait localement de façon brutale. Par ailleurs, certaines formes pourraient induire des variations dans l'homogénéité de l'éclairage, ce qui serait préjudiciable. A noter que les formes biconiques peuvent déjà donner des formes en selle de cheval, menant à des inhomogénéités d'éclairage par le phénomène décrit précédemment dans la discussion sur le GFL.

Parmi les familles de courbure répondant à ces critères généraux, j'ai travaillé en particulier avec la forme biconique, décrite par deux rayons de courbures selon des axes orthogonaux. En effet, d'une part, l'analyse menée au chapitre 2 sur la courbure de champ hors-axe montre que les familles de surfaces pertinentes sont toujours des surfaces quadratiques en champ. D'autre part, deux publications montrent que les biconiques sont pertinentes en design optique, en particulier pour les systèmes anamorphiques (i.e. qui ne préservent pas le rapport d'aspect). La première, de Zhong et Gross [97], présente en détails les surfaces biconiques, et montre que leur utilisation permet de découpler la coma de l'astigmatisme, et d'en faciliter la correction. Cette pratique rend possible d'avoir des puissances différentes selon les directions x et y, menant par conséquent directement à des courbures de Petzval variables selon la direction. C'est ce que confirme la seconde publication, de Muslimov *et al*, qui montre des surfaces toroïdales corrigeant efficacement un système à trois miroirs hors-axe [98]. Le mot toroïdal décrit pour eux une surface décrite par deux rayons de courbure, soit une surface biconique. Quoiqu'il en soit, à ce jour, je n'ai pas constaté le besoin d'étudier des formes beaucoup plus libres que ce qu'offre la forme biconique.

En dernier lieu, il faut ajouter que si l'on supprime l'hypothèse de la continuité en champ, on peut imaginer des systèmes optiques d'un autre ordre, qui réaliseraient par exemple des fonctions optiques différentes pour des portions différentes du microécran. Dans ce cas, il n'y aurait plus de raisons que la courbure ne varie pas brusquement. Ces cas débordent très largement du cadre de cette thèse.

Enfin, dans le chapitre 4, je présente en pratique la mise en courbure d'un microécran. Nous verrons alors que les composants à base de silicium ne permettent pas de réaliser toutes les formes souhaitées, ce qui limite *de facto* l'exploration de formes exotiques.

En conclusion, pour des systèmes d'imagerie hors-axe, le degré de liberté accordé par un second rayon de courbure sur la surface image est un apport conséquent. Si d'autres formes peuvent être intéressantes, à ce jour, je n'ai pas constaté de cas où la forme biconique semblait être limitante pour le système. En s'affranchissant de certaines contraintes, comme la continuité en champ il peut être pertinent d'explorer des formes très différentes, mais cela pourrait être au détriment de la faisabilité.

### 3.3.2 Critères de sélection du point de départ

Le choix d'un point de départ est un point critique, que ce soit en optique sur l'axe ou hors-axe. Meyzonnette et Runcimann utilisent une jolie analogie pour présenter le processus d'optimisation [94] : « L'ordinateur ressemble à un parachutiste dont on a bandé les yeux, et qui, lâché au-dessus de l'Himalaya, doit monter le plus haut possible après atterrissage. Le pilote de l'avion représente le concepteur optique, et la position où est lâché le parachutiste, le point de départ choisi par le concepteur. Avec l'aide de

l'optique de Gauss, il est probable que seules les premières collines seront gravies. Si le pilote utilise une carte basée sur les aberrations de Seidel, le parachutiste atteindra quelques pics un peu plus élevés. Avec de l'expérience et les conseils d'autres pilotes, il pourra atteindre des sommets tout à fait respectables, mais, pour arriver au sommet de l'Everest, il faut beaucoup de chance et de jugement. »

Lorsqu'on conçoit un système optique sur l'axe, le choix du point de départ se fait avec des banques de données (brevets, livres, ou essais personnels). Toutefois, en optique hors-axe, les banques de données sont beaucoup plus maigres et les applications plus diverses. Pour certains types de systèmes, comme les systèmes TMA (*Three Mirror Anastigmat*), de nombreuses publications ont été réalisées pour en étudier diverses caractéristiques [84,99–103].

Dans une publication, au lieu de ne donner que les résultats d'un système, comme c'est souvent le cas, Bauer *et al.* décrivent une méthode pour choisir un point de départ hors-axe [79]. Il s'agit de système capteur plutôt que de système visuel, mais cela permet d'étudier la relation entre la courbure et l'aspect *freeform*. En bref, ils ont défini trois filtres par lesquels ils analysent toutes les géométries d'un type de TMA. Le but est de trier rapidement tous les points de départ possibles sans réaliser toute l'optimisation du système, pour trouver celui qui a le plus de chance d'aboutir à un bon système.

Ces trois filtres sont expliqués en détails dans la publication, je les réexplique ici :

- Filtre 1 : “the FAFL astigmatism and FC coma of the first-order unobscured geometry must have the relative orientation that is correctable by a coma surface after the stop”. Les premières étapes de correction d'un système hors axe sont souvent assez similaires : optimiser les coefficients Z5/6 et Z7/8 de Zernike pour l'astigmatisme et la coma hors-axe. Le FAFL (*field asymmetric, field linear*) est la composante linéaire en champ de l'astigmatisme, et FC coma (*field-constant*) est la composante constante en champ de la coma. Dans la plupart des cas, il s'agit des deux aberrations les plus importantes du système de départ.
- Filtre 2 : “the focal plane tilt intrinsic to the tilted system must decrease as a result of using a coma shape on a surface after the stop to correct the FAFL astigmatism and FC coma”. Ce second filtre est complémentaire du premier : il est possible que le premier soit validé, au prix de dégrader d'autres aspects du système. Ici, ils ont choisi de se concentrer sur l'orientation du plan image, qui peut être affecté par la correction de la coma par un dioptré situé après le diaphragme. Un bon point de départ permet donc de corriger la FC coma et le FAFL astigmatisme tout en préservant une surface image orthogonale à l'axe optique.
- Filtre 3 : “the specific form of the geometry that meets the flat-field condition must be well-behaved, indicated by moderate mirror tilts and speeds”. Cette condition de champ plan est directement reprise de l'analyse faite pour les systèmes sur l'axe, afin de corriger la courbure de champ : avoir les courbures pour les différents dioptrés qui ne soient pas trop fortes. En hors-axe, s'ajoute aussi l'importance des tilts modérés, puisque ce sont eux qui induisent les aberrations hors-axe, dont la courbure.

Dans cette partie, je m'intéresse en particulier au troisième filtre qui correspond à l'analyse faite sur la correction de la courbure de champ hors-axe (voir 3.3.1). En résumé, comme la courbure de champ se corrige prioritairement avec les indices optiques et que la majorité des systèmes *freeform* utilisent du plastique moulé ou des miroirs, le travail sur les indices et peu ou pas réalisable pour corriger la courbure de champ. Dès lors, un système qui afficherait une forte courbure au départ est considéré comme un mauvais point de départ, si on n'a pas accès à la mise en courbure du composant.

Le but de cette partie est d'étudier l'influence des composants courbes sur la sélection des points de départ en optique *freeform*. Dit autrement, le dernier filtre peut-il être éliminé de l'analyse des points de départ ?

### 3.3.2.1 Présentation des systèmes

Pour être exhaustif, Bauer *et al.* décrivent toutes les géométries possibles à partir de 3 miroirs (voir Figure 3.31). Ils décrivent d'abord leur démarche pour obtenir les points de départ, puis classent les systèmes selon les trois filtres. Ensuite, ils montrent une optimisation complète de deux systèmes, le « a » et le « d » des Figure 3.30 et Figure 3.31, pour montrer que le point de départ choisi mène bien à un meilleur système.

A noter que cette publication est complémentaire des autres travaux sur les systèmes TMA hors-axe, puisqu'il ne s'agit pas ici d'étudier tous les TMA possibles. Les systèmes étudiés sont les huit géométries respectant plusieurs contraintes : premier miroir est le diaphragme du système ; configuration positive, négative, positive (PNP) ; le plan illustrant les systèmes sur la Figure 3.31 est un plan de symétrie pour les systèmes. Par ailleurs, les caractéristiques optiques de ces systèmes sont : focale de 200 mm, ouverts à F/3 et avec un champ total de 4°x4°. Le volume maximal du système doit être de 60 L, mesuré sous forme de boîte, avec au maximum 1% de distorsion.

Bien que ces systèmes ne sont pas des systèmes visuels, nous les reprenons afin de comparer le classement des huit géométries avec et sans le troisième filtre. Plus de détails sont donnés sur la mise en place de ces systèmes optiques dans l'annexe « Utilisation didactique de ZOS ».

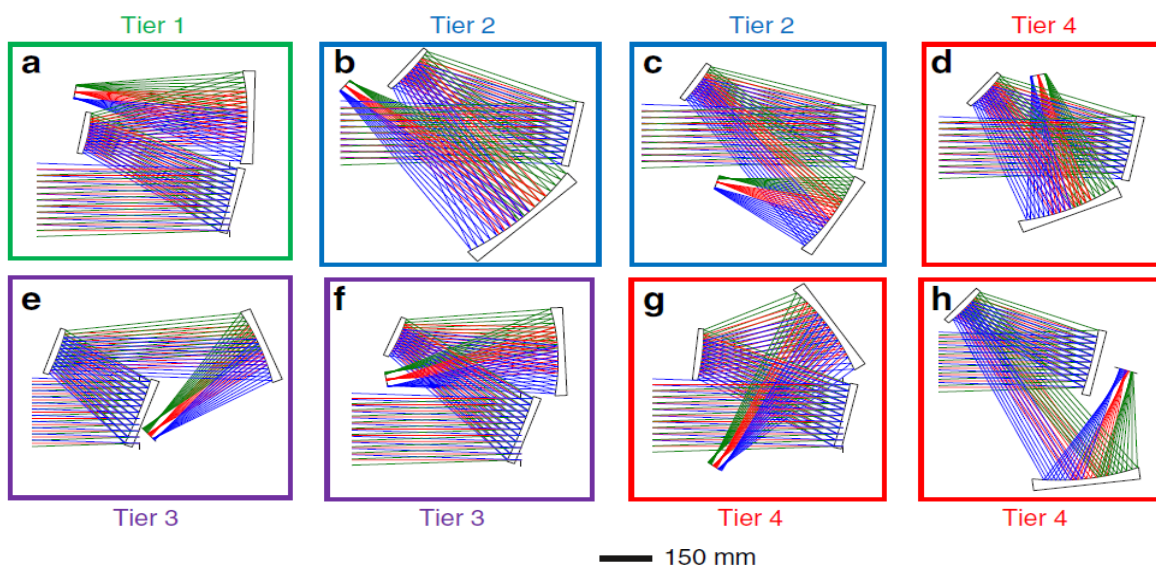


Figure 3.30 - Les 8 géométries possibles à partir de 3 miroirs, image issue de [79].

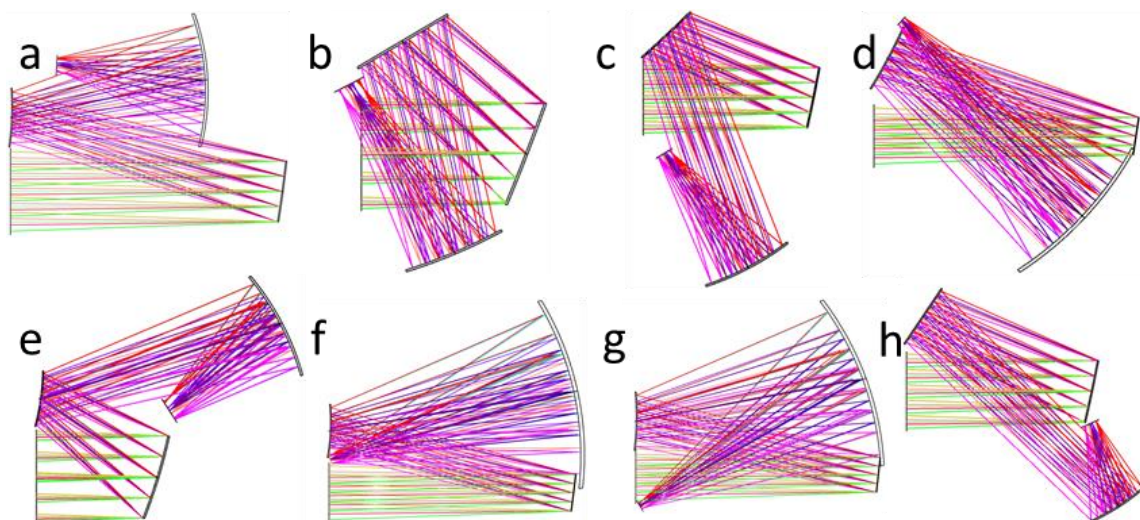


Figure 3.31 – Equivalents des systèmes de la Figure 3.30, repris dans ZOS pour cette étude.

### 3.3.2.2 Classement des systèmes

#### 3.3.2.2.1 Classement avec les trois filtres

A partir des fichiers initiaux décrits à la Figure 3.31, on peut calculer dans chaque cas les valeurs des trois filtres. Si la publication de référence détaille précisément la création des points de départ, peu de précisions sont données sur le calcul des valeurs des trois filtres, ainsi que sur la méthode de classement des systèmes.

Je créé donc, à partir des indications de la publication, une méthode pour calculer les valeurs de chaque filtre.

Le premier filtre correspond à la variation de la FC coma et FAFL astigmatisme. Pour chaque géométrie, je créé un premier fichier, pour lequel j'ai optimisé avec les coefficients Z5 et Z6. Puis un second avec une optimisation sur les coefficients Z7 et Z8. Ensuite, un programme Matlab utilisant le ZOS-API extrait des fichiers l'amplitude et le signe des aberrations d'astigmatisme et de coma par les FFD. Si la valeur de sortie de la fonction est positive, cela signifie que l'orientation des aberrations est identique entre les deux optimisations, ce qui est le cas favorable. Enfin, plus la valeur absolue du filtre est grande, plus la correction sur les coefficients Z7 et Z8 a été efficace. Mais les aberrations peuvent demeurer élevées car initialement très grandes.

Le second filtre correspond à l'orientation de la surface image avant et après optimisation pour la coma. La valeur est l'angle d'orientation de la surface image par rapport au rayon principal du champ central, obtenu avec la fonction de mérite. Comme la valeur de l'angle de tilt doit diminuer, en faisant la différence entre les deux, la valeur numérique du filtre 2 est négative si le système varie dans le bon sens.

Le dernier filtre est la condition de champ plat. Il est mesuré après la correction de l'astigmatisme et de la coma. Je mets en variable le rayon de courbure de la surface image et l'optimise en sphérique. Selon les remarques faites au 3.3.1.2.1, le système peut aussi bénéficier d'une courbure biconique. Donc je convertis ensuite la surface image en « *biconic* » et optimise. Enfin, au vu des dimensions des surfaces images, 20 mm de diagonale, un rayon de courbure de plus de 150 mm est arbitrairement considéré comme respectant la condition de champ plat.

Les résultats pour les huit systèmes sont présentés au Tableau 3.2.

système	Filtre 1	Filtre 2	Filtre 3
a	42.1	-6,6	plan
b	11.8	-9,3	plan
c	0.6	-8,6	plan
d	-1.1	12,5	plan
e	1	-33,3	plan
f	0	0	plan
g	236.9	7,2	non plan
h	-16.5	-17,5	non plan

Tableau 3.2 – Valeurs des trois filtres pour chaque système. Vert : bon point de départ, Rouge : mauvais point de départ, Orange : ni bon ni mauvais.

Le classement entre les 4 groupes (en reprenant l’appellation tier X de la publication) se fait selon la couleur de chaque filtre. Selon cette méthode de classement, je peux comparer les résultats obtenus par ma méthode à ceux publiés par Bauer *et al*, c’est ce que représente le Tableau 3.3.

	nombre de case de couleur			Système	Classement de Bauer et al.	Classement de mes systèmes
	verte	orange	rouge			
Tier 1	3	0	0	a	1	1
Tier 2	2	1	0	b	2	1
Tier 3	1	1	1	c	2	2
Tier 4	0	1	2	d	4	4
				e	3	2
				f	3	3
				g	4	4
				h	4	4

Tableau 3.3 – Gauche : comparaison des classements des systèmes obtenus entre la publication et ceux refais. Les systèmes b et e ont changé de catégorie. Droite : méthode de classement des systèmes.

La première remarque à faire est que si le classement n’est pas identique, il demeure assez proche. Deux systèmes (b et e) sont surclassés d’un niveau. Les méthodes de calcul des trois filtres, ou la méthode de classement peuvent expliquer ces légères différences. Il apparaît donc que nous retrouvons bien globalement les résultats présentés dans la publication.

### 3.3.2.2 Analyse du troisième critère et nouveau classement

Maintenant que je me suis assuré que mes résultats sont cohérents avec ceux de la publication, j’étudie le troisième critère : la courbure de la surface image permet-elle de remettre en cause d’importance du troisième critère ? Pour répondre à cette question, je présente les valeurs de rayons de courbure obtenus pour chaque système au Tableau 3.4.

Système	Sphérique	Biconique		Analyse sphérique	Analyse biconique
	R (mm)	Ry (mm)	Rx (mm)		
a	-177	-82	66	plan	biconique
b	-388	-245	-523	plan	plan
c	1 E+06	3 E+04	-123	plan	cyлинд. faible
d	-192	-192	-35	plan	cyлиндrique
e	2 260	-63	-5 630	plan	cyлиндrique
f	9 E+22	-6 629	19	plan	cyлиндrique
g	-40	-51	-27	sphérique	biconique
h	55	37	12	sphérique	biconique

Tableau 3.4 – Rayons de courbure pour chaque système, en sphérique et en biconique. Le code couleur est le même que précédemment.

Ces résultats confirment l’analyse réalisée sur la pertinence des courbures non sphériques pour l’analyse des systèmes hors-axe. La condition de champ plat énoncée dans la publication ne précise pas comment ils l’ont évaluée. Ce point est important, en particulier pour le système a. On constate qu’avec une optimisation sphérique, le rayon de courbure optimal est de -177 mm. Cette valeur est ici considérée comme assez grande pour que la condition de champ plat soit respectée. En revanche, lorsqu’on optimise en biconique, on s’aperçoit que les deux rayons de courbure sont de signes opposés, il s’agit donc d’une forme en selle de cheval. Il s’agit donc d’un cas assez proche de l’exemple de la partie 3.3.1.2.1, où le sphérique presque plan est un mauvais compromis entre les courbures selon x et selon y. Pour ce système, on peut donc affirmer que la condition de champ plat n’est pas respectée, mais qu’elle ne se manifeste que lorsque la surface image a les degrés de libertés suffisant pour le montrer. Ainsi, en intégrant l’analyse selon une courbure biconique plutôt que sphérique, le classement des meilleurs systèmes est donné dans le Tableau 3.5.

Système	Condition de champ plat sphérique	Condition de champ plat biconique
a	1	2
b	1	1
c	2	3
d	4	4
e	2	3
f	3	4
g	4	4
h	4	4

Tableau 3.5 – Classement des systèmes selon la manière dont on considère la condition de champ plat.

En passant du critère sphérique au critère biconique, quatre systèmes (a, c, e et f) sont déclassés d’un niveau. En particulier, le système a, qui était le meilleur pour Bauer *et al*, n’est plus le meilleur.

On peut donc conclure qu’il y a effectivement des modifications dans le classement des systèmes selon la manière de prendre en compte le troisième filtre.

Mais on peut aller encore plus loin : la technologie de courbure permet de corriger directement la courbure de champ, relativisant ainsi l’importance du troisième filtre. On s’interroge donc sur le classement des huit systèmes si on ne tient pas compte du troisième filtre, c’est-à-dire si l’on autorise la courbure de la surface



image. Dans ce cas, il faut repenser la méthode de classification des systèmes dans les quatre « tiers », puisqu'il n'y a plus que deux filtres sur lesquels s'appuyer. On peut alors proposer un nouveau classement, selon les filtres 1 et 2, comme le présente le Tableau 3.6.

				Filtre 1	Filtre 2	Classement avec 2 filtres	
				a	42	-7	1
				b	12	-9	1
				c	1	-9	2
				d	-1	13	4
				e	1	-33	2
				f	-2 E-11	0	3
				g	237	7	3
				h	-17	-17	3
		nombre de case de couleur					
		verte	orange	rouge			
Tier 1	2	0	0				
Tier 2	1	1	0				
Tier 3	0	1 ou 2	0 ou 1				
Tier 4	0	0	2				

Tableau 3.6 – Gauche : méthode de classement. Droite : Rappel des filtres 1 et 2 et classement. Cases bleues : systèmes changeant de catégorie par rapport au classement à critère biconique du Tableau 3.5.

Ce nouveau classement provoque de nombreux changements. Les systèmes g et h, qui étaient précédemment dans le Tier 4 profitent de la courbure pour avoir un potentiel plus intéressant en tant que point de départ. De plus, le système a se situe de nouveau dans le meilleur groupe avec le système b.

En conclusion, selon une analyse comparable à celle de Bauer *et al*, l'utilisation de la courbure de surface image permet d'ouvrir de nouvelles possibilités pour ce type de système optique. En revanche, le classement n'en est pas pour autant bouleversé : les systèmes les moins prometteurs le demeurent. Mais ils sont tout de même plus prometteurs avec la courbure que sans.

### 3.3.2.2.3 Optimisations complètes de trois systèmes

Parmi tous les systèmes classés, je réalise l'optimisation de trois systèmes : a, b et g.

Le système a est choisi car c'est la référence de Bauer *et al*, et que la courbure a eu une influence forte sur la manière de le catégoriser. Mener les optimisations jusqu'au bout, en autorisant une courbure biconique semble donc pertinent pour comparer les performances totales à celles rapportées dans la publication.

Le système b est choisi car, selon mes critères, il fait aussi parti des points de départs prometteurs. Les performances des systèmes a et b sont-elles proches ? Puisqu'il respecte la condition de champ plat, on s'attend à ce que la courbure ne modifie pas significativement les performances.

Enfin, le système g est choisi car il présente une curieuse caractéristique : selon le filtre 1, il s'agit du système le plus prometteur, mais au prix d'un tilt de la surface image important. Mener l'optimisation permet d'évaluer l'importance relative de ces critères.

Par ailleurs, je profite de ces optimisations pour comparer la courbure finale de la surface image à la courbure initiale, du Tableau 3.4. La question qui se pose est : la courbure envisagée au niveau du point de départ représente-t-elle vraiment une caractéristique intrinsèque du système ?

Comme je cherche ici seulement à discuter la suppression du filtre n°3 de l'analyse des points de départs, je reprends la même méthode d'optimisation que celle de Bauer *et al*. Cette méthode, utilisé dans tous les systèmes suivants, est décrite plus en détails dans l'annexe « Utilisation didactique de ZOS ».

## 3.3.2.2.3.1 Système a

Pour ce système, on s'attend à ce qu'il existe des différences entre l'approche utilisant un capteur courbe et celle utilisant un capteur plan.

De façon générale, pour ces deux approches, les étapes sont très proches de celles décrites dans la publication de Bauer *et al.* Comme le système b sera nettement détaillé par la suite, je présente directement les systèmes finaux. La Figure 3.32 montre ces systèmes finaux et la qualité image.

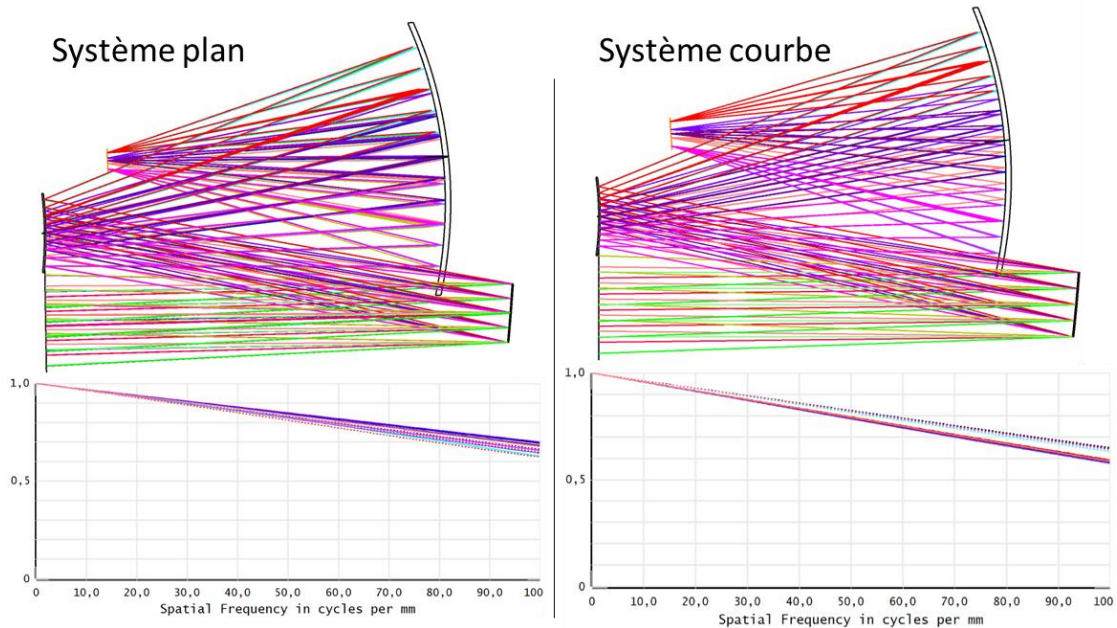


Figure 3.32 – Schéma des deux systèmes avec leur MTF. Le grand miroir semble couper les rayons mais ce n'est qu'un problème de présentation, les rayons ne sont pas coupés.

Si les systèmes ne sont pas identiques, il y a peu de différence entre les deux. Il y a donc peu d'intérêt à utiliser la courbure dans ce système pour améliorer les performances du système.

Pour analyser plus en profondeur ce système, le tableau suivant montre l'évolution des rayons de courbure en fonction de l'avancée des optimisations. Comme la courbure autorisée est biconique, sa représentation graphique n'est pas facilement lisible. Aucune contrainte n'a été imposée sur la valeur des rayons de courbure.

En observant ces valeurs, on remarque que les valeurs de courbure se stabilisent après quelques étapes vers des formes convexes peu courbées. Si les valeurs varient, il s'agit dans tous les cas de courbure peu agressives, jusqu'à être quasi plan. Pour vérifier l'importance de ces rayons de courbure, il suffit de les enlever : la qualité image se dégrade fortement. Mais une optimisation suffit à retrouver une bonne qualité image pour un capteur plan. Le système est donc sensible à la forme du capteur, mais n'a pas besoin en son état final d'un capteur courbe. Cependant, la différence entre les deux résultats laisse supposer (bien que cet exemple ne suffise pas comme démonstration) que la possibilité la courbure du capteur ait permis un chemin d'optimisation singulier qui donne *in fine* un meilleur résultat, où la courbure est presque inutile.

Par ailleurs, on remarque avec étonnement que le rayon de courbure final des optimisations est assez éloigné de celui prévue initialement pour la définition du critère n°3 : 1104 x -3562 à l'étape finale à comparer à -81 x 66 mm initialement, comme le montre le Tableau 3.7.



n° étape	étape d'optimisation	Ry	Rx
1	point de départ	inf	inf
2	astigmatisme	inf	inf
3	coma	inf	inf
4	courbure en variable	57,80	103,60
6	géométrie	-141,60	-106,00
7	conique	-615,60	-290,10
8	coma elliptique	-160,00	-104,00
9	coma 5e ordre	-333,00	-145,00
10	5e sphérique	1025,00	-128,00
11	7e sphérique	-454,00	-188,00
12	3e sphérique	-537,00	-419,00
13	asphère 4e ordre	-644,00	-560,00
14	optimisation globale	1104	-3562

Tableau 3.7 – Valeur des rayons de courbure du capteur en fonction des étapes d'optimisation.

Le critère 2 peut aussi être comparé entre son état initial et final. Dans le système final, je supprime la contrainte sur l'angle de tilt du capteur pour voir si le système pourrait être amélioré par ce biais. Le système courbe passe de 2° à 2.04°, tandis que le système plan passe de 5° à 6.9°. On peut donc dire que l'angle de tilt n'impose pas de contrainte forte sur les deux systèmes finaux, et que l'ordre de grandeur de l'angle de tilt entre le point de départ et le système final est proche (moins de 10°).

Le point qu'il convient de comparer entre les deux systèmes est le degré de « *freeform* », c'est-à-dire l'écart à la forme de base qu'apportent les coefficients de Zernike et d'asphérisation au système optique, nommé « *freeform departure* » dans la publication. Pour calculer ce chiffre, je calcule la différence de sag pour chaque miroir entre sa forme finale après optimisation et lorsque je réduis à zéros tous les coefficients de Zernike et les coefficient d'asphérisation. La surface est échantillonnée en 65x65 points et la différence de sag est calculée pour chaque portion. L'écart à la forme de base (ou le *freeform departure*) est la somme de tous les écarts. Si la publication de Bauer *et al* donne des valeurs numériques pour l'écart à la forme de base, je ne connais pas la méthode de calcul. Il n'est donc pas possible de comparer les valeurs. Le but de ces valeurs est juste d'analyser mes fichiers. Le résultat est présenté dans le tableau suivant.

Miroir	Ecart cumulé à la forme de base (mm)	
	Système courbe	Système plan
M1	27	47
M2	1 313	2 182
M3	17 441	12 887
Moyenne	6 260	5 039

Tableau 3.8 – Ecart à la forme de base en mm.

Si le système courbe est en moyenne plus compliqué à fabriquer que le système plan, les miroirs 1 et 2 paraissent plus faciles à fabriquer dans le cas courbe. Cette analyse pourrait être approfondie, mais la prise en compte du tolérancement et la discussion avec un fabricant dépassent les objectifs de cette partie.

In fine, les optimisations avec capteur plan et courbe sont proches, à la fois dans la méthode, mais aussi dans les résultats finaux. L'hypothèse de départ était que la courbure pouvait améliorer ce système puisque la condition de champ plat n'était pas respectée (avec un capteur biconique), comme indiqué au Tableau

3.5. Cette hypothèse n'est pas vérifiée suite aux optimisations. Bien que la courbure ait une influence importante sur la façon de catégoriser ce système, elle modifie peu les résultats. Ceci peut se comprendre aussi dans le sens où la qualité image était déjà excellente avec un capteur plan, il y avait donc peu de place pour une amélioration.

### 3.3.2.2.3.2 Système b

Le système b n'étant pas présenté dans la publication de Bauer et al, j'en détaille l'optimisation ici. Ce système est vu comme un bon point de départ par Bauer *et al.*, mais moins bon que le a. Selon mon classement, ce point de départ est prometteur. Cependant, comme la condition de champ est respectée initialement, on s'attend à ne pas trouver de différence significative liée à l'usage d'un capteur courbe.

Le point de départ, avant l'introduction des coefficients de Zernike, est meilleur que le point de départ du système a. La Figure 3.33 montre le système initial ainsi que sa qualité image.

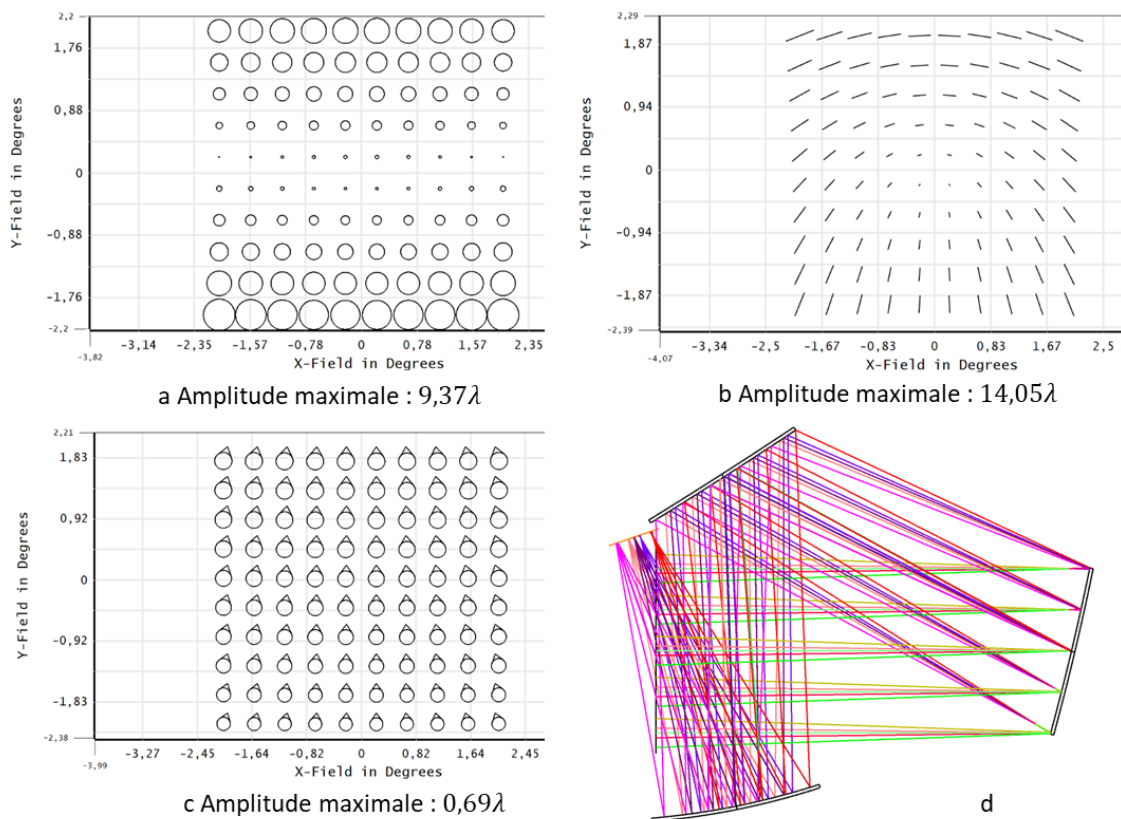


Figure 3.33 – Full-Field Display (FFD) du point de départ du système b. a : defocus, b : astigmatisme, c : coma. d : schéma du point de départ.

Les premières étapes sont identiques à celles du système a : optimisation sur l'astigmatisme, la coma, ainsi que l'aberration sphérique, puis la géométrie du système. Suite à cela, la qualité image est déjà grandement améliorée, et les aberrations hors-axe suffisamment réduites (d'un facteur 10 environ comme le montre la Figure 3.34) pour que les aberrations à symétrie de révolution deviennent prioritaires.

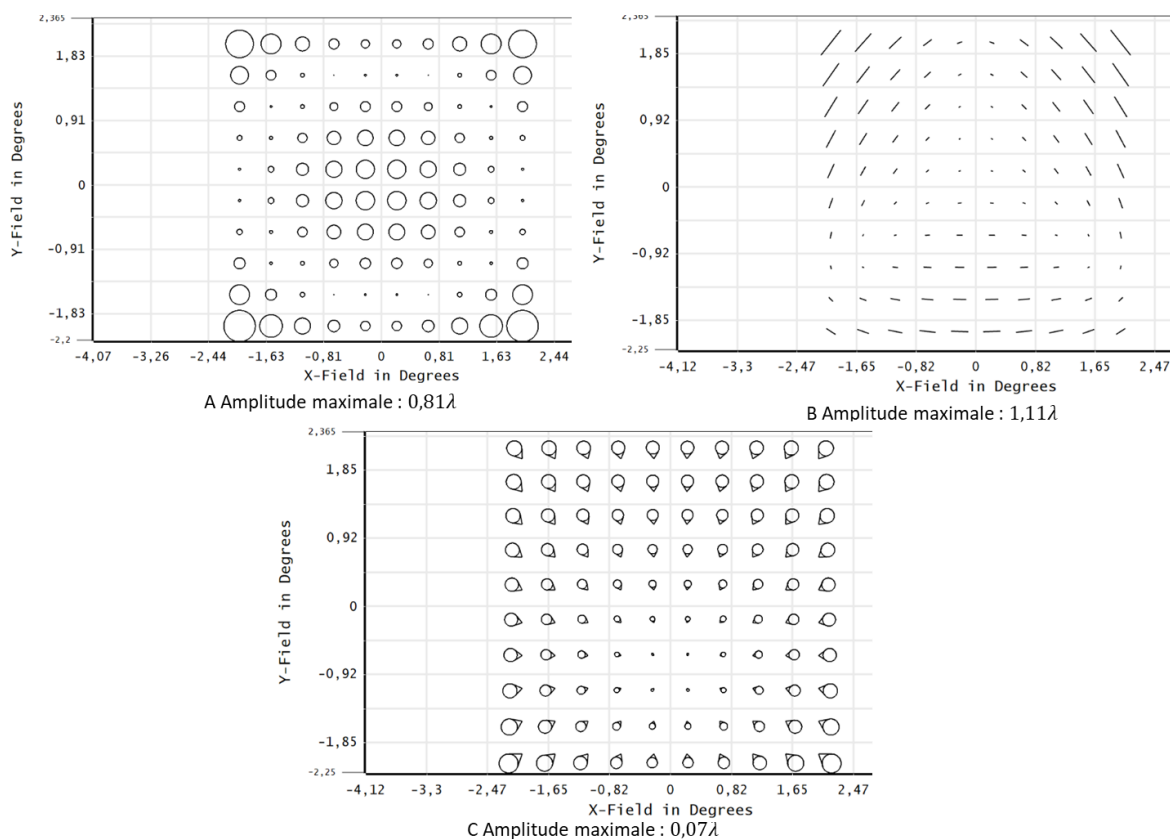


Figure 3.34 – FFD du système *b* après optimisation sur l’astigmatisme, la coma, l’aberration sphérique et la géométrie. A : defocus. B : astigmatisme. C : coma.

A ce stade, les trois aberrations sont assez bien centrées. Ce sont donc les aberrations sur l’axe qu’il convient désormais de réduire. Le defocus présente clairement une courbure puisque le centre est hors focus, et les bords aussi, mais un anneau est bien focalisé. Il n’y a pas dans ZOS d’autre méthode de visualisation qui permettrait peut-être de rendre la présence de courbure de champ plus explicite pour le lecteur. La Figure 3.35 explicite la forme de l’aberration telle qu’elle apparaît sur le FFD.

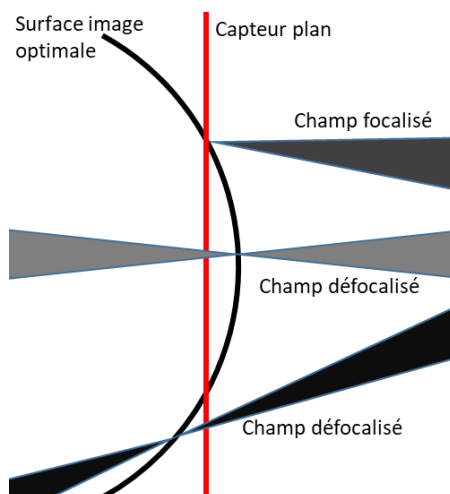


Figure 3.35 – Illustration pour comprendre la forme de la figure de FFD du defocus.

C'est donc à cette étape qu'il apparaît pertinent d'introduire la courbure du capteur. Je commence par une courbure sphérique car c'est la plus simple à mettre en œuvre, et que le FFD du défocus (montré à la Figure 3.36) ne montre pas particulièrement le besoin d'une autre forme de courbure.

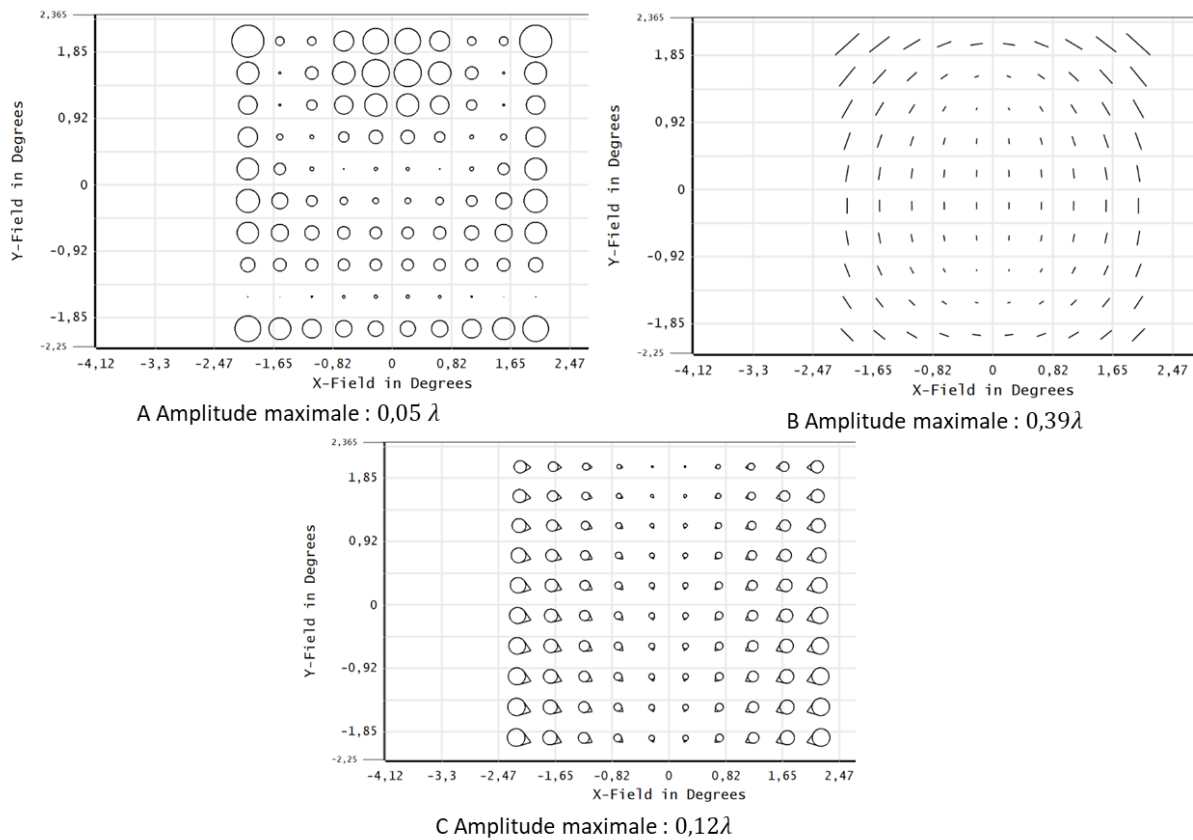


Figure 3.36 – FFD suite à l'optimisation sur la courbure sphérique du capteur.

a : defocus. b : astigmatisme. c : coma.

Le rayon de courbure issu de l'optimisation vaut  $R = -168 \text{ mm}$ . La courbure du capteur a effectivement permis de diminuer significativement à la fois le défocus et l'astigmatisme (environ d'un facteur 16 et 2,4 respectivement), mais a en même temps augmenté la coma d'un facteur 1,7. A noter au passage que ce rayon de courbure aurait été considéré comme plan selon les critères initiaux. Par ailleurs, mis à part l'ajout d'une lentille de champ, je ne vois pas comment j'aurais pu traiter le défocus autrement qu'avec la courbure du capteur.

A ce stade, des aberrations d'ordre supérieur ne sont plus négligeables devant les aberrations présentées sous forme de FFD. Il est important de commencer à analyser le système non plus seulement sous la forme des FFD, mais aussi avec une méthode d'évaluation de la qualité image globale. Dans ce cas, j'utilise la MTF, comme on le voit avec la Figure 3.37.

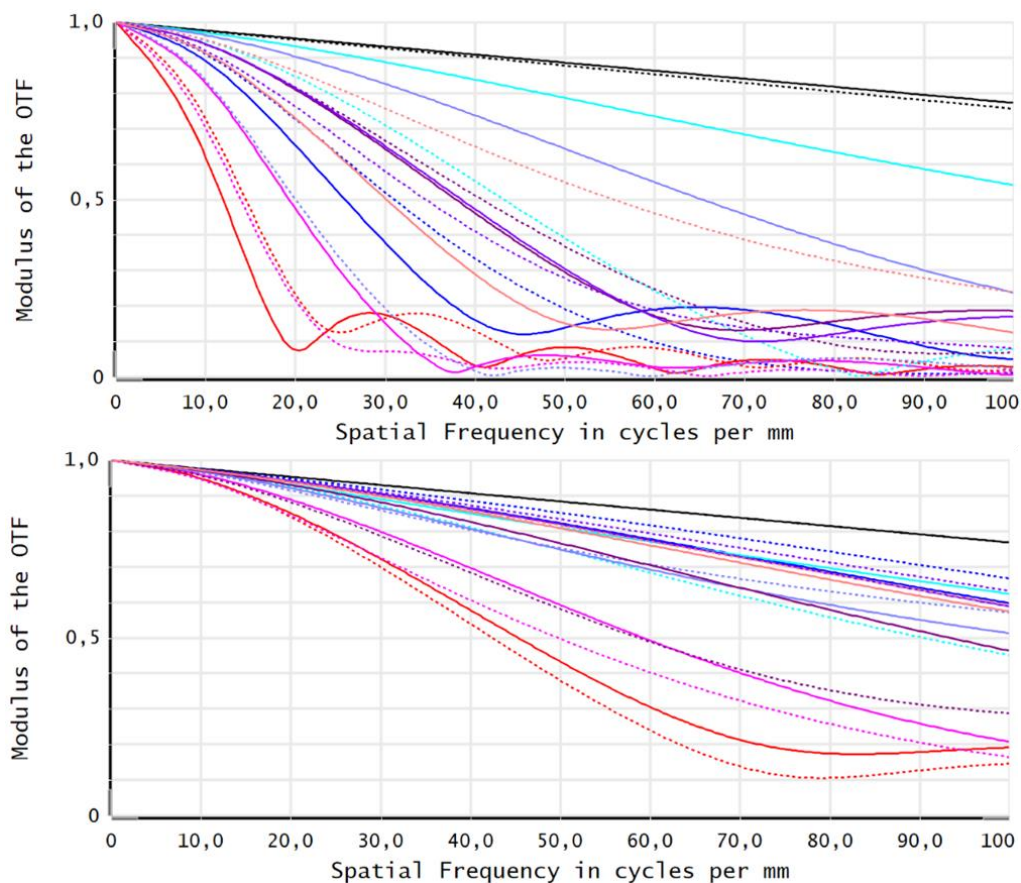


Figure 3.37 – Comparaison de la qualité image par la MTF du système b avant (haut) et après (bas) l'introduction de la courbure du capteur.

C'est l'évaluation de la qualité image globale qui permet d'éviter de se demander si vraiment l'introduction de la courbure est une bonne chose au regard de l'augmentation de la valeur de la coma. On peut affirmer avec ces courbes de MTF que la courbure sphérique a fortement amélioré le système.

Puis, en analysant le FFD du défocus (représenté à la Figure 3.36), on s'aperçoit que le défocus n'est plus à symétrie de révolution. En particulier, on remarque que les champs minimal et maximal selon x semblent être moins en focus que les autres points. Pour vérifier si cette remarque est juste, j'introduis une courbure biconique pour le capteur. Il est possible que ce degré de liberté supplémentaire permette d'améliorer le point de focalisation pour ces champs.

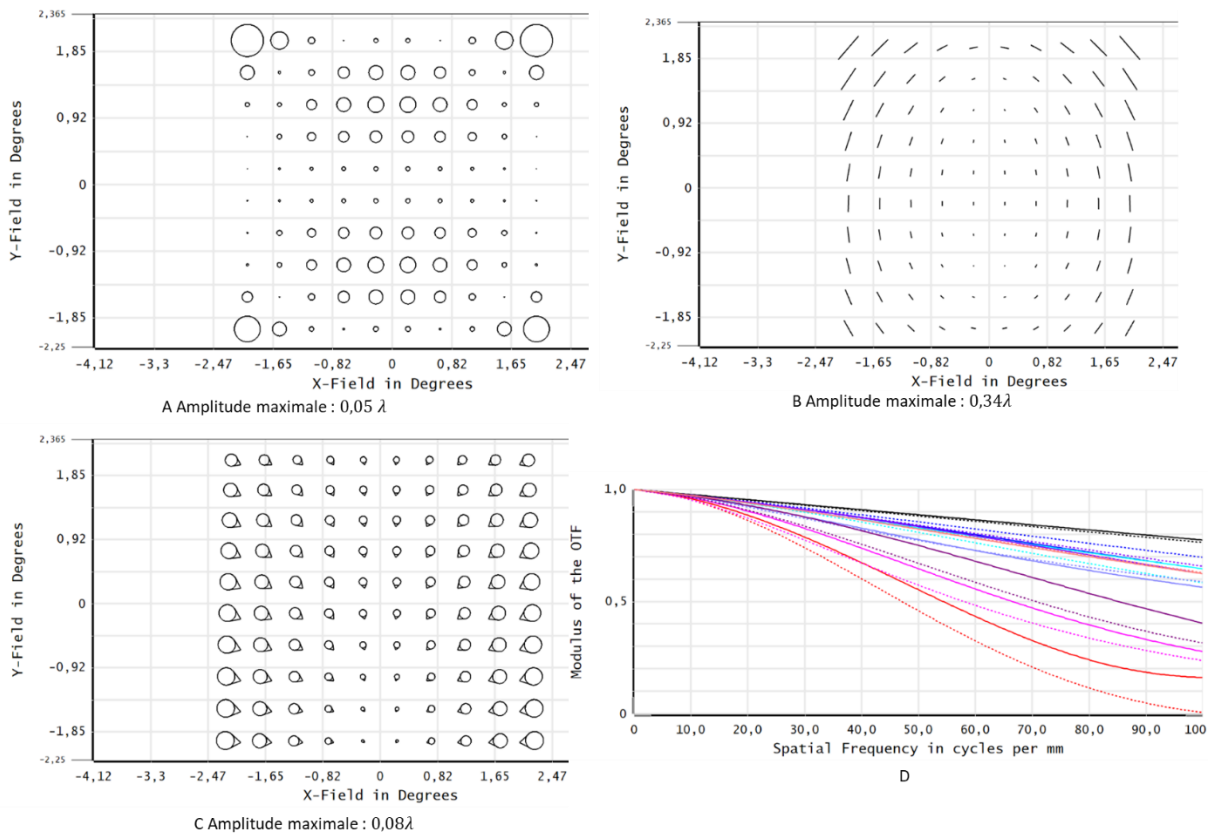


Figure 3.38 – FFD suite à l’optimisation avec la forme biconique pour le capteur.

A : defocus. B : astigmatisme. C : coma. D : MTF.

Le rayon de courbure sphérique était de  $R = -168\text{ mm}$ , les rayons de courbure biconiques sont  $R_x = -168\text{ mm}$  et  $R_y = -203\text{ mm}$ . On s’aperçoit que le défocus à une meilleure symétrie grâce à la courbure et que la coma est nettement améliorée. Je dois cependant préciser que je ne peux pas vraiment expliquer pourquoi la courbure biconique a permis d’améliorer la coma. On peut vraisemblablement penser que ce degré de liberté supplémentaire a permis à l’optimisateur de trouver une meilleure solution globale. On s’aperçoit aussi que la qualité image globale, mesurée par la MTF est aussi améliorée. Cela ne se perçoit pas à  $100\text{ cy/mm}$ , mais se perçoit aisément à  $50\text{ cy/mm}$ . Je conserve donc la courbure biconique.

A ce stade, il faut surtout rechercher les aberrations d’ordre supérieur qui dégradent le plus la qualité image, en analysant tous les FFD et en cherchant une aberration particulièrement problématique. Ce sont les coefficients de Zernike Z12 et Z17 qui fonctionnent ici (voir annexe 7). Cette recherche couplée à des changements dans la fonction de mérite, pour modifier les critères de qualité image (voir chapitre 5), on obtient rapidement un système quasi limité par la diffraction (voir Figure 3.39). Le tilt du capteur est de  $0,8^\circ$ , et ses rayons de courbure sont  $R_x = -126\text{ mm}$  et  $R_y = -166\text{ mm}$ . Je décide d’arrêter à ce stade les optimisations car la qualité image est déjà excellente. A noter que je n’ai pas eu à introduire de coefficients d’asphérisation dans le système.

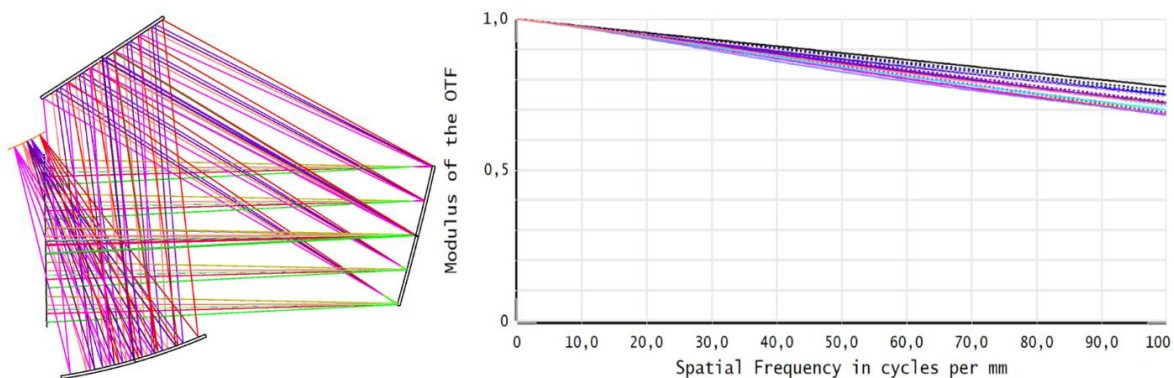


Figure 3.39 – Version finale du système b avec courbure de capteur. Gauche : système. Droite : MTF.

Les valeurs de courbures au fil des optimisations sont présentées dans le tableau suivant. On remarque qu’au total, les valeurs de courbure ne varient pas énormément au fil de la conception, elles s’ajustent tout en gardant une forme globale assez similaire. Par ailleurs, la courbure biconique trouvée pour calculer la condition de champ plan était de -522 x -255 mm, tandis que le système final affiche une courbure de 126 x 166 mm. Donc la courbure a finalement été globalement conservée par les optimisations comme le montre le Tableau 3.9. Il est à noter que pour un capteur qui mesure un peu plus de 10 mm de côté, les valeurs de courbures sont tout à fait réalistes mécaniquement (voir chapitre 4).

n° étape	Ry	Rx
1	inf	inf
2	inf	inf
3	inf	inf
4	inf	inf
6	-168	-168
7	-150	-203
8	-129	-170
9	-126	-166

Tableau 3.9 – Evolution des rayons de courbure du capteur en fonction des étapes d’optimisations. Toutes les étapes ne sont pas représentées dans cette description.

Maintenant que nous en avons fini avec la version utilisant un capteur courbe, nous reprenons les optimisations avec un capteur plan uniquement. Mais comme pour le système a, dans le cas du capteur plan, nous autorisons un angle de tilt jusqu’à 5° contre 2° pour le système à capteur courbe.

Les étapes d’optimisations sont relativement similaires. Je ne les détaille donc pas. A noter simplement que des optimisations globales ont été nécessaires pour sortir le système d’un minimum local. Par ailleurs, si les étapes sont similaires, dans le cas du système plan, il a fallu plus de coefficients *freeform* et asphériques pour obtenir la même qualité image, comme le montre le Tableau 3.10. In fine, l’écart à la forme de base est globalement plus réduit dans le cas courbe que dans le cas plan. A priori, il semble que le miroir M1 du système courbe serait plus facile à fabriquer que son équivalent dans le système plan comme le montre le Tableau 3.10. Mais de même que le système a, ces valeurs ne sont données qu’à titre indicatif.



	coefficient utilisé ?	
	système courbe	système plan
conique	non	oui
z4	oui	non
z5	oui	oui
z8	oui	oui
z9	oui	non
z11	non	oui
z12	oui	oui
z15	non	oui
z17	oui	oui
z20	non	oui
z21	non	oui

Miroir	Ecart cumulé à la forme de base (mm)	
	Système courbe	Système plan
M1	40	3 206
M2	3 233	3 154
M3	4 316	3 170
Moyenne	2 529	3 177

Tableau 3.10 – Gauche : comparaison des coefficients utilisés entre le cas courbe et le cas plan. Droite : tableau donnant les écarts à la forme de base par les coefficients freeform pour chaque miroir.

L’optimisation de ce système produit un système optique fonctionnel, avec un tilt du capteur de 2.9°, ce qui pourrait légèrement diminuer l’homogénéité de l’éclairage. La Figure 3.40 montre le système plan final.

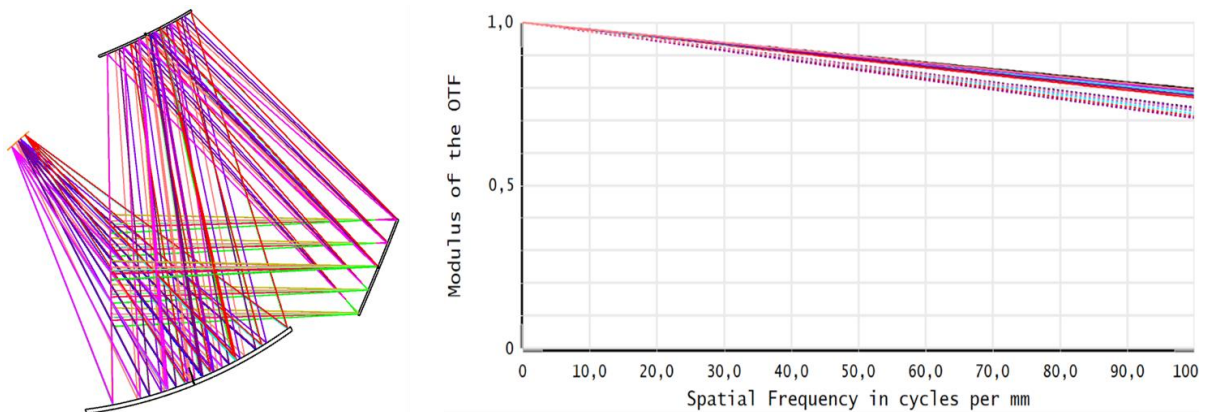


Figure 3.40 – Gauche : Illustration du système final avec capteur plan. Droite : MTF du système final.

Dans le cas du système b, la courbure a une influence plus importante que dans le système a. La solution finale courbe est assez différente de la solution plane, bien que les performances en termes de qualité image soient relativement similaires.

Au total, d’un point de vue subjectif, après avoir optimisé les systèmes a et b, il me semble que les deux ont un fort potentiel en termes d’imagerie, mais que le système b a peut-être été sous-évalué par Bauer *et al.* à cause du critère de champ plan.

Cependant, contrairement à ce qui était attendu initialement, le système courbe semble offrir un certain potentiel par rapport au système plan puisque les optimisations ont été beaucoup plus rapides et performantes. Cela reste un avis subjectif de concepteur.

### 3.3.2.2.3.3 Système g

L’optimisation du système g a été beaucoup plus fastidieuse que les précédentes. Puisque celle du système b a été fortement détaillée, je me permets d’aller plus vite car la procédure demeure proche.

Parmi les remarques générales sur cette optimisation, il faut noter que l’optimisation fastidieuse signifie qu’il a fallu beaucoup d’effort presque à chaque étape pour sortir du minimum local où j’étais enfermé.



Beaucoup d'optimisations ont été menées sans produire de résultats, et à de nombreuses reprises, seules les optimisations globales ont permis d'améliorer un peu le système. Le résultat final, présenté à la Figure 3.41, pour les deux systèmes est assez mauvais. Suivant la règle générale en conception optique, je ne peux pas affirmer qu'il n'y a pas de meilleur système, mais que les améliorer demanderait encore un effort démesuré par rapport aux systèmes a et b.

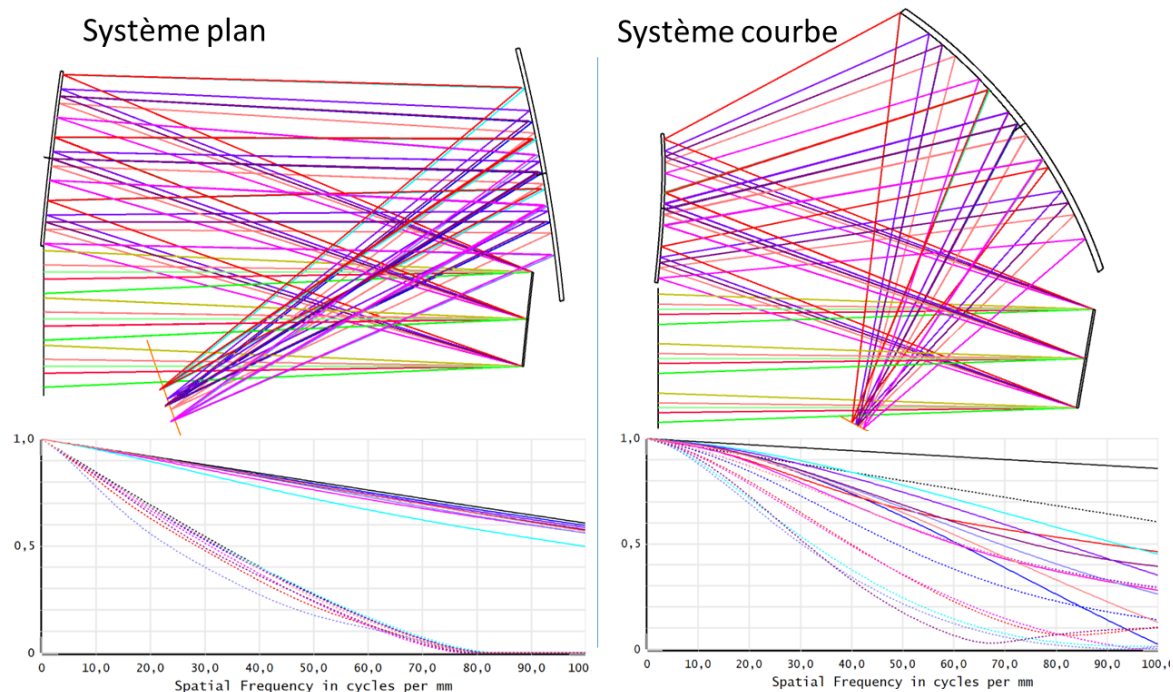


Figure 3.41 – Schéma et MTF des systèmes plan et courbe.

L'écart à la forme de base des dioptries montre que les miroirs sont très déformés par les coefficients *freeform*, sans pour autant avoir de résultat intéressant en qualité image, comme l'indique le Tableau 3.11.

Miroir	Ecart cumulé à la forme de base (mm)	
	Système courbe	Système plan
M1	3 187	3 240
M2	4 618	3 477
M3	4 509	18 333
Moyenne	4 105	8 350

Tableau 3.11 – écarts à la forme de base du système g par les coefficients *freeform* pour chaque miroir.

Enfin, on s'aperçoit en regardant l'ensemble des coefficients *freeform* (Tableau 3.12) que les deux systèmes sont assez proches dans leur optimisation. En revanche, la courbure du capteur varie beaucoup au fil des optimisations, et la valeur vers lequel il semble tendre n'est pas du tout proche de la valeur de départ, qui était -50 x -26 mm.

	coefficient utilisé ?				
	système courbe	système plan			
conique	ordre 4	ordre 8			
z4	oui	oui			
z5	oui	oui			
z8	oui	oui			
z9	oui	oui			
z11	oui	oui	n° étape	Ry	Rx
z12	oui	oui	1	inf	inf
z13	oui	non	2	inf	inf
z14	non	oui	3	inf	inf
z15	oui	oui	4	inf	inf
z17	oui	oui	5	inf	inf
z20	oui	oui	6	-231	-231
z21	oui	oui	7	-218	-218
z24	non	oui	8	-156	-156
z25	oui	oui	9	-289	-152
z27	oui	oui	10	356	-182
z28	oui	oui	11	603	-189
			12	1911	-282

Tableau 3.12 – Gauche : Coefficient freeform utilisés pour les deux version du système g. Droite : rayons de courbure du capteur courbure au fil des optimisations.

