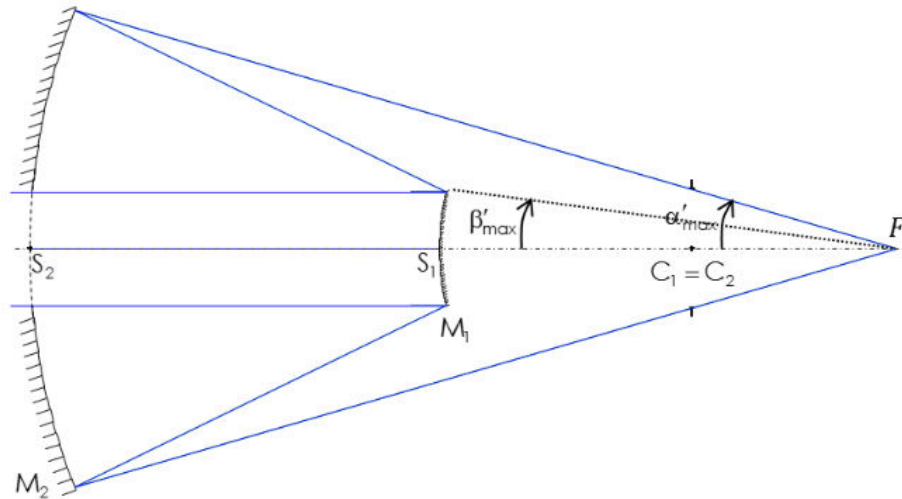


Projet de Conception Optique



I. Cahier des charges

Nous avons pour consigne de concevoir des objectifs de microscope pour des applications dans le domaine spectral étendu [200nm ; 20μm]. C'est pourquoi il nous a été imposé de concevoir des objectifs travaillant en réflexion (avec miroirs), cette condition sera automatiquement vérifiée. Il n'y a pas d'aberrations chromatiques pour les systèmes à miroirs.

On conçoit deux classes d'objectifs différents, chacune des deux classes comportera un objectif de grandissement x15 et un objectif de grandissement x40.

-Les objectifs de classe 1 travaillent en conjugaison $F \rightarrow$ infini (il s'agit de la configuration de départ de cette étude), une lentille de focale $f' = 200\text{mm}$, que l'on supposera dénuée d'aberrations, permet dans ce cas de projeter l'image à distance finie.

-Les objectifs de classe 2 travaillent en conjugaison finie $A \rightarrow A'$, c'est-à-dire que l'objectif projette l'image directement sur le détecteur; la distance entre le miroir de grand diamètre et le plan du détecteur dépend du grandissement de l'objectif (**c'est le «tirage optique» de l'objectif**); la distance mécanique entre le plan d'appui de l'objectif sur le statif du microscope et le plan du détecteur, quant à elle, est constante quel que soit le grandissement, et respecte le standard de 160mm de la plupart des microscopes (**c'est le «tirage mécanique» de l'objectif**).

Les objectifs conçus devront satisfaire le critère de Maréchal.

On nous fournit également les distances de tirage mécaniques tabulées :

	Distance de travail mécanique
Objectif × 15	23.8 mm
Objectif × 40	7.8 mm

Nous allons au cours de cette étude chercher à optimiser les objectifs de microscope travaillant avec une lamelle en verre d'une épaisseur de l'ordre de 170µm. L'optimisation concerne le front d'onde RMS.

