

Matière : *Conception de Systèmes Optiques*

Titre du document : *Cours 1 à 3*

Contenu:

Introduction

Méthodes d'évaluation des aberrations

- Approche géométrique
- Écart normal
- Réponse percussionnelle

Cursus/option : **2A Palaiseau**

Date de mise à jour : **Septembre 2024**

Année scolaire : **2024/2025**

Autrice : **Gaëlle Lucas-Leclin**



Semestre 1

Cours = 14 x 2 h = 28 h

TD papier = 6 x 1,5 h = 9 h

TD ordi = 6 x 3 h = 18 h

OpticStudio® Logiciel ZEMAX OpticStudio - disponible en salles d'info

Enseignants :

Y. Sortais / G. Lucas-Leclin

+ X. Délen / E. Papagiannouli

M. Fayat / N. Juppet

G. Peyre-Pradat

Evaluation :

- 3 QCM TD (TD 1 – 3 – 6) – bonus
- Partiel (15 octobre) – 33%
- CR TD Zemax (S46 - novembre) – 17%
- Examen écrit (S2 – 13 janvier) – 50%

= 55% UE Fondamentaux d'Optique

Documents en ligne

→ Emplois du temps

7P-138-PHO

→ Documents en ligne **eCampus**

CONTENUS

Généralités

Documents de cours

Documents de TD

Exercices et quizz

Annales

Bibliographie et ressources externes

FORUM

Questions & Réponses

Cours n°1 : Rappels d'optique instrumentale

A faire avant le 1^{er} cours : quelques rappels sur l'optique paraxiale et les conditions de stigmatisme/aplanétisme dans les systèmes optiques. Leçons et exercices d'application.

Durée : 90 mn

DOSSIER

Cours

PPT

DOSSIER

Polys

Résumés

Présentations faites en cours

→ Impression sur demande

Divers exercices corrigés et quizz en lien avec les cours

Introduction

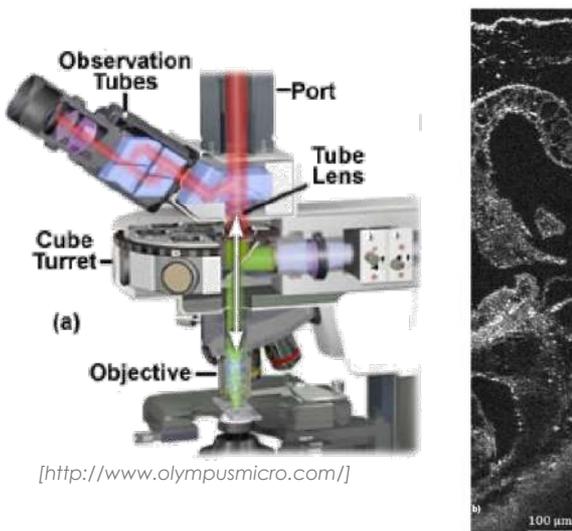
Conception de Systèmes Optiques
Cours n°1

Gaëlle Lucas-Leclin



Enjeux de la conception optique

Observer un objet biologique en
microscopie haute résolution?



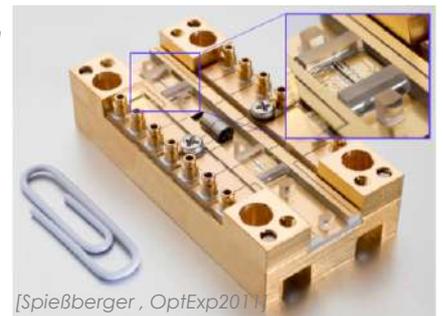
[<http://www.olympusmicro.com/>]

Coupe transverse par imagerie
OCT plein champ d'un tissu
animal ex-vivo

[Sacchet, OptExp2008]

Coupler un faisceau laser dans une
fibre optique ou un guide d'ondes ?

Intégration d'un
laser DBR +
amplificateur
évasé



[Spießberger, OptExp2011]

Filmer, photographier ?

Lentilles liquides



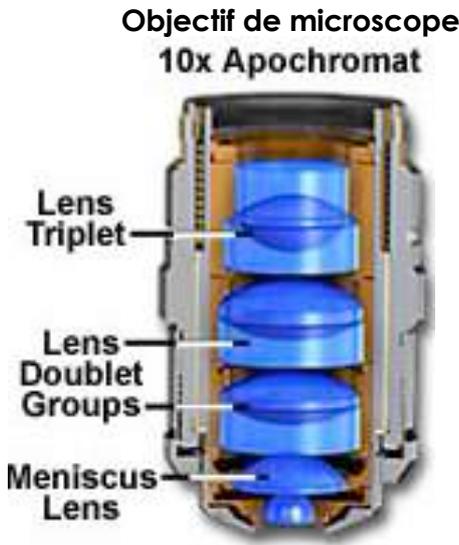
[www.varioptic.com]

Zoom x14 – Grand angle



[www.angenieux.com]

[http://www.olympusmicro.com/]



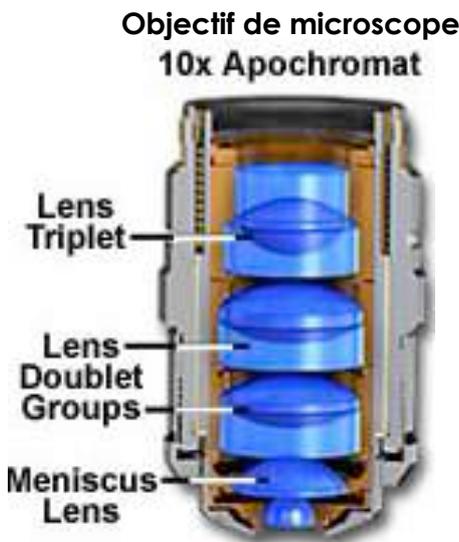
Conception de systèmes optiques

Optique instrumentale

- Définition d'une configuration optique
 - ON, champ utile
 - Grandeurs *paraxiales* : f' , g_y
 - Gamme spectrale
- Choix d'une solution optique
 - Dioptrique ou miroirs
 - Position de la pupille
- Correction des défauts
 - Évaluation des aberrations
 - Correction / Optimisation du système
 - Complexification de la solution optique
- Tolérancement
- Proposition d'un système optique réel

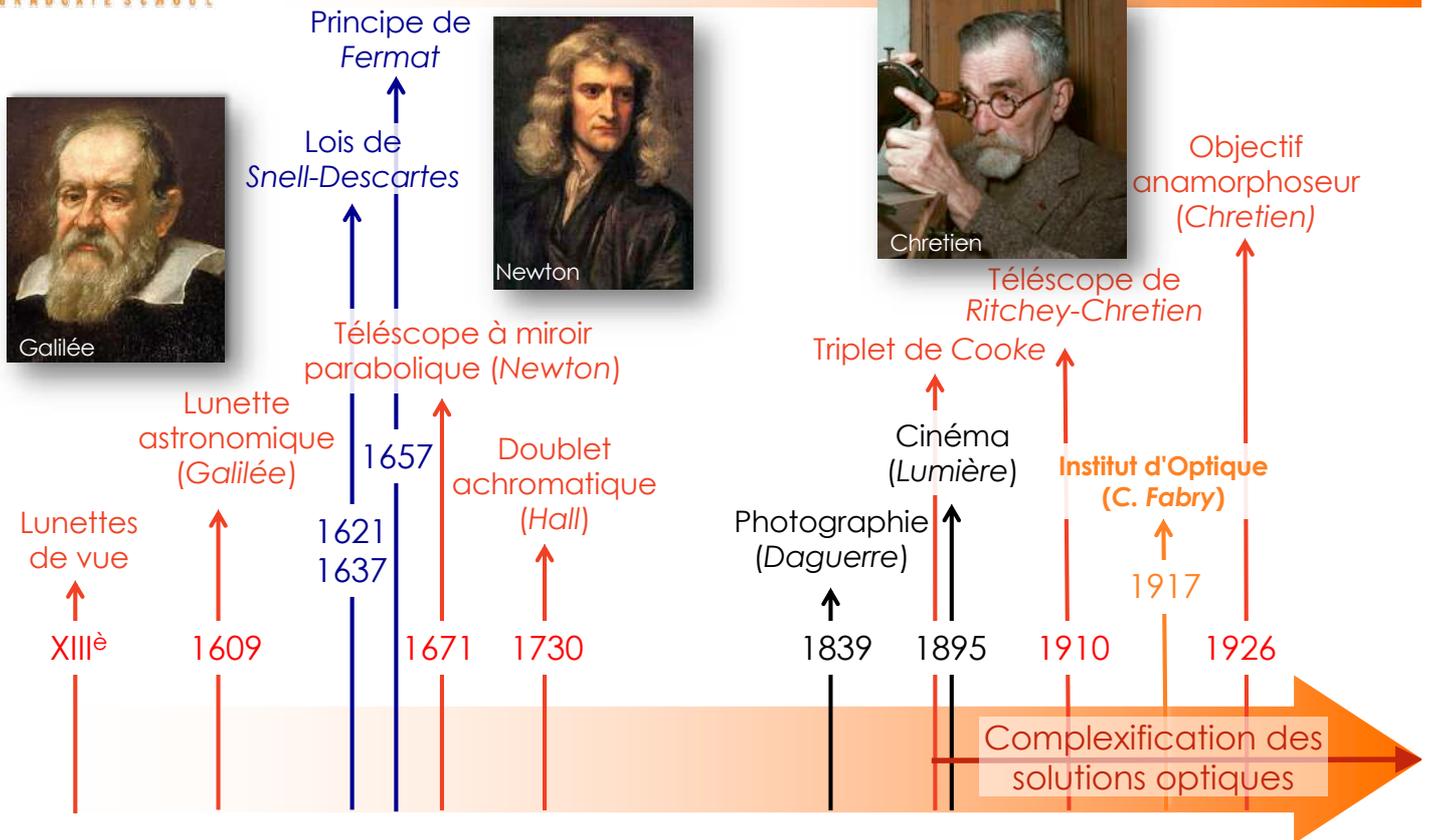
Outils de la conception optique

[http://www.olympusmicro.com/]



- Maîtrise de l'optique paraxiale
- Connaissance approfondie des principales aberrations (*géométriques, chromatiques*)
- Compréhension/application des critères d'évaluation de la qualité d'un dispositif
- Calcul analytique de systèmes simples
- Conception assistée par ordinateur

= objectifs du cours de CSO 2A Palaiseau



[Photos- Wikipedia]

Rappels d'optique instrumentale

eCampus

CONTENUS

Généralités

Documents de cours

Documents de TD

Sessions Collaborate

Questionnaires

Annales

LEÇON

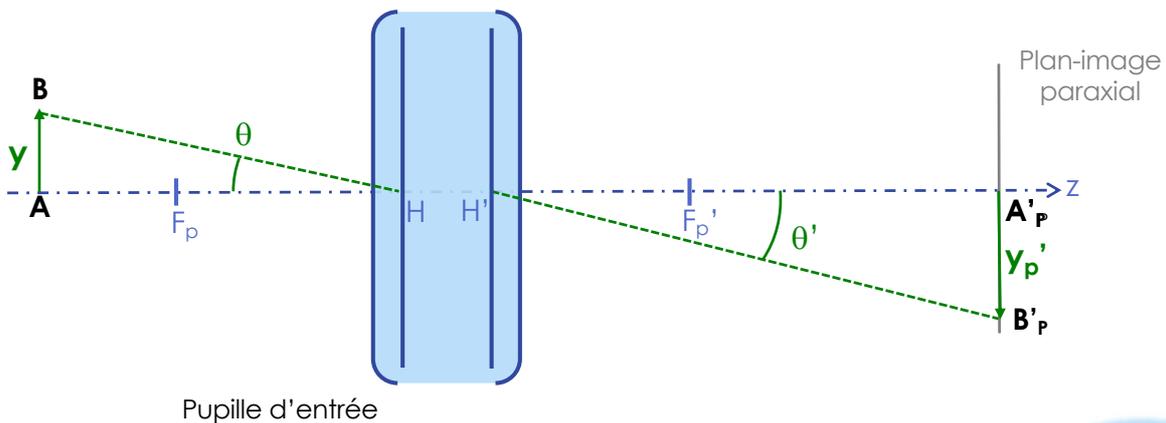


Cours n°1 : Rappels d'optique instrumentale

Contenu :

- Approximation paraxiale
- Description d'un système optique
- Ouverture et champ
- Stigmatisme, aplanétisme

Système optique

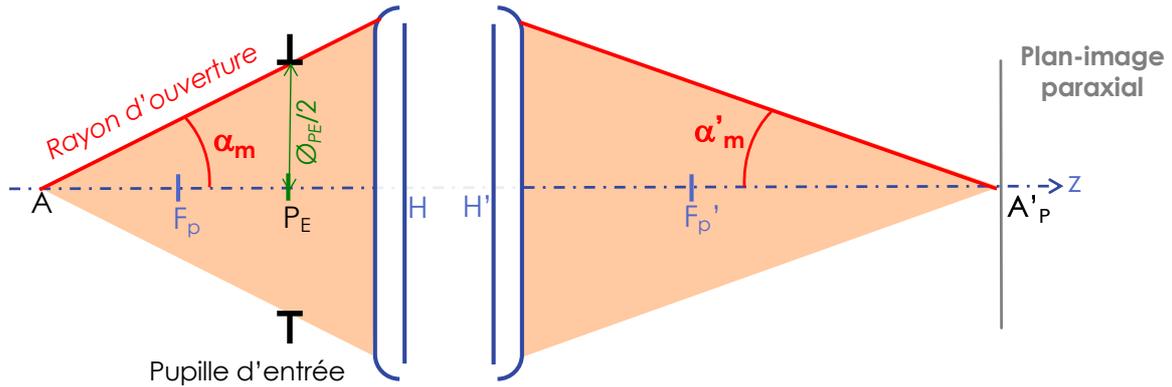


Relations paraxiales: approximation de Gauss

- focale $f' = \overline{H'F_p'}$
- conjugaison $\frac{n'}{\overline{H'A_p'}} - \frac{n}{\overline{HA}} = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$ $\overline{F_pA} \cdot \overline{F_p'A_p'} = f \cdot f'$
- grandissement transverse $g_y = \frac{y_p'}{y} = \frac{n}{n'} \frac{\overline{H'A_p'}}{\overline{HA}}$
 $= -\frac{f}{\overline{F_pA}} = -\frac{\overline{F_p'A_p'}}{f'}$

Système linéaire

$$\begin{cases} y' = g_y \times y \\ ON' = ON / g_y \end{cases}$$



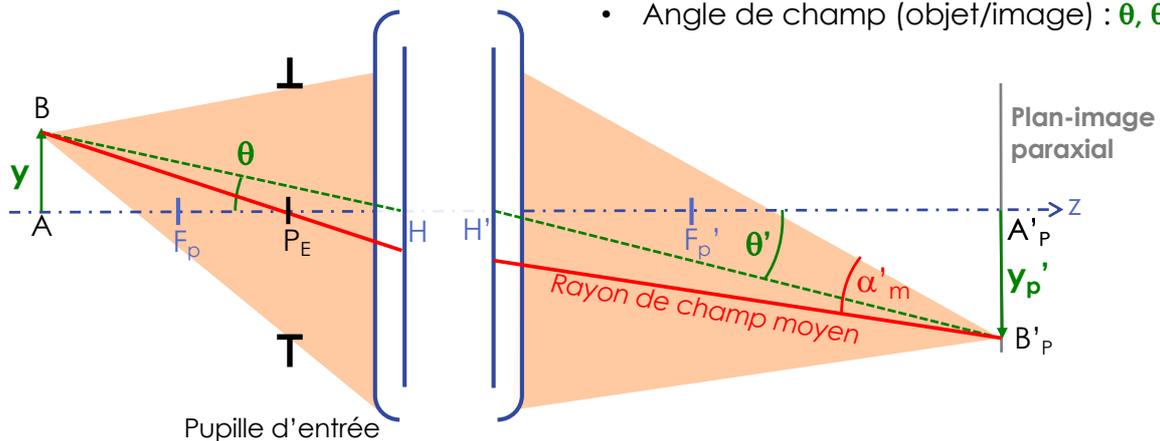
- **Ouverture Numérique** : $ON_{objet} = n \times \sin \alpha_m$ et $ON_{im} = n' \times \sin \alpha'_m$
définie par :

Ø de la pupille (entrée/sortie) : ϕ_{PE}, ϕ_{PS}
Angle d'ouverture (objet/image) : α_m, α'_m

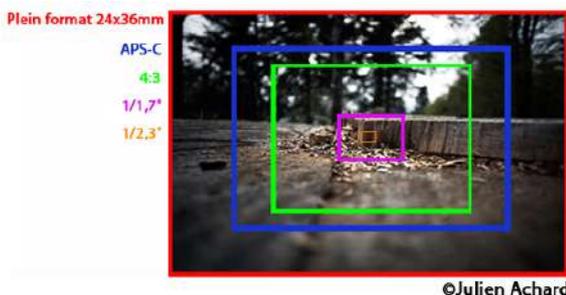
→ Résolution spatiale (limite de diffraction) : $\phi_{Airy} = \frac{1,22\lambda}{n' \sin \alpha'_m}$

→ Flux lumineux \propto étendue géométrique : $G = \pi \times S_{détecteur} \times n'^2 \sin^2 \alpha'_m$

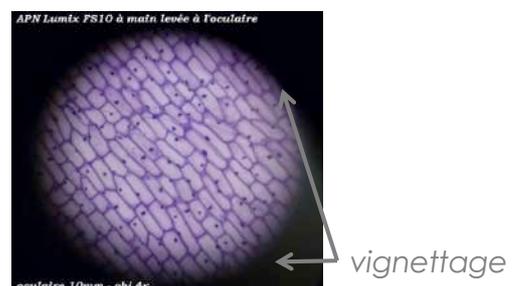
- Dimension transverse de l'objet/image : y, y'
- Angle de champ (objet/image) : θ, θ'



→ Champ limité par le capteur



→ Champ limité par les diaphragmes

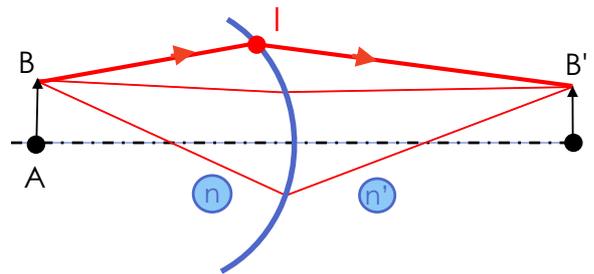


Stigmatisme, aplanétisme ?

→ Qu'est-ce que le stigmatisme d'un système optique ?

→ Qu'est-ce que l'aplanétisme ?

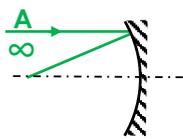
→ Exemples ?



→ Pourquoi sont-ce des qualités importantes pour un système ?

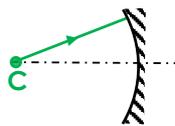
Exemples

1. Miroir sphérique $\infty \rightarrow$ foyer



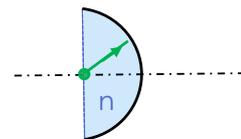
1. Stigmatique ?
2. Aplanétique ?
3. \emptyset

2. Miroir sphérique $C \rightarrow C$



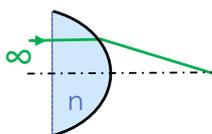
1. Stigmatique ?
2. Aplanétique ?
3. \emptyset

3. Diopre sphérique $C \rightarrow C$



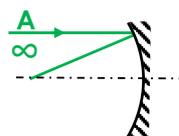
1. Stigmatique ?
2. Aplanétique ?
3. \emptyset

4. Diopre sphérique $\infty \rightarrow$ foyer



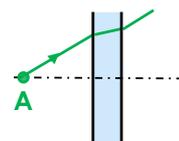
1. Stigmatique ?
2. Aplanétique ?
3. \emptyset

5. Miroir parabolique $\infty \rightarrow$ foyer



1. Stigmatique ?
2. Aplanétique ?
3. \emptyset

6. Lames à faces planes //

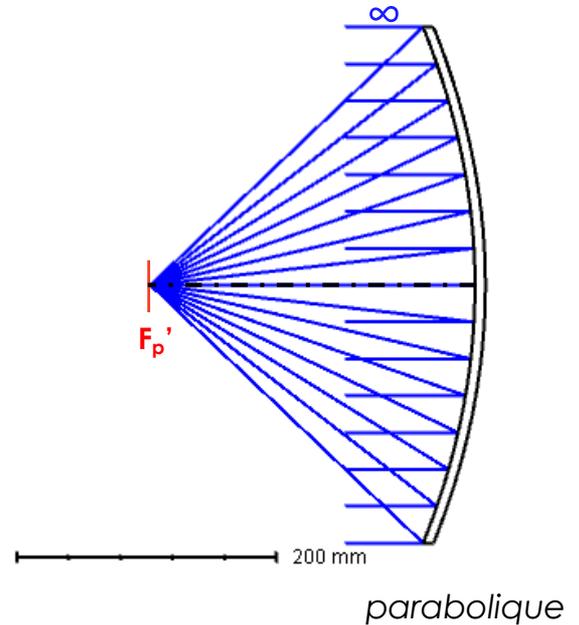
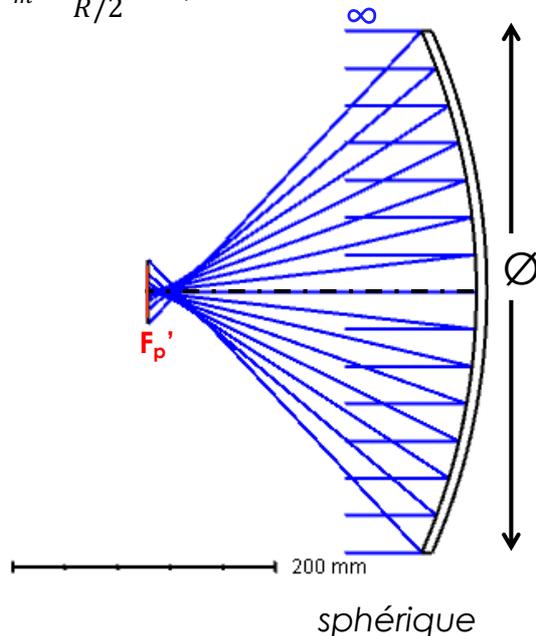


1. Stigmatique ?
2. Aplanétique ?
3. \emptyset

$R = 500 \text{ mm}$

$\varnothing = 400 \text{ mm}$

$$\sin \alpha'_m = \frac{\varnothing/2}{R/2} = 0,80$$



Approximation du stigmatisme et de l'aplanétisme

⇔ valable pour les faibles angles d'incidence sur les dioptries

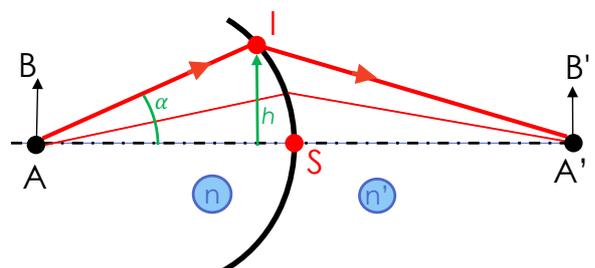
$$\sin i \cong i$$

⇒ formation des images

⇒ relations de l'optique géométrique

$$\frac{n'}{SA'} - \frac{n}{SA} = \frac{n' - n}{R}$$

⇒ images "parfaites" en limite de diffraction



Cas général : $(AIA') \neq (ASA')$

Origine des aberrations

Aberration = dégradation de l'image par rapport aux prédictions de l'optique paraxiale

