

Analyse de front d'onde : aberration sphérique

On s'intéresse aux aberrations sur l'axe d'un système optique de focale $f' = 150 \text{ mm}$, travaillant en conjugaison infini-foyer et ouvert à $f/5$. Les mesures du front d'onde sont réalisées à $\lambda = 0,633 \text{ }\mu\text{m}$. Pour un point-objet sur l'axe, le système optique étudié présente de l'aberration sphérique du 3^{ème} ordre. Pour une mise au point paraxiale, considérant donc une surface de référence centrée sur F'_p , l'écart normal aberrant du système est $\Delta(u, \varphi) = \Delta_{max} u^4$, avec (u, φ) les coordonnées polaires d'un point d'impact dans la pupille (cf. figure) et Δ_{max} l'amplitude maximale de l'écart normal.

L'ouverture numérique normalisée est notée u : $u = \frac{h}{h_{max}} = \frac{\alpha'}{\alpha'_{max}}$, avec respectivement h_{max} (ou α'_{max}) le rayon de la pupille (ou l'ouverture numérique image) ; φ est l'angle d'azimut du point d'impact dans la pupille (cf. figure ci-dessous).

En déplaçant le centre de la sphère de référence par rapport à laquelle la surface d'onde aberrante réelle est mesurée, l'écart normal aberrant est modifié et prend la forme $\Delta(u, \varphi) = \Delta_{max} u^4 + \Delta_\epsilon u^2$ dans la décomposition polynomiale de Seidel, où Δ_ϵ est associé à la défocalisation longitudinale ϵ par la relation $\epsilon = 2\Delta_\epsilon / \alpha'_{max}{}^2$.¹

Nous cherchons à comprendre l'impact d'un défaut de mise au point, caractérisé par la distance algébrique ϵ , et à mettre en évidence qu'un « meilleur foyer » existe.

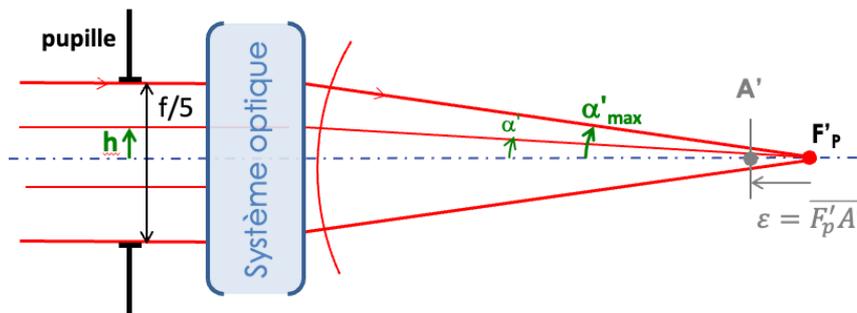


Figure 1 : Schéma du système optique

I. Mise en place et définitions

1. Quels sont la forme et le rayon de la réponse percussionnelle en limite de diffraction de ce dispositif ?
2. Qu'est-ce que mesure le rapport de Strehl ? Rappelez la relation entre la variance de l'écart normal σ_Δ^2 et le rapport de Strehl pour les faibles aberrations.
3. Exprimez la variance $\sigma_\Delta^2 = \overline{\Delta^2} - \bar{\Delta}^2$ de l'écart normal $\Delta(u, \varphi)$ en fonction de Δ_{max} et Δ_ϵ . Pour simplifier les notations, on pourra écrire $\Delta_\epsilon = \beta \times \Delta_{max}$.

On rappelle que la moyenne d'une fonction f sur une pupille circulaire est définie, en coordonnées polaires, par :

$$\bar{f} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(u, \varphi) u du d\varphi$$

4. Rappelez ce que spécifie le critère de Maréchal, sur l'écart normal et sur le rapport de Strehl.

¹ Le lien entre écart normal et défaut de mise au point vous sera démontré dans les prochains cours.

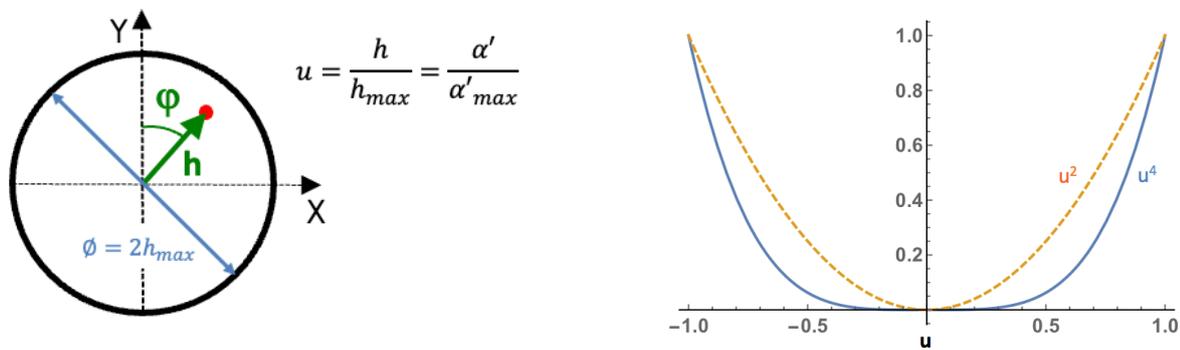


Figure 2 : (gauche) Définitions des coordonnées de la pupille ; (droite) allure des courbes $\Delta(u) = u^2$ et $\Delta(u) = u^4$

