



Techniques numériques pour l'optique : Cours Magistral 1

Victor COLAS

Master PAIP-POM

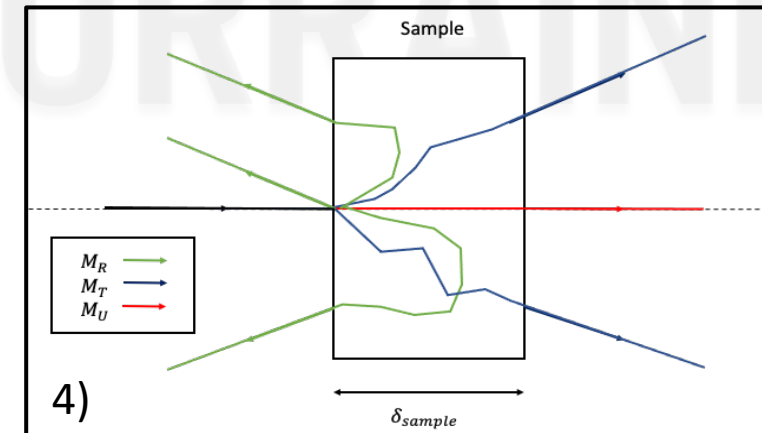
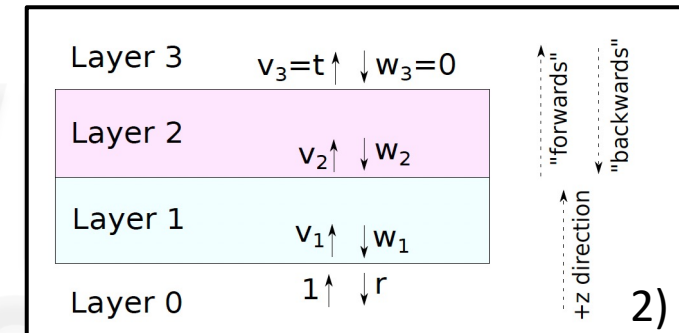
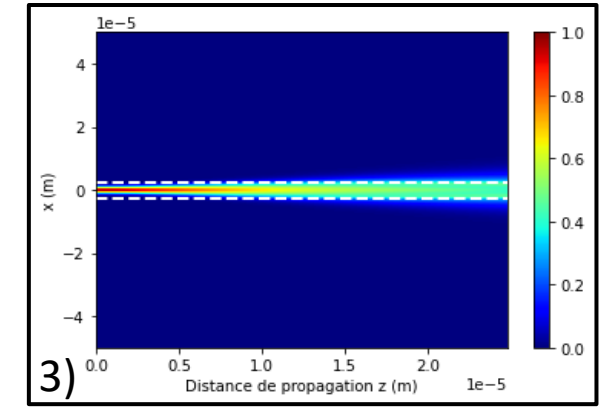
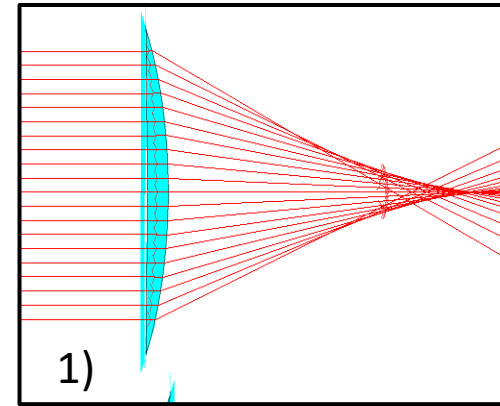