Au total, le système g n’est pas un système que je recommanderais, même en utilisant la courbure. En tout cas, il y a un blocage dans l’étude de cette configuration.

En recherchant cet élément, j’ai repris le système à divers niveaux intermédiaires pour faire des essais. En particulier, en analysant la MF, j’ai vu qu’à l’étape 3 où je travaille sur la coma hors-axe, assez tôt dans le design, la MF est composé à 36 % de la contrainte sur le tilt du capteur, à 5 % de la contrainte sur la géométrie, et le reste est lié aux aberrations. En mettant un poids moins important sur les contraintes géométriques qui contribuent à la MF, le système est nettement amélioré en qualité image. En revanche, il ne respecte plus la contrainte de non-obscuration (Figure 3.42). Puis, si je supprime aussi la contrainte sur le tilt du capteur, la contrainte géométrique est de nouveau améliorée (même si cela reste limite), mais le capteur atteint un angle de 38.7 °, ce qui est inacceptable.

Cette expérience montre plusieurs choses. D’abord, on pourrait peut-être en tirer un nouveau critère pour qualifier les points de départ : la géométrie du système est-elle un des freins manifeste de la MF ? Un « frein manifeste » étant entendu comme « les contraintes de géométries sont difficilement respectées par les optimisations, c’est-à-dire qu’elles contribuent à la valeur de la MF ». C’est bien ce que l’on constate pour le système g, et qui n’a pas été du tout constaté pour les systèmes a et b.

Ensuite, on peut s’interroger sur les liens qu’il y a entre l’angle de tilt du capteur et la géométrie du système. L’un a clairement une influence sur l’autre, mais sont-ils liés ou deux faces de la même pièce ? La réponse à cette question est importante pour savoir si le critère sur la géométrie pourrait être intégré. S’il ne s’agit que d’une influence, on peut supposer que ce nouveau critère à sa pertinence, mais s’il s’agit en fait du même critère, formulé différemment, l’intégrer serait redondant.

Quoiqu’il en soit pour la géométrie, dans le cas de ce système, il est clair que le critère sur l’angle de tilt est important et contribue largement à la piètre qualité finale. Le premier critère (FC coma et FAFL astigmatisme), qui était très élevé dans le cas du système g (et c’est la raison de son étude), ne semble pas avoir un rôle majeur dans ce système. Il est possible que le deuxième critère soit si important qu’il empêche le premier d’entrer en jeu.

Enfin, on peut dire que la prédiction de mauvais point de départ est confirmée : le système g ne semble pas intéressant. A noter en revanche que la courbure du capteur semble donner un avantage particulier dans ce cas de figure. Et cela est conforme aux analyses initiales : la courbure a fait passer ce système de la catégorie 4 à la catégorie 3, c'est-à-dire meilleur, mais malgré tout sans potentiel remarquable. Les difficultés de conceptions se matérialisent par la difficulté positionner correctement les dioptries : la qualité image est si mauvaise qu'elle prend un poids démesuré dans la MF, diminuant le poids des critères géométriques. Sur la Figure 3.42, les cercles rouges marquent les endroits où la géométrie n'est pas respectée.

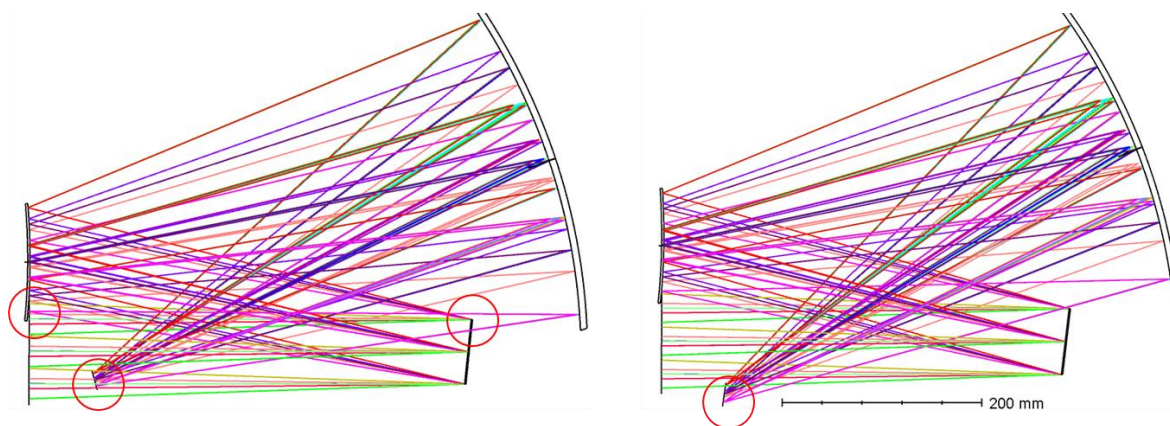


Figure 3.42 – Gauche : optimisation à l'étape 3 sur la coma, en diminuant les contraintes géométriques qui contribuent à la MF. Droite : puis en supprimant en plus la contrainte d'angle de tilt du capteur.

### 3.3.2.3 Discussion et conclusion

L'analyse de ces trois systèmes a mené à de nombreuses questions. Poursuivons-la par une analyse croisée. Avant tout, en comparant les qualités image finales et le comportement des systèmes au fil des optimisations, je pense que le système b est le meilleur des trois, suivi de près par le système a, et loin derrière se trouve le système g. Cette première affirmation est déjà une petite remise en cause de la publication originelle, avec la courbure.

#### 3.3.2.3.1 Analyse du critère n°1

Analysons ensuite les critères des différents systèmes, en commençant par l'importance du critère n°1. Les trois systèmes ont une bonne note pour ce critère, et il est à noter que le système g a la meilleure des trois. Pourtant, il se retrouve finalement bon dernier. Ceci peut s'expliquer de plusieurs façons.

D'abord, on peut penser, comme déjà expliqué dans le paragraphe précédent que la mauvaise note à ce deuxième critère empêche le premier critère de s'appliquer. L'avantage de ce système n'est alors simplement pas exprimé.

Ensuite, une autre hypothèse est que les corrections de l'astigmatisme et de la coma ont simplement besoin de varier dans le même sens pour que ce critère s'exprime, et que la variation soit forte ou très forte n'apporte rien de plus. Ainsi, l'avantage du système g est déjà exprimé, et n'est pas assez intéressant pour rendre le système au moins correct. Si cette hypothèse était validée, on pourrait simplement définir trois niveaux pour ce critère : bon, intermédiaire et mauvais. Avec une telle analyse, le système g aurait été nettement moins intéressant.

Enfin, on peut aussi s'interroger sur la pertinence de ce critère tout court. En effet, pour qu'un critère puisse dès le départ être utilisé pour caractériser un système optique, il faut qu'il lui soit intrinsèque, et que son influence s'étende tout au long de la conception. Ainsi, Bauer *et al* justifient l'utilisation de ce critère en disant que si les deux aberrations sont de signe opposé, l'orientation de la coma constante en champ doit d'abord être inversée, pour ensuite être corrigée, ce qui induit un écart à la forme de base supplémentaire, écartant le système d'une solution simple potentielle. Cependant, il est possible que cette écart de surface supplémentaire soit utilisé par la suite des optimisations comme une base intéressante de correction. Si l'écart à la forme de base finale peut éventuellement servir d'indicateur de simplicité de construction, cette valeur peut-elle être utilisée comme critère aussi tôt dans les optimisations ?

Par ailleurs, ce critère, par construction, ne peut pas être calculé tout au long de la conception du système, puisqu'une fois que ces contributions de FC coma et FAFL astigmatisme ont été corrigés, il n'est plus possible de le calculer. Peut-on alors le considérer comme intrinsèque à la géométrie ?

Pour trancher ces débats, l'étude complète du système h pourrait être menée. Comme ce système a des avantages opposés à ceux du système g, il pourrait apporter une contribution intéressante pour comprendre l'importance du critère n°1. Cependant, au moment d'écrire ces lignes, il ne me reste plus assez de temps pour réaliser ce travail.

#### 3.3.2.3.2 Analyse du critère n°2

La discussion à la fin de l'étude du système g apporte déjà une partie des éléments pour cette analyse. Pour le système g, l'angle de tilt du capteur joue un rôle important dans la difficulté des optimisations à trouver un bon système.

Un point important est que cette difficulté peut être repérée dans la MF, en analysant les opérandes qui contribuent le plus à sa valeur totale. Dans le cas du système g, l'angle de tilt ainsi que la géométrie ont été clairement des points limitants dans les optimisations. La question qui se pose est alors : faut-il ajouter la contrainte sur la géométrie comme un nouveau critère d'analyse du point de départ, ou est-ce un critère équivalent au critère n°2 ?

Pour répondre à cette question, on pourrait commencer par chercher parmi les 5 systèmes non optimisés une configuration où les deux critères seraient dissociés : l'angle de tilt ne pose pas de souci, mais la géométrie oui, ou inversement.

Par ailleurs, on peut s'interroger, comme pour le critère n°1 : pourquoi est-il intrinsèque à un système ? En démontrant cet aspect, on pourrait alors mieux en déduire son importance par rapport à la sélection d'un point de départ. Par ailleurs, on comprendrait alors mieux pourquoi l'amplitude de ce critère serait importante : plus l'amplitude est forte, plus le tilt nécessaire pour corriger la qualité image pourrait être forte, et donc difficile à corriger.

L'étude complète du système h pourrait d'ailleurs être encore une fois utile pour répondre à cette question. Selon ce que l'on a dit ici et précédemment, le système h pourrait être meilleur que le g.

#### 3.3.2.3.3 Analyse du critère n°3

La suppression du critère n°3 a modifié de façon assez importante le classement des huit systèmes. Sa suppression est assez logique lorsqu'on considère qu'il est possible d'utiliser des capteurs courbes. Le premier résultat est lié à l'importance d'analyser la courbure autrement qu'en sphérique pour ces systèmes,

car la moyenne des rayons optimaux selon x et selon y peut mener à un capteur plan, qui n'est qu'une mauvaise approximation de la forme idéale.

Une fois les optimisations menées, la comparaison entre les rayons de courbure utilisés pour définir le critère n°3 et les rayons de courbure finaux montre que la prédiction par le 3<sup>ème</sup> critère n'est pas très fine. Ainsi, au vu des analyses préliminaires, je m'attendais à ce que le système 'a' profite fortement de la courbure tandis que le système b en profite moins, mais c'est l'inverse qui s'est produit. Et bien que les versions du système b avec et sans la courbure soient très proches, la courbure a amélioré ce système. Pour le système g, au vu de la qualité image, on ne peut pas affirmer que la courbure a été utile, donc on n'en tire pas de conclusion.

In fine, en comparant les systèmes avec et sans courbure, on peut s'attendre à ce que la courbure ait principalement une influence sur la difficulté de réalisation des dioptries du système. Cependant, le calcul de l'écart à la forme de base n'est qu'une première approximation de la complexité de fabrication des surfaces. Pour en tirer une conclusion forte, il faudrait mener une étude de tolérancement sur chacun des dioptries, en fonction de méthode de fabrication.

A partir de ces résultats, il semble que la courbure permet d'améliorer les systèmes en les faisant parfois passer dans la catégorie supérieure à leur catégorie initiale. Ainsi, il est possible que les configurations c et e profitent des améliorations dues à la courbure et deviennent de bons systèmes, peut être à l'égal des systèmes a et b. Prolonger cette étude serait donc intéressant à ce niveau-là aussi.

Pour revenir à l'analyse du critère n°3, au vu de ce qui a été expliqué plus haut dans le chapitre, la courbure de Petzval est uniquement liée à la puissance des miroirs, et elle doit donc être proche pour chacune des configurations. Mais le calcul mené est une optimisation sur la courbure prenant en compte l'ensemble des paramètres, comme l'astigmatisme, pas celui de la courbure de Petzval. Ainsi, on peut s'attendre à ce que la correction des aberrations change la courbure au fil des optimisations, et rien à ma connaissance ne forcerait ne serait-ce que le signe de la courbure à demeurer constant. Après cette étude, je ne sais pas comment il serait possible d'anticiper l'importance de la courbure dès le départ.

#### 3.3.2.3.4 Conclusion et perspectives

Pour prolonger cette discussion, il serait bon de refaire un travail équivalent à celui-ci en augmentant le champ de vue total des systèmes, peut-être 8° ou même 16° pour mettre en avant le rôle de la courbure. Par ailleurs, il serait intéressant de trouver un ensemble de configurations équivalentes sur lesquelles on pourrait réaliser une étude similaire, mais en utilisant de l'optique réfractive. Ainsi, on introduirait les aberrations chromatiques dans l'étude, ce qui rendrait d'autant plus critique la correction de la courbure par un autre moyen qu'un travail sur les indices optiques et la courbure du capteur.

Enfin, au vu des questions que posent chacun des critères, il est aussi légitime de se demander s'il n'y aurait pas un degré d'importance relative à donner aux divers critères. Ce serait justifié si le critère 2 était effectivement plus influent que les autres. On pourrait par exemple n'ajouter la règle 1 ou 3, que si le critère 2 est de mauvais augure, le système est déclassé d'une catégorie par exemple.

Par ailleurs, Bauer *et al* ont donné trois critères qui selon eux recouvraient bien l'analyse à mener d'un point de départ, mais rien n'interdit de chercher de nouveaux critères, comme par exemple, celui de la géométrie.

En conclusion, on peut dire que l'analyse menée ici soulève plus de questions qu'elle n'en résout. Mais la question principale est tranchée : la contrainte sur la courbure modifie le classement lorsqu'on envisage l'utilisation de capteurs courbes.

Les autres questions qui se posent ne peuvent trouver de réponse qu'en prolongeant cette étude. Il s'agit d'une part de finir les optimisations sur les autres configurations. Puis de tester d'autres configurations : en déplaçant la pupille, en changeant le nombre de miroirs et en intégrant de la réfraction dans les systèmes. Ces autres essais pourraient permettre de prendre du recul sur les analyses, et permettre une prédiction plus fine d'un bon ou d'un mauvais point de départ en très peu de temps.

### 3.3.3 Conclusion

Les apports de la courbure aux système hors-axe ont été présentés. On a d'abord vu comment la courbure de champ devait être prise différemment en compte lorsqu'un système optique est hors-axe. Puis on a vu en quoi la courbure remet en cause la façon dont on peut analyser un système en tant que point de départ. Cette seconde partie pose plus de question qu'elle n'en résout. En revanche, cela a aussi permis de lancer plusieurs pistes pour questionner plus en profondeur les critères choisis pour étudier la pertinence d'un point de départ.

## 3.4 CONCLUSION

Ce troisième chapitre a présenté de nombreux éléments qui montrent en quoi la courbure d'un capteur ou d'un microécran peut avoir une influence sur le résultat final d'un système. Il n'y a pas réellement de découverte dans ce chapitre, en particulier parce que ce sujet a déjà été très étudié, mais il n'y a pas pour autant aucune nouveauté. De façon générale, la courbure correspond à un degré de liberté supplémentaire dont la pertinence se révèle importante dès que le champ de vue est important.

Le premier axe de travail a été l'étude de la courbure dans le cadre des systèmes visuels. Certaines analyses précédentes ont été questionnées à cause de la position singulière de la pupille pour les systèmes visuels, ainsi que la relation entre les divers paramètres du système. D'autres sujets d'étude ont été approfondis, comme le gain en flux lumineux ainsi que le rôle de la distorsion sur la courbure optimale. Ces deux points s'appliquent d'ailleurs aussi aux systèmes avec capteur d'image.

Le second axe de travail est lié aux apports de la courbure aux systèmes hors-axe. Un des résultats important a été de montrer que la courbure pour un système hors-axe n'est plus nécessairement sphérique. Une courbure biconique peut souvent apporter une contribution importante aux systèmes. Puis l'étude de la sélection de points de départ en prenant en compte la courbure a montré qu'il reste encore de nombreux travaux à mener sur ce sujet pour avoir des prédictions plus affinées. Et le rôle de la courbure pourrait être mieux exploré encore. Dans le cadre de ces systèmes où il n'y a pas de lentille de champ, la courbure est la solution la plus simple pour corriger ces aberrations, et utiliser au mieux les degrés de liberté apportés par le *freeform*.

En conclusion, on peut dire que la courbure de microécrans ou de capteurs a un rôle important en conception optique. Mais ce rôle est multiforme et complexe, parfois même contradictoire. Il s'agit donc pour le concepteur de définir précisément quelles sont ses priorités lorsqu'il calcule un système optique. Un point important est que la courbure peut améliorer plusieurs caractéristiques d'un même coup.

En résumé, les points qui sont influencés par la courbures sont :

- La compacité
- La qualité image (courbure de champ, astigmatisme, distorsion)
- La définition du champ de vue,
- Le flux lumineux

- Le choix d'un point de départ

Enfin, il est important de noter qu'un composant plan n'est pas déconnecté de ces analyses, il a simplement une courbure fixée comme étant infinie. De nombreux raisonnements s'appliquent à ceux-là aussi, mais sans que le concepteur puisse agir dessus.

## 4 MISE EN COURBURE D'UN MICROECRAN

Le premier chapitre présente l'état de l'art sur la vision humaine, les microécrans, les systèmes visuels. Le second chapitre présente l'état de l'art en lien avec la conception optique. Le troisième chapitre présente l'intérêt de courber les microécrans pour les systèmes visuels. Les fondements utiles à la compréhension de ce travail de thèse étant maintenant posés, entrons dans le vif du sujet : la mise en courbure des microécrans.

### 4.1 DU CAPTEUR D'IMAGE AU MICROECRAN

Historiquement, cette thèse est partie de la capacité à mettre en courbure des capteurs d'image. Il y a eu de nombreux travaux réalisés sur le sujet, étudiant tout le procédé, des limites théoriques aux caractérisations de fiabilité des composants [104–107]. Toutefois, comme présenté au chapitre 3, l'idée de courber la surface image n'est pas récente, elle remonte au XIX<sup>ème</sup> siècle, avec les premières mises en équations des aberrations, en particulier par Joseph Petzval. Et de nombreux dispositifs ont exploité cette idée, comme ceux présentés à la Figure 3.4.

Au tournant des capteurs numériques, les technologies n'étaient pas adaptées à la courbure. Cependant, pour la réalisation du télescope Kepler, l'idée a ressurgit. Comme aucun capteur courbe numérique n'existait à cette époque, les concepteurs créèrent un capteur mosaïque : plusieurs capteurs plans collés sur une surface sphérique. Par la suite, des équipes de recherche commencèrent à réaliser des composants courbes à partir d'imageur de type CMOS, mais tout cela restait à l'état de prototype et, à notre connaissance, aucun capteur courbe n'a été réalisé sur une ligne de production, bien que deux start-up, CurveOne et Silina, s'y emploient [104–106].

Le CEA-Leti a, pour sa part, d'abord entrepris de courber des capteurs pour des applications spécifiques dans l'infrarouge, pour s'intéresser ensuite à la courbure de capteurs visibles. Christophe Gaschet, pendant sa thèse, a étudié les apports de la courbure aux systèmes de capteurs d'image [54]. Sa thèse a abouti à un démonstrateur fonctionnel de performances similaires à un système commercial, mais avec un volume plus faible de 60 % et 40 % de lentilles en moins, illustré à la Figure 4.1.



Figure 4.1 – Démonstrateur de Gaschet comparé à un objectif commercial de caractéristiques similaires.

Suite aux résultats encourageants obtenus au sein du CEA-Leti, une question est venue : peut-on transposer la courbure d'un capteur de type CMOS à un microécran ? Dans ce cas, peut-on espérer obtenir des gains en compacité aussi importants dans les systèmes visuels pour la RA que pour les capteurs d'image ? C'est ainsi que mon projet de thèse a été initié.



Dans la partie suivante, je décris la théorie mécanique permettant de simuler la courbure des composants d'anticiper leur casse et déformations, ainsi que les validations expérimentales de ces simulations. Puis, je présente les procédés de courbure pour les capteurs ainsi que leurs adaptations aux microécrans de type OLED. Enfin, je donne les résultats obtenus sur les microécrans OLED *Izumi*.

## 4.2 MISE EN COURBURE : DE LA THEORIE A LA PRATIQUE

L'objectif dans le cadre de ma thèse a été de reprendre ces travaux et de les adapter à la courbure de microécrans. En pratique, j'ai pu m'appuyer sur les compétences d'un collègue (Fabien Zuber) pour la mise en place et la réalisation de ces simulations. Dans ce cadre, nous sommes partis d'un modèle Ansys préexistant permettant de simuler la courbure.

Rappelons ici que les simulations ne modélisent pas la rupture mécanique des composants mais quantifient les contraintes dues à la déformation dans le matériau lors de la mise en courbure. En parallèle, la littérature foisonnante dans le domaine des matériaux permet de connaître les valeurs seuil de contrainte au-delà desquelles le matériau étudié a une forte probabilité de casser. Le travail expérimental mené consiste à valider les correspondances entre les contraintes dans le matériau et la rupture, pour en déduire les courbures maximales atteignables pour des formes variées.

### 4.2.1 Modèle ANSYS

ANSYS est un logiciel de simulation mécanique capable de simuler des déformations sur des pièces mécaniques en utilisant la méthode des éléments finis. La modélisation consiste à déformer une puce selon la forme souhaitée, puis de calculer numériquement la valeur des contraintes qui s'exercent dans le matériau. L'objectif est de prédire si le composant cassera lors de la courbure. Les paramètres influençant la casse des composants ont déjà été étudiés dans le travail de Gaschet [54]. Je les rappelle brièvement.

#### 4.2.1.1 Modélisation du microécran Izumi

Pour notre démonstrateur, nous utilisons un microécran *Izumi* fournit par la société *Microoled*. Il s'agit d'un microécran OLED de  $16,70 \times 15,43 \text{ mm}^2$ , composé de plusieurs couches : un substrat de silicium d'environ  $725 \mu\text{m}$  d'épaisseur, une couche de CMOS, puis la couche comportant les OLED et leur encapsulation, les filtres colorés et enfin une lamelle de verre de  $170 \mu\text{m}$  d'épaisseur, qui est remplacée par un *Hardcoat* (voir 4.2.2.2). La Figure 4.2 montre un schéma de pixel OLED.

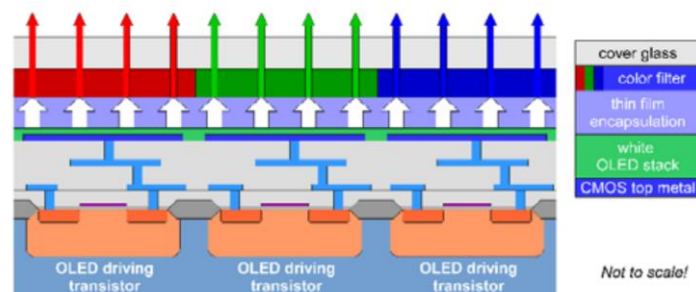


Figure 4.2 – Schéma d'un microécran OLED, issu de [108].

Le silicium est un matériau cassant, c'est-à-dire qu'il ne possède pas de zone de déformation inélastique et c'est le matériau qui compose majoritairement le composant final. Les couches d'OLED, épaisses de quelques micromètres et constituées principalement d'oxydes et de matériaux organiques peuvent être considérées comme négligeables pour nos simulations. De même, Gaschet a montré [54] que les couches

CMOS, également épaisses de quelques microns, peuvent être négligées. Ainsi, le modèle simulant le microécran *Izumi* a été simplifié au maximum en ne modélisant qu'une couche uniforme de silicium dont l'épaisseur va varier typiquement entre 50 et 100  $\mu\text{m}$ .

Comme le silicium est un matériau rigide, il n'est pas possible de le courber facilement s'il a une épaisseur trop importante (typiquement  $> 100 \mu\text{m}$ ). Il faut donc l'amincir pour le rendre plus flexible et, dans nos simulations, nous avons pris une épaisseur finale du composant égale à 80  $\mu\text{m}$ . De plus, comme la puce *Izumi* est rectangulaire, elle présente une double symétrie axiale. Il est donc possible de n'en modéliser qu'un quart, en ajoutant des contraintes simulant la symétrie. C'est le coin supérieur droit qui a été choisi pour nos simulations. Bref, pour modéliser le composant *Izumi* sous contraintes, il suffit de simuler un quart d'une plaque de silicium au format  $16,70 \times 15,43 \times 0,08 \text{ mm}^3$ .

L'étude de convergence, non présentée ici, indique un bon compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats pour un maillage composé de 20 000 éléments, avec trois éléments répartis selon l'épaisseur du composant. Les éléments utilisés pour le maillage sont des quadrangles, définis par 4 nœuds et 6 degrés de liberté à chaque nœud, nommé « element SHELL 181 » dans Ansys. Les données mécaniques décrivant le comportement du silicium sont trois coefficients indépendants élastiques, comme présenté dans [106]. La prise en compte de la symétrie est réalisée en interdisant les déplacements latéraux de matière selon l'axe x pour les nœuds tels que  $y = 0$  et selon l'axe y pour les nœuds tels que  $x = 0$ . La courbure est modélisée par un déplacement selon Z, en contraignant la position des nœuds d'une des faces extérieure selon l'équation 4.1). Cette équation a pour variables deux rayons de courbure,  $R_1$  et  $R_2$ , indépendants, selon X et Y, donnant une forme biconique au composant.

$$\text{sag}(x, y) = \frac{x^2/R_1 + y^2/R_2}{1 + \sqrt{1 - x^2/R_1^2 + y^2/R_2^2}} \quad 4.1$$

La forme sphérique correspond à  $R_1 = R_2$ . La forme cylindrique apparaît lorsqu'un rayon est infini.

Les deux critères utilisés comme seuil de contrainte dans le matériau sont :  $S1_{max} = 200 \text{ MPa}$  et  $S1_{max} = 500 \text{ MPa}$ , issus de [109,110]. Le fait d'utiliser deux valeurs pour la même question physique permet de prendre en compte la variabilité du silicium face à une déformation. Selon la qualité initiale du matériau et les défauts produits lors de manipulations, le seuil de rupture d'une puce varie. Selon les conditions expérimentales, les valeurs de ruptures peuvent être très diverses : avec le minimum de défaut dans le silicium et dans certaines conditions, il peut atteindre  $10 \text{ GPa}$  [111]. Nous avons choisi ces deux valeurs car elles sont proches de nos conditions expérimentales. Si elles ne correspondent pas exactement à notre cas de figure, ce sont les ordres de grandeurs qui sont importants à ce stade. Cela est précisé lors des validations expérimentales.

Les types de contraintes auxquelles un matériau peut être soumis sont de cinq types : compression, tension, torsion, flexion et cisaillement. La compression résulte de l'application de deux forces de directions opposées qui écrasent un matériau. La tension est l'opposé : les deux forces de direction opposées étirent le matériau. La torsion résulte de deux forces de rotations appliquées dans deux sens opposés, elle tord le matériau. La flexion résulte de forces qui permettent de plier le matériau. Enfin, le cisaillement résulte de forces de directions opposées qui déchire ou découpent le matériau. Pour courber, nous appliquons uniquement une flexion au composant. Cette contrainte a pour résultante principale de courber, mais aussi d'induire trois autres contraintes au niveau local du matériau : tension, compression et cisaillement. Ces trois conséquences sont liées entre elles par les caractéristiques du matériau. Mécaniquement, le

coefficient de Poisson est le lien entre la tension et la compression dans un matériau soumis à une contrainte. Plus de détails mécaniques sont donnés dans [112].

A noter que le silicium est plus résistant à la compression qu'à la tension, donc nous nous focalisons donc principalement sur les zones en tension car c'est dans ces zones que les ruptures risquent de se produire. A noter également que les contraintes de cisaillement sont considérées de pouvant pas être cause de rupture car elles sont faibles à cause de la faible épaisseur du microécran.

### 4.2.1.2 Résultats des simulations

Les simulations permettent de récupérer deux types de données : la répartition des contraintes dans la puce ainsi que leurs valeurs absolues.

La Figure 4.3 donne les répartitions des tensions sur les faces avant et arrière du quart de puce courbée selon plusieurs formes : sphérique, cylindrique, selle de cheval et biconique. On ne reporte sur cette figure que les valeurs en tension puisque c'est la contrainte qui porte l'information importante pour ce système. Les paramètres qui déterminent les limites de courbures sont : le matériau, les dimensions latérales de la puce et son épaisseur. Ici, seule l'épaisseur est variable, plus elle est faible et plus la puce est flexible mais, à partir de 50  $\mu\text{m}$ , sa manipulation devient délicate et difficile à mettre en œuvre sans risquer de casser le composant. Le compromis choisi est finalement une épaisseur de 80  $\mu\text{m}$ .

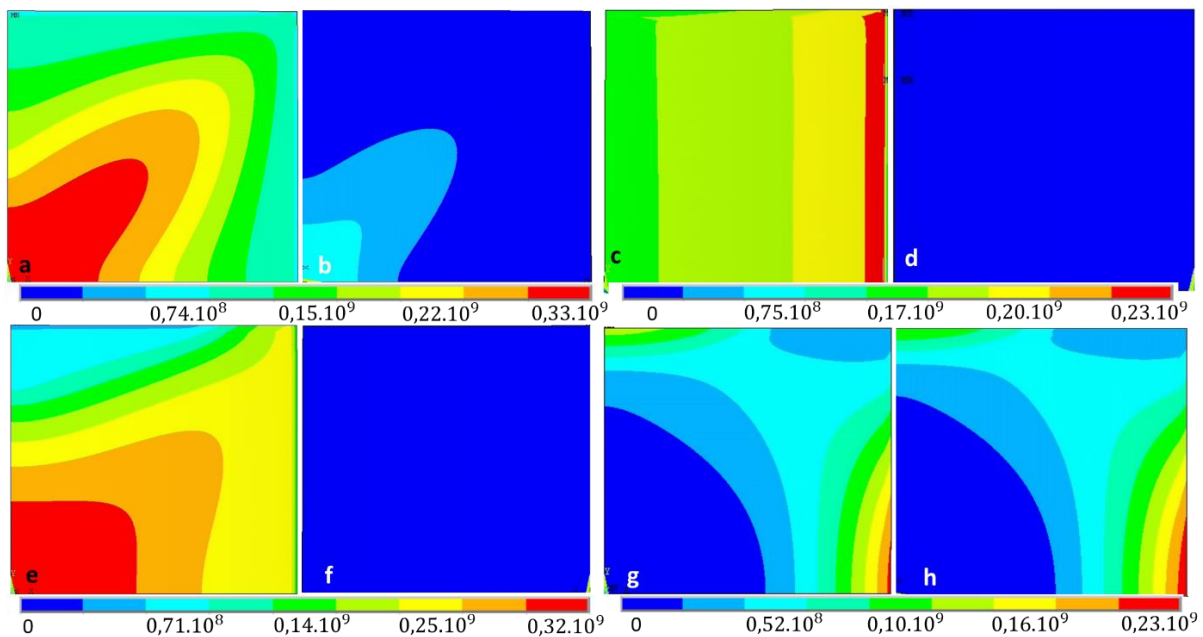


Figure 4.3 – Répartition des contraintes de tension dans un quart de la puce, pour différentes formes. Chaque forme est représentée par deux images : à gauche, la face arrière de la puce, à droite, la face avant. (a,b) forme sphérique,  $R = 60$  mm ; (c,d) forme cylindrique,  $R = 30$  mm ; (e,f) forme biconique  $R_1 = 33,3$  mm,  $R_2 = 200$  mm ; (g,h) forme en selle de cheval,  $R_1 = 100$  mm,  $R_2 = -100$  mm.

On perçoit la différence entre les quatre formes de courbure avec une répartition des contraintes caractéristiques pour chacune. Il est à noter la particularité de la forme en selle de cheval : comme les rayons de courbure sont de valeurs opposées, les contraintes de tension sont équivalentes sur les deux faces, contrairement aux autres formes. Par ailleurs, comme les formes sphérique et cylindrique sont des cas particuliers des formes biconiques, on observe que la forme biconique quelconque est un intermédiaire entre les deux, du point de vu de la répartition de la tension ainsi que pour les valeurs. Sur la Figure 4.3, la

forme biconique ressemble à première vue plus à du sphérique, mais en observant en détails, on voit que le bord droit de la face arrière a une répartition de contrainte qui se rapproche du cas cylindrique. Par ailleurs, en face avant, la forme biconique est plus proche du cylindrique.

A titre informatif, comme déjà précisé auparavant, le format du composant a également une influence sur les contraintes. Ainsi, plus la puce sera rectangulaire, plus la répartition de tension dans le composant sera cylindrique. Une étude selon le format de la puce a été menée dans la thèse de Gaschet [54].

La simulation consiste à calculer la valeur maximale de contrainte dans le composant. Nous utilisons 30 points d’échantillonnage pour les deux rayons de courbure, ce qui fait 900 calculs de répartition des contraintes. Lorsque la valeur de tension dépasse l’un des deux seuils précédemment indiqués, nous retenons la valeur des rayons de courbure utilisée. L’ensemble des couples de rayons de courbure forme deux courbes (voir Figure 4.4), selon la limite à 200 MPa (en vert) et à 500 MPa, (en rouge) nommée T-10 et T-100. La première donne la limite à partir de laquelle on estime que 10 % des puces courbées casseront. Cette proportion est fixée arbitrairement. La seconde limite de 500 MPa, est la limite à partir de laquelle 100 % des puces sont supposées casser. Ce chiffre est aussi arbitraire, mais il permet de donner une présentation simple et quantitative des résultats expérimentaux.

Les résultats font apparaître trois zones distinctes : la zone entourée par la ligne verte, où les contraintes sont estimées trop faibles pour induire une rupture ; la zone à l’extérieur de la ligne rouge, où les contraintes mènent a priori à la rupture de la puce ; la zone intermédiaire, comprise entre les deux lignes, où il est plus difficile de prédire la quantité de puce qui casseront.

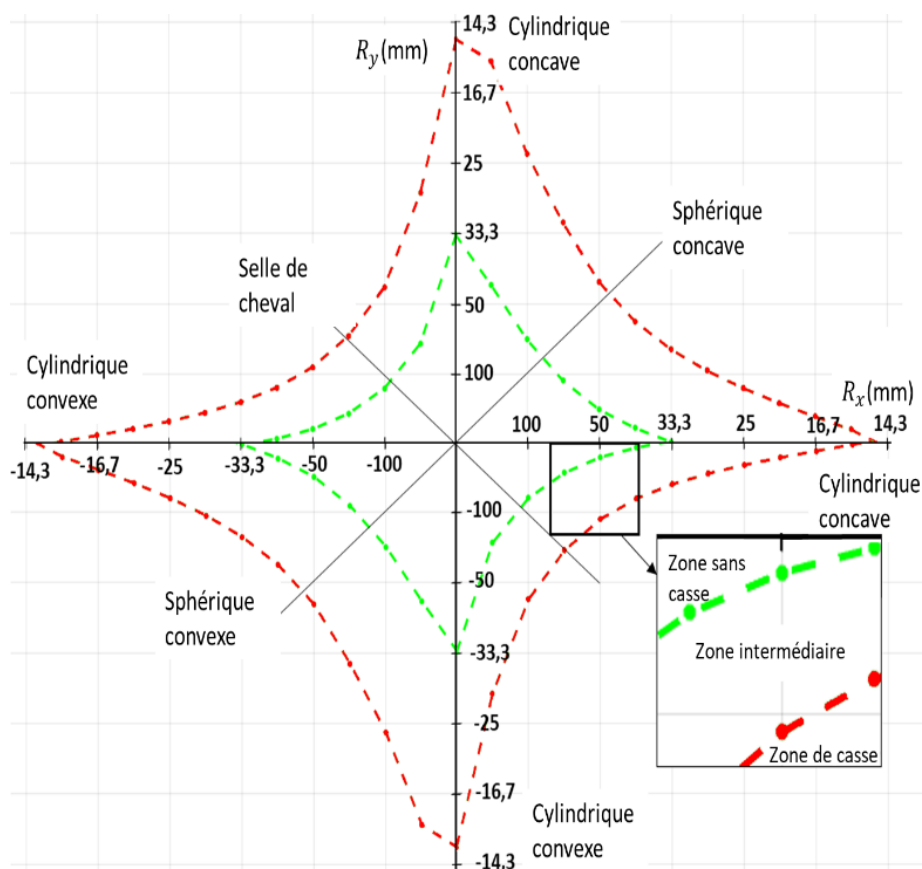


Figure 4.4 – Courbe T-10 et T-100, en fonction des couples de rayons de courbure  $R_1$  et  $R_2$ .

## 4.2.2 Procédé de courbure

### 4.2.2.1 Courbure de capteurs

De même que la théorie mécanique n'a pas été mise en place spécifiquement dans le cadre de cette thèse, les procédés de courbure ont également été développés auparavant [54,105,107]. A noter qu'ils ont été pensés pour courber des capteurs d'images et nous verrons par la suite qu'ils ne peuvent pas être transposés tels quels dans le cas de microécrans OLED. Nous commençons donc par décrire succinctement ces procédés, puis nous parlerons du travail réalisé pour adapter ces procédés aux microécrans. Ce travail a été réalisé grâce aux compétences de Stéphane Nicolas.

Il existe différents types de procédés de courbure, qui répondent à des objectifs spécifiques. Le premier type est la mise en courbure collective, le second est la mise en courbure individuelle. La courbure collective permet de diminuer les coûts et d'augmenter les cadences de production et est donc adaptée pour des composants à forts volumes. La courbure individuelle permet de travailler spécifiquement sur de plus petites séries. L'un et l'autre utilisent la même méthode de courbure.

L'un des avantages au cœur de la technologie de courbure développée par le CEA-Leti est qu'elle vient parfaitement s'insérer dans le processus de packaging<sup>5</sup> des composants sans en modifier les étapes existantes. Suite aux étapes conventionnelles, la Figure 4.5 montre les étapes de courbures.

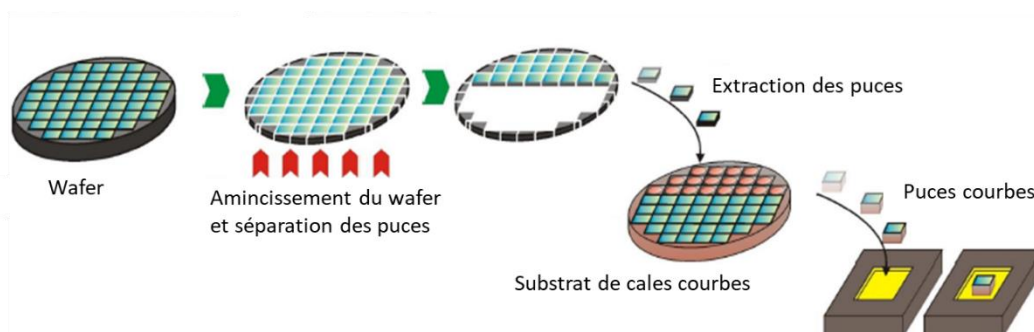


Figure 4.5 – Etapes de mise en courbure de microécrans

Nous avons vu précédemment la nécessité d'amincir les wafers pour les rendre plus flexibles. Un wafer standard de diamètre  $200\text{ mm}$  fait en général  $725\ \mu\text{m}$  d'épaisseur, et il est généralement aminci à moins de  $100\ \mu\text{m}$ . C'est la première étape de type Back-End une fois que la partie imageur CMOS (*Front-End*) a été réalisée. Ensuite, les méthodes diffèrent si l'on fait de la courbure collective ou de la courbure individuelle, mais le principe reste le même.

Après amincissement, la plaque est découpée pour en séparer les composants. La découpe est une réalisée par une scie, technique classique en microélectronique. Une fois extraits, les composants sont placés sur un autre substrat composé des cales ayant la forme désirée (sphérique, cylindrique...). Ce substrat de cale, est fabriqué par usinage de plaques métalliques, typiquement de l'aluminium. A noter qu'une couche de colle est déposée sur les cales avant le report des composants.

<sup>5</sup> Packaging en microélectronique : connexion d'une puce à son environnement pour qu'elle assure la fonction prévue, en optimisant sa durée de vie (robustesse des connexions et protection contre les agressions de l'environnement). Le packaging est aussi un élément de sécurité.

Une fois que toutes les puces sont reportées sur le substrat cales, on applique une force pour les plaquer au fond des cales. En général, les colles utilisées nécessitent de monter en température (typiquement entre 100-160 °C) afin de les réticuler. Il faut donc appliquer une force à la température de réticulation.

Enfin, les puces courbées sont de nouveau individualisées et placées en boîtier électronique. Les étapes finales de packaging sont alors effectuées : connexions électriques par câblage filaire, fermeture du boîtier par collage d'une vitre et tests électro-optiques pour vérifier le fonctionnement des composants. Le processus de courbure s'insère donc au sein du procédé de packaging standard des imageur CMOS.

Il existe d'autres procédés de courbure proposés dans la littérature. Certains permettent d'atteindre des rayons de courbure bien supérieurs mais au prix de changer de nombreuses étapes de microélectronique, ce qui est un défi pour l'industrialisation [113,114]. D'autres proposent des méthodes utilisant plus de procédés conventionnels en microélectronique, qui se rapprochent de ce que nous présentons ici [104,106]. Ces méthodes sont souvent plus limitées en courbure, mais sont plus facilement industrialisables. La Figure 4.6 montre des procédés conventionnels comme le bonding ou l'encapsulation, aussi utilisés lors du procédé de courbure.

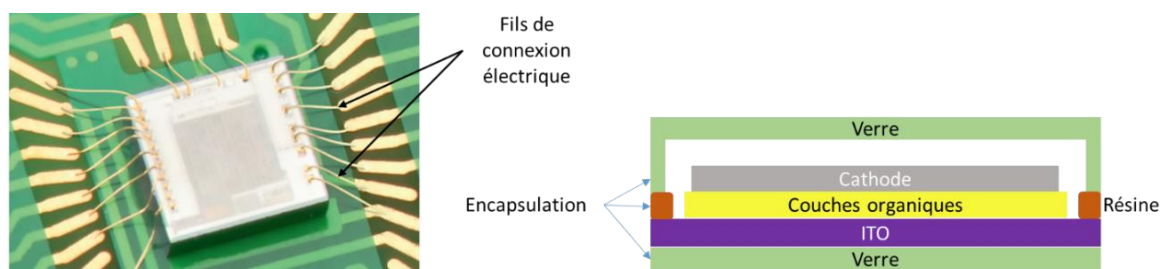


Figure 4.6 - Gauche : état de la puce après la connexion par câblage (crédit Würth Electronics). Droite : schéma d'une puce OLED encapsulée par du verre, la résine servant à fixer les capots de verre.

#### 4.2.2.2 Courbure de microécrans

Pour courber les microécrans, il faut adapter la technologie de courbure décrite précédemment pour les imageurs CMOS. Ce travail a été initié avant cette thèse au sein du CEA Leti par B. Chambion et T. Maindron [31].

Tout d'abord, il faut préciser que nous nous focalisons principalement sur des microécrans de type OLED. Si je présente aussi le travail réalisé sur la courbure de microécrans GaN dans la suite de ce chapitre, en pratique, ce travail est pensé pour des microécrans OLED, notamment par disponibilité des microécrans OLED dans le commerce. Les microécrans LED sont encore en cours de développement.

A noter que les OLED sont des matériaux oxydables. Un contact à faible dose avec de l'oxygène les dégrade rapidement, contrairement aux capteurs d'image. Pour éviter l'oxydation, on réalise une encapsulation en ajoutant un capot de verre qui complète la passivation, et assurer une protection mécanique [9]. A cause d'une épaisseur de l'ordre de  $500 \mu\text{m}$ , ce capot ne peut pas être courbé. Il est donc nécessaire de le supprimer tout en préservant les OLED. Le travail de thèse de Marion Provost a été utilisé pour cela : elle a développé un matériau SolGel appelé HardCoat (HC) [115]. En plus d'augmenter le contraste des microécrans et d'en diminuer l'épaisseur, cette solution permet de se passer du capot de verre. Le HC encapsule chimiquement et mécaniquement les OLED, bien que cette protection reste inférieure à celle d'un capot de verre.

Dans le procédé de mise en courbure, l'application du HC est la première étape réalisée lorsqu'on réceptionne le wafer contenant les microécrans. Il permet donc de les protéger de l'atmosphère, et de les manipuler sans crainte de destruction au moindre effleurement.

La suite du processus de courbure est identique à celui de la mise en courbure des capteurs d'image. La Figure 4.7 en résume donc le processus.

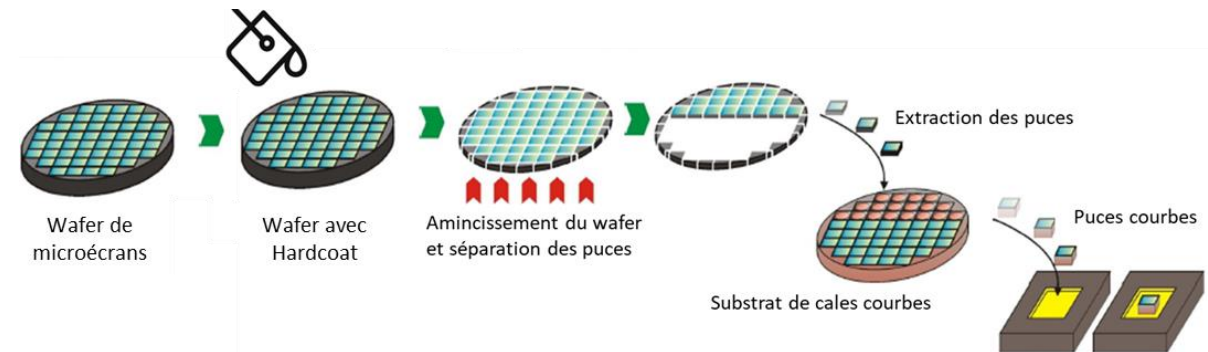


Figure 4.7 – Etapes de mise en courbure de microécrans.

Un autre problème s'est posé lors de l'adaptation de la procédure aux microécrans : la température maximale acceptable pour les OLED est de 100 °C. Cette température limite le choix des colles entre la cale courbe et le microécran.

Enfin, la force à appliquer pour courber le composant impose un contact entre les OLED et la membrane de courbure. A ce stade, nous ne savons pas si cela dégrade les performances des OLED même si les premiers résultats obtenus par T. Maindron [31] sont encourageants car ce composant était toujours fonctionnel après courbure.

## 4.2.3 Déformation mécanique

### 4.2.3.1 Présentation du problème

Au chapitre 3, j'ai présenté la relation entre la courbure et la distorsion, avec notamment une définition adaptée aux surfaces courbes basée sur la longueur de l'arc. Tout n'a pas été détaillé, car il fallait auparavant mieux comprendre les aspects mécaniques de la déformation du composant de silicium. Dans cette partie, je reviens donc sur la déformation mécanique induite par la mise en courbure des composants.

Cette déformation mécanique entraîne notamment une déformation de la grille des pixels pour s'adapter à la contrainte mécanique. Avant courbure, la grille est plane et latéralement régulière. Elle est constituée de carrés qui couvrent un rectangle. Lors de la courbure, cette grille n'est plus plane, mais épouse la forme voulue. Les lignes initialement droites et orthogonales entre les pixels (lignes et colonnes) deviennent des courbes tridimensionnelles. Localement, les pixels prennent des formes de losanges, comme le montre la Figure 4.8.

Cette partie vise à quantifier la distorsion induite par cette déformation mécanique, puis, de conclure sur son influence en conception optique.



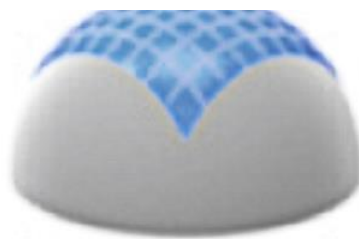


Figure 4.8 – Simulation de la déformation d'une grille régulière après courbure sur une cale, issu de [113].

Pour quantifier la déformation, nous utilisons directement la simulation mécanique faite avec le logiciel Ansys, précédemment présentée. Contrairement à ce qui a été fait plus haut dans ce chapitre où le résultat étudié était la valeur de contrainte dans le matériau en fonction de la courbure, ici, c'est la position finale des points de la surface qui est analysée.

La face arrière, collée à la cale considérée infiniment rigide, a dans la simulation une forme finale qui épouse exactement de celle de la cale. En pratique, on fixe comme condition aux limites que les nœuds du dessous ont des coordonnées qui vérifient l'équation de la surface de la cale, ce qui bloque un degré de liberté. La position latérale, qui correspond aux deux autres degrés de liberté des nœuds, n'est bloquée que sur les deux axes  $x$  et  $y$ , perpendiculairement à chacun d'eux. Ceci traduit l'attache latérale du centre de la puce et la symétrie du système. Cette symétrie permet d'ailleurs de ne simuler qu'un quart de la puce. En dehors de ces axes, les positions latérales résultent de l'équilibre local des contraintes mécaniques.

La face avant (où se situent les pixels) se situe à  $80\ \mu\text{m}$  de la cale. Cette épaisseur permet une répartition des contraintes dans le matériau qui peut résulter d'une déformation différente entre la face avant et la face arrière.

#### 4.2.3.2 Quantification de la déformation mécanique

La méthode utilisée pour quantifier la déformation mécanique est détaillée dans l'annexe « déformation mécanique ». Dans cette partie, je n'en présente que les grandes étapes, ainsi que le résultat pour un cas de courbure biconique de rayon de courbure  $50.8 \times 92.4\ \text{mm}$ . Ces valeurs correspondent à la forme sélectionnée pour un système présenté au chapitre 5. D'autres cas sont présentés en annexe pour vérifier les conclusions de manière plus générale.

La première étape consiste à définir une grille de référence courbe, à partir de laquelle les écarts en positions peuvent être calculés. Cette référence doit épouser la surface image théorique, biconique. Néanmoins, cette contrainte ne suffit pas à définir totalement la grille. Il faut en effet en plus définir la façon dont celle-ci se déforme latéralement. En cohérence avec la définition de la distorsion adaptée aux microécrans courbes (voir partie 3.2.4), on choisit la conservation de la longueur d'arc au cours du processus de courbure

A ce stade, une difficulté apparaît : le calcul de la longueur d'arc est compliqué pour les surfaces biconiques. Cette difficulté est contournée en utilisant comme surface de référence une surface sphéro-cylindrique avec les mêmes rayons de courbure principaux. Celle-ci a la propriété que les arcs dans tous plans contenant l'axe optique sont des arcs de cercle, leur longueur est donc facile à calculer. Compte tenu de la taille des microécrans, la différence entre les surfaces biconiques et sphéro-cylindriques sont négligeables pour les rayons de courbure considérés.



L'utilisation de la surface sphéro-cylindrique permet donc de définir complètement la grille des pixels après courbure avec l'hypothèse de conservation des longueur d'arc. C'est par rapport à cette référence, que les écarts latéraux sont calculés (voir partie gauche de la Figure 4.9).

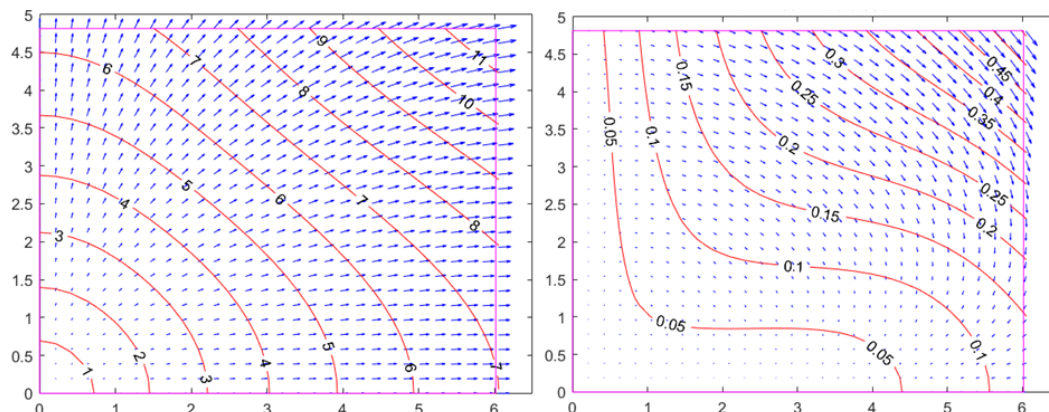


Figure 4.9 – Microécran Izumi, courbé avec les rayons 50.8 x 92.4 mm. Gauche : écarts mécaniques latéraux ( $\mu\text{m}$ ). Droite : déformation résiduelle ( $\mu\text{m}$ ) après soustraction de la composante d'agrandissement.

La norme maximale du champ vectoriel se situe au coin de la zone émissive de la puce et vaut  $12 \mu\text{m}$ . Ceci est un peu plus grand qu'un pixel couleur, ce qui est proche d'être négligeable.

Par ailleurs, on observe que ces vecteurs d'écarts mécaniques ont un comportement globalement centrifuge avec une norme des vecteurs qui augmente avec la distance au centre. Ceci correspond globalement à un agrandissement. Nous disons agrandissement pour éviter de confondre avec le grandissement optique. Ayant fait cette observation de comportement global, on peut calculer le champ vectoriel correspondant à un simple agrandissement centré sur l'origine (vecteur proportionnel au vecteur lui-même). On trouve un coefficient de proportionnalité de 0,55 %.

Par rapport à cet ajustement, le champ résiduel (voir partie droite de la Figure 4.9) a une norme maximale inférieure à  $0,5 \mu\text{m}$ , ce qui est cette fois tout à fait négligeable.

### 4.2.3.3 Conclusions sur la déformation mécanique

Sur le cas présenté précédemment (forme biconique de rayons de courbure 50,8 x 92,4 mm), on trouve que par rapport à la position des pixels attendus, en faisant l'hypothèse de conservation des arcs, l'écart latéral maximal en coin de zone émissive de la puce ( $6 \times 4,8 \text{ mm}$  par rapport au centre) est de  $12 \mu\text{m}$ . Cet écart est principalement un agrandissement (écart centrifuge proportionnel à la distance au centre) avec un coefficient de 0,55 %. Si l'on soustrait cette composante, le résidu maximal n'est plus que de  $0,5 \mu\text{m}$ .

Les résultats pour l'ensemble des cas analysés (autres cas présentés dans l'annexe « déformation mécanique ») sont récapitulées dans le Tableau 4.1.

Rayons de courbure	50.8 x 92.4 mm	30 x 30 mm	60 x 60 mm	60 x -60 mm
Écart latéral maximal	12 $\mu\text{m}$	45 $\mu\text{m}$	13 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
Coefficient d'agrandissement	0,14 %	0,55 %	0,17 %	-0.11 %
Déformation résiduelle maximale	0.55 $\mu\text{m}$	0,13 $\mu\text{m}$	0,6 $\mu\text{m}$	0.75 $\mu\text{m}$

Tableau 4.1 – Récapitulatif des résultats d'analyse quantitative des déformations mécaniques simulées.

Il faut rappeler qu'ils sont issus de l'analyse de simulations qui ne prennent pas en compte toutes les subtilités du processus de mise en courbure, dont notamment les points suivants :

- la couche de colle ajoute une épaisseur avec flexibilité qui pourrait changer un peu la répartition des contraintes et elle est réticulée alors que la puce subit une pression de plaquage qui sera relâchée par la suite,
- la cale n'est pas infiniment rigide
- la forme de la cale est entachée d'erreur lors de sa fabrication.

Néanmoins ils donnent les ordres de grandeur des phénomènes et les observations faites sur le cas particulier 50,8 x 92,4 mm valent de manière plus générale.

#### 4.2.3.4 Conséquences sur la conception optique

Les ordres de grandeur des écarts mécaniques entre la réalité et une déformation conservant les arcs sont à comparer aux performances de la conception optique qui leur correspondent. Les déformations mécaniques latérales étudiées sont à relier aux aberrations qui déplacent latéralement les images en fonction du champ, en particulier la distorsion, dont la définition est revue en « distorsion en arc » (voir chap. 3). Néanmoins, il faut aussi les relier à la maîtrise du simple grandissement qui fait partie des contraintes d'optimisation et constitue un écart au modèle paraxial.

Nous trouvons que les écarts mécaniques apparaissent comme un agrandissement qui, dans le pire des cas présentés ajoute un dixième de degré au champ de vue, ce qui est négligeable.

Une fois l'agrandissement pris en compte, le résidu est à comparer à la distorsion. On a des formes complexes bien loin des traditionnelles formes en barillet ou coussinet, mais les amplitudes sont très faibles : elles correspondent dans le pire des cas précédent à un équivalent de 0.45 % de distorsion (déplacement du point image par rapport à la grille théorique).

En conclusion, les microécrans courbes ont une répartition des pixels qui suit l'hypothèse de conservation des longueurs d'arc avec un léger agrandissement et une distorsion négligeable.

#### 4.2.4 Validation expérimentale du modèle

Les résultats de simulation précédents considèrent une plaque de silicium idéale. Or, en réalité, les manipulations aux diverses étapes de courbure induisent des défauts dans les puces. Ces défauts peuvent mener à une diminution de la résistance des puces aux contraintes mécaniques. Si l'on considère les deux limites de ruptures de la Figure 4.4, c'est justement pour prendre en compte ces effets.

Toutefois, ces valeurs ont été choisies depuis [109,110], où les conditions de mesures ne sont pas identiques aux nôtres. Nous cherchons donc à évaluer la proximité de nos résultats théoriques via un nouveau montage expérimental, l'objectif étant d'obtenir des points expérimentaux à comparer aux résultats théoriques de la Figure 4.4. Nous voulons obtenir deux courbes, E-10 et E-100, qui sont le pendant expérimentales des courbes T-10 et T-100 : couple de rayon de courbure auquel 10 % des puces cassent ;

E-100 : couple de rayon de courbure auquel 100 % des puces cassent. Ces données montreront un meilleur aperçu de la probabilité de casse des puces en fonction du couple de rayon de courbure.

Enfin, nous menons ces expériences pour trois groupes de puces afin de comparer trois techniques de préparation des puces et en étudier l'influence sur le taux de rupture. Je les décris par la suite.

#### 4.2.4.1 Matériel et méthode

Il n'est pas possible expérimentalement d'étudier tous les points de la carte présentée sur la Figure 4.4. Nous n'allons donc étudier que quatre types de courbures, les plus courantes, avec 8 points testés par type, en allant du moins courbé au plus courbé. Les quatre types de courbures sont : sphérique concave, cylindrique concave, cylindrique convexe, et selle de cheval. Le premier point testé pour chaque type de courbure est dans la zone verte : les puces devraient normalement ne pas casser à ce niveau-là. Le dernier point est, dans la mesure du possible, dans la zone rouge. Les 6 autres points sont répartis entre les deux limites verte et rouge, pour essayer d'obtenir une répartition statistique des ruptures. La Figure 4.10 montre la répartition de ces 8 points de test, pour les quatre formes testées.

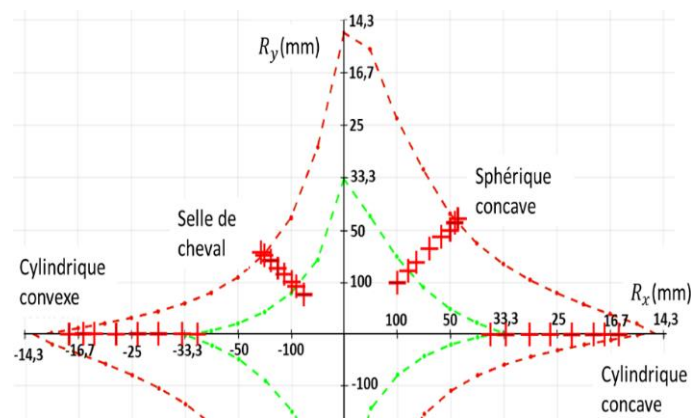


Figure 4.10 – Superposition des résultats de simulation et des points expérimentaux étudiés.

Trois wafers fournissent les puces utilisées pour cette série de test. Chacun a été préparé selon une méthode différente pour les comparer.

La première méthode est notre procédure standard : wafer aminci à  $80 \mu\text{m}$ , avec une étape de stress release dry polish pour libérer les contraintes en face arrière, puis découpé pour obtenir des puces de la même surface que le microécran *Izumi*.

Les deux autres suivent une procédure DBG (Dicing Before Grinding), où les étapes sont inversées : wafers d'abord prédécoupés au format des puces (prédécoupe de  $150 \mu\text{m}$  de profondeur, épaisseur du wafer  $725 \mu\text{m}$ ) ; puis amincissement à  $80 \mu\text{m}$  qui permet de séparer les puces. L'un de deux wafers ne subit pas d'autres traitement : les puces de ce wafer appartiennent au groupe *raw* (brut). Le dernier wafer subit un *dry polish* destiné à libérer des contraintes dans le matériau : ces puces forment le groupe *stress-release*. Ces contraintes sont liées aux étapes de découpe et d'amincissement qui peuvent créer des microfissures en surface du matériau induisant des précontraintes dans le matériau, réduisant ainsi sa résistance à la contrainte lors de la mise en courbure. Les défauts créés par la découpe en bord de puce, sont nommés *chipping*. Sur l'ensemble de la face arrière, il y a ce que l'on appelle la zone écrouie. Elle fait à peine un micromètre d'épaisseur et peut être enlevée par des procédés de polissage adaptés. C'est cela qui est appliqué au groupe *stress-release*. La Figure 4.11 montre un exemple de résultat caractéristique de chacune des procédures.

Comme le silicium est un matériau cassant, il n'a que deux comportements lorsqu'il est sous contrainte : soit il casse, soit il résiste et reste inchangé après la déformation. Ainsi, pour réduire le nombre de puces utilisés, on réutilise les puces qui n'ont pas cassé, puisque leurs propriétés n'ont pas changé. La méthode expérimentale est proche de celle décrite dans [54] : on courbe chaque puce d'abord sur la cale la moins agressive. Si elle ne casse pas, on la déplace sur la cale suivante, et ainsi de suite, jusqu'à la rupture. Les cales de test de chaque forme échantillonnent la répartition statistique des ruptures.

Les cales sont fabriquées par impression 3D avec du *verowhite polyjet*, au pas de  $32\ \mu\text{m}$ . Cette méthode de fabrication a déjà été testée dans notre laboratoire [54].

En considérant un test bilatéral, fondé sur une réponse binaire à la rupture, et en considérant que toutes les puces sont indépendantes, pour obtenir un résultat certain à 95%<sup>6</sup> et fiable à 95%<sup>7</sup> avec d'écart type de  $1\sigma$ , il faut tester au minimum 13 puces pour chaque type de courbure et pour chaque groupe de puces [116].