- Aberrations *chromatiques* : les caractéristiques paraxiales (F' , g_y ...) du système dépendent de λ
- Aberrations *géométriques* : la trajectoire réelle des rayons diffère de la trajectoire paraxiale

⇒ image floue, déformée ; perte de résolution de l'image

Chromatisme

Dû à la *variation de l'indice du verre* avec la longueur d'onde

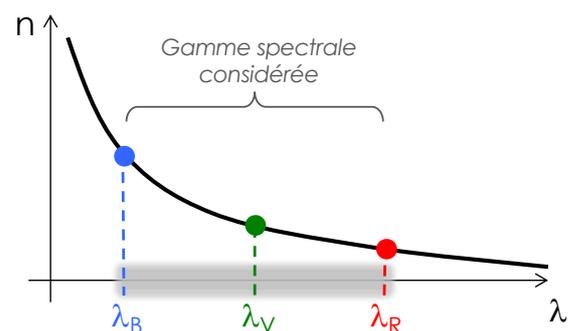
→ caractérisé par la **constringence** du verre

$$v = \frac{n_V - 1}{n_B - n_R}$$

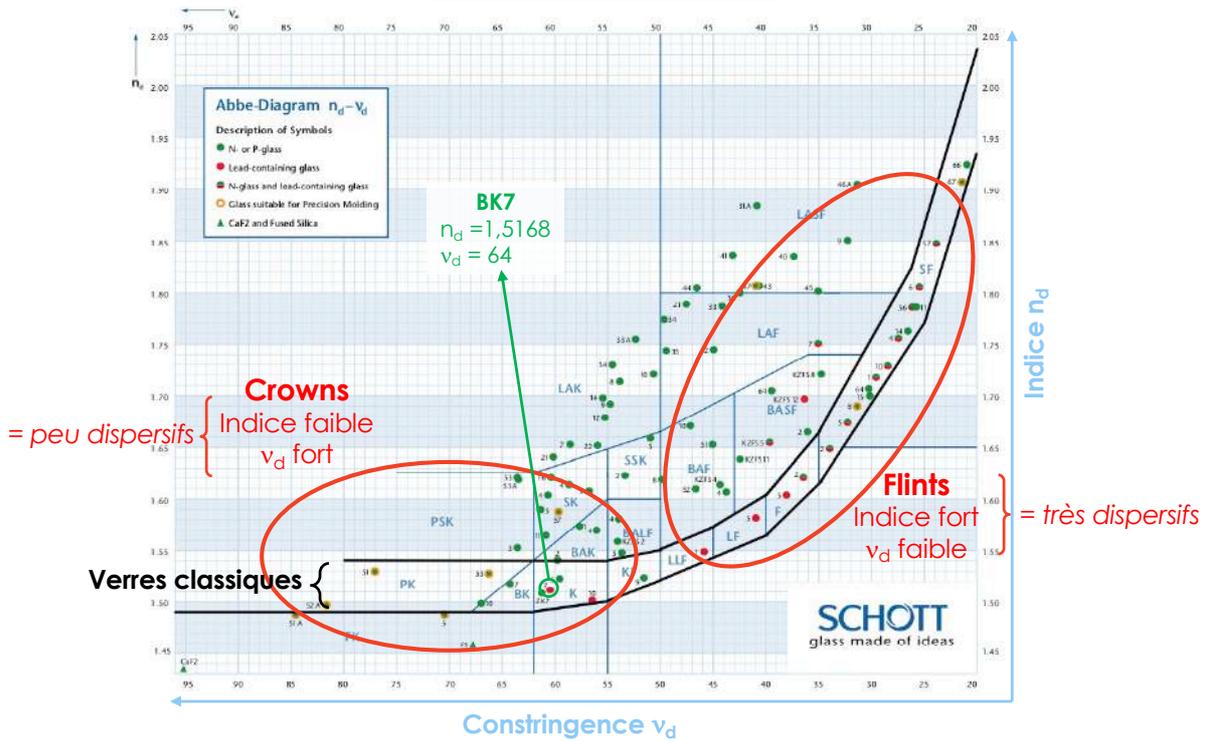
(ou nombre d'Abbe)

= quantifie la **dispersion** du verre dans la gamme spectrale d'intérêt

dans le visible	λ_B	486,13 nm (raie F)	1,5224
	λ_V	587,56 nm (raie d)	1,5168
	λ_R	656,27 nm (raie C)	1,5143
			BK7



Carte des verres



<https://refractiveindex.info>

https://www.schott.com/advanced_optics/english/knowledge-center/technical-articles-and-tools/abbe-diagramm.html

➔ modification de la focale des lentilles

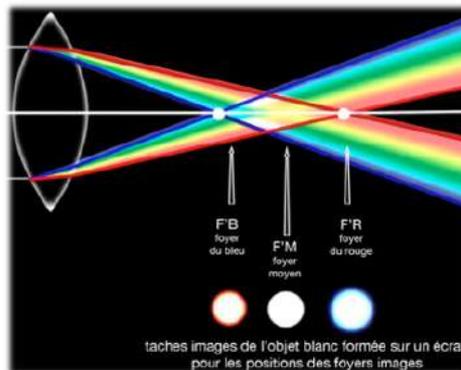
$$\Delta f' = f'_B - f'_R \cong -\frac{f'_V}{\nu} \Rightarrow \text{chromatisme longitudinal \& latéral}$$

Démonstration :

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \frac{1}{\nu}$$

$$\Rightarrow \frac{df'}{f'^2} = -dn \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = -\frac{1}{f'} \times \frac{dn}{(n-1)}$$

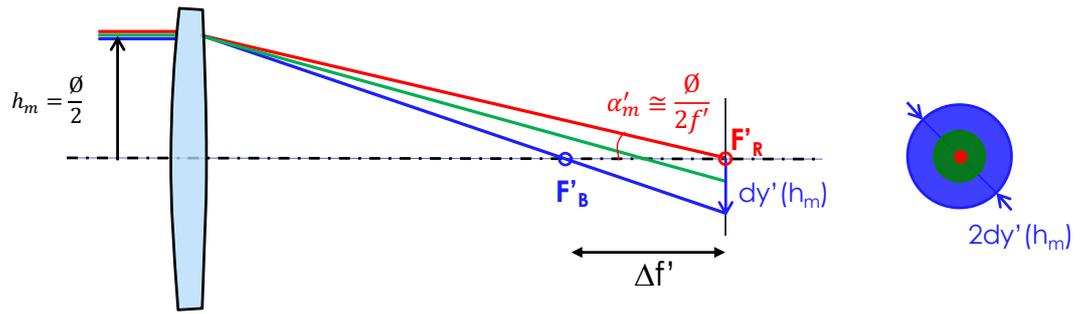
$$\Leftrightarrow df' = -f' \times \frac{dn}{(n-1)}$$



⇒ déplacement de la position de l'image paraxiale selon λ
+ modification de sa taille y'

⇒ image d'un point = tache image colorée et étalée

$f'_V = 50 \text{ mm}$
 $\varnothing = 10 \text{ mm}$
 BK7 - $\nu = 64$



chromatisme longitudinal :

$$\Delta f' = f'_B - f'_R \cong -\frac{f'_V}{\nu}$$

\varnothing de la tache-image dans le plan de mise au point paraxial rouge :

$$2dy'(h_m) \cong 2 \times \alpha'_m \times \Delta f' =$$

\varnothing de la tache d'Airy (limite de diffraction) :

$$\varnothing_{Airy} = \frac{1,22 \lambda}{\sin \alpha'_m} =$$

Aberrations géométriques

⇔ trajectoire réelle des rayons \neq paraxiale

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

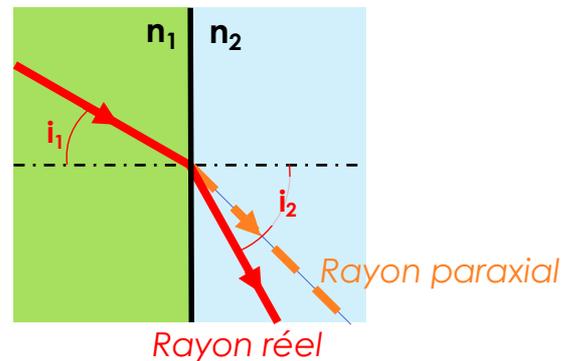
$$n_1 i_1 = n_2 i_2$$

Écart au stigmatisme paraxial approché :

- Rayons ne convergent pas en 1 point
- Surface d'onde \neq sphère

⇒ tache de diffusion $>$ Airy

(sauf cas de stigmatisme rigoureux)

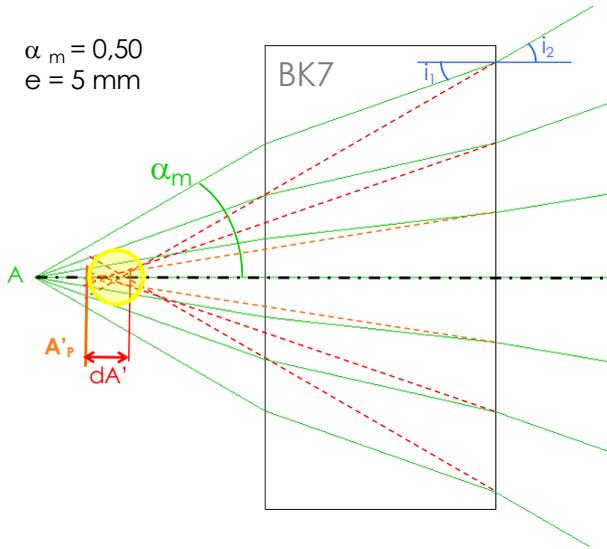


$$n_1 > n_2$$

$$i_2(\text{réel}) > i_2(\text{paraxial})$$

Exemple : lame à faces planes et //

= non-stigmatique pour un point objet sur l'axe

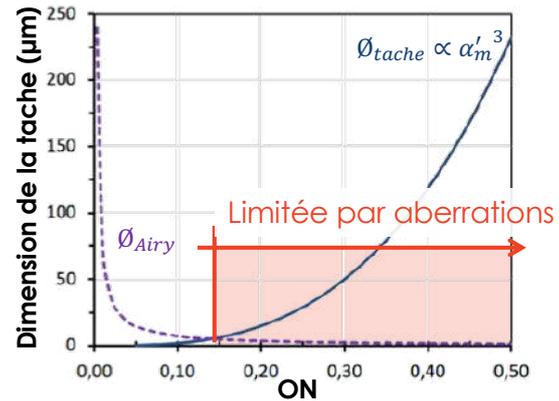


$\alpha_m = 0,50$
 $e = 5 \text{ mm}$

Décalage paraxial objet-image $AA'_P = e \left(1 - \frac{1}{n}\right)$

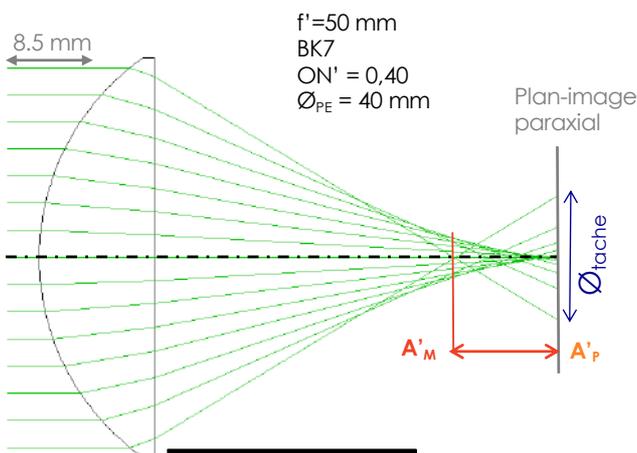
Écart entre la position de l'image paraxiale et de l'image réelle $dA' \cong e \frac{n^2 - 1}{2n^3} \alpha_m^2$

Ø de la tache de diffusion $\varnothing_{tache} \cong 2 \times dA' \times \alpha_m$



⇒ importance du défaut augmente avec l'ouverture numérique

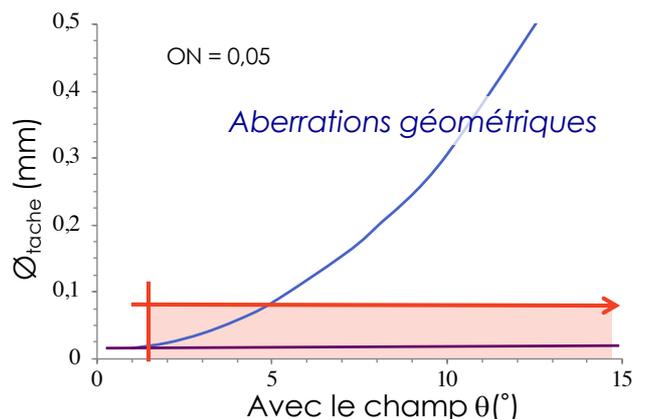
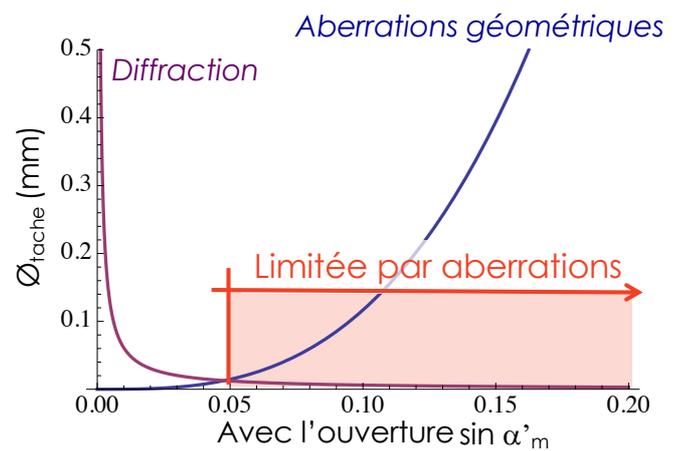
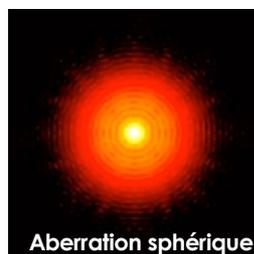
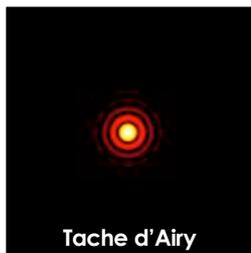
Lentille simple



$f' = 50 \text{ mm}$
BK7
 $ON' = 0,40$
 $\varnothing_{PE} = 40 \text{ mm}$

Plan-image paraxial

A'_M A'_P



Méthodes d'évaluation

Trois approches complémentaires pour décrire les aberrations d'un système :

1. Description géométrique – basée sur les tracés de rayons
→ Aberrations transverses (dy' , dx')
2. Analyse de la propagation des surfaces d'onde
→ Écart normal aberrant Δ
3. Prise en compte de la diffraction – optique de Fourier
→ Réponse percussionnelle

Méthodes d'évaluation

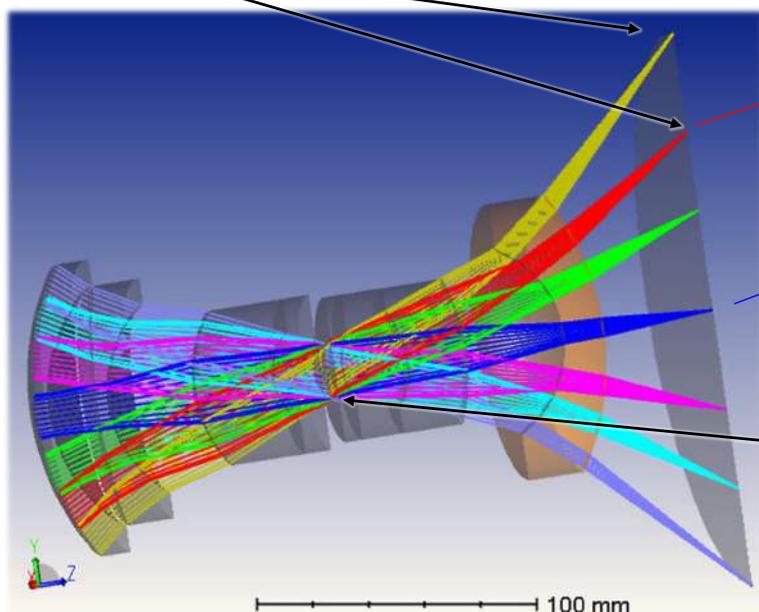
I. L'approche géométrique

Conception de Systèmes Optiques
Cours n° 1

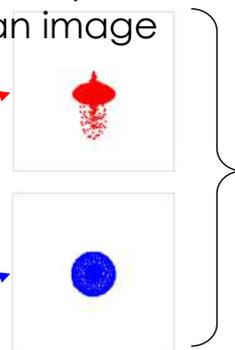
Gaëlle Lucas-Leclin

Trajectoire des rayons

pour plusieurs pts objets/images \neq
sur l'axe et dans le champ



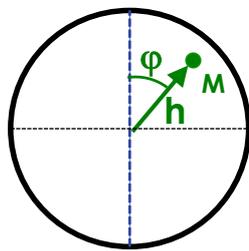
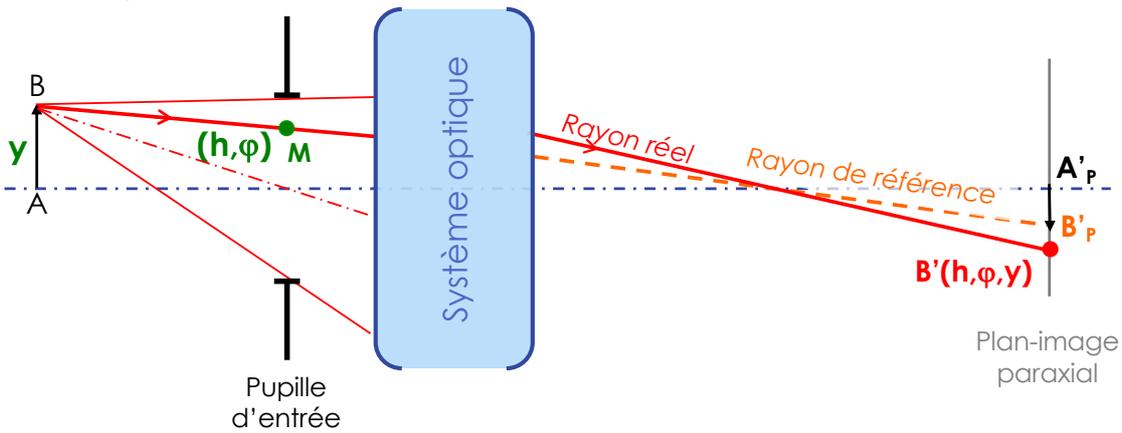
Spot-diagramme =
impact des rayons dans le
plan image



Lancer de rayons
= tracé de la
trajectoire d'un grand
nombre de rayons
couvrant la pupille tous
issus du pt objet

= approche privilégiée par les logiciels de conception optique

— Rayons tracés dans l'approximation paraxiale
— Rayons réels



$$h \geq 0$$

$$\varphi \in [0; 2\pi[$$

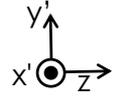
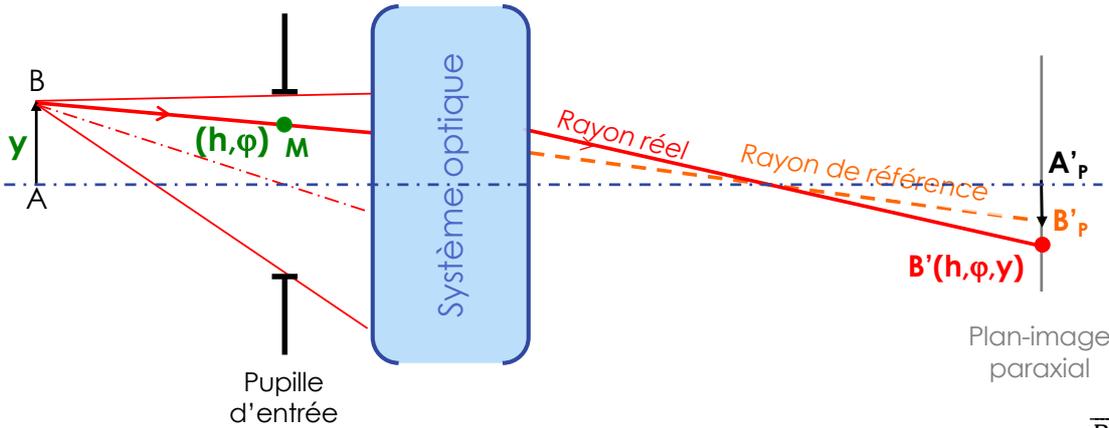
→ Description de la trajectoire réelle des **rayons** & de leur impact **B' (h, phi, y)** dans le plan-image de référence

définis par le **point objet B(y)** & le **point d'impact M(h, phi)** dans la pupille

⇔ méthode des logiciels de tracés de rayons

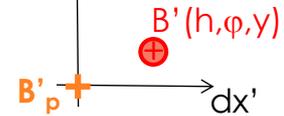
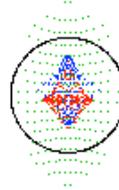
Trajectoire des rayons

— Rayons tracés dans l'approximation paraxiale
— Rayons réels



Plan-image paraxial

$$\overrightarrow{B'_p B'} = \begin{bmatrix} dx'(h, \varphi, y) \\ dy'(h, \varphi, y) \end{bmatrix}$$

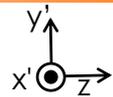
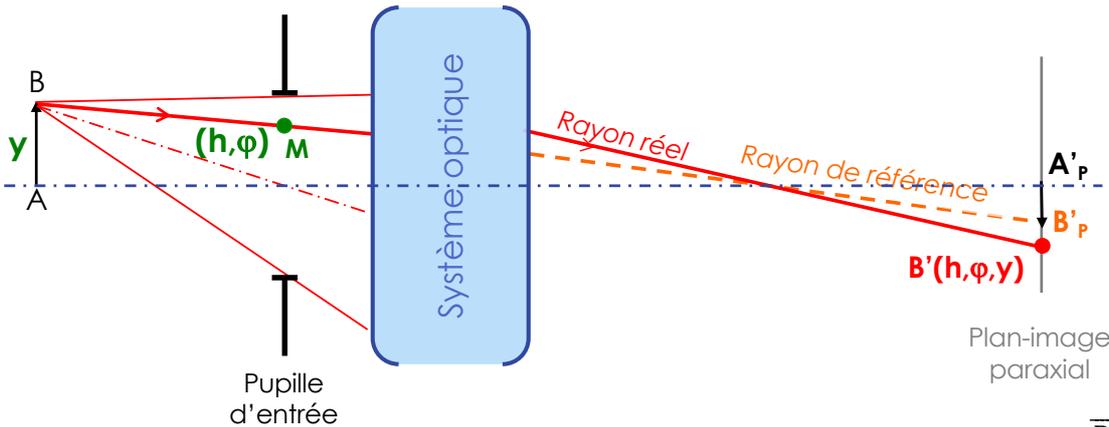


⇒ tache-image = répartition des impacts
= spot-diagram

(ABA'p) : y' - plan tangentiel
"meridional"
⊃ axe optique et objet
x' - plan sagittal
⊃ axe optique
⊥ plan tangentiel

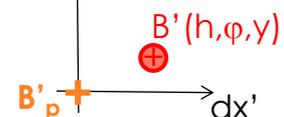
Trajectoire des rayons

— Rayons tracés dans l'approximation paraxiale
— Rayons réels



Plan-image paraxial

$$\overrightarrow{B'_p B'} = \begin{bmatrix} dx'(h, \varphi, y) \\ dy'(h, \varphi, y) \end{bmatrix}$$



→ Description analytique des aberrations transverses :