II. Mise en Place paraxiale

Nous nous sommes basés sur les objectifs de microscopes similaire à ceux exigés disponible sur le site commercial de Thorlabs :

Mirror Coating		UV-Enhanced Aluminum ($R_{\text{abs}} > 80\%$ Over 200 nm - 20 µm)		
Magnification ^a		15X	25X	40X
Numerical Aperture		0.3	0.4	0.5
Focal Length		13.3 mm	8 mm	5.0 mm
Parfocal Distance ^b		63.3 mm	45.0 mm	30.0 mm
Back Focal Length		Infinity	Infinity	Infinity
Design Tube Lens Focal Length ^c		200 mm	200 mm	200 mm
Entrance Pupil Diameter ^d		8.0 mm	6.4 mm	5.1 mm
Working Distance ^b		23.8 mm	12.5 mm	7.8 mm
Field of View		1.2 mm	0.7 mm	0.5 mm
Resolution ^e		1.1 µm	0.8 µm	0.7 µm
Obscuration ^f	Secondary Mirror Only	22%	22%	18%
	Mirror and Spider Vanes	26%	26%	24%
Transmitted Wavefront Error		<λ/14 RMS at 200 nm		

Figure 1 : tableau des specs des objectifs réfléchissant de chez Thorlabs

Nous allons alors baser notre étude sur ces données venant de Thorlabs pour ensuite affiner l'optimisation répondant le mieux au cahier des charges.

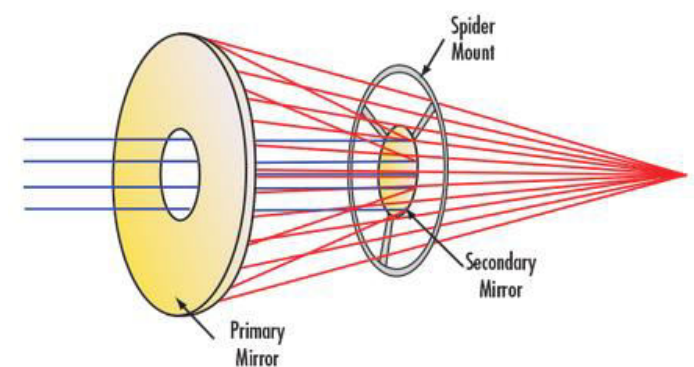


Figure 2 : objectif réfléchissant de chez EdmundOptics mettant en avant notamment les pattes servant à tenir le premier miroir

Condition d'aberration sphérique du 3^{ème} ordre nulle pour des miroirs sphériques concentriques :

$$u_0 = \frac{3-\sqrt{5}}{2} = 0,38$$

III. Performances

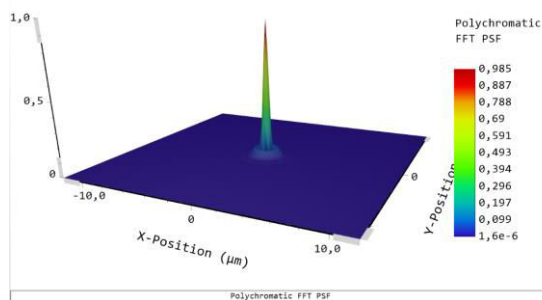
a. Classe 1

i. Objectif x15

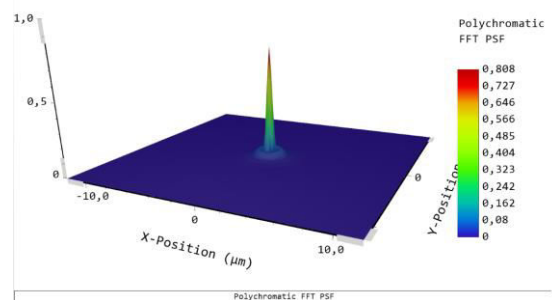
0	OBJECT	Standard ▾			Infini...		Infinity									Infinity
1		Standard ▾			Infini...		40,000									5,769
2	STOP (a	Standard ▾		M1	12,997 V		-21,133		MIRROR							4,399
3	aper)	Standard ▾		M2	34,203 P		21,133 P		MIRROR							18,816
4		Standard ▾			Infini...		23,630									11,530
5		Standard ▾			Infini...		0,170		N-BK7							0,417
6	IMAGE	Standard ▾			Infini...		-									0,371

Dans cette configuration, nous vérifions la condition sur la distance de travail trouvée en partie II (7,8mm). Nous allons maintenant analyser un des critères les plus direct afin de confirmer ou non que le critère de Maréchal est vérifié. On pourra noter que l'obturation liée aux miroirs a largement fait baisser le rapport de Strehl.