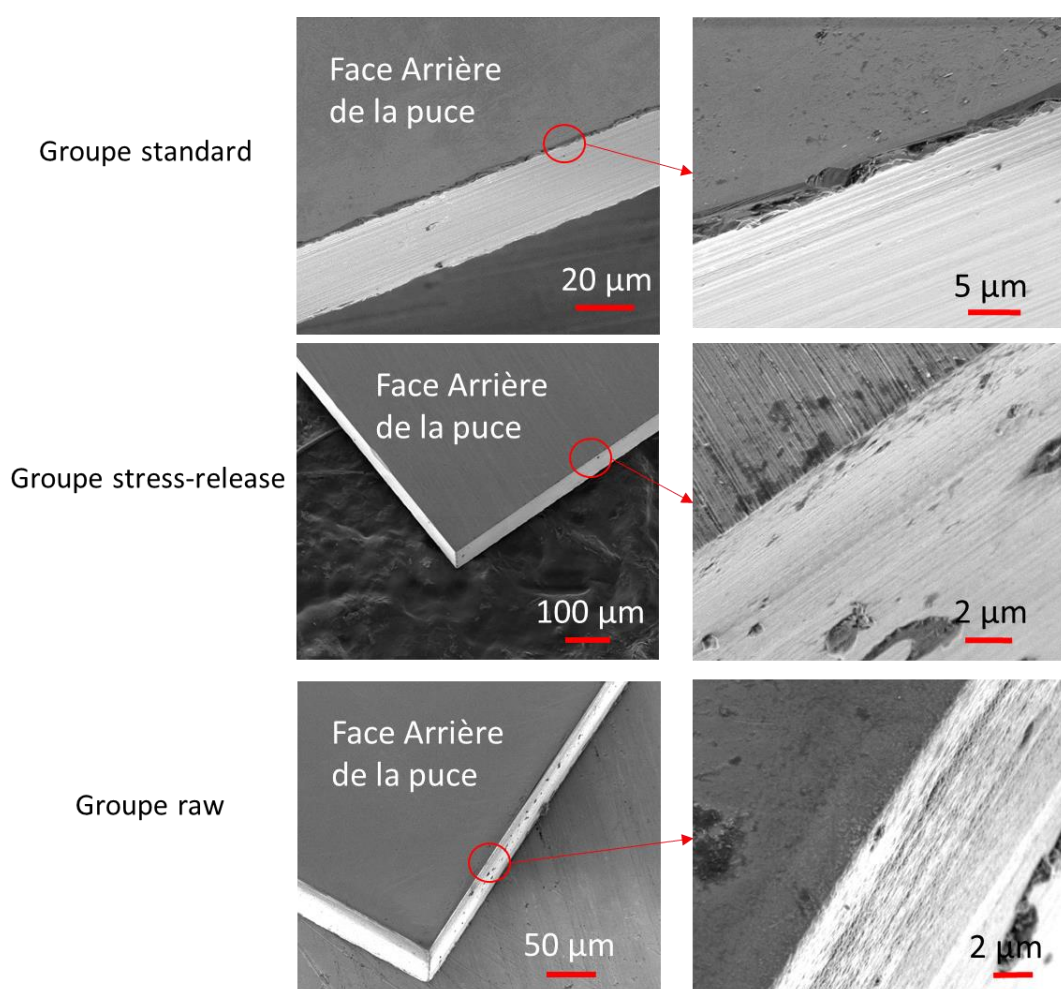


Figure 4.11 – Image MEB d'une puce de chaque groupe. Colonne gauche : vue générale des bords des puces ; colonne droite : vue rapprochée des bords. La zone de chipping est nettement visible sur les bords de la puce standard par rapport aux puces des groupes DBG. Le groupe raw est le seul à ne pas avoir eu de stress-release, ce qui se manifeste par les rayures sur sa face arrière (image centre, droit).

<sup>6</sup> Certain à 95 % : probabilité de ne pas avoir rejeté une hypothèse vraie.

<sup>7</sup> Fiable à 95 % : probabilité de ne pas avoir accepté une hypothèse fausse.

La procédure expérimentale est la suivante :

Initialisation :

- Préparation des puces
- Positionnement de la 1<sup>e</sup> puce sur la cale la moins agressive du premier type de courbure testé
- Application d'une force sur la puce pour la courber
- Relâchement de la force et vérification de la rupture de la puce.

Boucle :

- Placer la puce sur la cale suivante et ajouter une nouvelle puce sur la cale initiale
- Recommencer et décaler les puces jusqu'à la rupture de toutes les puces.
- Recommencer pour toutes les formes de courbure et pour les trois groupes de puces.

### 4.2.4.2 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux sont reportés de manières différentes dans la Figure 4.12 et la Figure 4.13. Un code est adopté pour identifier rapidement le rayon de courbure en jeu, représenté dans le Tableau 4.2.

holder #	1	2	3	4	5	6	7	8	9
sphérique (rayons, mm)	100x100	81x81	70x70	60x60	55x55	50x50	47x47	44x44	Pas de rupture
Selle de cheval (rayons, mm)	125x-125	110x-110	100x-100	87x-87	80x-80	70x-70	65x-65	60x-60	Pas de rupture
Cylindrique (mm)	40xinf	33xinf	30xinf	27xinf	24xinf	21xinf	19xinf	16xinf	Pas de rupture

*Tableau 4.2 – Equivalence rayons de courbure - numéro de cale. La couleur de la case correspond à la zone où se situe la courbure selon les simulations. Le numéro 9 correspond à l'absence de rupture.*

Les Figure 4.12 et Figure 4.13 montrent les résultats des tests de rupture pour les trois formes de courbures choisies, de deux façons différentes.

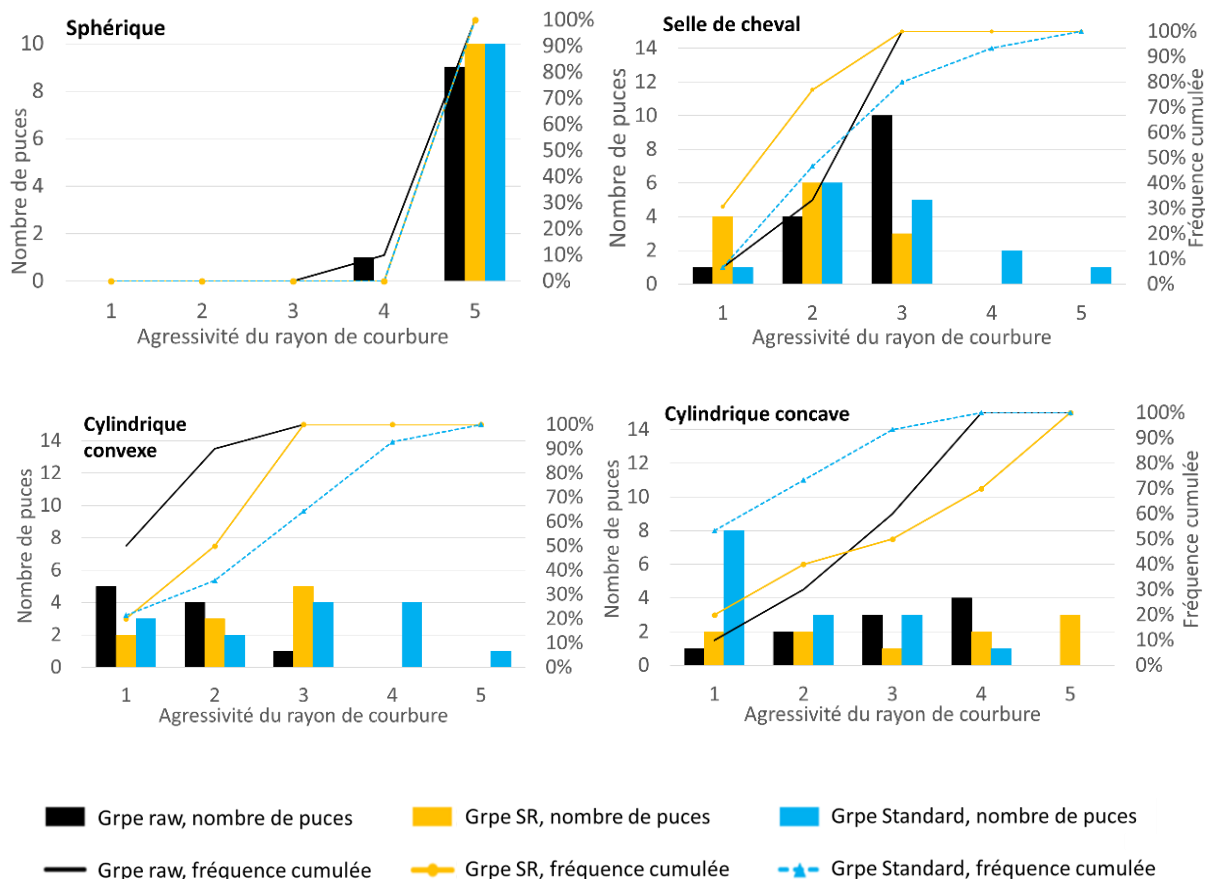


Figure 4.12 – Répartition des ruptures. Le code couleur représente chaque procédures de préparation des puces. Les résultats sont présentés avec les valeurs brutes et les pourcentage cumulés de rupture. Les cales sont groupées deux à deux pour la lisibilité, sauf la n°9 qui marque l’absence de rupture.

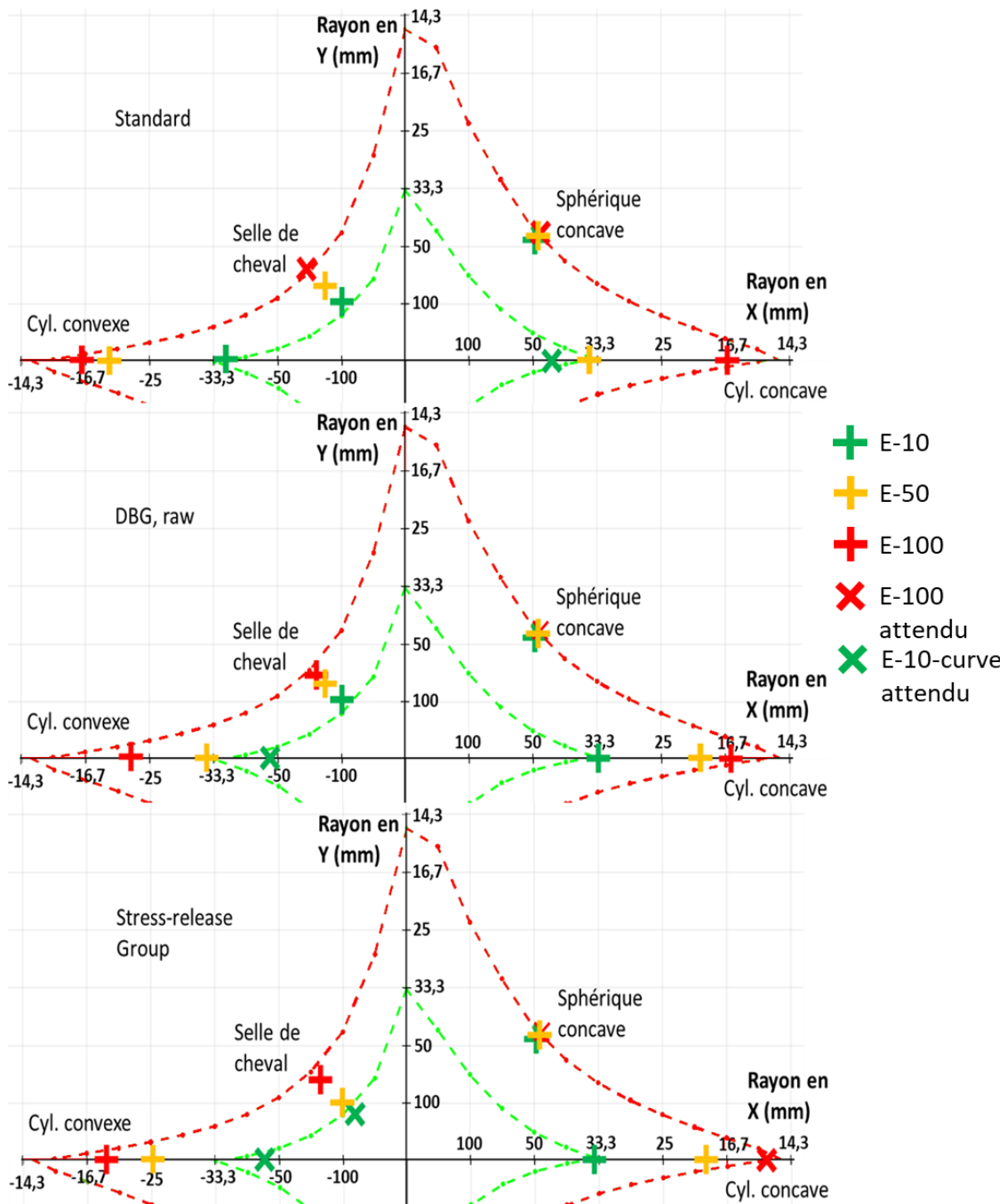


Figure 4.13 – Résultats expérimentaux superposés aux résultats théoriques, pour chaque groupe de puce. Haut : groupe standard ; milieu : groupe raw ; bas : groupe stress-release. Les croix vertes représentent un point de la courbe E-10. Les croix rouges représentent un point de la courbe E-100. Les croix oranges représentent la médiane. Les croix à 45° représentent les points qui n’ont pas pu être déterminés.

Afin d’évaluer la pertinence de nos résultats, je calcule les deux valeurs extrêmes entre lesquelles la moyenne à 90% de chances de se situer, nommée moyenne inférentielle. Pour ce calcul, je suppose que la distribution des ruptures se fait selon une loi normale, centrée sur la valeur moyenne de rupture. En utilisant la loi de Student, on obtient :

$$\bar{X}_n - t_{0,9} \frac{S_n^*}{\sqrt{n}} \leq m \leq \bar{X}_n + t_{0,9} \frac{S_n^*}{\sqrt{n}} \quad 4.2$$



Avec  $\bar{X}_n$  la valeur moyenne des rayons de courbure de rupture,  $t_{0,9} = 1,833$  le coefficient à 10 % de la table de Student [117],  $S_n^*$  le coefficient de variance de l'échantillon et  $n$  le nombre d'éléments.

En représentant ces valeurs probables pour la moyenne, ainsi que la médiane et les valeurs maximales et minimales de numéro de cale de rupture, on obtient la Figure 4.14 :

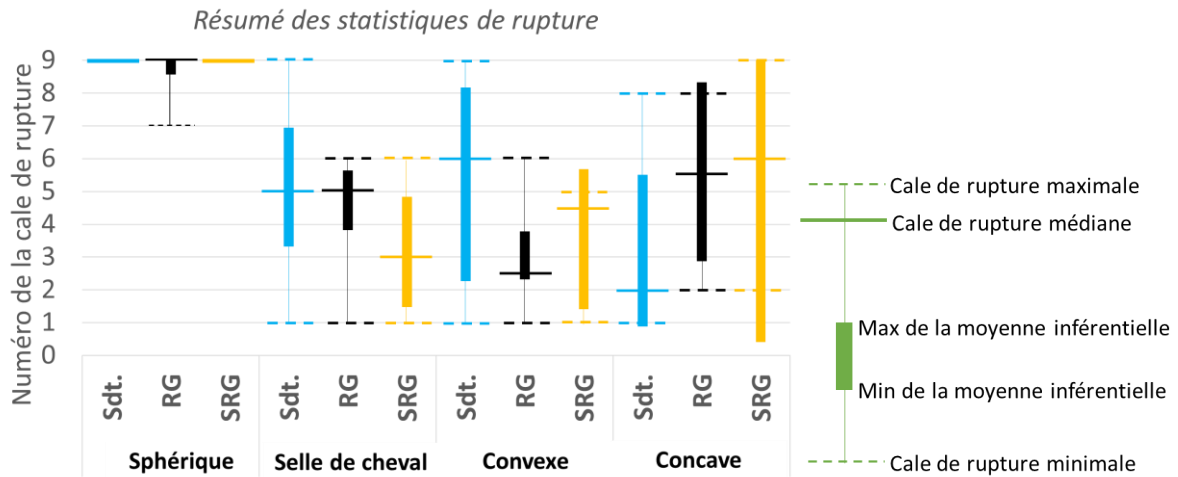


Figure 4.14 – Statistiques expérimentales de ruptures. Le code couleur est le même. Cinq valeurs sont présentées dans chaque cas : cale de rupture minimale, maximale et médiane, ainsi que les moyennes probables à 90%, indiquées avec les segments pleins. A droite : légende pour lire ces cinq valeurs.

#### 4.2.4.3 Discussions

Le premier objectif est de définir les courbes expérimentales E-10 et E-100, pour les comparer aux courbes théoriques T-10 et T-100. La Figure 4.13 montre la réussite partielle de cet objectif : la plupart des points ont été déterminés, mais pas tous. Deux limites empêchent d'en déterminer certains. D'une part, certaines cales initiales ont cassé plus de 10 % des puces, ce qui empêche de placer le point de la courbe E-10. D'autre part, dans le cas du sphérique, les cales avec les rayons de courbure les plus agressifs requièrent plus de force pour plaquer la cale correctement. Ainsi, pour les deux dernières cales en sphérique, on n'a pas pu déterminer si la puce rompt ou pas. L'absence de ces points rend plus délicate l'interprétation des résultats, mais on perçoit tout de même une proximité des courbes théoriques et expérimentales. Si la corrélation n'est pas parfaite, ces résultats confortent l'utilisation de nos simulations pour estimer la faisabilité d'une courbure donnée.

Par ailleurs, la proximité entre les courbes T-100 et E-100 semble meilleure qu'entre les courbes T-10 et E-10. Ceci peut se comprendre par le fait que la valeur de  $S_{1max} = 200 \text{ MPa}$  utilisée pour la courbe T-10 a été obtenue lors de nos premières études sur la courbure en ajoutant un coefficient de sécurité à la valeur de  $500 \text{ MPa}$ , valeur que l'on trouve dans la littérature lorsqu'un wafer subit un process très similaire à celui du procédé appelé ici standard [109]. Elle a été conforté par le fait que l'on n'ait que rarement constaté de rupture dans la zone verte. Cependant, le choix du coefficient de sécurité reste relativement arbitraire. Il est donc difficile de savoir s'il faut définir cette limite comme la zone de 10 % ou de 1 % de rupture par exemple. Le choix du pourcentage de rupture peut donc ne pas tout à fait correspondre, l'important est l'ordre de grandeur. En ce sens les écarts entre les courbes T-10 et E-10 n'est pas très important.

Le second objectif est d'obtenir la répartition statistique des ruptures pour chaque type de courbure. Les Figure 4.12 et Figure 4.13 fournissent ce résultat pour les quatre formes de courbure. Les autres formes, non testées ici, ont une répartition des contraintes intermédiaire par rapport à la Figure 4.3. Le phénomène



est particulièrement visible pour la forme biconique, intermédiaire entre le sphérique et le cylindrique. Ainsi, il est physiquement raisonnable de penser que la distribution statistique des ruptures est à l'image de la continuité des répartitions des contraintes dans les puces. Evidemment, ces extrapolations devraient être faite avec précaution au vu de la variabilité de nos résultats. Pour étudier plus en détails une forme non testée ici, ces résultats peuvent servir de point de départ.

A noter que notre procédé expérimental est proche de celui utilisé pour les puces fonctionnelles, mais pas identique. Ici, aucune colle n'est utilisée pour fixer les puces à la cale, ce qui peut faire une différence significative en pratique : d'une part, la colle atténue la rugosité de la cale, donnant donc une surface plus plane localement à la puce, d'autre part, elle modifie le type de contact entre la puce et la cale, en absorbant une partie de l'énergie. Ces deux modifications ont probablement tendance à sous-estimer les rendements dans notre expérimentation.

Le dernier objectif est de comparer les trois types de préparation des puces avant la mise en courbure. Si nos résultats permettent effectivement de les comparer, il n'est pas évident d'en tirer des conclusions. Nous nous attendions à ce que le groupe standard ait de moins bons résultats que le groupe *raw*, lui-même moins bon que le groupe *stress-release*, puisque la procédure DBG réduit la zone de *chipping* en face arrière. Ensuite, le groupe *stress-release* a eu une étape de préparation supplémentaire pour réduire les stress résiduels issus de l'amincissement. L'hypothèse de départ est : les ruptures précoces de puces sont dues à la présence de de *chipping* sur la face arrière, réduisant la résistance à la contrainte des puces.

Le Tableau 4.3 résume les résultats obtenus en les comparant aux résultats attendu.

Forme	Sphérique	Selle de cheval	Cylind. convexe	Cylind. concave
Maximum de contrainte	Au centre, face arrière	Aux bords, Deux faces	Au bord, face avant	Au bord, face arrière
Meilleur procédé attendu	Standard et SR	DBG, SR	Egaux	DBG, SR
Résultat obtenu	Egaux	Standard	Standard	DBG, SR

Tableau 4.3 – Comparaison pour chaque forme testée des résultats attendus aux résultats obtenus.

La forme sphérique a une particularité par rapport aux autres : le maximum de contrainte est au centre de la face arrière. Or, en face arrière, les groupes standard et SR ont reçu un dry polish qui diminue les contraintes, ce qui devrait en diminuer les ruptures. L'impossibilité d'atteindre la rupture par manque de force rend impossible de valider cette hypothèse. Mais les résultats obtenus ne contredisent pas les hypothèses.

Pour les autres formes, les maxima de contraintes sont en bord de puce. Selon l'hypothèse initiale, la supériorité du groupe stress release devrait être observée. Mais ce groupe n'est meilleur que dans le cas particulier de la forme cylindrique concave. De plus, nous ne constatons même pas de différences entre le groupe standard et les deux groupes issus du procédé DBG (*raw* et *stress-release*) puisque pour les formes cylindriques convexes, le groupe standard est meilleur. Ces résultats ne valident pas l'hypothèse de départ : nous n'observons pas de supériorité du groupe stress release sur les autres, ni même du procédé DBG sur le procédé standard.

Face à ces résultats, il y a plusieurs conclusions possibles : soit il y a un biais dans nos procédures, soit l'hypothèse de départ du lien entre le *chipping* et les ruptures précoces n'est pas valide.

La dispersion de nos résultats ne permet pas de conclure avec fermeté pour savoir quelle méthode est la meilleure dans chaque cas. Une première question apparaît donc : cette dispersion peut-elle cacher les résultats attendus ?

Tout d'abord, les points expérimentaux manquants ne permettraient pas de changer les conclusions. En effet, la forme selle de cheval confirme la supériorité du procédé standard et la forme cylindrique concave confirme la supériorité du procédé stress-release. La forme sphérique a la même imprécision pour les trois types de formes, donc il n'y a pas de conclusion quant au meilleur procédé à remettre en cause. Ces absences de points expérimentaux ne peuvent donc pas expliquer ces résultats surprenants.

En analysant la Figure 4.14, on voit que certaines moyennes inférées donnent des intervalles très importants, surtout pour le groupe Stress-Release. Ces intervalles sont mathématiquement liés à la variance du rayon de rupture : plus les ruptures sont dispersées sur les huit cales, plus la moyenne inférée est large. Soit le nombre de puces testées est insuffisant pour certains groupes, soit un autre facteur expérimental a introduit de la dispersion dans les résultats.

En étudiant attentivement les paramètres de l'expérience, nous pensons que les cales pourraient être un facteur de dispersion. Nous avons fait attention à utiliser les mêmes cales pour toutes les puces et elles sont fabriquées avec la meilleure résolution possible (pas de  $32\ \mu\text{m}$ ). Plusieurs essais antérieurs avaient aussi renforcé notre confiance dans leur utilisation. Mais après leurs observations au microscope, illustrées à la Figure 4.15, les cales cylindriques convexes ont des bosses au centre, d'environ  $20\ \mu\text{m}$  de hauteur, liées à la résolution de l'impression 3D. Ces bosses transforment le contact surfacique en un contact ponctuel entre la puce et la cale, ce qui peut tout à fait induire une dispersion des résultats. A noter en particulier qu'en cylindrique, si le maximum de contrainte se situe effectivement au bord des puces, il reste élevé à travers toute la surface, ce qui laisse la possibilité d'une amorce de rupture ailleurs qu'au bord. Les résultats expérimentaux montrent que c'est le groupe *raw* qui rompt le plus vite sur ces cales et c'est celui qui n'a pas eu le traitement stress release en face arrière, ce qui indique une influence du stress release sur la face arrière. Mais ce groupe de test ne permet pas de valider l'apport de la procédure DBG pour traiter les amorces de ruptures en bord de puce.

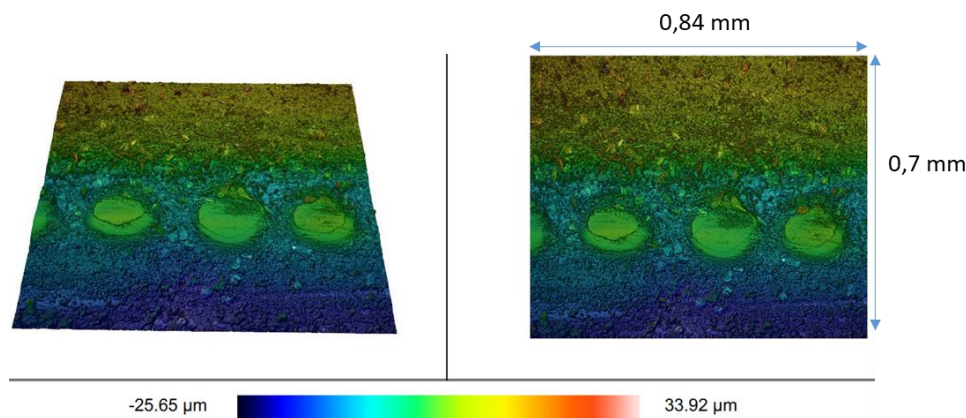


Figure 4.15 – Observation d'une cale cylindrique convexe au microscope confocal. On perçoit nettement la ligne pointillée issue de l'impression 3D. Leur hauteur est de l'ordre de  $20\ \mu\text{m}$ .

Cependant, même en retirant les résultats cylindriques convexe de l'analyse, les résultats obtenus sur la forme en selle de cheval montrent une supériorité du groupe standard sur les deux autres, alors que le maximum de contrainte se situe bien en bord de puce, où la disparition du chipping devrait jouer en la faveur des groupes *raw* et SR.

Une autre explication consiste à supposer que le traitement DBG a entraîné une dégradation de la face avant des groupes *raw* et SR. Ces dégradations peuvent survenir lors de la manipulation des puces. Cette hypothèse est appuyée par l'observation MEB des faces avant des puces, illustrée à la Figure 4.16. On voit que toutes les puces ont du *chipping* sur les faces avant, mais les puces DBG ont un *chipping* plus prononcé (plus profonds et plus nombreux) que pour le groupe standard. Partir de l'hypothèse que les faces avant sont dégradées pour ces deux groupes, explique que le procédé standard soit meilleur en cylindrique convexe car les contraintes sont sur la face avant, où le groupe DBG est moins bon. Cela explique aussi que le procédé standard soit le moins bon en cylindrique concave puisque les défauts sont sur la face arrière, où la suppression du *chipping* en face arrière grâce au DBG montrerait bien son efficacité. Pour la forme selle de cheval, comme les contraintes sont à la fois en face avant et face arrière, les faces avant dégradées auraient plutôt favorisé le procédé standard. Enfin, pour la forme sphérique, il n'y a pas de différence liée à l'état de la face avant. Ceci correspond effectivement à ce qui est observé expérimentalement.

La dégradation des faces avant semble donc une hypothèse réaliste. Cependant, l'étude de face arrière n'avait pas été prévue initialement et la rupture des puces rend difficile de vérifier cette hypothèse. Cela peut être un effet global affectant toutes les puces ou un effet local, par exemple uniquement sur les bords des wafers.

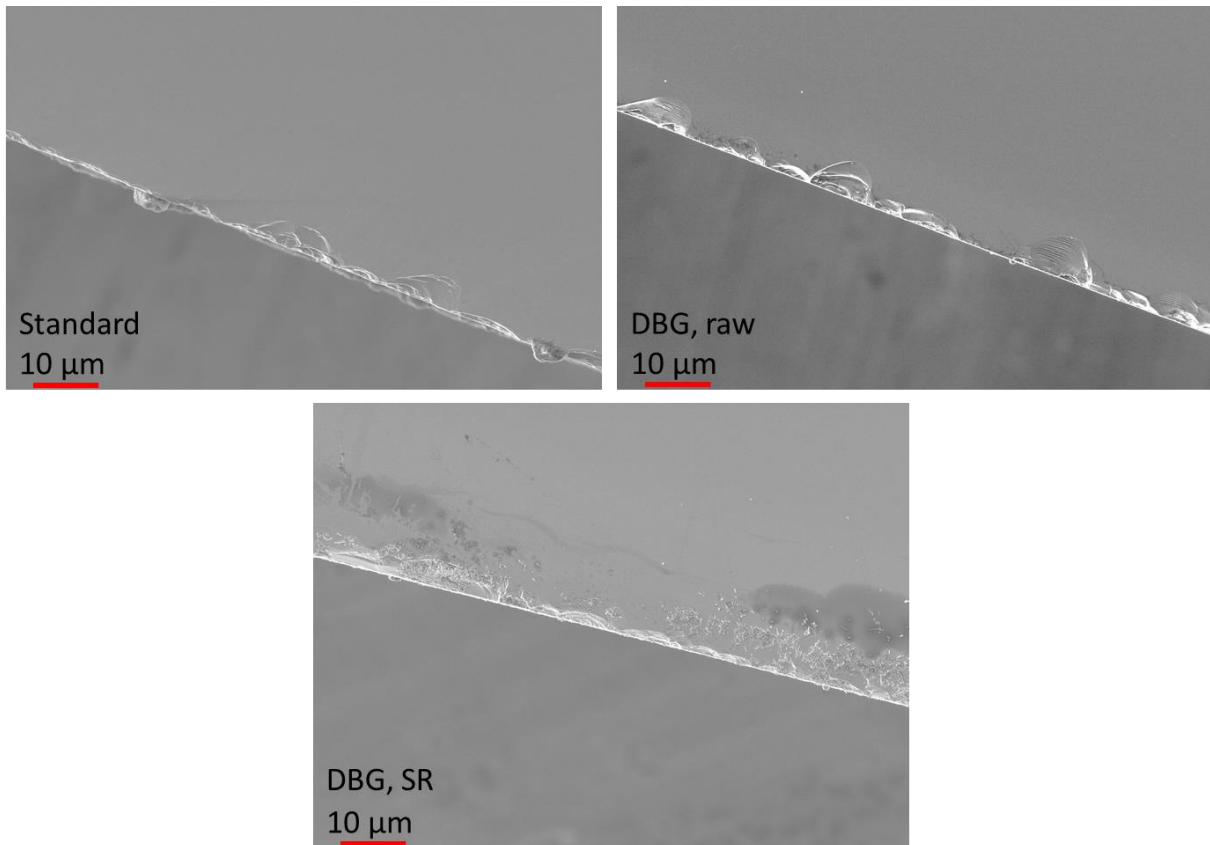


Figure 4.16 – Faces avant d'une puce représentative des trois groupes.

Cette hypothèse permet de rendre compte du fonctionnement de la suppression du *chipping* en face arrière, ainsi que de la variabilité de nos résultats. Il faudrait donc produire d'autres wafers DBG pour tester la reproductibilité des traitements, ainsi que leur homogénéité.

#### 4.2.4.4 Conclusion

L'expérience menée a permis de valider les simulations sur la plupart des points, et d'y ajouter des informations inaccessibles par simulation. En revanche, la comparaison entre les différentes méthodes ne permet pas de conclure sur l'influence du DBG. Pour retravailler sur ces conclusions, un plan d'expérience plus ambitieux devrait être mis en œuvre, en testant plusieurs wafers de chaque groupe, et en gardant trace de la localisation de chaque puce testée. Enfin, pour éviter d'induire un doute sur la variabilité des résultats, il est préférable d'usiner des cales métalliques, identiques à celles utilisées en pratique avec un meilleur état de surface, plutôt que les cales en impression 3D, même de haute résolution.

Quoiqu'il en soit, le procédé expérimental lui-même peut être repris pour comparer, dans d'autres cas, les simulations avec la réalité. Dans le cas où l'on ait besoin d'avoir une vision plus précise des rendements, ce procédé peut être repris. Enfin, les simulations sont effectivement proche de la réalité physique de la rupture des puces.

#### 4.2.5 De l'OLED au GaN

Comme je l'ai présenté au chapitre 1, la technologie OLED n'est pas la seule technologie de microécran. Les microécrans à cristaux liquides et les MEMs sont des technologies très éloignées de l'OLED, ce qui rend inenvisageable d'adapter nos technologies de courbure à ces cas-là. En revanche, les microécrans GaN sont assez proches des microécrans OLED pour envisager de les courber selon des méthodes similaires. Afin d'entrevoir les perspectives de courbure de ces technologies, nous avons pris le temps de réfléchir à adapter notre travail à leurs caractéristiques.

Les travaux ne sont constitués que de simulations parce que par manque de maturité, il est difficile de se fournir en microécran GaN pour tester la courbure. Je présente deux modèles mécaniques, développés pendant cette thèse, avec l'aide précieuse de Fabien Zuber, sur la base des travaux de Bertrand Chambion.

La différence entre les deux modèles est principalement liée à la répartition du GaN sur le microécran. Le premier modèle considère la couche de GaN comme étant répartie uniformément sur toute la surface émissive, avec une épaisseur entre  $1,5 \mu\text{m}$ . Le second modèle considère des îlots de GaN, déposés sur chaque pixel. Si le premier modèle correspond aux premiers essais de microécran, le second correspond aux développements actuels essayés au CEA. Nous étudions donc deux géométries distinctes, mais dans les deux cas, on suppose un contact parfait entre le GaN et le substrat de silicium.

La première chose à comprendre est que le matériau GaN est, comme le silicium, un matériau cassant. Mais ses possibilités de déformation sont encore plus faibles. Autrement dit, pour une même épaisseur, une plaque de GaN pourra être beaucoup moins courbée qu'une plaque de silicium. Ainsi, les limites en tensions pour le silicium sont :  $S_{1max} = 200 \text{ MPa}$  et  $S_{2max} = 500 \text{ MPa}$  ; pour le GaN, elles sont :  $S_{1max} = 50 \text{ MPa}$  et  $S_{2max} = 70 \text{ MPa}$ . En revanche, pour le silicium, comme la compression ne posait pas de souci, nous n'en avons pas donné les valeurs. Pour le GaN, ces valeurs sont :  $S_{3max} = 140 \text{ MPa}$  et  $S_{4max} = 200 \text{ MPa}$  [118]. Ces valeurs sont à prendre avec précaution, puisqu'elles ne correspondent pas exactement à nos protocoles. Mais, de même que pour le silicium, c'est l'ordre de grandeur qui importe.

Nous simulons un microécran GaN, et nous cherchons le rayon de courbure pour lequel un des seuils de contrainte est dépassé dans une des couches matériau, pour l'ensemble des formes biconiques. Les détails techniques de la simulation sont très proches de celle réalisée pour l'OLED, avec la même surface étudiée, un amincissement à  $80 \mu\text{m}$  du silicium, et un maillage équivalent (élément de maille, et nombre de nœuds). La seule différence est liée à l'ajout de la couche de GaN.

## 4.2.5.1 Simulation de GaN uniformément réparti

### 4.2.5.1.1 Présentation du modèle

Dans le cadre du premier modèle, nous réalisons une première simulation avec une épaisseur de  $1,5 \mu\text{m}$  de GaN, déposé sur toute la puce, il est donc nommé « GaN pleine plaque ». Cette épaisseur est considérée comme représentative, après discussions avec des experts du CEA. Les caractéristiques du microécran simulée sont identiques au microécran OLED *Izumi* afin que les résultats soient comparables : surface de  $16,70 \times 15,43 \text{ mm}^2$ , amincie à  $80 \mu\text{m}$ .

Cette technologie a été produite au CEA-Leti en utilisant des microtubes qui sont une méthode d'interconnexion permettant à la fois de gérer le contact mécanique entre le pixel et le substrat, et le contact électrique [119]. Ces puces sont composées de quatre couches : le substrat en silicium, le CMOS, les microtubes et la couche de GaN. Le développement d'une simulation reproduisant fidèlement une telle structure est au-delà de nos compétences en simulation mécanique. Nous avons donc cherché un matériau équivalent à la couche microtube-GaN, et en supposant l'influence du CMOS négligeable (hypothèse déjà faite pour l'OLED), on peut modéliser ces composants. Mais ne pouvant pas le tester expérimentalement, nous avons décidé de ne simuler que les couches de silicium et de GaN.

La Figure 4.18 montre clairement que la courbure d'un microécran GaN est beaucoup plus limitée que la courbure d'un microécran OLED, pour ce premier modèle. Par ailleurs, on remarque une forte asymétrie du microécran GaN entre les courbure concaves et convexes. Cette asymétrie est due à la position de la couche de GaN sur le microécran, sur le dessus. Ainsi, si le microécran est courbé en concave ou en convexe, ce ne sont pas les mêmes contraintes en tension et compression qui sont en jeu. Concrètement, lorsque la courbure est concave, c'est la limite en compression ( $S_3$ ) qui est atteinte la première, tandis qu'en convexe, c'est la limite en tension ( $S_1$ ), comme illustré à la Figure 4.17.

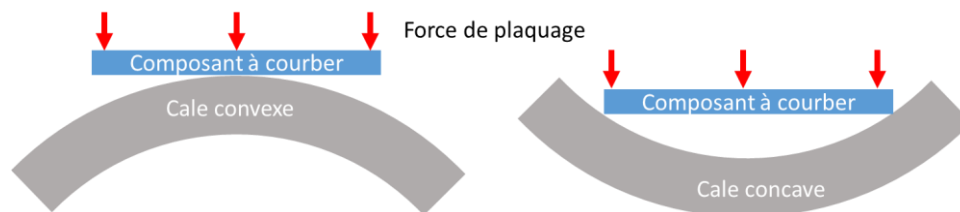


Figure 4.17 – Illustration des contraintes sur la face arrière de la puce courbée en silicium. Gauche : le composant subit des contraintes de tension, car il est étiré pour être plaqué sur la cale. Droite : à l'inverse, ce sont des contraintes de compression qui interviennent.

### 4.2.5.1.2 Résultats de simulation

La Figure 4.18 donne les résultats de la simulation, pour l'OLED et le GaN pleine plaque, pour les comparer. La lecture de ce graphe est identique aux graphes de l'OLED, avec les trois zones à considérer :

- Du centre du graphe ( $R_x = \text{inf}$  ;  $R_y = \text{inf}$  → microécran plan), jusqu'aux courbes vertes, la courbure ne pose a priori pas de problème technique, il ne devrait pas y avoir de casse.
- Entre les courbes vertes et rouges, la proportion de puces cassées pendant la mise en courbure devrait croître, c'est la zone intermédiaire.
- Au-delà de la courbe rouge, la zone décrit des courbures inatteignables, le composant a de très grandes chances de casser pendant la mise en courbure. Ce graphe est un peu complexe à lire, mais on peut se contenter de lire les valeurs sphériques et cylindriques pour avoir une idée des ordres de grandeur.

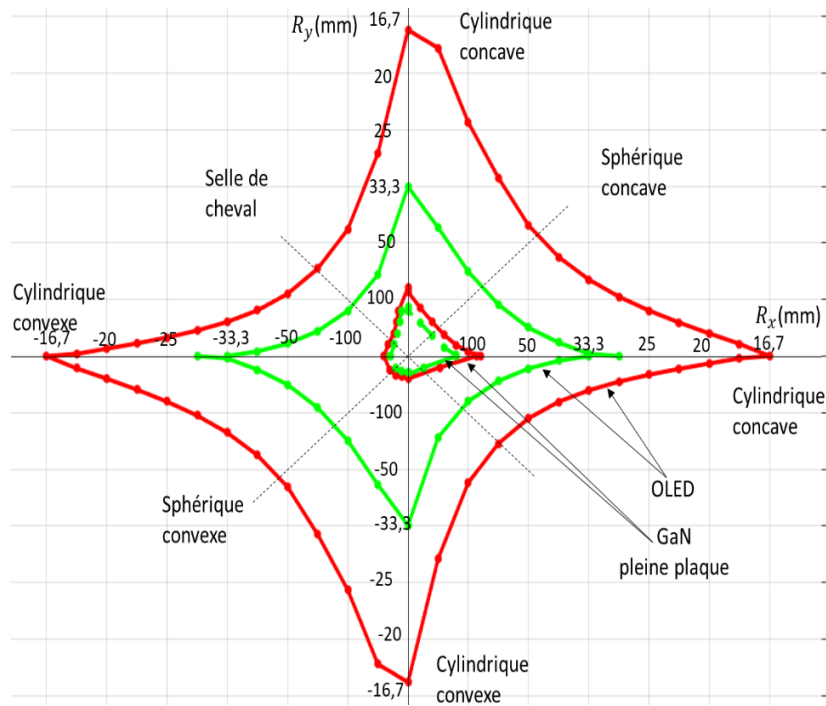


Figure 4.18 – Superposition des résultats de courbure.

Dans le cadre de cette modélisation en couche uniforme, on peut dire que le GaN limite fortement les courbures atteignables. A titre de comparaison, et pour simplifier la lecture de la Figure 4.18, le Tableau 4.4 résume trois valeurs de rayon de courbure pour l’OLED et le GaN pleine plaque.

	Rayon de courbure max, OLED	Rayon de courbure max, GaN pleine plaque
Sphérique concave	47 mm	200 mm
Sphérique convexe	-47 mm	-400 mm
Cylindrique concave	17 mm	87 mm

Tableau 4.4 – Comparaison des courbure limites entre la technologie OLED et GaN pleine plaque pour une même surface.

A l’échelle de la surface de *Izumi*,  $16,70 \times 15,43 \text{ mm}^2$ , la courbure sphérique atteignable au maximum en convexe est négligeable, il a très peu de différence par rapport à un microécran plan.

Voyons maintenant le second modèle, qui est plus proche de la réalité pour décrire les microécrans GaN, mais plus prospectif.

## 4.2.5.2 Simulation de GaN pixélisé

### 4.2.5.2.1 Présentation du modèle

Le second modèle considère que le GaN est déposé sur chaque pixel, localement, en îlots, comme le montre la Figure 4.19. Lorsque le microécran est plan, les écarts entre les pixels sont remplis de métal, afin d’assurer un contact électrique entre les pixels. Si on courbait un tel composant, il faudrait donc adapter le volume de métal pour éviter de remplir les interstices et éviter une résistance en plus à la courbure.

Notre hypothèse principale considère les îlots de GaN comme assez petits pour que la courbure locale du composant soit négligée du point de vue du GaN. Par conséquent, les pixels de GaN ne sont pas déformés,

donc les contraintes dans le GaN ne sont pas induites par la déformation de ce matériau, mais par celle du silicium, qui transfère ses contraintes puisque les deux sont liés, en considérant ce contact comme parfait.

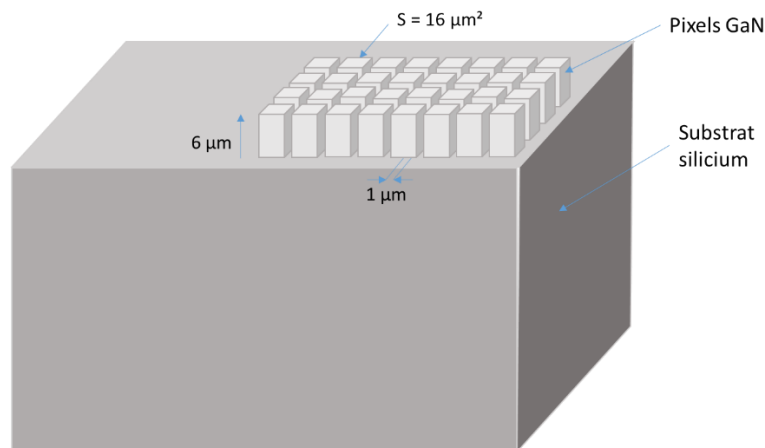


Figure 4.19 – Illustration d’un microécran avec des pixels GaN répartis en îlots. Les écarts et dimensions des pixels sont à l’échelle. Mais l’épaisseur du silicium ne peut pas être représentée à l’échelle, son épaisseur de 80  $\mu\text{m}$  serait démesurée pour la taille de l’image.

Avec cette hypothèse, la modélisation numérique dans Ansys est grandement simplifiée, puisque nous ne modélisons que le substrat de silicium. Le calcul consiste donc à calculer les valeurs de contraintes en chaque point du silicium, et à déterminer le premier nœud où la valeur de contrainte dépasse le seuil de rupture du GaN. Comme le contact entre le silicium et le GaN est supposé parfait, on considère que le microécran a atteint son seuil de rupture, selon les valeurs de seuil :  $S_{1max} = 50 \text{ MPa}$  et  $S_{1max} = 70 \text{ MPa}$  en tension, et  $S_{3max} = 140 \text{ MPa}$  et  $S_{3max} = 200 \text{ MPa}$  en compression.

#### 4.2.5.2.2 Test sur une limite du modèle

Dans ce cadre les dimensions exactes des pixels importent peu puisqu’ils n’y apparaissent pas. En revanche, un point crucial doit être vérifié avant les calculs par éléments finis : pour quel rayon de courbure les pixels se touchent-ils ? Si les pixels GaN entrent en contact avant le rayon de courbure limite donné par la simulation précédente, des contraintes (compression et cisaillement) interviendraient dans le système, mais ne seraient pas modélisées : le modèle ne serait plus valide.

Pour calculer le rayon de courbure pour lequel les pixels se touchent, on prend comme dimension, une surface de  $4 \mu\text{m}$  de côté et  $6 \mu\text{m}$  de hauteur. L’écart laissé entre les pixels est de  $1 \mu\text{m}$ . Ces dimensions ont été choisies après discussion avec un expert CEA. Ils représentent des objectifs de développement actuels pour augmenter les résolutions. On commence par rechercher l’angle entre deux pixels qui se touchent.

$$\theta = 2A \sin\left(\frac{e}{2h}\right) = 9.6^\circ \quad 4.3$$

Puis, on calcule le nombre de pixel nécessaire à réaliser un cercle complet.

$$N_{px} = \frac{360}{\theta} = 38 \text{ pixels} \quad 4.4$$

Connaissant la taille des pixels, on en déduit le périmètre du cercle



$$P = sN_{px} = 151 \mu m \tag{4.5}$$

Du périmètre, nous en déduisons le rayon de courbure du cercle formé par les pixels ainsi agencés :

$$R = \frac{P}{2\pi} = 24.0 \mu m \tag{4.6}$$

La Figure 4.20 permet de visualiser les grandeurs permettant ce calcul de rayon.

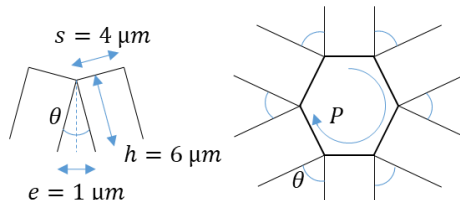


Figure 4.20 – Visualisation des éléments permettant de calculer le rayon de courbure maximal selon cette géométrie.

Ce n’est donc pas le contact entre les pixels qui limite le rayon de courbure atteignable, mais bien les contraintes dans le matériau avant le contact des pixels entre eux.

#### 4.2.5.2.3 Résultats de simulation

Nous pouvons donc maintenant revenir à la simulation des contraintes. Nous ne simulons qu’une plaque de silicium, mais nous cherchons les valeurs de contraintes correspondant aux limites du GaN. Toutefois, celui-ci ne se situe pas sur toute la surface, la recherche des contraintes limite ne se fait donc que dans la zone active du microécran. Au-delà, seules les valeurs de contraintes du silicium sont considérées. La Figure 4.21 compare les résultats pour l’OLED et le GaN.

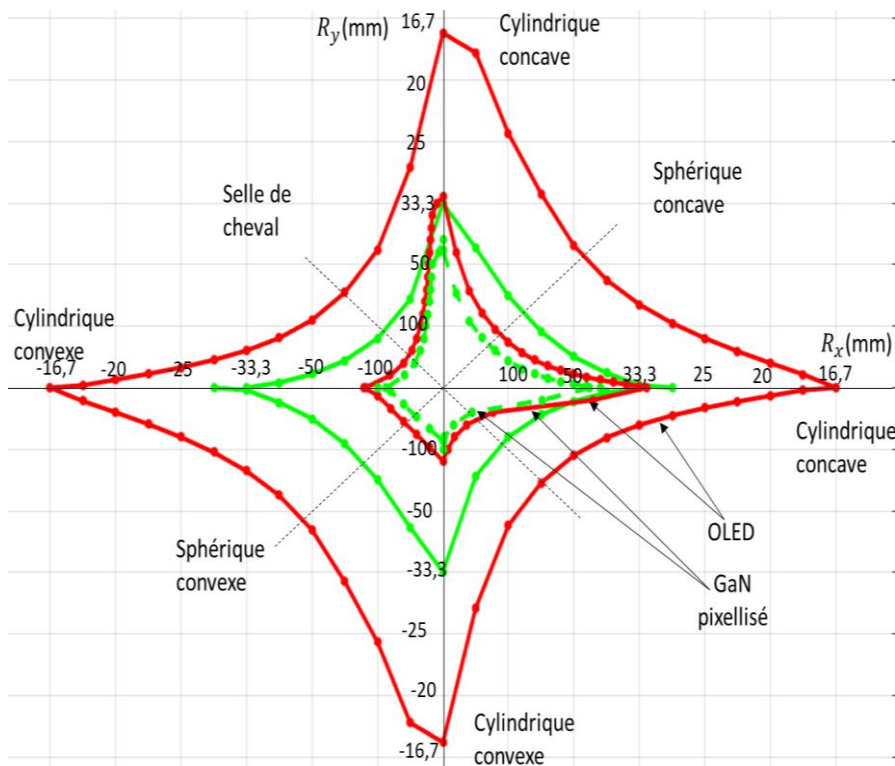


Figure 4.21 – Superposition des résultats pour la courbure de microécrans OLED et GaN pixelisé.



En comparant les courbures atteignables entre le modèle de GaN pleine plaque et pixélisé, on voit que la pixellisation permet de gagner en courbure pour les microécrans GaN, bien qu'ils demeurent moins flexibles que les microécrans OLED. Nous donnons quelques valeurs numériques dans le Tableau 4.5 pour faciliter la lecture de la Figure 4.21.

	Rayon de courbure max, OLED	Rayon de courbure max, GaN pixélisé
Sphérique concave	47 mm	118 mm
Sphérique convexe	-47 mm	-175 mm
Cylindrique concave	17 mm	32 mm

Tableau 4.5 – Comparaison des courbures limites entre la technologie OLED et GaN pixélisé pour une même surface.

En superposant les courbures limites selon les deux hypothèses de rupture pour les trois types technologies, la différence apparait clairement, comme le montre la Figure 4.22.

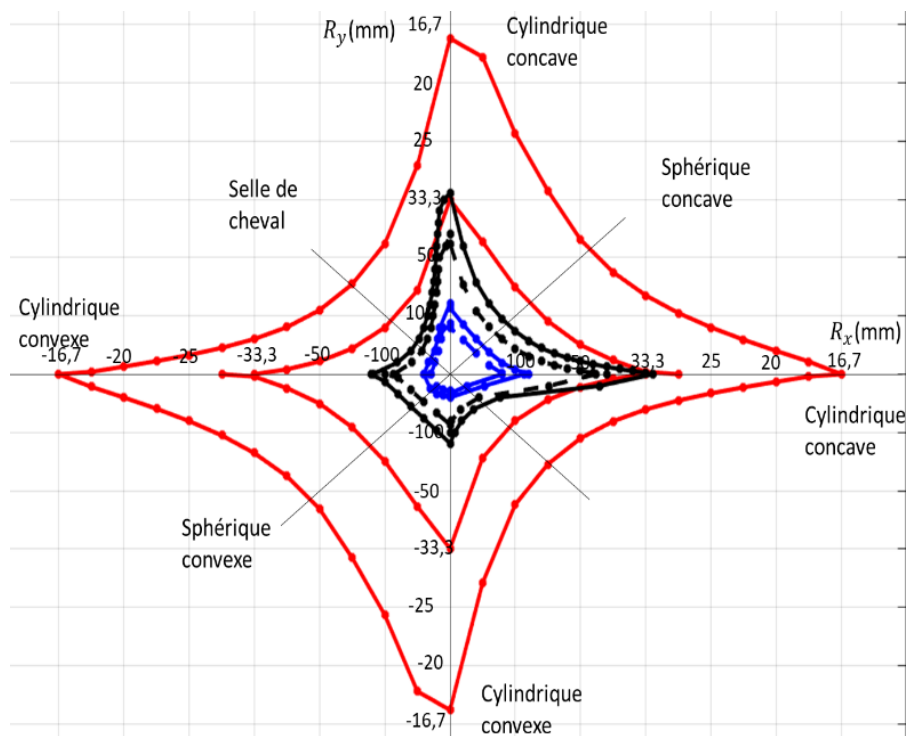


Figure 4.22 – Superposition des courbures atteignables pour un microécran OLED (rouge), GaN pixélisé (noir) et GaN pleine plaque (bleu).

#### 4.2.5.2.4 Conclusion et perspectives

Le modèle présenté indique clairement l'influence du GaN, qui limite fortement la courbure du microécran. Mais la pixellisation de ce matériau permet déjà d'améliorer les résultats. Toutefois, ces résultats doivent être pris avec précaution, du fait du manque de recul que nous avons sur les hypothèses de départ. Plutôt que de s'intéresser aux valeurs précises de courbure, l'information donnée par ces simulations est dans les ordres de grandeurs, et l'amélioration notable de la courbure maximale apportée par la pixellisation du GaN.

Dans les perspectives de recherche, il faudrait pouvoir mener un banc de test pour valider des simulations et être plus affirmatif sur les courbures atteignables pour un microécran GaN. En particulier, il est tout à

fait imaginable qu'en ajoutant un composant entre la couche de silicium et celle de GaN, on puisse limiter la transmission des contraintes du silicium vers le GaN, et ainsi gagner en courbure.

Quoiqu'il en soit, il semble qu'au vu des caractéristiques du matériau, il sera difficile d'avoir un composant GaN plus flexible qu'un équivalent OLED. En particulier parce que dans les cas modélisés ici, le matériau de substrat est composé de silicium, qui demeure un matériau limitant pour la courbure. En s'affranchissant du silicium, on pourrait imaginer réaliser des composants beaucoup plus flexibles, mais nous sortons du concept initial qui consiste à rester au plus proche des chaînes de fabrication de microélectronique.

## 4.3 PROCÉDE ET RESULTATS

Initialement, cette partie devait servir à présenter l'ensemble des manipulations et leurs résultats ainsi que les caractérisations permettant de qualifier les microécrans. La Figure 4.7 présentant les étapes de courbure des microécrans est présentée de nouveau à la Figure 4.23, car elle permet de mieux suivre le travail décrit par la suite.

Malheureusement, pour diverses raisons dont une panne machine de longue durée, nous avons pris du retard pour la mise en courbure des microécrans fonctionnels. A ce jour, ce retard n'est pas encore comblé, et nous travaillons encore à la réalisation pratique de microécrans fonctionnels. Nous ne pouvons donc en présenter qu'un aperçu assez rapide.

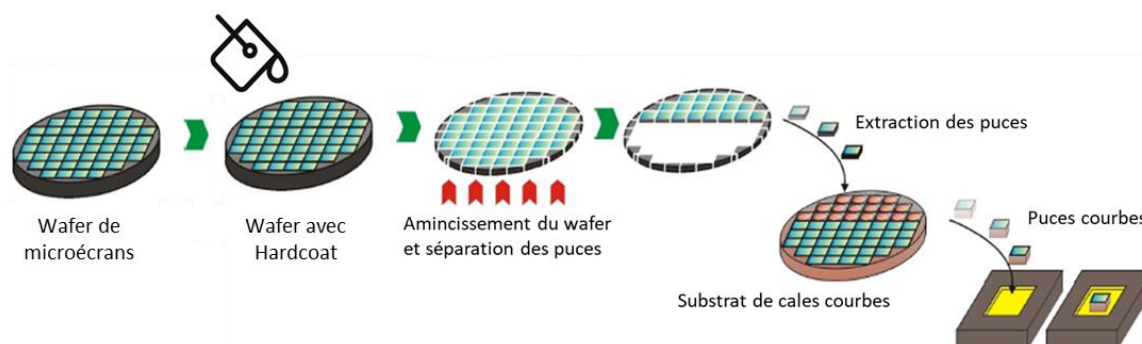


Figure 4.23 - Etapes de mise en courbure de microécrans

### 4.3.1 Avant courbure

#### 4.3.1.1 Réception des wafers

Les microécrans nous ont été fournis avant la finalisation des étapes de *back-end*<sup>8</sup> par la société Microoled. Les étapes de packaging, c'est-à-dire de découpe, d'encapsulation avec un capot de verre, de wire-bonding ainsi que le report des microécrans sur la carte électronique n'ont donc pas été réalisés sur les wafers fournis.

Suivant la procédure normale de production, avant la mise en place de notre protocole de courbure, Microoled a procédé à un test électrique de chaque puce pour en vérifier le bon fonctionnement. Ils nous ont fourni les résultats de ces tests sous forme de cartes des wafers, de sorte à connaître les caractéristiques des composants avant toute manipulation. Les résultats ne sont pas binaires : fonctionnel / non fonctionnel. Il s'agit plutôt d'une liste de catégorie possible dans laquelle se trouvent les puces : entièrement fonctionnelle, non fonctionnelle,  $N$  pixels non fonctionnels, présences d'inhomogénéités, etc. Cependant,

<sup>8</sup> Etapes de Back-end : étapes de finalisation d'un produit en microélectronique.

nous n'en publions pas les résultats pour des raisons de Confidentialité demandée par notre fournisseur Microoled.

### 4.3.1.2 Dépôts du Hardcoat

C'est à cette étape que la panne machine a fortement retardé notre travail. Le Hardcoat (HC) a finalement pu être déposé par un processus de *spin-coating*, de sorte à obtenir une couche homogène du HC et à n'en laisser qu'au-dessus de la zone pixel. Une fois déposée, la couche de HC mesure  $5\ \mu\text{m}$  d'épaisseur. La Figure 4.24 montre l'état du wafer de microécran ayant reçu la couche de HC. Quelques puces ont déjà été extraites.

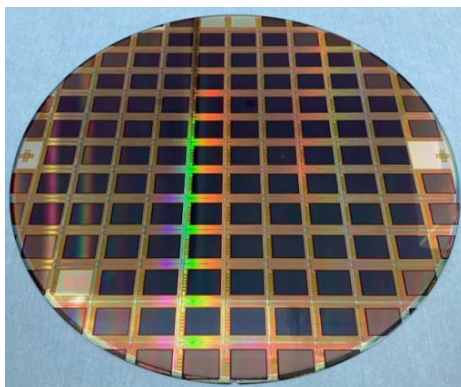


Figure 4.24 – Wafer de microécran enduit de HardCoat.

### 4.3.1.3 Amincissement et découpe

Les deux wafers ont été amincis dans les mêmes conditions à  $80\ \mu\text{m}$  d'épaisseur, puis ils ont été découpés par des procédés standards en microélectronique. Ces étapes se sont déroulées sans problème majeur.

A ce stade, les puces sont prêtes à être extraites pour être courbées. La Figure 4.25 présente le wafer de microécran à l'issue du procédé de préparation des puces. Les puces extraites ont été utilisés pour la courbure.

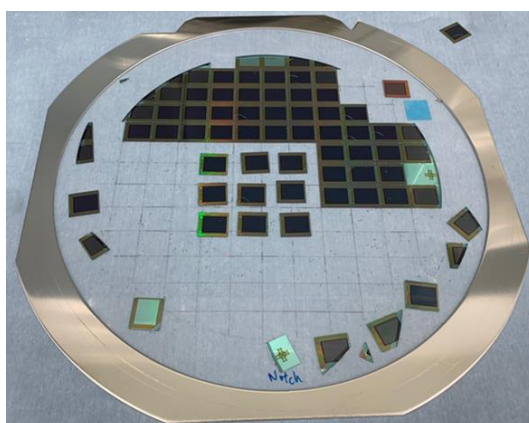


Figure 4.25 – Wafer après amincissement et découpe. De nombreuses puces ont déjà été extraites.

## 4.3.2 Après courbure

Au moment de rédiger ce mémoire, nous travaillons toujours sur cette étape. Il est donc difficile de la décrire plus précisément. Plutôt que de présenter nos résultats finalisés, je peux afficher une image d'un microécran courbe, fonctionnel, allumé sous pointes (Figure 4.26). Cette méthode d'allumage ne permet

d'allumer que l'ensemble des pixels, sans distinction et sans contrôle des caractéristiques du microécran, comme l'homogénéité par exemple.

Ce premier résultat montre tout de même que la courbure est réalisable sur un microécran *Izumi*.

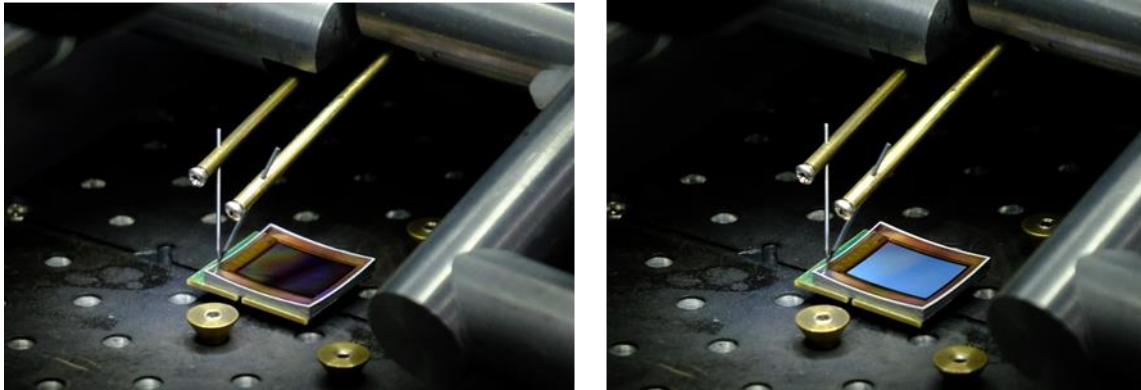


Figure 4.26 – Allumage du microécran *Izumi* de *Microoled* sous pointe en salle blanche. Gauche : microécran courbe éteint. Droite : microécran courbe allumé.

## 4.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, les aspects concrets de la mise en courbure des composants ont été présentés. Les techniques de microélectroniques utilisées pour ce travail sont dans l'ensemble assez classiques, ce qui est un choix volontaire, car cela permet de faciliter la projection vers une industrialisation de ces techniques.

Les simulations mécaniques permettant d'évaluer les courbures atteignables pour un composant ont été validées dans leur ordre de grandeur par un banc de test expérimental. Cependant, ces tests devraient être réalisés de nouveau si le composant utilisé change ou si la forme désirée n'a pas encore été testée. L'utilisation de wafer de silicium bruts permet d'évaluer le taux de rupture pour un procédé précis.

A ce jour, nous sommes capables de produire des microécrans courbes fonctionnels. Ce travail est réalisé afin de fournir les composants nécessaires aux démonstrateurs optiques que je présente dans le cinquième et dernier chapitre.



# 5 DEMONSTRATEURS DE SYSTEMES VISUELS AVEC MICROECRAN COURBE

Une part importante de mon temps de travail au fil de ces trois années a été consacrée à la conception de systèmes optiques visuels, et ce chapitre vise à en présenter les résultats. Au vu de la quantité de travail fourni pour cette partie, je ne peux pas en présenter la totalité. Le développement de systèmes optiques à la caractéristique d'être tortueux puisqu'il s'agit de faire constamment des choix pour améliorer le système.

Bref, ce chapitre ne présente pas tout mon travail de conception, mais plutôt les objectifs et les moyens employés pour y arriver. L'objectif principal de la thèse est de réaliser un démonstrateur de système visuel utilisant un microécran courbe. Dans la partie 1, je présente le choix des démonstrateurs, en détaillant la construction des cahiers des charges. Dans la partie 2, je détaille les démonstrateurs finaux, ainsi que leur tolérancement et optomécanique dans la partie 3. Enfin, les réalisations pratiques sont abordées dans la partie 4.

## 5.1 LE CHOIX DU DEMONSTRATEUR

### 5.1.1 Raisonnement menant au choix du démonstrateur

Comme présenté au chapitre 1, le but initial était d'étudier la capacité de la courbure à améliorer un casque de RA, et d'en produire un démonstrateur. Or, il a vite été clair que la réalisation de ces casques comporte encore de nombreux défis, dont une partie importante n'est pas liée aux problématiques de ce travail. Je me suis donc concentré sur la question de l'affichage en concevant un viseur d'appareil photographique utilisant la RA.