Présentation de l'UE

- **Descriptif :**

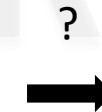
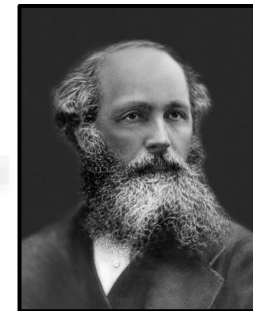
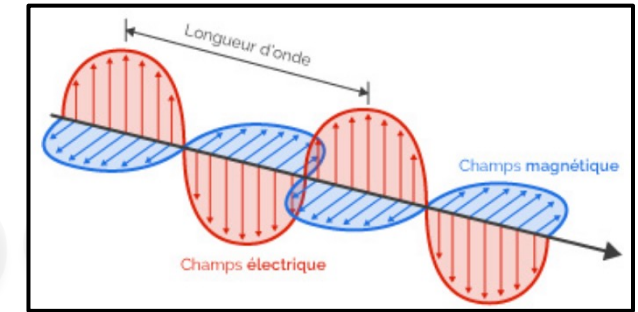
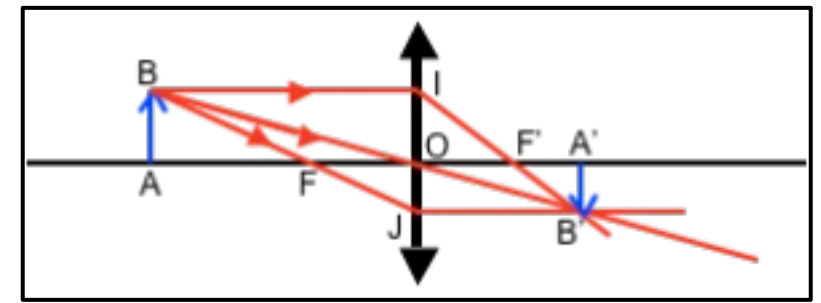
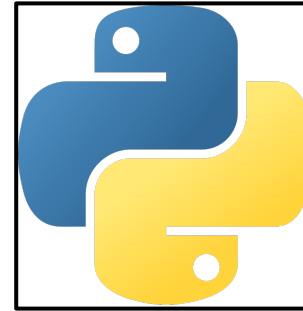
Utilisation de l'outil numérique pour étudier la propagation de la lumière au travers 4 exemples :

1. le lancer de rayons
2. la propagation de lumière dans des milieux multicouches
3. la propagation de faisceau dans l'espace de Fourier
4. les approches Monte Carlo pour la propagation en milieux diffusants.



Présentation de l'UE

- **Prérequis :**
 - Algorithmie (Python)
 - Optique géométrique
 - Optique physique (électromagnétisme)
- **Acquis d'apprentissage :**
 - Utiliser l'outil numérique pour la propagation de la lumière
- **Compétence visée :**
 - « Passage » de la théorie au numérique
 - Démarche de recherche (autonomie + article scientifique)



$$\overrightarrow{rot}(E) = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

Maxwell - Faraday

Composition de l'UE

- **14 h de CM :**

1. CM1 (4h) : Ray-Tracing pour le design de systèmes optiques
2. CM2 (4h) : Propagation d'onde optique dans les milieux multicouches
3. CM3 (4h) : Propagation libre ou guidée de faisceau laser
4. CM4 (2h) : Approche de Monte Carlo pour les milieux diffusants

- **16 h de TP (3x4 h de projet + 4h de soutenance) qui constituent l'évaluation de l'UE :**

1. Définir un projet à traiter (livrable descriptif à rendre ~2 pages) (~15% note)
2. Faire les travaux nécessaires puis rédiger un article scientifique en guise de rapport (~50% note)
3. Faire une présentation orale (15 min) au reste de la promo (~35% note)

CM1 (4h) : Ray-Tracing pour le design de systèmes optiques

1. Présentation de l'Optique Matricielle
2. Théorie vers la pratique - mon code de ray tracing sur Python
3. Présentation des logiciels d'Optical Design - Code V, Zemax, Oslo...
4. Découverte libre des librairies de Python

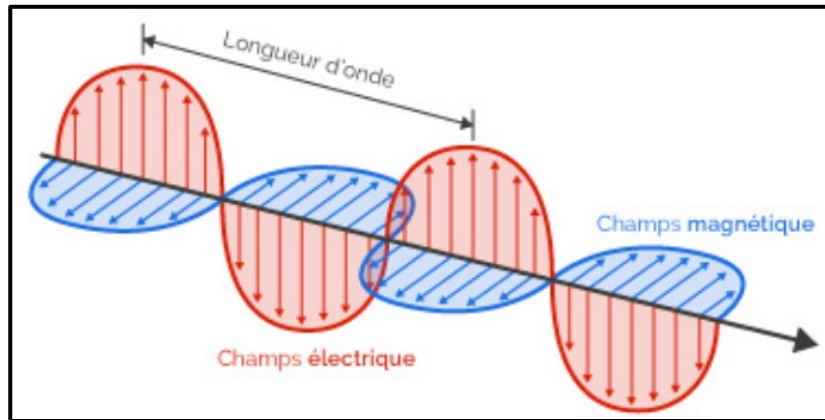
Présentation des sources :