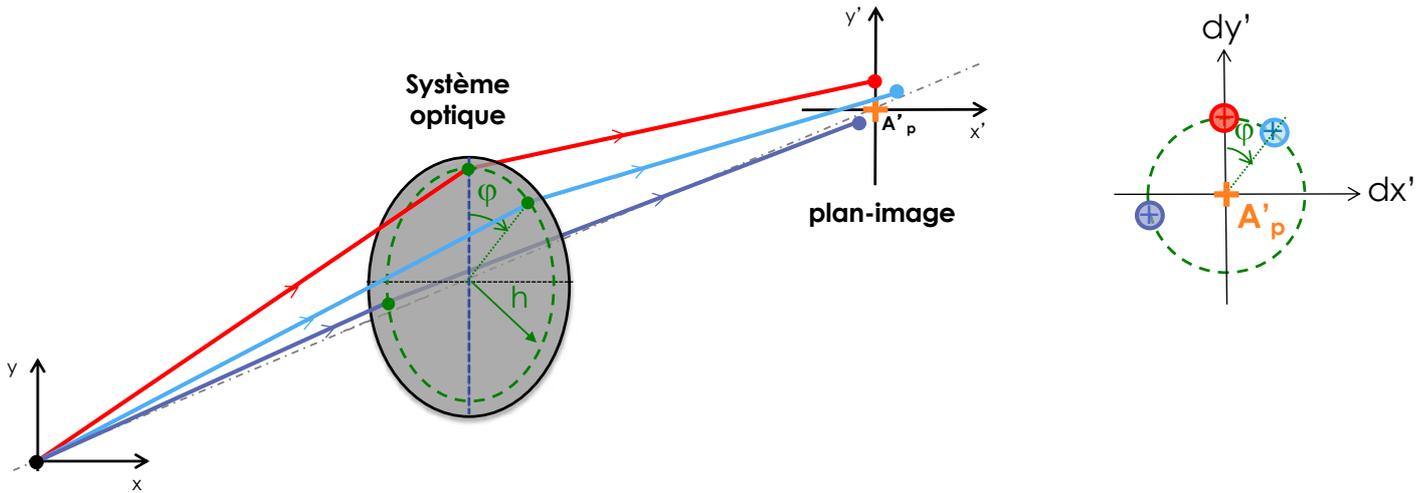
$$\overrightarrow{B'_p B'} = f(h, \varphi, y)$$

$$= \sum (y^m h^n \cos(q\varphi) + y^m h^n \sin(q\varphi))$$

⇔ développement limité en y, h et φ

- chaque terme est associé à un type d'aberration ≠ d'ordre croissant m+n
- simplification du développement du fait des symétries
- (y, h, φ) définis en paraxial → équivalence dans l'espace image (y'_p, h'_p, φ)

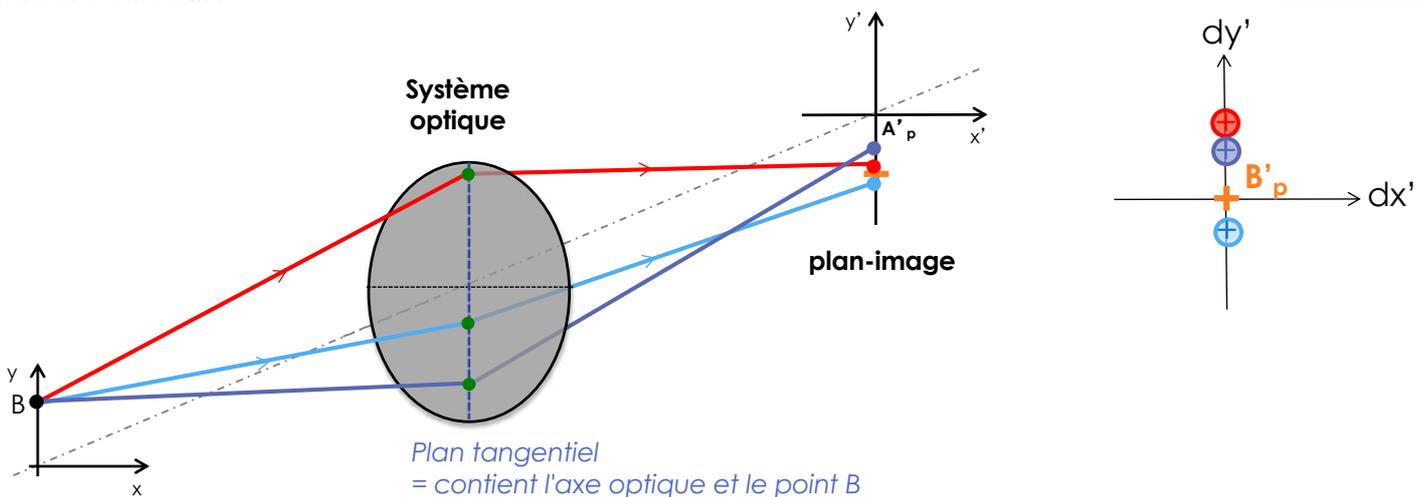
Aberrations transverses



Objet sur l'axe optique : $dy'(h, \varphi, y=0) = f(h) \times \cos \varphi$
 $dx'(h, \varphi, y=0) = f(h) \times \sin \varphi$

⇔ symétrie de révolution

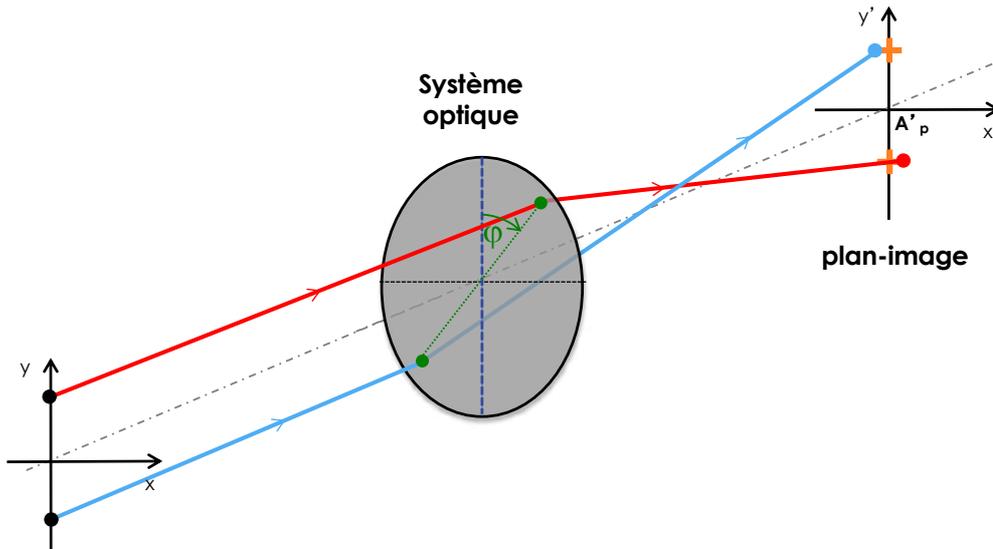
Aberrations transverses



Objet sur l'axe optique : $dy'(h, \varphi, y=0) = f(h) \times \cos \varphi$
 $dz'(h, \varphi, y=0) = f(h) \times \sin \varphi$

Rayon du plan tangentiel : $dx'(\varphi=0/\varphi=\pi) = 0$
 ⇔ symétrie par rapport au plan

Aberrations transverses

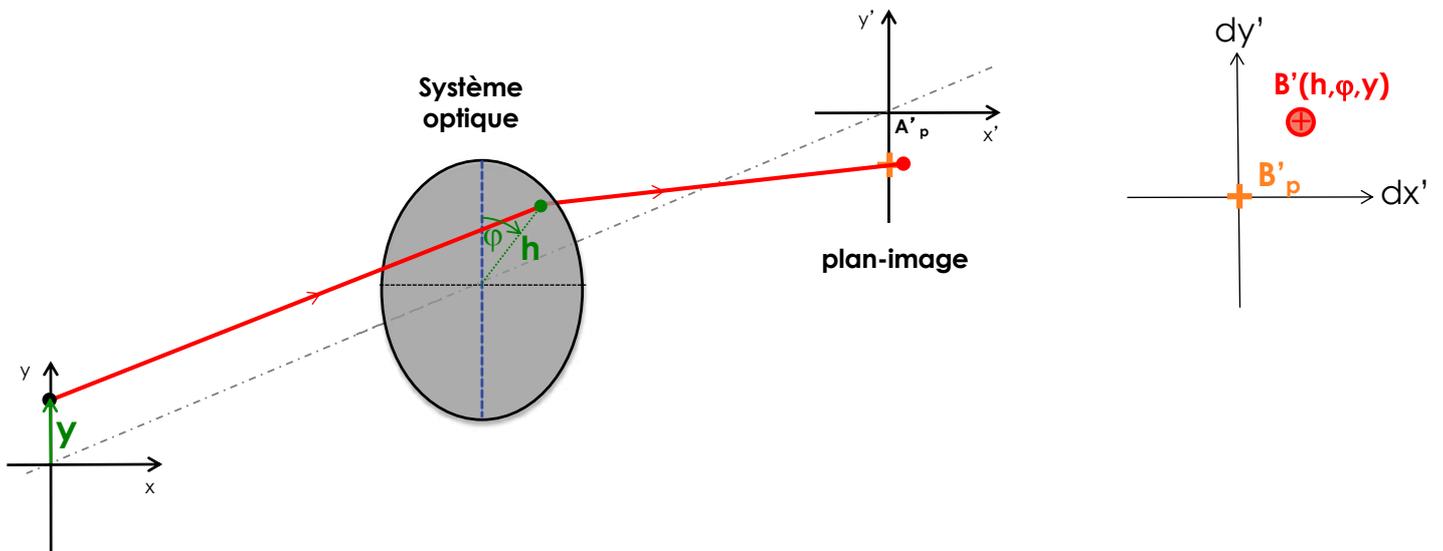


Objet sur l'axe optique : $dy'(h, \varphi, y=0) = f(h) \times \cos \varphi$
 $dx'(h, \varphi, y=0) = f(h) \times \sin \varphi$

Rayon du plan tangentiel : $dx'(\varphi=0/\varphi=\pi) = 0$

Rotation de π autour de l'axe: dy' & dx' fonctions *impaires* de h & y

Aberrations transverses



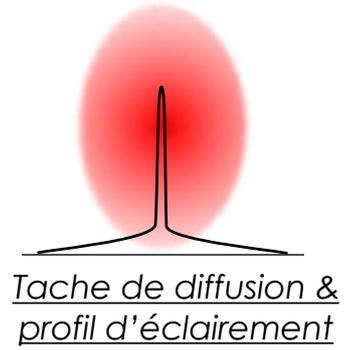
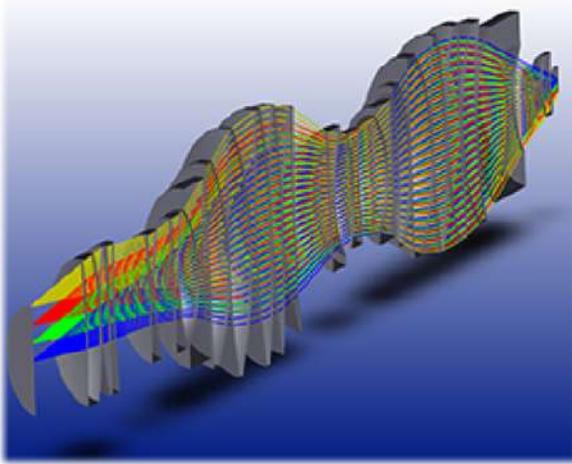
Développement de Seidel des aberrations transverses : 3^{ème} ordre

$$dy'(h, \varphi, y) = A_1 h^3 \cos \varphi + A_2 y h^2 (2 + \cos 2\varphi) + (3A_3 + A_4) y^2 h \cos \varphi + A_5 y^3$$

ab. sphérique
coma
astigmatisme, courbure
distorsion

$$dx'(h, \varphi, y) = A_1 h^3 \sin \varphi + A_2 y h^2 \sin 2\varphi + (A_3 + A_4) y^2 h \sin \varphi$$

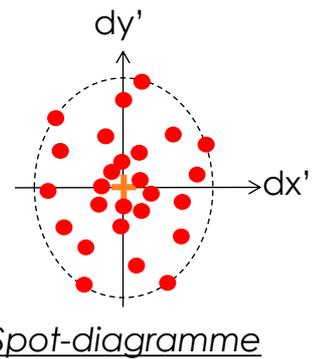
Évaluation de la tache de diffusion



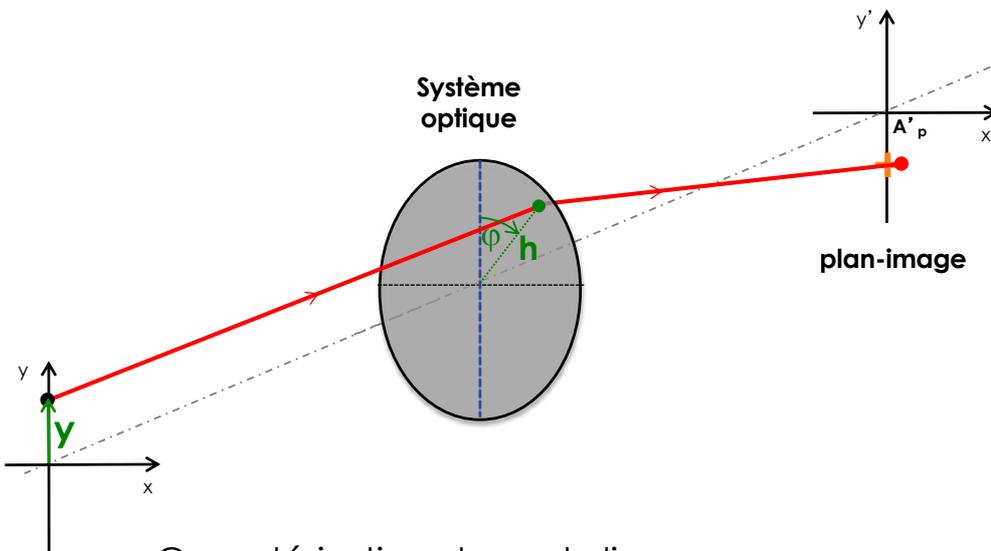
→ Simulation de la tache image à partir d'un grand nombre de rayons lancés au travers du système :

- pour un point objet $B(y)$ donné, lancer d'un faisceau de rayons couvrant la pupille
- trajectoire réelle des rayons (Snell-Descartes)

⇒ diagramme de points qui donne une information sur l'extension spatiale de la tache et les aberrations



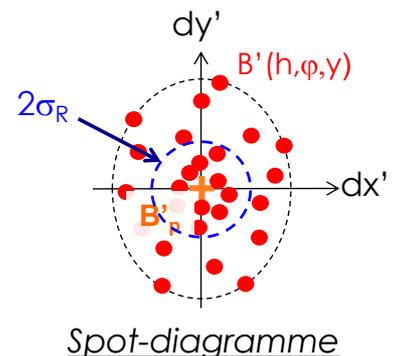
Évaluation de la tache de diffusion



Caractérisation du spot-diagramme :

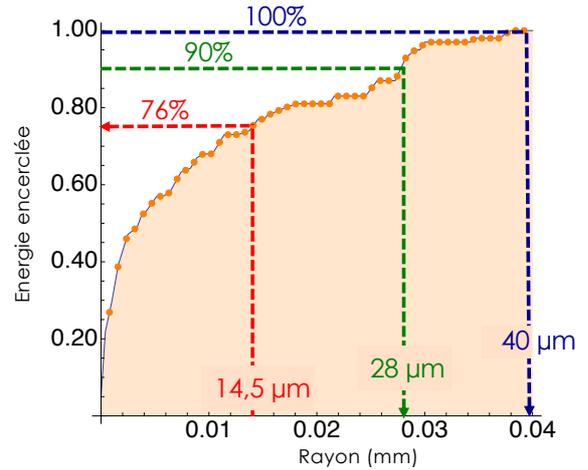
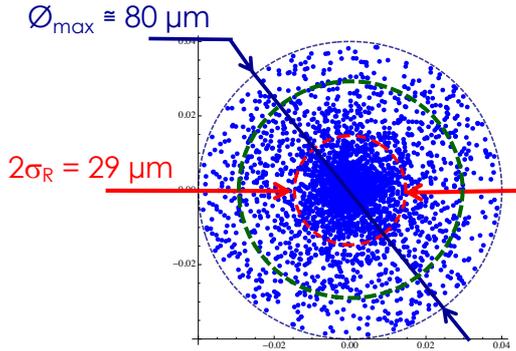
- Dimensions maximales dy'_{max} , dx'_{max}
- Ecart-type $\sigma_R = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$
- Energie encerclée $R_{XX\%}$

à comparer à la limite de diffraction (\emptyset_{Airy})



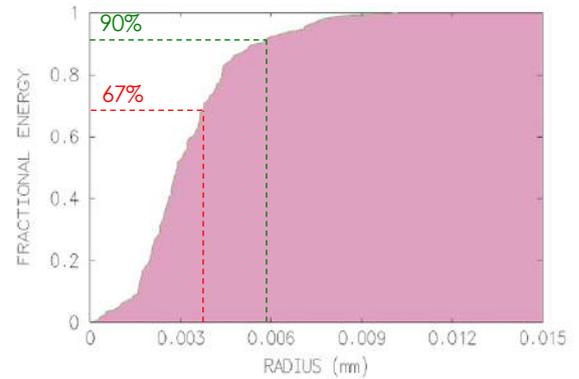
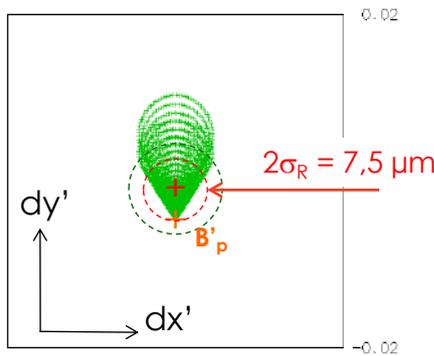
→ Aberration sphérique du 3^{ème} ordre

2λ
0,10
 $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$
5000 pts
 $\varnothing_A = 6 \mu\text{m}$



→ Coma d'un miroir parabolique

$\infty \rightarrow F', R = 400 \text{ mm}$
 $ON = 0,10, \theta = 0,5^\circ$
 $\varnothing_A = 6 \mu\text{m}$



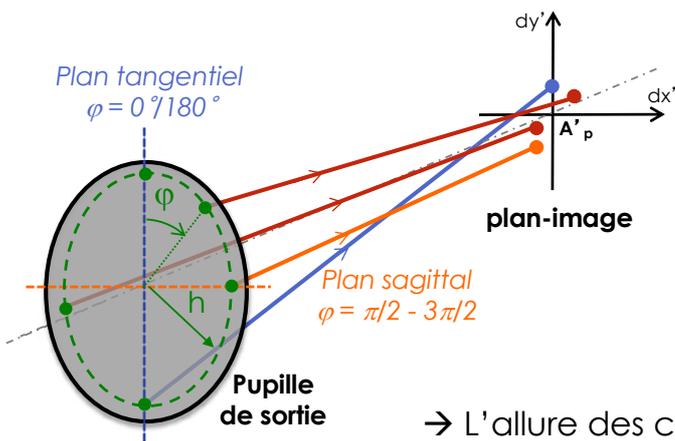
Courbes de tracés de rayons

= évolution des aberrations transverses avec les coordonnées pupillaires (h, φ)

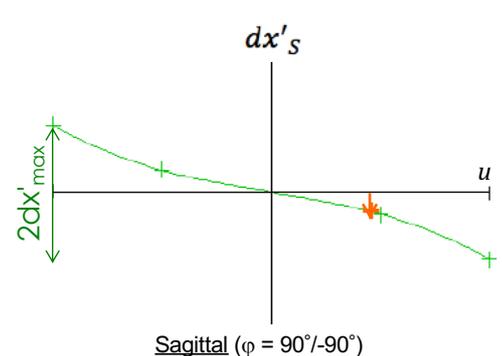
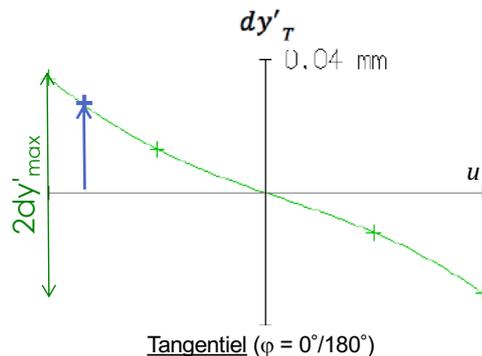
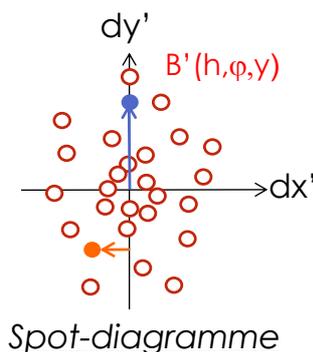
$$\begin{cases} dy'_T = f_T(u) & \text{pour } \varphi = 0 - \pi \\ dx'_S = f_S(u) & \text{pour } \varphi = 3\pi/2 - 3\pi/2 \end{cases}$$

$$u = \frac{h}{h_{max}} = \frac{\alpha'}{\alpha'_m} \in [-1; 1]$$

Hauteur d'impact normalisée dans la pupille



→ L'allure des courbes (dy', dx') informe sur la nature des aberrations présentes, en comparaison avec le d.l. de Seidel.