Des viseurs d'appareils photographiques utilisant la RA existent déjà. La société Fujifilm en a conçu un, nommé MVF (*Mixed ViewFinder*), utilisé dans deux modèles, les appareils X-pro et les appareils X-100. La société Leica en conçoit depuis longtemps, mais sans utiliser de microécran, ils sont purement optiques. Ces trois systèmes sont illustrés à la Figure 5.1. Les avantages de ces systèmes sont décrits dans l'annexe 1.



Figure 5.1 – Gauche : Fujifilm X-pro2. Centre : Fujifilm X100V. Droite : Leica M-A.

En comparaison aux casques ou lunettes de RA, l'intégration de la RA dans un viseur diminue certaines contraintes. Notamment, les contraintes optomécaniques sont simplifiées, puisque c'est l'utilisateur lui-même qui aligne le système avec son champ de vision en déplaçant l'appareil photographique. De plus, le système est monoculaire, ce qui permet de s'affranchir des contraintes des systèmes binoculaires, comme la gestion de l'écart interpupillaire ou le conflit vergence-accommodation [52].

De plus, pour viser, l'utilisateur colle son œil au viseur, ce qui coupe le flux lumineux hors champ de vue. De cette façon, le microécran peut être moins lumineux que pour un casque de RA où rien ne coupe le flux lumineux ambiant.

Au-delà de ces arguments, un système de viseur est créé pour un usage précis : cadrer et régler l'appareil photographique. Ceci permet de définir un cahier des charges précis à partir de la littérature. Les casques de RA, eux, ont de nombreux cas d'usage possibles, et il n'est alors pas simple d'arbitrer les priorités parmi les différentes caractéristiques.

## 5.1.2 Présentation d'autres systèmes de viseur

De façon à mieux comprendre comment les cahiers des charges ont été définis, je commence par présenter des exemples de systèmes visuels qui ont été des références pour cerner le sujet.

### 5.1.2.1 Viseur réfléchitif de Bauer

Durant son travail de thèse A. Bauer a développé un viseur électronique réfléchitif *freeform*, utilisant deux miroirs [96]. Puis, reprenant l'étude théorique menée durant sa thèse, il a conçu un démonstrateur pour un viseur électronique *freeform* utilisant cette fois cinq miroirs [120], illustré à la Figure 5.2. Comme il s'agit d'un système réfléchitif, pour éviter de couper le chemin optique du microécran jusqu'à l'œil, il est hors axe.

Les systèmes réfléchitifs ont l'avantage de ne pas présenter d'aberration chromatique, souvent gênante. Ce viseur a été réalisé selon l'analyse issue de la théorie des aberrations nodales (NAT). Par ailleurs, toutes les étapes de fabrication ont été franchies, ce qui en fait une expérience intéressante.

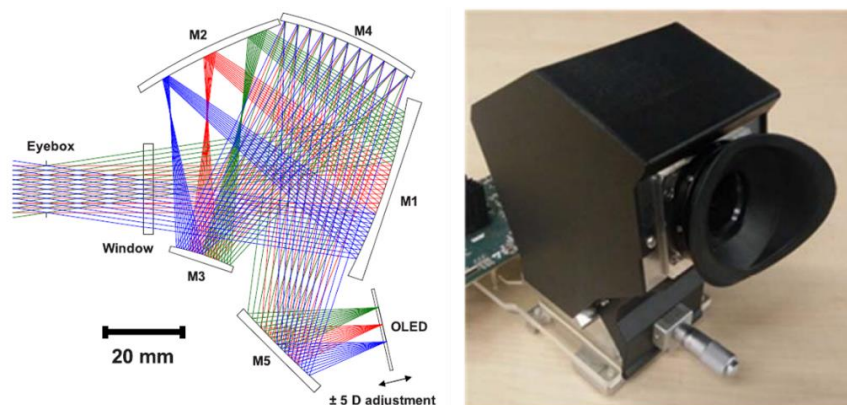


Figure 5.2 – Viseur à 5 miroirs de Bauer, dans [120]. Gauche : schéma optique. Droite : image du démonstrateur.

Le cahier des charges de ce système est le suivant :



<i>Paramètre</i>	<i>Critère</i>	<i>Unité</i>
<i>Diagonale image virtuelle à 3 m</i>	<i>1,83</i>	<i>m</i>
<i>Diamètre de l'EB</i>	<i>12</i>	<i>mm</i>
<i>Eye Relief</i>	<i>25</i>	<i>mm</i>
<i>Ajustement dioptrique</i>	<i>+ - 5</i>	<i>Dioptries</i>
<i>Distorsion</i>	<i>&lt; 2</i>	<i>%</i>
<i>Télécentricité objet</i>	<i>&lt; 2</i>	<i>%</i>
<i>MTF @ fréquence de Nyquist de l'écran</i>	<i>&gt; 25</i>	<i>%</i>
<i>Résolution microécran</i>	<i>1920 x 1080</i>	<i>Pixels</i>
<i>Pixel pitch</i>	<i>8,1</i>	<i>µm</i>

Tableau 5.1 – Cahier des charges du viseurs réflectif à 5 miroirs de Bauer.

### 5.1.2.2 Viseur X-pro 2

L'autre système qui a servi pour définir mon démonstrateur est le viseur Mixed ViewFinder (MVF) de Fujifilm. Il réalise de la RA avec un microécran LCD. Tous les détails optiques de ce viseur ne sont pas disponibles publiquement, mais à partir des caractéristiques techniques et des brevets de la société, j'en ai établi les principaux. A noter que ce travail a été initié avec le X-pro 2 et qu'entre-temps le X-pro 3 est sorti. La Figure 5.3 représente le système MVF du X-pro2 de Fujifilm.



Figure 5.3 – Vue artistique du viseur du X pro 2 de Fujifilm (image Fujifilm).

Ce viseur à trois modes d'usage. Le premier est le mode électronique (EVF) dans lequel on ne voit que l'image du microécran. Les deux autres sont de la RA. Le second est simplement la vision directe, avec des informations telles que le cadrage et la correction de parallaxe, qui s'affichent par superposition. Le troisième ajoute en plus un petit cadre en bas à droite du champ de vue, avec une image numérique qui peut être, par exemple, la portion de l'image sur laquelle on fait la mise au point. La Figure 5.4 représente ces trois usages avec des illustration de Fujifilm.





Figure 5.4 – Image de Fujifilm montrant les trois façons d'utiliser le viseur du X-pro. Gauche : mode EVF. Centre : mode viseur direct avec correction de parallaxe. Droite : mode viseur direct avec agrandissement de la zone de mise au point en bas à droite.

La mesure du volume du MVF est délicate, car plusieurs sous-systèmes le composent (lentille rétractable, détecteur infrarouge, ...). La valeur présentée ici n'est qu'une approximation du volume du viseur direct. Le Tableau 5.2 donne les informations essentielles du MVF de Fujifilm.

	Paramètre	Critère	Unité
Viseur Direct (Optical ViewFinder, OVf)	Champ de vue direct	~ 83	°
	Grossissement	0,36 / 0,6	-
Viseur électronique (EVF)	Champ de vue EVF diagonale	~ 29,1 (X-pro2)	°
Général	diagonale du microécran	12,2 (X-pro 2)	mm
	Technologie du microécran	TFT-LCD couleur	-
	Définition couleur	590 000	Nb de pixel
	Résolution image	38,1	Pixel/°
	Tirage d'œil (Eye Relief)	16	mm
	Adaptation dioptrique	-4:+2	Dioptries
	Volume viseur direct	15 000	mm <sup>3</sup>

Tableau 5.2 – Caractéristiques principales du viseur MVF du X pro 2.

Ce viseur est celui auquel je compare directement mon démonstrateur.

### 5.1.3 Cahier des charges

Cette partie présente les cahiers des charges régissant les systèmes optiques développés. Pour en expliquer la cohérence, je présente d'abord le raisonnement général sous-jacent ainsi que des exemples d'inspiration. Puis, j'ajoute des remarques importantes pour comprendre les méthodes de simulation des systèmes visuels. Enfin, je présente les cahiers des charges.

#### 5.1.3.1 Raisonnement général

Le démonstrateur choisi est donc un viseur d'appareil photographique utilisant la RA. J'en présente les caractéristiques principales choisies, à partir de systèmes commerciaux.

Contrairement à la plupart des viseurs commerciaux qui ont des grossissements entre 0.3x et 0.8x, j'ai décidé de mettre un grossissement 1x. Ainsi, on peut viser avec les deux yeux ouverts. C'est un lien direct avec les lunettes de RA puisqu'elles doivent forcément avoir un grossissement unitaire pour être naturelles.

Le second critère est lié à la qualité image (plus de détails sur la qualité image par la suite). L'objectif est que la résolution au travers du système soit au moins aussi fine que celle d'un œil emmétrope dont la résolution angulaire est  $60 \text{ pix}/^\circ$ . Ce critère rend ce système plus exigeant que le viseur du X-pro2. Comme le nombre de pixels définit le champ de vue, pour avoir le plus grand champ possible, je cherche parmi les microécrans de *Microoled* le modèle ayant le plus de pixels. Le modèle *Izumi* est donc choisi :  $1300 \times 1044 \text{ pixels}$ , ce qui correspond à un champ de vue de  $21,6 \times 17,4^\circ$ , soit en diagonal  $27,7^\circ$ , à comparer aux  $29,1^\circ$  du X-pro 2.

Le microécran *Izumi* a une luminance nominale de  $300 \text{ cd}/\text{m}^2$ . Cette valeur est suffisante pour un viseur électronique, où la luminosité ambiante est coupée, mais ce n'est pas élevé pour un viseur à RA. Cette caractéristique impose de minimiser les pertes lumineuses. Suivant l'analyse faite au chapitre 3 sur les causes de pertes lumineuses, cela implique deux choses :

- minimiser les pertes aux interfaces : système composé seulement de dioptrés collés,
- minimiser les pertes par réflexions : n'autoriser que des réflexions totales internes et une seule réflexion non totale (au niveau du combiner). Couplé à la notion de compacité maximale (cf ci-après), je décide de ne pas autoriser de réflexion totale interne.

Une autre source de pertes est liée à la dimension de la *Eye Box* (EB). Mais trop la réduire rendrait le viseur difficile à aligner avec l'œil. Je décide d'en fixer le diamètre à  $12 \text{ mm}$ , avec un dégagement oculaire (*eye relief*) de  $18 \text{ mm}$ . Ces dimensions forment une EB confortable, utilisable avec des lunettes de vue. Le dégagement oculaire est plus grand que le X-pro 2 ( $16 \text{ mm}$ ), mais d'autres systèmes vont jusqu'à  $20 \text{ mm}$  (Sony RX 100, modèle VII). Cela permet aussi de ne pas mettre de correction dioptrique, puisque le dégagement oculaire permet de garder ses lunettes.

Un autre avantage de n'autoriser que des dioptrés collés est de n'avoir qu'un seul prisme à positionner par rapport au microécran, ce qui simplifie l'optomécanique.

Enfin, du point de vue de l'encombrement, un viseur est intégré dans un boîtier photographique, donc il faut en maximiser la compacité au sens du volume plutôt que de l'épaisseur du système, contrairement aux systèmes de RA intégrés dans une paire de lunettes. La masse totale du système n'est pas un critère primordial pour un viseur. Mais l'optique *freeform* mène dans ce cas à l'utilisation de plastiques optiques. Par conséquent, le système sera léger.

### 5.1.3.2 Qualité image et système visuel

Le dernier point à présenter avant de donner le cahier des charges complet est la notion de qualité image dans le cas des systèmes visuels. Contrairement aux systèmes avec capteurs d'image, le système visuel de l'utilisateur introduit plus de subtilités. On se trouve face à deux problèmes : la modélisation de l'œil et de ses mouvements, ainsi que la subjectivité du facteur humain.

#### 5.1.3.2.1 Modélisation en trois temps

Pour simuler un système visuel, il est possible d'utiliser plusieurs méthodes. La plus évidente consiste à représenter exactement le système physique, avec le microécran comme source proche du système optique, et l'œil comme détecteur. Mais il est aussi possible de les simplifier, voyons comment.

##### **Modélisation à l'envers**

Plus le système est à un état d'ébauche, plus il est pertinent de le modéliser à l'envers, comme sur la Figure 5.5. Cette méthode n'est pas identique au système en sens direct, puisque les aberrations sont, par

définition, présentes uniquement au niveau de la surface du microécran, ce qui ne correspond pas au comportement physique du système optique.

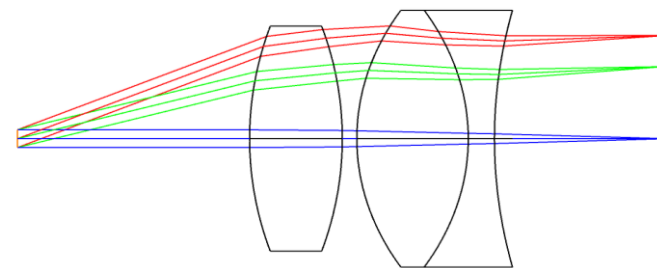


Figure 5.5 – Système visuel composé de trois lentilles et d’un microécran, modélisé à l’envers. La pupille est la première surface (à gauche, en orange). Les rayons en sortent sans avoir d’aberration.

La modélisation à l’envers comporte plusieurs avantages. D’une part, elle permet de s’affranchir d’intégrer un modèle d’œil. Comme le modèle est à l’envers, la première surface est la pupille du système. Ainsi, les rayons considérés en entrée ne comportent à ce stade aucune aberration, l’œil verrait donc une image parfaite. D’autre part, dans ZOS, lorsque le diaphragme est situé en fin de fichier (donc que le système est modélisé en sens direct), la fonction « *solve chief ray* »<sup>9</sup> ne peut pas être activée en même temps que le *ray aiming*<sup>10</sup>, ce qui ne permet pas de tracer correctement les rayons dans le système. Enfin, c’est surtout lors de l’ébauche du système que cette modélisation est pertinente car la présence de fortes aberrations pupillaires peut rendre les polynômes de Zernike mal définis.

Les aberrations sont alors reportées au niveau du microécran. En connaissant la taille des pixels du microécran, on peut dans un premier temps comparer la taille des pixels aux *spot diagram*. Or, le *spot diagram* est la méthode la plus directe dans le logiciel ZOS, puisqu’il s’agit de tracé de rayon. Pour les systèmes *freeform*, cela évite les erreurs de calculs de la part d’outils qui n’ont pas été prévus pour cela, en particulier lorsque les aberrations sont larges (voir 5.1.3.2.2).

Une fois que le système est mis en place, on peut changer de modélisation.

#### Modélisation à l’endroit sans modèle d’œil

Dans ce cas, l’absence de modèle d’œil permet aussi de gagner en temps de calcul. Mais on peut alors comparer la qualité image à la résolution de l’œil, sous forme de *spot diagram* ou de MTF. Cette modélisation est plus précise car les rayons utilisés pour le calcul sont ceux réellement entrants dans l’œil. La Figure 5.6 montre un exemple de système visuel modélisé à l’endroit.

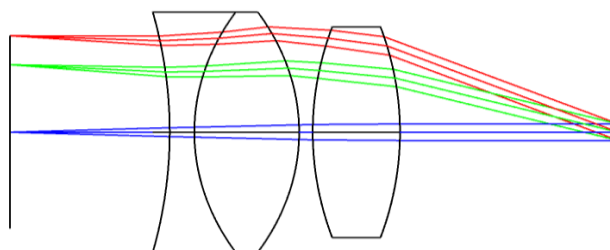


Figure 5.6 – Même système visuel que la Figure 5.5, modélisé à l’endroit. La 1<sup>ère</sup> surface à gauche est le microécran, source lumineuse. La surface à droite est la pupille de l’œil. La surface image n’est pas représentée ici, car située trop loin à gauche.

<sup>9</sup> Solve chief ray : réglage automatique de position d’un repère dans ZOS selon le rayon principal.

<sup>10</sup> Ray aiming : correction numériques des erreurs de positionnement des rayons au niveau du diaphragme.

### Modélisation finale

L'ajout d'un modèle d'œil permet de visualiser le système complet et de valider la qualité image avec l'AIM. Cependant, l'optimisation est délicate car on pourrait compenser les aberrations du modèle d'œil, au risque d'avoir un résultat spécifique à celui-ci. Par ailleurs, cela permet de visualiser correctement les mouvements d'œil et de vérifier que leur prise en compte a été correctement faite auparavant. La Figure 5.7 montre le même système avec un modèle d'œil en plus.

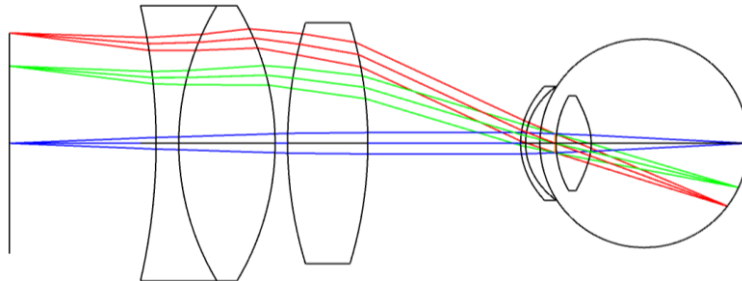


Figure 5.7 – Le même système, modélisé à l'endroit et avec un modèle d'œil intégré à la modélisation.

Maintenant que ces trois modélisations ont été présentées, voyons comment évaluer la qualité image.

#### 5.1.3.2.2 Evaluation de la qualité image et modèle d'œil

D'abord, sans considérer les mouvements de l'œil, quelle est la qualité image requise pour que l'utilisateur n'en perçoive pas les défauts ?

Pour répondre à cette question, on part du diamètre des cônes,  $2,5 \mu\text{m}$ , un cycle de contraste est donc perçu par une zone de  $5 \mu\text{m}$ , ce qui correspond à une fréquence spatiale théorique maximale de  $200 \text{ cy/mm}$ . Mais en pratique, si on considère les défauts moyens de l'œil emmétrope, la résolution maximale est autour de  $110 \text{ cy/mm}$  [2]. Dans l'espace objet, ceci correspond à une taille angulaire de  $60 \text{ pixels}/^\circ$  pour les détails les plus fins.

Dans des cas d'usages singuliers, il est possible d'avoir une résolution plus fine, que l'on appelle l'hyperacuité [121], mais ce n'est pas le sujet ici.

La présence d'aberrations (l'image d'un point devient une tache) diminue le contraste des pixels, qui se mélangent alors les uns aux autres. La Figure 5.8 illustre le mélange des taches images au bord des pixels, ce qui conduit à réduire le contraste entre les deux pixels. Pour contrôler les aberrations, la question est alors : quelle est la perte de contraste maximale à autoriser ?

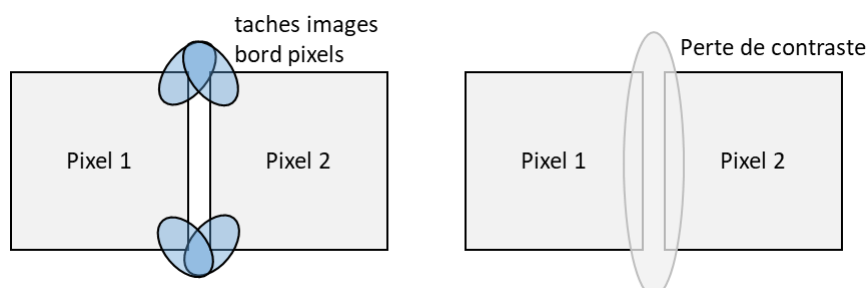


Figure 5.8 – Perte de contraste entre deux pixels, du fait des aberrations aux bords des pixels.

Une réponse est apportée par la courbe *Aerial Image Modulation* [2] : il s'agit du contraste minimal pour que l'œil emmétrope perçoive l'information, en fonction de la fréquence spatiale. Cette courbe est valable

uniquement au niveau de la rétine : tant que la MTF est au-dessus de l'AIM, la fréquence spatiale est perçue. La Figure 5.9 montre à la fois la courbe AIM et la MTF d'un modèle d'œil.

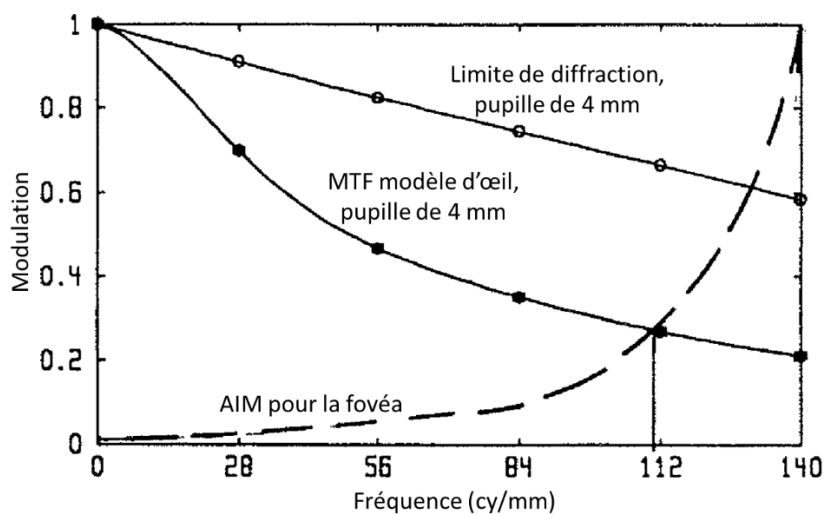


Figure 5.9 – MTF d'un modèle d'œil (pupille de 4 mm) et courbe Aerial Image Modulation, issu de [2].

Cependant, pour utiliser cette courbe, il est nécessaire d'insérer un modèle d'œil pour simuler une rétine, ce qui est parfois préférable d'éviter (cf 5.1.3.2.1). Pour évaluer la qualité image au niveau de l'image virtuelle, ou au niveau du microécran en modélisant le système à l'envers, il faut transférer ce raisonnement dans les autres espaces.

Or, ce qui est résolu au niveau de la rétine doit être résolu dans les autres espaces (image virtuelle et microécran), car l'information perdue ne peut pas être retrouvée. La première chose à faire est d'évaluer la fréquence spatiale correspondante à celle de la résolution au niveau de la rétine, mais dans les autres espaces. Puis, ce sont les mêmes valeurs de contraste qui permettent de quantifier la qualité image.

Au niveau de l'image virtuelle, une fois la limite de résolution et la distance de projection définie, on connaît la taille des pixels au niveau de l'image virtuelle, et donc la fréquence spatiale de limite de résolution :

$$f = \frac{1}{2T_{pix}} \quad 5.1$$

Avec  $T_{pix}$  la taille d'un pixel au niveau de l'image virtuelle. Pour la limite de résolution de l'œil ( $60 \text{ pix/}^\circ$ ) à une distance de  $4 \text{ m}$ , la fréquence spatiale limite est de  $0,43 \text{ cy/mm}$ .

Au niveau du microécran, pour tirer parti de l'ensemble des pixels du microécran, on se place dans le cas où la taille d'un cycle correspond à la taille de deux pixels. L'équation 5.1 est utilisée avec la taille des pixels au niveau du microécran, donnant dans le cas du microécran *Izumi* une fréquence limite de  $53 \text{ cy/mm}$ . La valeur de contraste minimal pour assurer que le système visuel percevra les détails est de 20 %. Prendre un peu plus de marge permet de faciliter la visualisation par un meilleur contraste, et assure plus de tolérances lors de la fabrication du système.

Le critère sur la MTF du système est donc défini. Cependant, la MTF étant le module de la transformée de Fourier de la PSF (*Point Spread Function*), il peut être difficile de savoir si le calcul est correctement mené lorsqu'il y a des tilts complexes dans le système, comme expliqué par ZOS [122]. Lorsque le système est modélisé à l'envers, comme il ne s'agit pas de l'évaluation finale de la qualité image, le calcul de la MTF peut être utilisé pour sa simplicité et praticité. Mais une fois modélisé à l'endroit, il est plus pertinent de n'utiliser que le tracé de rayons, qui ne souffre pas de ces erreurs. Ainsi, pour évaluer la qualité image sur

la surface virtuelle, au lieu de la MTF, on utilise l'énergie encerclée, selon le modèle de Walker pour l'étude de HUD [2]. Les incohérences entre MTF et énergie encerclée ont été constatées en pratique. Pour deux systèmes en sens direct, la MTF au niveau de l'image virtuelle est meilleure pour l'un, mais l'énergie encerclée indique que l'autre système est meilleur. D'autres outils d'analyse (simulation d'image) confirment que c'est bien l'énergie encerclée qui désigne le meilleur système.

Puisqu'on utilise l'énergie encerclée, il faut caractériser l'étalement de la tache image. On choisit de l'évaluer par le rayon encerclant de 80 % de l'énergie car c'est un critère proche au rayon RMS du spot diagram. Ce rayon doit être défini par rapport à la taille des pixels sur l'image virtuelle pour correspondre au critère illustré à la Figure 5.8. Lorsqu'il correspond à 40 % de la taille du pixel, on peut considérer que l'aberration est bien contrôlée. En ajoutant un peu de marge, 30 % de la taille du pixel est aussi une valeur pertinente [2].

Ce qui a été présenté jusque-là ne concerne que le champ central, au-delà, la qualité image se dégrade avec l'écart angulaire : la résolution est deux fois moins bonne à 14° qu'à 0° [2]. Mais on ne peut pas accepter que la qualité image se dégrade en conséquence car en pratique pour observer un détail dans le champ, on tourne son regard dans sa direction. Donc la qualité image dans le champ doit rester suffisante, jusqu'à la limite où il est plus naturel de tourner sa tête que son œil. Seulement, cette limite varie beaucoup avec l'individu : pour 10 sujets, Stahl trouve une valeur moyenne de  $35.8 \pm 31.9^\circ$  avec une médiane de  $25,3^\circ$  [23]. Ainsi, il est important de maintenir une qualité image satisfaisante un champ de vue incluant les mouvements de l'œil, même pour de grandes valeurs de champ.

### 5.1.3.2.3 Simulation des mouvements de l'œil

La prise en compte des mouvements de l'œil est l'une des différences importantes par rapport aux systèmes capteurs d'image. Les mouvements sont de deux sortes : les décentrement de la pupille et les rotations de l'œil. A noter qu'il n'y a pas besoin de modèle d'œil pour prendre en compte les mouvements, il suffit de régler la position et l'orientation de la pupille. Dans ZOS, ceci se fait en utilisant des *coordinate break*<sup>11</sup> réglés avec le mode multi-configuration<sup>12</sup>.

Pour prendre en compte les décentrement, il suffit de décentrer la pupille. Le diamètre de la pupille d'entrée ainsi que la taille de la pupille de l'œil simulée donnent l'amplitude des déplacements autorisés : tant que la pupille de l'œil reste inscrite dans la pupille de sortie, l'utilisateur ne perçoit pas de vignettage. Les rotations de l'œil sont plus subtiles à considérer : il faut simuler le centre de rotation du globe oculaire, et faire tourner la pupille autour de ce point, puis réorganiser les champs de vues pour que le champ central soit celui sur lequel l'œil est aligné, sans changer le reste de la description du système. Cette rotation transforme légèrement la pupille d'un cercle vers une ellipse, comme à la Figure 5.10.

<sup>11</sup> Coordinate Break : ligne dans le Lens Data permettant de régler la position et l'orientation du système de coordonnées local. C'est l'outil permettant d'introduire des tilts et décentrement dans le système.

<sup>12</sup> Multi-Configuration Editor : éditeur dans ZOS permettant de faire varier certains paramètres du système. Une configuration contient une position de pupille par exemple.

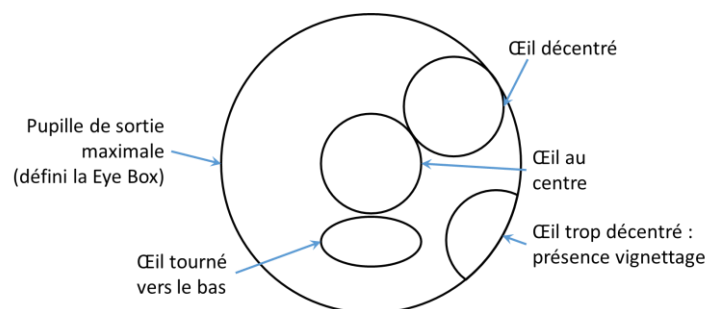


Figure 5.10 – Représentation des décentrages et rotation de l'œil dans l'Eye Box.

En parallèle des déplacements, il faut modifier le champ de vue considéré comme le centre champ, puisque l'œil se concentre alors sur un autre point, et la qualité image est toujours évaluée pour la fovéa.

Cependant, ces simulations ne doivent pas donner naissance à des positions où l'image serait incontrôlée et mauvaise. Pour s'en prémunir, une solution est d'avoir une zone de recouvrement entre les positions de l'œil. Un dioptré ne devrait donc pas avoir de zone définie par un champ unique, en particulier pour les dioptrés *freeform*. Sans cela, en plus d'une qualité image non contrôlée localement, de la lumière parasite pourrait aussi apparaître.

De plus, utiliser une configuration ouverte avec le diamètre maximal de la pupille de sortie permet de définir la Eye Box complètement et de contrôler la géométrie du système. D'autre part, cela garanti un minimum de recouvrement avec chacune des autres configurations. Mais l'accumulation de configurations alourdi les simulations, pour le calcul des fonctions de mérite (MF) et de chaque outil d'analyse. Concrètement, certaines optimisations locales prennent plusieurs heures pour être menées jusqu'au bout.

Il existe cependant une autre méthode qui peut être utilisée pour simplifier les simulations tout en prenant en compte les mouvements de l'œil : placer la pupille du système au centre de rotation de l'œil. Au lieu de placer la pupille à la distance réelle par rapport au système optique, on la recule d'environ  $12\text{ mm}$ , soit le rayon moyen du globe oculaire. Cette astuce permet d'éviter d'intégrer des configurations supplémentaires, car chaque champ joue le rôle du champ central pour le cas où l'œil s'oriente dans sa direction. La Figure 5.11 montre deux champs avec la pupille au centre de rotation de l'œil. Lorsque le regard se dirige vers le champ du haut, il devient le champ central. Or, l'œil n'est pas présent dans la simulation, seule la pupille y est. Par conséquent, il n'y a pas à faire tourner l'œil, la simple présence du champ suffit à simuler la rotation.

Cette technique est très pratique pour mettre en place les systèmes, car plus légère que le multi-configuration. En revanche, elle ne permet que de simuler les centres champs, en fonction des rotations de l'œil, on ne peut donc pas évaluer la qualité image en bord de fovéa. C'est donc une technique qui ne devrait pas être utilisée tout au long de la conception, mais plutôt au début.

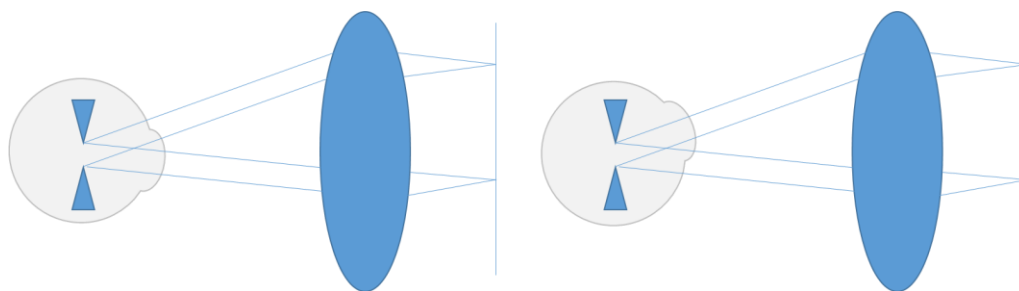


Figure 5.11 – Système visuel avec la pupille au centre de rotation de l'œil, orienté dans deux positions différentes. Cette méthode permet d'alléger les simulations.

### 5.1.3.3 Cahiers des charges complets

A ce stade, tout ce qui est nécessaire a été présenté, nous pouvons maintenant détailler les cahiers des charges des systèmes développés.

#### 5.1.3.3.1 Viseur augmenté, MVF

Une difficulté lors de la création de ce cahier des charges est liée aux critères à fixer. En particulier sur la qualité image, mon but est d'obtenir un système limité par l'œil. Toutefois, je ne sais pas à l'avance quelles seront les performances réelles qu'il est possible d'atteindre. C'est pourquoi il est plus juste de dire que l'objectif est d'obtenir une qualité image meilleure que celle de l'œil, mais en cas d'échec, simplement de chercher la meilleure qualité image possible et la comparer à celle de l'œil.

	<i>Paramètre</i>	<i>Critère</i>	<i>Unité</i>
<i>Caractéristiques optiques</i>	<i>Champ de vue</i>	<i>21 x 17</i>	<i>°</i>
	<i>Grossissement</i>	<i>1</i>	<i>-</i>
	<i>Résolution</i>	<i>60</i>	<i>Pix/°</i>
	<i>Tirage d'œil (Eye Relief)</i>	<i>18</i>	<i>mm</i>
	<i>Diamètre pupille de sortie</i>	<i>12</i>	<i>mm</i>
	<i>Homogénéité éclairage</i>	<i>&gt; 90</i>	<i>%</i>
	<i>Longueurs d'onde (poids)</i>	<i>0,47 (,107) ; 0,51 (,503) ; 0,555 (1) ; 0,61 (,503) ; 0,65 (,107)</i>	<i>μm</i>
<i>Caractéristiques microécran</i>	<i>Courbure du microécran</i>	<i>Biconique</i>	<i>-</i>
	<i>Dimensions du microécran</i>	<i>9,7 x 12,1</i>	<i>mm</i>
	<i>Définition microécran couleur</i>	<i>1 350 000</i>	<i>Nb de pixels</i>
	<i>Taille d'un pixel carré</i>	<i>9,4</i>	<i>μm</i>
	<i>Rapport d'aspect</i>	<i>5:4</i>	<i>-</i>
<i>Général</i>	<i>Nombre de dioptries freeform</i>	<i>4</i>	<i>-</i>
	<i>Type de système</i>	<i>Réfractif</i>	<i>-</i>
	<i>Nombre de prismes collés</i>	<i>2</i>	<i>-</i>
	<i>Distance de projection</i>	<i>4 000</i>	<i>mm</i>

Tableau 5.3 – Cahier des charges complet définissant le démonstrateur de viseur augmenté.

Pour définir les spécifications de qualité image, un résumé dans un tableau est trop imprécis. Il faut préciser quelques éléments auparavant.

La qualité image est mesurée avec une pupille de 4 mm de diamètre, qui correspond à des conditions réalistes d'observation. Les mouvements d'œil correspondent au balayage du champ par la fovéa par rotation. Pour s'assurer que l'on couvre l'ensemble du champ, on modélise sept configurations représentant les mouvements maximaux de l'œil. Deux configurations peuvent être enlevées car le système est symétrique par rapport à l'axe vertical. La Figure 5.12 montre la gestion des configurations avec un cas particulier et les sept configurations utilisées. Pour chaque position de l'œil, la qualité image est évaluée sur la fovéa, c'est-à-dire  $\pm 2,5^\circ$  autour du champ central.



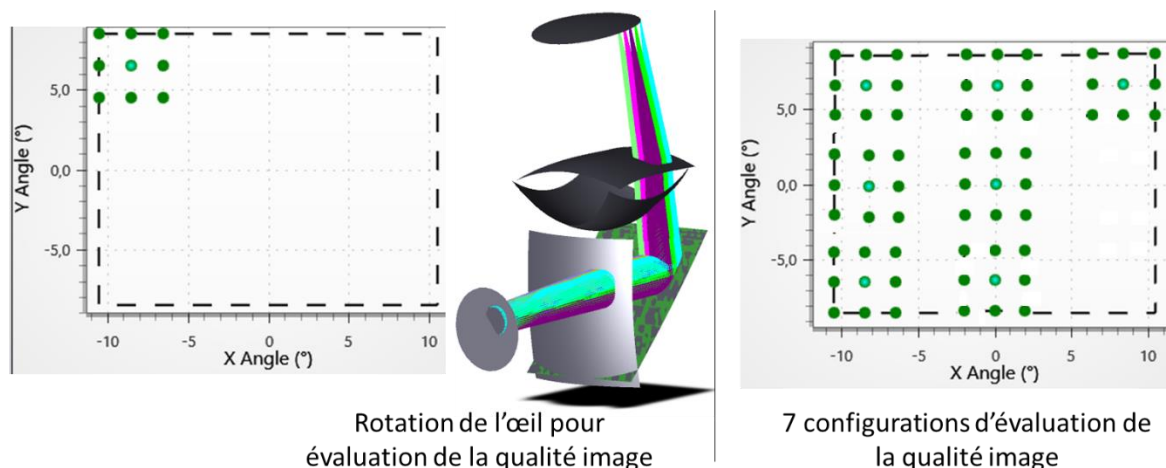


Figure 5.12 – Gauche : configuration où le regard est tourné vers un coin de l'image. Droite : superposition des groupes de champs déplacés avec le regard. Chaque groupe de 9 champs correspond à la fovéa.

Pour la configuration centrale, les spécifications pour la qualité image sont :

- En sens inverse, MTF supérieure à 40 % @ 50 lp/mm,
- En sens direct, sans modèle d'œil, 80 % de l'énergie encerclée de l'image virtuelle (située à 4 000 mm) doit se trouver dans un rayon de moins de 450  $\mu\text{m}$ .

Pour les autres configurations, on tolère une légère dégradation de la qualité image, toujours dans la mesure où elle présente une qualité suffisante pour cette résolution.

- En sens inverse, MTF supérieure à 35 % @ 50 lp/mm,
- En sens direct, sans modèle d'œil, 80 % de l'énergie encerclée de l'image virtuelle (située à 4 000 mm) doit se trouver dans un rayon de moins de 500  $\mu\text{m}$ .

La distorsion doit être inférieure à 5 % dans tous les cas.

### 5.1.3.3.2 Voie directe, MVF

Une fois que le prisme principal du MVF est défini, l'utilisateur peut observer l'image du microécran confortablement. Pour le système de RA, il faut concevoir une voie optique complémentaire qui permette d'observer le monde réel au travers du système. Il s'agit donc de compenser les aberrations et déformations introduites par le prisme de la voie augmentée.

De sorte à obtenir le système le moins volumineux possible, je n'autorise qu'un seul dioptre pour corriger la voie directe. Le système est donc composé d'un troisième prisme, dont l'une des faces est complémentaire de la face du combiner, de sorte à être collée au prisme principal. Le fait que les dioptres soient collés permet d'éviter les sauts d'indices, les réflexions multiples et de simplifier l'optomécanique. L'autre dioptre du prisme compensateur est seul responsable de la qualité image de la voie directe. Ces trois prismes ainsi qu'un modèle d'œil et le microécran sont représentés sur la Figure 5.13.

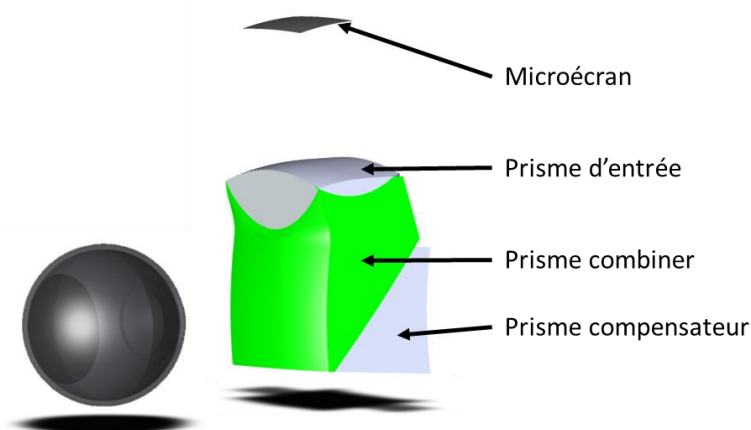


Figure 5.13 – Illustration du MVF avec la voie augmentée et la voie directe.

Le système compensateur est évalué selon sa qualité image et l'épaisseur totale de la voie directe. Le nombre de coefficients *freeform* et surtout l'écart total à la forme de base ne sont pas quantifiés dans le cahier des charges, mais les indiquer permet d'anticiper les systèmes qui seront plus ou moins simples à réaliser. La qualité image est évaluée en termes d'énergie encerclée pour une image projetée à 4 000 mm : elle doit être plus résolue que la résolution de l'œil moyen. Par ailleurs, la distorsion doit aussi être maintenue en dessous d'une valeur seuil, mesurée sur une surface courbe. Le Tableau 5.4 résume ces caractéristiques essentielles.

Qualité image Voie directe	<i>Modélisée en sens direct, sans modèle d'œil. Énergie encerclée, 80% de l'énergie comprise dans un rayon ...</i>	> 450	$\mu\text{m}$
	<i>Distorsion, mesurée sans modèle d'œil, avec le champ maximal</i>	> 5	%
Caractéristiques optiques	<i>Épaisseur totale de la voie directe</i>	> 25	mm

Tableau 5.4 – Cahier des charges pour la voie directe du MVF.

### 5.1.3.3 Viseur électronique, EVF

Au moment de définir ce cahier des charges, nous ne savions pas quelles difficultés prévoir pour réaliser un démonstrateur fonctionnel, en particulier par rapport à la fabrication des optiques *freeform*. Pour s'assurer d'obtenir un démonstrateur fonctionnel, nous avons prévu un second système optique, avec uniquement des optiques à symétrie de révolution. Il s'agit d'un EVF réfractif utilisant un microécran courbe, sans RA donc. Son cahier des charges est proche de celui du MVF. Une caractéristique importante du système est son épaisseur maximale, fixée à 28 mm.

Par ailleurs, le champ de vue est plus grand que pour le MVF. Comme on utilise le même microécran dans les deux cas, on tolère une baisse de la qualité image, dans le sens où on ne sera plus limité par la résolution de l'œil à 60 *pix/°* mais à 48 *pix/°*. Cette valeur permet une bonne qualité image, bien qu'inférieure. Le Tableau 5.5 présente le cahier des charges de l'EVF.

	Paramètre	Critère	Unité
Caractéristiques optiques	Champ de vue	21x27	°
	Résolution	48	Pix/°
	Tirage d'œil (Eye Relief)	18	mm
	Diamètre de la pupille de sortie	10,6	mm
	Longueurs d'onde (poids)	0,47 (,107) ; 0,51 (,503) ; 0,555 (1) ; 0,61 (,503) ; 0,65 (,107)	
Caractéristiques microécran	Rayon de courbure minimal microécran	60	mm
	Dimensions du microécran	9,7 x 12,1	mm
	Définition microécran couleur	1 350 000	Nb de pixels
	Résolution image	60	Pixel/°
	Rapport d'aspect	5:4	-
	Rayon de courbure limite	60	mm
Général	Épaisseur maximale autorisée	28	mm
	Type de système	Réfractif, symétrique	-
	Distance de projection	4 000	mm

Tableau 5.5 – Cahier des charges complet définissant le démonstrateur EVF à symétrie de révolution.

La qualité image du système EVF est mesurée de façon simplifiée par rapport au système MVF pour faciliter le processus. La qualité image est mesurée uniquement en sens inverse, avec une pupille de 4 mm. On mesure le rayon pour lequel l'énergie encerclée atteint 80 %, pour le centre champ ainsi que le bord de la fovéa, pour trois positions de l'œil en rotation : 0°, 5° et 12,1°. Ces trois positions permettent de balayer l'ensemble du champ, avec un recouvrement d'au moins 2°. Pour assurer ce recouvrement, j'ajoute des champs supplémentaires qui sont utilisés pour les optimisations et contraignent le système, mais qui ne sont pas relevés pour l'évaluation de la qualité image. La Figure 5.14 montre les trois configurations qui sont utilisées pour évaluer la qualité image de l'EVF.

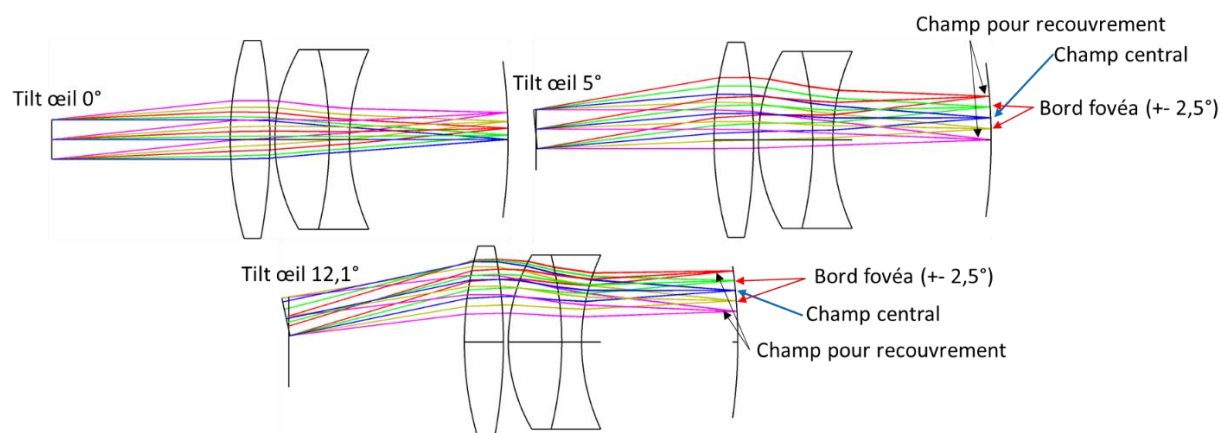


Figure 5.14 – Les trois configurations et les champs utilisés pour l'évaluation de la qualité image.

Comme le système est modélisé à l'envers, il faut comparer la taille des pixels (9,4 μm) au rayon contenant l'énergie. Par ailleurs, il importe plus que tous les champs soient inférieurs à la spécification plutôt que

d'avoir quelques champs inférieurs à leur spécification avec un champ qui ne l'atteint pas. Si par exemple le cas où l'œil s'oriente vers le bord du champ correspond à une qualité image dégradée, l'utilisateur pourra le percevoir, alors qu'une qualité image bien meilleure que ce qui est requis au centre sera de toute façon limitée par les pixels.

Pour évaluer la qualité image au bord de la fovéa et limiter le nombre de valeurs données, on prend le plus grand rayon encerclant 80 % de l'énergie entre le bord inférieur et le bord supérieur de la fovéa. Et le Tableau 5.6 donne les rayons encerclant 80 % de l'énergie utilisés pour qualité la qualité image de l'EVF.

	Champ considéré	Rayon contenant 80 % de l'énergie encerclée	
Qualité image EVF Modélisée en sens inverse, sans modèle d'œil	Tilt œil : 0° ; centre fovéa	3,7	μm
	Tilt œil : 0° ; bord fovéa, 2,5°	4	μm
	Tilt œil : 5° ; centre fovéa	3,7	μm
	Tilt œil : 5° ; max entre bord min et max de la fovéa, max(2,5°, -2,5°)	4	μm
	Tilt œil : 12.1° ; centre fovéa	3,7	μm
	Tilt œil : 12,1° ; max entre bord min et max de la fovéa, max(2,5°, -2,5°)	4	μm
	Distorsion	> 5	%

Tableau 5.6 – Evaluation de la qualité image de l'EVF pour être limitée par le microécran.

## 5.2 DESIGN AVEC MICROECRANS PLAN ET COURBE

La conception optique avec le microécran courbe est réalisée d'abord avec un système *Electronic ViewFinder* (EVF), à symétrie de révolution. Puis un système *freeform*, le *Mixed ViewFinder* (MVF).

### 5.2.1 EVF

Je commence par présenter le système qui sert de référence courbe. Puis, je le compare à des systèmes avec microécran plan en utilisant différents degrés de liberté.

#### 5.2.1.1 Système de référence : microécran courbe

De sorte à obtenir le système le plus simple et le plus compact possible, nous n'autorisons ni conique, ni asphérisation des lentilles et n'utilisons que 3 lentilles. Ce système sert de référence dans la suite.

Le système obtenu remplit les spécifications attendues. Il mesure 28 mm d'épaisseur, et pèse 11 g (poids du verre uniquement). La Figure 5.15 illustre ce système EVF.

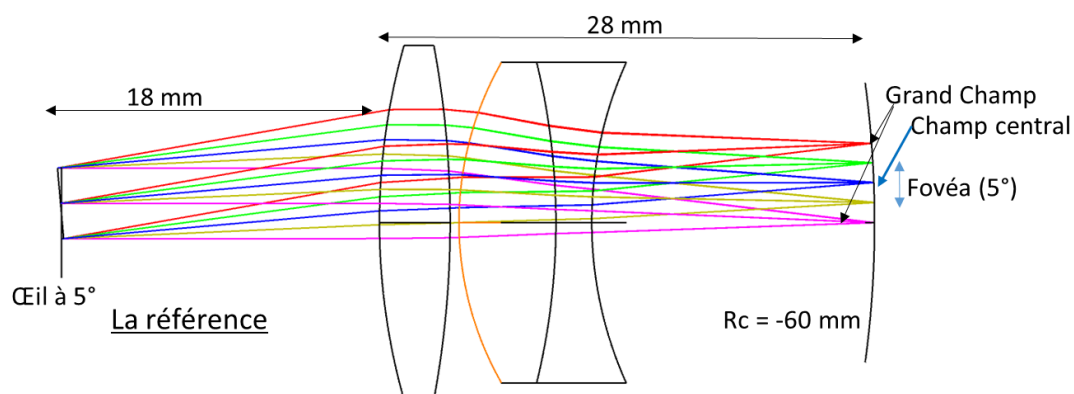


Figure 5.15 – EVF avec un microécran courbe, dans une configuration où l'œil regarde vers le haut, de 5°.

La qualité image est donnée dans le Tableau 5.7, qui rappelle les spécifications du système et donne les valeurs du système final utilisant un microécran courbe.

Rotation de l'œil	0°		5°		12,1°	
	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa
Spécification	3,7	4	3,7	4	3,7	4
Système courbe	3,55	3,15	3,04	3,56	3,07	3,85

Tableau 5.7 – Rayon encerclant 80 % de l'énergie des champs de référence.

### 5.2.1.2 Microécran plan

Le but est de comparer les résultats obtenus avec un microécran plan à la référence. Pour cela, on modifie diverses propriétés du système comme la contrainte en épaisseur, l'ajout d'une lentille ou de coefficients d'asphérisation. La suite décrit les cas explorés, et en compare la qualité image au système courbe. Les spécifications sont rappelées au fil du développement, mais ce n'est qu'une comparaison secondaire.

#### 5.2.1.2.1 Epaisseur limitée à 28 mm

Pour réaliser une première comparaison, on rend le microécran plan et on ré-optimise le système pour l'améliorer autant que possible. Plusieurs optimisations ont été menées, il ne s'agit pas de faire un seul essai. Le système obtenu est clairement moins bon que la référence courbe. Il respecte le critère d'épaisseur, et son poids n'est que très légèrement augmenté (de 11 g pour la référence, il devient 11,5 g, soit 4,5 % d'augmentation), mais la qualité image n'est pas bonne. Le rayon encerclant 80 % de l'énergie est d'une part nettement supérieur à la référence, mais en plus, il ne respecte pas le cahier des charges (voir Tableau 5.8).

Il est clair qu'il manque à ce système initial un degré de liberté supplémentaire pour l'améliorer. La Figure 5.16 illustre ce second système optique, avec microécran plan.

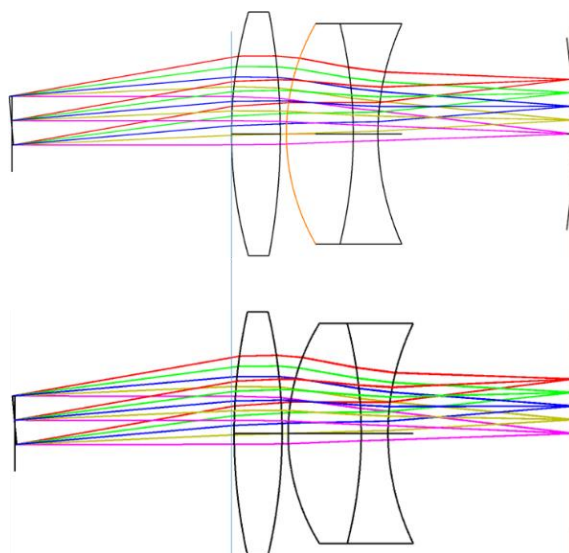


Figure 5.16 - Comparaison entre le système courbe et le système plan de même épaisseur.

Tilt de l'œil	0°		5°		12,1°	
	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa
Spécific., $\mu\text{m}$	3,7	4	3,7	4	3,7	4
Référence, mD courbe, $\mu\text{m}$	3,55	3,15	3,04	3,56	3,07	3,85
épaisseur limitée, $\mu\text{m}$	5,32 (50%)	4,63 (47%)	3,58 (18 %)	4,85 (36%)	6,57 (114%)	10,98 (185%)

Tableau 5.8 – Qualité image du système avec microécran plan, de 28 mm d'épaisseur. Les pourcentages indiqués correspondent à la variation du rayon encerclant 80 % de l'énergie par rapport à la référence courbe.

### 5.2.1.2.2 Épaisseur non limitée

Le premier degré de liberté que l'on essaye d'ajouter est lié à l'épaisseur du système. Toutes les contraintes sur les épaisseurs sont supprimées : épaisseur des verres, espacement des lentilles et surtout longueur totale. Dans ce cas, comme on pouvait s'y attendre, le système s'allonge, il passe de 28 mm à 42,3 mm, soit 51 % de longueur en plus. De plus, l'épaisseur supérieure des verres fait passer le poids des lentilles de 11 g à 36,8 g, soit 235 % en plus, comme le présente la Figure 5.17.

Un essai préliminaire a été réalisé en conservant une contrainte sur l'épaisseur des lentilles, car il est courant que l'optimisation sur les épaisseurs des lentilles donne des solutions non pertinentes. Mais dans ce cas, la qualité image était encore très mauvaise. Libérer la contrainte sur l'épaisseur des lentilles a permis de sensiblement l'améliorer.

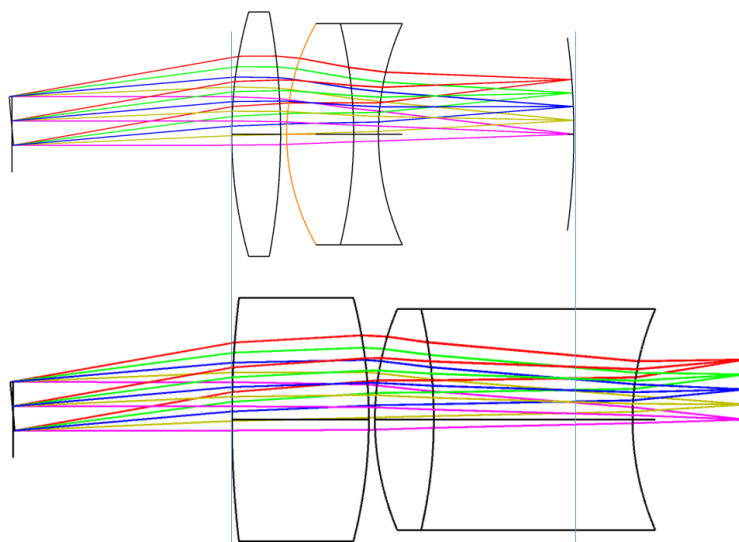


Figure 5.17 – Comparaison entre le système courbe et le système plan sans limite d'épaisseur.

Cet embonpoint du système plan permet à la qualité image d'être nettement améliorée par rapport au système plan précédent. Par rapport à la référence courbe, le Tableau 5.9 montre que la plupart des champs d'évaluation sont améliorés, sauf les deux derniers. Ce système ne permet pas d'atteindre toutes les spécifications du cahier des charges.

Tilt de l'œil	0°		5°		12,1°	
	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa
Spécific., $\mu\text{m}$	3,7	4	3,7	4	3,7	4
Référence, mD courbe, $\mu\text{m}$	3,55	3,15	3,04	3,56	3,07	3,85
épaisseur non limitée $\mu\text{m}$	2,85 (-20%)	2,48 (-21%)	2,39 (-21%)	2,72 (-24%)	4,60 (50%)	6,56 (70%)

Tableau 5.9 - Qualité image du système avec microécran plan, sans limite d'épaisseur. Les pourcentages indiqués correspondent à la variation du rayon encerclant 80 % de l'énergie par rapport à la référence courbe.

### 5.2.1.2.3 Asphérisation de dioptries

#### 5.2.1.2.3.1 Coniques et asphériques

De sortes à obtenir un système qui réponde entièrement au cahier des charges, en termes de qualité image, mais aussi d'épaisseur, j'ajoute d'abord une conique sur le premier dioptre du doublet. La qualité image est effectivement améliorée, mais cela reste loin des spécifications. Ce nouveau système est 23 % plus lourd que la référence (13,6 g), et par construction fait la même épaisseur, comme le présente la Figure 5.18.

En ajoutant plus de degrés de liberté à l'asphérisation, on espère trouver une solution plane qui arrive à égaler le système courbe. L'asphérisation est autorisée graduellement jusqu'au 8<sup>e</sup> ordre, et on cherche le dioptre qui améliore le mieux le système avec ces variables supplémentaires. C'est le premier dioptre, celui qui est le plus près de l'œil qui en tire le plus profit.

Si la qualité image n'est pas meilleure que la référence, elle en est assez proche, et la plupart des champs satisfont au cahier des charges, sauf les deux champs extrêmes, comme le montre la Tableau 5.10. Il n'y a pas encore assez de degrés de liberté pour rendre le système meilleur que la référence.

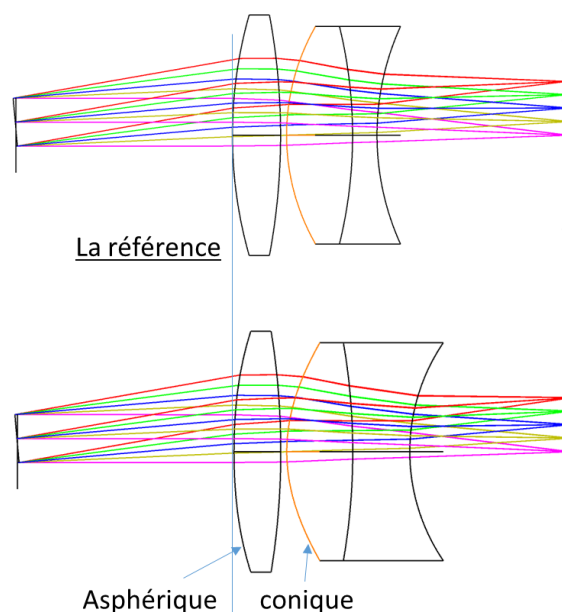


Figure 5.18 - Comparaison entre le système courbe et le système plan avec une conique et une asphérique du 8<sup>e</sup> ordre.



Tilt de l'œil	0°		5°		12,1°	
	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa
Spécific., $\mu\text{m}$	3,7	4	3,7	4	3,7	4
Référence, mD courbe, $\mu\text{m}$	3,55	3,15	3,04	3,56	3,07	3,85
Coniq. Asph. $\mu\text{m}$	2,78 (-22%)	3,03 (-4%)	3,32 (9%)	3,81 (7%)	5,09 (66%)	5,24 (36%)

Tableau 5.10 - Qualité image du système avec microécran plan, une conique et une apshérique du 8<sup>ème</sup> ordre. Les pourcentages indiqués correspondent à la variation du rayon encerclant 80 % de l'énergie par rapport à la référence courbe.

Si on autorise de nouveau la courbure du microécran en variable, la qualité image devient de nouveau excellente, et dépasse le système de référence, avec une masse quasi similaire. A noter que je n'ai pas imposé de contrainte sur le rayon de courbure du microécran, et que sa valeur optimale final est de  $-54\text{ mm}$ , ce qui dépasse la limite fixée pour la référence, mais reste très proche de la valeur optimale du système initial lorsqu'il n'y avait pas de contrainte.

Ce que cela montre, c'est que dans ce cas de figure, le degré de liberté pertinent est lié à la courbure de champ. Il semble que l'asphérisation n'est pas la meilleure approche pour corriger la qualité image.

#### 5.2.1.2.3.2 Système de qualité image équivalent par asphérisation

Avec ce dernier système asphérique, je cherche le degré d'asphérisation à partir duquel la qualité image est équivalente à la référence. Pour cela, de nombreux essais et méthodes d'optimisations ont été essayés. In fine, je n'ai pas réussi à avoir un système de qualité image équivalente. Il en est proche, mais demeure inférieur et n'atteint pas toutes les spécifications dans le champ.

Il était clair pendant les optimisations que l'ajout de degrés de liberté asphériques n'était pas la bonne solution pour améliorer le système. Comme j'étais un peu bloqué, j'ai autorisé des degrés de libertés différents, comme la séparation du doublet et la modification des verres, comme l'illustre la Figure 5.19.

Le résultat final comporte 4 dioptries asphériques jusqu'au 10<sup>ème</sup> ordre pour certains. Avec ces complexités supplémentaires, la qualité image est proche de celle de la référence, mais le système est 21,8 % plus lourd pour la même longueur (13,4 g contre 11 g pour la référence), comme le montre le Tableau 5.11.

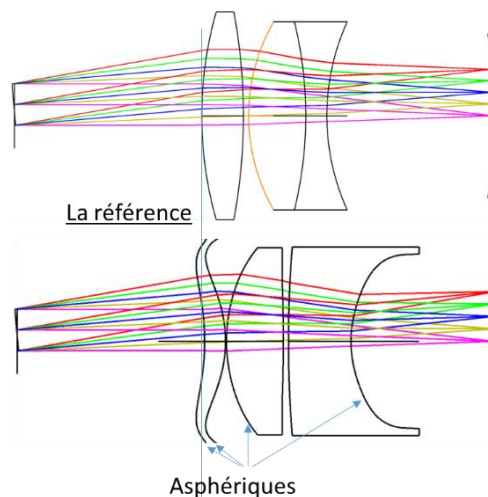


Figure 5.19 - Comparaison entre le système courbe et le système avec 4 dioptries asphériques.



Tilt de l'œil	0°		5°		12,1°	
	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa
Spécific., $\mu\text{m}$	3,7	4	3,7	4	3,7	4
Référence, mD courbe, $\mu\text{m}$	3,55	3,15	3,04	3,56	3,07	3,85
Asphériques $\mu\text{m}$	2,47 (-30%)	3,14 (0%)	3,01 (-1%)	3,40 (-4%)	3,30 (7%)	4,36 (13%)

Tableau 5.11 - Qualité image du système avec microécran plan, avec 4 asphériques du 10<sup>e</sup> ordre. Les pourcentages indiqués correspondent à la variation du rayon encerclant 80 % de l'énergie par rapport à la référence courbe.

#### 5.2.1.2.4 Ajout d'une lentille

Au vu de la difficulté à atteindre les performances attendues avec les asphérisations, une autre stratégie est mise en place : comment obtenir une correction proche de celle apportée par la courbure mais avec un microécran plan ? Une solution est bien connue en conception optique : ajouter une lentille de champ. L'objectif est de comparer l'influence de la courbure à une lentille de champ.

##### 5.2.1.2.4.1 Lentille de champ sans épaisseur limitée

Le premier test mené consiste à ajouter une lentille de champ, c'est-à-dire très proche du microécran, tout en maintenant l'ensemble des caractéristiques identiques, en particulier l'épaisseur maximale de 28 mm.

La différence de qualité image joue encore en faveur du système utilisant un microécran courbe, malgré les multiples optimisations du système plan, représentés par la Figure 5.31. Par rapport aux spécifications, la lentille de champ permet de les atteindre, sauf la dernière, comme le montre le Tableau 5.12. Il est assez clair que l'ajout d'une lentille de champ est plus pertinent pour ce système que l'asphérisation du triplet.

Puisque le système n'a pas encore atteint la résolution nécessaire, je supprime la limite en épaisseur. La qualité image s'améliore nettement, et est meilleure que la référence. Pour ce système, la longueur augmente de 19,3 % par rapport à la référence courbe (33,4 mm par rapport à 28 mm), et la masse augmente de 40 % (15,4 g par rapport à 11 g). Ces valeurs illustrent les gains obtenus par l'utilisation d'un microécran courbe.