Optique matricielle pour l'analyse des systèmes centrés

par Christophe LABBÉ Maître de conférences à l'Université de Caen et Benoît PLANCOULAIN Maître de conférences à l'Université de Caen

→ Disponible sur Arche

De l'électromagnétisme au rayon lumineux



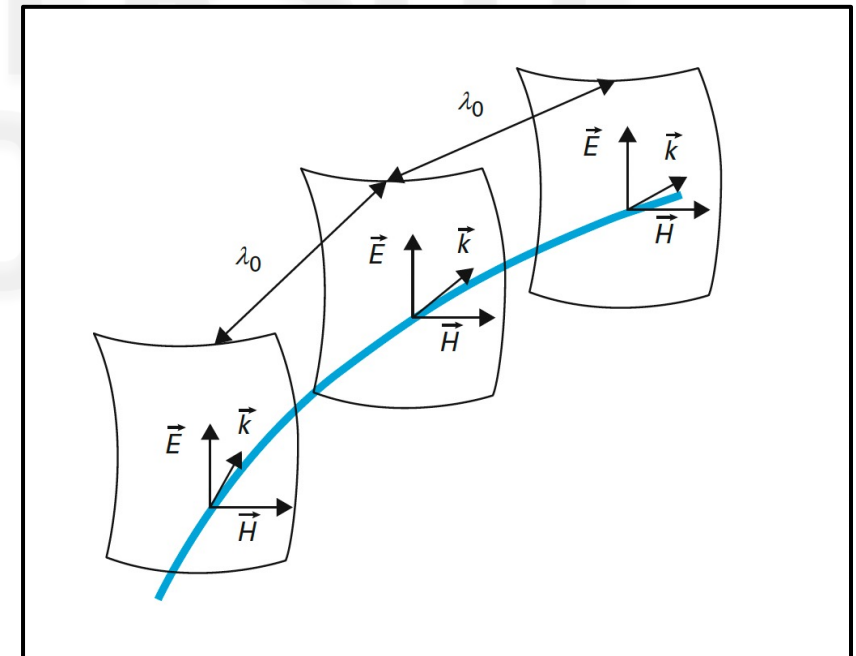
Propagation des ondes quasi-planes :

Valable si $\lambda \ll$ dimension des optiques

→ Optique géométrique

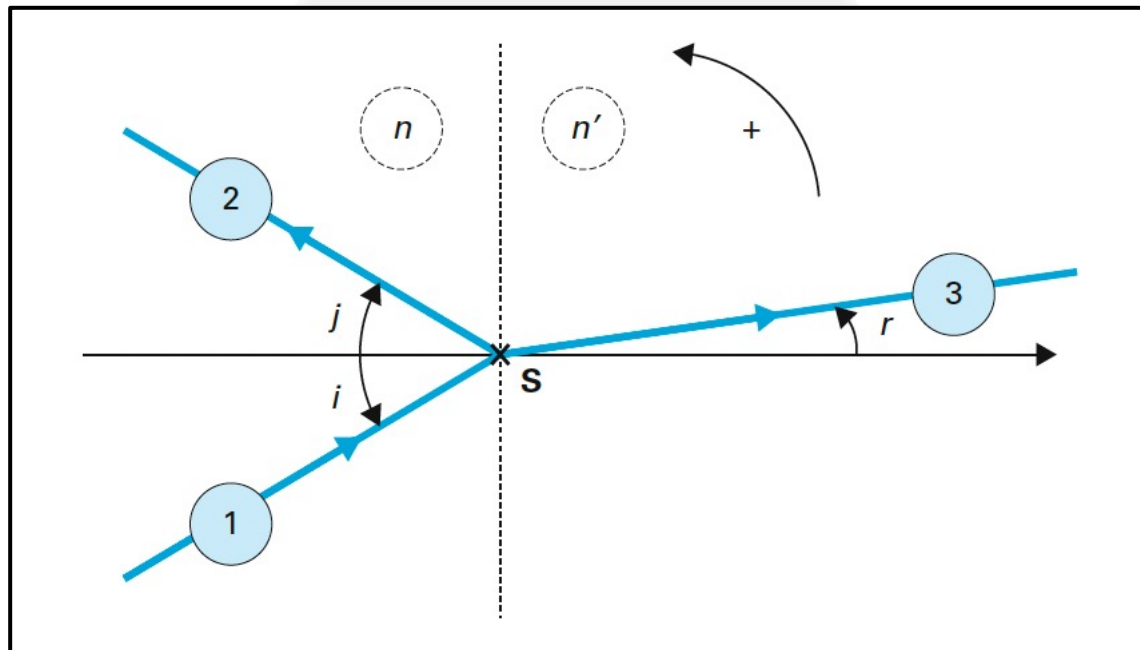
→ $(\vec{k}, \vec{E}, \vec{H})$ trièdre direct