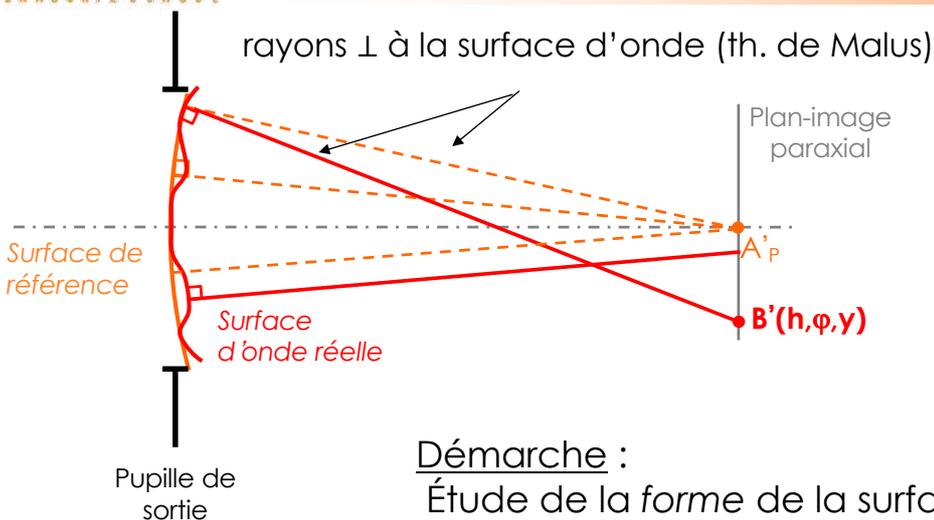
Méthodes d'évaluation

II. L'écart normal

Conception de Systèmes Optiques
Cours n°2

Gaëlle Lucas-Leclin

Écart normal

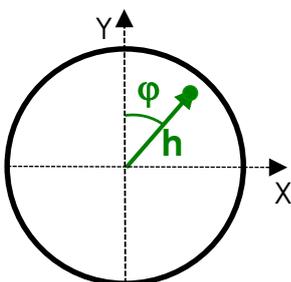


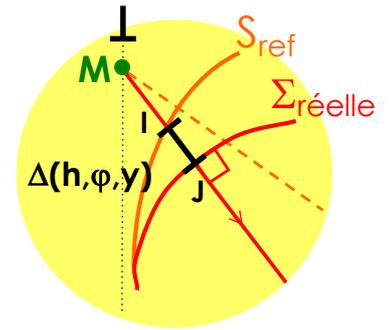
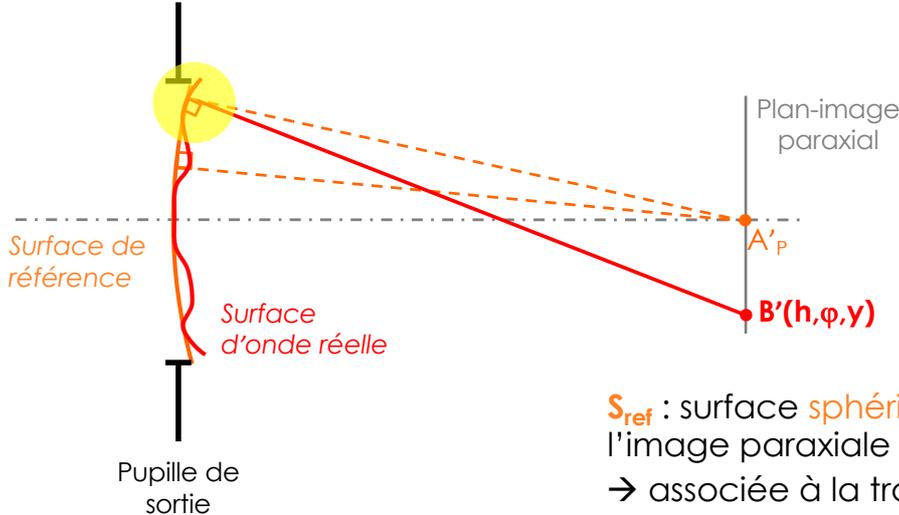
Démarche :

Étude de la *forme* de la surface d'onde aberrante et de sa *propagation* au travers du système optique

- Cas paraxial = stigmatique
surface d'onde = sphère
- Cas réel
surface déformée

→ **Écart normal** = mesure de la déformation par rapport à une sphère de référence



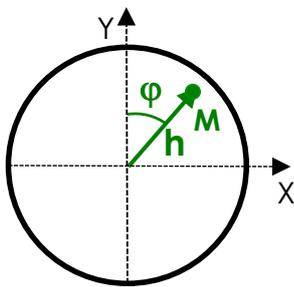


S_{ref} : surface **sphérique** de référence, centrée sur l'image paraxiale (ou autre pt de référence)
→ associée à la trajectoire paraxiale des rayons

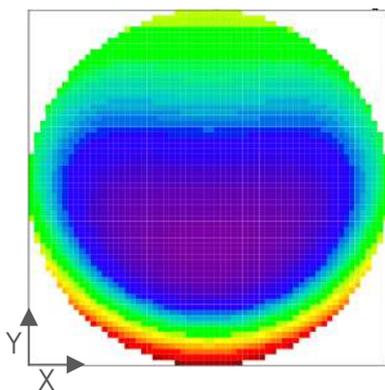
$\Sigma_{réelle}$: surface d'onde **réelle**, perpendiculaire aux rayons réels

$\Delta(h, \varphi, y) = \bar{IJ}$
= distance algébrique entre S_{ref} et $\Sigma_{réelle}$ mesurée sur le rayon réel

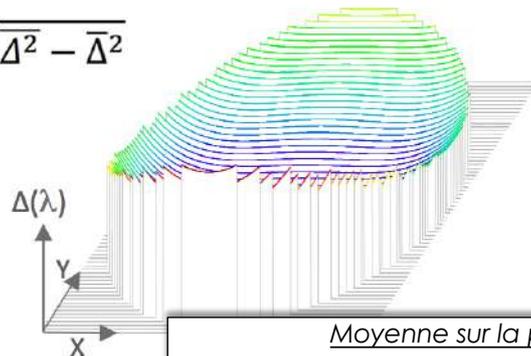
→ déphasage de l'onde aberrante $\Phi(h, \varphi) = -\frac{2\pi}{\lambda} \Delta(h, \varphi)$



🇬🇧 Optical Path Difference



$$\begin{cases} \Delta_{PV} \\ \sigma_{\Delta} = \sqrt{\Delta^2 - \bar{\Delta}^2} \end{cases}$$



Moyenne sur la pupille

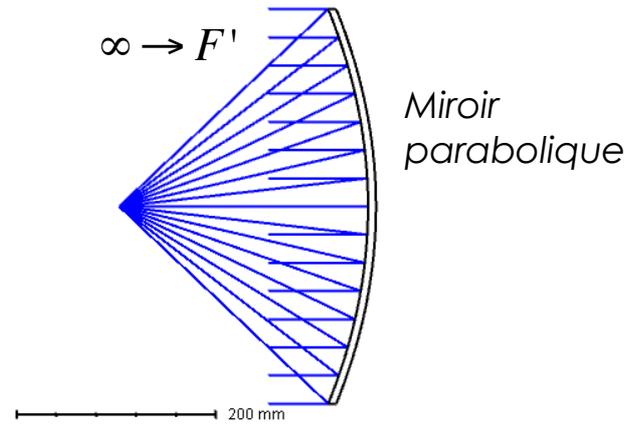
$$\bar{\Delta} = \frac{\iint \Delta(h, \varphi) h dh d\varphi}{\iint h dh d\varphi} \quad \bar{\Delta} = \frac{\iint \Delta(X, Y) dXdY}{\iint dXdY}$$

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

- Mesure de Δ en fonction des coordonnées dans la pupille
- Δ s'exprime (en général) en unités de λ
- σ_{Δ} est une grandeur pertinente pour quantifier l'importance des défauts
→ $\sigma_{\Delta} \lesssim \lambda/14$: aberrations négligeables

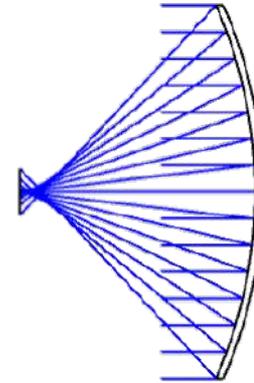
Quelle est la forme de la surface d'onde réelle convergente après le miroir parabolique ?

- sphérique
- parabolique
- autre forme



Et après ce miroir sphérique ?

- sphérique
- parabolique
- autre forme

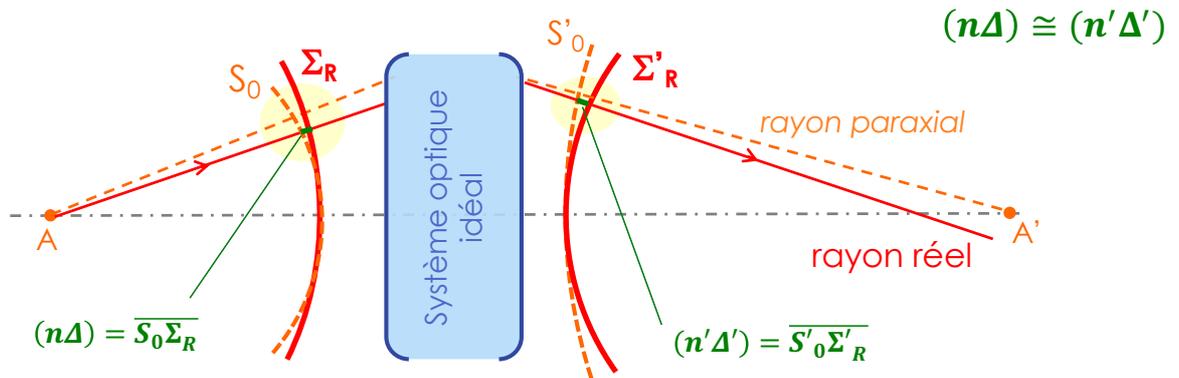


Le chemin optique aberrant ($n\Delta$) se conserve le long du rayon optique

= résultat fondamental qui permet de comprendre la propagation des aberrations au travers d'un système optique et leur compensation

valide pour les aberrations pas trop fortes & les optiques pas trop ouvertes

= **conséquence directe du principe de Fermat**



- Chemin optique aberrant mesuré sur un **rayon réel**, par rapport à une **trajectoire paraxiale idéale**
- Conservation au travers d'un système non aberrant \Rightarrow extension au cas aberrant

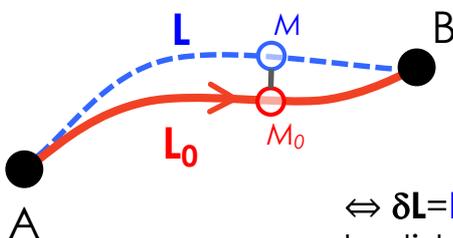
Rappel : principe de Fermat

"La nature agit toujours par les voies les plus courtes et les plus simples"

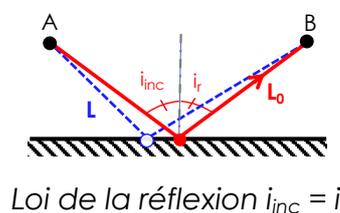
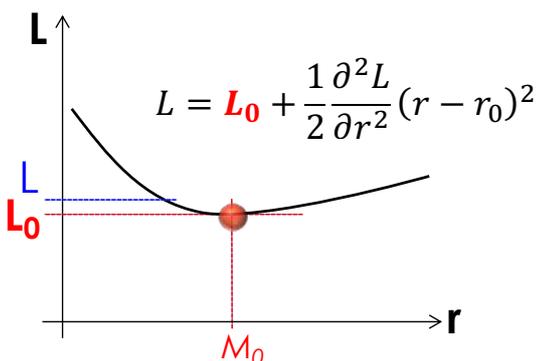
Le chemin optique $L = (\mathbf{AB})$ effectivement suivi par la lumière est **extrémal**.



Fermat
(1601 - 1665)

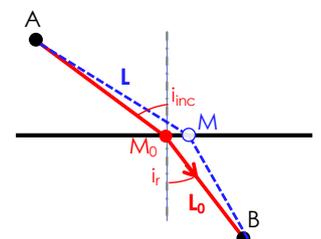


$\Leftrightarrow \delta L = L - L_0$ est au - du 2^{ème} ordre avec la distance MM_0 entre les trajectoires.



Loi de la réflexion $i_{inc} = i_r$

Loi de la réfraction
 $n_{inc} \sin i_{inc} = n_r \sin i_r$



Le chemin optique aberrant ($n\Delta$) se conserve le long du rayon optique

= résultat fondamental qui permet de comprendre la propagation des aberrations au travers d'un système optique et leur compensation

valide pour les aberrations pas trop fortes & les optiques pas trop ouvertes

= conséquence directe du principe de Fermat

→ Démonstration menée dans trois cas différents :

1. propagation en espace libre
2. propagation au travers d'un système optique non aberrant
3. propagation au travers d'un système optique aberrant

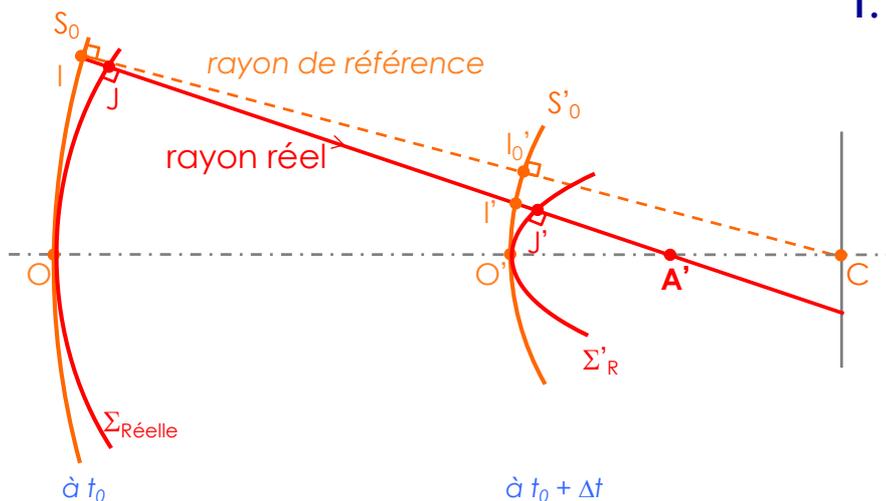
$$\left. \begin{array}{l} 1. \\ 2. \end{array} \right\} (n'\Delta') \cong (n\Delta)$$

$$(n'\Delta') \cong (n\Delta) + (n'\Delta')_{so}$$

1. Propagation en espace libre

Définition des surfaces d'onde :

$$(OO') = (II'_0) = (JJ')$$



Pendant $\Delta t = \overline{OO'}/c$

- propagation de la surface d'onde sphérique de référence $S_0 \rightarrow S'_0$
 $S_0, S'_0 \perp$ rayon (II'_0)
- propagation de la surface d'onde aberrante réelle $\Sigma_R \rightarrow \Sigma'_R$
 $\Sigma_R, \Sigma'_R \perp$ rayon (JJ')

Théorème de Gouy

1. Propagation en espace libre

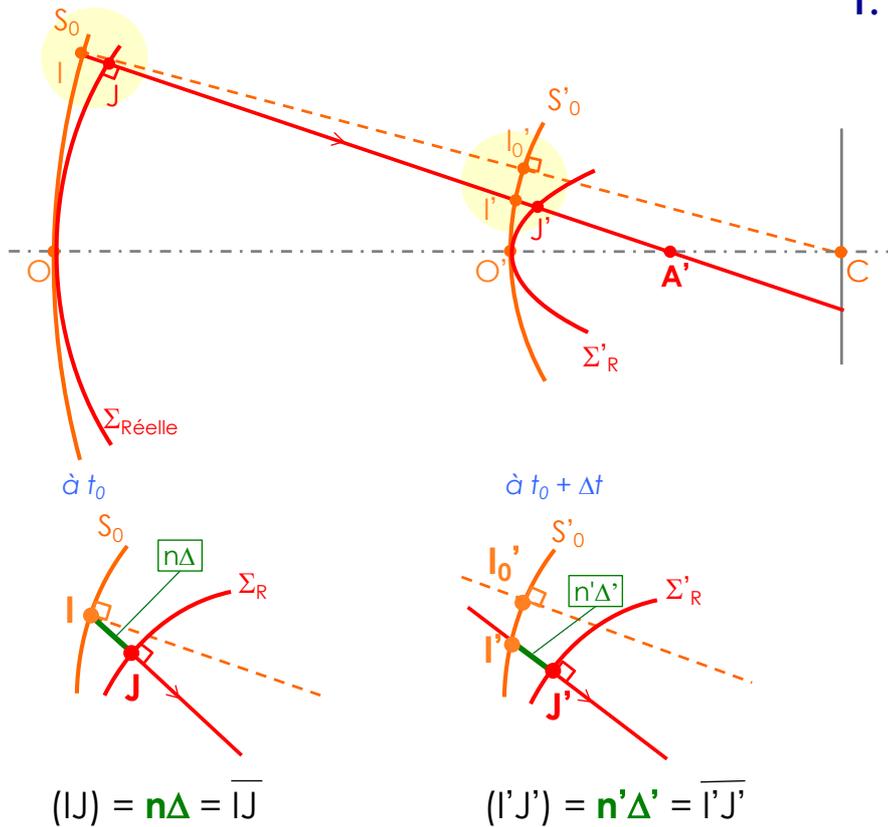
Définition des surfaces d'onde :

$$(OO') = (II_0') = (JJ')$$

chemin non réellement suivi par la lumière mais proche de (II')

$$(JJ') = (JI) + (II') + (I'J') \\ = -n\Delta + (II') + n'\Delta'$$

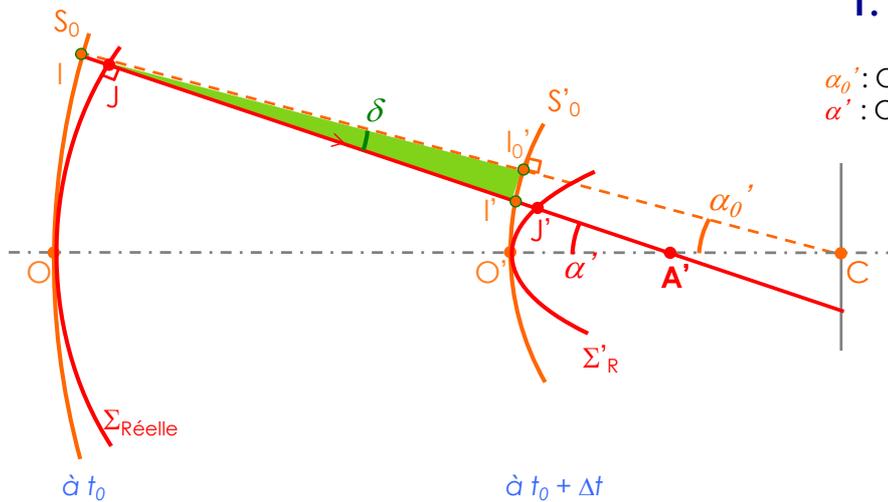
chemin réellement suivi par la lumière



Théorème de Gouy

1. Propagation en espace libre

α_0' : Ouverture numérique définie en paraxiale
 α' : Ouverture numérique du rayon aberrant



Même démonstration en utilisant les relations trigonométriques dans le triangle $(II'I_0')$:

$$\overline{II_0'} = \overline{II'} \times \cos \delta \cong \overline{II'} \times \left(1 - \frac{\delta^2}{2} + \dots \right)$$

avec $\delta = \alpha' - \alpha_0' \ll \alpha_0'$

$\Rightarrow \overline{II_0'} \cong \overline{II'}$ au 2^{ème} ordre près en δ

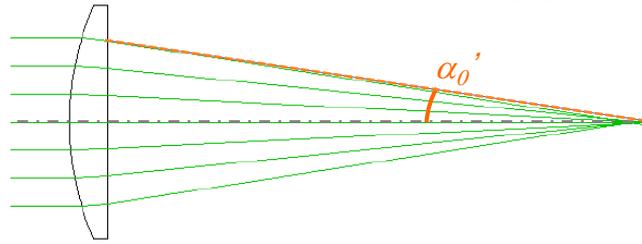
$$(JJ') = (JI) + (II') + (I'J') \\ = -n\Delta + \underbrace{(II')} + n'\Delta' \\ \cong (II_0')$$

Principe de Fermat

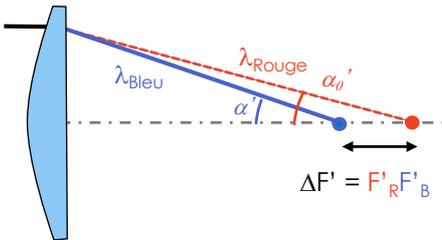
1. Propagation en espace libre

→ Exemple

Lentille simple
 $F' = 100 \text{ mm}$
 $\text{ON} = \sin \alpha'_0 = 0,10$



- chromatisme principal

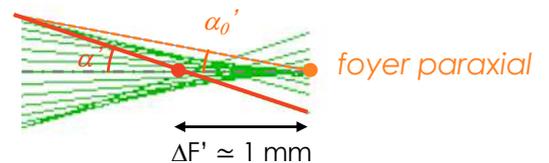


{ Rayon de référence dans le rouge par convention
 { Rayon aberrant bleu

$$\Delta F' = -\frac{f'_R}{v} \cong -\frac{100 \text{ mm}}{50} = -2 \text{ mm} \Rightarrow \frac{|\alpha' - \alpha'_0|}{\alpha'_0} \cong \left| \frac{\Delta F'}{f'} \right| = 2\%$$

$$\Rightarrow 1 - \frac{\delta^2}{2} \cong 1 - 2 \cdot 10^{-6}$$

- aberration sphérique



{ Rayon paraxial de référence
 { Rayon marginal aberrant

$$\Rightarrow \frac{|\alpha' - \alpha'_0|}{\alpha'_0} \cong 1\% \Leftrightarrow 1 - \frac{\delta^2}{2} \cong 1 - 5 \cdot 10^{-7}$$

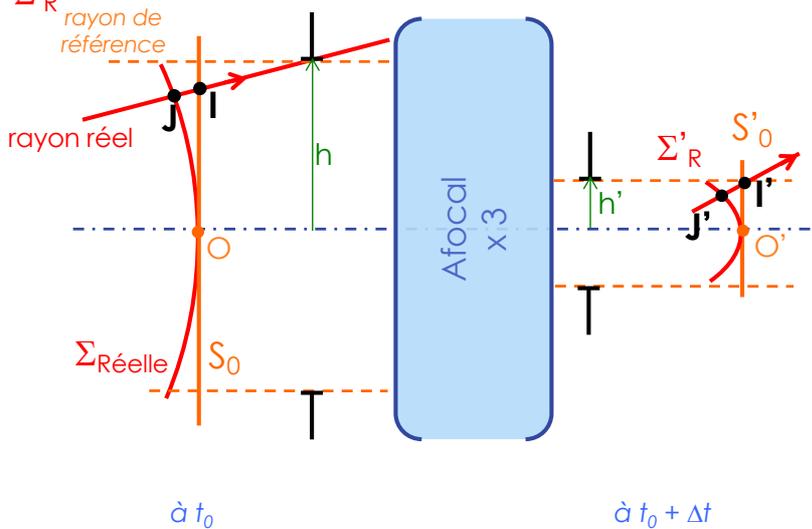
2. Propagation au travers d'un système non-aberrant

Exemple : système afocal

$\infty \mapsto \infty$

$S_0 \mapsto S'_0$

$\Sigma_R \mapsto \Sigma'_R$



Démo détaillée
eCampus

Temps de propagation

$$\Delta t = \frac{(OO')}{c}$$

surface d'onde plane de référence $S_0 \rightarrow S'_0$

surface d'onde aberrante réelle $\Sigma_R \rightarrow \Sigma'_R$

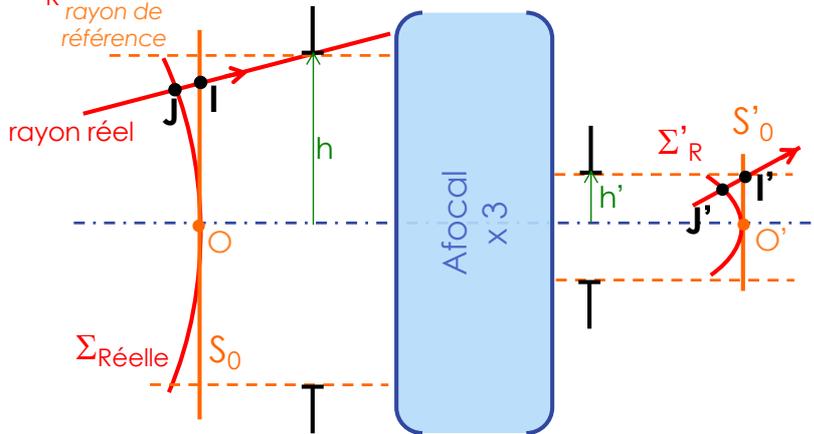
Théorème de Gouy

2. Propagation au travers d'un système non-aberrant

Exemple : système afocal

$$S_0 \mapsto S'_0$$

$$\Sigma_R \mapsto \Sigma'_R$$



Définition des surfaces d'onde :

$$(OO') = (II'_0) = (JJ')$$

chemin non réellement suivi par la lumière mais proche de (II')