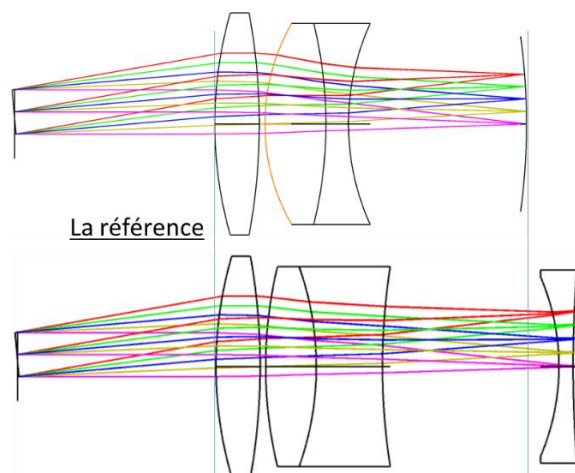


Figure 5.20 - Comparaison entre le système courbe et le système avec une lentille de champ, sans limite d'épaisseur.

Tilt de l'œil	0°		5°		12,1°	
	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa
Spécific., $\mu\text{m}$	3,7	4	3,7	4	3,7	4
Référence, mD courbe, $\mu\text{m}$	3,55	3,15	3,04	3,56	3,07	3,85
Lentille champ épaisseur libre	2,19 (-38%)	2,21 (-30%)	2,06 (-32%)	2,52 (-29%)	2,94 (-4%)	3,54 (-8%)

Tableau 5.12 - Qualité image du système avec lentille de champ sans limite d'épaisseur. Les pourcentages indiqués correspondent à la variation du rayon encerclant 80 % de l'énergie par rapport à la référence.

L'ajout d'une lentille de champ n'a pas permis de remplir toutes les spécifications du système, mais en supprimant la contrainte d'épaisseur, le système s'améliore significativement. Une dernière manipulation est menée pour voir comment obtenir un système respectant tout le cahier des charges, dont l'épaisseur. Pour cela, je repars du système avec la lentille de champ, qui était proche des spécifications, et j'autorise de l'asphérisation.

#### 5.2.1.2.4.2 Lentille de champ et conique

Pour augmenter les degrés de liberté du système, j'ai choisi d'autoriser l'asphérisation, en commençant par une seule conique. Comme cela ne suffisait pas, une seconde conique est autorisée, comme l'indique la Figure 5.21. Dans ces conditions, le Tableau 5.13 montre que le système vérifie toutes les spécifications.

Pour ce système, la masse est augmentée de 24,9 % par rapport à la référence courbe (13,74 g par rapport à 11 g), pour une épaisseur de 28 mm.

Par ailleurs, l'ajout d'une lentille diminue la transmittance totale du système sans anti-reflets de 70 % de transmittance pour la référence à 64 %.

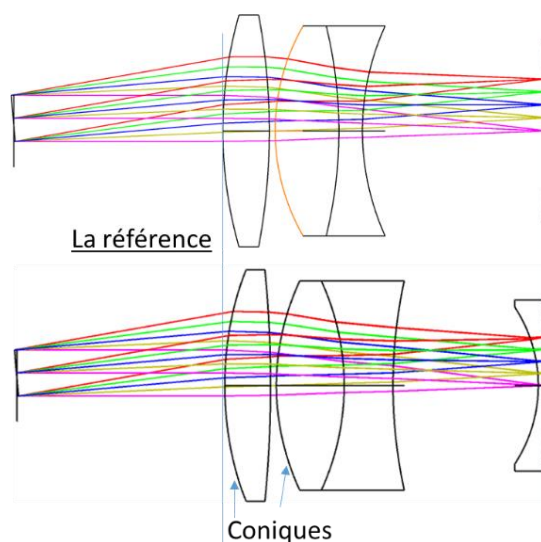


Figure 5.21 – Comparaison entre le système courbe et le système une lentille de champ et coniques.

Tilt de l'œil	0°		5°		12,1°	
	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa	centre champ	bord fovéa
Spécific., $\mu\text{m}$	3,7	4	3,7	4	3,7	4
Référence, mD courbe, $\mu\text{m}$	3,55	3,15	3,04	3,56	3,07	3,85
Lentille champ coniques $\mu\text{m}$	2,49 (-30%)	2,47 (-22%)	2,38 (-22%)	2,92 (-18%)	3,08 (0%)	3,81 (-1%)

Tableau 5.13 - Qualité image du système avec lentille de champ et coniques. Les pourcentages indiqués correspondent à la variation du rayon encerclant 80 % de l'énergie par rapport à la référence courbe.

### 5.2.1.2.5 Conclusion

L'ensemble des essais met en relief l'apport singulier de la courbure du microécran. On a vu qu'avec trois lentilles et sans microécran courbe, il faut un système complexe avec de nombreuses asphérisations pour valider presque toutes les spécifications, et ce système pourrait se révéler très cher à réaliser.

Insérer une lentille de champ constitue une bien meilleure solution en l'absence de microécran courbe, même si cela complexifie le montage optomécanique. Par rapport à un système sans limite d'épaisseur, la courbure diminue la masse de 40 % et l'épaisseur de 19,3 %. Lorsqu'on force la longueur à rester à 28 mm, pour atteindre la qualité image, il faut ajouter deux coniques en plus de la lentille de champ, et dans ce cas, la masse supplémentaire est de 24,9 %, et la transmittance diminue de 6 points par rapport à la référence. Ces résultats confirment que dans ce cas, la lentille de champ est une meilleure solution que les asphérisations, mais au prix d'alourdir et de complexifier le système par rapport à un microécran courbe.

## 5.2.2 MVF

La conception du MVF (*Mixed ViewFinder*) est un objectif important de ce travail de thèse. Il s'agit d'un viseur augmenté qui doit être le plus compact et le plus lumineux possible. Ce travail a été long à mener pour de nombreuses raisons. En particulier, j'ai appris à optimiser les systèmes *freeform* en même temps que je cherchais à remplir le cahier des charges. De nombreux systèmes ont été créés, avec des points de départ différents et des méthodes différentes, mais cette diversité est trop grande pour en donner une description complète. Je présente d'abord un premier résultat pour en montrer certaines difficultés pour ensuite présenter le résultat final.

### 5.2.2.1 Premiers résultats

Les premiers développements ont été assez laborieux, car je découvrais de nombreux éléments de mes recherches en même temps que j'avais dans la conception. Il y a eu beaucoup de temps et d'énergie dépensés pour obtenir des premiers résultats intermédiaires corrects.

J'ai mené les optimisations en parallèle sur le système à microécran plan et le système à microécran courbe. Les degrés de libertés sont très proches dans les deux cas, ce qui s'explique par le fait que les aberrations sont similaires et la méthode d'optimisation aussi. Le critère d'optimisation pour le système avec microécran courbe est d'obtenir la meilleure qualité image possible dans le volume le plus restreint possible. En parallèle le critère d'optimisation du système utilisant un microécran plan est que sa qualité image soit la plus proche possible du système courbe, sans limitation sur le volume. Si la qualité image n'est

pas limitée par la diffraction, les systèmes approchent des performances requises. Le microécran courbe a une courbure biconique de  $28,5 \times 190 \text{ mm}$ , ce qui est mécaniquement réaliste. Les deux systèmes sont affichés à la même échelle dans la figure suivante. Le système avec microécran plan est 30 % plus volumineux que sa comparaison courbe. On a donc un résultat encourageant par rapport au gain en volume pour une qualité image assez similaire.

Cette version de la conception a marqué un pas important car le système s'approchait d'une qualité image satisfaisante. J'ai donc commencé à concevoir le prisme compensateur pour garantir la vision directe. Ce prisme doit être collé au *combiner* et compenser les déformations que la voie augmentée impose à l'image directe. C'est cette étape qui m'a montré que mes développements n'étaient pas bons : la courbure du dioptre de sortie est si forte dans le modèle courbe que la compensation ne se fait pas correctement, la qualité image de la vision directe est trop dégradée. La Figure 5.22 montre deux systèmes avec un microécran courbe et plan en comparant leur volume et leur qualité image.

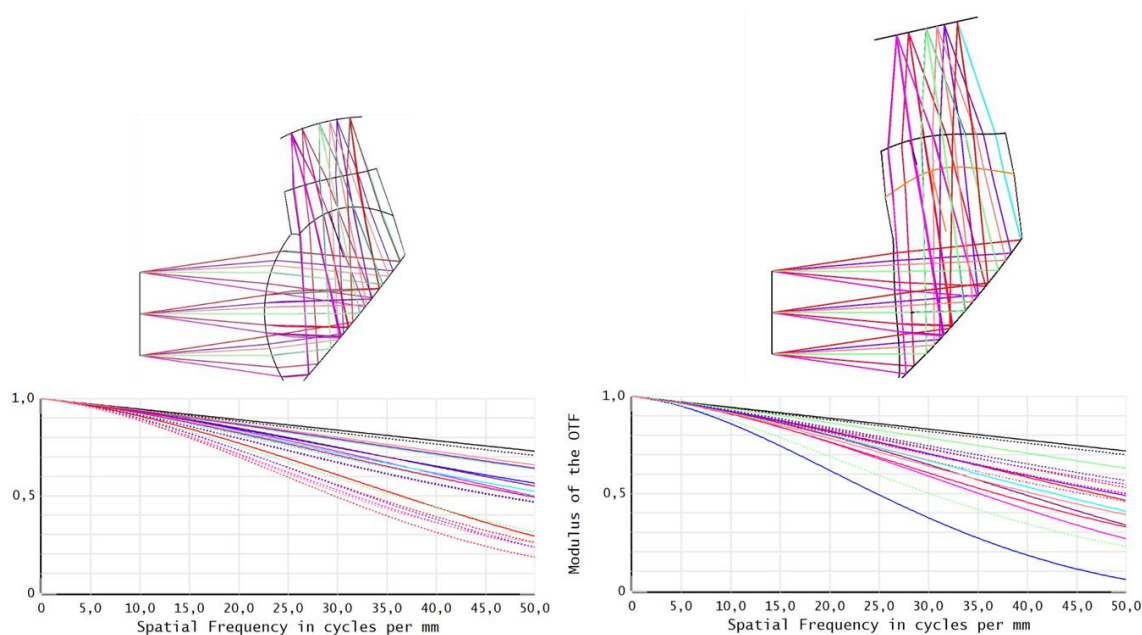


Figure 5.22 – Une version préliminaire du système MVF, modélisé en sens inverse. Les schémas ne montrent que la voie augmentée, à la même échelle, avec les MTF respectives.

### 5.2.2.2 Voie directe, compensation

Une fois que ces premières versions du système MVF ont pris forme, j'ai essayé de construire le prisme compensateur. L'objectif est de vérifier que la voie directe puisse correspondre aux spécifications. Une mauvaise surprise a cependant imposé de repenser les spécifications : le prisme compensateur ne permettait pas à ce stade d'obtenir une qualité image correcte.

Pour concevoir le prisme compensateur, je ne considère que la partie de la voie augmentée qui est concernée, c'est-à-dire deux dioptries sur les quatre des prismes de cette voie. Le prisme compensateur n'a qu'un seul dioptre de libre pour la correction de l'image, puisque l'autre dioptre est fixé par le combiner.

La qualité image obtenue est mauvaise, pour une pupille de 2 mm, dans le champ de la fovéa alignée avec le centre de l'image, 80 % de l'énergie n'est encerclée qu'à partir de  $75 \text{ mm}$ , au lieu de  $580 \mu\text{m}$  selon le cahier des charges. Pourtant, pour obtenir ce résultat, 12 coefficients de Zernike ont été optimisés, avec les coniques et de nombreux essais, et méthodes d'optimisations utilisées. Il est clair qu'il y a un souci dans la

définition de la voie augmentée, qui rend le prisme compensateur incapable de réaliser sa tâche. La Figure 5.23 illustre ce système ainsi que la qualité image qui n'est pas du tout au niveau attendu.

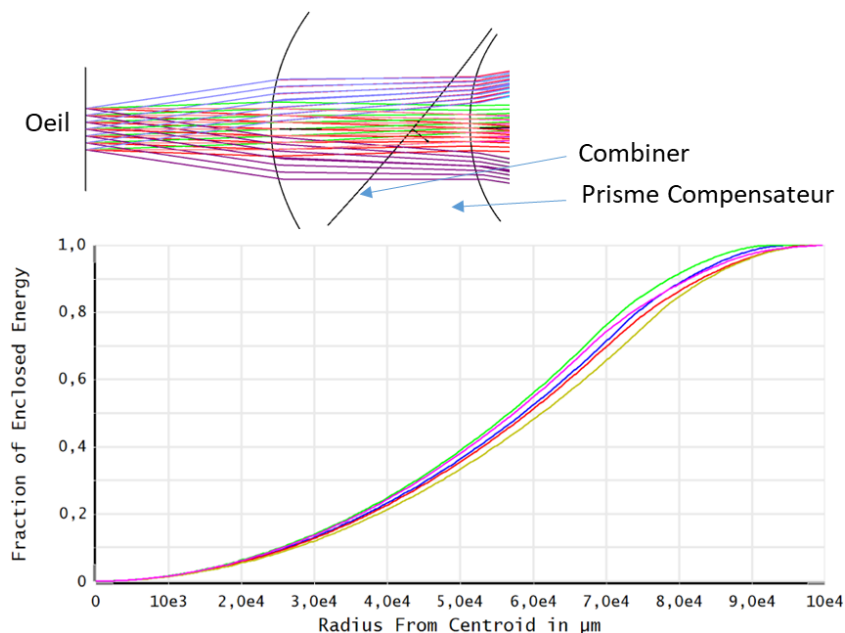


Figure 5.23 – Haut : Voie directe du système de MVF, avec le prisme compensateur à droite. Bas : énergie encerclée pour ce système, en considérant une pupille de 2 mm, sur la fovéa centrée.

Pour éviter de reproduire ce mauvais résultat, j'inverse la démarche de recherche. Si le dioptre de sortie du prisme est plan, le prisme compensateur pourrait se contenter d'être plan, l'ensemble ne serait qu'une lame plane à faces parallèles. Or la courbure de la surface de sortie du prisme est ici très forte et asphérique (voir annexe systèmes optiques), je cherche donc la courbure limite à partir de laquelle le prisme compensateur ne peut plus atteindre ses spécifications. En prenant un matériau identique pour les deux prismes, je trouve qu'entre 60 et 50 mm de rayon de courbure pour la surface de sortie, j'arrive à garantir la qualité image. Le fait d'avoir un seul matériau permet d'éviter que le combiner n'influence la qualité image, car avec son fort angle de tilt, il complique la correction.

Je reprends donc la conception du prisme de la voie augmentée en limitant la courbure autorisée pour le dioptre de sortie : il sera uniquement biconique, sans coefficient d'asphérisation ou *freeform*, avec une courbure limitée à 60 mm.

### 5.2.2.3 Résultat final

#### 5.2.2.3.1 Présentation générale

En reprenant le travail à partir d'un autre point de départ, j'obtiens un résultat beaucoup plus intéressant. Ce système final satisfait au cahier des charges, sans avoir une homogénéité d'éclairage déséquilibrée comme certains autres systèmes non présentés ici.

La méthode utilisée pour obtenir ce résultat a d'abord consisté à optimiser le système sans se fixer de contrainte importante sur le volume global. Une fois qu'un résultat satisfaisant en qualité image a été trouvé, j'ai cherché à le rendre plus compact, jusqu'à ce que la qualité image ne soit plus dans la limite du cahier des charges.

Le dioptre de sortie est à la courbure maximale autorisée pour garantir la faisabilité de la voie compensée. Le microécran est courbé selon une forme biconique, avec une courbure de  $50,8 \times 92,4 \text{ mm}$ , qui est une courbure tout à fait réaliste techniquement (cf le chapitre 4), illustrée à la Figure 5.24.

Pour évaluer l'apport de la courbure, deux systèmes utilisant un microécran plan sont conçus : le premier (a) cherche à avoir un volume très proche du système final, et sa qualité image est alors dégradée. Le second système (b) cherche à préserver la qualité image quitte à être moins compact. Ces deux approches permettent de constater les gains obtenus grâce à la courbure du microécran selon deux perspectives différentes. Evidemment, les systèmes plans sont aussi prévus pour que la voie directe soit réalisable. Les voies directes sont présentées dans la partie suivante.

En bref, on peut dire que la courbure du microécran permet d'obtenir un meilleur système. La qualité image est 45 % meilleure que la qualité image du système plan compact ( $440 \mu\text{m}$  contre  $640 \mu\text{m}$  pour encercler 80% de l'énergie sur la fovéa), et il est 25 % plus compact que le système de qualité image satisfaisante (voir 5.2.2.3.3 pour la méthode de mesure du volume). De plus, par rapport aux deux autres systèmes, il entraîne a priori moins de complexité à la fabrication que les systèmes plans, comme l'indique la Figure 5.28. Enfin, le système courbe est aussi plus lumineux que les deux autres, pour une même ouverture : en supposant une émission lambertienne (pire des cas), le flux reçu par la pupille du système courbe est augmenté de 20 % par rapport au système (a) et de 5 % par rapport au système (b), et, tout en préservant une homogénéité d'éclairage équivalente dans les trois cas. Chacun de ces aspects est présenté plus en détails dans la suite. La Figure 5.24 montre la voie augmentée du système final, ainsi qu'un cas où l'œil regarde le bas de l'image.

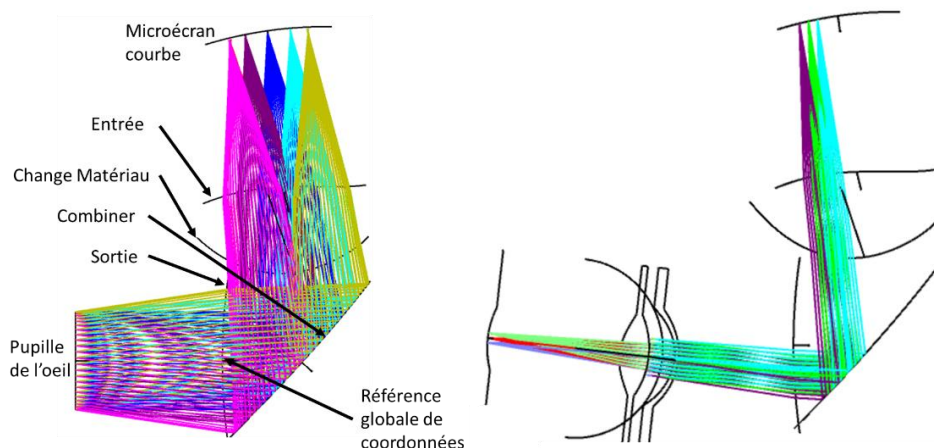


Figure 5.24 – Système final, aux meilleures performances. Gauche : cas plein champ et pleine ouverture. Droite : illustration pour la fovéa et pour une ouverture de 4 mm de diamètre, avec un modèle d'œil.

### 5.2.2.3.2 Qualité image

La qualité image du système, comme indiqué dans la partie 5.1.3.2, doit être mesurée selon deux méthodes : la MTF lorsque le système est modélisé en sens inverse, l'énergie encerclée lorsque le système est modélisé en sens direct. En sens inverse, la qualité image est à comparer aux pixels du microécran, puis en sens direct, à la résolution de l'œil pour une image projetée à  $4\ 000 \text{ mm}$ . S'il est probablement encore possible d'améliorer ce système, de trouver d'autres solutions présentant d'autres qualités, celui-ci est le système le plus abouti que j'ai obtenu. A noter que la qualité image présentée à la Figure 5.25 correspond au cas où l'œil est en position centrale.



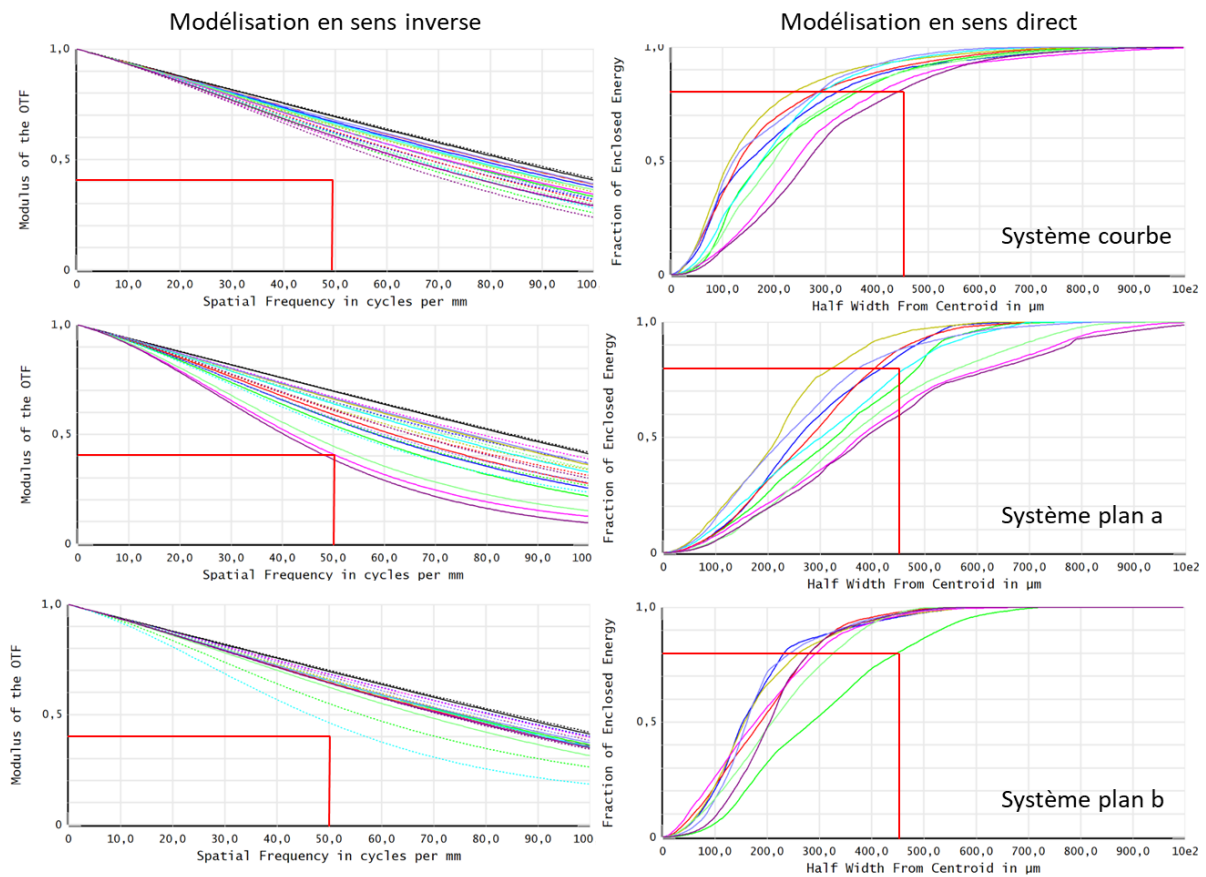


Figure 5.25 – Qualité image des trois systèmes, configuration centrale. Les lignes rouges indiquent les spécifications. Chaque courbe de couleur représente un point du champ de la fovéa.

Pour les autres configurations, il serait fastidieux de tout afficher, je les présente dans l’annexe « systèmes optiques ». Le système atteint la plupart des spécifications du cahier des charges pour les différentes positions de l’œil, mais certaines sont un peu moins bonnes qu’attendu. Quoiqu’il en soit, il s’agit du meilleur résultat lorsqu’on considère l’ensemble du cahier des charges.

### 5.2.2.3 Volume

Les trois systèmes proviennent d’un point de départ identique et ont fait l’objet d’une démarche similaire durant leur conception. La Figure 5.26 les montre les uns à côté des autres. On perçoit alors les différences de volume entre les systèmes.

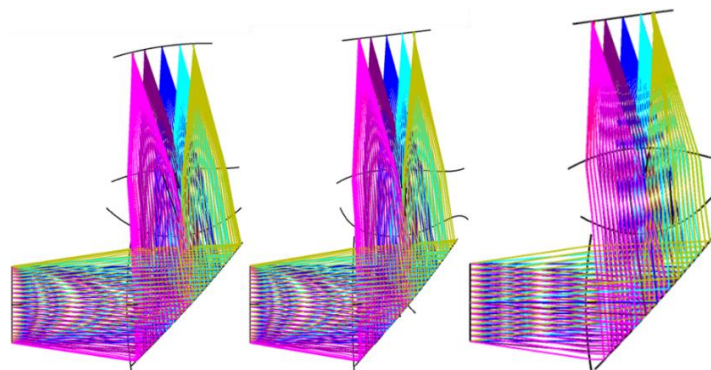


Figure 5.26 – Les trois systèmes à la même échelle. Gauche : référence. Centre : système (a), même volume, qualité image inférieure. Droite : système (b), qualité image équivalente et volume plus important.

A noter que la façon dont le volume est mesuré joue un rôle dans les résultats. Deux méthodes ont été employées pour mesurer le volume des systèmes. La première méthode correspond au volume de la plus petite boîte dans laquelle peut tenir le système, sans compter la pupille de l'œil. La seconde méthode correspond au détournage précis des systèmes optiques, comme illustré à la Figure 5.27. La première méthode peut être obtenue directement dans ZOS, ce qui permet d'avoir un retour direct de l'information. Elle a en outre l'avantage de correspondre à ce qui serait intéressant de limiter pour considérer l'intégration de ces systèmes dans un boîtier d'appareil photographique. La seconde méthode permet d'obtenir des résultats plus précis et aide à visualiser les points de différence entre les trois systèmes.

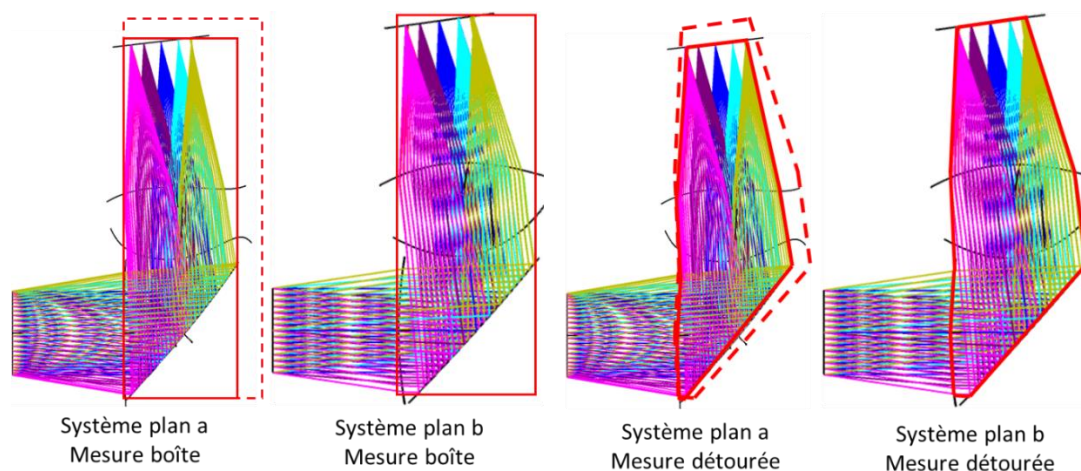


Figure 5.27 – Illustration des deux méthodes de mesure du volume. En pointillé : report de (b) sur (a).

En relatif, entre le système courbe et le système plan (b), le gain en volume est assez important, comme l'indique le Tableau 5.14. En pratique, pour interpréter ces données, il faudrait avoir plus d'informations sur les contraintes d'ingénieries imposées par l'intégration d'un tel viseur dans un boîtier photographique.

	Volume boîte (mm <sup>3</sup> , %)	Volume détournée (mm <sup>3</sup> , %)
Système de référence (et a)	16 600	9400
Système b	20 800 (25 %)	10 200 (9 %)

Tableau 5.14 – Volume selon les deux méthodes de calcul.

#### 5.2.2.3.4 Flux entrant dans la pupille

Comme indiqué au chapitre 3, pour qu'un système soit lumineux, il faut qu'il minimise les pertes lumineuses, ainsi que la lumière parasite. Comme les trois systèmes sont proches structurellement, les pertes lumineuses en leur sein sont similaires. En revanche, le flux lumineux entrant dans leur pupille est intéressant à comparer, car la relation entre le microécran et les pupilles n'est pas identique dans les trois cas. L'objectif est de répondre à la question : quel est le système transmet le plus de flux lumineux ?

Pour y répondre, j'ai repris le travail réalisé pour l'étude théorique du gain en flux lumineux au chapitre 3 : je simule un microécran lambertien ainsi que la pupille de chacun des trois systèmes, avec ZOS en mode non séquentiel. En simulant un quart du microécran, je peux estimer le flux lumineux reçu par la pupille dans chaque cas, cela dépend de la forme du microécran, du type d'émission, du diamètre de la pupille et de sa position. Avec une émission lambertienne, le système courbe est 20 % plus lumineux que celui de volume équivalent (a) et 5 % plus lumineux que celui de qualité image équivalente (b), comme le montre le Tableau 5.15.



	système courbe	système plan a	système plan b
courbure (mm)	50,8 x 92,4	-	-
semi diamètre de la pupille (mm)	67	80	471
distance mD pupille (mm)	157	207	2260
<b>flux reçu par la pupille (W)</b>	<b>1,26</b>	<b>1,05</b>	<b>1,21</b>

Tableau 5.15 – Flux reçu par la pupilles des trois systèmes pour une émission lambertienne.

Un point important est que pour les trois systèmes l'homogénéité de l'éclairage en fonction du champ est sensiblement identique, avec moins de 10 % de pertes dans le pire des cas. En effet, un système qui aurait un important flux lumineux, mais une très faible homogénéité, pourrait poser des problèmes.

### 5.2.2.3.5 Remarques sur l'écart à la forme de base

La suite du chapitre donnera plus de détails sur la facilité à fabriquer ces prismes simulés et donc sur le tolérancement. Avant d'étudier ces notions, on peut déjà souligner que l'écart à la forme de base, mesurée de la même façon que pour le choix du point de départ présenté au chapitre 3, c'est-à-dire en sommant point à point la différence de *sag* pour chaque surface entre sa version finale et sa forme de base (rayon de courbure et conique uniquement). Plus le coefficient est élevé, plus l'écart à la forme de base est important. Ces chiffres, donnés à la Figure 5.28, ne donnent qu'une première approximation de la complexité des surfaces et ne doit être pris qu'à titre indicatif.

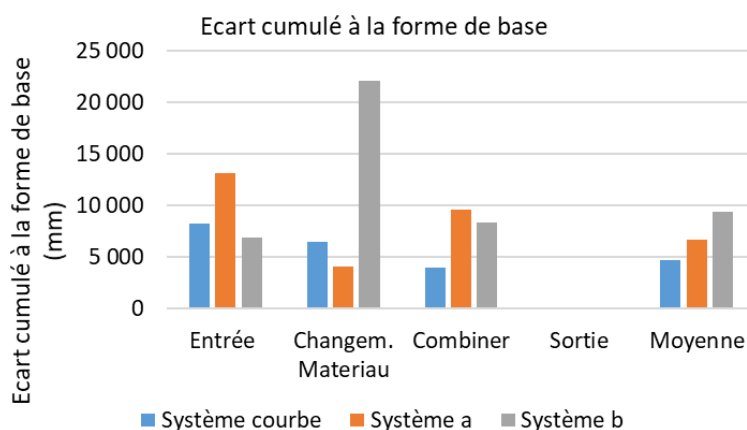


Figure 5.28 – Ecart cumulé à la forme de base pour les trois systèmes de MVF.

### 5.2.2.4 Compensation du système final

Les résultats liés à la courbure du microécrans ont tous été donnés dans la partie précédente, puisque c'est au niveau de la voie augmentée qu'il y a une influence. Comme le prisme compensateur est conçu de façon similaire à ce qui est décrit dans la partie 5.2.2.2, je me contente ici de comparer les résultats finaux des trois systèmes optiques. Les détails optiques sont donnés dans l'annexe « systèmes optiques ».

Les voies compensées sont à comparer selon trois critères : l'épaisseur de la voie optique, la qualité image, et l'écart à la forme de base. L'aspect visuel des trois voies compensées est similaire, si bien qu'il suffit d'en présenter un pour comprendre les trois, comme sur la Figure 5.29.

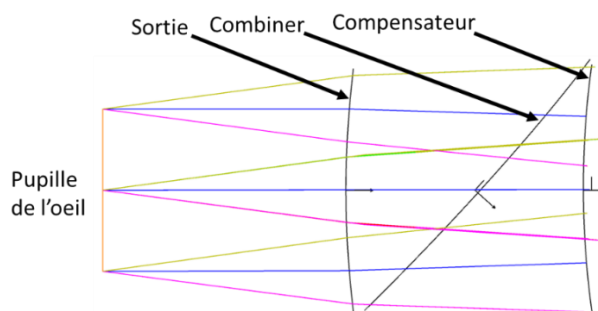


Figure 5.29 – Illustration de la voie compensée du système utilisant un microécran courbe.

L'épaisseur des trois systèmes est directement reliée à l'encombrement du système. Géométriquement, le diamètre du dioptré de sortie est fixé, comme indiqué dans la partie 5.1.3.1. La différence entre les trois versions est d'une part due à la position et à l'orientation du combiné par rapport au dioptré de sortie, comme l'indique la Figure 5.30.

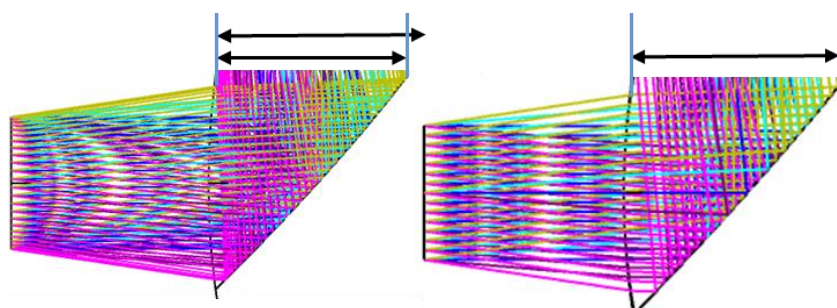


Figure 5.30 – Portion liée à la voie directe des systèmes courbes et plan b, constatant une différence d'épaisseur entre les deux systèmes.

D'autre part, la position du dioptré compensateur par rapport au combiné tend à minimiser les aberrations en cherchant le système le plus fin possible. Mais une épaisseur minimale doit être conservée entre les dioptrés combiné et compensateur pour fabriquer le prisme, fixée ici à 5 mm. Le Tableau 5.16 donne l'épaisseur totale pour les trois systèmes. Si le système courbe et le système plan (a) ont une épaisseur similaire, le système plan (b) est 16 % plus épais. Cette différence n'a pas été prise en compte dans les calculs de la partie précédente qui ne concernait que la voie augmentée.

	Système courbe	Système (a)	Système (b)
Épaisseur voie directe (mm)	19,1	19,8	22,1

Tableau 5.16 – Épaisseurs comparées de la voie directe des trois systèmes.

Le critère suivant, l'écart à la forme de base, compare les trois systèmes de la même façon que précédemment : on somme la différence point à point de *sag* entre le dioptré défini entièrement et le même dioptré en supprimant les termes *freeforms*. On constate que le système courbe est le moins complexe des trois, suivi du système (a), puis du système (b). Ce résultat est surprenant dans le sens où le système (b) est celui qui a le moins de contraintes sur la compacité et aurait pu, par conséquent, être le plus proche de sa forme de base, comme l'indique le Tableau 5.17. Donner les raisons de ces résultats n'est pas facile, car il s'agit du résultat des optimisations sur lesquelles on ne contrôle que les paramètres d'entrée. De même que précédemment, seule l'étude du tolérancement peut permettre d'aller plus loin dans cette comparaison.

Dioptre	Ecart à la forme de base (mm)		
	système courbe	système a	système b
Compensateur	1 150	3 388	4 324

Tableau 5.17 – Ecart à la forme de base pour les dioptries compensateur des trois systèmes.

Enfin, pour la qualité image, les trois versions satisfont aux spécifications. La Figure 5.31 montre la qualité image mesurée pour la fovéa, avec un œil centré. Mais le système (b) a été nettement plus difficile à optimiser que les autres. D'ailleurs sa qualité image est un peu inférieure. Cette difficulté supplémentaire pour le système (b) est à relier avec l'écart à la forme de base qui est plus important : si le dioptre est plus déformé, c'est peut-être justement car il y a plus d'aberrations à corriger.

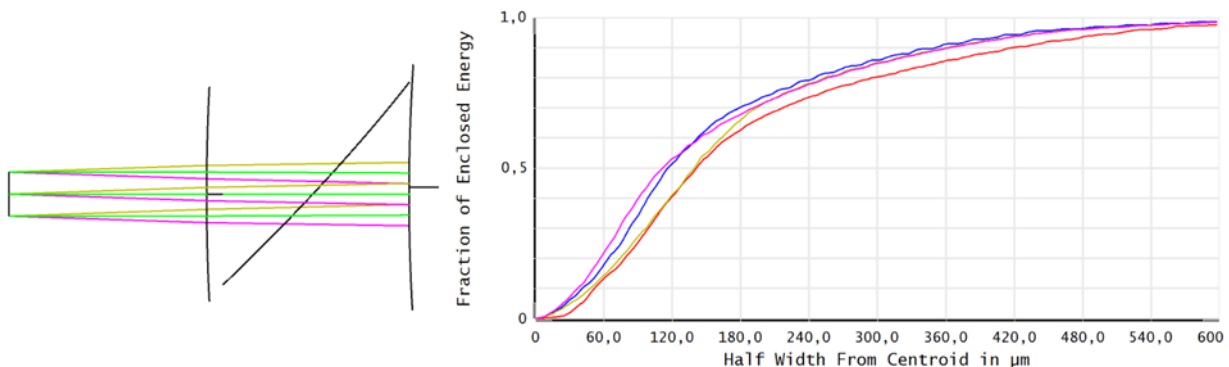


Figure 5.31 – Gauche : Vue latérale de la voie compensée du système courbe. Droite : énergie encerclée du système courbe, pour une pupille de 4 mm de diamètre et le champ de la fovéa. La surface image sur laquelle l'énergie encerclée est calculée est l'image virtuelle, projetée à 4 000 mm.

A ce stade, deux systèmes ont été calculés, un EVF et un viseur mixte MVF, permettant de faire de la RA. La différence principale entre les deux est la présence de la voie de RA. De plus l'EVF a un champ de vue un peu plus grand, mais dans l'ensemble ils ont beaucoup de points communs. Dans les deux cas, la courbure du microécran permet d'améliorer les performances à plusieurs points de vue : qualité image, flux lumineux, volume, complexité de fabrication.

Maintenant que les systèmes sont calculés, il est important d'évaluer leur faisabilité via le tolérancement.

## 5.3 TOLERANCEMENT ET OPTOMECHANIQUE

L'EVF est un système à symétrie de révolution, son tolérancement est donc usuel, contrairement au MVF en tant que système *freeform*. Je le présente donc en premier. Dans cette partie, plus que le résultat de tolérancement, c'est le raisonnement et les méthodes qui importent. A la suite du tolérancement, je présente les solutions optomécaniques retenues car elles y sont liées.

### 5.3.1 Présentation du tolérancement

Le tolérancement est l'évaluation des performances d'un système en prenant en compte les écarts entre la géométrie nominale et la réalisation pratique, toujours entachée d'erreur. L'enjeu du tolérancement c'est la maîtrise des coûts : on peut tout produire à la meilleure précision possible mais cela reviendrait très cher. Ici, l'enjeu est de s'assurer que l'on obtiendra un démonstrateur fonctionnel, en maîtrisant les coûts.

En pratique, la première chose à faire est de définir un objectif de tolérancement. Dans le cas présent, en fabricant deux exemplaires, on souhaite être quasi certain d'en avoir un qui atteigne les performances. Avec 80 % des systèmes simulés répondant aux spécifications, on a 96% de chances d'avoir au moins un bon système parmi les deux.

Puis, il faut analyser le système optique pour en déduire une liste de paramètres à étudier. La question à se poser est : qu'est ce qui peut varier lors de la production des optiques, de leur montage ou de leur utilisation ? La Figure 5.32 illustre d'un côté les écarts de production des optiques et d'autre part les écarts de montage.

Une fois les erreurs identifiées, il faut définir une méthode d'analyse de la qualité image qui soit représentative du système (*spot diagram*, MTF, énergie encerclée, fonction de mérite...). Puis déterminer selon ce critère d'évaluation une valeur de seuil déterminant ce qui est tolérable pour le système en prenant toutes les erreurs en compte. Ceci recoupe l'objectif de tolérancement.

Enfin, on peut définir des compensateurs : il s'agit de paramètres réglés pendant la production du système pour compenser les pertes dues aux tolérances. Il est classique d'autoriser un réglage de la position longitudinale pour compenser un défocus. Plus il y a de compensateurs, plus on relâche les tolérances, mais plus le réglage du système est long, et donc cher.

Le tolérancement est alors mis en place, il ne reste plus qu'à calculer les tolérances minimales pour atteindre les objectifs de tolérancement. Pour cela, trois types d'analyses sont disponibles dans ZOS : *sensitivity*, *inverse sensitivity* et *Monte Carlo*, toutes décrites en détails dans l'aide du logiciel. En les combinant successivement, on obtient une image statistique de la dégradation des performances.

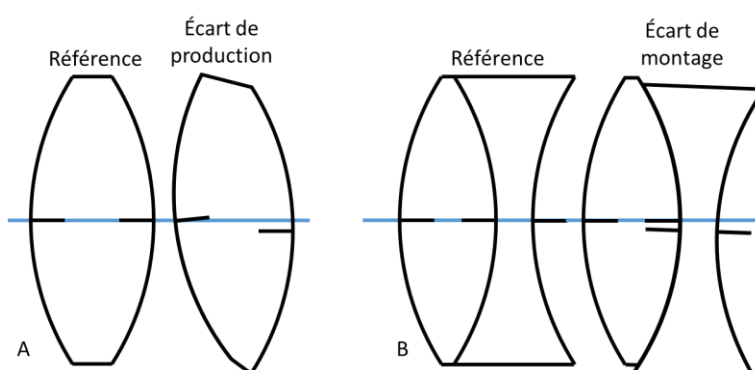


Figure 5.32 – A : écart de production : tilt et décentrement. B : écart de montage lors du collage.

Les tolérances obtenues mènent à deux scénarii : soit elles conviennent pour la production et ce travail est fini, soit il y a un échec. En cas d'échec, plusieurs solutions sont possibles : payer plus cher pour des tolérances plus strictes, ajouter des compensateurs, reprendre le design initial ou changer le cahier des charges (par exemple en tolérant un plus grand pourcentage de systèmes ratés en production).

Cette description générale permet de comprendre la méthodologie du tolérancement. Pour plus de détails théorique, voir [123] ; pour les détails pratiques, je recommande les tutoriels mis en ligne par ZOS (Zemax OpticStudio).

### 5.3.2 Tolérancement EVF

C. Gaschet et F. Zuber ont étudié le tolérancement de systèmes utilisant des capteurs courbes [54,124]. La symétrie de révolution de ces systèmes rend leurs analyses proches de celle de l'EVF. J'en reprends donc de nombreux éléments en y ajoutant les spécificités des systèmes visuels.

### 5.3.2.1 Tolérancement de microécran courbe

#### 5.3.2.1.1 Erreurs de forme et de position du microécran courbe

Lorsque la surface image est plane, elle n'est pas incluse dans le tolérancement. Plus précisément, les erreurs de formes sont négligeables, et au lieu de regarder la dégradation des performances liés au désalignement de la surface image, on l'utilise comme compensateur. Cependant, la courbure change ces deux aspects: les erreurs de formes importent et le positionnement de la surface courbe peut dégrader la qualité image.

Une première remarque consiste à identifier l'ensemble des erreurs possibles liées à l'usage de la courbure. La Figure 5.33 représente chaque erreur possible pour un capteur courbe, et leur addition [124].

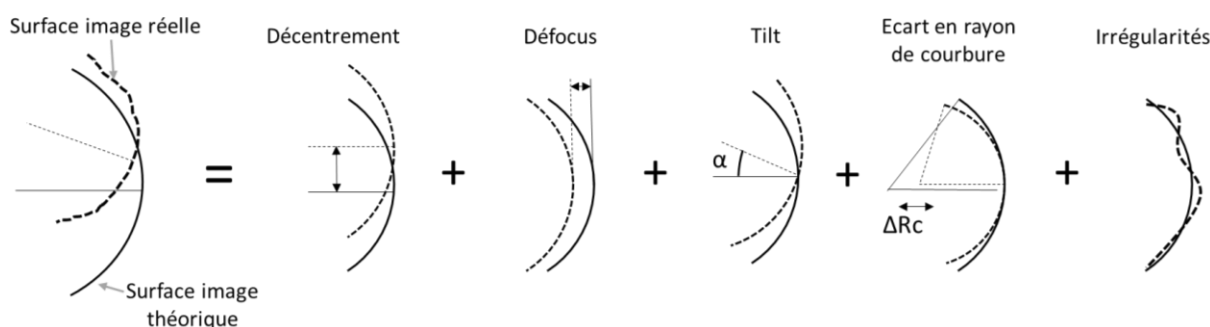


Figure 5.33 – Ensemble des erreurs possibles lors de l'usage d'un microécran courbe, issu de [124].

L'objectif du tolérancement est double : d'une part trouver une représentation pertinente des écarts possibles entre la surface nominale et la surface courbe réelle, et d'autre part, trouver un moyen de quantifier ces écarts.

Une première approche consisterait à quantifier une tolérance pour chaque erreur présentée à la Figure 5.33. Mais deux arguments s'opposent à cette méthode : tous ces défauts ne sont pas indépendants, et on veut conserver un compensateur sur la surface image pour alléger les tolérances du système optique.

Les interdépendances entre les défauts sont les combinaisons dont la dégradation totale des performances n'est pas égale à la somme des dégradations. La Figure 5.34 donne deux exemples où la combinaison de deux défauts donne une erreur totale faible.

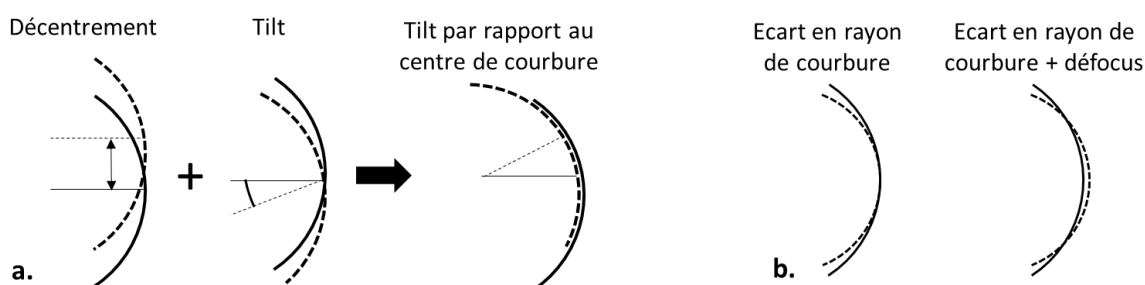


Figure 5.34 – a : Décentrement combiné à un tilt donne une surface image décalée sans dégrader la qualité image, en réduisant le champ. b : compensation partielle d'un écart de courbure par un défocus.

Ainsi, parmi tous les défauts présentés à la Figure 5.33, il faut en distinguer deux types : ceux qui sont liés à la mise en courbure (écart au rayon de courbure et irrégularités de surface) et ceux qui sont liés au montage optomécanique (décentrement, tilt et défocus). Pour utiliser les défauts de mise en courbure comme compensateur, il faut mesurer le système optique pour l'associer au microécran qui est au plus

proches des caractéristiques utiles. Puis, une fois le microécran affecté à un système, la position et l'orientation peuvent être contrôlées en tant que compensateurs. Comme expliqué au 5.3.1, plus il y a de compensateurs, plus la correction des autres erreurs est fine, mais aussi plus le montage est complexe.

Il est à noter que le travail de Zuber *et al.* [124] ne considérait que le cas de capteurs courbes, et non de microécrans. Or, lors du montage d'un système avec capteur, on peut le brancher et visualiser en direct l'image d'un point source pour régler le défocus par exemple. Avec un microécran, cette démarche est plus compliquée puisque l'image est virtuelle. Pour cette étape, le plus simple est de réaliser le réglage en plaçant son œil en acceptant la subjectivité du monteur. Pour supprimer cette subjectivité, plusieurs montages optiques ont été proposés pour simuler un œil [125–127].

Dans le cas du montage de l'EVF, nous autorisons 3 compensateurs (décentrement x y et défocus).

A ce stade, nous savons ce qui doit être pris en compte pour réaliser le tolérancement avec une surface image courbe et donc cela répond au premier objectif du concepteur optique. Voyons maintenant comment quantifier ces écarts.

### 5.3.2.1.2 Tolérances et profondeur de foyer

Pour quantifier ce qui est tolérable pour la surface image, la procédure suit les méthodes usuelles : analyser les sensibilités une-à-une et s'assurer que leurs interactions ne dégradent pas trop les performances. Pour vérifier ce dernier point, la méthode usuelle est l'analyse Monte Carlo qui consiste à prendre aléatoirement une valeur pour chaque erreur et à évaluer la performance du système obtenu. En répétant ce processus plusieurs fois, on obtient une image statistique des performances avec ces tolérances. Dire cela est suffisant pour répondre au second objectif : quantifier les tolérances.

Cependant, comme on étudie ici le tolérancement d'une surface image, il y a un autre point à considérer pour faire correctement ce travail : la profondeur de foyer.

La profondeur de foyer, déjà présentée par C. Gaschet dans sa thèse [54], est l'intervalle de position longitudinale dans lequel doit se situer un pixel du microécran pour être imagé correctement au travers du système optique. Généralement, la profondeur de foyer est calculée pour le centre champ, mais elle peut varier avec le champ. La profondeur de foyer est importante à étudier car elle correspond à l'ensemble des positions de chaque pixel qui ne dégradent pas les performances, ce qui est une autre façon de parler de tolérancement. Ainsi, C. Gaschet montre dans sa thèse une méthode de quantification de l'écart en rayon de courbure tolérable en s'assurant que la variation de position longitudinale du pixel extrême soit inférieure à la profondeur de foyer. Le calcul de variation de rayon de courbure donné par C. Gaschet néglige le grandissement, ce qui n'est pas mon cas. En reprenant sa démonstration, j'obtiens :

$$\Delta R = \frac{4R^2}{h^2} T_{pix} N(1 + m) = \frac{8R^2}{h^2} T_{pix} N. \quad 5.2$$

Avec  $T_{pix}$  la taille d'un pixel,  $N$  l'ouverture du système (supposée constante),  $h$  la demi-diagonale du capteur,  $R$  le rayon de courbure nominal et  $\Delta R$  l'écart en rayon de courbure.

Cependant, le fait que l'EVF étudié ici soit un système visuel pousse à analyser un peu différemment la notion de profondeur de foyer. En effet, pour C. Gaschet, son système pouvait travailler à ouverture variable, mais comme le tolérancement doit prendre en compte tous les cas, il suffit de se placer à ouverture maximale pour en déduire la profondeur de foyer. Dans le cas d'un système visuel, si la conclusion est aussi qu'il faut se placer à ouverture maximale, il est important de voir que le raisonnement n'est pas le même.

En effet, les systèmes visuels ont deux ouvertures : celle de l'EB, définie par une pupille de  $12\text{ mm}$  dans mes systèmes, et celle de l'œil, définie par la luminance reçue, prise à  $4\text{ mm}$ . Seulement, contrairement au cas d'un système capteur d'image, d'une part la pupille de l'œil ne percevra jamais l'image virtuelle à pleine ouverture, et d'autre part, la pupille de l'œil bouge dans l'EB.

Avant de présenter le raisonnement menant à choisir la pupille de l'EB, il est pertinent de quantifier la profondeur de foyer dans les deux cas pour se rendre compte de la différence. En reprenant le calcul de C. Gaschet, sans négliger le grandissement, dans le cas d'un microécran *Izumi* courbé à  $60\text{ mm}$  de courbure nominale, la tolérance sur le rayon de courbure vaut :

	Diam. de la Eye Box	Diam. de la pupille de l'œil
Tolérance absolue (mm)	$R = 60 \pm 4,9\text{ mm}$	$R = 60 \pm 14,7\text{ mm}$
Tolérance relative	$\pm 8\%$	$\pm 24,5\%$

Tableau 5.18 – Tolérances sur le rayon de courbure du microécran, en fonction de la pupille.

Or, aux vues des caractéristiques mécaniques de la mise en courbure (cf. chapitre 4) la probabilité que la courbure réelle soit plus agressive que la courbure nominale est très faible. On peut donc affirmer que la courbure tolérée est entre  $64,9\text{ mm}$  et  $60\text{ mm}$  pour la pleine pupille et  $74,5\text{ mm}$  et  $60\text{ mm}$  pour la pupille de l'œil.

Supposons alors que l'on prenne la pupille de l'œil pour calculer la profondeur de foyer. Dans ce cas, l'ouverture est petite et la profondeur de foyer est grande. Or, les rayons lumineux passant au travers du système sont tous compris à l'intérieur de la pupille maximale, celle de l'EB, bien que l'œil ne voit pas ceux qui dégradent la qualité image puisqu'ils ne rentrent pas dans sa pupille. On pourrait donc considérer que ces rayons ne sont pas gênants.

Toutefois, après un mouvement de l'œil, la pupille sélectionne d'autres rayons. Le fait que les rayons soient différents implique que les aberrations sont différentes. Par exemple, si la première position est centrée, il ne peut y avoir que de l'aberration sphérique, mais lorsqu'on regarde un bord, les autres aberrations apparaissent, ce qui modifie la sensation visuelle. Ce phénomène est nommé *pupil swim*, car il apparaît visuellement comme une sorte de flottement dans l'image, décrit comme désagréable pour l'utilisateur [2,126].

C'est pourquoi, ne pas contrôler la profondeur de foyer avec la pleine ouverture de l'EB, mais avec l'ouverture de l'œil, c'est tolérer une variation des aberrations qui peut fortement dégrader l'utilisation du système. Alors qu'en calculant la profondeur de foyer avec la pleine ouverture, les rayons extrêmes sont contrôlés de la même façon, et cela limite la possibilité d'apparition de *pupil swim*.

Par ailleurs, l'étude de la profondeur de foyer renseigne sur la sensibilité minimale à considérer pour les irrégularités de surface : tant que l'amplitude des irrégularités est inférieure à la profondeur de foyer, les performances ne sont pas affectées, le système y est insensible. C'est la cas auquel correspond la Figure 5.35. A noter que dans le pire des cas, où la courbure est à sa valeur limite maximale, alors l'amplitude tolérable des irrégularités est nulle dans la direction en bord de profondeur de foyer. La prise en compte des interactions entre les deux est donc complexe.

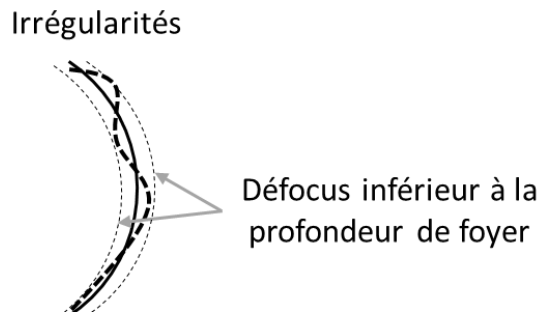


Figure 5.35 – Irrégularités dont l'amplitude est inférieure au défocus dû à la profondeur de foyer.

En conclusion, l'analyse de la profondeur de foyer permet d'une part d'estimer la tolérance sur le rayon de courbure du composant courbe, et d'estimer la sensibilité du composant aux irrégularités locales. Toutefois, les interactions entre les deux limitent la portée d'une analyse paraxiale comme celle-ci. Le meilleur moyen calculer ces tolérances est d'utiliser une analyse Monte Carlo, en s'assurant que l'ouverture considérée est bien celle de l'EB.

### 5.3.2.2 Tolérancement de l'EVF complet

Pour réaliser le tolérancement de l'EVF, les écarts pris en compte sont : écarts au rayon de courbure, épaisseurs entre chaque dioptré (épaisseurs des lentilles et des intervalles entre lentilles), tilt et décentrement de chaque dioptré (écart de fabrication), décentrement des lentilles entières (écart de montage), irrégularités non sphériques sur les dioptrés, variation d'indice et de constringence des matériaux. Les écarts liés à la dilatation thermique ou aux vibrations par exemple ne sont pas considérés, car absents des conditions du laboratoire. Le tolérancement est réalisé en sens inverse de la lumière (microécran considéré comme un capteur) pour accélérer les calculs.

Le critère de performance est un point important. On a vu avec la partie précédente qu'il fallait prendre en compte l'ouverture totale du système pour éviter de tolérer des variations d'aberration en fonction de la position de l'œil. Cependant, à pleine ouverture, la qualité image ne peut plus être évaluée par rapport aux performances de l'œil, ce qui impose donc d'utiliser d'autres configurations dans le critère de performances. Enfin, il faut aussi inclure différentes positions de l'œil dans l'évaluation du critère de performance. Pour considérer tous ces cas de figure, la solution choisie est de créer une fonction de mérite (MF) sur 4 configurations : une configuration plein champ et pleine ouverture pour le *pupil swim* et trois configurations sur les positions de l'œil. D'abord centré, puis avec un tilt de 5° et enfin un tilt de 12,1°, ce qui permet avec la fovéa de couvrir l'ensemble du champ. Le calcul automatique de la MF donne un nombre réel qui résume la performance du système. Cette méthode permet de mélanger toutes les configurations facilement puisque tout est résumé en une seule valeur. Cependant, lorsque l'on utilise la valeur moyenne des *spots diagram*, ce critère est directement relié à un paramètre physique. À l'inverse, un critère sur la MF est délicat à interpréter : quelle est la valeur maximale de MF que l'on peut tolérer ?

Pour répondre à cette question, je commence par régler les tolérances avec des valeurs standards et à évaluer d'une part la sensibilité du système individuellement à chaque variable, et d'autre part des exemples concrets de systèmes par Monte Carlo pour évaluer ce que représentent les valeurs de la MF pour ces cas. Une fois ces valeurs déterminées (que je ne reporte pas ici, car elles n'ont pas de sens absolu), je cherche à ce que 80 % des systèmes aient des performances satisfaisantes, évaluée en MTF sur les trois positions de l'œil, c'est-à-dire, plus que 20 % de contraste à 50 lp/mm.



Enfin, j'utilise les décentremets selon x, y et z comme compensateurs. Les valeurs de tolérances sont présentées dans le Tableau 5.19 ainsi que le Tableau 5.20.

	L1 S1	L1 S2	L2 S1	L3/L3	L3 S2	Microécran
Rayon de courbure (%)	36,7 +- 0,2	-54,6 +- 0,2	-18,2 +- 0,2	-38,1 +- 0,2	21,9 +- 0,2	-60 +- 5
Indice	+ - 0,0005	-	+ - 0,0005	+ - 0,0005	-	-
Nb d'Abbe	+ - 0,41	-	+ - 0,949	+ - 0,238	-	-
Irrégularités (franges)	+ - 2	+ - 2	+ - 2	+ - 2	+ - 2	+ - 2
Surface tilt (°)	-0,15 ; + 0,1	-0,08 ; +0,1	+ - 0,15	-0,15 ; +0,1	+ - 0,15	+ - 0,15
Epaisseur (mm)	+ - 0,2	+ - 0,1	+ - 0,15	+ - 0,2	Compensat.	-

Tableau 5.19 – Tolérances de fabrication des optiques. Les cases vides sont celles où le critère n'a pas de sens. « Compensat. » signifie que la distance entre L3 S2 et le microécran est utilisée comme compensateur.

	L1	Collage de L2 L3	L2 et L3 ensembles	Microécran
Décentrement (mm)	0,05	0,04	0,04	+ - 0,15
Tilt (°)	+ - 0,15	+ - 0,15	+ - 0,15	+ - 0,15

Tableau 5.20 – Tolérances de fabrication des optiques.

### 5.3.3 Tolérancement MVF

#### 5.3.3.1 Difficulté du tolérancement en *freeform*

Le tolérancement du MVF est plus délicat à mener à cause de l'aspect *freeform* des dioptries. En effet, lorsqu'une seule valeur (rayon de courbure) sert à décrire un dioptrie, il suffit d'en borner la valeur. Mais lorsque la complexité augmente (asphérique ou *freeform*), les erreurs réelles à considérer incluent d'autres critères tels que l'écart en pentes, la moyenne RMS de la forme ainsi que la fréquence spatiale des erreurs résiduelles [123].

Pour les optiques sphériques, l'opérande TIRR dans ZOS (*Tolerance on surface IRregularity*) simule des défauts aléatoires sur un dioptrie. L'opérande ajoute au dioptrie de l'aberration sphérique et de l'astigmatisme. Il ne s'agit que d'un modèle des défauts aléatoires, dont la représentativité doit être questionnée selon les cas. Pour les optiques *freeform*, les opérandes TEXI et TEZI sont l'équivalent de TIRR, en ajoutant des variations irrégulières de petite amplitude sur un dioptrie par l'utilisation d'un polynôme dont la déformation totale ajoutée au dioptrie ne dépasse pas le seuil fixé. Dans ce cas aussi, la représentativité de la méthode doit être questionnée, à cause de la nature aléatoire des défauts simulés.

L'utilisation de ces méthodes permet une approximation pertinente dans certains cas. Pour savoir dans quel cas on se trouve, il faut connaître le procédé de fabrication des optiques, car chaque procédé induit des défauts spécifiques. La partie suivante donne des pistes selon les méthodes de production des *freeform*.

### 5.3.3.2 Fabrication de dioptrés *freeform*

Il existe de nombreux outils pour fabriquer des dioptrés *freeform*, mais on en retient ici que les deux méthodes principales : le tournage diamant et le moulage.

Le tournage diamant consiste à faire tourner à haute vitesse l'optique et à en usiner le dioptré avec une pointe en diamant. Comme il n'y a pas de symétrie de révolution, le système doit comporter plus de 2 degrés de liberté, et plus il y en a, plus les formes réalisables sont diverses, mais plus la machine est difficile à contrôler [70]. Du fait du travail point à point, suite au tournage, une finition est souvent requise. Celle-ci peut se faire selon plusieurs méthodes comme le polissage par faisceau d'ion, par jet de fluide ou par magnéto-rhéologie. Avec les méthodes de finition, la précision finale peut atteindre quelques nanomètre d'écart RMS. Ainsi, ces machines sont extrêmement précises et ont peu de limites quant aux formes réalisables. En revanche, comme l'usinage est réalisé pour chaque point du dioptré, le procédé est long, et il y a peu d'économie d'échelle possible, ce qui le rend surtout utile pour créer des prototypes ou de faibles volumes de pièces [70,95].

Un type d'erreur caractéristique de ce procédé est appelé *Mid-Spatial Frequencies*. Il s'agit d'erreurs liées à la précision de la pointe diamant et à sa petite taille, qui peut laisser des écarts à des fréquences spatiales plus grandes que la taille de la pointe. La fréquence est trop faible pour être simulée par les opérandes TEXI et TEZI, mais trop grande pour être simulée comme de la rugosité [128]. Par ailleurs, plus la précision est fine, plus la complexité de la machine et de son usage s'accroît (gestion des degrés de liberté, des conditions d'opération...). Enfin, le travail sur les matériaux cassants comme certains verres optiques peut être délicat à gérer [70].