II. Écart normal d'aberration sphérique : effet de la mise au point

Par la suite, nous considérons que le dispositif optique étudié présente une aberration sphérique du 3^{ème} ordre caractérisée par $\Delta_{max} = 2\lambda$. La figure 3 présente plusieurs écarts normaux aberrants pour cette valeur de Δ_{max} mais différents plans de mise au point ($\beta \neq 0$). La figure 4 (gauche) présente les profils superposés de ces mêmes écarts normaux $\Delta(u)$.

1. Mise au point au foyer paraxial ($\beta = 0$)

- Représentez la surface d'onde aberrante et la surface d'onde de référence pour une mise au point au foyer paraxial.
- Exprimez σ_Δ au foyer paraxial ($\beta = 0$) en fonction de Δ_{max} .
- Évaluez numériquement σ_Δ dans le cas étudié ($\Delta_{max} = 2\lambda$) : le critère de Maréchal est-il vérifié ?
- Parmi les fronts d'onde représentés en figure 3, quel est celui qui correspond à une mise au point au foyer paraxial ? Justifiez votre réponse.
- Que pouvez-vous prévoir de la forme et de la dimension de la réponse percussionnelle (RPI) du système optique dans ces conditions ? Quelle RPI représentée en figure 4 correspond à cette mise au point ?

2. Mise au point au meilleur foyer

Le meilleur foyer est défini comme le plan dans lequel les aberrations ont l'impact le plus faible sur la réponse percussionnelle, c'est-à-dire qu'il en réduit les déformations.

- Pourquoi déterminer la position du meilleur foyer revient-il ici à minimiser σ_Δ ?
 - Quelle valeur de β minimise σ_Δ ? Quelle est alors la valeur de σ_Δ ?
 - Évaluez numériquement σ_Δ dans ce cas : le critère de Maréchal est-il vérifié ?
 - Parmi les fronts d'onde représentés en figure 3, quel est celui qui correspond à une mise au point au meilleur foyer ?
 - Exprimez la position du meilleur foyer par rapport au foyer paraxial ϵ , en fonction de Δ_{max} et l'ouverture numérique α'_m . Évaluez numériquement cette valeur.
 - Que pouvez-vous prévoir de la forme et de la dimension de la réponse percussionnelle du système optique dans ces conditions ? Quelle RPI représentée en figure 4 correspond à cette mise au point ?
- À quelle mise au point pourraient correspondre les deux autres fronts d'onde de la figure 3 ? Associez les réponses percussionnelles correspondantes.
 - Réduire l'ouverture numérique de $\sqrt{2}$ (soit $f/7$) permettrait-il de vérifier le critère de Maréchal au foyer paraxial ? au meilleur foyer ? Détaillez votre réponse.