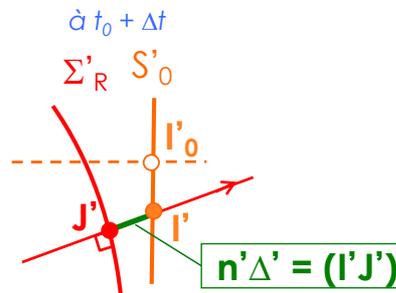
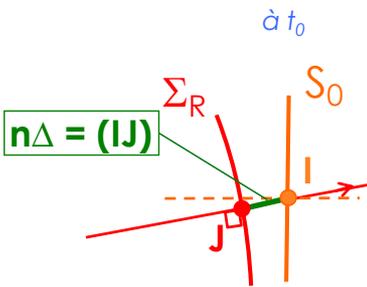
$$(JJ') = (JI) + (II') + (I'J')$$

$$= -n\Delta + (II') + n'\Delta'$$

chemin réellement suivi par la lumière

Principe de Fermat

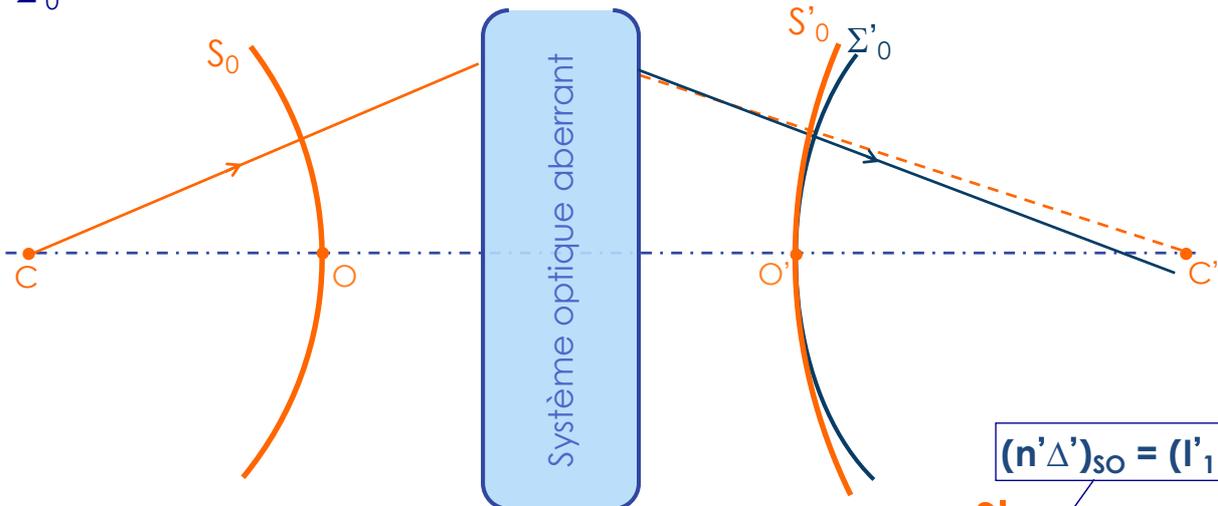
$$(II') \cong (II'_0)$$



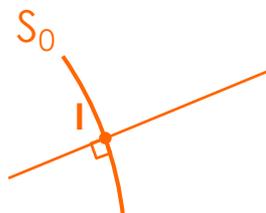
Théorème de Gouy

3. Propagation au travers d'un système aberrant

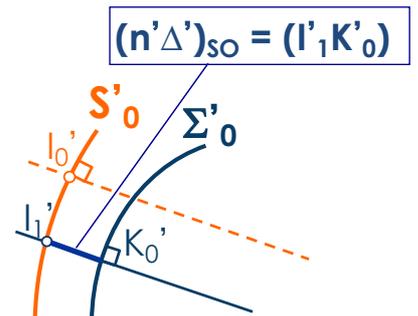
$$S_0 \mapsto S'_0$$



S_0, S'_0 = surfaces d'onde sphériques



$$(OO') = (IK'_0) = (II'_0)$$

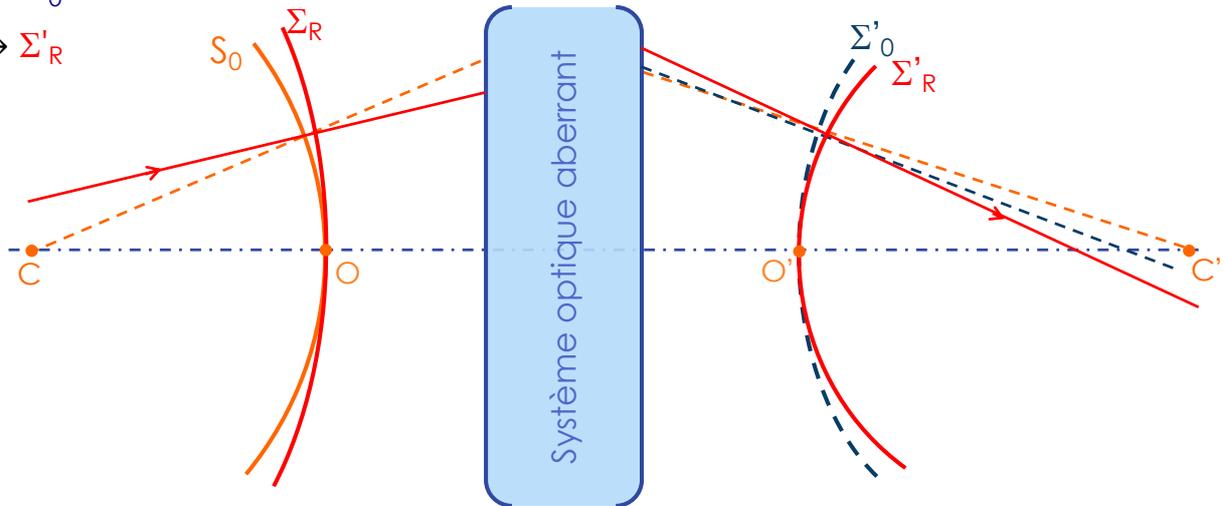


Théorème de Gouy

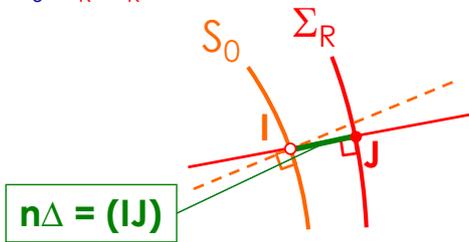
3. Propagation au travers d'un système aberrant

$$S_0 \mapsto \Sigma'_0$$

$$\Sigma_R \mapsto \Sigma'_R$$



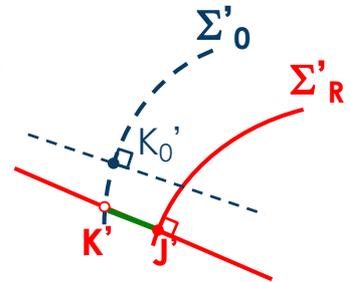
$\Sigma'_0, \Sigma_R, \Sigma'_R$ = surfaces d'onde aberrantes



$$(OO') = (IK'_0) = (JJ')$$

$$(JJ') = -n\Delta + (IK') + (K'J')$$

$$\Rightarrow (K'J') \cong (IJ) = n\Delta$$

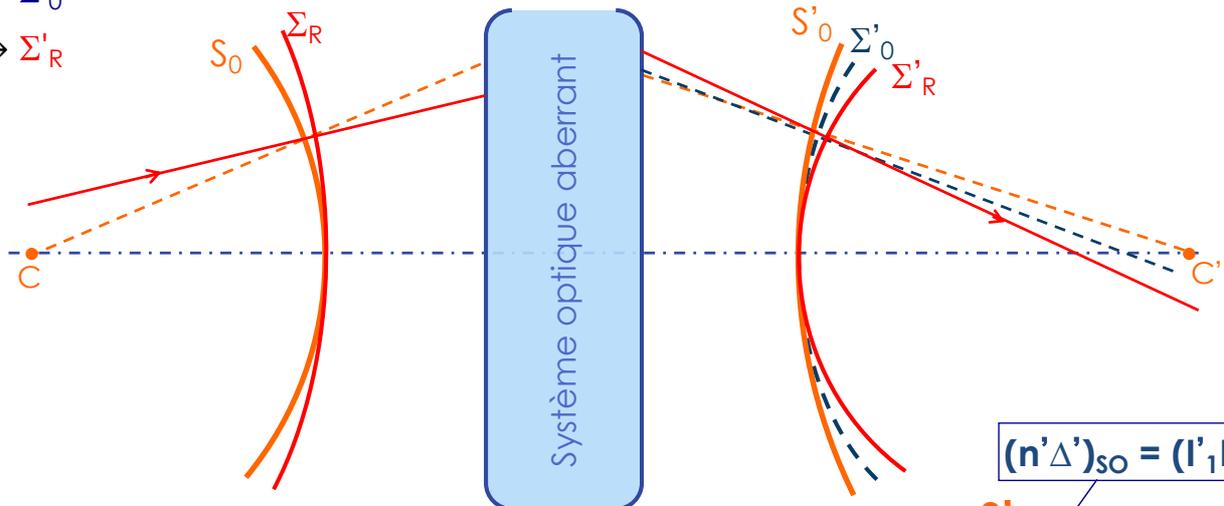


Théorème de Gouy

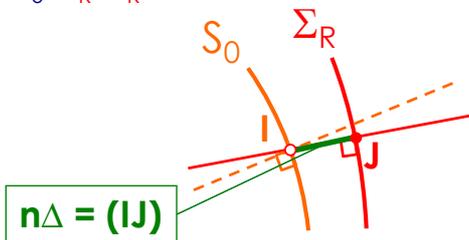
3. Propagation au travers d'un système aberrant

$$S_0 \mapsto \Sigma'_0$$

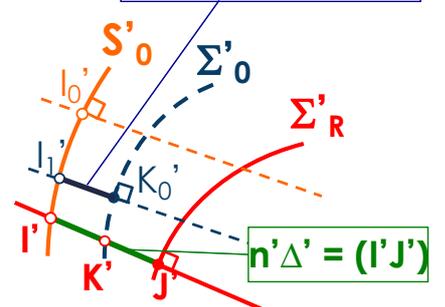
$$\Sigma_R \mapsto \Sigma'_R$$



$\Sigma'_0, \Sigma_R, \Sigma'_R$ = surfaces d'onde aberrantes



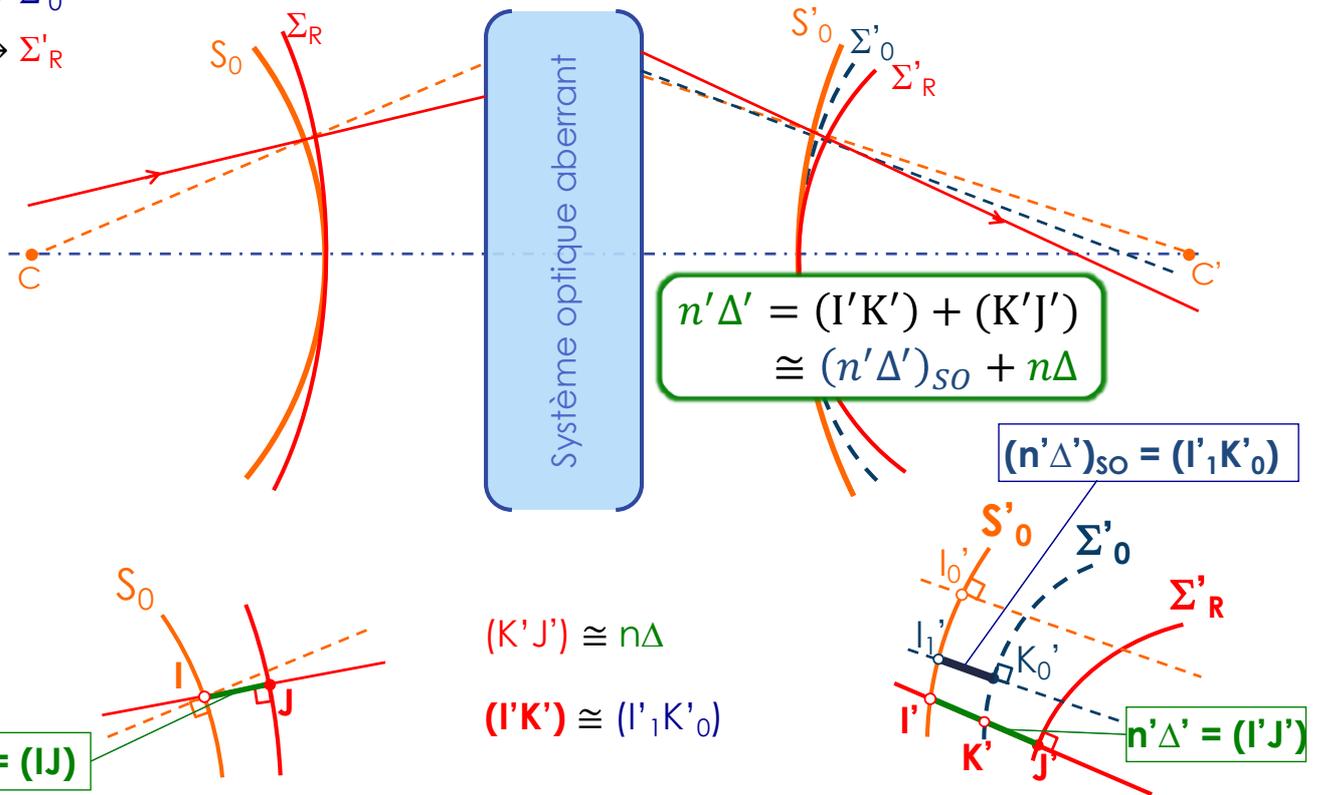
$$(n'\Delta')_{S_0} = (I'_1K'_0)$$



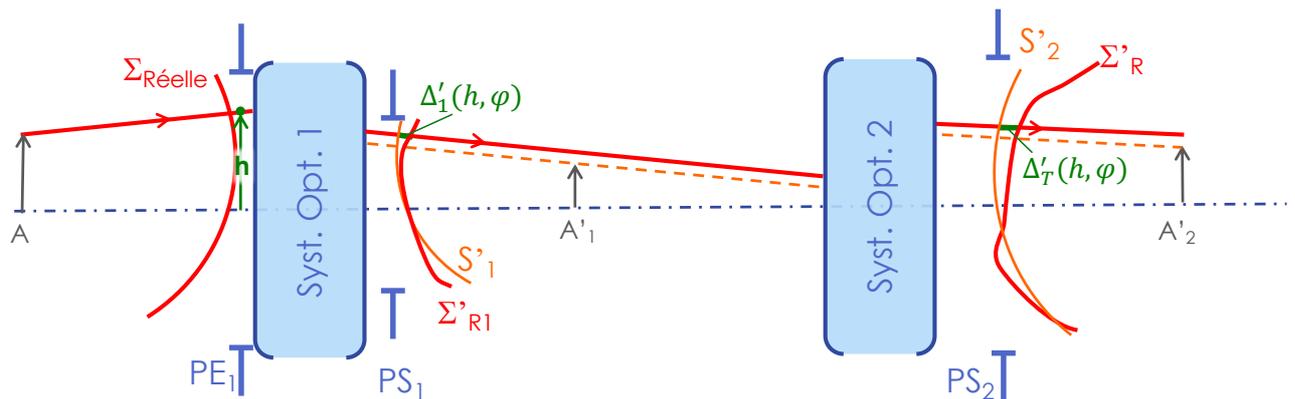
3. Propagation au travers d'un système aberrant

$$S_0 \mapsto \Sigma'_0$$

$$\Sigma_R \mapsto \Sigma'_R$$

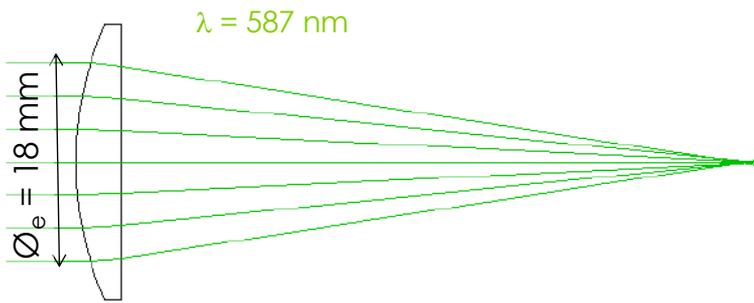


Combinaison de systèmes

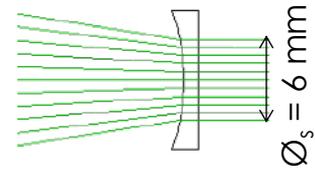


Écart normal total = somme des contributions à l'écart normal aberrant le long d'un même **rayon réel**

$$n'\Delta'_T = n'_1\Delta'_1 + n'_2\Delta'_2$$



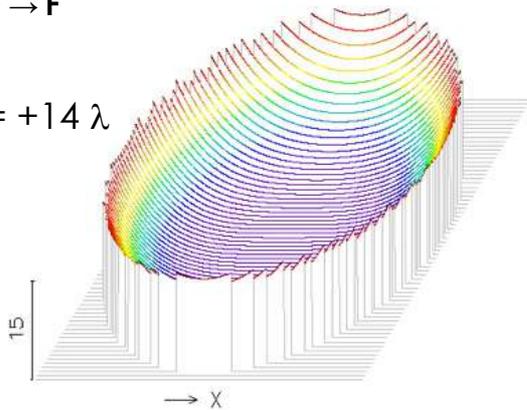
$L_1 : f' = 60 \text{ mm}, \text{BK7}$



$L_2 : f' = -20 \text{ mm}, \text{SF14}$

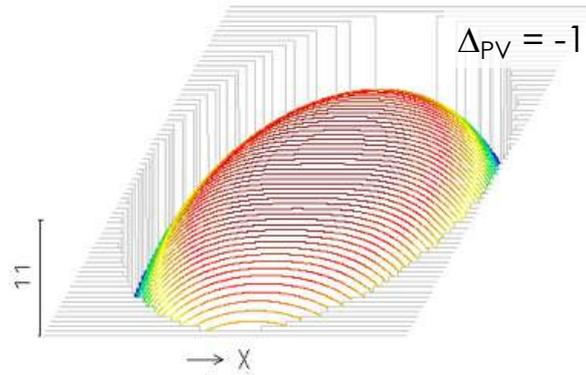
$L_1 : \infty \rightarrow F'$

$\Delta_{PV} = +14 \lambda$



$L_2 : F \rightarrow \infty$

$\Delta_{PV} = -11,5 \lambda$

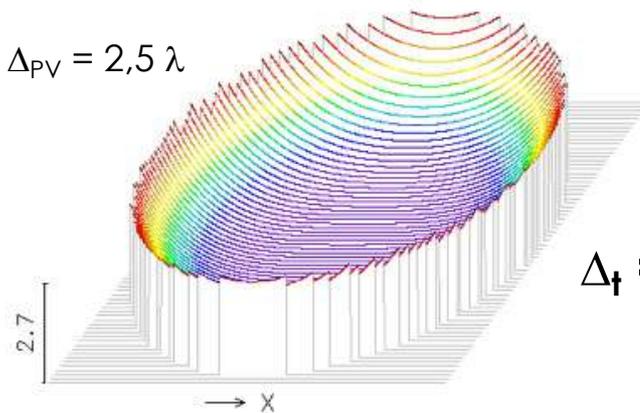


→ Les contributions se somment le long du même rayon réel qui se propage dans le système.



$L_1 : f' = 60 \text{ mm}, \text{BK7}$

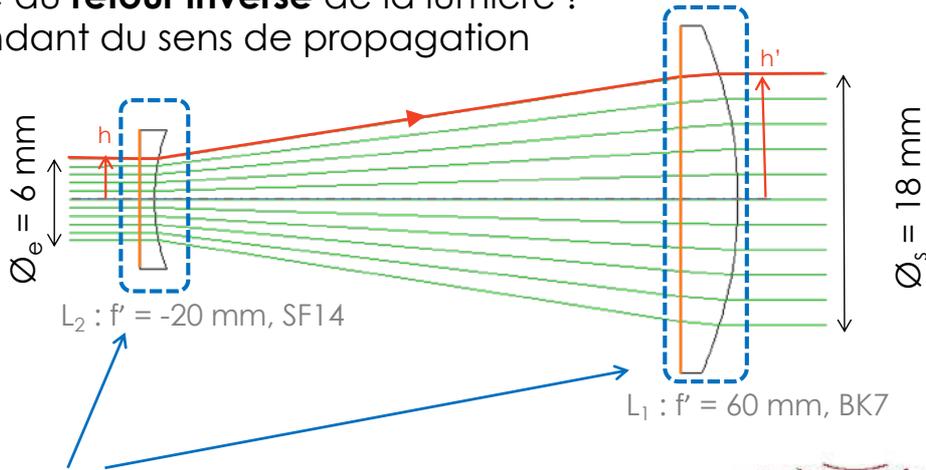
$\Delta_{PV} = 2,5 \lambda$



$$\Delta_t = \Delta_1 + \Delta_2$$

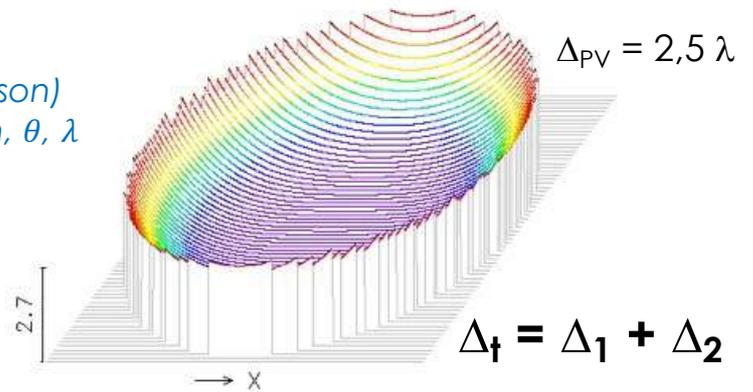
Assemblage de lentilles

NB : principe du **retour inverse** de la lumière !
 ⇒ Δ indépendant du sens de propagation



Lentilles utilisées

- dans le même sens (conjugaison)
- dans les mêmes conditions : h, θ, λ

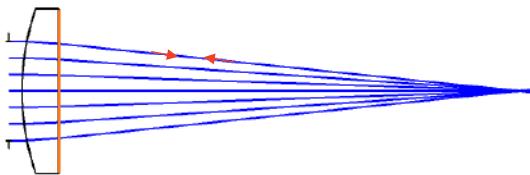


$\varnothing_1 = 15 \text{ mm}$ $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$
 $F'_1 = 75 \text{ mm}$

Remarque : sens des lentilles

+ plat, + près

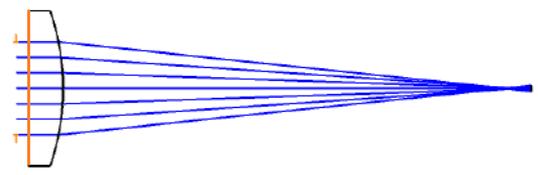
face plane vers le foyer



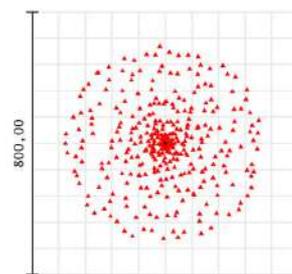
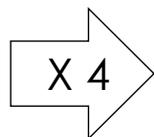
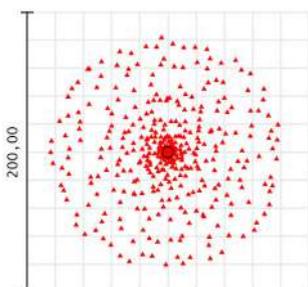
$\Delta_{PV} = + 4 \mu\text{m}$

Écart normal

face plane vers ∞



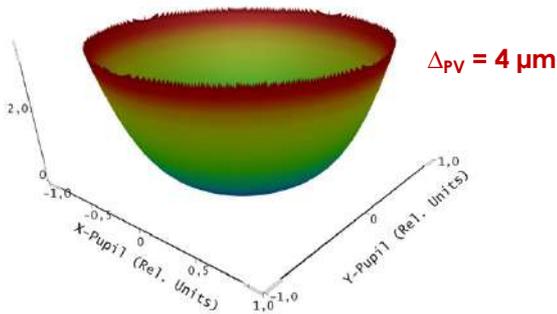
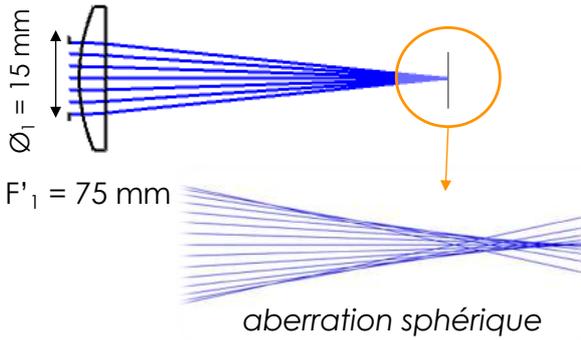
$\Delta_{PV} = + 16 \mu\text{m}$



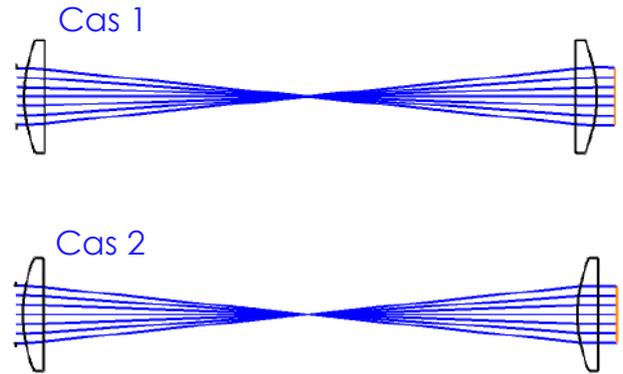
Spot-diagramme

quel que soit le sens de propagation de la lumière

L_1 seule ($\infty \rightarrow F'$) :



Système afocal $G_\theta = -1$

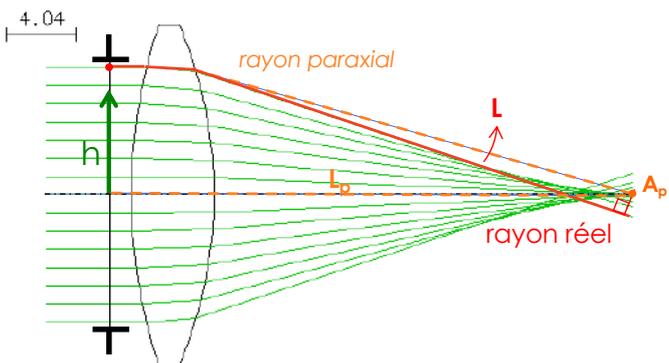


Quelle est l'amplitude PV de l'écart normal total, en sortie de l'afocal ?