Le moulage peut être par injection, par compression ou par coulée [95]. S'ils consistent tous à introduire le matériau optique dans un moule et, une fois refroidi, à en extraire la pièce, la différence est dans le mode d'introduction. Ces procédés permettent d'obtenir rapidement de nombreux exemplaires d'une même pièce avec le même moule. C'est dans le moule que réside la première difficulté de cette méthode, puisqu'il faut en fabriquer un qui soit assez précis et robuste pour produire de nombreuses pièces identiques. Le moule est d'ailleurs souvent conçu par usinage diamant. Puis, l'autre difficulté est de concevoir l'injection du matériau dans le moule ainsi que l'extraction de la pièce, sans dégrader le moule. La qualité des optiques dépend directement de la qualité du moule, mais le coût de ce dernier est amorti par le nombre de pièces fabriquées, et cela peut en être très bon marché pour un volume suffisant. Pour qu'un matériau soit compatible avec le moulage, il doit pouvoir être fondu puis refroidi en conservant ses propriétés optiques, ce sont principalement des plastiques optiques ou des verres organiques. Une des limitations du moulage est le diamètre maximal des pièces qui dépasse difficilement 30 mm de diamètre [129].

Je n'ai pas connaissance d'un type d'erreur caractéristique des optiques moulées, seule une discussion avec les spécialistes de l'injection permet d'évaluer les tolérances à simuler. Le refroidissement du matériau entraîne souvent une contraction de la matière, et dans le cas de certaines formes, cela peut entraîner des déformations spécifiques que l'on peut prendre en compte dans la forme du moule.

D'autres méthodes existent, comme la réplique, ou l'impression 3D des éléments [130], mais sachant que je ne les utiliserai pas, je ne les ai pas étudiées.

Il y a matière à développer des thèses entières sur chacun de ces sujets, mais dans le cadre de celle-ci, ces brèves considérations sont suffisantes. En particulier, le système MVF doit simplement être produit en tant que prototype. Les coûts d'un moulage sont donc complètement prohibitifs, donc le seul moyen à disposition sera l'usinage diamant.

### 5.3.3.3 Tolérancement mené pour le MVF

Suite à une discussion avec deux fabricants d'optique *freeform*, pour obtenir un tolérancement réaliste, il faudrait procéder par itérations : réaliser un premier tolérancement, produire des pièces, analyser leur écart à la forme, et affiner le tolérancement ainsi que la production. Malheureusement, ce travail est long et coûteux. En conséquence, au lieu de chercher à faire un tolérancement précis, on a décidé de modéliser les points les plus importants pour simplifier le tolérancement. Ce choix limite la représentation statistique du tolérancement mais ne devrait pas compromettre la production des pièces optiques, car selon les fabricants, la limitation technique à la production des prismes est plutôt liée à leur caractérisation qu'à leur production.

Cette limite fait qu'il n'est pas possible de discuter de la Figure 5.28 qui indiquait que le système *freeform* utilisant un microécran courbe était potentiellement plus simple à fabriquer que les systèmes plans. Pour discuter plus précisément ce fait, il serait nécessaire de réaliser un tolérancement plus précis, qui n'a pas été abouti ici.

Ainsi, pour le tolérancement, j'ai pris en compte : l'écart à la forme (rayon de courbure et conique), l'écart en position relative des dioptries, l'écart en centrage et orientation de la surface usinée sur le dioptré et l'écart en indice optique des matériaux. J'ai donc laissé de côté l'étude des variations détaillées comme les *mid-spacial frequencies*. Par ailleurs, la méthode est similaire à celle de l'EVF. Toutefois, la MF permettant d'évaluer les performances n'est pas identique car la non-symétrie de révolution impose de prendre en compte plus de cas.

Les résultats indiquent que la qualité des matériaux plastiques est le principal élément limitant les performances. Notamment, l'indice optique difficile à garantir précisément avec les plastiques optiques est l'erreur qui dégrade le plus les performances. Le second élément dégradant le plus des performances sont les erreurs en position de la surface *combiner*, ainsi que les écarts de formes sur le dioptré d'entrée.

L'un des avantages à avoir conçu le système MVF comme un prisme monobloc est qu'une fois le prisme réalisé et collé, l'optomécanique a très peu de degré de liberté à gérer. Le seul réglage qui demeure est lié à l'alignement du prisme avec le microécran, en angle et en position. En fixant la position du prisme comme référence, on peut quantifier les écarts de position du microécran par rapport au prisme.

On décide d'utiliser la position du microécran selon les trois axes comme compensateur. Il reste donc les positions angulaires à quantifier en tant que tolérances, mais aussi les amplitudes des déplacements latéraux pour prévoir la course des compensateurs.

Les Tableau 5.21, Tableau 5.22, Tableau 5.23 et Tableau 5.24 donnent les détails du tolérancement pour le système courbe. Je les ai répartis sur plusieurs tableaux pour en faciliter la lecture.

Surface :		Sortie	Combiner	Chang.Mat.	Entrée	Type erreur
rayon en Y	min	-0,1	-0,02	-0,1	-0,1	%
	max	0,1	0,02	0,1	0,1	%
rayon en X	min	-0,1	-0,01	-0,01	-0,005	%
	max	0,1	0,01	0,01	0,005	%
conique en Y	min	-	-0,002	-0,01	-10,0	val abs
	max	-	0,003	0,01	10,0	val abs
conique en x	min	-	-0,002	-0,01	-0,001	val abs
	max	-	0,003	0,01	0,001	val abs
épaisseur à la prochaine surface	min	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	val abs
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	val abs
décentrement selon X	min	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	val abs
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	val abs
décentrement selon Y	min	-0,1	-0,032	-0,1	-0,1	val abs
	max	0,1	0,05	0,1	0,1	val abs
tilt selon X	min	-0,032	-0,025	-0,1	-0,05	val abs
	max	0,1	0,012	0,1	0,1	val abs
tilt selon Y	min	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	val abs
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	val abs
tilt selon Z	min	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	val abs
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	val abs

Tableau 5.21 – Tolérances de fabrication des optiques du MVF.

Par ailleurs, la tolérance sur le rayon de courbure du microécran est : [50,8, 52] mm pour le premier rayon de courbure, et [92,4, 94] mm pour le second.

matériau		LEXAN_CXT17	ZEONEX_E48R_2016	Type erreur
tolérance sur indice opt.	min	-0,01	-0,003	val abs
	max	-0,01	0,003	val abs

Tableau 5.22 – Tolérances sur les indices optiques des matériaux.

Type	Nominal, mm	Min, mm	Max, mm
Défocus	0	-0,4	0,35
Décentrement en x	0	-0,5	0,5
Décentrement en y	2,284	1,7	2,8

Tableau 5.23 – Valeur utile pour les décentremments à autoriser comme compensateur.

Type	Nominal, °	Min, °	Max, °
Tilt selon l'axe x	5,779	-1	1
Tilt selon l'axe y	0	-1	1
Tilt selon l'axe z	0	-1	1

Tableau 5.24 – Tolérance en position angulaire du microécran.

### 5.3.4 Optomécanique

Les systèmes sont maintenant conçus et tolérancés. Suite aux discussions avec les fabricants, il ne reste plus qu'à prévoir l'optomécanique pour accueillir les éléments qui seront fabriqués.

#### 5.3.4.1 Optomécanique EVF

Pour l'EVF, l'optomécanique consiste en un barillet tenant les deux éléments avec des bagues de serrage. Comme il n'y a que deux éléments (un doublet et un singulet), on peut insérer l'un par un bout du barillet, et l'autre par l'autre bout. Le fait de n'avoir que deux éléments est donc une simplification pratique pour le montage final. Par ailleurs, le collage du doublet est réalisé par le fabricant.

Les bagues de serrages sont usinées de sorte à être tangentes aux dioptries qu'elles tiennent. Ainsi, le contact est surfacique entre la lentille et la bague de serrage, ce qui limite le jeu dans le système. La Figure 5.36 représente tous les éléments optomécanique pour l'EVF.

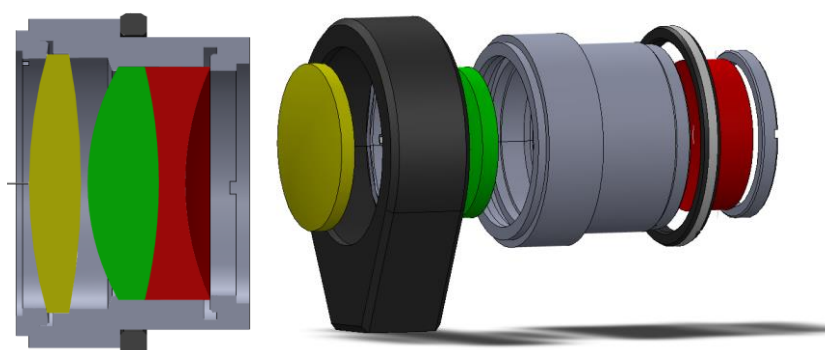


Figure 5.36 – Gauche : vue en coupe du barillet et des lentilles de l'EVF. Droite : vue éclatée de l'ensemble des optiques de l'EVF, avec le support mécanique pour tenir le système sur une table optique.

Ensuite, le montage permettant de tenir le microécran et d'en régler précisément la position utilise du matériel classique de mécanique pour l'optique. La Figure 5.37 représente l'ensemble de l'EVF, avec le barillet, le microécran ainsi que le montage optomécanique permettant d'en régler la position.

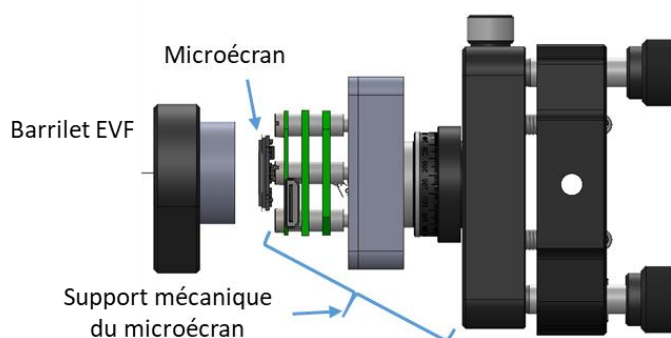


Figure 5.37 – Montage optomécanique complet de l'EVF.

#### 5.3.4.2 Optomécanique MVF

L'optomécanique pour le système MVF a été plus compliquée à réaliser que pour l'EVF. La première étape a été de convertir le fichier séquentiel en un format compatible avec les logiciels de CAO. Dans ZOS, il existe des outils automatiques pour faire cela, mais je n'ai réussi à exporter que les dioptries un à un. La reconstitution des prismes s'est faite avec Solidworks.

Ensuite, nous avons réfléchi à une méthode pour maintenir le prisme correctement aligné. Pour cela, nous ajoutons des ergots sur les côtés du prisme. Ces ergots sont conçus avec la même précision que le reste du prisme, ce qui permet à la fois de gérer l’alignement des dioptries lors du collage (fait par le fabricant d’optique), et de gérer le montage mécanique du prisme. Les supports optomécaniques sont alors creusés d’une fente sur les côtés permettant d’y loger les ergots. Ces fentes sont légèrement plus grandes que les ergots, avec certaines faces correspondant parfaitement à la position finale des ergots. Ces éléments sont représentés sur la Figure 5.39. Avec des vis, nous pousserons l’ensemble du prisme à être collé aux faces de références. La précision de placement dépend alors de la précision de l’usinage du bloc optomécanique et des faces de référence en particulier, de la précision de fabrication des ergots, ainsi que des dimensions des ergots : plus ils sont gros, meilleure est la précision.

La Figure 5.38 représente le MVF avec les deux voies optiques et un œil simulé, mais sans les ergots optomécanique pour plus de clarté. On y distingue trois faisceaux de rayons : le bleu et le vert sont deux points du champ de la voie augmentée (ils partent du microécran), le rouge est un point du champ de la vision directe (provenant d’un objet réel).

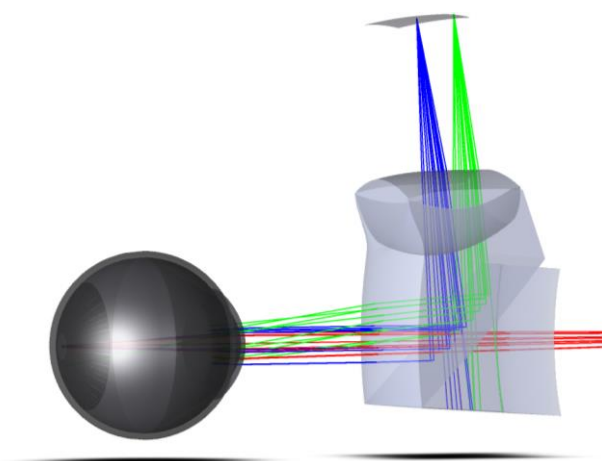


Figure 5.38 – Système MVF final. A gauche, un œil à l’échelle par rapport au prisme et au microécran.

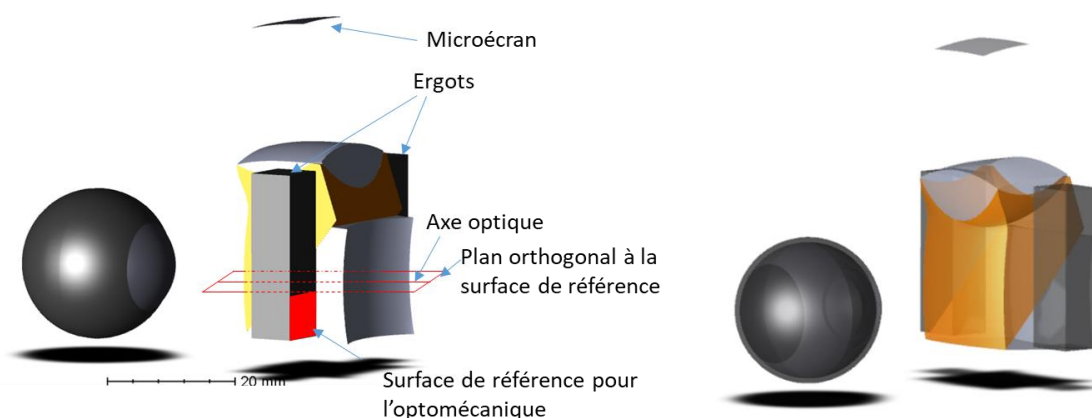


Figure 5.39 – Visualisation 3D de l’ensemble du système avec les ergots mécaniques.

## 5.4 REALISATIONS PRATIQUES ET CARACTERISATIONS

Suite à des problèmes de temps et de financement, le MVF ne sera pas produit. L’ensemble des étapes précédentes a été réalisé avant de savoir que ce projet serait finalement écarté. Le système EVF, lui, est mené à terme. Mais au moment de rédiger ces lignes, les lentilles viennent juste d’arriver, et le microécran

courbe n'est pas encore fonctionnel. Par conséquent, les éléments décrits dans cette partie correspondent à la planification des travaux encore en cours.

### 5.4.1 Caractérisation des dioptries *freeform*

La caractérisation d'un dioptré *freeform* est l'une des difficultés pratiques principales. De nombreuses machines commerciales ont été développées, et beaucoup de recherches sont menées sur le sujet. Les principales technologies de caractérisations sont :

- Mesures points à points
- Interférométrie (globale et par sous-pupille)
- Déflectométrie
- Tomographie X

Les principaux critères permettant de choisir une méthode plutôt qu'une autre sont :

- La durée de la mesure
- L'incertitude
- La pente maximale mesurable
- Le diamètre des pièces

Si la caractérisation d'un dioptré *freeform* est importante en soi, il est important pour un prisme de pouvoir aussi caractériser la position d'un dioptré par rapport à un autre. Comme la tomographie à rayon X permet de mesurer les positions relatives des surfaces, c'est une technique qui était envisagée.

### 5.4.2 Caractérisation du prototype complet

La caractérisation des lentilles a été menée par le fabricant. Avec ces données, j'ai pu déterminer avec ZOS la meilleure combinaison entre les deux doublets et les deux singulets. La caractérisation menée ici comporte deux volets : évaluer la sensation visuelle à l'utilisation et évaluer la MTF de l'assemblage.

#### 5.4.2.1 Test visuel

##### 5.4.2.1.1 Description du test

Après avoir monté les lentilles dans le barillet, j'ai monté l'EVF devant un microécran. Au moment de réaliser ce montage, nous n'avons pas encore de microécran courbe opérationnel, donc j'utilise un microécran plan, comme on le voit sur la partie gauche de la Figure 5.41. L'alignement se fait à l'œil, mais il est délicat puisque l'absence de courbure dégrade la qualité image dans le champ. Une fois aligné, la première manière de caractériser le système est de réaliser un test visuel. C'est une étape importante car c'est elle qui permet de savoir si le système atteint les performances requises.

Définir un protocole de tests dépend des objectifs pour lesquels le système a été conçu. Si les tests visuels peuvent prendre des formes très diverses, il s'agit ici de tester si l'utilisateur perçoit les informations typiques d'un viseur d'appareil photo (valeurs numériques, mesure d'orientation de l'appareil, etc.). Je cherche donc à évaluer la fréquence spatiale à partir de laquelle les informations ne sont plus perçues.

La méthode utilisée consiste à afficher un nombre aléatoire de cycles pour une fréquence spatiale donnée. L'observateur compte le nombre de cycles, s'il annonce la bonne valeur, l'information est bien perçue. Mais ce test n'est pas binaire : lorsqu'on est proche de sa limite de résolution, on peut percevoir les cycles mais avoir du mal à les compter, et se tromper. Il est donc important de faire en sorte que le test ne soit pas trop fastidieux pour l'observateur, car la fatigue peut dégrader les performances.

Les mires sont verticales, horizontales et à 45°. Cela permet d'être plus proche de la diversité des orientations présentes dans une image réelle. Le nombre de barre doit être supérieur à 3 pour avoir au moins deux barres à compter en plus des barres extérieures. Cette procédure est proche des tests ophtalmologiques où l'utilisateur doit énoncer la lettre qu'il arrive à lire.

Mais contrairement à ces tests qui sont des constitués de mires imprimées, il s'agit ici d'un microécran qui affiche les informations. Sa luminance doit être réglée de sorte à être assez forte pour éviter de diminuer artificiellement le contraste, tout en s'assurant qu'il n'y a pas de phénomène parasite comme du cross talk avec une luminance trop élevée.

La Figure 5.40 montre deux exemples de mires affichées sur le microécran pour réaliser ce test visuel. Mes mires ressemblent à des éléments de mire USAF 1951, mais je ne me suis pas raccroché à ce standard pour les raisons données dans l'annexe « Test visuel et mire USAF 1951 ».



Figure 5.40 – Mire avec nombre variable de cycle, de fréquence contrôlée, avec trois orientations.

#### 5.4.2.1.2 Résultats

Il est évidemment impossible de montrer ce qui est perçu au travers du système avec des photos. J'ai réalisé le test moi-même, sachant que j'ai une vue normale (10/10) lorsque je porte mes lunettes. Grâce au dégagement oculaire, je peux regarder dans l'EVF avec mes lunettes. Jusqu'à la fréquence de 2 pixels par bande, je peux compter sans erreur le nombre de barres affichées, même si j'ai plus de mal à compter les bandes orientées à 45°.

Puis, lorsque j'observe la fréquence spatiale minimale (1 pixel par bande), dans les cas horizontaux et verticaux, je distingue les différentes bandes, mais j'ai beaucoup de mal à compter les bandes, je fais souvent une erreur d'une bande. Les bandes orientées à 45° sont plus difficiles encore : je distingue les différentes bandes mais je n'arrive plus à les compter, c'est ma limite de résolution.

Ce résultat correspond à la qualité image qui était l'objectif de conception : la fréquence spatiale limite devait correspondre à la limite de résolution d'un observateur emmétrope. C'est bien ce que j'ai observé au centre du champ. Pour le reste du champ, on ne peut pas encore dire ce qu'il en est puisqu'il manque le microécran courbe.

Ce test visuel permet d'affirmer que le système correspond bien au cahier des charges au centre du champ. Je complète tout de même cette analyse par une mesure de la MTF pour quantifier ce résultat.

#### 5.4.2.2 Mesure de MTF

*Edition post oral de thèse : cette partie est comporte plusieurs erreurs. La partie 5.4.2.3 détaille les erreurs commises.*

Suite au travail de C. Gaschet, un banc de mesure de MTF a été créé. Nous utilisons la méthode dites des bords penchés, ou *slanted edges* (décrite en détails dans [54]). Ce banc optique a été adapté pour l'utiliser avec un système visuel. Il permet de réaliser des mesures sur la voie directe et la voie augmentée.



Contrairement au montage originel, le montage de mesure de la MTF d'un viseur utilise une Caméra De Mesure (CDM) qui est mise à la place de l'œil. Cela modifie à la fois le banc optique et le protocole. La CDM (Sony RX100 III) n'étant pas parfaite, il est nécessaire de prendre en compte sa propre MTF. Pour cela, on réalise deux mesures : la MTF totale, c'est-à-dire celle du viseur et de la CDM, et la MTF de la CDM seule.



Figure 5.41 – Gauche : caméra de mesure avec l'EVF. Droite : caméra de mesure (CDM) seule.

Le montage doit donc gérer la double prise de vue, avec et sans la CDM. La difficulté est liée à deux aspects : d'une part on ne peut pas utiliser la même mire dans les deux cas, puisque le microécran est trop petit pour servir de mire à la CDM, et d'autre part les deux images doivent avoir un éclairage similaire pour éviter de dégrader artificiellement la MTF dans l'un des deux cas, en introduisant du bruit ou des zones mal exposées par exemple.

En pratique, pour gérer ces deux aspects, on commence par prendre les photographies avec l'EVF et le microécran. On en prend trois, avec trois méthodes de mise au point différentes (auto focus, auto focus continu et manuel). Ces trois images sont faites avec les mêmes réglages d'exposition (diaphragme, temps d'exposition et ISO). Puis, toujours avec les mêmes réglages, on place la mire imprimée devant la CDM. Comme l'important est que le capteur de la CDM soit exposé de façon similaire, on ajuste la puissance de l'éclairage de la mire pour gérer l'exposition. Dans ce cas, les conditions de prise de vues sont presque identiques, au détail près que l'une des mires est pixellisée, et l'autre est imprimée avec une définition bien meilleure. De même, on prend encore trois images avec les trois mises au point.

Au vu des changements de protocole, le traitement d'image a été modifié. Un premier point consiste à s'assurer que l'on mesure le même point du champ sur les deux images. Ensuite, une gestion différente des multiples images a été mise en place. Enfin, une fonction pour déduire la MTF du viseur à partir de la MTF totale et de la MTF de la CDM seule est ajoutée.

Pour gérer les multiples images, le protocole se déroule en trois étapes. D'abord, on détermine la zone qui correspond au champ central. Puis, pour cette zone, on calcule la MTF de la CDM seule pour les trois méthodes de mise au point et on choisit la meilleure. Enfin, en divisant la MTF mesurée avec l'EVF par celle qui a été mesurée pour la CDM seule, on obtient la MTF de l'EVF.

Une fois les photographies des mires prises avec et sans le viseur, le calcul de la MTF suit 5 étapes

- Sélection de la ROI (Region Of Interest),
- Détection automatique du bord par le logiciel,
- Calcul de la MTF par la méthode du bord penché (détails dans [54]),
- Sélection de la meilleure MTF selon les méthodes de mise au point,
- Division de la MTF avec la CDM par celle sans la caméra de mesure, pour chaque champ.

Cette méthode appelle plusieurs commentaires importants. Pour compenser la MTF de la CDM, le système doit être linéaire et la MTF doit être constante sur la ROI. L'aspect linéaire est validé par les conditions expérimentales qui font travailler le capteur de la CDM avec une exposition identique. La constance de la MTF est une hypothèse raisonnable tant que la ROI demeure petite. Pour le vérifier, j'ai réalisé des mesures avec des ROI de 40 à 90 pixels de côté, et les résultats sont très proches. Par ailleurs, l'échantillonnage par

la CDM peut induire des repliements des spectres, selon le théorème de Nyquist-Shannon. C’est pour cette raison que la méthode des bords penchés a été choisie, car elle permet de réaliser un sur-échantillonnage des bords par le capteur de mesure [54,131]. A noter que c’est la caméra de mesure qui est penchée, et non la mire sur le microécran, donc la pixellisation du microécran n’est pas un souci car la mire numérique est parfaitement verticale. Dans ces conditions, on peut dire que la MTF totale est le produit des MTF du viseur et de la caméra de mesure. En conséquence, diviser la MTF totale par celle de la caméra de mesure permet d’obtenir la MTF du viseur.

Comme les microécrans courbes ne sont pas encore opérationnels, j’utilise un microécran plan pour mesurer la MTF. La mesure est donc faite uniquement pour le champ central. La Figure 5.42 montre le type de cliché pris et utilisé pour la mesure de la MTF.

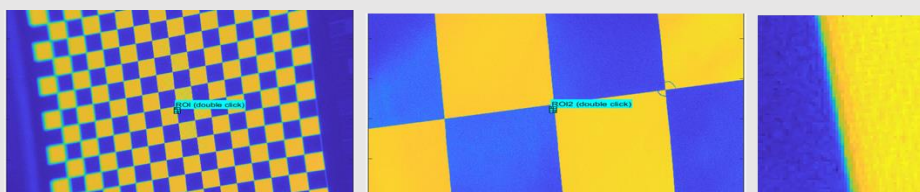


Figure 5.42 – Gauche : choix de la ROI pour la mesure de la MTF dans le cas CDM et EVF. Centre : Le même point de mesure de la MTF, cas de la CDM seule. Droite : exemple de ROI.

Une fois les zones de mesures sélectionnées, les quatre étapes de calculs présentées ci-avant donnent la MTF de l’EVF. La Figure 5.43 présente les résultats obtenus, en les comparant à la MTF théorique, pour une ouverture de 4 mm. A noter que la MTF théorique représentée est la MTF géométrique (fonction *Geometric MTF*), car les composantes de diffraction bien présentes dans chacune des mesures (totale et CMD seule) s’éliminent lors de la division de l’une par l’autre. Les incertitudes expérimentales sont difficiles à évaluer du fait du calcul numérique réalisant le traitement d’image. J’ai donc réalisé plusieurs mesures, en alignant les éléments optiques plusieurs fois.

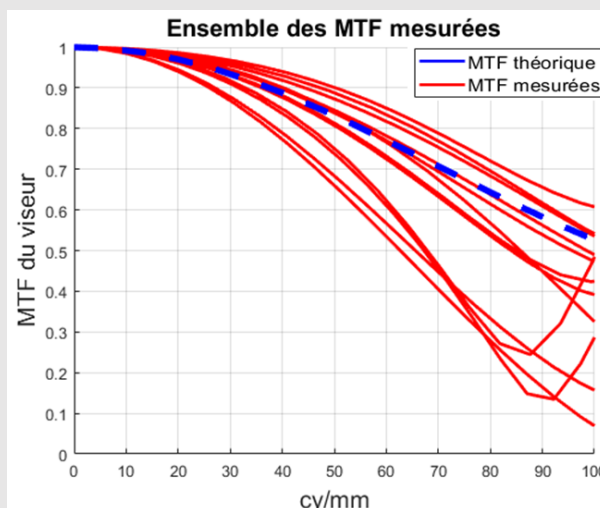


Figure 5.43 – MTF théorique et ensemble des mesures des MTF de l’EVF pour le centre du champ.

On peut classer les résultats obtenus en trois groupes : les 3 cas pour lesquels la MTF est meilleure que la courbe théorique, les 4 dont la MTF est très mauvaise et les 5 dont la MTF est valide.

Les MTF meilleures que la MTF théorique apparaissent lorsque la photographie de la mire imprimée (qui sert à évaluer la MTF de la CDM seule) est moins bonne que la MTF totale. Par exemple, elle n’a pas été bien focalisée ou il y a eu un problème d’éclairage.

Les MTF très mauvaises apparaissent lorsque la photographie au travers de l'EVF est un peu floue. Cela arrive fréquemment car le banc optique utilisé est assez délicat à aligner. L'alignement de l'EVF avec le microécran se fait à l'œil. Mais il faut ensuite placer la caméra de mesure à la même position que l'œil, et cela est imprécis. Dans ce cas, on obtient des MTF trop faibles, voire avec des rebonds. Grâce aux tests visuels qui ont été menés auparavant, on sait que la fréquence spatiale limite (100 cy/mm) est résolue par l'œil emmétrope. Donc les courbes expérimentales qui indiquent des contrastes très faibles à cette fréquence spatiale peuvent être supprimées des résultats puisqu'on sait qu'elles sont résolues en pratique.

Les courbes de MTF restantes sont celles qui représentent des mesures correctes. La Figure 5.44 regroupe toutes les courbes expérimentales qui sont valides par rapport à l'analyse précédente.

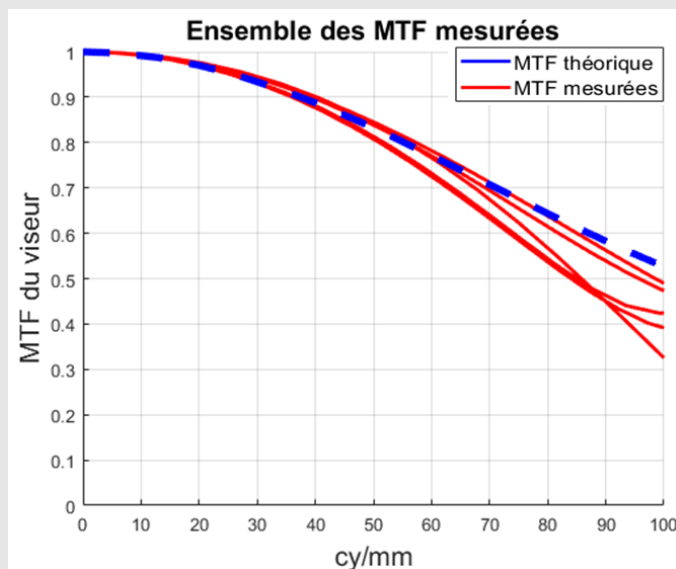


Figure 5.44 – Courbes expérimentales de MTF de l'EVF en supprimant les cas trop bons ou trop mauvais, par rapport à la référence théorique.

### 5.4.2.3 Relecture critique de la mesure de FTM, suite à la soutenance de thèse

Lors de l'oral de thèse, la discussion a permis de montrer qu'il y avait des erreurs dans le raisonnement de la partie 5.4.2.2. En conséquence, la totalité de la partie 5.4.2.2 s'est avérée erronée.

J'ai fait le choix de garder ces erreurs dans le manuscrit final pour en garder trace, mais aussi de rajouter cette discussion pour éclaircir la lecture du manuscrit final

#### 5.4.2.3.1 Erreur fondamentale

La première erreur se situe à la racine du raisonnement et invalide les raisonnements suivants. Le raisonnement initial consiste à dire que le produit des MTF des deux optiques (CDM et EVF) donne la MTF du système optique complet. Donc pour en déduire la MTF de l'EVF, il suffit de diviser la MTF totale par celle de la CDM.

Or, on ne peut multiplier des MTF que lorsqu'elles sont de natures différentes : par exemple la MTF d'une optique avec celle d'un capteur. Multiplier la MTF de deux optiques n'est pas valide car cela viole la notion de compensation.

On peut le démontrer par l'absurde : si on multipliait deux MTF de systèmes optiques parce qu'ils sont l'un à la suite de l'autre, comme les MTF sont toujours inférieures à 1, accumuler des lentilles dans un système optique ne ferait que dégrader la MTF finale. Or, le principe même de la conception optique est d'ajouter des lentilles pour compenser les aberrations et donc améliorer la MTF totale.

#### 5.4.2.3.2 MTF théorique de référence – erreur liée à la diffraction

Selon mon raisonnement initial, la MTF de l'EVF était obtenue en faisant la division de la MTF totale par la MTF de la CDM. Or, la pupille de l'EVF est beaucoup plus grande que celle de la CDM (12 mm vs 4 mm). La supposition expérimentale consistait à négliger la diffraction apportée par l'EVF devant celle de la CDM. Cette supposition correspondait au raisonnement initial puisque la diffraction du système total est proche de celle de la CDM, donc aux basses fréquences spatiales la division fait disparaître l'influence de la diffraction pour la MTF de l'EVF.

Il se trouve que ZOS inclus de nombreux outils pour mesurer une MTF, dont le principal est l'outil « FFT MTF » et un autre, l'outil « Geometric MTF ». Dans le premier cas, il s'agit de calculer la MTF selon la méthode théorique : le module de la transformée de Fourier de la Point-Spread Function. De manière générale, la MTF est une mesure 2D, obtenue à partir de la PSF 2D. Dans le cas de l'outil « FFT MTF », ZOS sélectionne deux directions orthogonales de la PSF (sagittale et tangentielle, dont la définition dans ZOS est assez délicate [132]). Dans le second cas, il s'agit d'une approximation de la MTF basée sur un tracé de rayon qui sert lorsque le système est très éloigné de la limite de diffraction. Et cet outil n'inclut pas la diffraction, par construction. Au vu du raisonnement initial selon lequel la division de la MTF totale par celle de la CMD devait éliminer la diffraction, cela semblait être l'outil adapté. Et en pratique, les courbes correspondaient.

Puisque le raisonnement initial (produit de MTF d'optiques) est erroné, le raisonnement concernant la prise en compte de la diffraction est aussi faux. Si la pente quasi nulle aux basses fréquences spatiales paraissait cohérente avec le raisonnement initial, une prise de recul théorique nous aurait alerté : l'EVF a une qualité image proche de la limite de diffraction, donc la perte de contraste du système est due pour une part importante à la diffraction. Négliger l'influence de la diffraction est donc un problème.

#### 5.4.2.3.3 MTF théorique de référence et méthode 'stated edge'

Ce troisième point est plutôt une remarque générale qui a été repérée lors de la relecture de cette partie, et indépendante des paragraphes précédents. Les courbes de MTF obtenues par des méthodes que l'on peut qualifier de directes sont influencées par le type de mire choisie : une mire sinusoïdale ou une mire périodique carrée ne donnent pas les mêmes résultats. En effet, la mire sinusoïdale permet de réaliser directement la mesure de contraste pour une fréquence spatiale donnée, tandis que la mire périodique carrée introduit des harmoniques dans le résultat.

Le protocole mis en œuvre dans ce travail utilise une mire à bord penché, qui est une méthode connue et usuelle [133]. Les résultats obtenus à partir de cette méthode sont comparables aux résultats obtenus avec une mire sinusoïdale [134,135], mais pas avec une mire périodique carrée. L'éventuelle comparaison avec des résultats de simulation Zemax doit donc être faite avec le réglage adéquat de l'outil « FFT MTF ».

#### 5.4.2.3.4 Erreur expérimentale – gestion du fond continu

Enfin, une dernière erreur, indépendante de toutes les autres, est liée à l'absence de gestion de la lumière parasite lors des mesures. Puisque la lumière parasite éclaire de façon globale la mire, elle influence les

résultats expérimentaux aux basses fréquences spatiales. Cet éclairage implique que l'image analysée comporte des composantes d'éclairage uniforme ou en gradient qui doivent *a priori* être prises en compte [136].

Dans le détail du calcul de la MTF avec les bords penchés, avant de réaliser la Transformée de Fourier pour obtenir la MTF, on dérive la fonction de projection du bord, ce qui donne la Line Spread Function (LSF). Par conséquent, si une composante continue due à de l'éclairage parasite est présente, elle est supprimée à cette étape.

En revanche, si une composante en gradient est présente dans l'image à cause de l'éclairage, elle devient une constante suite à la dérivation, et donc un pic de Dirac à la fréquence nulle apparaît suite à la Transformée de Fourier. Ce pic aurait pour effet principal de modifier la normalisation de la MTF, donnant l'impression d'une MTF fortement dégradée aux fréquences spatiales supérieures à quelques  $\text{cy/mm}$ . Cependant, la sélection d'une ROI de faibles dimensions permet de limiter la présence de composantes d'éclairage non continues [137]. Par ailleurs, l'entreprise Imatest utilise un filtre correcteur de l'image du bord penché pour compenser une éventuelle non-uniformité [136]. Leur filtre consiste à évaluer la forme de la non-uniformité avec une courbe de fit (au premier ordre) et à la supprimer numériquement de l'image. Ils démontrent une nette stabilisation de la mesure de la MTF pour tous les niveaux de non-uniformité introduits dans l'image du bord penché.

Cette difficulté expérimentale peut expliquer pourquoi certaines courbes expérimentales sont parfois si mauvaises, bien qu'à l'évidence elles ne sont sans doute pas induites par un quasi pic de Dirac.

#### 5.4.2.3.5 Méthode qui aurait fonctionné

Pour réaliser la mesure de la MTF de l'EVF, une autre méthode, suggérée par Yvan Sortais suite à la soutenance de thèse pourrait être utilisée. L'idée consiste à ajouter dans le fichier ZOS de l'EVF la combinaison optique de la CDM complète. Ainsi, on pourrait obtenir la MTF théorique du système complet. Expérimentalement, cette méthode permet aussi d'éviter de réaliser deux clichés et de les mettre en correspondance : un seul cliché avec l'EVF et la CDM placés devant le microécran suffit. Cela permet de simplifier à la fois les manipulations et le traitement des données.

Dans le cas où la combinaison optique de la CDM n'est pas disponible et donc sa MTF n'est pas connue avec précision sur le spectre désiré, on peut simplifier la méthode en supposant une CDM de qualité bien supérieure à celle de l'EVF et donc la modéliser comme une lentille parfaite. La suite de la méthode est identique. Bien sûr cette hypothèse induit plus d'incertitude sur la MTF réelle de l'EVF, mais a l'avantage d'être correcte.

Cette méthode aurait évité les deux premières erreurs, mais par contre ne change rien aux deux dernières.

Pour le problème d'absence de mesure de MTF par la méthode des bords penchés dans ZOS, celle-ci n'est pas vraiment un problème car la mesure par bord penché, faites dans de bonnes conditions, est une mesure rigoureuse de MTF. Si on veut néanmoins rester proche de l'expérience dans la comparaison avec ZOS, on peut utiliser la méthode FFT Line/Edge Spread qui permet de simuler une Edge Spread Function (ESP), dont on peut décider de l'orientation selon les axes X et Y. Ce résultat peut alors être traité avec des outils comme l'ESP expérimentale et avoir une comparaison de MTF avec un maximum de traitements communs. Pour avoir une validation expérimentale non visuelle de l'EVF, on pourrait d'ailleurs se contenter d'une comparaison sur les ESP plutôt que sur les MTF.

Concernant les conditions d'éclairage (lumière parasite et non uniformités), la méthode y est partiellement insensible, car ce sont des gradients locaux qui sont pris en compte. Pour une détection et une correction des mesures, on peut se référer à la méthode développée par Imatest [4].

#### 5.4.2.4 Conclusions et perspectives

Deux méthodes ont été utilisées pour caractériser l'EVF, d'une part, un test visuel et d'autre part une mesure quantitative de la MTF pour la comparer à la théorie.

Le test visuel a été réalisé avec deux personnes ce qui est suffisant pour affirmer que le système transmet l'information prévue au centre du champ. Il a l'avantage d'être simple et rapide à effectuer. Ce test suffit pour montrer que le système assemblé est fonctionnel dans le cadre des travaux de cette thèse.

L'évaluation de la MTF a été réalisée pour une caractérisation plus complète et précise. Mais la méthode initiale était fondée sur une erreur. Une méthode correcte est proposée, mais n'a pas pu être réalisée car discutée après la soutenance.

En conclusion, si l'on sait désormais comment procéder pour évaluer la MTF d'un système visuel, cette partie souhaite souligner la complexité sous-jacente à la mesure de la MTF d'un système optique, a fortiori visuel. De nombreux écueils peuvent rendre les mesures fausses ou difficiles à interpréter.

Par ailleurs, une autre limite de ce travail est liée à l'absence d'évaluation de la qualité image dans le champ. Ceci est dû à l'absence de microécran courbe fonctionnel pour lequel le système EVF a été conçu, à la date de soumission du manuscrit de thèse pour évaluation.

### 5.5 CONCLUSION

Ce chapitre conclut la présentation des travaux menés pendant cette thèse en présentant les démonstrateurs tels qu'ils ont été imaginés, construits et évalués. Deux démonstrateurs ont été présentés, l'un utilisant de la Réalité Augmentée (RA) pour ajouter de l'information dans le viseur, l'autre est un viseur électronique compact. Au-delà des apports théoriques du chapitre 3 qui a présenté les avantages de la courbure, ce chapitre montre des cas concrets, dont les performances sont plus réalistes car elles prennent en compte l'ensemble des contraintes des systèmes.

In fine, nos résultats montrent que la courbure permet d'améliorer les systèmes optiques selon plusieurs critères, comme la qualité image, la compacité ou le flux lumineux. Par ailleurs, les formes de courbure de microécrans sont à la fois mécaniquement réalistes et correspondent bien aux analyses précédentes.

Le tolérancement a été présenté, en détaillant la prise en compte de la courbure du microécran dans le tolérancement. Puis les optomécaniques conçues pour accueillir les systèmes optiques ont été présentées pour rendre compte de la conception de ces systèmes optiques jusqu'à leur intégration complète.

Si nous avons dû finalement abandonner la réalisation du système MVF (Mixed ViewFinder), le démonstrateur EVF (Electronic ViewFinder) est encore en cours de montage au moment de rédiger cette conclusion. Nous espérons pouvoir mener ces manipulations à leur terme pour réaliser la caractérisation la plus importante pour un système visuel : placer son œil dans le système pour évaluer la qualité de l'image.



---

# 6 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

## 6.1 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES TECHNIQUES

### 6.1.1 Conclusion générale

L'objectif de ce travail de thèse était de quantifier les apports de la courbure de microécrans aux systèmes visuels, puis de réaliser un démonstrateur les exploitants. Pour cela, un premier chapitre a détaillé les éléments essentiels à la compréhension du sujet, autour du triptyque perception visuelle, système optique et microécran. Puis, un second chapitre a présenté en détails les aspects essentiels à la conception optique, en particulier dans le cas de systèmes *freeform*.

Le chapitre 3 détaillé les apports théoriques de la courbure de microécran aux systèmes visuels. De nombreux points ont déjà été étudiés dans la littérature, et en particulier par Christophe Gaschet qui m'a précédé en travaillant sur la courbure de capteurs d'images. Suite à un rapide retour sur ce travail, j'ai présenté les apports de la courbure en deux temps : d'abord en me concentrant sur les apports aux systèmes visuels, puis sur les systèmes optiques hors-axes.

L'un des premiers apports est lié à l'ajustement fin du champ de vue par la courbure de la surface image, qui est de l'ordre de quelques pourcents. Un autre apport, plus significatif, est lié au gain en flux lumineux que peut assurer la courbure du microécran. Si les cônes d'émission des microécrans actuels sont larges, des recherches sont en cours pour les rendre plus étroits. A mesure que des progrès seront réalisés dans ce domaine, l'importance de la courbure sera augmentée, jusqu'à atteindre potentiellement des gains de l'ordre de 20 % dans les cas favorables. Enfin, sur les surfaces courbes, la notion de distorsion a été redéfinie car le logiciel Zemax OpticStudio ne réalise ce calcul correctement que pour les surfaces planes. Cela a aussi été l'occasion d'introduire la distorsion dans le calcul de la courbure optimale, ce qui permet de comprendre pourquoi, selon les critères d'optimisation, la courbure ne tend pas toujours vers les valeurs théoriques.

Dans la deuxième partie du troisième chapitre, j'ai présenté les apports de la courbure aux systèmes hors-axes. En particulier, l'utilisation de la courbure de microécran pour corriger la courbure de champ hors-axe est détaillée. Enfin, le travail de sélection du point de départ réalisé par Bauer *et al.* est revisité grâce à l'ajout de la courbure dans les systèmes étudiés. La courbure a changé certains points du classement proposé par Bauer *et al.* et a permis, dans la plupart des cas, de simplifier les systèmes optiques finaux.

Le quatrième chapitre est centré sur les techniques de mise en courbure des composants microélectroniques. Les simulations mécaniques présentées permettent d'estimer les courbures limites qu'il est possible de réaliser. Comme nous avons étudié des formes biconiques, qui n'avaient jamais été testées, un protocole de validation des simulations a été établi. Ce travail a permis de valider une part importante des résultats de simulation, et d'obtenir des informations supplémentaires comme les rendements. Suite à ces tests, le procédé concret de mise en courbure est abordé. Enfin, pour anticiper l'évolution des technologies de microécran, des simulations et réflexions ont été données à propos de la mise en courbure de microécran LED utilisant du GaN.

Enfin, le dernier chapitre présente des résultats concrets de simulation de divers systèmes optiques, en détaillant les apports de la courbure. Ceux-ci sont assez différents des prévisions théoriques car il ne s'agit plus de comparer la modification apportée à la courbure du microécran, mais de comparer des systèmes



optiques où la courbure est autorisée ou non, aboutissant à des compromis différents. Pour le système Mixed ViewFinder, qui utilise de l'optique *freeform*, deux systèmes de comparaison sans microécran courbe ont été conçus : l'un cherche à optimiser la qualité image pour un volume équivalent, l'autre cherche le volume minimal pour une qualité image similaire. Dans les deux cas, la courbure améliore soit la qualité image, soit le volume du système final, en plus de gagner en flux lumineux. La cumulation des deux avantages est un point clef de l'intérêt de la courbure car l'un des problèmes spécifiques aux systèmes visuels est lié aux nombreux compromis qui les empêchent des améliorations simultanées.

Puis un système Electronic ViewFinder a été présenté. Il s'agit d'un système visuel à symétrie de révolution. On montre avec cet exemple un autre apport important de la courbure : elle permet de se passer à la fois d'ajouter une lentille de champ et d'utiliser des coefficients asphériques pour une même qualité image et un même volume. Ce système beaucoup plus simple à réaliser est obtenu grâce à la courbure.

Enfin, suite à l'étude détaillée de la réalisation des systèmes MVF et EVF (tolérancement et optomécanique), seul l'EVF a pu être réalisé à ce jour. Ce système a été caractérisé avec un banc de mesure de MTF adapté aux systèmes visuels ainsi que par un test visuel avec un opérateur humain. Cependant, au moment de rédiger cette thèse, les microécrans courbes ne sont pas encore complètement sortis de production et la caractérisation de la MTF n'a pu être réalisée qu'au centre du champ.

### 6.1.2 Perspectives techniques

Ce travail ouvre plusieurs perspectives. Si les apports théoriques de la courbure aux systèmes visuels et aux systèmes optiques en général peuvent encore être approfondis, il semble qu'il y ait désormais assez de matière pour s'orienter surtout vers la recherche de solutions optiques à améliorer grâce à la courbure. Parmi les caractéristiques qui apparaissent essentielles pour que la courbure joue pleinement son rôle, il faut que le champ de vue soit grand. Ensuite, la forme finale de courbure ainsi que les compromis qu'elle entraîne dépendent de l'ensemble du cahier des charges. A titre personnel, j'ai le sentiment qu'il est possible de trouver des systèmes optiques qui tireraient de la courbure un profit encore plus important que les systèmes présentés dans cette thèse.

Une perspective ouverte par la courbure, mais qui ne s'y limite pas, est liée aux critères de sélection du point de départ pour un système *freeform*. Le travail mené ici apporte plus de questions qu'il n'en résout, notamment parce qu'il questionne les filtres utilisés pour classer les systèmes initiaux. Un travail approfondi sur ce sujet apporterait un recul très important à la conception de systèmes optiques *freeform* en affinant ce travail crucial qu'est le choix d'un point de départ.

Du point de vue de la mise en courbure, les microécrans comme les capteurs nécessitent principalement de passer à l'étape suivante, c'est-à-dire développer des solutions de productions standardisées de sorte à les rendre industrialisables. De nombreux outils ont été développés et sont désormais à disposition même s'ils n'ont pas été décrits ici car ils font partis de projets parallèles à cette thèse.

Une fois que tout cela a été dit, il est probable que ce soit la courbure de capteur qui sera poursuivie en priorité sur les microécrans, selon la stratégie du laboratoire. Si on peut affirmer que la courbure de microécran est un outil important pour les systèmes visuels, il ne permet pas de changer radicalement la donne par rapport aux casques de Réalité Augmentée (RA) que cherchent à développer de nombreux acteurs. Dans ce travail, je me suis focalisé sur des systèmes de viseurs de sorte à produire un démonstrateur focalisé sur les apports optiques de la courbure. Mais elle ne suffit pas à elle seule, pour atteindre le Graal des systèmes de RA, véhiculé par l'image d'Epinal d'*Iron Man* par exemple.

## 6.2 PERSPECTIVES SUR LA REALITE AUGMENTEE

Au-delà de l'aspect technique stimulant que constitue le développement de la RA, j'ai pu échanger au fil de la thèse avec de nombreux autres chercheurs sur la RA elle-même : quel est le sens de ces recherches ?

Cette question, lorsqu'on la creuse, montre vite des ramifications très diverses et n'est pas évidente à traiter. Sans trop m'étendre ici, je vais essayer de présenter quelques questions qui ont été soulevées et ont mené à une certaine remise en cause de ces développements.

### 6.2.1 L'utilité de la Réalité Augmentée

Au fil de mes trois ans de thèse, j'ai pu lire de nombreux articles qui vantaient cette nouvelle interface homme-machine comme étant la clef qui permettra des usages innovants. Souvent, quelques exemples justifient l'intérêt de cette technologie, comme permettre à des pompiers de voir l'infrarouge thermique lors de leurs interventions, ou révolutionner l'enseignement en manipulant des objets 3D.

Pourtant, bien que peu explicitée publiquement, il semble que la principale raison pour laquelle la RA cristallise autant de recherches est liée aux smartphones. En 2021, le monde en est saturé et le rythme de croissance de ce marché diminue. Ainsi, des leaders comme Apple cherchent à développer la RA pour dépasser la notion de smartphone et créer un nouveau marché mondial à conquérir.

#### 6.2.1.1 L'aspect écologique

Depuis mon arrivée au CEA fin 2018, la stratégie de développement a été modifiée pour inclure dès la conception les Objectifs de Développement Durables (ODD) dans les projets menés. L'objectif général est de contribuer à la réussite des accords de Paris, c'est-à-dire, passer pour un français de 12 tonnes équivalent carbone à 2, ce qui est un défi extraordinaire. Des outils innovants pourraient aider à réduire drastiquement nos émissions, sans sacrifier notre style de vie.

Une fois ces objectifs posés, le développement de la RA apparaît soudain assez superflu : en quoi cet outil qui a surtout pour vocation d'être produit et acheté massivement à l'échelle de la planète, avec des ressources parfois rares, polluantes à extraire et qui consomme de l'énergie va-t-il dans le bon sens ?

S'il n'est jamais possible de prédire les retombées de la recherche avec exactitude, le fait que cet outil soit développé avec des objectifs *a priori* opposés aux objectifs initiaux jette un sévère doute quant à l'utilité de la RA dans ce domaine.

#### 6.2.1.2 L'aspect humain

Sans remettre en cause le fait qu'il y ait des applications pertinentes à la RA, je voudrais d'abord revenir sur l'exemple souvent utilisé de la pédagogie.

##### 6.2.1.2.1 Les promesses pédagogiques

Depuis l'avènement de l'informatique, de nouvelles pédagogies ont vu le jour, utilisant le numérique pour diversifier l'enseignement. En France, on n'a jamais eu autant d'ordinateur par élève qu'aujourd'hui, en même temps que notre niveau scolaire s'est effondré, au point d'être classé dernier de l'Union Européenne pour l'enseignement en mathématique en 2020 (classement PIMMS), et qu'à 18 ans, un français sur cinq ne sait pas ou peu lire (données de la Journée De Citoyenneté). Bien sûr, le lien de cause à effet n'est pas si simple et d'autres facteurs sont aussi à considérer, mais il me semble qu'il y a une erreur trop répandue à

laquelle contribuent ces pédagogies numériques : au prétexte que tout peut se trouver sur internet, il suffit de savoir chercher. Et la RA entretient l'illusion que si cela ne fonctionne pas, c'est que l'interface homme-machine idéale n'existe pas encore.

A travers cette idée, les pédagogues modernes ont commis l'erreur de croire que l'on pouvait supprimer l'effort et que le cerveau était comparable à un ordinateur, comme s'il était préférable de « sauvegarder de l'espace mémoire » pour que les élèves aillent plus loin sur d'autres sujets, plus « rentables ». Mais en supprimant les fondements, peut-on encore construire ? Cela revient à croire que pouvoir retrouver l'information est totalement équivalent à comprendre les choses. Dit autrement, l'erreur consiste à croire que la culture fait partie du domaine de l'avoir alors que c'est fondamentalement de l'ordre de l'être. C'est notamment la thèse de F.X. Bellamy dans *Les déshérités*<sup>13</sup>.

Je termine ce paragraphe en soulignant qu'en même temps que les ingénieurs de la *Silicon Valley* développent ces outils numériques, ils les suppriment de leur école. Comme l'explique C. Anderson, l'écart digital entre les enfants riches et pauvres est l'inverse de ce que l'on peut intuitivement penser : les enfants les plus privilégiés sont ceux à qui on ne donne pas d'écran trop tôt<sup>14</sup>. Apprendre à utiliser un ordinateur est évidemment important, mais l'informatique, qui n'est qu'un moyen, tend à devenir plus prioritaire que l'objectif même de l'enseignement : transmettre pour élever.

#### 6.2.1.2.2 L'augmentation de l'humain

L'autre point qui me semble crucial sur ce sujet est lié à ce que l'on peut appeler « les augmentations ». La RA sert à afficher des informations invisibles, comme l'infrarouge thermique ou des messages flottants. On a l'impression d'augmenter l'humain en lui offrant de nouvelles fonctionnalités, et on suppose donc que cela ne peut donc que s'additionner à ce qu'est l'humain.

Pourtant, il me semble que c'est l'inverse. Le GPS, qui est une forme de RA, permet d'arriver à destination sans se poser de question et sans plus rencontrer de difficultés, bref en supprimant l'effort. Arriver à destination mais sans apprendre le trajet et se fabriquer une carte mentale peut-il être considéré comme une augmentation ? D'une certaine façon, et sans en nier toute la praticité, cette « augmentation » a surtout rendu de nombreuses personnes dépendantes à cette technologie. Dans ces conditions, ne serait-il pas plus juste d'appeler cela des diminutions ?

### 6.2.2 Conclusion personnelle

Je reprendrais à mon compte une phrase de la chercheuse S. Quinton<sup>15</sup> : « ne sommes-nous pas, en tant que chercheurs, en train de procrastiner sur les enjeux climatiques, par déni de l'échec potentiel ? ». Elle parlait en particulier des recherches qui tentent de modéliser le climat plus finement car certains mécanismes ne sont pas encore bien compris. Sauf qu'en attendant ce qui pourrait être du pinaillage, le problème principal est là et se développe. Faut-il attendre d'en avoir compris tous les ressorts avant d'agir, en sachant qu'il est illusoire de penser un jour en venir à bout ?

Il me semble que ce raisonnement peut aussi s'appliquer aux développements technologiques : on développe des choses à tout va, en misant sur les statistiques pour que certaines innovations fassent florès et nous sauvent des périls planétaires qui pointent. Pourtant, la plupart de ces développements sont menés

---

<sup>13</sup> F.X. Bellamy, *Les déshérités, ou l'urgence de transmettre*, Ed. Plon, 2014

<sup>14</sup> <https://www.nytimes.com/2018/10/26/style/digital-divide-screens-schools.html>

<sup>15</sup> Lors d'une conférence en sept. 2021 « sciences, environnement et société : quel rôle pour la recherche face à l'urgence écologique ? »

pour développer des marchés de masse qui contribuent surtout à entretenir les cercles vicieux de la surconsommation et l'illusion de l'augmentation.

En ajoutant à cela la révolution cognitive construite par ces outils technologiques et dont personne ne connaît les conséquences concrètes à long terme, autre que la *Fear Of Missing Out*, il me semble que ces sujets de recherche devraient être questionnés. On ne peut pas échapper à ces questions en disant que celui qui ne veut pas de ces outils peut toujours les refuser, et que leur existence ne lui retire rien : par leurs conséquences, ces développements, concernent la totalité de la société, écologiquement et humainement. Au regard de ces enjeux, je pense qu'il n'est ni urgent, ni important de mettre une priorité sur la continuité de leur développement.

Evidemment, ces réflexions n'empêcheront personne de travailler à cela, et nous devons gérer ces défis, que l'on souhaite ou non leur développement. Mais j'aimerais que ces mots contribuent, chez des scientifiques et technologues, à prendre en compte l'entière réalité de leur travail : écologiquement, humainement et évidemment technologiquement.

# 1 ANNEXE – COMPARAISON DES VISEURS D'APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES

Analyser les différents types de viseurs utilisés aujourd'hui dans les appareils photographiques permet de mieux comprendre le choix que nous avons fait pour le MVF.

Les trois grands types de viseurs d'appareil photographique actuels sont : direct, reflex et électronique. Le reflex a longtemps été synonyme de haut de gamme, parce qu'il avait les meilleures caractéristiques et est relativement cher à produire. Mais ce titre est en partie détrôné depuis quelques années par les viseurs électroniques, introduits par Sony. Ce sont les progrès sur la qualité des microécran qui ont permis de les utiliser dans ce cadre. Toutefois, Leica conserve le viseur direct, notamment pour le modèle M.

Pour comparer ces viseurs, le tableau suivant résume les points de comparaison. Les réponses sont un peu trop binaires pour être exactes, mais cela donne une vue globale. Nous colorons en vert ce qui ressort comme un point fort, et en rouge, les points faibles. Certains points sont gardés en noir, car, selon les usages, cela peut être vu comme un point faible ou un point fort.

	Direct	Reflex	Electronique
Encombrement du système de visée	Faible	Fort	Faible
Faible utilisation de la batterie pour la visée	Oui	Oui	Non
Grande dynamique (utilisable par faible et forte luminosité)	Oui	Oui	Non
Champ plus large que le champ de l'objectif	Oui	Non	Non
Image proche du réel (modification possible de l'image)	Oui	Modification par l'objectif	Modification par le capteur
Ajout d'informations complexes	Non	Limité	Oui
Problème de parallaxe	Oui	Non	Non
Compatible avec les focales extrêmes (macro ou télé)	Non	Oui	Oui
Temps de latence entre les photographies	Non	Oui	Non
Utilisable en video	Oui	Difficilement	Oui
Vision de l'image enregistrée par le capteur en direct	Non	Non	Oui
Type de photographie particulièrement adapté	Photo de rue	-	-
Type de photographie particulièrement inadapté	Macro, téléobjectif	Sport	Studio, photo de nuit, astro

## 2 ANNEXE - COMPROMIS DANS LES SYSTEMES VISUELS

Cette annexe présente une liste des compromis à gérer pour concevoir un système visuel. Selon l'application, ces équilibres changent. De plus, elles sont séparées en deux grandes catégories, les compromis intrinsèques aux technologies de microécran et ceux liés aux systèmes optiques.

### 2.1 COMPROMIS INTRINSEQUES AUX MICROECRANS

Flux lumineux VS autonomie : Pour augmenter la luminance émise par le microécran, il faut augmenter la puissance électrique consommée, ce qui réduit l'autonomie de la batterie.

Directivité du cône d'émission vs extraction lumineuse : L'un des défis technologique lié au développement des microécrans est de rendre l'émission plus directive. Une des méthodes consiste à jouer sur les cavités d'extractions des pixels, mais on y perd en EQE. Il faut donc maximiser l'EQE dans un cône d'émission donné.

Taille des pixels vs extraction lumineuse : La réduction de la taille des pixels dégrade aussi l'EQE.

Couleur d'émission vs résolution : Pour obtenir une image couleur, il faut au moins 3 sous-pixels monochromatiques. En pratique, la plupart des technologies en utilisent 4. Ceci est lié au découpage ligne / colonne des matrices de pixels. D'autre part, cela permet de compenser une différence d'EQE entre les couleurs pour améliorer le diagramme chromatique du microécran. Mais cela implique que pour avoir un pixel de 1  $\mu\text{m}$  de côté, les sous-pixels doivent mesurer 0.5  $\mu\text{m}$  de côté, ce qui renforce encore les difficultés de conception. Tolérer un système monochromatique améliore à peu de frais la résolution du système.

### 2.2 COMPROMIS LIES AUX SYSTEMES OPTIQUES

Champ VS résolution : La résolution, c'est le nombre de pixel par degré, le champ c'est le nombre de degré. A nombre de pixel donné, plus le champ est grand, plus la résolution diminue.

Ouverture VS pertes en flux lumineux : L'ouverture est liée au diamètre de la pupille de sortie (*Eye Box*). Lorsque l'œil y est positionné, il voit l'ensemble du champ. Plus la *Eye Box* est grande, plus il est simple pour l'utilisateur de positionner son œil. Mais comme la pupille de l'œil est limitée en diamètre (3 à 4 mm en pratique), l'utilisateur ne perçoit pas toute la lumière qui passe par la EB. Une EB trop grande éclaire le visage de l'utilisateur plutôt que d'envoyer la lumière sur sa rétine.

Eye relief VS diamètre des optiques : Un grand *Eye Relief* (ER) permet à l'utilisateur de ne pas devoir coller son œil à l'optique pour voir l'image. Mais plus il est grand, plus le diamètre des optiques côté œil doit être grand, puisque les rayons extrêmes arrivent avec un angle convergent vers la pupille.

Ouverture vs champ : L'invariant de Lagrange est un invariant caractéristique d'un système optique :

$$L = n\gamma\theta_{ouverture}$$

Ainsi, l'invariant est par définition constant, donc une fois qu'un champ et une ouverture sont fixés, on ne peut plus augmenter l'un sans diminuer l'autre. Augmenter les deux en même temps (grand champ et grande ouverture) implique que l'invariant augmente, ce qui complexifie les difficultés de conception du système.

## 3 ANNEXE – UTILISATION DIDACTIQUE DE ZEMAX OPTICSTUDIO

---

La plupart des logiciels de conception optique fonctionnent de façon similaire. Je présente ici ZOS qui est celui que j'utilise. Cette annexe donne une vue d'ensemble du logiciel, permettant au néophyte de mieux appréhender une partie du travail de simulation de cette thèse. Je profite de ces explications pour donner des exemples des méthodes utilisées pour contrôler certains systèmes décrit dans le corps du texte.

### 3.1 UTILISATION GENERALE DU LOGICIEL

L'information principale du fichier est contenue dans le « lens data ». Il s'agit d'un tableau regroupant les paramètres du système optique : position des surfaces dans l'espace, rayons de courbure, diamètres des dioptries, coefficients asphériques ou *freeform* etc. C'est aussi là que l'on choisit les variables optimisées.

Les optimisations se contrôlent à partir d'un autre tableau le « Merit Function Editor ». La MF (Merit Function, ou fonction de mérite) consiste en une suite d'instruction fournissant chacune des valeurs numériques. La moyenne RMS de toutes les lignes est calculée en prenant en compte les poids affectés à chaque instruction pour en régler l'importance. L'optimisation consiste à faire varier les paramètres mis en variables pour faire tendre la valeur de la MF vers 0. Toutes les caractéristiques du système peuvent être prises en compte, dont les aberrations. Il est important de définir une MF qui ne permette pas d'obtenir des solutions absurdes. L'optimisation est une boîte noire du point de vue de l'ingénieur.

Suite à l'optimisation, l'ingénieur possède une palette d'outil d'analyse du système pour contrôler son écart au cahier des charges. Cette palette est trop grande pour être exhaustif ici, mais il s'agit principalement de contrôler la qualité image et les caractéristiques géométriques et physiques du système. Chaque outil étant unique, il est préférable de se référer à l'aide ZOS pour en comprendre le fonctionnement.

Enfin, d'autres menus existent pour compléter l'analyse du système optique comme le « tolerance data editor », le « multi-configuration editor », etc. Je ne les détaille pas plus dans cette annexe, mais il y a tout le nécessaire pour concevoir un système optique, jusqu'à l'optomécanique pour laquelle il faut utiliser d'autres logiciels.