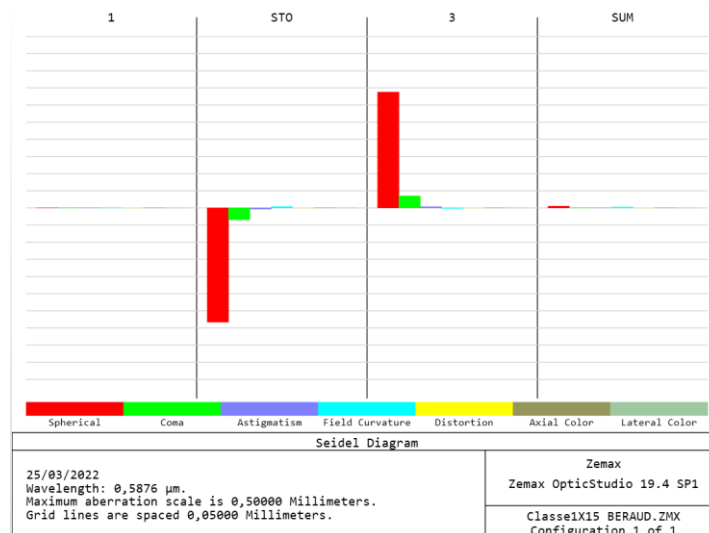
Sur l'axe :



Angle de champs de 1° :



Les PSF ci-dessus nous indique pouvoir attendre de cet objectif de respecter le critère de Maréchal pour un angle inférieur à 1°.



Nous pouvons voir grâce au diagramme de Seidel disponible que les aberrations du premier miroir compensent celles du deuxième. C'est une des techniques les plus utilisées pour annuler les aberrations parce qu'elle est très souvent moins coûteuse.