- $\Delta_{PV} = 0 \mu\text{m}$
- $\Delta_{PV} = + 2 \mu\text{m}$
- $\Delta_{PV} = + 4 \mu\text{m}$
- $\Delta_{PV} = + 8 \mu\text{m}$
- $\Delta_{PV} = 16 \mu\text{m}$
- Il manque des données pour répondre

Ecart normal & chemin optique

Comment évaluer l'écart normal aberrant Δ ?

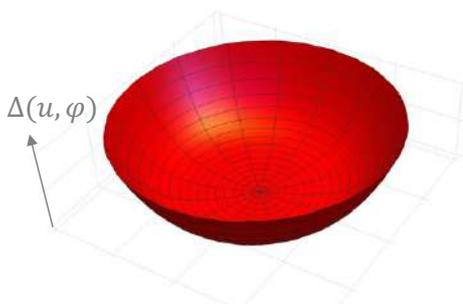


$$n' \Delta' = L_p - L$$

chemin optique mesuré en paraxial
 \Leftrightarrow indépendant du rayon (stigmatisme paraxial)

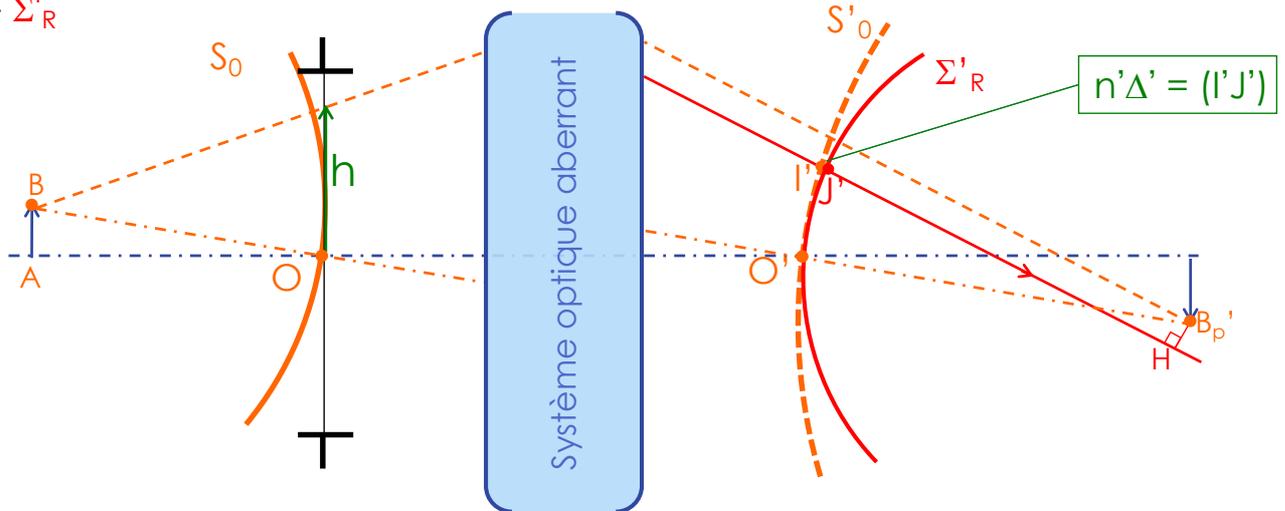
chemin optique mesuré sur le rayon réel
 $= \sum n_i d_i$

\rightarrow Approche utilisée dans les logiciels de tracés de rayons
 \Leftrightarrow valable pour les aberrations faibles – même cadre que th de Gouy



Ecart normal & chemin optique

$$S_0 \mapsto \Sigma'_R$$



S_0, S'_0 = surfaces sphériques de référence
 Σ'_R = surface d'onde aberrante

En paraxial, le système est stigmatique :

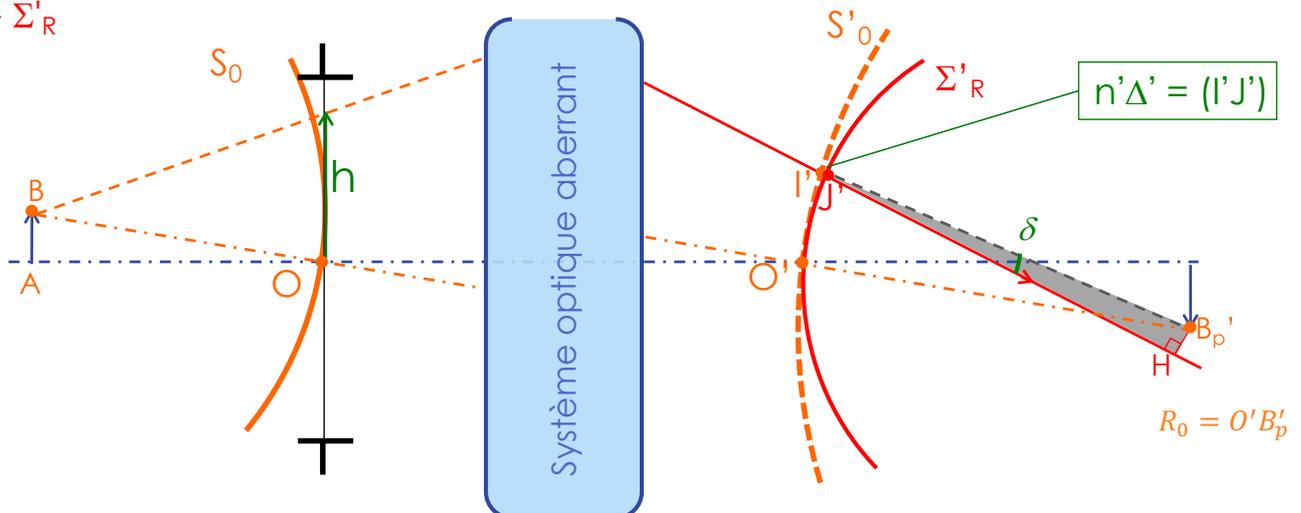
$$(BB'_p) = \text{constante}$$

⇒ chemin optique de référence :

$$L_p = (BOO'B'_p) = (BO') + n'R_0$$

Ecart normal & chemin optique

$$S_0 \mapsto \Sigma'_R$$



S_0, S'_0 = surfaces sphériques de référence
 Σ'_R = surface d'onde aberrante

Le chemin optique **réel** est mesuré sur le rayon réel :

$$L = (BJ' B'_p) = (BJ'H)$$

$$= (BJ') - n'\Delta' + n'(I'H)$$

$$\rightarrow = (BO')$$

$$\overline{I'H} = R_0 \times \cos \delta$$

$$\cong R_0 \left(1 - \frac{1}{2} \delta^2\right)$$

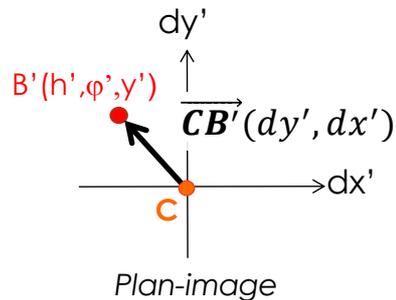
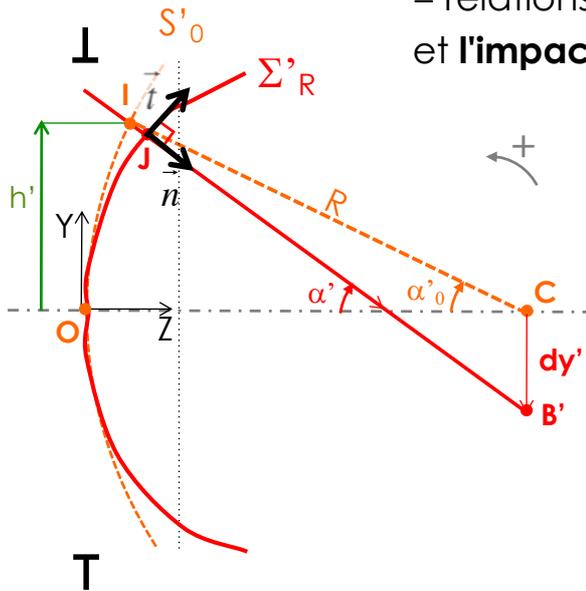
$$\Rightarrow L \cong (BO') - n'\Delta' + n'R_0$$

$$= L_p - n'\Delta'$$

$$n'\Delta' \cong L_p - L$$

Relations de Nijboer

= relations entre l'écart normal $\Delta(h, \varphi)$ dans la pupille et l'impact des rayons réels (dy, dx') dans le plan-image



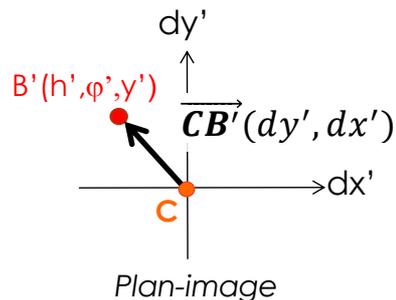
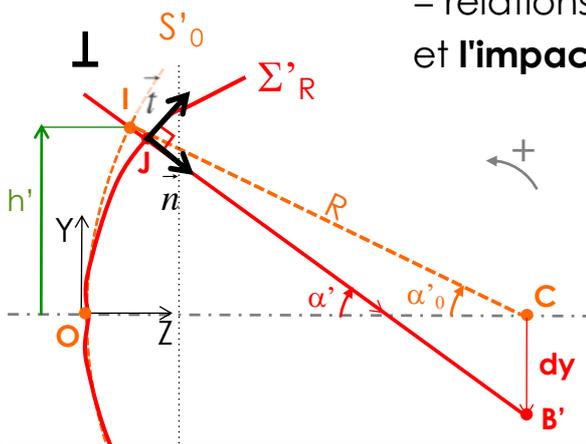
Bernard Nijboer
(1915 - 1999)

Les rayons sont \perp à la surface d'onde aberrante Σ'_R
 \Rightarrow l'impact des rayons dans le plan-image s'en déduit géométriquement

= spot-diagramme

Relations de Nijboer

= relations entre l'écart normal $\Delta(h, \varphi)$ dans la pupille et l'impact des rayons réels (dy, dx') dans le plan-image



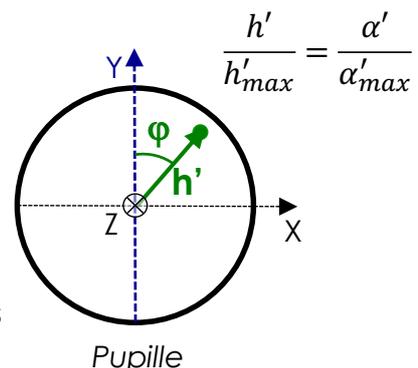
Démo détaillée
eCampus

Équations générales

$$\begin{cases} dy' = \frac{1}{\cos \alpha'} \left(\frac{\partial \Delta'}{\partial \alpha'} \right) \cos \varphi' - \frac{1}{\sin \alpha'} \left(\frac{\partial \Delta'}{\partial \varphi'} \right) \sin \varphi' \\ dx' = \frac{1}{\cos \alpha'} \left(\frac{\partial \Delta'}{\partial \alpha'} \right) \sin \varphi' + \frac{1}{\sin \alpha'} \left(\frac{\partial \Delta'}{\partial \varphi'} \right) \cos \varphi' \end{cases}$$

(en coordonnées polaires (α', φ') dans la pupille)

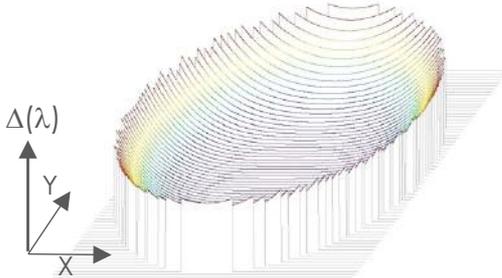
$\frac{\partial \Delta'}{\partial \alpha'}$, $\frac{\partial \Delta'}{\partial \varphi'}$: dérivées partielles de Δ par rapport aux coordonnées dans la pupille



Aberration sphérique du 3^{ème} ordre

Écart normal

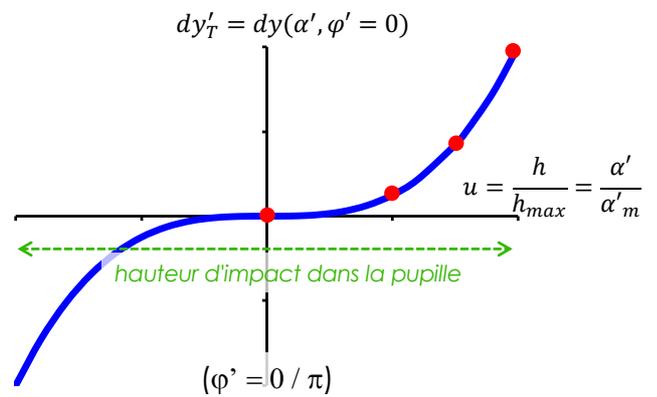
$$\Delta(h, \varphi) = A'_1 h^4 \Leftrightarrow \Delta(\alpha', \varphi) = \frac{\Delta_0}{\alpha'_m{}^4} \alpha'^4$$



Aberrations transverses

$$\begin{cases} dy' = \frac{1}{\cos \alpha'} \left(\frac{\partial \Delta'}{\partial \alpha'} \right) \cos \varphi' - \frac{1}{\sin \alpha'} \left(\frac{\partial \Delta'}{\partial \varphi'} \right) \sin \varphi' \\ dx' = \frac{1}{\cos \alpha'} \left(\frac{\partial \Delta'}{\partial \alpha'} \right) \sin \varphi' + \frac{1}{\sin \alpha'} \left(\frac{\partial \Delta'}{\partial \varphi'} \right) \cos \varphi' \end{cases}$$

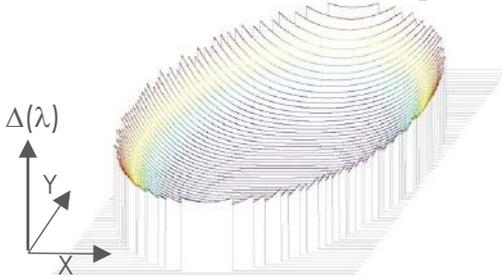
$(\alpha' \leq 0,5) \quad \approx 1 \quad \downarrow \quad \frac{4\Delta_0}{\alpha'_m{}^4} \alpha'^3 \quad \downarrow \quad \approx \alpha' \quad \downarrow \quad 0$



Aberration sphérique du 3^{ème} ordre

Écart normal

$$\Delta(h, \varphi) = A'_1 h^4 \Leftrightarrow \Delta(\alpha, \varphi) = -\frac{a}{4} \alpha'^4$$



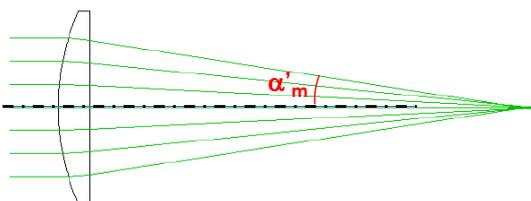
Aberrations transverses

$$\Rightarrow \begin{cases} dy' \cong -a\alpha'^3 \cos \varphi \\ dx' \cong -a\alpha'^3 \sin \varphi \end{cases}$$

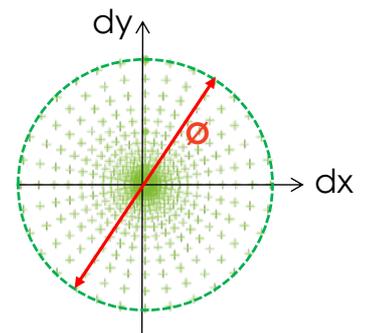
Spot-diagramme

$$\varnothing_{max} = |2a\alpha'^3_m|$$

→ Exemple :



$$\begin{aligned} f' = 60 \text{ mm} & \quad \left| \rightarrow \sin \alpha'_m = \frac{\varnothing_L}{2f'} = 0,15 \right. \\ \varnothing_L = 18 \text{ mm} & \\ \Delta_{max} = +14 \lambda & \end{aligned}$$



Méthodes d'évaluation

III. L'approche ondulatoire : la réponse percussionnelle

1. Imagerie dans le cadre de l'optique de Fourier
2. Réponse percussionnelle incohérente
 - En limite de diffraction
 - En présence d'aberrations
 - Rapport de Strehl
 - Critère de Maréchal
3. Exemples

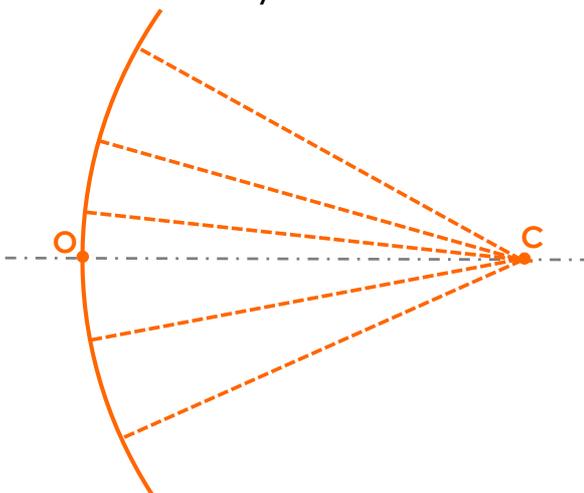
Conception de Systèmes Optiques
Cours n°3

Gaëlle Lucas-Leclin



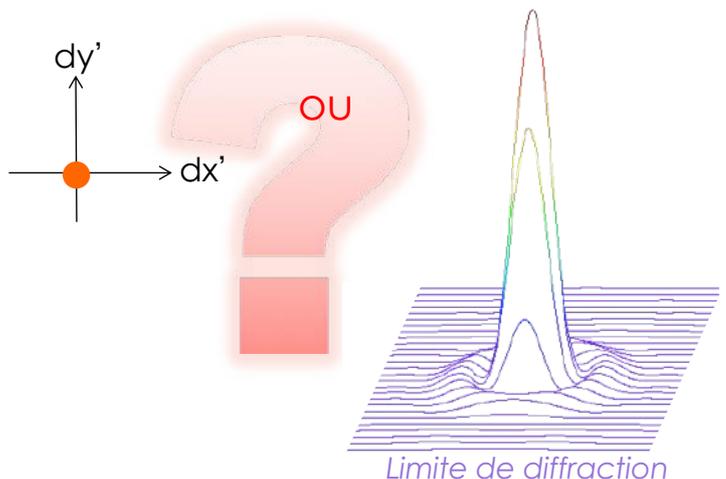
Approche ondulatoire

Système non aberrant :



Description géométrique

→ Quelle est la tache – image ?

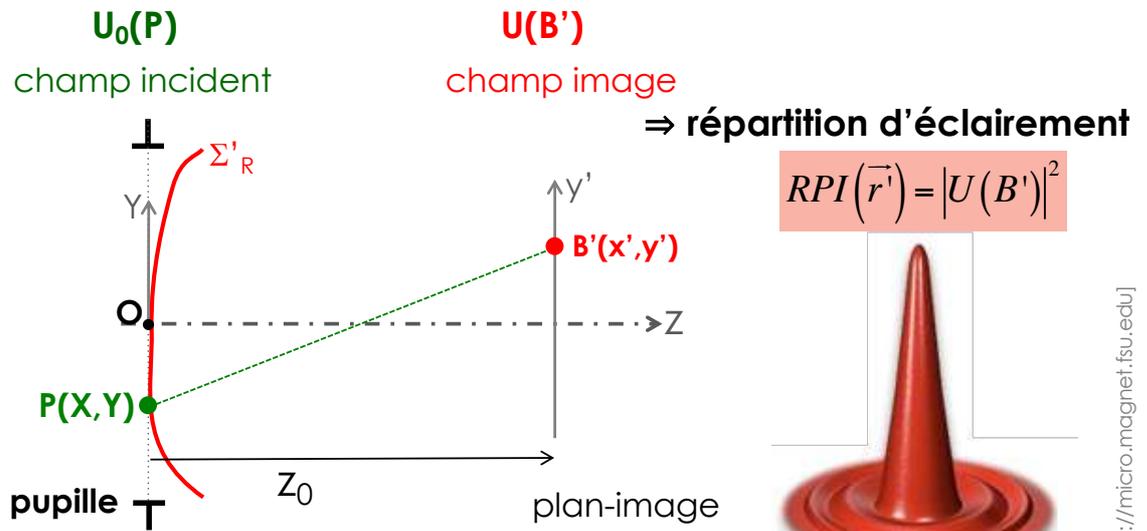


→ Comment prendre en compte la diffraction
dans les systèmes aberrants ?