Voyons maintenant quelques exemples permettant à la fois de comprendre le fonctionnement du logiciel et d'illustrer certaines parties de la thèse.

### 3.2 EXEMPLE D'UTILISATION : DECALAGE DE PUPILLE

La notion de décalage de pupille, abordé au chapitre 2, est utilisé comme exemple pour illustrer l'utilisation de ZOS pour des optimisations. Il s'agit de la modélisation d'une lentille simple, avec la pupille sur le premier dioptrie. On fixe des conditions de départ où l'aberration sphérique et la coma sont de signe opposés, non nuls. Puis, uniquement en déplaçant la pupille, on corrige les aberrations. Je montre d'abord la mise en place du système, avec le réglage du signe des aberrations, puis la méthode pour déplacer la pupille et la correction d'aberrations qui en découle.

Le système est une lentille simple, avec l'objet à l'infini et la pupille au niveau du dioptrie d'entrée. Ceci se traduit ainsi dans le *lens data* : la ligne 0 a une épaisseur infinie, ce qui positionne l'objet. La ligne 1 est

présente pour l’affichage, afin de voir les rayons arriver sur le système. La ligne 2 définit la pupille du système. Son épaisseur est nulle : elle est collée au dioptre d’entrée. La ligne 3 définit le dioptre d’entrée par le rayon de courbure, le semi-diamètre et la conique. La ligne est colorée, ce qui indique qu’il y a un matériau, ici du N-BK7. Enfin, l’épaisseur de 2 mm indique l’écart entre le sommet de ce dioptre et du suivant. Puis, la ligne 4 définit le dioptre de sortie de la lentille, avec les mêmes paramètres. Son épaisseur permet de positionner la surface image, à  $26,8\text{ mm}$  du sommet du dernier dioptre.

Il y a une information supplémentaire à repérer dans le lens data : les V situés sur le côté de certaines cases indiquent les paramètres qui sont mis en variable.

	Surface Type	Commer	Radius	Thickness	Material	Co:	Clear Semi-Dia	Chi	Mech Se	Conic
0	OBJECT Standard ▾		Infinity	Infinity			Infinity	0,0..	Infinity	0,000
1	Standard ▾		Infinity	10,000			7,675	0,0..	7,675	0,000
2	STOP Standard ▾		Infinity	0,000			7,500	0,0..	7,500	0,000
3	Standard ▾		15,689 V	2,000	N-BK7		7,532	0,0..	7,532	-0,714 V
4	Standard ▾		-186,135 V	26,795 V			7,531	0,0..	7,532	0,000
5	IMAGE Standard ▾		Infinity	-			1,000 U	0,0..	1,000	0,000

Figure 3.1– Lens data décrivant le point de départ du système.

Avant d’afficher le système, il reste deux choses à régler : le champ et l’ouverture du système. Le champ est défini en angle côté objet, et l’ouverture en f#. On peut alors produire un premier affichage du système.

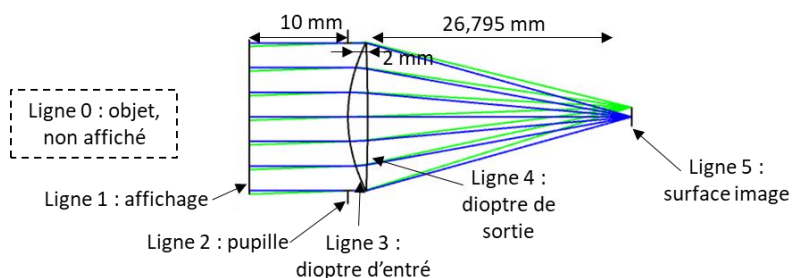


Figure 3.2 – Affichage (Layout) du système optique.

Maintenant que le système est mis en place, je définis les contraintes pour obtenir le point de départ souhaité, c’est-à-dire, avec les aberrations de signe opposé. Pour cela, on utilise la MF. Entre deux opérandes, je recommande d’insérer des commentaires car la relecture peut être fastidieuse à cause de cette organisation un peu rigide.

Chaque opérande suit une logique identique : on définit les paramètres spécifiques à l’opérande, puis on donne une valeur cible (*target*), et un poids (*weight*) qui définit l’importance de chaque opérande dans le calcul de la valeur totale de MF. La valeur réelle est affichée dans la colonne *value*. Une dernière colonne indique en pourcent la contribution de cette opérande dans la valeur totale de la MF.

Dans cette MF (cf Figure 3.3), on distingue 6 blocs de calculs. Le premier (lignes 1 et 2) contrôle la focale. Le second (lignes 3 à 5) impose à l’aberration sphérique de rester négative. Seule la ligne 5 est prise en compte dans la valeur de la MF car son poids est non nul. Le troisième (lignes 6 à 8) force la coma à être positive. Le quatrième contrôle la hauteur du rayon marginal sur la face d’entrée de la lentille, mais cela n’est qu’indicatif puisque son poids est nul. Le cinquième contrôle la hauteur du rayon principal. Enfin, le dernier groupe n’est pas affiché entièrement, il s’agit du groupe automatique d’opérandes donné par ZOS.

Il ne reste plus qu’à optimiser le système selon ces critères pour obtenir le point de départ souhaité. On constate dans la Figure 3.3 que les valeurs des aberrations sont bien de signe opposé, comme désiré.



Type	Wave	Hx	Hy	Px	Py	Target	Weight	Value	
1	BLNK	optimisation sur la focale							
2	EFFL	1				28,000	1,000	28,000	Bloc 1
3	BLNK	optimisation sur l'aberration sphérique							
4	SPHA	3	1			0,000	0,000	-27,053	Bloc 2
5	OPLT	4				0,000	1,000	0,000	
6	BLNK	optimisation sur la coma pour la surface 1							
7	COMA	3	1			0,000	0,000	6,116	Bloc 3
8	OPGT	7				0,000	1,000	0,000	
9	BLNK	valeur de h (hauteur du rayon marginal sur dioptre 1)							
10	RAGY	3	1	0,000	0,000	0,000	0,000	7,500	Bloc 4
11	BLNK	valeur de k (hauteur du chief ray du champ max sur dioptre 1)							
12	RAGY	3	1	0,000	1,000	0,000	0,000	-2,776E-17	Bloc 5
13	DMFS								Bloc 6
14	BLNK	Sequential merit function: RMS spot x+y centroid X Wgt = 1,0000 Y Wgt = 1,0000 GQ 3 rings 6 arms							

Figure 3.3 - L'aberration sphérique est à -27 wave et la coma à 6 wave, donc de signe opposé. Seule l'épaisseur de la surface 2 (position de la pupille) est modifiée pour déplacer la pupille.

Comme cet exemple vise à montrer l'influence du déplacement de pupille, on ne laisse que l'épaisseur contrôlant la position de la pupille en variable. Après optimisation, cette épaisseur passe de 0 à 24,3 mm, ce qui corrige la coma –même si la qualité totale ne change pas tant-.

Surface	Type	Coma	Radius	Thickness	Material	Clear Sen	Conic
0	OBJECT	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0,000
1		Standard	Infinity	10,000		7,675	0,000
2	STOP	Standard	Infinity	24,294 V		7,500	0,000
3		Standard	15,688	2,000	N-BK7	7,960	-0,714
4		Standard	-186,314	26,795		7,998	0,000
5	IMAGE	Standard	Infinity	-		0,491	0,000

Figure 3.4 – Etat final du système, après optimisation

Type	Surf	Wave	Target	Weight	Value	% Contrib		
1	BLNK	optimisation sur la focale						
2	EFFL	1	28,000	1,000	28,000	1,037E-06		
3	BLNK	optimisation sur l'aberration sphérique						
4	SPHA	3	1	0,000	0,000	-27,045	0,000	
5	OPLT	4			0,000	0,000	0,000	
6	BLNK	optimisation sur la coma pour la surface 1						
7	COMA	3	1	0,000	1,000	8,246E-08	9,719E-08	
8	OPGT	1			0,000	0,000	0,000	
9	BLNK	valeur de h (hauteur du rayon marginal sur dioptre 1)						
10	RAGY	3	1	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
11	BLNK	valeur de k (hauteur du rayon principal du champ maximal sur dioptre 1)						
12	RAGY	3	1	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
13	BLNK	fonction de mérite automatique						
14	DMFS							
15	BLNK	Sequential merit function: RMS spot x+y centroid X Wgt = 1,0000 Y Wgt = 1,0000 GQ 6 rings 6 arms						

Figure 3.5 – MF modifiée après l'optimisation sur la position de la pupille pour corriger la coma. Le poids des lignes 7 et 8 est modifié par rapport à la première optimisation. L'aberration sphérique ne change presque pas, mais la coma est annulée.

Suite au test numérique, voyons si nous pouvons approcher par le calcul ces valeurs d'optimisation. D'abord, calculons  $\Delta E$  pour ce cas.

$$\Delta E = \frac{\Delta k}{h} = \frac{0,424 - 0}{7,5} = 0,0565$$

Ce qui permet d'en déduire l'ajout de coma induit par le déplacement de la pupille, en prenant la valeur du coefficient d'aberration sphérique directement dans zemax.

$$\Delta W_{131} = 4\Delta EW_{040} = -0.5672 \text{ wave}$$

Or, la valeur de l'aberration de coma, lorsque la pupille est collée au dioptre est :  $W_{131} = 0.5827 \text{ wave}$ . Donc le déplacement de la pupille a permis au système de compenser la coma. Le point important est que cette compensation est réalisée grâce aux conditions de départ, sur le signe des aberrations. Si elles avaient été de même signe, éloigner la pupille n'aurait fait qu'empirer la situation.

### 3.3 EXEMPLE D'UTILISATION : CONTROLE DE GEOMETRIES FREEFORM

Cette partie est liée à la partie « Critère de sélection du point de départ » du chapitre 3. J'y décris certaines méthodes importantes de contrôle des caractéristiques d'un système *freeform* dans la MF.

#### 3.3.1 Minimiser les tilts des miroirs

Les tilts sont contrôlés par des surfaces *coordinate break*, dont le paramètre n°3 est celui donnant le tilt dans le plan de symétrie des systèmes. Les opérandes PMVA (*parameter value*) donnent la valeur de cet angle, et les opérandes OPGT (*operand greater than*), OPLT (*operand less than*) maintiennent la valeur de l'opérande PMVA. Pour minimiser, j'aurais pu directement mettre un poids de 1 aux lignes 2, 3 et 4, mais comme ces paramètres ne seront jamais nuls, il est préférable de leur laisser une plage de valeur, de sorte à moins contraindre l'optimisation.

1	BLNK	▼	valeur des tilts doit être minimisé, sans obscuration								
2	PMVA	▼	2	3					0,000	0,000	5,622
3	PMVA	▼	4	3					0,000	0,000	-4,231
4	PMVA	▼	6	3					0,000	0,000	-5,141
5	OPGT	▼	2						-5,000	1,000	-5,000
6	OPLT	▼	2						5,000	1,000	5,622
7	OPGT	▼	3						-5,000	1,000	-5,000
8	OPLT	▼	3						5,000	1,000	5,000
9	OPGT	▼	4						-5,000	1,000	-5,141
10	OPLT	▼	4						5,000	1,000	5,000

Figure 3.6 – Extrait de la fonction de mérite pour minimiser les tilts.

#### 3.3.2 Contrôler les écarts de distances entre les miroirs

L'opérande TTHI (*total thickness*) donne l'épaisseur entre les miroirs. J'en prends la valeur absolue avec ABSO (valeur absolue) de sortes à les comparer plus facilement. Puis, j'en fais la différence avec les opérandes DIFF (*difference*), et les quatre dernières opérandes s'assurent que l'écart entre les miroirs est inférieur à +/- 50 mm, ce chiffre étant arbitraire.

14	TTHI	▼	3	4					-535,052	0,000	-630,252
15	ABSO	▼	14						0,000	0,000	630,252
16	TTHI	▼	5	6					558,832	0,000	573,264
17	TTHI	▼	7	8					-594,502	0,000	-505,766
18	ABSO	▼	17						0,000	0,000	505,766
19	DIFF	▼	16	15					0,000	0,000	-56,989
20	DIFF	▼	18	16					0,000	0,000	-67,498
21	OPGT	▼	19						-50,000	1,000E-04	-56,989
22	OPLT	▼	19						50,000	1,000E-04	50,000
23	OPGT	▼	20						-50,000	1,000E-04	-67,498
24	OPLT	▼	20						50,000	1,000E-04	50,000

Figure 3.7 – Extrait de la fonction de mérite pour que les écarts des miroirs soient à peu près égaux.

### 3.3.3 Contrôler les rayons de courbure des dioptries

Pour contrôler le rayon de courbure, et faire en sorte qu'il soit dans la plage demandée par Bauer et al, je commence par récupérer la valeur de référence, qui est l'épaisseur entre les miroirs, avec l'opérande TTHI. Puis, je réalise le produit explicité avec l'opérande PROB, ici 1.5-2.5 x cet écart. Ensuite, je récupère la valeur du rayon de courbure du miroir négatif (M2), avec CVVA et RECI qui me donne l'inverse de la courbure du miroir. Puis, je fais la différence entre les deux valeurs de références et le rayon de courbure, avec les opérandes DIFF, et enfin, je maintiens la valeur avec les opérandes OPGT.

Pour le miroir M1, qui est positif, le procédé est identique, mais en changeant juste les paramètres pour maintenir un rayon de courbure valant 3-4 x l'écart entre les miroirs.

39	TTHI ▾ 5	6					0,000	0,000	573,264
40	PROB ▾ 39		1,500				0,000	0,000	859,896
41	PROB ▾ 39		2,500				0,000	0,000	1433,160
42	CVVA ▾ 5						0,000	0,000	-1,125E-03
43	RECI ▾ 42						0,000	0,000	-889,136
44	ABSO ▾ 43						0,000	0,000	889,136
45	DIFF ▾ 44	40					0,000	0,000	29,240
46	DIFF ▾ 41	44					0,000	0,000	544,024
47	OPGT ▾ 45						0,000	1,000	0,000
48	OPGT ▾ 46						0,000	1,000	0,000

Figure 3.8 – MF pour contrôler la courbure du dioptré négatif, par rapport à l'écart entre les miroirs.

La dernière surface est simplement choisie pour maintenir la focale du système, donc il suffit d'avoir un contrôle avec l'opérande EFFL (effective focal length).

### 3.3.4 Contrôler le volume du système

Le volume du système doit être inférieur à 60 L. Pour cela, je calcule les écarts maximaux en x, y et z.

Les lignes 55 à 65 permettent de définir l'amplitude du système selon l'axe z. Au fil des optimisations, les maxima changent, donc je cherche les extrema par la MF directement. Les lignes 67 à 69 permettent de définir l'amplitude selon l'axe y. Dans ce cas, les extrema ne varieront pas, car la géométrie du système est maintenue. Les lignes 71 à 75 définissent l'amplitude selon l'axe x. Comme cette direction est celle de la symétrie du système, le diamètre de l'optique la plus grande définit l'amplitude maximale dans cette direction. Les lignes 77 et 78 permettent de calculer le volume du système en multipliant les trois valeurs précédentes. Enfin, la ligne 79 permet de maintenir le contrôle, avec un objectif inférieur à  $60 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$ .

53	BLNK	critère 4 : la volume de 60 L										
54	BLNK	longueur max en z du systeme										
55	RAGZ	3	1	0,000	1,000	0,000	0,000		0,000	0,000	624,480	
56	RAGZ	7	1	0,000	1,000	0,000	0,000		0,000	0,000	570,252	
57	MAXX	55	56						0,000	0,000	624,480	
58	RAGZ	5	1	0,000	-1,000	0,000	0,000		0,000	0,000	2,517	
59	RAGZ	9	1	0,000	-1,000	0,000	0,000		0,000	0,000	71,553	→ Dimension du système selon z
60	RAGZ	9	1	0,000	1,000	0,000	0,000		0,000	0,000	71,305	
61	RAGZ	9	1	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	71,437	
62	MINN	58	59						0,000	0,000	2,517	
63	MINN	60	61						0,000	0,000	71,305	
64	MINN	62	63						0,000	0,000	2,517	
65	DIFF	57	62						0,000	0,000	621,963	
66	BLNK	longueur max en y du systeme										
67	RAGY	9	1	0,000	1,000	0,000	1,000		0,000	0,000	226,760	→ Dimension du système selon y
68	RAGY	3	1	0,000	0,000	0,000	-1,000		0,000	0,000	-33,332	
69	DIFF	67	68						0,000	0,000	260,092	
70	BLNK	longueur max en x du systeme										
71	DMVA	3			0				0,000	0,000	67,195	→ Dimension du système selon x
72	DMVA	5			0				0,000	0,000	137,570	
73	DMVA	7			0				0,000	0,000	370,902	
74	MAXX	71	72						0,000	0,000	137,570	
75	MAXX	73	74						0,000	0,000	370,902	
76	BLNK	calcul du volume										
77	PROD	65	69						0,000	0,000	1,618E+05	→ Volume total
78	PROD	75	77						0,000	0,000	6,000E+07	
79	OPLT	78							6,000E+07	1,000	6,000E+07	

Figure 3.9 – Extrait de la MF pour contrôler le volume du système à moins de 60 L.

### 3.3.5 Contrôler l'obstruction des rayons par les dioptries

Pour éviter l'obscuration, il faut s'adapter au cas de chaque miroir. Le miroir M1 est le diaphragme du système et la référence de coordonnées. Il n'y a donc rien de particulier à faire pour ce miroir. En revanche, le miroir M2 peut couper le trajet des rayons qui partent de l'objet pour arriver sur M1.

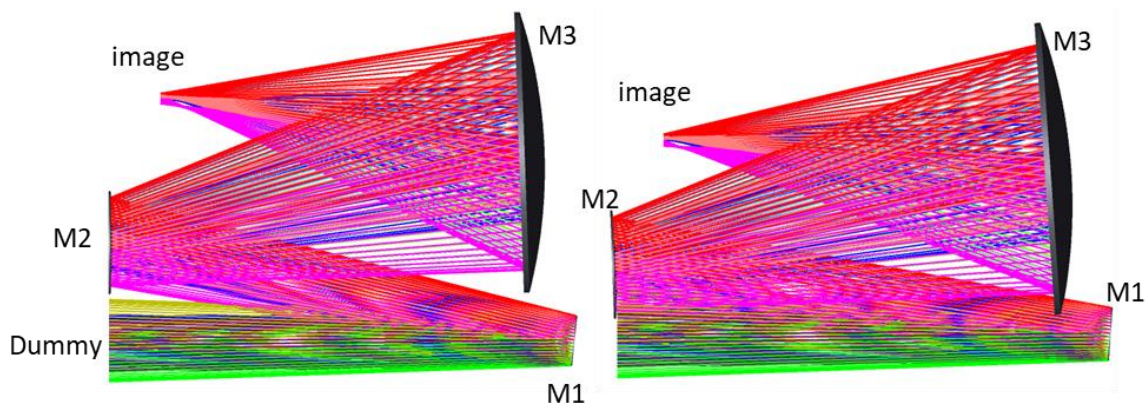


Figure 3.10 – Gauche : M2 n'obstrue pas les rayons arrivant sur M1. Droite : M2 les obstrue. ZOS ne coupent pas les rayons car on est en mode séquentiel, mais en pratique, ces rayons le seraient.

Dans ce cas, une solution consiste à positionner une surface *dummy* sous le miroir M2. Il s'agit d'une surface qui n'existe pas réellement et n'a pas d'impact sur le tracé de rayon. En l'alignant avec la partie basse de M2, on peut le forcer à se situer au-dessus, comme indiqué à la Figure 3.11. Ce genre de contrôle est simple à mettre en place, mais ne fonctionne que lorsque la position du dioptré à contrôler est peu libre.

81	BLNK	éviter obscurtion								
82	BLNK	pour que la surf 1 d'affichage soit en z. au même niveau que le miroir N								
83	RAGZ	1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
84	RAGZ	5	1	0,000	-1,000	0,000	-1,000	0,000	0,000	-1,043
85	DIFF	83	84					0,000	1,000	1,043
86	BLNK	je peux ensuite forcer le mir N a etre au dessus de la surf 1 daffichage								
87	RAGY	5	1	0,000	-1,000	0,000	-1,000	0,000	0,000	29,541
88	RAGY	1	1	0,000	-1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	55,139
89	DIFF	87	88					0,000	0,000	-25,598
90	OPGT	89						10,000	100,000	-25,598

Alignement selon z des deux surfaces

Alignement en y des deux surfaces

Figure 3.11 – Contrôle de l’obscurtion par le miroir M2.

Lorsque la position du dioptré à contrôler est plus libre, un autre type de contrôle plus robuste permet de laisser une grande liberté d’optimisation au logiciel. Il s’agit de s’assurer que le miroir M1 (appelé P1 pour positif n°1 dans la MF) ne coupe pas les rayons allant de M2 à M3. Pour cela, je définis le point du miroir M1 qui couperait le premier le rayon allant de M2 à M3. Je trouve alors l’équation de droite du rayon, pour finalement calculer la valeur limite des coordonnées du point du miroir M1, selon la Figure 3.12.

La méthode est ensuite mise en pratique dans la MF avec les commandes décrites par la Figure 3.13 : les lignes 101 et 102 donnent les coordonnées du bord supérieur de M1. Puis les lignes 105 à 114 calculent le coefficient directeur et l’ordonnée à l’origine du rayon reliant M2 à M3. Les lignes 116 et 117 donnent les coordonnées de k. Enfin, les lignes 119 et 120 contrôlent la position de M1max par rapport à k.

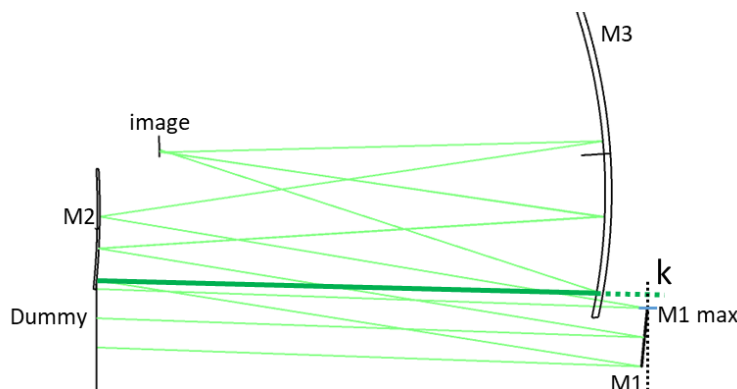


Figure 3.12 – Obscurtion du miroir M1 entre les miroirs M2 et M3. Le rayon en vert épais est le rayon extrême entre M2 et M3 dont je calcule l’équation. La position du point k est calculée pour servir de limite à M1. Les coordonnées de k s’adaptent dynamiquement aux changements de géométrie.

99	BLNK	ctrl sur position de P1 en dessous de la droite reliant N à P2								
100	BLNK	trouver la valeur du bord supérieur de P1								
101	RAGY	3	1	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	33,415
102	RAGZ	3	1	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	626,853
103	BLNK	calculer la droite entre N et P2								
104	BLNK	coef dir								
105	RAGY	5	1	0,000	-1,000	0,000	-1,000	0,000	0,000	29,541
106	RAGY	7	1	0,000	-1,000	0,000	-1,000	0,000	0,000	51,389
107	DIFF	105	105					0,000	0,000	21,848
108	RAGZ	5	1	0,000	-1,000	0,000	-1,000	0,000	0,000	-1,043
109	RAGZ	7	1	0,000	-1,000	0,000	-1,000	0,000	0,000	560,749
110	DIFF	109	108					0,000	0,000	561,791
111	DIVI	107	110					0,000	0,000	0,039
112	BLNK	ordonnée à l'origine = y - ax								
113	PROD	111	108					0,000	0,000	-0,041
114	DIFF	105	113					0,000	0,000	29,582
115	BLNK	calcul du Ymin acceptable pour P2 en fonction de Z -> ymin=a*z+ordOrig								
116	PROD	111	102					0,000	0,000	24,378
117	SUMM	116	114					0,000	0,000	53,959
118	BLNK	finalisation opérande								
119	DIFF	117	101					0,000	0,000	20,545
120	OPGT	119						5,000	1,000	5,000

Point extrême de M1

Équation de la droite reliant M2 à M3 (coefficient direction et ordonnée à l’origine)

Coordonnée en y du point k

Contrôle finale de la position de M1

Figure 3.13 – Contrôle du rayon extrême reliant M2 à M3 (appelé N et P2 dans la MF).





Evaluer la distorsion sur tout le champ, par une macro :

Je donne les étapes nécessaires pour calculer la distorsion en arc, quelque soit la définition de la surface courbe. Il s'agit d'une méthode fonctionnelle, mais il est possible d'en trouver des meilleures.

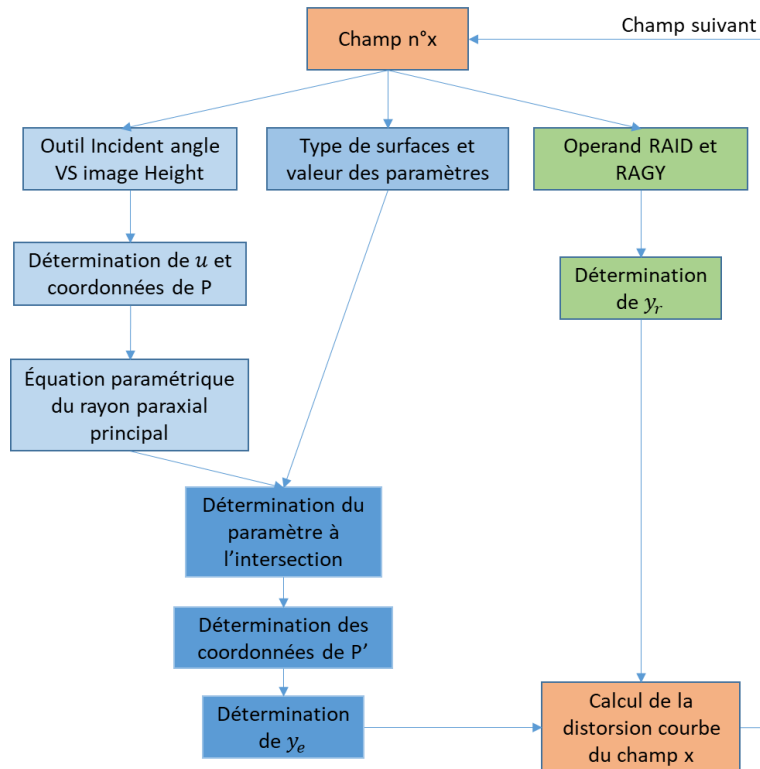


Figure 3.16 – Structure du code pour la macro de calcul de la distorsion courbe.

Initialement, on connaît entièrement les positions et angles d'incidences des rayons sur la surface image, ainsi que son équation de sag,  $z(x, y)$ . Par exemple, pour une surface sphérique, on a :

$$z(x, y) = z(r) = \frac{r^2/R_c}{1 + \sqrt{1 - r^2/R_c^2}} \quad 3.1$$

Par ailleurs, avec ZOS, on a accès à l'angle  $u$  et aux coordonnées de  $P (x_0 y_0 z_0)$  déterminant l'incidence d'un rayon sur la surface image. On détermine alors un second point de coordonnée  $(x_1 y_1 z_1)$  du rayon principal, et on en déduit les équations paramétriques de la droite :

$$x = x_0 + (x_1 - x_0)t \quad 3.2$$

$$y = y_0 + (y_1 - y_0)t \quad 3.3$$

$$z = z_0 + (z_1 - z_0)t \quad 3.4$$

En reportant l'équation paramétrique de la droite (3.2, 3.3, 3.4) dans l'équation du sag 3.1, on élimine  $x$ ,  $y$  et  $z$ , ce qui donne une équation avec seulement le paramètre  $t$  en inconnue. On en déduit la valeur de  $t$ , donnant l'intersection. En le reportant dans l'équation de la droite, on obtient le point  $P' (x, y, z)$ .

Il ne reste plus qu'à déterminer les longueurs  $l_e$  et  $l_r$  pour finaliser le calcul de la distorsion courbe. Cependant, comme précisé au chapitre 4, le calcul de ces longueurs est plus ou moins aisé en fonction du type de surface. Par exemple, le cas du biconique est compliqué (voir annexe 6).

## 3.5 OPTIMISATION D'UN SYSTEME OPTIQUE *FREEFORM*

### 3.5.1 Méthode générale

De façon générale, l'optimisation d'un système optique suit une méthode détaillée dans la Figure 3.17 qui schématise ce que décrit le texte de Bauer *et al* dans [79]. Après analyse du système, l'ingénieur décide de ce qu'il fait du résultat de l'optimisation : qu'enseigne ce résultat d'optimisation sur l'état du système ?

Dans le cas de systèmes *freeform*, l'outil d'analyse privilégié sont les FFD, qui permettent de déterminer les aberrations prioritaires à corriger. Pour cela, il faut d'abord déterminer la nature et l'ampleur de chaque aberration pour décider de celle qui doit être prioritairement corrigée. Puis, selon cette analyse, il choisit la façon de procéder : quelles sont les variables suivantes à optimiser ?

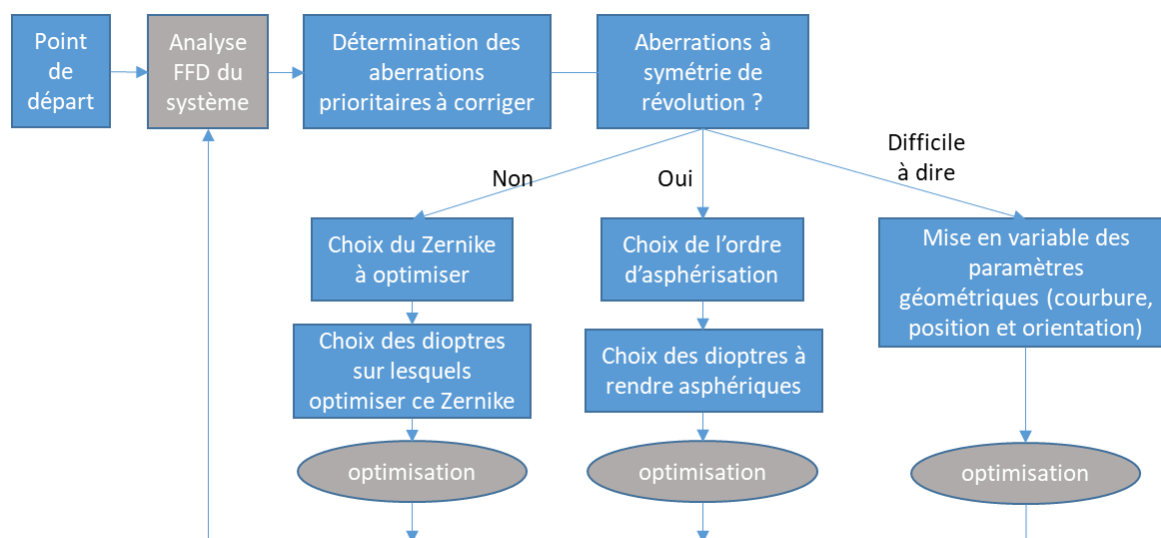


Figure 3.17 – Méthode d'optimisation d'un système *freeform*. Fond bleu : décisions actives de l'ingénieur. Fond gris : utilisations de fonctions automatiques du logiciel de conception optique.

Le schéma précédent montre déjà un certain nombre de décisions prises au fil du design. Mais sa représentation est trop linéaire, et ne considère pas certaines autres alternatives qui se présentent à l'ingénieur. Pour les toucher du doigt, on peut se poser la question suivante : que se passe-t-il si après l'optimisation l'analyse FFD du système ne change pas ?

Il arrive en effet que les optimisations stagnent. Par exemple, le système n'a pas été amélioré par l'optimisation, ou l'amélioration n'est pas claire (certains critères indiquent une amélioration, d'autre une dégradation). L'ingénieur est alors amené à changer sa méthode. Un premier changement intéressant consiste à utiliser une autre méthode d'optimisation (changer de critère d'optimisation ou utiliser une optimisation globale). D'autres choix plus radicaux sont aussi possibles : ajouter un nouveau degré de liberté au système (ajouter une lentille, séparer un doublet, ajouter une autre variable) ou changer de point de départ. La Figure 3.18 illustre de façon plus complète la diversité des choix que doit prendre l'ingénieur.



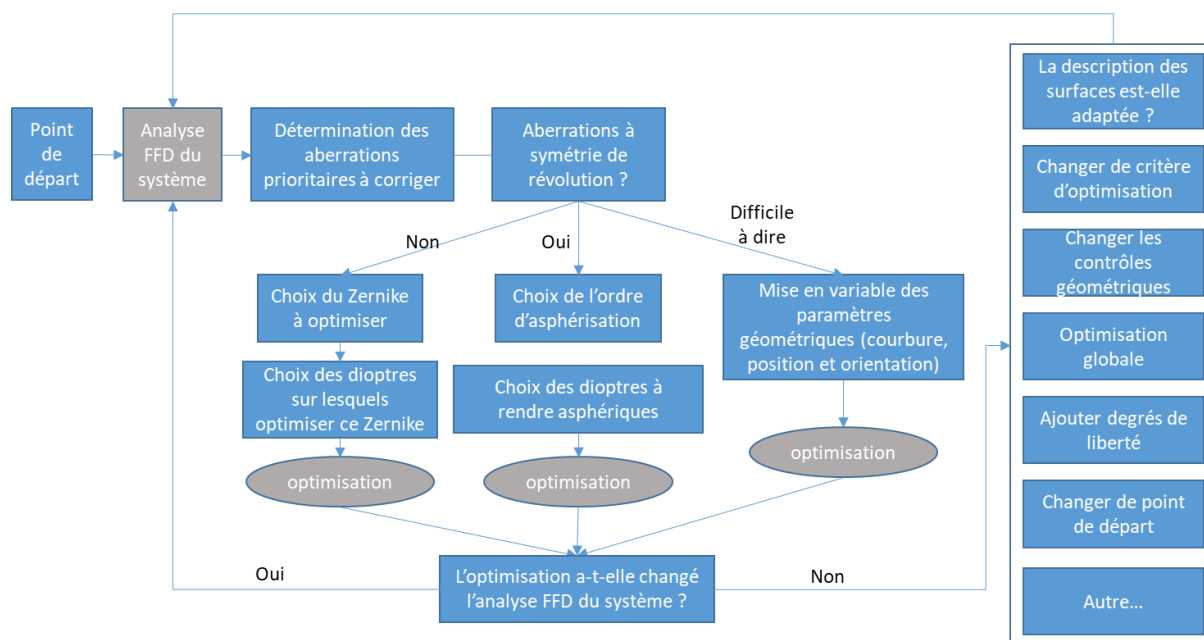


Figure 3.18 – Schéma d’optimisation plus complet d’un système freeform.

Maintenant que ces généralités ont été présentées, j’ajoute des précisions sur les étapes les plus importantes de ce processus.

### 3.5.2 Analyse des aberrations : Full-Field Displays

Pour identifier les aberrations, on peut utiliser les Full-Field Displays [138–140] (appelés Field-Field Aberration dans ZOS). Ils sont obtenus en décomposant le front d’onde dans la pupille de sortie de chaque champ, selon un polynôme de Zernike. Pour afficher des informations liées à la coma par exemple, on décompose les fronts d’onde, et on affiche les coefficients Z7 et Z8 en chaque champ. Les FFA synthétisent une aberration en mélangeant deux coefficients affichent deux informations : l’amplitude et l’orientation :

$$\text{amplitude} = \sqrt{Z7^2 + Z8^2} \quad ; \quad \text{angle} = \text{Atan}\left(-\frac{Z7}{-Z8}\right)$$

Puis, ils affichent l’amplitude par la taille relative des icônes symbolisant les deux aberrations. L’équipe de ZOS a fait le choix d’ajouter un signe négatif pour les aberrations de sorte à ce que les icones soient orientées dans le même sens que les aberrations transverses, qui comportent un signe négatif. Pour plus d’informations, il est préférable de se référer à l’aide de ZOS.

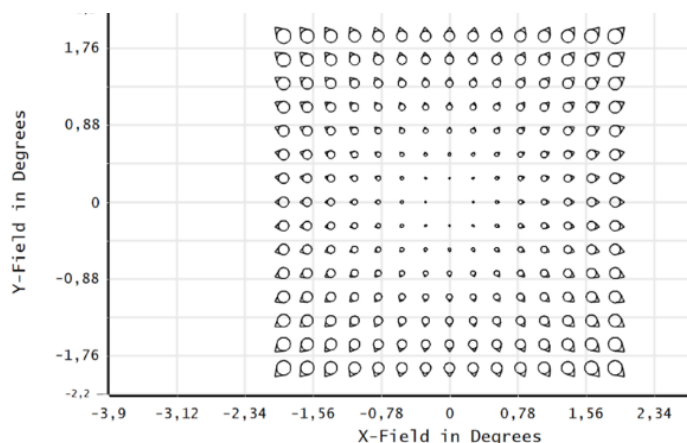


Figure 3.19 – Full Field Aberrations obtenue avec Zemax Opticstudio, pour une lentille simple.

### 3.5.3 Optimisation en *freeform*

Plus les degrés de libertés sont nombreux, plus les optima sont nombreux, mais ils ne se valent pas tous. L'objectif est de trouver celui qui a les bonnes qualités d'imagerie sans être trop difficile à tolérer.

Une première approche consiste à sélectionner beaucoup de variables à tout optimiser d'un coup. A partir d'un bon point de départ, cela peut fonctionner, mais de meilleurs résultats sont souvent trouvés. La Figure 3.18 montre un procédé plus fin. Cependant, ces conseils ont des limites car le *freeform* recouvre une diversité de systèmes encore insoupçonnée. Quoiqu'il en soit voici quelques conseils :

#### Définir les variables à optimiser :

Les FFD sont un outil privilégié pour réaliser cette étape. Mais les variables sont aussi les paramètres de tilts et de décentrement, les épaisseurs ou les coefficients d'asphérisation, que n'indiquent pas les FFD. Il faut chercher à comprendre pourquoi le système est limité au fil des itérations, comme le résume la Figure 3.18.

Quoiqu'il en soit, la bonne combinaison de variable à optimiser pour débloquer un système n'est pas triviale à trouver, et il est parfois nécessaire de réaliser des essais, puis de revenir en arrière, changer les variables et comparer les résultats. En revanche, selon les cas, certaines variables ne sont pas pertinentes, par exemple pour des raisons de symétrie. L'annexe 4 montre les symétries au sein des polynômes de Zernike, ce qui permet, selon les symétries du systèmes d'éviter de tester des variables inutiles.

#### Ecrire une fonction de mérite efficace :

La fonction de mérite est l'outil permettant de contrôler les optimisations. Une fonction de mérite bien conçue réalise un équilibre entre les critères d'optimisation, sans redondance, mais en étant exhaustive. C'est particulièrement important pour les systèmes hors axe où la géométrie peut être difficile à contrôler.

Puis, lorsqu'on calcule la valeur de la fonction de mérite, la colonne « contribution » permet de voir quels sont les opérandes qui la dégrade le plus. C'est un moyen efficace de repérer les points limitants du système.

#### Optimiser :

Cette étape est la plus facile, puisqu'elle consiste à lancer un code d'optimisation de la fonction de mérite par trace de rayon. Ce code est souvent inaccessible en détail, et le concepteur se contente surtout d'observer les résultats une fois l'optimisation terminée.

Dans ZOS il existe trois méthodes d'optimisation : l'optimisation locale, l'optimisation Hammer, et l'optimisation Globale. Ces algorithmes sont un point de concurrence importante entre les différents logiciels de conception optique, et de nouvelles méthodes sont étudiées régulièrement pour en trouver d'autres plus efficaces encore [141].

#### Comprendre le résultat obtenu et en déduire les pistes travail pour les prochaines itérations :

L'optimisation d'un système *freeform* consiste en général à corriger les aberrations hors axe, qui sont souvent les plus importantes, en rapprochant les nœuds de l'axe optique local. Une fois fait, l'ajout d'asphères aux dioptries peut finaliser le système, qui apparaît comme s'il était sur l'axe.

Si le cahier des charges n'est pas encore rempli, chacune des idées de la Figure 3.18 peut être testée. Il est souvent nécessaire de tester plusieurs optimisations en changeant divers paramètres, puis d'en comparer les résultats pour prendre celui qui semble le plus intéressant. Si le système semble toujours aussi bloqué,

en dernier recours, il est encore possible de changer de point de départ. Dans le pire des cas, on peut même accepter un compromis qui ne remplisse pas tout le cahier des charges.

Ce travail peut être long et fastidieux, mais en procédant avec rigueur et en prenant le temps de comparer les diverses solutions, on peut aller loin. Quoiqu'il en soit, certains systèmes sont intrinsèquement plus limités que d'autres, et seule l'expérience peut aider à gagner en finesse d'analyse.

## 4 ANNEXE - POLYNOMES DE ZERNIKE

Le chapitre 2 propose un rapide tour d'horizon des principales méthodes pour décrire les dioptries *freeform*. Parmi les plus usitées, il y a les polynômes de Zernike. La littérature à ce sujet est assez développée, je n'en présente donc ici qu'une vue d'ensemble. Les polynômes de Zernike ont été conçus par Fritz Zernike et Bernard Nijboer, en 1942 [60].

### 4.1 DEFINITION MATHÉMATIQUE

#### 4.1.1 Généralités et définitions

Par construction, les polynômes de Zernike sont un ensemble infini de polynôme orthogonaux, définis sur le disque unité [60]. Leur orthogonalité s'obtient par intégrale sur le disque unité et assure l'unicité de la description d'une surface. Une conséquence directe de cette définition est la nécessité de partir d'une surface de base circulaire. Si les surfaces à décrire sont rectangulaires par exemple, d'autres ensembles polynomiaux seront plus adaptés, mais il est possible de définir les surfaces sur des disques unités et de les recouper ensuite. En pratique, on utilise une combinaison linéaire d'un nombre limité de Zernike pour décrire une surface. Les coefficients de Zernike sont les coefficients multiplicatifs affectés à chaque polynôme.

Les polynômes sont séparés en polynômes pairs et impairs. Les indices  $m$  et  $n$  définissent les ordres azimutaux et sagittaux, permettant de classer les polynômes.

$$Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \begin{cases} \sin(m\varphi), & \text{si } m < 0 \\ \cos(m\varphi), & \text{si } m > 0 \\ 1, & \text{si } m = 0 \end{cases} \quad 4.1$$

Où  $m$  et  $n$  sont des nombres entiers non nuls, avec  $n \geq m$ . Les variables  $0 \leq \rho \leq 1$  et  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  sont les coordonnées polaires décrivant la position du point de la surface, normalisées par un rayon de référence. Enfin, les polynômes  $R_n^m$  sont définis selon leur parité, avec l'expression :

$$\text{Si } n - m \text{ est pair :} \quad R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} \rho^{n-2k} \quad 4.2$$

$$\text{Si } n - m \text{ est impair :} \quad R_n^m(\rho) = 1 \quad 4.3$$

Il existe de nombreuses autres manières de définir les polynômes de Zernike : avec les fonctions de Bessel, avec des fonctions génératrices, avec des relations de récurrences etc. Et il existe de nombreuses façon de classer les polynômes de Zernike, selon la manière dont ils sont générés. A noter que toutes ces classifications rendent leur utilisation piègeuse. Il est nécessaire d'être au clair sur l'axe de référence, sur le type de classification utilisée, sur leur normalisation radiale, ainsi que sur l'unité des coefficients de Zernike. La page internet [142] décrit de façon détaillée les caractéristiques des Zernike, dont les définitions mathématique. La suite de ce document présente des remarques liées à la conception optique.

## 4.1.2 Visualisation des premiers Polynômes

Il existe de nombreuses façons de classer les polynômes de Zernike. Une première façon de le faire est d'utiliser les coefficients  $n$  et  $m$  pour les classer. Par ailleurs, en conception optique le classement « fringe Zernike » est souvent utilisé. Il s'agit d'un sous-ensemble des polynômes de Zernike, qui est celui que j'utilise dans ZOS. La numérotation de ZOS donne le coefficient avec le cosinus avant celui avec le sinus.

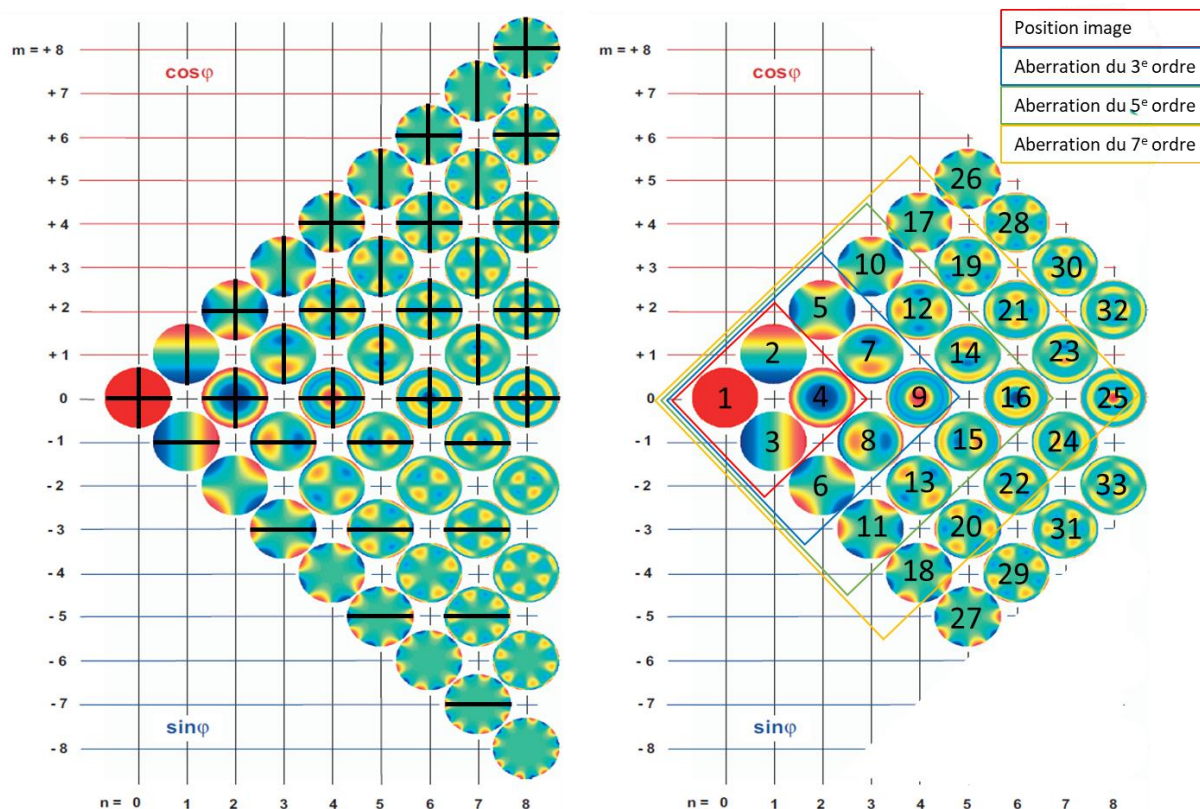


Figure 4.1 – Gauche : polynômes de Zernike selon le classement  $m, n$ , avec les symétries. Droite : classement Fringe Zernike, avec leur numérotation telle qu'utilisée dans ZOS. Image issue de [62].

L'analyse des symétries est importante pour la conception des systèmes optiques, car selon l'orientation des dioptries *freeform*, le système peut garder des symétries. Dans ce cas, utiliser les polynômes qui ne correspondent pas à cette symétrie n'est pas pertinent. Cette analyse permet de choisir plus simplement les polynômes à introduire dans les optimisations.

## 4.2 UTILISATION EN CONCEPTION OPTIQUE

Lorsque Nijboer a défini ces polynômes, il s'est limité au cas où la condition de symétrie de révolution est valide. Son objectif était de trouver un nouveau moyen de construire la fonction d'aberration plutôt que celle présentée au chapitre 2. Il utilise des polynômes plutôt qu'un développement de Taylor à partir des termes invariants par symétrie de révolution ( $x^2+y^2$ ;  $xx'+yy'$ ;  $x'^2+y'^2$ ).

Les polynômes de Zernike sont principalement utilisés dans deux cas : décrire la fonction d'aberration d'un système et pour décrire la surface d'un dioptré *freeform*. Ces deux cas sont indépendants. Le premier permet de définir les graphiques *Full-Field Displays (FFD)* ou bien en métrologie de surface. Le second permet de décrire les surfaces, en définissant l'écart à la surface plane (sag) pour chaque point.

---

Le fait que Nijboer se limite au cas des systèmes à symétrie de révolution implique que la relation entre la pupille de sortie et la surface image ne soit pas trop entachée d'aberration, sinon, le calcul des FFD n'est plus faisable. C'est pour cela que Bauer *et al.* ont développé une méthode pour calculer les FFD à partir du tracé de rayon [139]. Toutefois, lorsqu'on utilise ces polynômes pour décrire un dioptré, il s'agit d'une description mathématique pour laquelle cette condition de symétrie n'est pas un problème.

### 4.2.1 Description des surfaces

Par construction, les polynômes de Zernike décrivent la fonction d'aberration. Il est donc possible de retrouver une correspondance, bien qu'elle ne soit pas évidente, entre ces polynômes et les coefficients de Seidel, puisqu'il s'agit en fait de deux descriptions mathématiques de la même réalité physique. Ce travail a été réalisé notamment par Gray *et al.* [143]. Si les aberrations apparaissent différentes avec les polynômes de Zernike, par rapport à Seidel, cela est dû à leur propriété de minimisation de l'écart-type par rapport à un plan.

L'autre usage des polynômes de Zernike correspond à la description de dioptrés. S'il n'y a pas de différence mathématique entre cela et la description d'une surface d'onde, il ne s'agit plus de décomposer en Zernike une surface préexistante, mais de la construire. En optimisant les coefficients de Zernike, on obtient des dioptrés capables de corriger les aberrations hors axe.

### 4.2.2 Autres éléments importants pour la conception optique

Dans les paramètres qui définissent les polynômes de Zernike, il y a le rayon de normalisation de la surface sur laquelle les polynômes sont définis. Comme le signale Nijboer dans sa thèse, ce rayon est inclus dans la définition de chaque polynôme, et ne doit donc pas être modifié sans adapter les coefficients car la surface définie ne serait plus la même. Pour éviter ce problème, il explique dès l'introduction qu'il se place dans le cas où le rayon de la pupille et la distance entre la pupille de sortie et la surface image sont fixes.

Par ailleurs, la majeure partie de l'influence des polynômes de Zernike se concentre sur les bords du disque unité. Selon les objectifs de conception, ils peuvent ne pas être bien adaptés au problème, en particulier s'il s'agit de modéliser un dioptré ayant localement une déformation importante. Les polynômes de Zernike sont très utilisés, mais ne sont pas pertinents dans toutes les situations.

## 5 ANNEXE - COURBURE OPTIMISANT LE FLUX

### 5.1 RAPPEL DU CHAPITRE 3

Dans le chapitre 3, l'étude des Gains en Flux Lumineux (GFL) a été menée avec des formes sphériques. Mais en réalité, elles ne sont pas optimales. Cette annexe présente le raisonnement pour calculer la forme optimale. J'obtiens une équation différentielle mais je n'ai pas réussi à en déduire l'équation explicite. Je présente le raisonnement pour qu'il puisse resservir au lecteur au besoin.

Pour la calculer, nous cherchons d'abord les conditions permettant à une forme d'être candidat au titre de la forme optimale. Physiquement, la courbure doit respecter deux critères :

- Etre continue, sans point singulier
- Avoir un cône d'émission émettant perpendiculairement à la surface du pixel.

Par ailleurs, un autre critère permet de définir la meilleure courbure : la courbure minimale. Par définition, il s'agit de la courbure qui maximise le flux entrant dans la pupille tout en minimisant la courbure du composant.

### 5.2 LE CALCUL

Dans ces conditions, en partant des équations classiques de radiométrie, on cherche l'équation donnant le sag  $z$ , en fonction de la hauteur du champ,  $y$ . A partir des équations de radiométrie, on peut définir le flux reçu par la pupille depuis un unique pixel du microécran à partir de l'intensité :

$$F_{det/B} = \frac{I_B S_{det} \cos(\theta)}{d^2}, \quad 5.1$$

$$I_B = \frac{F_B}{2\pi \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)} = \frac{F_B}{\Omega_B} \quad 5.2$$

Avec  $I_B$  l'intensité du flux  $F_B$ ,  $S_{det}$  la surface du détecteur (ici la pupille),  $\theta$  l'angle entre les deux surfaces considérées et  $d$  la distance entre les deux surfaces.

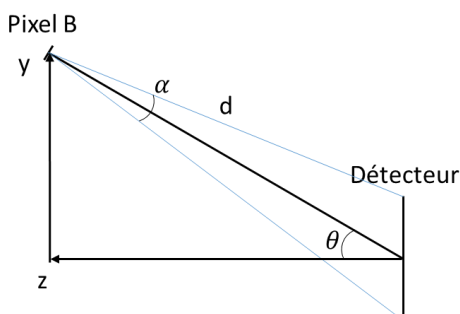


Figure 5.1 – Grandeurs permettant de calculer l'équation différentielle donnant la position d'un pixel pour la courbure optimale.

La condition du calcul est l'égalité des flux entre celui émis par un pixel et celui reçu par la pupille :

$$F_B = F_{det/B} \quad 5.3$$

En portant les expressions 5.1 et 5.2 dans la précédente, et avec l'expression usuelle de l'étendue géométrique, on obtient :

$$F_{det/B} = \frac{F_B}{\Omega_B} S_{det} \cos(\theta) \frac{1}{d^2} = F_B \quad 5.4$$

Soit :

$$\Omega_B d^2 = S_{det} \cos(\theta) \quad 5.5$$

Par ailleurs, l'émission orthogonale à la surface du microécran s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{dz(y)}{dy} = \theta. \quad 5.6$$

Finalement, nous obtenons l'équation différentielle donnant le *sag* en fonction de la hauteur du pixel :

$$\Omega_B y + \Omega_B z(y) - S_{det} \cos\left(\frac{dz(y)}{dy}\right) = 0, \quad 5.7$$

Malheureusement, la résolution de cette équation différentielle n'a pas donné de résultat simple à présenter. La seule conclusion que nous en tirerons donc est qu'effectivement, la forme optimale n'est pas un cercle.



## 6 ANNEXE - DEFORMATION MECANIQUE

Cette annexe apporte les détails nécessaires à la compréhension des résultats présentés dans le chapitre 4, partie « Déformation mécanique », et complète ceux-ci par d'autres cas.

Pour rappel, le but du calcul est de déterminer l'écart entre la grille de référence courbe et la position obtenue par simulation des différents points de la surface des pixels. La grille de référence choisie est définie par une surface sphéro-cylindrique avec conservation des longueurs d'arc.

### 6.1 LE CHOIX D'UNE SURFACE DE REFERENCE COURBE

#### 6.1.1 Généralités

Pour étudier les déformations locales d'une surface de microécran courbe, il est nécessaire de définir une surface de référence décrivant le résultat théorique, c'est-à-dire, la surface que l'on devrait obtenir sur tous les écarts mécaniques étaient nuls.

Les surfaces étudiées ici sont celles qui sont définies à partir de deux courbures. De nombreux types de surface répondent à cette description, et les confusions sont faciles et peuvent être préjudiciables. A l'ordre 2 (approximation parabolique), il n'y a qu'une définition :  $z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{2}$ , avec  $c_x = \frac{1}{R_x}$ ,  $c_y = \frac{1}{R_y}$  qui sont les courbures et rayons de courbure, orientés orthogonalement. Aux ordres supérieurs, la définition exacte de la surface en modifie les propriétés. Une publication de Malacara *et al.* en présente plusieurs, ainsi que leurs propriétés et leur différences [144].

#### 6.1.2 Surfaces biconique et sphéro-cylindrique

Dans le cadre de cette thèse, pour les microécrans courbes, on a utilisé les surfaces *biconic* dans ZOS. Ces surfaces sont très pratiques à utiliser dans les simulations optiques, mais pour réaliser le calcul des déformations suite à la mise en courbure, elles sont peu pratiques, car le calcul de la distance en arc entre n'importe quel point et le centre de la surface n'est pas trivial.

Pour faciliter ce travail, on utilise l'approximation sphéro-cylindrique des biconiques, selon l'équation<sup>16</sup> :

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \left(1 - \frac{(c_x x^2 + c_y y^2)^2}{x^2 + y^2}\right)^{1/2}}$$

Il s'agit d'une surface dont toutes les coupes selon un plan contenant l'axe optique sont des cercles. Cette propriété rend direct le calcul de la distance en arc entre n'importe quel point de la surface et son centre.

<sup>16</sup> Z. Malacara, *et al.* "Astigmatic optical surfaces, characteristics, testing, and differences between them," OE **46**, 123001 (2007).

## 6.2 PRESENTATION DES COORDONNEES U V W

Considérons un point P de coordonnées cartésiennes  $(x,y,z)$ . On appelle  $\Pi_\varphi$ , le demi-plan contenant l'axe Oz (axe optique) et ce point P. Il est caractérisé par  $\varphi$ , l'angle qu'il fait avec le plan  $O_{xz}$  (autrement dit :  $y = 0$ ). Dans ce demi-plan, un point P est a pour coordonnées cartésiennes  $(\rho,z)$ .  $\rho$  est la distance à l'axe Z. Ceci correspond aux coordonnées cylindriques classiques.

Le nouveau système de coordonnées est caractérisé par deux rayons de courbure  $R_X$  et  $R_Y$ , ou les courbures correspondantes  $C_X = \frac{1}{R_X}$ ,  $C_Y = \frac{1}{R_Y}$ .

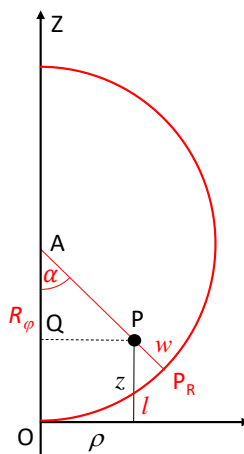


Figure 6.1– Relation entre coordonnées  $(\rho,z)$  et  $(l,w)$  dans le demi-plan  $\Pi_\varphi$ .

Dans  $\Pi_\varphi$ , le rayon de courbure prise en compte est celui du cercle qui est l'intersection avec la surface sphéro-cylindrique soit :  $R_\varphi = \frac{1}{C_X \cos^2 \varphi + C_Y \sin^2 \varphi}$ . On y prend comme référence d'un nouveau système de coordonnées un demi-cercle dont le centre, A, est situé sur l'axe Oz à l'abscisse  $R_\varphi$ . Soit  $P_R$ , la projection orthogonale du point P sur ce cercle. On appelle  $w$  l'abscisse de P sur le rayon  $AP_R$ , en prenant  $P_R$  comme origine et la convention de signe :  $w$  est positif pour P à l'intérieur du cercle. La position de  $P_R$  sur le cercle est caractérisée par  $l$ , son abscisse curviligne le long du demi-cercle. Le couple  $(l,w)$  forme des nouvelles coordonnées de P qui sont relatives au cercle. La relation de Pythagore dans le triangle APQ, où Q est la projection orthogonale de P sur l'axe Oz, permet d'obtenir :

$$w = R_\varphi - \text{sign}(R_\varphi) \sqrt{(R_\varphi - z)^2 + \rho^2}.$$

On a par ailleurs :  $l = R_\varphi \cdot \alpha = R_\varphi \arctan\left(\frac{\rho}{R_\varphi - z}\right)$ .

Cette définition dans le demi-plan  $\Pi_\varphi$ ,  $(\rho,z) \rightarrow (l,w)$ , est ensuite étendue à l'ensemble de l'espace tridimensionnel :  $(x,y,z) \rightarrow (u,v,w)$ . L'angle  $\varphi$  est tel que :  $x = \rho \cos(\varphi)$ ,  $y = \rho \sin(\varphi)$ .

De manière analogue, on définit les coordonnées  $u$  et  $v$  par :  $u = l \cos(\varphi)$ ,  $v = l \sin(\varphi)$ .

On a donc :  $\mathbf{u} = \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} l$ ,  $\mathbf{v} = \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} l$ .

A partir des coordonnées  $(x,y,z)$  d'un point de la surface simulée, on peut déduire les coordonnées  $(u,v,w)$  selon le schéma de calcul suivant.

$$\rho^2 = x^2 + y^2$$

$$A = \frac{x^2}{R_X} + \frac{y^2}{R_Y}$$

$$R_\varphi = \frac{\rho^2}{A}$$

$$B = \frac{\rho}{A} \arctan\left(\frac{\rho A}{\rho^2 - Az}\right)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{B}\mathbf{x}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{B}\mathbf{y}$$

$$\mathbf{w} = R_\varphi - \text{sign}(R_\varphi) \sqrt{(R_\varphi - z)^2 + \rho^2}$$

### 6.3 DETERMINATION DES ECARTS MECANQUES

A partir d'un point M quelconque situé sur la surface des pixels lorsque le microécran est plan, notre but est de calculer la position finale que devrait avoir ce point si, lors de la courbure, on avait la conservation de la distance en arc avec le centre de l'écran. Cette hypothèse reprend l'idée de distorsion en arc. Puis on n'a plus qu'à faire la différence entre cette position et la position du même point obtenu par la simulation Ansys initialement faite pour connaître la répartition des contraintes.

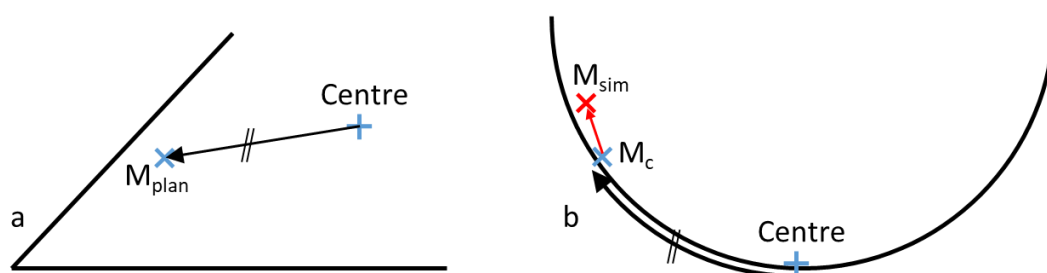


Figure 6.2 – Déplacement du point M lors de la mise en courbure (a) point de départ plan. (b) M<sub>c</sub> : point après courbure avec conservation de la distance en arc. M<sub>sim</sub> : simulation Ansys avec les déformations mécaniques.

Le point de départ  $M_{plan}$  a pour coordonnées cartésiennes:  $(x_{plan}, y_{plan}, z_{plan} = e)$  avec  $e$  l'épaisseur du microécran, ici  $80 \mu\text{m}$ . Le point  $M_c$  correspondant a pour coordonnées sphéro-cylindriques :  $(u_c, v_c, w_c)$ . La conservation de la longueur d'arc et de l'épaisseur font que l'on a  $(u_c, v_c, w_c) = (x_{plan}, y_{plan}, z_{plan})$ .

On récupère en parallèle les coordonnées cartésiennes du point  $M_{sim}$  issues de la simulation :  $(x_{sim}, y_{sim}, z_{sim})$ . Leur conversion en coordonnées sphéro-cylindriques donne  $(u_{sim}, v_{sim}, w_{sim})$ . La différence entre  $M_c$  et  $M_{sim}$  permet de définir les écarts mécaniques  $E_{meca}$ . Les composantes de ces vecteurs dans le repère sphéro-cylindrique sont  $(u_{sim}, v_{sim}, w_{sim}) - (u_c, v_c, w_c) = (u_{sim} - x_{plan}, v_{sim} - y_{plan}, w_{sim} - z_{plan})$ . Dans ces écarts, on ne s'intéresse qu'aux composantes latérales :  $(u_{sim} - x_{plan}, v_{sim} - y_{plan})$ . C'est ce que l'on présente dans la colonne de gauche de la Figure 6.3. Les vecteurs bleus ont comme point de départ la référence sphéro-cylindrique et comme point d'arrivée les coordonnées issues de la simulation. Leur longueur est fortement augmentée pour qu'ils soient visibles. Les courbes rouges sont les courbes de niveaux de leur longueurs en  $\mu\text{m}$ . Le rectangle rose représente  $\frac{1}{4}$  du microécran. On constate alors que les courbures induisent une déformation globalement centrifuge.