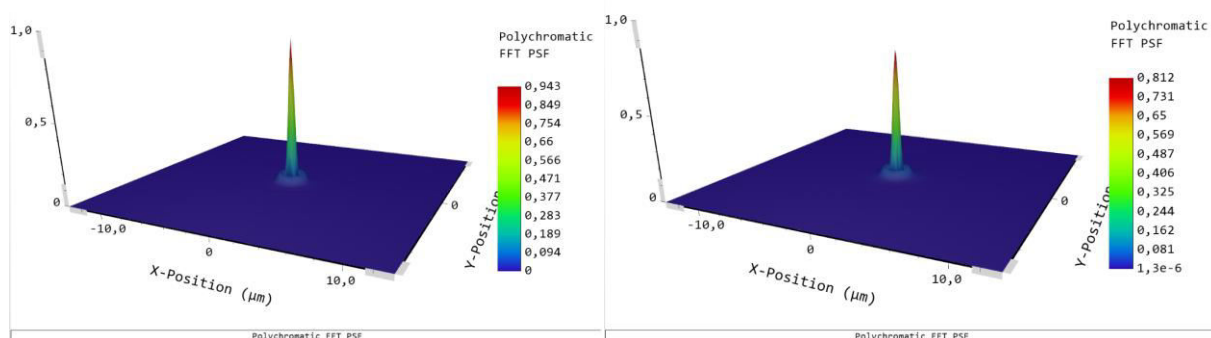
ii. Objectif x40

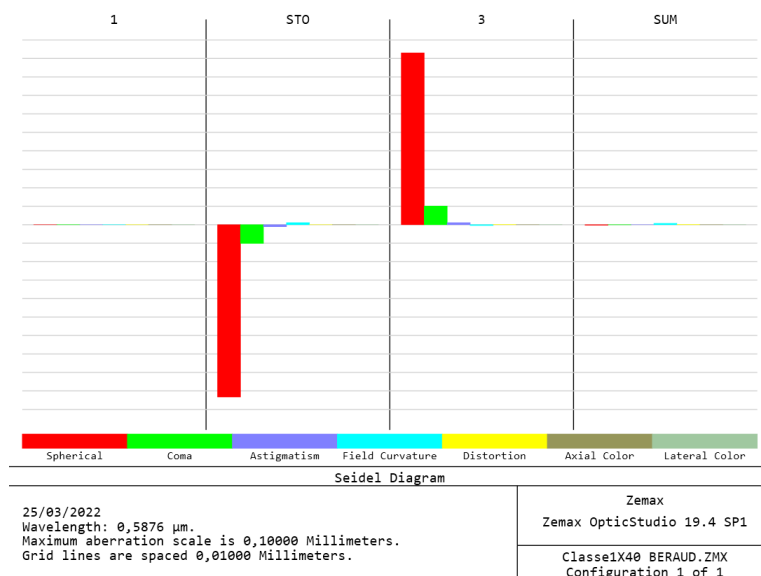
0	OBJECT	Standard ▾		Infini...	Infinity				Infinity
1		Standard ▾		Infini...	25,000				2,265
2	STOP	Standard ▾	M1	4,318 V	-7,045	MIRROR			1,400
3	(aper)	Standard ▾	M2	11,362 P	7,044	MIRROR			6,029
4	(aper)	Standard ▾		4,318	7,700				3,062
5		Standard ▾		Infini...	0,158	N-BK7			0,167
6	IMAGE	Standard ▾		Infini...	-				0,123

Dans cette configuration, nous vérifions toujours la condition sur la distance de travail trouvée en partie II (7,8mm). Nous allons vérifier que le critère de Maréchal est toujours vérifié.

Sur l'axe :

Angle de champs de 1,5° :





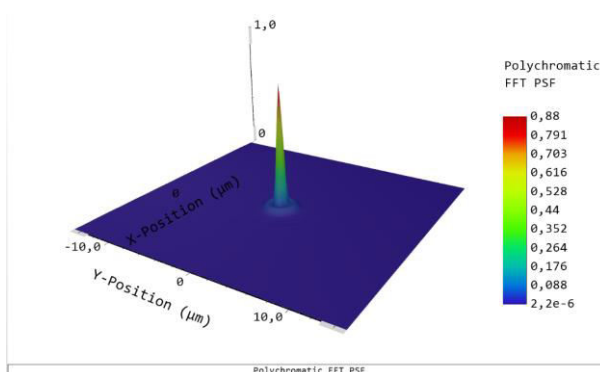
Notons alors que notre objectif de Schwarzschild est bien corrigé des aberrations.

b. Classe 2

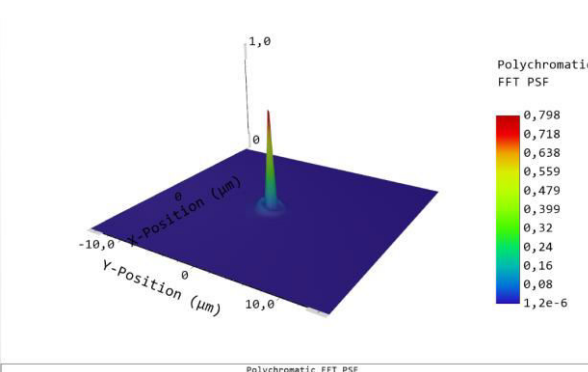
i. Objectif x15

0	OBJECT	Standard ▼		Infini...	0,000					0,200
1		Standard ▼		Infini...	185,000					0,200
2	STOP	Standard ▼	M1	12,817 V	-8,850	MIRROR				4,391
3	(aper)	Standard ▼	M2	20,585 V	8,850 P	MIRROR				10,406
4		Standard ▼		Infini...	23,630					8,302
5		Standard ▼		Infini...	0,170	BK7				0,053
6		Standard ▼		Infini...	0,000					0,016
7	IMAGE	Standard ▼		Infini...	-					0,016