Imagerie en optique de Fourier

= dans le cadre de la diffraction de Fresnel

Modélisation de la propagation de la surface d'onde aberrante pupille → plan image



[http://micro.magnet.fsu.edu]

Réponse percussionnelle incohérente

image d'un point

éclairage spatialement incohérent

Réponse percussionnelle

🇬🇧 Point Spread Function

→ cours d'Optique de Fourier, A. Dubois
→ Optique, Hecht – ch. 10

Imagerie en optique de Fourier

= dans le cadre de la diffraction de Fresnel

Principe d'Huygens-Fresnel : chaque point $P(X,Y)$ du front d'onde se comporte comme une source secondaire d'une ondelette sphérique

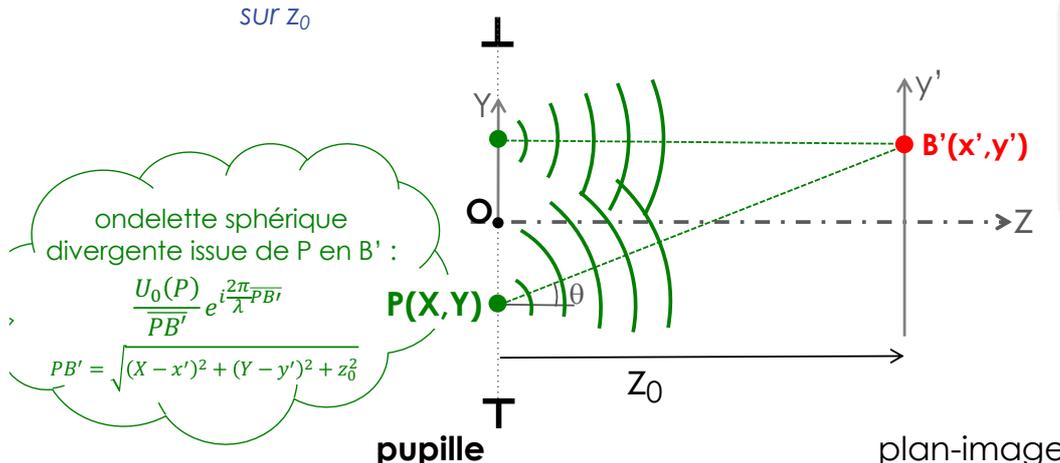
⇒ le champ au point B' est la somme des ondelettes issues de la pupille

$$U(B') \cong \frac{-i}{\lambda z_0} e^{i\frac{2\pi}{\lambda}z_0} \iint_{\text{pupille}} U_0(P(X,Y)) \exp\left(i\frac{\pi}{\lambda} \frac{(X-x')^2}{z_0} + i\frac{\pi}{\lambda} \frac{(Y-y')^2}{z_0}\right) dXdY$$

propagation sur z_0

onde dans la pupille

phase sphérique

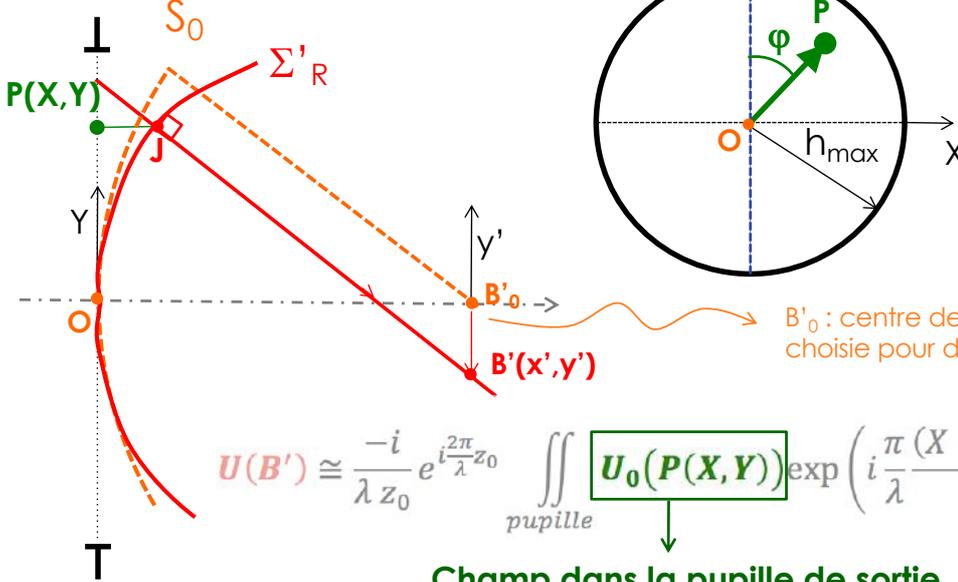


Approximations de la diffraction de Fresnel :

- Champs scalaires - pas de prise en compte de la polarisation
- Angles d'incidence faibles
- Onde monochromatique

RPI en présence d'aberrations

Pupille de sortie



Fonction pupille :

- pupille circulaire homogène
 $p_0(X, Y) = 1$
pour $h = \sqrt{X^2 + Y^2} \leq h_{max}$
- pupille annulaire
- pupille gaussienne
- ...

B'_0 : centre de la sphère de réf S_0
choisie pour définir Δ

$$U(B') \cong \frac{-i}{\lambda z_0} e^{i\frac{2\pi}{\lambda}z_0} \iint_{pupille} U_0(P(X, Y)) \exp\left(i\frac{\pi}{\lambda} \frac{(X-x')^2}{z_0} + i\frac{\pi}{\lambda} \frac{(Y-y')^2}{z_0}\right) dXdY$$

Champ dans la pupille de sortie

onde aberrante Σ'_R : $U_0(P) = A_0 p_0(X, Y) \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} n\Delta(X, Y)\right) \exp\left(-i\pi \frac{X^2 + Y^2}{\lambda z_0}\right)$

fonction pupille phase aberrante phase sphérique
onde convergente en B'_0

RPI en présence d'aberrations

Expression du champ optique au point B'

$$U(B') \cong \frac{-i}{\lambda z_0} e^{i\frac{2\pi}{\lambda}z_0} \iint_{pupille} U_0(P(X, Y)) \exp\left(i\frac{\pi}{\lambda} \frac{(X-x')^2}{z_0} + i\frac{\pi}{\lambda} \frac{(Y-y')^2}{z_0}\right) dXdY$$

$U_0(P) = A_0 p_0(X, Y) \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} n\Delta(X, Y)\right) \exp\left(-i\pi \frac{X^2 + Y^2}{\lambda z_0}\right)$

$$U(B') \cong \frac{-i}{\lambda z_0} e^{i\frac{2\pi}{\lambda}z_0} e^{i\frac{\pi}{\lambda} \frac{x'^2 + y'^2}{z_0}} A_0 \iint_{pupille} p_0(X, Y) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} n\Delta(X, Y)} \exp\left(-2i\pi \frac{x'X + y'Y}{\lambda z_0}\right) dXdY$$

$$TF\left(p_0(X, Y) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} n\Delta(X, Y)}\right)_{\left(\frac{x'}{\lambda z_0}, \frac{y'}{\lambda z_0}\right)}$$

phase aberrante Fréquence spatiale [mm⁻¹]

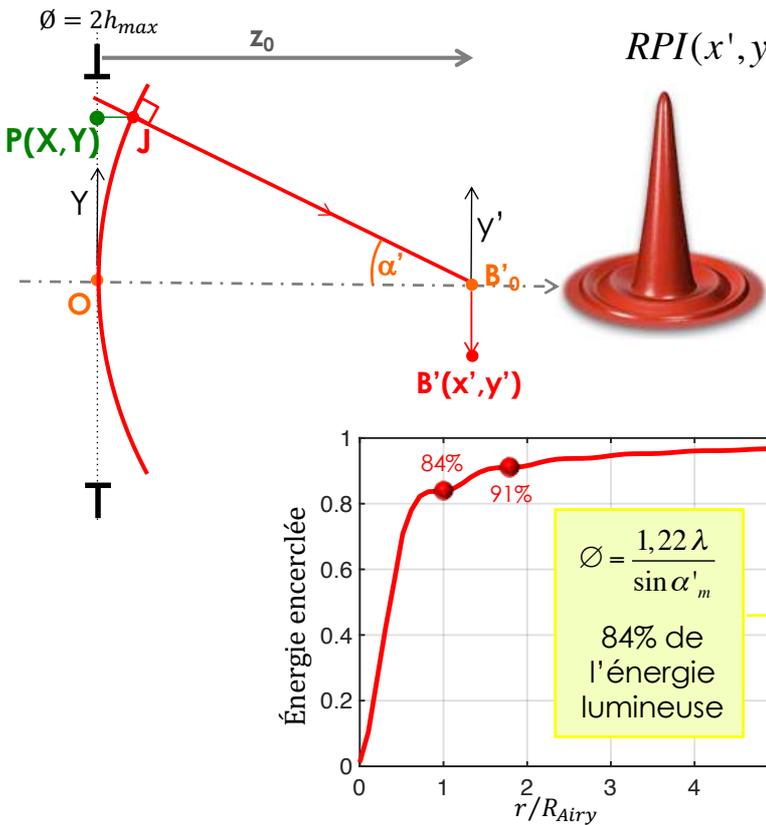
⇒ Réponse percussionnelle incohérente = profil d'éclairement autour de B'_0

$$RPI(x', y') = |U(B')|^2 \cong \frac{|A_0|^2}{(\lambda z_0)^2} \left| TF\left(p_0(X, Y) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} n\Delta(X, Y)}\right)_{\left(\frac{x'}{\lambda z_0}, \frac{y'}{\lambda z_0}\right)} \right|^2$$

[W.m⁻²]

RPI en limite de diffraction

Pupille de sortie



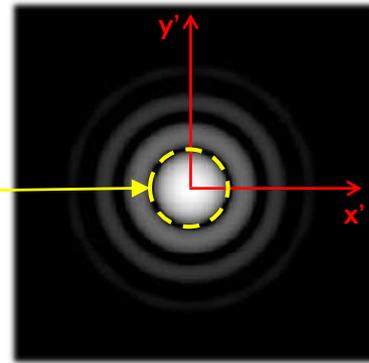
Pupille circulaire homogène

$$RPI(x', y') = |U(B')|^2 \cong \frac{|A_0|^2}{(\lambda z_0)^2} \times |\mathbf{TF}[p_0(X, Y)]|^2_{\left(\frac{x'}{\lambda z_0}, \frac{y'}{\lambda z_0}\right)}$$

$$= \frac{|A_0|^2}{(\lambda z_0)^2} \times (\pi h_{max}^2)^2 \times \left(\frac{2J_1\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_{max} r'}{z_0}\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_{max} r'}{z_0}} \right)^2$$

E_{max} [W/m²] RPI normalisée
0 ≤ ... ≤ 1

$$\begin{cases} r' = \sqrt{x'^2 + y'^2} \\ \sin \alpha'_m = \frac{h_{max}}{z_0} \end{cases}$$



RPI en limite de diffraction

Pupille circulaire homogène

$$RPI(x', y') = |U(B')|^2 \cong \frac{|A_0|^2}{(\lambda z_0)^2} \times |\mathbf{TF}[p_0(X, Y)]|^2_{\left(\frac{x'}{\lambda z_0}, \frac{y'}{\lambda z_0}\right)}$$

$$= \frac{|A_0|^2}{(\lambda z_0)^2} \times (\pi h_{max}^2)^2 \times \left(\frac{2J_1\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_{max} r'}{z_0}\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_{max} r'}{z_0}} \right)^2$$

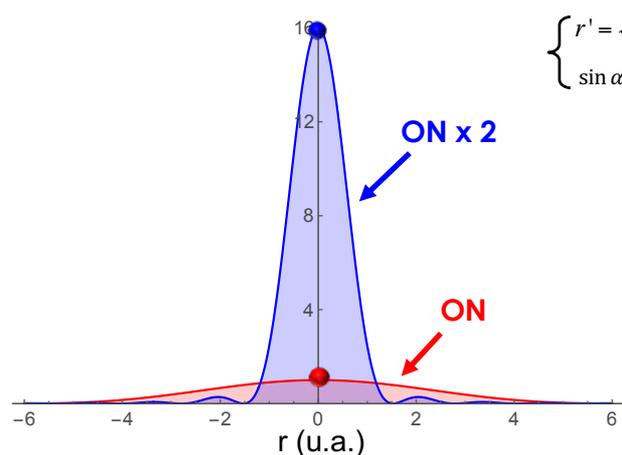
E_{max} [W/m²]

$|A_0|^2$: éclairement dans la pupille

$|A_0|^2 \times \pi h_{max}^2$:
flux capté par le système optique

$E_{max} \propto h_{max}^4 \propto (ON)^4$

$$\begin{cases} r' = \sqrt{x'^2 + y'^2} \\ \sin \alpha'_m = \frac{h_{max}}{z_0} \end{cases}$$



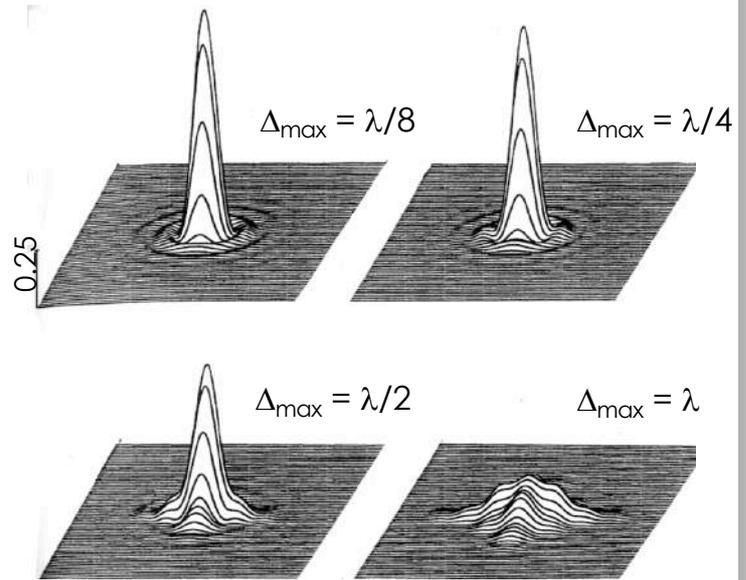
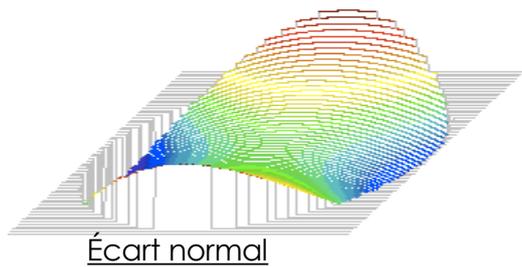
$$RPI(\vec{r}^i) = \frac{|A_0|^2}{(\lambda z_0)^2} \left| TF \left(p_0(X, Y) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda} n \Delta(X, Y)} \right) \left(\frac{\vec{r}^i}{\lambda z_0} \right) \right|^2$$

→ Pas d'expression analytique dans le cas général

calcul numérique par intégration 2D ou par Fast Fourier Transform (FFT)

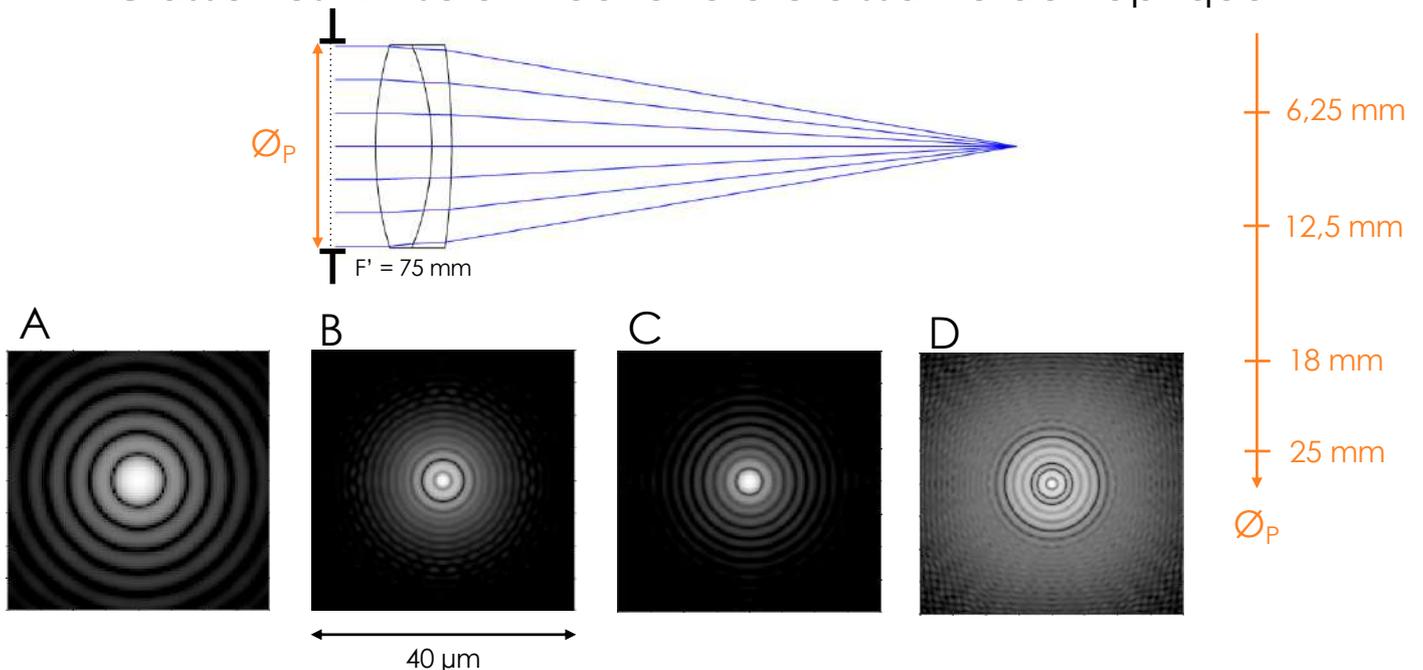
Astigmatisme du 3^{ème} ordre :

$$\Delta(h, \varphi) = \Delta_{\max} \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^2 \cos 2\varphi$$



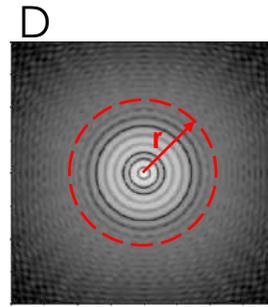
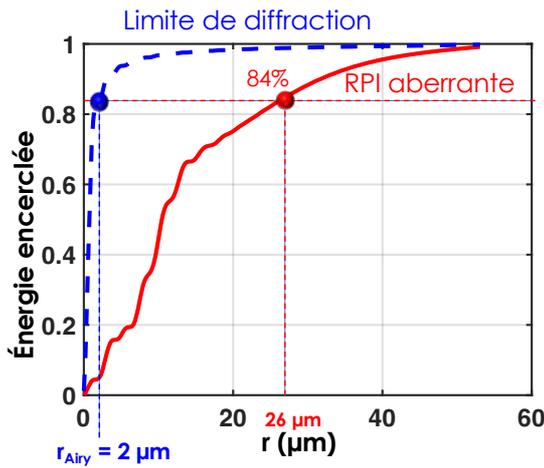
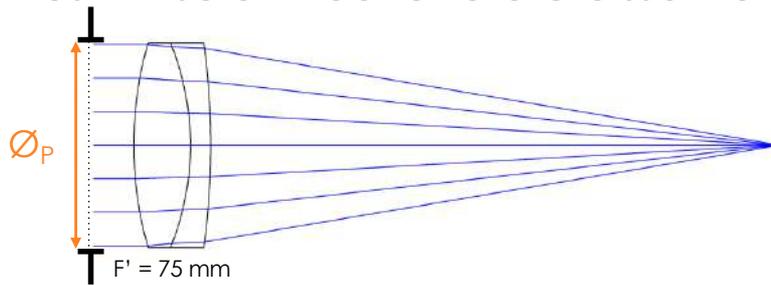
[Modern Optical Engineering, W. Smith]

Classer les RPI selon l'ouverture croissante de l'optique



Représentation en échelle log de l'éclairement sur un carré de côté 40 µm ;
éclairement normalisé au maximum et seuillage à -40 dB

Classer les RPI selon l'ouverture croissante de l'optique



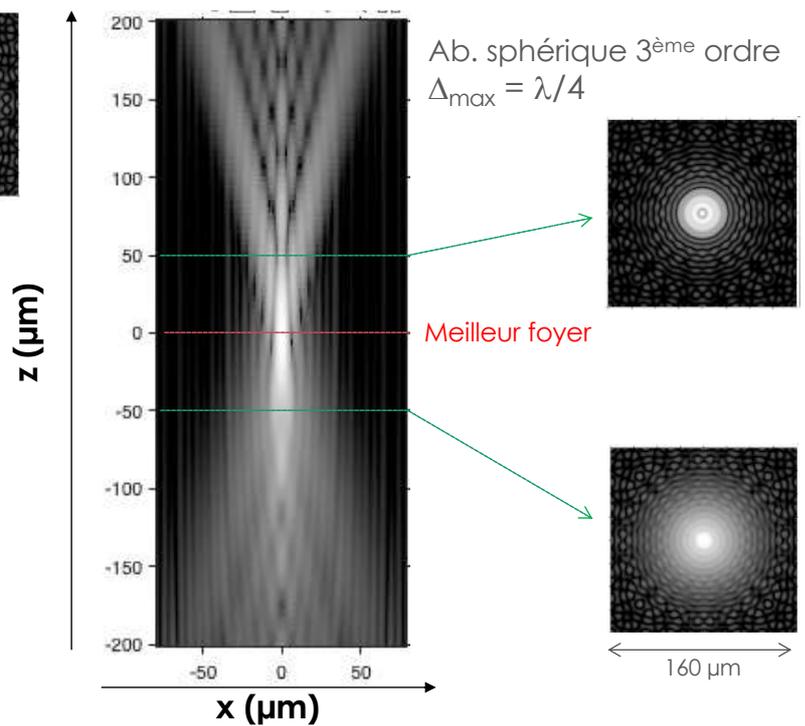
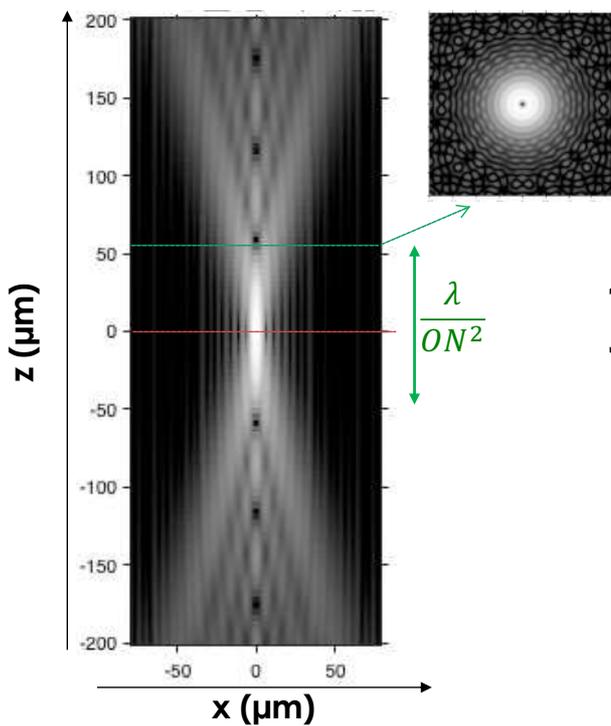
$\varnothing_P = 25 \text{ mm}$

Évolution le long de l'axe optique

RPI en limite de diffraction

RPI aberrante

ON = 0,10
 $\lambda = 1 \mu\text{m}$



= éclaírement max. dans la RPI aberrante
normalisé à l'éclaírement max. en limite de diffraction

$$R_S = \frac{\max(|U(B')|^2)}{E_{max}}$$

$$R_S = \frac{|U(B'_0)|^2}{E_{max}} = \frac{|\mathbf{TF}(p_0(X, Y)e^{i\Phi(X, Y)})_{\vec{0}}|^2}{|\mathbf{TF}(p_0(X, Y))_{\vec{0}}|^2} \leq 1$$