« Rayon lumineux » = Le déplacement progressif des surfaces d'onde permet de définir une trajectoire tangente au vecteur $\vec{k}$



Loi de Snell Descartes

Propagation des rayons lumineux régie par les lois des Snell-Descartes



Les lois :

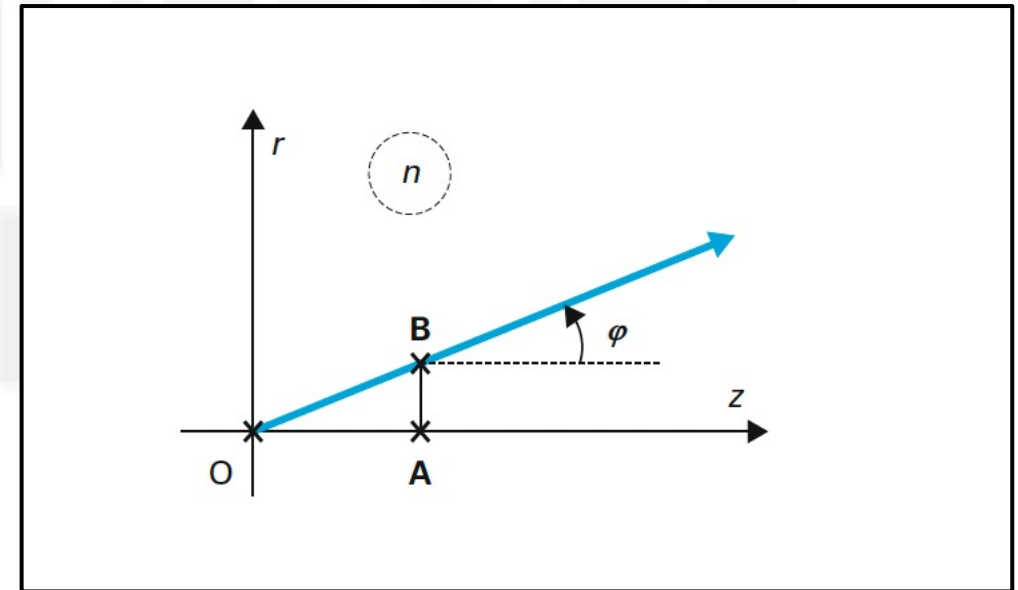
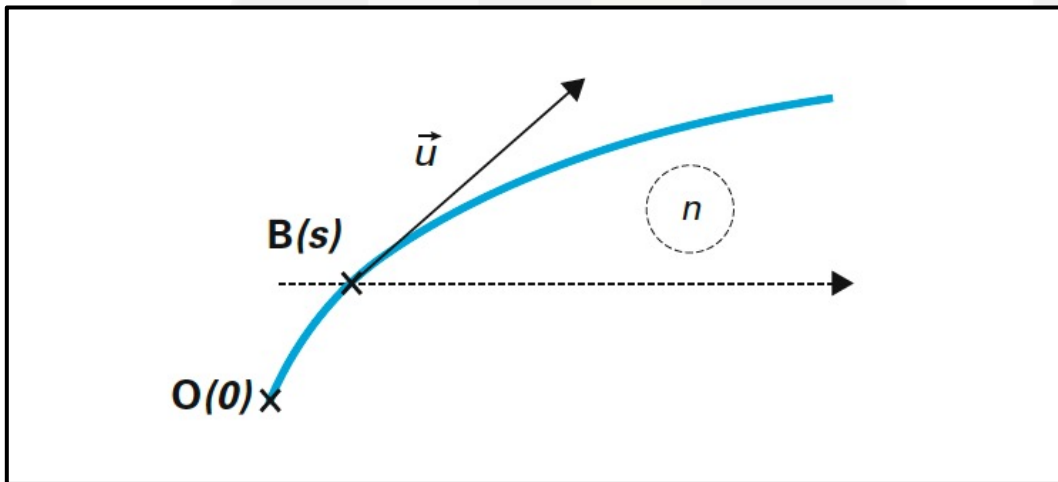
1. Rayons 1 (incident), 2 (réfléchi) et 3 (réfracté) dans le plan d'incidence
2. Réflexion $= i = -j$
3. Réfraction $n \cdot \sin(i) = n' \cdot \sin(r)$