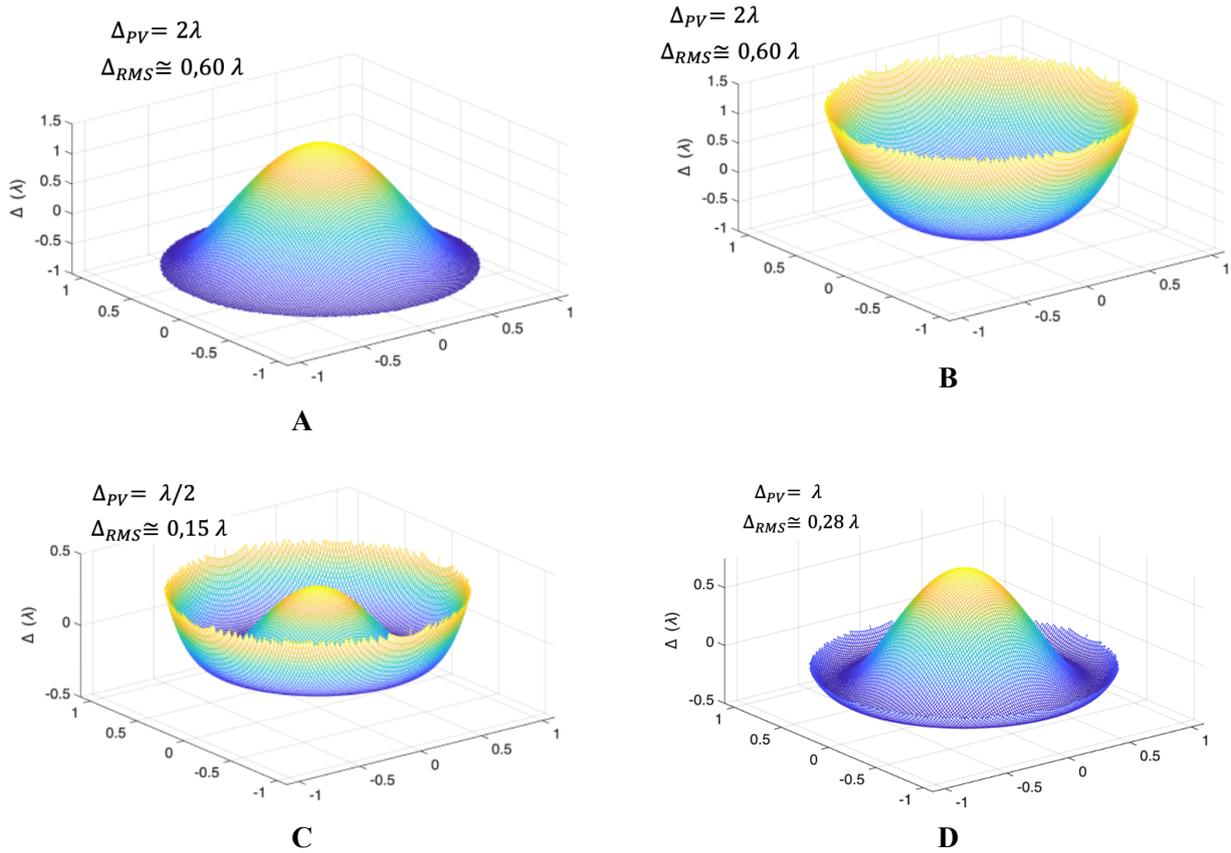


Figure 3 : Écarts normaux aberrants $\Delta(u, \varphi)$ pour différents plans de mise au point ; les écarts normaux sont représentés sur une pupille circulaire normalisée, les effets de bord sont dus à l'échantillonnage de la pupille.

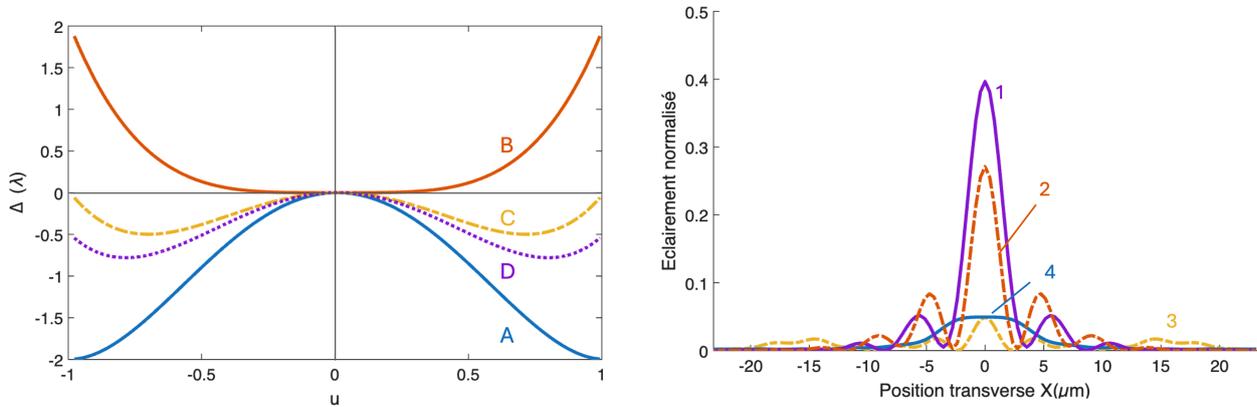


Figure 4 : (gauche) Profils des différents écarts normaux aberrants $\Delta(u)$ pour différents plans de mise au point ; (droite) Profils des réponses percussionnelles pour les plans de mise au point choisis.

Éléments de réponses :

I.3. $\sigma_{\Delta}^2 = \frac{\Delta_{max}^2}{3} \left(\frac{4}{15} + \frac{\beta}{2} + \frac{\beta^2}{4} \right)$

II.1.d & e front d'onde B – RPI 4

II.2.b. $\beta = -1$; $\sigma_{\Delta} = \frac{\Delta_{max}}{6\sqrt{5}}$

II.2.e. $\epsilon = -\frac{2\Delta_{max}}{\alpha'_m} \cong -250 \mu\text{m}$

II.2.d & f front d'onde C – RPI 1

II.3. A = foyer marginal (RPI 3) ; D = mise au point intermédiaire entre C et A (RPI2)

II.4. $\Delta'_{max} = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow$ au foyer paraxial $\sigma'_{\Delta} \cong 0,15 \lambda$ et au meilleur foyer $\sigma'_{\Delta} \cong 0,04 \lambda$