Avec $\Phi(X, Y) = -2\pi \frac{\Delta(X, Y)}{\lambda}$

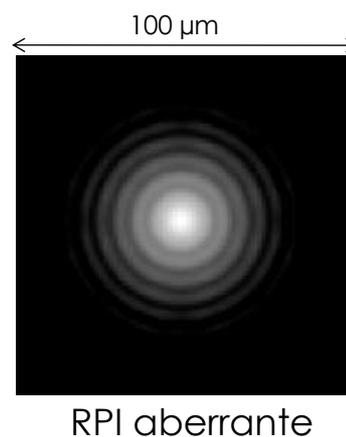
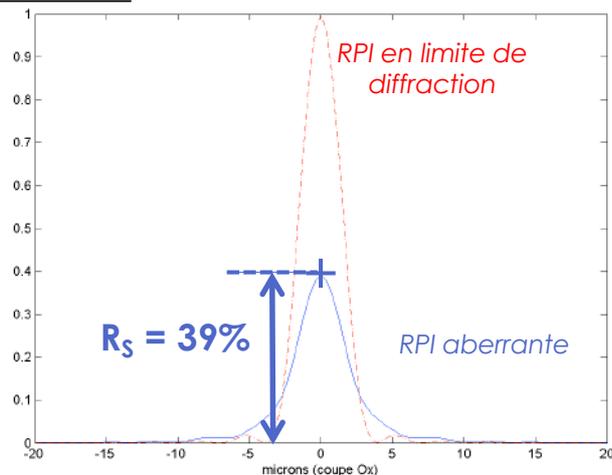
$$\left| \iint_{pupille} p_0(X, Y)e^{i\Phi(X, Y)} dXdY \right|^2 \leq \iint_{pupille} |p_0(X, Y)e^{i\Phi(X, Y)}|^2 dXdY$$

Ab. Sphérique du 3^è ordre

$$\sin \alpha_m' = 0,10$$

$$\lambda = 0,5 \mu\text{m}$$

$$\Delta_{max} = \lambda/2$$



RPI aberrante

= éclairement max. dans la RPI aberrante
normalisé à l'éclairement max. en limite de diffraction

$$R_S = \frac{|U(B'_0)|^2}{E_{max}} = \frac{\left| \mathcal{TF}(p_0(X,Y)e^{i\Phi(X,Y)})_{\vec{0}} \right|^2}{\left| \mathcal{TF}(p_0(X,Y))_{\vec{0}} \right|^2} \longrightarrow \left| \underbrace{\iint_{\sqrt{X^2+Y^2} \leq h_{max}} e^{i\Phi(X,Y)} dXdY}_{\text{Moyenne sur la pupille}} \right|^2$$

$\frac{e^{i\Phi} \times \pi h_{max}^2}{\pi h_{max}^2}$

- Approximation quadratique

$$R_S \cong 1 - \sigma_{\Phi}^2$$

- Approximation exponentielle

$$R_S \cong \exp(-\sigma_{\Phi}^2)$$

+ grand domaine de validité

avec $\sigma_{\Phi}^2 = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \sigma_{\Delta}^2$: variance de la phase aberrante

= grandeur pertinente pour quantifier l'importance d'une aberration

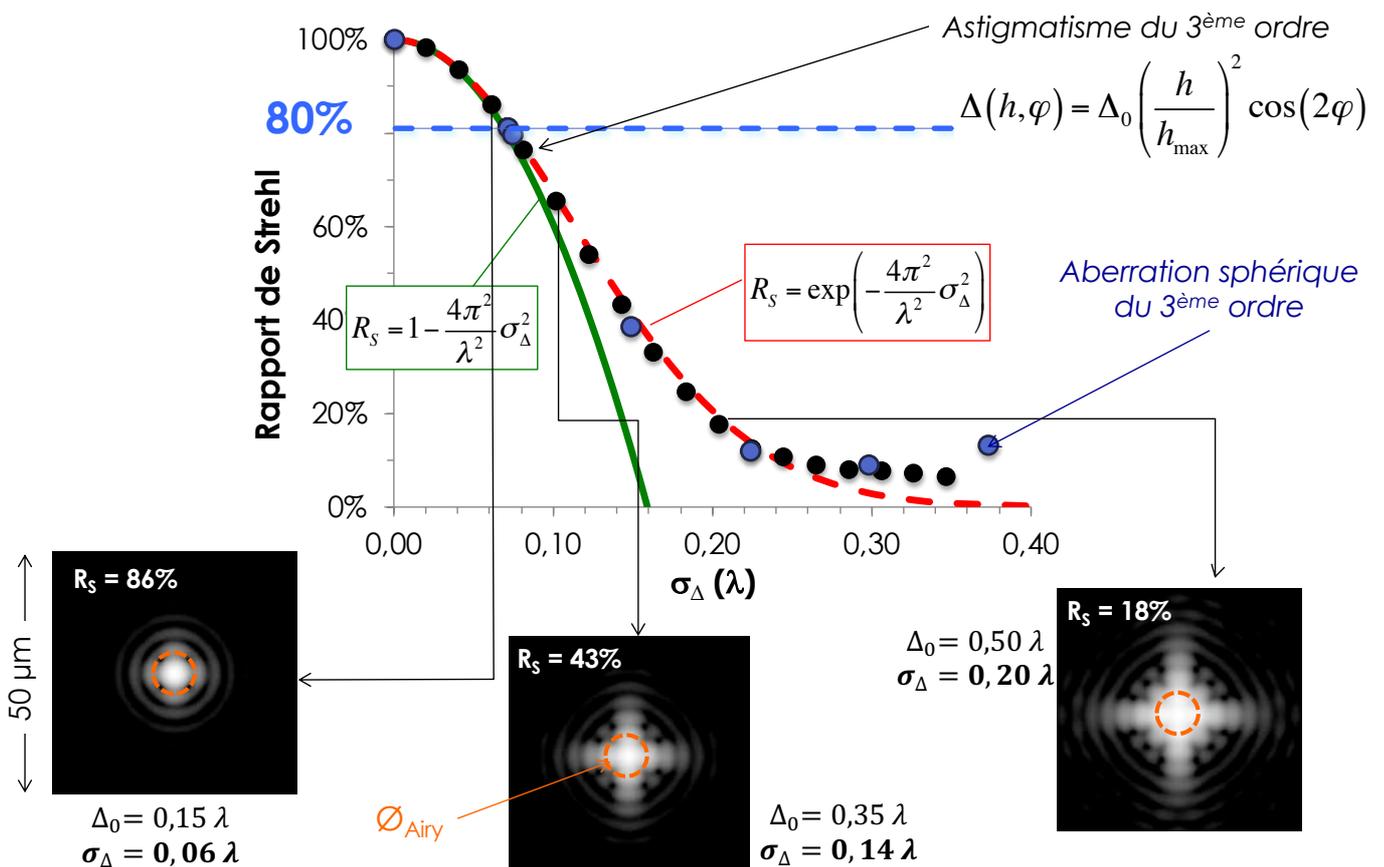
Démonstration :

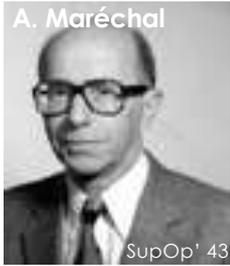
Pour les faibles aberrations ($\Phi \ll 1$) :

$$e^{i\Phi} \cong 1 + i\Phi - \frac{\Phi^2}{2} ..$$

→ cf poly

Approximation analytique de R_S





$$R_S \geq 80 \% \Leftrightarrow 1 - \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \sigma_\Delta^2 \geq 0,80 \Leftrightarrow \sigma_\Delta \leq \frac{\sqrt{0,2}}{2\pi} \lambda \cong 0,07\lambda \cong \frac{\lambda}{14}$$

$$\Leftrightarrow \sigma_\Delta \leq \frac{\lambda}{14}$$

→ critère usuel pour définir la "limite de diffraction"

⇒ tolérances sur les différentes aberrations :

Aberration (3 ^{ème} ordre)	Ecart normal aberrant	Amplitude PV
Aberration sphérique	$\Delta(h, \varphi) = \Delta_{\max} \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^4$	$\Delta_{\max} = 0,24 \lambda$
Coma	$\Delta(h, \varphi) = \Delta_{\max} \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^3 \cos \varphi$	$\Delta_{PV} = 2\Delta_{\max} = 0,40 \lambda$
Astigmatisme	$\Delta(h, \varphi) = \Delta_{\max} \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^2 \cos 2\varphi$	$\Delta_{PV} = 2\Delta_{\max} = 0,34 \lambda$

pour une mise au point au foyer paraxial

Synthèse des approches

→ Écart normal

= analyse et propagation d'une surface d'onde

Théorème de Gouy $(n'\Delta')_{total} = \sum_i (n'_i \Delta'_i)$

Relation avec les chemins optiques $(n'\Delta') = L_p - L$

→ Analyse de la réponse percussionnelle

- évaluée géométriquement

= tracé de rayons

Étalement géométrique de l'impact des rayons
Aberrations transverses

- évaluée en prenant en compte la diffraction

= optique de Fourier

Répartition de l'éclairement

$$RPI(x', y')^2 \cong \frac{|A_0|^2}{(\lambda z_0)^2} \times |\mathbf{TF}[p(X, Y)]|^2$$

Rapport de Strehl



$$\begin{cases} dy \cong \frac{\partial \Delta}{\partial \alpha} \cdot \cos \varphi - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \Delta}{\partial \varphi} \cdot \sin \varphi \\ \frac{\partial \Delta}{\partial \alpha} \cdot \sin \varphi + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \Delta}{\partial \varphi} \cdot \cos \varphi \end{cases}$$

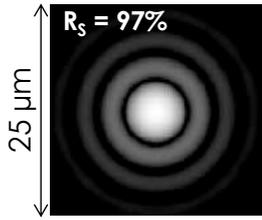
Relations de Nijboer

$$R_S \cong \exp\left(-\frac{4\pi^2}{\lambda^2} \sigma_\Delta^2\right)$$

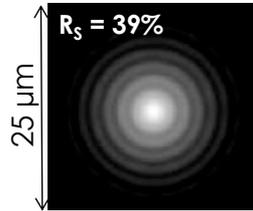
Spot-diagramme vs RPI ?

Aberration sphérique du 3^{ème} ordre

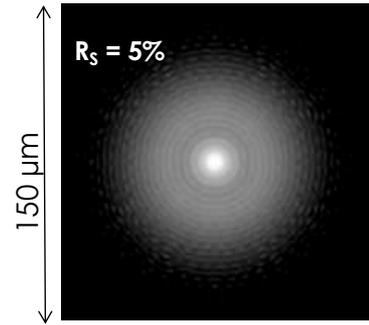
$$\Delta(h, \varphi) = \Delta_0 \times \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^4$$



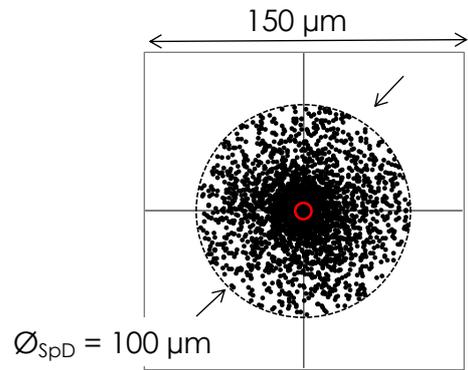
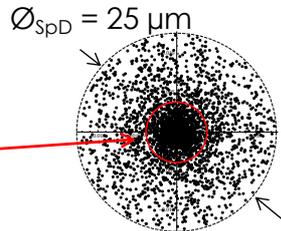
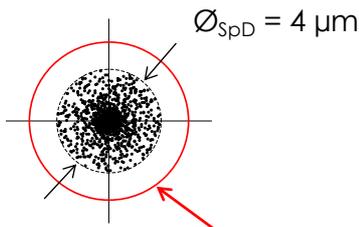
$\Delta_0 = 0,1 \lambda$



$\Delta_0 = 0,5 \lambda$

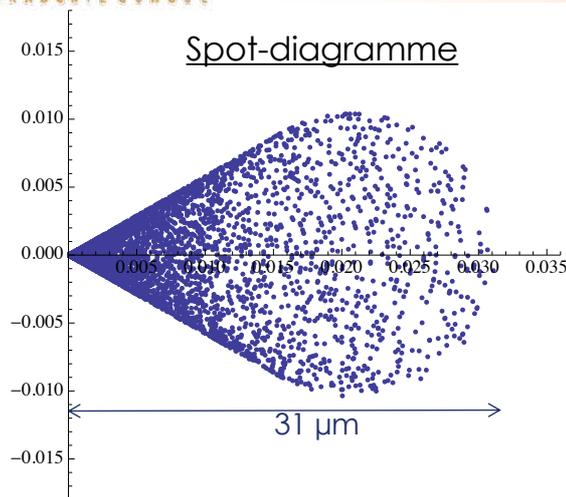


$\Delta_0 = 2 \lambda$



$\sin \alpha_m' = 0,10$
 $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$
 $\varnothing_{\text{Airy}} = 8 \mu\text{m}$

Spot-diagramme vs RPI ?

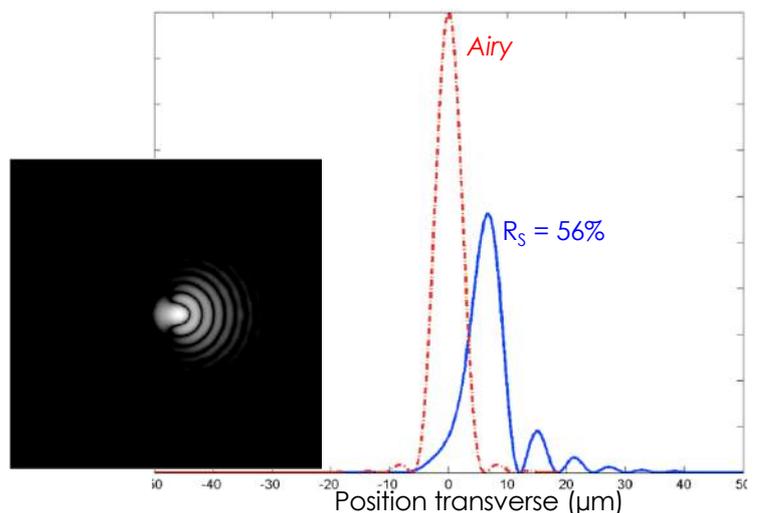


Coma du 3^{ème} ordre

$$\Delta(h, \varphi) = \lambda \times \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^3 \cos \varphi$$

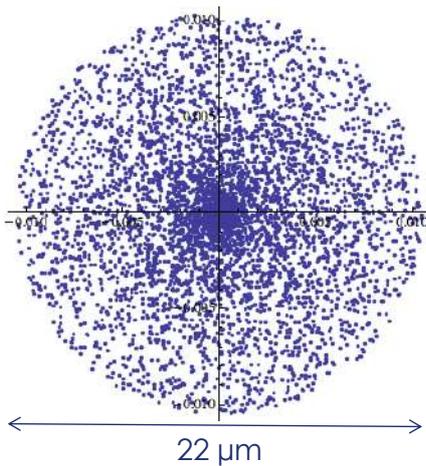
$\sin \alpha_m' = 0,06$
 $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$

Réponse percussive incohérente



Spot-diagramme vs RPI ?

Spot-diagramme



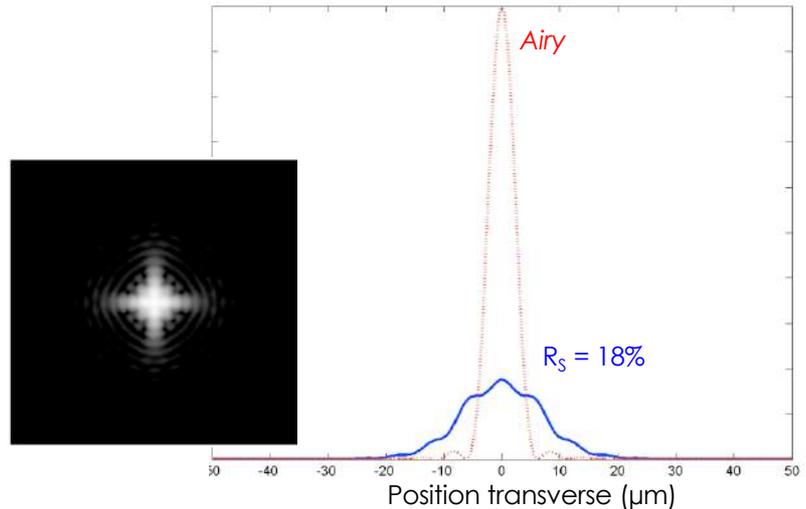
Astigmatisme du 3^{ème} ordre

$$\sin \alpha_m' = 0,06$$

$$\lambda = 0,633 \mu\text{m}$$

$$\Delta(h, \varphi) = \frac{\lambda}{2} \times \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^2 \cos 2\varphi$$

Réponse percutive incohérente



Spot-diagramme vs RPI ?

= 2 approches pour décrire l'image d'un point, à partir d'une même surface d'onde

→ dans le cas des très faibles aberrations - $\Delta \lesssim \lambda$

prise en compte de la diffraction **indispensable** pour rendre compte de la taille de la *tache-image* & de son profil d'intensité

→ dans le cas des fortes aberrations - $\Delta \gtrsim 10 \lambda$

pb de limite de validité des calculs numériques de TF (échantillonnage, nombre de pts, temps de calcul ...)
approche géométrique suffisante et rapide
mais ne décrit pas explicitement l'éclairement

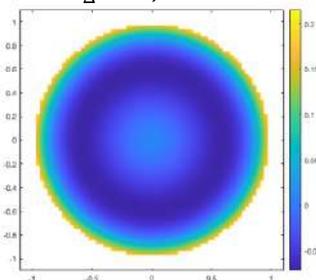


tache ≠ tâche
task



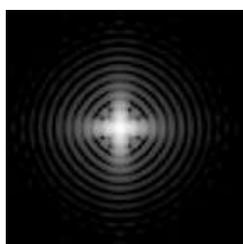
Associez les fronts d'onde et les RPI

$\Delta_{PV} = 0,30 \lambda$
 $\sigma_{\Delta} = 0,08 \lambda$



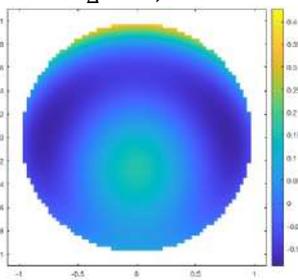
A

1



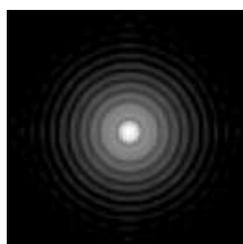
$R_S = 0,46$

$\Delta_{PV} = 0,57 \lambda$
 $\sigma_{\Delta} = 0,10 \lambda$



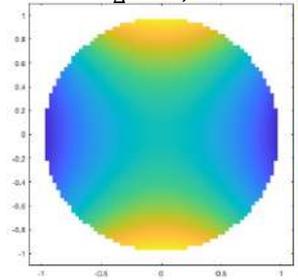
B

2



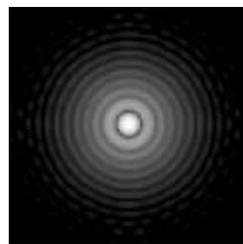
$R_S = 0,79$

$\Delta_{PV} = 0,69 \lambda$
 $\sigma_{\Delta} = 0,14 \lambda$



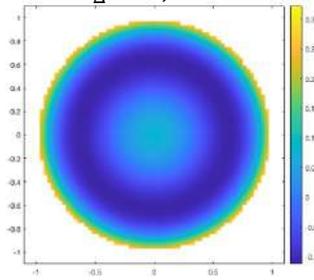
C

3



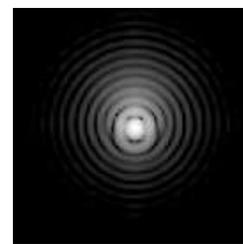
$R_S = 0,61$

$\Delta_{PV} = 0,44 \lambda$
 $\sigma_{\Delta} = 0,11 \lambda$



D

4



$R_S = 0,69$

Méthodes d'évaluation des aberrations – synthèse

- Les aberrations chromatiques et géométriques décrivent la trajectoire réelle de la lumière dans un système optique, et les conséquences sur la qualité de l'image, par rapport à l'approximation paraxiale. (cf. Cours n°1)
- Les aberrations d'un système optique peuvent être décrites suivant plusieurs approches complémentaires :
 - d'une manière purement géométrique à partir du tracé des rayons *réels* (par réfraction ou réflexion sur les dioptries) ;
 - en raisonnant sur la propagation des surfaces d'onde déformées, par l'intermédiaire de l'écart normal ;
 - en prenant en compte la diffraction, grâce à l'optique de Fourier.
- L'approche géométrique à partir d'un tracé de rayons est celle utilisée par les logiciels de conception optique. Elle donne en particulier accès à l'impact des rayons issus d'un point-source au voisinage du point-image calculé dans l'approximation paraxiale. Les **aberrations transverses**, associées au vecteur $\overline{B'_p B'}$ (dy', dx'), décrivent ces impacts. La décomposition polynomiale des aberrations transverses dans les systèmes à symétrie de révolution fait apparaître des termes d'ordre croissant, qui dépendent de la hauteur du rayon dans la pupille (h ou α'), de l'angle d'azimut dans la pupille (φ) et du champ (y' ou θ). Chaque terme peut être associé à une aberration différente. (cf. Cours n°1)
- **L'écart normal aberrant** $\Delta(h, \varphi)$ est la distance algébrique entre la surface d'onde réelle et la surface d'onde de référence, mesurée sur le rayon réel. Cette grandeur permet de décrire les déformations d'une surface d'onde au travers d'un système optique. Le théorème de Gouy stipule que l'écart normal se conserve en espace libre et à la traversée d'un système optique non-aberrant. Les contributions des différents dioptries et systèmes optiques se somment le long du rayon réel. (cf. Cours n°2)
- L'écart normal caractérise les défauts d'un système optique dans la conjugaison considérée, en fonction des coordonnées dans la pupille (h, φ) pour un point objet donné (y ou θ). C'est une grandeur importante pour analyser les performances d'un dispositif, pour concevoir et compenser une configuration optique. (cf. Cours n°2)
- Les rayons optiques étant perpendiculaires à la surface d'onde réelle, les aberrations transverses (dy', dx') dans le plan-image sont évidemment liées à l'écart normal aberrant Δ . Les **relations de Nijboer** explicitent ce lien de manière analytique. (cf. Cours n°2)
- La prise en compte de la diffraction, du fait des dimensions finies des optiques et donc de la pupille, dans l'évaluation des performances d'un dispositif d'imagerie permet de prévoir l'importance des aberrations par rapport à la limite de diffraction (tache d'Airy). Cela repose sur l'optique de Fourier et l'approximation de Fresnel. (cf. Cours n°3)
- La répartition d'éclairement autour du point de référence est la **réponse percussionnelle incohérente** (RPI) ; elle est proportionnelle au module carré du front d'onde dans la pupille. (cf. Cours n°3)
- Le **rapport de Strehl** R_S est le rapport entre le maximum d'éclairement dans la RPI en présence d'aberrations, et ce maximum en limite de diffraction. Pour les faibles aberrations, le rapport de Strehl est simplement lié à l'écart quadratique moyen de l'écart normal aberrant σ_Δ . Le critère de Maréchal propose de considérer qu'un système optique est en limite de diffraction si $\sigma_\Delta \lesssim \frac{\lambda}{14}$, ce qui correspond à $R_S \geq 80\%$. (cf. Cours n°3)

⇒ consultez le poly (disponible sur e-campus) *Méthodes d'évaluation des aberrations* pour approfondir