Hypothèses et conséquences

Milieux homogènes : indice optique $n(x, y, z)$ constant dans chaque matériau

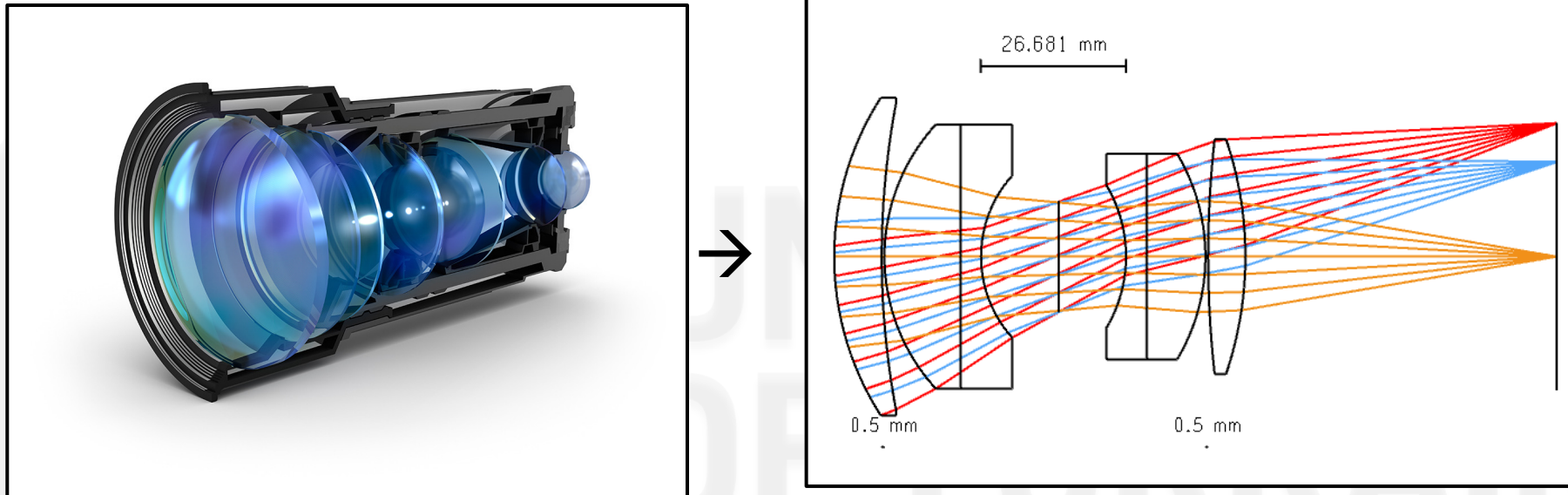
Seule une discontinuité aux interfaces

→ La lumière se propage en ligne droite



Hypothèses et conséquences

Systèmes centrés : Symétrie de révolution autour de l'axe optique



Optique paraxiale : Rayons proches de l'axe optique (faible incidence)
Linéarisation de la 2^{nde} loi de Snell-Descartes (formalisme matriciel permis!)