Pour les deux premiers cas, de courbure sphérique, observe que ces vecteurs d'écarts mécaniques ont un comportement globalement centrifuge avec une norme des vecteurs qui augmente avec la distance au

centre. C'est aussi pour le cas avec deux courbures dans le même sens donné dans le corps de cette thèse. Le cas de la selle de cheval n'est présenté qu'à titre de curiosité.

Ce comportement correspond globalement à un agrandissement. La forme la plus simple d'agrandissement est une homothétie de rapport  $k$  centrée sur le centre de la puce. Le point  $M_k$  correspondant à pour coordonnées latérales  $(u_k, v_k) = k (u_c, v_c) = k (x_{plan}, y_{plan})$ . Si l'on tient compte de cet agrandissement homothétique, l'écart résiduel (auss appelé déformation résiduelle) est  $E_{résiduel} = (u_{sim}, v_{sim}) - (u_k, v_k) = (u_{sim}, v_{sim}) - k (x_{plan}, y_{plan})$ . Le coefficient  $k$  est déterminé de manière à minimiser la somme quadratique des modules des écarts résiduels pour l'ensemble des points de la simulation mécanique.

Le champ résiduel obtenu est présenté sur la partie droite de la Figure 6.3. Ces déformations résiduelles de l'ordre du dixième de micromètre dans les cas les plus importants, c'est-à-dire très inférieures à la taille du pixel et donc complètement négligeables.

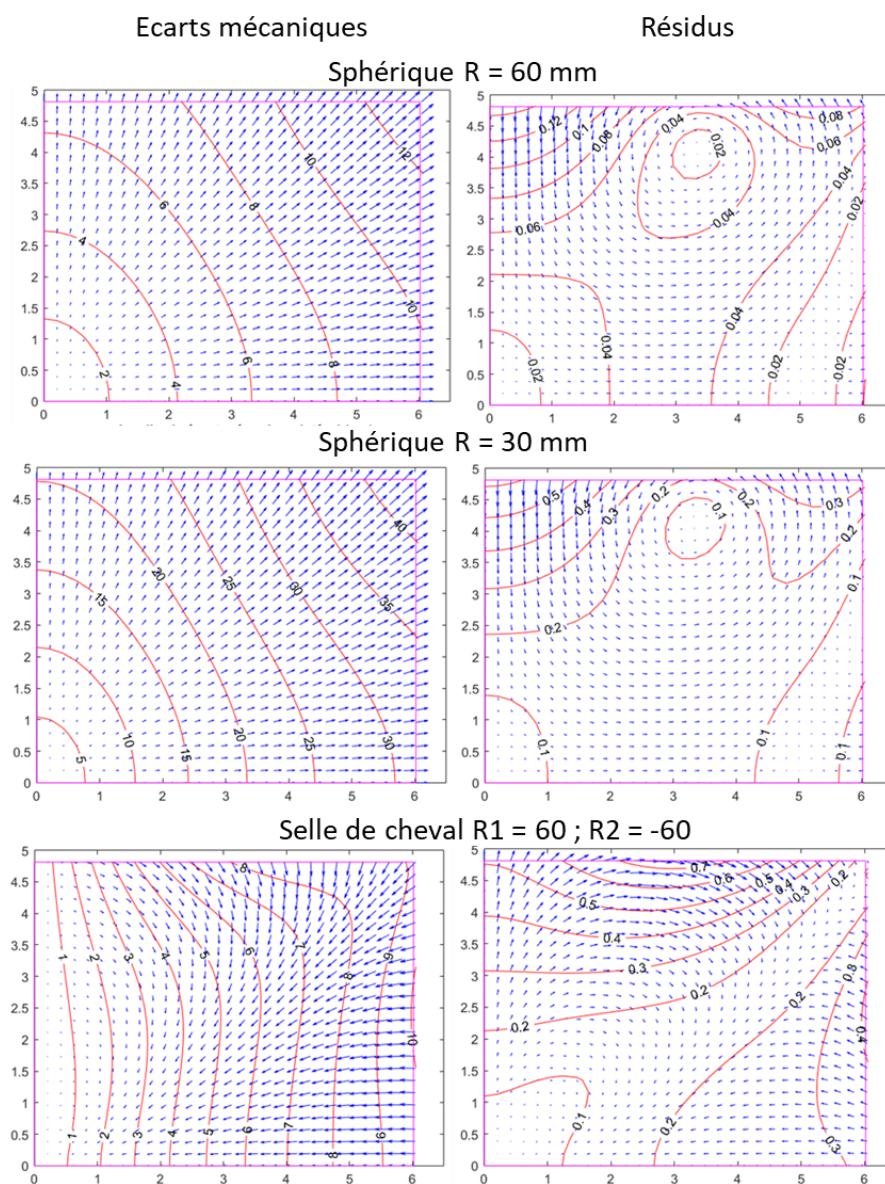


Figure 6.3 – Résultats des écarts mécaniques et résidus. Les vecteurs bleus ont comme point de départ la référence sphéro-cylindrique et comme point d'arrivée les coordonnées issues de la simulation. Leur longueur est fortement augmentée pour qu'ils soient visibles. Les courbes rouges sont les courbes de niveaux de leur longueurs en  $\mu\text{m}$ . Le rectangle rose représente  $\frac{1}{4}$  du microécran.

# 7 ANNEXE - COURBURE DE FOYER AVEC DISTORSION

Suite au chapitre 3, présentant la courbure de meilleur foyer lorsque l'on inclut la distorsion dans l'analyse, je détaille dans cette annexe les calculs permettant d'obtenir les résultats présentés.

## 7.1 RAPPEL DES ELEMENTS DU CHAPITRE 3

L'objectif du calcul est de déterminer les coordonnées du point M, illustré à la Figure 7.1. Ce point définit un point du champ, dont deux rayons suffisent à le positionner. En paraxial, le point M a pour coordonnées  $(0, Y')$ . La présence des aberrations de courbure de champ et de distorsion déplacent la position optimale pour ce point du champ dans l'espace. La courbure de champ apporte un déplacement longitudinal et la distorsion apporte un déplacement latéral. L'astigmatisme est aussi pris en compte, mais son action est différente puisqu'elle dégrade la qualité image, ce qui déplace longitudinalement la position optimale du pixel. Le point M est donc caractérisé par des coordonnées  $(E_z, Y' + E_y)$ , et le but est de déterminer  $E_z$  et  $E_y$ .

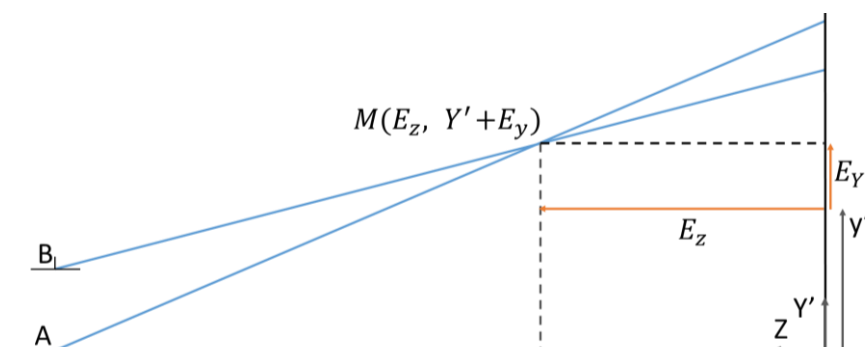


Figure 7.1 - Rayon principal et un rayon d'ouverture maximale, du même champ, défini par M.

## 7.2 CALCUL

Pour calculer  $E_z$  et  $E_y$ , il faut reprendre la fonction d'aberration en intégrant les 3 aberrations (courbure de champ, astigmatisme et distorsion). Les deux derniers termes sont des termes de pistons et de tilt, qui sont les éléments qui introduisent  $E_z$  et  $E_y$ , c'est-à-dire les inconnues que nous cherchons pour connaître M.

$$W = W_{222}y'^2y_p^2 + W_{220}y'^2(x_p^2 + y_p^2) + W_{311}y'^3y_p + \frac{n}{2}E_z \left(\frac{R_p}{R}\right)^2 (x_p^2 + y_p^2) + E_y n \frac{R_p}{R} y_p \quad 7.1$$

En dérivant la fonction d'aberration par rapport à  $x_p$  et  $y_p$ , on obtient  $\varepsilon_x$  et  $\varepsilon_y$ . Dériver selon  $x$  donne les équations pour le cas sagittal, et selon  $y$  le cas tangentiel. Dans ces deux cas, le point image est celui où les rayons convergent, donc les  $\varepsilon$  s'y annulent puisqu'ils représentent les défauts de focalisation. La condition à utiliser est donc :  $\varepsilon_x = 0$  et  $\varepsilon_y = 0$ .

$$\varepsilon_x = -\frac{R}{nR_p} \frac{\partial W}{\partial x_p} = -\frac{2R}{nR_p} W_{220} x_p y'^2 + \frac{R_p}{R} E_{z_{sagittal}} x_p = 0 \quad 7.2$$

$$\Rightarrow E_{z_{sagittal}} = -\frac{2R^2}{nR_p^2} W_{220} y'^2 \quad 7.3$$

Ce résultat est indépendant de la distorsion, et on retrouve donc le résultat énoncé par Welford.

L'autre cas est celui du cas tangentiel. Selon la même méthode, on a :

$$\varepsilon_y = -\frac{R}{nR_p} \frac{\partial W}{\partial y_p}$$

$$\varepsilon_y = -\frac{R}{nR_p} [2(W_{220} + W_{222})y'^2 y_p + W_{311}y'^3 + n \left(\frac{R_p}{R}\right)^2 y_p E_{z,tang} + \frac{nR_p}{R} E_{y,tang}] \quad 7.4$$

L'équation 3 donne  $E_z$  en fonction de  $y'$ , c'est le cas sagittal. En revanche, je ne devrais plus avoir de  $x_p$  dans cette équation... L'équation 4 permet de déterminer  $E_z$  et  $E_y$  en fonction du champ ( $y'$ ), défini par  $y_p$  (allant de -1 à 1), dans le cas tangentiel.

Comme l'équation 4 est vraie pour tous les rayons d'ouverture, j'en choisis 2 en particulier :  $y_p = 0$  et  $y_p = 1$ , illustré à la Figure 7.1. En se plaçant au point M, l'astigmatisme rend l'aberration transverse non nulle, on utilise donc la condition  $\varepsilon_y = a$ . En injectant ces valeurs dans l'équation 4, je peux en déduire les expressions de  $E_z$  et  $E_y$ .

### 7.2.1 Cas du rayon $y_p = 0$

J'injecte  $y_p = 0$ , dans l'équation 4 pour déterminer la coordonnée  $E_y$  du point M, car alors  $E_z = 0$ . Ceci annule tous les termes sauf celui de distorsion et de  $E_y$ , ce qui donne :

$$E_y = -a - \frac{R}{nR_p} W_{311} y'^3 \quad 7.5$$

### 7.2.2 Cas du rayon $y_p = Y_p / Y_p = 1$

De même, j'utilise l'équation 4 avec  $y_p = 1$  :

$$2(W_{220} + W_{222})y'^2 + W_{311}y'^3 + n \left(\frac{R_p}{R}\right)^2 E_z + \frac{nR_p}{R} E_y = 0 \quad 7.6$$

J'injecte l'équation 5 pour remplacer la valeur de  $E_y$ , ce qui annule les termes de distorsion et le terme d'aberration au point M dû à l'astigmatisme. J'obtiens alors :

$$E_z = -\frac{2R^2}{nR_p^2} (W_{220} + W_{222})y'^2 \quad 7.7$$

Nous retrouvons bien les deux résultats annoncés au chapitre 3.

## 8 ANNEXE - SYSTEMES OPTIQUES

Cette annexe donne les détails des systèmes du chapitre 5. La rédaction des données optiques est plus compliquée à présenter dans le cas de systèmes *freeform* à cause du nombre de coefficient et de la position des dioptries.

### 8.1 RESULTAT FINAL, SYSTEME COURBE

#### 8.1.1 Données numériques du systèmes

La description exhaustive du système *freeform* se fait en cinq tableaux.

surface	type de surface	matériaux
microécran (objet)	standard	-
In Coupler	standard	ZEONEX_E48R_2016
changeMat	even asphere	LEXAN_CXT17
combiner	biconic zernike	mirror
ExitPrism	biconic zernike	LEXAN_CXT17
Compensateur	biconic zernike	LEXAN_CXT17

*Tableau 8.1 – Description des surfaces et des matériaux.*

surface	Ry	Rx	Cy	Cx
microécran (objet)	5,08E+01	9,24E+01	0,00E+00	0,00E+00
In Coupler	1,96E+06	4,02E+00	7,06E+09	-9,87E-01
changeMat	-5,18E+00	-5,47E+00	-8,86E-01	-1,21E+00
combiner	-1,47E+01	1,38E+01	-8,38E-01	-1,05E+00
ExitPrism	7,37E+01	2,89E+01	0	0
Compensateur	inf	3,81E+00	0	-9,66E-01

*Tableau 8.2 – Paramètres des surfaces de base.*

surface	vecteur d'orientation			position		
	GLCA	GLCB	GLCC	GLCX	GLCy	GLCZ
microécran (objet)	0	-9,90E-01	1,40E-01	0	4,04E+01	5,56E+00
In Coupler	0	-9,71E-01	2,39E-01	0	2,13E+01	7,92E+00
changeMat	0	-9,46E-01	3,24E-01	0	1,08E+01	8,89E+00
combiner	0	-6,67E-01	7,45E-01	0	0,00E+00	9,54E+00
ExitPrism	0	0	1	0	0	0
pupille (stop)	0	0	1	0	0	-1,80E+01
Compensateur	0	0	1	0	-1,55E+00	2,48E+02

*Tableau 8.3 – Orientation et position des dioptries.*

	surface	In Coupler	changeMat	combiner	Compensateur
	rayon de normalisation	1,57E+01	1,50E+01	2,55E+01	2,60E+01
	z6	-2,16E+00	-1,58E+00	-9,10E+00	5,87E+02
	z7	2,17E-01	-1,15E+00	-3,84E-02	-8,56E+00
	z8	0	0	0	0
	z9	-1,02E-01	1,57E+00	1,42E-01	8,46E+00
	z10	-3,26E-02	-8,05E-03	-7,55E-03	1,80E-08
	z11	1,77E-05	-6,36E-04	1,28E-01	-1,02E+02
	z12	3,65E-02	-1,18E+00	0,00E+00	0
	z13	5,11E-03	2,31E-03	9,29E-04	-1,24E-09
	z14	2,01E-01	3,78E-01	3,31E-01	-1,44E+02
	z15	-1,20E-02	1,02E-01	1,60E-03	-5,01E-09
	z16	0	0	0	0
	z17	0	0	0	0
	z18	0	0	0	0
	z19	2,94E-02	-2,04E-02	2,12E-02	-2,16E-02
	z20	-6,66E-03	1,28E-02	-5,06E-03	0
	z21	-1,35E-02	8,24E-02	2,36E-02	0
	z22	0	0	0	0
	z23	0	0	0	0
	z24	0	0	0	0
	z25	-6,54E-04	1,89E-02	9,86E-04	0

Tableau 8.4 – Coefficients de Zernike.

surface	In Coupler	changeMat	Compensateur
x1	-7,16E-04	1,87E-03	4,60E-08
x2	-7,96E-02	-2,86E-03	-4,25E+00
x3	1,82E-05	1,87E-06	-1,34E-10
x4	-6,85E-05	1,92E-04	3,90E-03
x5	-1,23E-07	1,92E-07	1,79E-12
x6	1,72E-07	-7,13E-07	0
x7	1,93E-09	-1,19E-08	0
y1	2,87E-01	-2,32E-01	-1,89E+00
y2	-1,32E-02	9,07E-02	1,18E-01
y3	-1,30E-03	5,29E-03	5,51E-03
y4	-7,41E-06	-2,39E-04	3,98E-03
y5	-6,49E-07	2,36E-06	-3,34E-08
y6	-1,39E-07	-2,26E-07	0
y7	1,62E-09	3,17E-09	0

Tableau 8.5 – Coefficients asphériques.



### 8.1.2 Qualité image sur les configurations alternatives

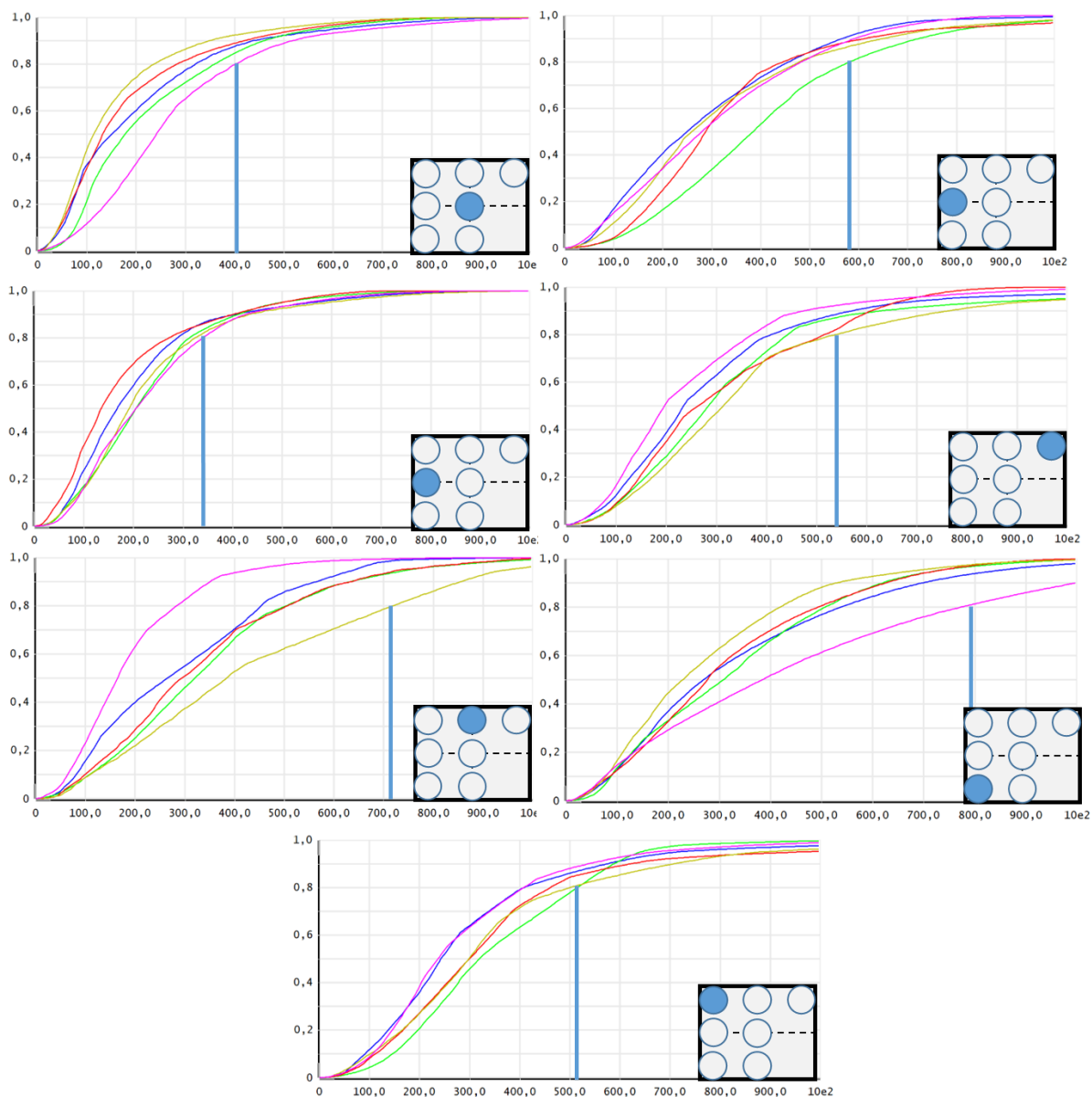


Figure 8.1 – Qualité image du MVF, voie augmentée, sur les sept configurations d'évaluation définies. On voit que deux cas sont un peu moins bon que ce que le cahier des charges prévoyait, sans que cela soit une mauvaise qualité image.

## 8.2 EVF

### 8.2.1 Système courbe

Type	Radius	Thickness	Material	Semi-Diameter
STANDARD	36,70	4,00	S-LAH58	10,00
STANDARD	-54,59	0,50		10,00
STANDARD	18,24	5,48	N-PSK3	9,00
STANDARD	-38,14	2,03	S-TIH53	9,00
STANDARD	21,97	16,00		7,84
STANDARD	-59,00	0,00		7,90

Tableau 8.6 – Table optique du système EVF utilisant un microécran courbe et servant de référence.

### 8.2.2 Systèmes plans

#### 8.2.2.1 Trois lentilles sphériques, 28 mm

Type	Radius	Thickness	Material	Semi-Diameter
standard	45,67	3,91	S-LAH58	10,00
standard	-45,10	0,50		10,00
standard	17,40	6,01	N-PSK3	9,00
standard	-37,26	2,32	S-TIH53	9,00
standard	20,89	15,28		7,70
standard	infinity	-	-	8,06

Tableau 8.7 – Trois lentilles sphériques, 28 mm.

#### 8.2.2.2 Trois lentilles sphériques, sans limite d'épaisseur

Type	Radius	Thickness	Material	Semi-Diameter
standard	85,69	11,27	S-LAH58	10,00
standard	-39,84	0,50		10,00
standard	23,25	4,84	N-PSK3	9,00
standard	-39,96	16,35	S-TIH53	9,00
standard	22,81	9,35		7,68
standard	Infinity	-		8,74

Tableau 8.8 – Table optique du système à trois lentilles dans limite d'épaisseur.

## 8.2.2.3 Trois lentilles, deux coniques, 28 mm

Type	Radius	Thickness	Material	Semi-Diameter	conic
even asph	43,27	3,92	S-LAH58	10,00	6,82
even asph	-72,40	0,50		10,00	
even asph	12,90	5,28	N-PSK3	9,00	-1,86
standard	-96,98	6,00	S-TIH53	9,00	
standard	11,94	12,31		6,65	
standard	Infinity	-		8,80	

Tableau 8.9 – Table optique du système du système à 3 lentilles, 28 mm.

## 8.2.2.4 Quatre lentilles asphériques, 28 mm

Dans ce cas, je sépare le tableau en deux cas pour la lisibilité.

Type	Radius	Thickness	Material	Semi-Diameter	conic
even asph	-22,52	2,00	S-LAL21	10,00	4,07
even asph	-12,13	0,10		10,00	-0,27
even asph	15,38	5,45	S-BAL35	9,00	-4,79
standard	-150,42	0,49		8,47	
standard	112,68	6,00	S-NBH56	9,00	
even asph	10,61	13,96		7,32	0,62
standard	Infinity	-		9,58	

Tableau 8.10 – Table optique du systèmes à quatre lentilles aspherique, de 28 mm.

Type	4e ordre	6e ordre	8e ordre	10e ordre
even asph	9,20E-05	1,16E-06	1,61E-08	5,48E-11
even asph	6,54E-05	2,07E-06	1,16E-09	1,48E-10
even asph	8,60E-05	1,06E-06	-7,33E-09	2,71E-11
standard				
standard				
even asph	-3,93E-04	2,16E-06		
standard				

Tableau 8.11 - Coefficients asphériques.

## 8.2.2.5 Quatre lentilles, sans limite d'épaisseur

Type	Radius	Thickness	Material	Semi-Diameter
standard	35,67	4,01	S-LAH58	10,00
standard	-57,33	0,50		10,00
standard	38,94	4,60	N-PSK3	9,00
standard	-26,99	6,00	S-TIH53	9,00
standard	59,13	16,00		8,44
standard	-20,64	1,29	N-FK5	8,15
standard	107,65	0,86		8,75
standard	Infinity	0,00		9,09

Tableau 8.12 – Table optique du système à quatre lentilles sans limite d'épaisseur.

## 8.2.2.6 Quatre lentilles, 28 mm et deux coniques

Type	Radius	Thickness	Material	Semi-Diameter	conic
standard	29,60	3,97	S-LAH58	10,00	1,74
standard	-101,97	0,50		10,00	
standard	20,84	5,87	N-PSK3	9,00	-0,43
standard	-21,72	4,24	S-TIH53	9,00	
standard	42,62	12,58		7,77	
standard	-12,32	0,79	N-FK5	6,78	
standard	-68,64	0,10		7,40	
standard	Infinity	0,00		7,72	

Tableau 8.13 – Table optique du système à quatre lentilles, avec deux coniques.

## 9 TESTS VISUELS

Pour évaluer la fréquence spatiale maximale perçue par un observateur, j'ai mis en place le test visuel décrit au chapitre 5. Dans cette annexe, je présente des remarques sur la mire USAF 1951, pour expliquer pourquoi je ne l'ai pas utilisée.

B. Walker indique utiliser la mire USAF 1951 pour caractériser la résolution de systèmes visuels [2]. On pourrait l'afficher sur le microécran, puis demander à l'utilisateur quel élément il arrive à distinguer. Cette méthode comporte cependant plusieurs défauts dans le cas de ce test visuel.

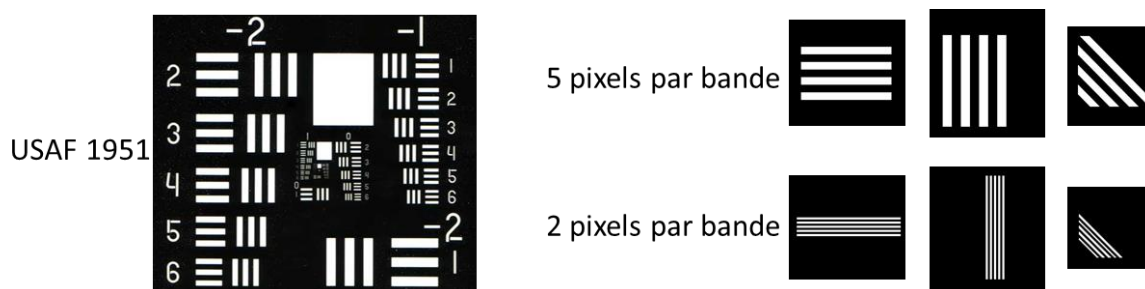


Figure 9.1 – Gauche : mire USAF 1951. Droite : Mires utilisée pour le test visuel.

D'une part, les barres sont soit verticales soit horizontales, ce qui est un cas particulier vis-à-vis de la perception des fréquences et peut in fine sur-estimer les performances. En effet, la perception visuelle est la plus performante pour ces deux orientations spécifiques, on appelle cela l'hyperacuité.

D'autre part, la mire USAF 1951 présente les fréquences à des points du champ différent. Il faudrait donc déplacer numériquement ou mécaniquement la mire pour positionner la fréquence étudiée au même point du champ du système optique, compliquant ainsi le montage.

Par ailleurs, en limite de résolution, il est difficile de savoir si on perçoit l'information ou si on l'imagine. Le motif prédictible de cette mire est donc un problème pour s'assurer des résultats obtenus.

Enfin, la mire est affichée par un microécran qui est pixellisé. On ne peut donc afficher que des fréquences qui sont des multiples de la taille d'un pixel sans avoir des d'aliasing. Or la mire USAF 1951 est normée en avec une progression géométrique des motifs (coefficient  $\sqrt[6]{2}$ ) et n'est donc pas adaptée à un microécran.

Les mires que j'ai créées pour le test visuel répondent à chacun de ces problèmes : une image par mire, un nombre aléatoire de cycle, trois orientations différentes et dont les fréquences sont des multiples de la taille des pixels.

---

# 10 TABLE DES FIGURES

---

Figure 1.1..... 2	Figure 2.10..... 36	Figure 3.18..... 75
Figure 1.2..... 3	Figure 2.11..... 36	Figure 3.19..... 75
Figure 1.3..... 3	Figure 2.12..... 38	Figure 3.20..... 76
Figure 1.4..... 5	Figure 2.13..... 39	Figure 3.21..... 76
Figure 1.5..... 6	Figure 2.14..... 40	Figure 3.22..... 78
Figure 1.6..... 7	Figure 2.15..... 43	Figure 3.23..... 80
Figure 1.7..... 7	Figure 2.16..... 43	Figure 3.24..... 80
Figure 1.8..... 9	Figure 2.17..... 44	Figure 3.25..... 82
Figure 1.9..... 9	Figure 2.18..... 45	Figure 3.26..... 83
Figure 1.10..... 11	Figure 2.19..... 46	Figure 3.27..... 84
Figure 1.11..... 12	Figure 2.20..... 46	Figure 3.28..... 86
Figure 1.12..... 12	Figure 2.21..... 48	Figure 3.29..... 89
Figure 1.13..... 13	Figure 2.22..... 49	Figure 3.30..... 92
Figure 1.14..... 13	Figure 3.1 ..... 58	Figure 3.31..... 93
Figure 1.15..... 16	Figure 3.2 ..... 59	Figure 3.32..... 97
Figure 1.16..... 17	Figure 3.3 ..... 60	Figure 3.33..... 99
Figure 1.17..... 17	Figure 3.4 ..... 61	Figure 3.34.....100
Figure 1.18..... 18	Figure 3.5 ..... 63	Figure 3.35.....100
Figure 1.19..... 20	Figure 3.6 ..... 64	Figure 3.36.....101
Figure 1.20..... 22	Figure 3.7 ..... 64	Figure 3.37.....102
Figure 1.21..... 23	Figure 3.8 ..... 65	Figure 3.38.....103
Figure 2.1..... 28	Figure 3.9 ..... 65	Figure 3.39.....104
Figure 2.2..... 28	Figure 3.10..... 66	Figure 3.40.....105
Figure 2.3..... 29	Figure 3.11..... 68	Figure 3.41.....106
Figure 2.4..... 29	Figure 3.12..... 69	Figure 3.42.....108
Figure 2.5..... 30	Figure 3.13..... 70	Figure 4.1 .....113
Figure 2.6..... 31	Figure 3.14..... 72	Figure 4.2 .....114
Figure 2.7..... 32	Figure 3.15..... 72	Figure 4.3 .....116
Figure 2.8..... 34	Figure 3.16..... 73	Figure 4.4 .....117
Figure 2.9..... 35	Figure 3.17..... 74	Figure 4.5 .....118

Table des figures

---

Figure 4.6.....	119	Figure 5.11.....	152	Figure 5.42.....	187
Figure 4.7.....	120	Figure 5.12.....	154	Figure 5.43.....	187
Figure 4.8.....	121	Figure 5.13.....	155	Figure 5.44.....	188
Figure 4.9.....	122	Figure 5.14.....	156	<b><u>Annexes</u></b>	
Figure 4.10.....	124	Figure 5.15.....	157	Figure 3.1 .....	201
Figure 4.11.....	125	Figure 5.16.....	158	Figure 3.2 .....	201
Figure 4.12.....	127	Figure 5.17.....	159	Figure 3.3 .....	202
Figure 4.13.....	128	Figure 5.18.....	160	Figure 3.4 .....	202
Figure 4.14.....	129	Figure 5.19.....	161	Figure 3.5 .....	202
Figure 4.15.....	131	Figure 5.20.....	162	Figure 3.6 .....	203
Figure 4.16.....	132	Figure 5.21.....	163	Figure 3.7 .....	203
Figure 4.17.....	134	Figure 5.22.....	165	Figure 3.8 .....	204
Figure 4.18.....	135	Figure 5.23.....	166	Figure 3.9 .....	205
Figure 4.19.....	136	Figure 5.24.....	167	Figure 3.10.....	205
Figure 4.20.....	137	Figure 5.25.....	168	Figure 3.11.....	206
Figure 4.21.....	137	Figure 5.26.....	168	Figure 3.12.....	206
Figure 4.22.....	138	Figure 5.27.....	169	Figure 3.13.....	206
Figure 4.23.....	139	Figure 5.28.....	170	Figure 3.14.....	207
Figure 4.24.....	140	Figure 5.29.....	171	Figure 3.15.....	207
Figure 4.25.....	140	Figure 5.30.....	171	Figure 3.16.....	208
Figure 4.26.....	141	Figure 5.31.....	172	Figure 3.17.....	209
Figure 5.1 .....	143	Figure 5.32.....	173	Figure 3.18.....	210
Figure 5.2.....	144	Figure 5.33.....	174	Figure 3.19.....	210
Figure 5.3.....	145	Figure 5.34.....	174	Figure 4.1 .....	214
Figure 5.4.....	146	Figure 5.35.....	177	Figure 5.1 .....	216
Figure 5.5.....	148	Figure 5.36.....	182	Figure 6.1 .....	219
Figure 5.6.....	148	Figure 5.37.....	182	Figure 6.2 .....	220
Figure 5.7.....	149	Figure 5.38.....	183	Figure 6.3 .....	221
Figure 5.8.....	149	Figure 5.39.....	183	Figure 7.1 .....	222
Figure 5.9.....	150	Figure 5.40.....	185	Figure 8.1 .....	226
Figure 5.10.....	152	Figure 5.41.....	186	Figure 9.1 .....	230

---

# 11 REFERENCES

---

1. B. B. Bruce and N. J. Newman, "Functional Visual Loss," *Neurologic Clinics* **28**, 789–802 (2010).
2. B. H. Walker, *Optical Design for Visual Systems*, SPIE press (2000).
3. D. Liguoro, *Anatomie morphologique et fonctionnelle du système nerveux central*, Éd. 2013 (Éd. Bergeret, 2013).
4. "anatomie et fonctionnement de l'oeil," Parc Laser Vision à Lyon.
5. "Oh say, can you see? The physiology of vision," <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/1453/0000/Oh-say-can-you-see-The-physiology-of-vision/10.1117/12.44348.full?SSO=1>.
6. G. Wetzstein, "the human visual system - EE 267 Virtual Reality - lecture 5," <http://stanford.edu/class/ee267/lectures/lecture5.pdf>.
7. M. Hébert, "Colorimetry," <http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=564>.
8. O. L. B. Roche, "Analyse morphologique et fonctionnelle de l'accommodation," thesis, Paris 8 (2009).
9. G. GAUSSORGUES, "Systèmes optroniques passifs - L'œil et la vision," <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-photonique-th13/fondamentaux-de-l-optique-42448210/systemes-optroniques-passifs-e4100/>.
10. M. Charbonneau, "Approche méthodologique et comparative des critères de qualité d'image, de perception et d'exploitabilité opérationnelle : application aux systèmes d'aide à la vision nocturne en aéronautique," thesis, Bordeaux 2 (2010).
11. e-penser, #01 *La Vue, Partie 1 - Les Sens Humains - e-Penser* (2018).
12. e-penser, #02 *La Vue, Partie 2 - Les Sens Humains - e-Penser* (2018).
13. G. Osterberg, *Topography of the Layer of Rods and Cones in the Human Retina* (A. Busck, 1935).
14. A. Patney, M. Salvi, J. Kim, A. Kaplanyan, C. Wyman, N. Benty, D. Luebke, and A. Lefohn, "Towards foveated rendering for gaze-tracked virtual reality," *ACM Trans. Graph.* **35**, 179:1-179:12 (2016).
15. N. B. Gatinel Studio, "La pupille de l'oeil," (n.d.).
16. T. Cognard, "La vision humaine - oeil et appareil photo, quelles différences ?," *Les Numériques* (2018).
17. S. Hecht, S. Schlaer, and M. H. Pirenne, "ENERGY, QUANTA, AND VISION," *Journal of General Physiology* **25**, 819–840 (1942).
18. "Direct detection of a single photon by humans | Nature Communications," <https://www.nature.com/articles/ncomms12172>.
19. "Light and Dark Adaptation - Webvision - NCBI Bookshelf," <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11525/>.
20. H. Strasburger, I. Rentschler, and M. Jüttner, "Peripheral vision and pattern recognition: A review," *Journal of Vision* **11**, 13–13 (2011).
21. M. J. Simpson, "Mini-review: Far peripheral vision," *Vision Research* **140**, 96–105 (2017).
22. I. P. Howard and B. J. Rogers, *Seeing in Depth: Volume 1: Basic Mechanics/ Volume 2: Depth Perception 2-Volume Set* (Oxford University Press, n.d.).
23. J. S. Stahl, "Amplitude of human head movements associated with horizontal saccades," *Experimental brain research* **126**, 41–54 (1999).
24. D. Guitton and M. Volle, "Gaze control in humans: eye-head coordination during orienting movements to targets within and beyond the oculomotor range," *Journal of neurophysiology* **58**, 427–459 (1987).
25. S. Liversedge, I. Gilchrist, and S. Everling, *The Oxford Handbook of Eye Movements* (OUP Oxford, 2011).



26. R. Rodieck and F. Koenig, *La Vision*, De Boeck Université (2000).
27. H. Gross, "Handbook of Optical Systems: Volume 4: Survey of Optical Instruments, Volume 4," <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527699247>.
28. "Characteristics of saccades during the near point of convergence test | Elsevier Enhanced Reader," <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0042698921001322?token=4A6125B31DA94A5597EAC886D3BAF6378DF6D89CF46425B7939FF511AE6942A6F36030730B879DEF8590836149E3B370&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210727150523>.
29. C. Devisme, "Etude de l'influence des disparités horizontales et verticales sur la perception de la profondeur en champ visuel périphérique," 292.
30. K. Graef and F. Schaefel, "Control of accommodation by longitudinal chromatic aberration and blue cones," *Journal of Vision* **12**, 14–14 (2012).
31. T. Maindron, B. Chambion, M. Provost, A. Vandeneynde, P. Peray, M. Zussy, J. Dechamp, C. Rossat, and S. Gonnin, "Curved OLED microdisplays," *Journal of the Society for Information Display* **27**, 723–733 (2019).
32. I. Underwood, "Introduction to Microdisplays," in *Handbook of Visual Display Technology*, J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, eds. (Springer, 2016), pp. 1–10.
33. H. X. Jiang and J. Y. Lin, "Nitride micro-LEDs and beyond - a decade progress review," *Opt. Express*, OE **21**, A475–A484 (2013).
34. P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishino, "Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum," in *Telemanipulator and Telepresence Technologies* (International Society for Optics and Photonics, 1995), Vol. 2351, pp. 282–292.
35. S. F. Ray, *Applied Photographic Optics: Lenses and Optical Systems for Photography, Film, Video, Electronic Imaging and Digital Imaging*, Third edition (Focal Press, 2002).
36. J. P. Rolland and O. Cakmakci, "The past, present, and future of head-mounted display designs," in *Optical Design and Testing II* (International Society for Optics and Photonics, 2005), Vol. 5638, pp. 368–377.
37. T. Maindron, "OLED: Theory and Principles," in *OLED Microdisplays* (John Wiley & Sons, Ltd, 2014), pp. 1–33.
38. F. Templier, "Overview of OLED Displays," in *OLED Microdisplays* (John Wiley & Sons, Ltd, 2014), pp. 35–51.
39. J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, eds., *Handbook of Visual Display Technology*, Springer References (Springer, 2012).
40. I. Underwood, "Liquid Crystal on Silicon Reflective Microdisplays," in *Handbook of Visual Display Technology*, J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, eds. (Springer, 2012), pp. 2043–2056.
41. I. Underwood, "Transmissive Liquid Crystal Microdisplays," in *Handbook of Visual Display Technology*, J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, eds. (Springer International Publishing, 2016), pp. 2833–2842.
42. M. Brown and H. Urey, "MEMS Microdisplays," in *Handbook of Visual Display Technology*, J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, eds. (Springer, 2016), pp. 1–15.
43. I. Underwood, "OLED and Other Emissive Microdisplays," in *Handbook of Visual Display Technology*, J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, eds. (Springer, 2012), pp. 2095–2107.
44. H. C. Nathanson, W. E. Newell, R. A. Wickstrom, and J. R. Davis, "The resonant gate transistor," *IEEE Transactions on Electron Devices* **14**, 117–133 (1967).
45. C. Féry and P. L. Roy, "OLED pour l'affichage et l'éclairage," 33 (2014).
46. H.-W. Chen, J.-H. Lee, B.-Y. Lin, S. Chen, and S.-T. Wu, "Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives," *Light: Science & Applications* **7**, 17168 (2018).
47. J. Herrnsdorf, J. J. D. McKendry, S. Zhang, E. Xie, R. Ferreira, D. Massoubre, A. M. Zuhdi, R. K. Henderson, I. Underwood, S. Watson, A. E. Kelly, E. Gu, and M. D. Dawson, "Active-Matrix GaN Micro Light-Emitting Diode Display With Unprecedented Brightness," *IEEE Transactions on Electron Devices* **62**, 1918–1925 (2015).
48. Y. Motoyama, K. Sugiyama, H. Tanaka, H. Tsuchioka, K. Matsusaki, and H. Fukumoto, "High-efficiency OLED microdisplay with microlens array," *Journal of the Society for Information Display* **27**, 354–360 (2019).

49. D. A. Owens and H. W. Leibowitz, "Oculomotor adjustments in darkness and the specific distance tendency," *Perception & Psychophysics* **20**, 2–9 (1976).
50. O. Cakmakci, D. M. Hoffman, and N. Balram, "3D Eyebox in Augmented and Virtual Reality Optics," in *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Wiley Online Library, 2019), Vol. 50, pp. 438–441.
51. "[2021] Marché De La Réalité Augmentée Et Mixte | Paysage Concurrentiel, Événements Et Développements De L'industrie," *INFO DU CONTINENT* (2021).
52. G. Kramida, "Resolving the Vergence-Accommodation Conflict in Head-Mounted Displays," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* **22**, 1912–1931 (2016).
53. H. Li, X. Zhang, G. Shi, H. Qu, Y. Wu, and J. Zhang, "Review and analysis of avionic helmet-mounted displays," *OE* **52**, 110901 (2013).
54. C. Gaschet, "DéTECTEURS courbes et déFORMABLES : applications multidisciplinaires," thesis, Aix-Marseille (2018).
55. C. Wiesmann, "Nano-structured LEDs – Light extraction mechanisms and applications," phd (2010).
56. F. Olivier, "Etude des caractéristiques électro-optiques de micro-LED GaN pour application aux micro-écrans haute-luminance," thesis, Grenoble Alpes (2018).
57. G. W. Stroke, "Principles of Optics. Electromagnetic theory of propagation, interference, and diffraction of light. Max Born and Emil Wolf. Pergamon, London; Macmillan, New York, ed. 2, 1964. xxviii + 808 pp. Illus. \$17.50," *Science* **146**, 1154–1154 (1964).
58. W. T. Welford, *Aberrations of Optical Systems* (Routledge, 2017).
59. M. J. Kidger, *Fundamental Optical Design*, SPIE Press Book (2001), Vol. PM92.
60. B. Nijboer and F. Zernike, "the diffraction theory of aberrations," (1942).
61. H. H. Hopkins, *Wave Theory of Aberrations* (Clarendon Press, 1950).
62. H. Gross, H. Zügge, M. Peschka, and F. Blechinger, "Aberrations," in *Handbook of Optical Systems* (John Wiley & Sons, Ltd, 2006), pp. 1–70.
63. J. Sasián, "Theory of sixth-order wave aberrations," *Appl. Opt.*, AO **49**, D69–D95 (2010).
64. H. Gross, H. Zügge, M. Peschka, and F. Blechinger, "Correction of Aberrations," in *Handbook of Optical Systems* (John Wiley & Sons, Ltd, 2006), pp. 215–289.
65. B. Kress, "See Through Optical Architectures for Wearable Displays," in *Imaging and Applied Optics 2014 (2014)*, Paper JTU1A.1 (Optical Society of America, 2014).
66. K. P. Thompson, "Aberration fields in tilted and decentered optical systems," (1980).
67. R. V. Shack and K. Thompson, "Influence Of Alignment Errors Of A Telescope System On Its Aberration Field," in *Optical Alignment I* (International Society for Optics and Photonics, 1980), Vol. 0251, pp. 146–153.
68. J. R. Rogers, "Origins and Fundamentals of Nodal Aberration Theory," in *Optical Design and Fabrication 2017 (Freeform, IODC, OFT) (2017)*, Paper JTU1C.1 (Optical Society of America, 2017).
69. K. Fuerschbach, J. P. Rolland, and K. P. Thompson, "Theory of aberration fields for general optical systems with freeform surfaces," *Optics Express* **22**, 26585 (2014).
70. J. P. Rolland, M. A. Davies, T. J. Suleski, C. Evans, A. Bauer, J. C. Lambropoulos, and K. Falaggis, "Freeform optics for imaging," *Optica*, OPTICA **8**, 161–176 (2021).
71. I. Kaya, K. P. Thompson, and J. P. Rolland, "Comparative assessment of freeform polynomials as optical surface descriptions," *Optics express* **20**, 22683–22691 (2012).
72. M. Ares, S. Royo, J. Caum, and C. Pizarro, "Comparison of B-spline and Zernike fitting techniques in complex wavefront surfaces," in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV* (International Society for Optics and Photonics, 2005), Vol. 5856, pp. 169–178.
73. T. Agócs, "Comparison of optical design methods of freeform surfaces for imaging applications," in *Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI* (International Society for Optics and Photonics, 2015), Vol. 9626, p. 962637.
74. O. Cakmakci, I. Kaya, G. E. Fasshauer, K. P. Thompson, and J. P. Rolland, "Application of radial basis functions to represent optical freeform surfaces," in *International Optical Design Conference 2010* (International Society for Optics and Photonics, 2010), Vol. 7652, p. 76520A.
75. H. Chase, "Optical design with rotationally symmetric NURBS," in *International Optical Design Conference 2002* (International Society for Optics and Photonics, 2002), Vol. 4832, pp. 10–25.

76. F. Muñoz, P. Benítez, and J. C. Miñano, "High-order aspherics: the SMS nonimaging design method applied to imaging optics," in *Optical Design and Engineering III* (International Society for Optics and Photonics, 2008), Vol. 7100, p. 71000K.
77. J. Ye, L. Chen, X. Li, Q. Yuan, and Z. Gao, "Review of optical freeform surface representation technique and its application," *OE* **56**, 110901 (2017).
78. "Using the TrueFreeForm surface for grid based freeform optimization · MyZemax," <https://my.zemax.com/en-US/Knowledge-Base/kb-article/?ka=KA-01890>.
79. A. Bauer, E. M. Schiesser, and J. P. Rolland, "Starting geometry creation and design method for freeform optics," *Nature Communications* **9**, 1756 (2018).
80. J.-B. Volatier and G. Druart, "Differential method for freeform optics applied to two-mirror off-axis telescope design," *Opt. Lett.*, *OL* **44**, 1174–1177 (2019).
81. "Starting point designs for freeform four-mirror systems," [https://www.researchgate.net/publication/321325987\\_Starting\\_point\\_designs\\_for\\_freeform\\_four-mirror\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/321325987_Starting_point_designs_for_freeform_four-mirror_systems).
82. Y. Zhong and H. Gross, "Initial system design method for non-rotationally symmetric systems based on Gaussian brackets and Nodal aberration theory," *Optics Express* **25**, 10016 (2017).
83. F. R. Fournier, "A review of beam shaping strategies for LED lighting," in *Illumination Optics II* (International Society for Optics and Photonics, 2011), Vol. 8170, p. 817007.
84. T. Yang, J. Zhu, X. Wu, and G. Jin, "Direct design of freeform surfaces and freeform imaging systems with a point-by-point three-dimensional construction-iteration method," *Opt. Express*, *OE* **23**, 10233–10246 (2015).
85. T. Gong, G. Jin, and J. Zhu, "Point-by-point design method for mixed-surface-type off-axis reflective imaging systems with spherical, aspheric, and freeform surfaces," *Opt. Express*, *OE* **25**, 10663–10676 (2017).
86. O. Dross, R. Mohedano, P. Benitez, J. C. Minano, J. Chaves, J. Blen, M. Hernandez, and F. Munoz, "Review of SMS design methods and real world applications," in *Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems* (International Society for Optics and Photonics, 2004), Vol. 5529, pp. 35–47.
87. M. Nikolic, "SMS for imaging systems using free-forms," phd, E.T.S.I. Telecomunicación (UPM) (2017).
88. D. K. Nikolov, A. Bauer, F. Cheng, H. Kato, A. N. Vamivakas, and J. P. Rolland, "Metaform optics: Bridging nanophotonics and freeform optics," *Science Advances* **7**, eabe5112 (2021).
89. "Camera - Sutton Panoramic Camera, London, circa 1861," <https://collections.museumsvictoria.com.au/items/407437>.
90. "Panon Camera Shoko," <http://camera-wiki.org/wiki/Panon>.
91. M. Johnson, "Spacecraft and Instrument," [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/spacecraft/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/spacecraft/index.html).
92. F. Xu, W. Huang, J. Liu, and W. Pang, "Design of lenses with curved Petzval image surfaces," *Journal of Modern Optics* **63**, 2211–2219 (2016).
93. B. Wheelwright, Y. Sulai, Y. Geng, S. Luanava, S. Choi, W. Gao, and J. Gollier, "Field of view: not just a number," in *Digital Optics for Immersive Displays* (International Society for Optics and Photonics, 2018), Vol. 10676, p. 1067604.
94. H. Runciman and J.-L. Meyzonnette, "Éléments de conception optique," *Techniques de l'ingénieur. Electronique* **6**, E4040-1 (1995).
95. Z. Challita, "Optique astronomique et plasticité : développements en fabrication optique pour des miroirs actifs de formes libres," thesis, Aix-Marseille (2013).
96. A. Bauer, "Optical design with freeform surfaces, with applications in head-worn display design," (2016).
97. Y. Zhong and H. Gross, "Vectorial aberrations of biconic surfaces," *J. Opt. Soc. Am. A*, *JOSAA* **35**, 1385–1392 (2018).
98. E. Muslimov, E. Hugot, M. Ferrari, T. Behaghel, G. R. Lemaitre, M. Roulet, and S. Lombardo, "Design of optical systems with toroidal curved detectors," *Opt. Lett.*, *OL* **43**, 3092–3095 (2018).
99. B. Zhang, G. Jin, and J. Zhu, "Towards automatic freeform optics design: coarse and fine search of the three-mirror solution space," *Light: Science & Applications* **10**, 65 (2021).

100. K. P. Thompson, K. Fuerschbach, T. Schmid, and J. P. Rolland, "Using nodal aberration theory to understand the aberrations of multiple unobscured three mirror anastigmatic (TMA) telescopes," in *Optical System Alignment, Tolerancing, and Verification III* (International Society for Optics and Photonics, 2009), Vol. 7433, p. 74330B.
101. A. Bauer, E. M. Schiesser, and J. P. Rolland, "Exploring the design space of 3-mirror freeform imagers," in *Frontiers in Optics / Laser Science (2020), Paper FM1A.5* (Optical Society of America, 2020), p. FM1A.5.
102. E. M. Schiesser, A. Bauer, and J. P. Rolland, "Effect of freeform surfaces on the volume and performance of unobscured three mirror imagers in comparison with off-axis rotationally symmetric polynomials," *Opt. Express*, OE **27**, 21750–21765 (2019).
103. X. Sang, Z. Chen, X. Gao, B. Yan, H. Li, Y. Wang, and L. Zhao, "Design and fabrication of a wide-angle off-axis three-mirror head-mounted display system," *Optik* **191**, 139–145 (2019).
104. K. Itonaga, T. Arimura, K. Matsumoto, G. Kondo, K. Terahata, S. Makimoto, M. Baba, Y. Honda, S. Bori, T. Kai, K. Kasahara, M. Nagano, M. Kimura, Y. Kinoshita, E. Kishida, T. Baba, S. Baba, Y. Nomura, N. Tanabe, N. Kimizuka, Y. Matoba, T. Takachi, E. Takagi, T. Haruta, N. Ikebe, K. Matsuda, T. Niimi, T. Ezaki, and T. Hirayama, "A novel curved CMOS image sensor integrated with imaging system," in *2014 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology): Digest of Technical Papers* (2014), pp. 1–2.
105. B. Chambion, C. Gaschet, M. Lombard, M. Fernandez, P. Joly, S. Caplet, F. Zuber, A. Vandeneynde, P. Peray, G. Lasfargues, M. Zussy, J. Deschamps, A. Bedoin, and D. Henry, "Collective Curved CMOS Sensor Process: Application for High-Resolution Optical Design and Assembly Challenges," in *2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* (2019), pp. 535–542.
106. B. Guenter, N. Joshi, R. Stoakley, A. Keefe, K. Geary, R. Freeman, J. Hundley, P. Patterson, D. Hammon, G. Herrera, E. Sherman, A. Nowak, R. Schubert, P. Brewer, L. Yang, R. Mott, and G. McKnight, "Highly curved image sensors: a practical approach for improved optical performance," *Opt. Express*, OE **25**, 13010–13023 (2017).
107. B. Chambion, C. Gaschet, T. Behaghel, A. Vandeneynde, S. Caplet, S. Gétin, D. Henry, E. Hugot, W. Jahn, S. Lombardo, and M. Ferrari, "Curved sensors for compact high-resolution wide-field designs: prototype demonstration and optical characterization," in *Photonic Instrumentation Engineering V* (International Society for Optics and Photonics, 2018), Vol. 10539, p. 1053913.
108. U. Vogel, P. Wartenberg, B. Richter, S. Brenner, K. Fehse, and M. Schober, "OLED-on-silicon microdisplays: Technology, devices, applications," in (2018), Vol. 2018-September, pp. 90–93.
109. J. Zhao, J. Tellkamp, V. Gupta, and D. R. Edwards, "Experimental Evaluations of the Strength of Silicon Die by 3-Point-Bend Versus Ball-on-Ring Tests," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* **32**, 248–255 (2009).
110. M. Y. Tsai and C. H. Chen, "Evaluation of test methods for silicon die strength," *Microelectronics Reliability* **48**, 933–941 (2008).
111. R. F. Cook and F. W. DelRio, "Material Flaw Populations and Component Strength Distributions in the Context of the Weibull Function," *Exp Mech* **59**, 279–293 (2019).
112. K. Tekaya, M. Fendler, K. Inal, E. Massoni, and H. Ribot, "Mechanical behavior of flexible silicon devices curved in spherical configurations," in *2013 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)* (IEEE, 2013), pp. 1–7.
113. Z. Rao, Y. Lu, Z. Li, K. Sim, Z. Ma, J. Xiao, and C. Yu, "Curvy, shape-adaptive imagers based on printed optoelectronic pixels with a kirigami design," *Nat Electron* **4**, 513–521 (2021).
114. H. L. Phan, J. Yi, J. Bae, H. Ko, S. Lee, D. Cho, J.-M. Seo, and K. Koo, "Artificial Compound Eye Systems and Their Application: A Review," *Micromachines* **12**, 847 (2021).
115. M. Provost, "Intégration de couches hybrides de base sol-gel dans les architectures de passivation de dispositifs OLED," phdthesis, Université Grenoble Alpes (2019).
116. J. Prins, D. MacCormack, D. Michelson, and K. Horrell, "Product and Process Comparison," in *Engineering Statistics Handbook*, NIST (n.d.).
117. N. Cheze, "Statistique inférentielle - Estimation. Tables statistiques," <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/42101210-probabilites-et-statistique/download/af169/statistique-inferentielle.html>.

118. A. Polian, M. Grimsditch, and I. Grzegory, "Elastic constants of gallium nitride," *Journal of Applied Physics* **79**, 3343–3344 (1996).
119. B. G. de Brugiére, F. Marion, M. Fendler, V. Mandrillon, A. Hazotte, M. Volpert, and H. Ribot, "A 10 $\mu$ m pitch interconnection technology using micro tube insertion into Al-Cu for 3D applications," 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC) 1400–1406 (2011).
120. A. Bauer, M. Pesch, J. Muschaweck, J. Muschaweck, F. Leupelt, and J. P. Rolland, "All-reflective electronic viewfinder enabled by freeform optics," *Opt. Express*, OE **27**, 30597–30605 (2019).
121. M. Fahle, "Parallel perception of vernier offsets, curvature, and chevrons in humans," *Vision Research* **31**, 2149–2184 (1991).
122. "Why are FFT and Huygens MTF results different on tilted image surfaces?," <https://support.zemax.com/hc/en-us/articles/1500005576222-Why-are-FFT-and-Huygens-MTF-results-different-on-tilted-image-surfaces->.
123. H. Gross, H. Zügge, M. Peschka, and F. Blechinger, "Tolerancing," in *Handbook of Optical Systems* (John Wiley & Sons, Ltd, 2006), pp. 595–716.
124. F. Zuber, B. Chambion, C. Gaschet, S. Caplet, S. Nicolas, S. Charrière, and D. Henry, "Tolerancing and characterization of curved image sensor systems," *Appl. Opt.*, AO **59**, 8814–8821 (2020).
125. T. Miletti, N. Truant, E. Gurabardhi, E. Francesca, F. Giartosio, and M. Francardi, "HMD quality evaluation of projected image: hardware assessment and software evaluation for distortions correction," in *Digital Optics for Immersive Displays* (International Society for Optics and Photonics, 2018), Vol. 10676, p. 106760C.
126. Y. Geng, J. Gollier, B. Wheelwright, F. Peng, Y. Sulai, B. Lewis, N. Chan, W. S. T. Lam, A. Fix, D. Lanman, Y. Fu, A. Sohn, B. Bryars, N. Cardenas, Y. Yoon, and S. McEldowney, "Viewing optics for immersive near-eye displays: pupil swim/size and weight/stray light," in *Digital Optics for Immersive Displays* (International Society for Optics and Photonics, 2018), Vol. 10676, p. 1067606.
127. E. Eisenberg and J. Jensen, "Measuring and qualifying optical performance of AR/VR/MR device displays and addressing the unique visual requirements of transparent AR/MR displays," in *Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR)* (International Society for Optics and Photonics, 2020), Vol. 11310, p. 113100S.
128. "Constructing mid-spatial frequency tooling errors for evaluation and tolerancing," <https://support.zemax.com/hc/en-us/articles/1500005490441-Constructing-mid-spatial-frequency-tooling-errors-for-evaluation-and-tolerancing>.
129. K. Rains, "Asphere Manufacturing Overview: The Good, the Bad, and the Ugly," <https://blog.lacroixoptics.com/blog/asphere-blog-series-overview>.
130. T. Houllier, N. Rousselet, Y. Surrel, and T. Lépine, "Advanced optical freeform substrates fabricated by ceramic 3D printing and controlled by deflectometry," in *Optical Fabrication, Testing, and Metrology VI* (International Society for Optics and Photonics, 2018), Vol. 10692, p. 106920P.
131. S. Birchfield, "Reverse-Projection Method for Measuring Camera MTF," *Electronic Imaging* **2017**, 105–112 (2017).
132. "Understanding tangential/sagittal in OpticStudio and how to rotate rays," <https://support.zemax.com/hc/en-us/articles/1500005488921-Understanding-tangential-sagittal-in-OpticStudio-and-how-to-rotate-rays>.
133. F. Viallefont-Robinet and D. Léger, "Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement," *Opt. Express* **18**, 3531 (2010).
134. "Validating the Imatest slanted-edge calculation | Imatest,".
135. J. Cadou, "Comparison of Two MTF Measurement Methods: Sine-Wave Vs Edge Gradient Analysis," 94.
136. "Correcting nonuniformity in slanted-edge MTF measurements | Imatest,".
137. O. van Zwanenberg, S. Triantaphillidou, R. Jenkin, and A. Psarrou, "Camera System Performance Derived from Natural Scenes," *ei* **2020**, 241–241 (2020).
138. K. P. Thompson, "Beyond Optical Design Interaction Between The Lens Designer And The Real World," in D. T. Moore and W. H. Taylor, eds. (1986), p. 426.
139. A. Bauer, J. P. Rolland, and K. P. Thompson, "Ray-based optical design tool for freeform optics: coma full-field display," *Optics Express* **24**, 459 (2016).

140. E. M. Schiesser, A. Bauer, and J. P. Rolland, "Estimating field-dependent nodal aberration theory coefficients from Zernike full-field displays by utilizing eighth-order astigmatism," *J. Opt. Soc. Am. A*, **JOSAA** **36**, 2115–2128 (2019).
141. T. Houllier and T. Lépine, "Comparing optimization algorithms for conventional and freeform optical design," *Opt. Express*, **OE** **27**, 18940–18957 (2019).
142. "Zernike coefficients," [https://www.telescope-optics.net/zernike\\_coefficients.htm](https://www.telescope-optics.net/zernike_coefficients.htm).
143. R. W. Gray, C. Dunn, K. P. Thompson, and J. P. Rolland, "An analytic expression for the field dependence of Zernike polynomials in rotationally symmetric optical systems," *Optics Express* **20**, 16436–16449 (2012).
144. Z. Malacara, D. Malacara-Doblado, D. Malacara-Hernandez, and J. E. A. Landgrave, "Astigmatic optical surfaces, characteristics, testing, and differences between them," *OE* **46**, 123001 (2007).

## RESUME

Suite au travail réalisé au CEA-Leti sur les capteurs courbes, et l'obtention de systèmes ultra compacts grâce à cette technologie, ce travail de thèse explore l'utilisation de microécran courbes dans des systèmes visuels pour les rendre plus compacts.

Une étude théorique des apports de la courbure aux systèmes visuels ainsi qu'aux systèmes *freeform* est développée. La courbure permet à la fois de simplifier la correction de l'aberration de courbure de champ, mais aussi de la distorsion. Par ailleurs, la courbure permet aussi d'augmenter le flux lumineux transmis depuis le microécran au système optique, avec des gains allant jusqu'à 20 % dans les cas favorables. Par rapport aux systèmes optiques *freeforms*, la courbure permet de libérer des degrés de libertés dans la conception des systèmes, ce qui peut améliorer la compacité du système final, sa qualité image ou en simplifier la fabrication. L'un des avantages significatifs, c'est que ces apports ne s'excluent pas l'un l'autre.

Suite à ces études théoriques, deux systèmes optiques sont conçus, dont l'un est fabriqué et caractérisé. Le premier système est un viseur à Réalité Augmentée, qui peut être intégré dans un appareil photographique, et composé de trois prismes *freeforms* collés. Ce système démontre les apports de la courbure à la fois en qualité image, en volume et en flux lumineux. Le second système, celui qui est fabriqué, est un viseur électronique à symétrie de révolution qui démontre les apports de la courbure en compacité ainsi qu'en difficulté de fabrication. Une caractérisation de ce second système est réalisée, qui inclut une mesure de contraste ainsi qu'un test visuel.

## ABSTRACT

After first developments at CEA-Leti on curved sensors and the demonstration of highly compact optical systems benefiting from curvature, this thesis explores the use of curved microdisplays in visual systems to make them more compact.

Advantages of curved microdisplays in visual *freeform* optical systems are studied theoretically. The curvature allows a better correction of field curvature aberration and of distortion. Also, the curvature allows improving the flux transmitted from the microdisplay to the optical system. Under most favorable circumstances, the gains reach about 20 %. For *freeform* systems, the curvature frees some new degrees of *freeform*, which can then be used to improve the compactness of the final system, its image quality or simplify its manufacturing. The possibility of combining all these positive impacts is a major result of this work.

After these theoretical studies, two optical systems are designed, and one of them is manufactured and characterized. The first is an augmented reality viewfinder, made of three *freeform* prisms bond together. It is meant to be used in cameras and demonstrates the benefits of using curved microdisplays on image quality, compactness and luminous flux. The second system is the one which is manufactured. It is a conventional electronic viewfinder demonstrating the benefits of curvature regarding compactness and easier manufacturing of the device. Its characterization includes a measure of the contrast and a visual test.