Sur l'axe :

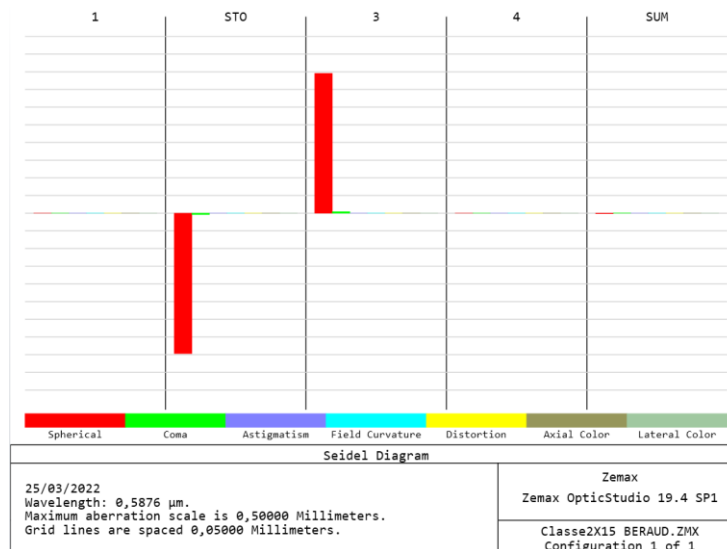


Objet de 200 μm :



Le critère de Maréchal n'est plus vérifié pour un objet de 200 μm (Field n°2) ce qui est satisfaisant pour le capteur CCD. Ça n'est cependant pas rédhibitoire puisque la taille du spot (2 μm) reste inférieure à la taille du pixel qui sera utilisé (5 μm).

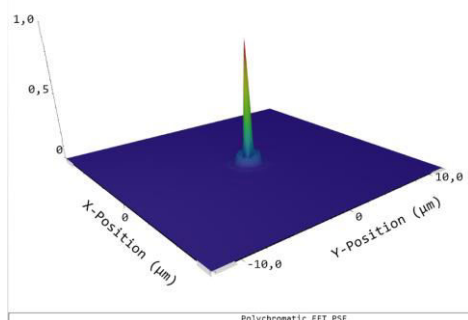
Spot Diagram									
25/03/2022					Zemax				
Units are μm . Airy Radius: 1,214 μm . Legend items refer to Wavelengths					Zemax OpticStudio 19.4 SP1				
Field :	1	2	3	4	5	6	7	8	
RMS radius :	0,749	0,793	0,765	0,772	0,772	0,757	0,751	0,754	
GEO radius :	1,373	1,831	1,601	1,730	1,665	1,546	1,498	1,421	
Scale bar :	4	Reference : Chief Ray							
					Classe2X15 BERAUD.ZMX				
					Configuration 1 of 1				



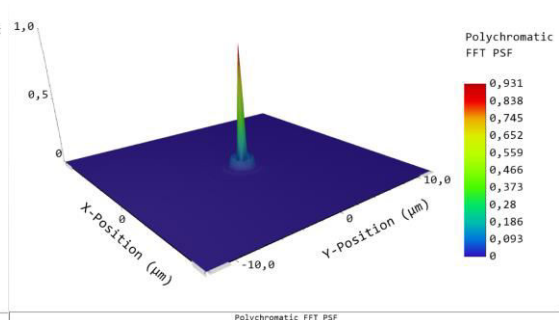
ii. Objectif x40

0	OBJECT	Standard ▾		Infini...	180,000					6,286
1	STOP	Standard ▾	M1	6,536 V	-12,420	MIR...				2,525
2	(aper)	Standard ▾	M2	19,092 V	12,420 P	MIR...				12,132
3	(aper)	Standard ▾	obscurati...	Infini...	11,988 V					7,347
4		Standard ▾		Infini...	0,170	BK7				0,239
5		Standard ▾		Infini...	0,000					0,178
6	IMAGE	Standard ▾		Infini...	-					0,178