$$n \cdot \sin(i) = n' \cdot \sin(r) \rightarrow n \cdot i = n' \cdot r$$

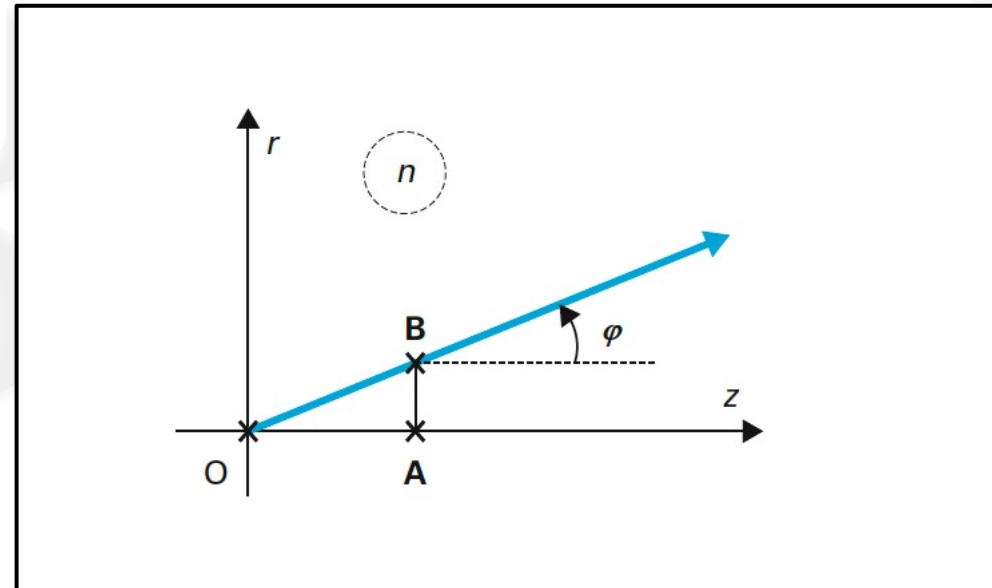
Erreur inf à 5% pour $|i| = 30^\circ$

Les coordonnées du rayon lumineux

Prise en compte de toutes les hypothèses et leurs conséquences :

Le rayon lumineux est
totalement décrit par
ces coordonnées :

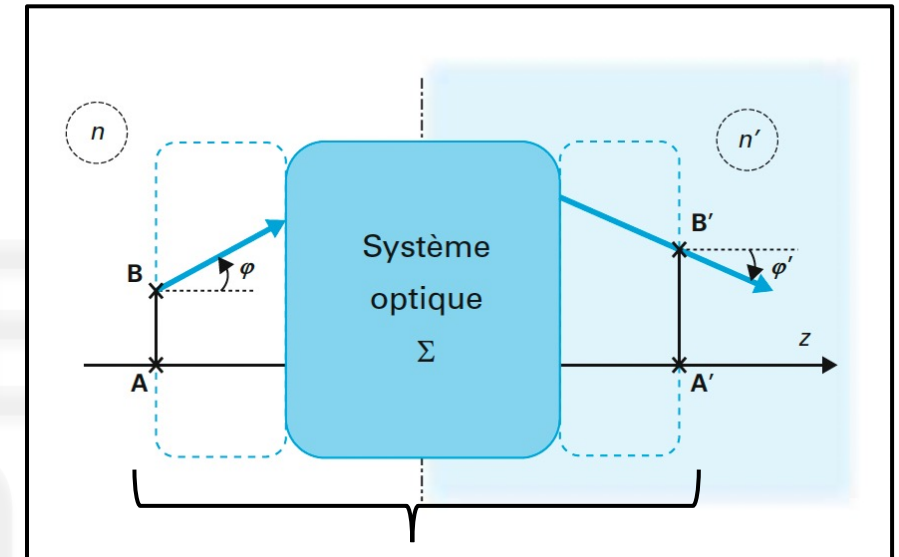
$$Coord(z) = \begin{pmatrix} \overline{AB(z)} \\ n(z)\varphi(z) \end{pmatrix}$$