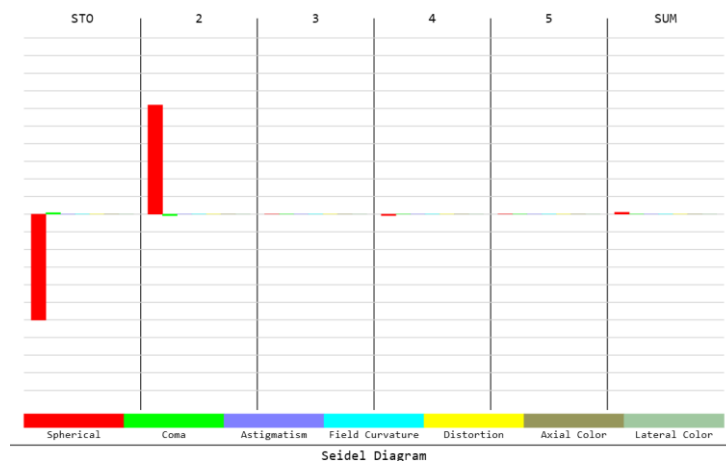
Sur l'axe :



Objet de 1mm :



Le rapport de Strehl est vérifié dans l'axe et dans le champ pour un objet de 1mm ce qui est plus que satisfaisant dans notre cas d'étude.



De la même manière, les aberrations sont à présent compensées.

IV. Tolérancement

Le tolérancement est une des parties les plus importante pour la conception de système optique, il nous permettra de garantir les performances choisies pour des exigences données.

L'objectif est de se placer dans les exigences **Standard** (10 franges) dans notre cas d'étude.

Nous allons, lors de cette étude du tolérancement de nos objectifs, considérer uniquement les défauts d'alignement et de tilt des éléments et non pas des surfaces. Nous analyserons aussi les défauts sur les rayons de courbure.

- a. Classe 1
 - i. Objectif x15

Ce qui va être le plus pertinent sera les « worst offenders » de notre système :

Worst offenders:				Value	Criterion	Change
Type						
TRAD	2	0	-0,20000000	0,00516952	0,00387728	
TTHI	2	3	0,20000000	0,00340445	0,00211221	
TTHI	1	2	-0,20000000	0,00340445	0,00211221	
TRAD	2	0	0,20000000	0,00224872	0,00095648	
TIRR	2		-0,20000000	0,00157436	0,00028212	
TTHI	1	2	0,20000000	0,00123724	-5,5000E-05	
TTHI	2	3	-0,20000000	0,00123724	-5,5000E-05	
TIRR	2		0,20000000	0,00105754	-0,00023470	

Figure 3 : Worst offenders de l'objectif x15

Pour cet objectif donc, nous en déduisons que les défauts les plus dégradants sur notre système sont ceux liés aux défaut sur le rayon de courbure des deux miroirs, et de leur position relative sur l'axe optique.

On peut donc constater d'après la Figure 3, que pour avoir des incertitudes tolérables pour le cahier des charges (change inférieur à 5µm pour être inférieur à la taille du pixel) il nous faut une

incertitude à 150µm sur les rayons de courbure des miroirs. L'incertitude sur l'écart entre les deux miroirs doit également être d'environ 150µm. Cela paraît être des exigences très contraignantes mais c'est parce que nous avons des optiques très petites de base. Cette exigence sur le rayon de courbure représente 3% du rayon de courbure. Nous ne pouvons cependant pas faire des optiques plus grandes compte tenu des exigences de distances de travail et de travail mécaniques.

90% >	0,00521003
80% >	0,00422721
50% >	0,00242471
20% >	0,00147957
10% >	0,00122845

Si l'on se garde ce critère de 5 µm d'exigence RMS sur le Spot, on peut considérer que 90% de la production satisfait les exigences du cahier des charges.

i. Objectif x40

Pour ce grandissement aussi le même critère de 5µm est requis sur les mêmes éléments (Rayons de courbure et distance séparant les deux miroirs). De nouveau, nos exigences peuvent paraître trop importantes pour une précision Standard.

Worst offenders:					
Type			Value	Criterion	Change
TRAD	2	0	-0,15000000	0,00470330	0,00401919
TTHI	1	2	-0,15000000	0,00340627	0,00272215
TTHI	1	2	0,15000000	0,00217509	0,00149098
TTHI	2	3	0,15000000	0,00208697	0,00140285
TRAD	2	0	0,15000000	0,00188982	0,00120570
TTHI	2	3	-0,15000000	0,00090160	0,00021748
TIRR	2		-0,20000000	0,00082869	0,00014457
TIRR	2		0,20000000	0,00073109	4,6970E-05

Il en est de même pour les déchets dus aux imprécisions de la production. C'est tout de même acceptable d'admettre que 90% de la production atteint les critères de performance.

90% >	0,00434156
80% >	0,00338740
50% >	0,00171479
20% >	0,00093906
10% >	0,00073938

a. Classe 2

i. Objectif x15

Worst offenders:

Type			Value	Criterion	Change
TTHI	1	2	0,10000000	0,00800923	0,00730246
TTHI	2	3	-0,10000000	0,00800092	0,00729415
TTHI	1	2	-0,10000000	0,00689648	0,00618971
TTHI	2	3	0,10000000	0,00688675	0,00617998
TRAD	2	0	0,10000000	0,00644631	0,00573953
TRAD	2	0	-0,10000000	0,00549052	0,00478374
TIRR	2		0,20000000	0,00111774	0,00041097
TIRR	2		-0,20000000	0,00038682	-0,00031996

Pour les objectifs de classe 2 on peut se rendre compte que ces exigences sont encore plus contraignantes. Il sera sûrement très difficile de pouvoir satisfaire ces contraintes.

90% >	0,00731832
80% >	0,00527216
50% >	0,00312255
20% >	0,00184381
10% >	0,00060537

Ici 80% de la production pourra être satisfaisante pour satisfaire les performances.

ii. Objectif x40

Worst offenders:

Type			Value	Criterion	Change
TEDX	1	1	-0,20000000	0,02082495	0,02020308
TEDX	1	1	0,20000000	0,02082495	0,02020308
TEDY	1	1	-0,20000000	0,02082495	0,02020308
TEDY	1	1	0,20000000	0,02082495	0,02020308
TTHI	1	2	-0,10000000	0,00854515	0,00792327
TRAD	2	0	-0,10000000	0,00800614	0,00738426
TTHI	1	2	0,10000000	0,00767607	0,00705419
TRAD	2	0	0,10000000	0,00706832	0,00644644
TRAD	1	0	0,10000000	0,00664363	0,00602175
TRAD	1	0	-0,10000000	0,00622943	0,00560755

Pour ce dernier objectif de microscope, les incertitudes les plus contraignantes sont les alignements de déplacement suivant x et y. Cet objectif est beaucoup plus exigeant que les 3 autres, il risque d'y avoir beaucoup de gaspillage lors de la production.

90% >	0,02398119
80% >	0,02190731
50% >	0,01385670
20% >	0,00661604
10% >	0,00587376

90% de la production serait a priori « à jeter » car elle ne satisferait pas le critère de performance.

V. Conclusion

Nous avons réalisé la conception de 4 objectifs à réflexion classes et de grandissements différents. Nous avons pu alors estimer leurs performances atteignables malheureusement il s'avère que le tolérancement révèle des précisions requises très ambitieuses pour de la conception avec une

précision dite « Standard » (épaisseur de 0,2mm). Les exigences de distances de travail et de travail mécaniques n'ont peut-être pas permis d'avoir des tolérances des plus réalistes.

Les objectifs de microscopes similaires de chez Thorlabs sont à vendre aux alentours de 2 000€, pour des ouvertures numériques de 0,3 – 0,5.