Principe de l'Optique Matricielle

$$Coord(z) = \begin{pmatrix} \overline{AB(z)} \\ n(z)\varphi(z) \end{pmatrix}$$

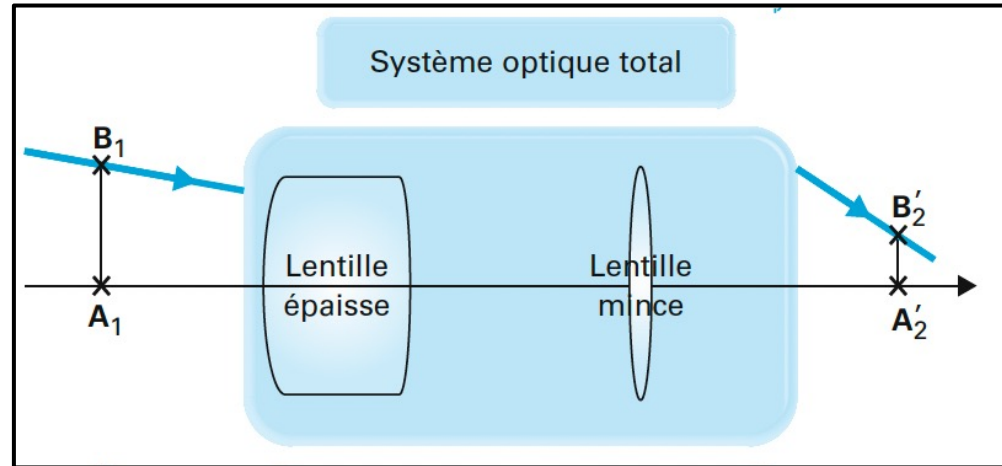
- Calcul des coordonnées d'un rayon lumineux durant sa propagation le long de l'axe optique z
 - Calcul issu de produit matriciel
- Matrices de transfert (=boite noire) pour tout systèmes optiques décomposable en matrice élémentaires



Décrit par une
Matrice de transfert

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

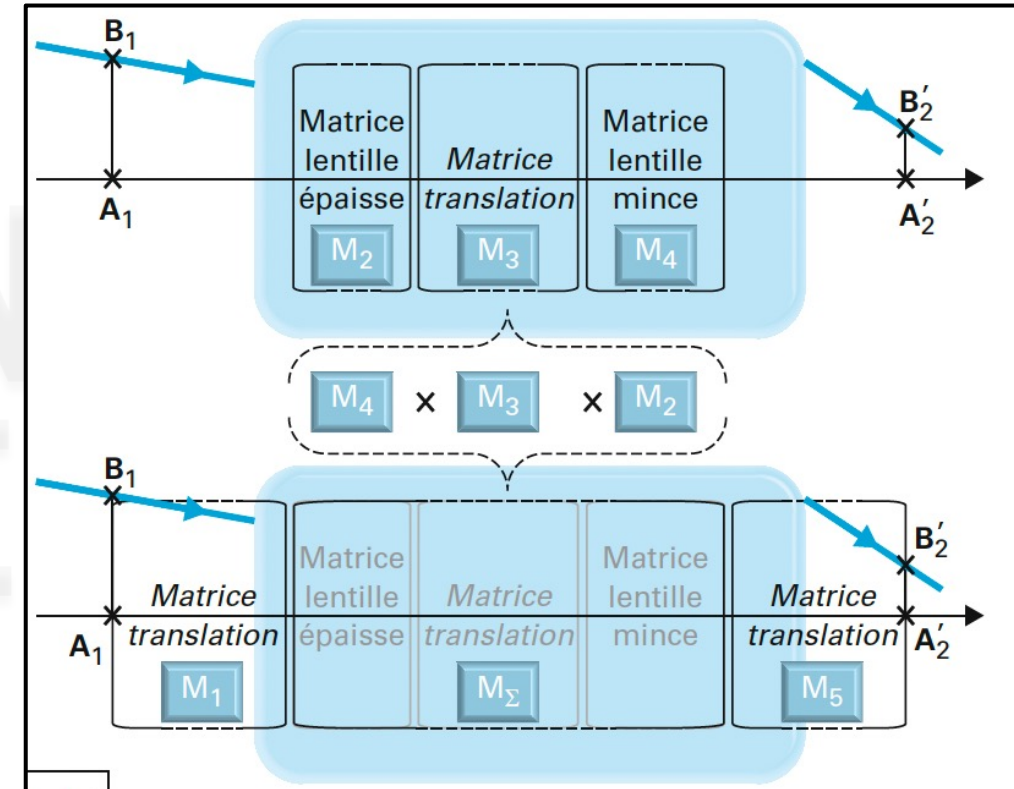
Décomposition en matrices élémentaires



Matrice de transfert

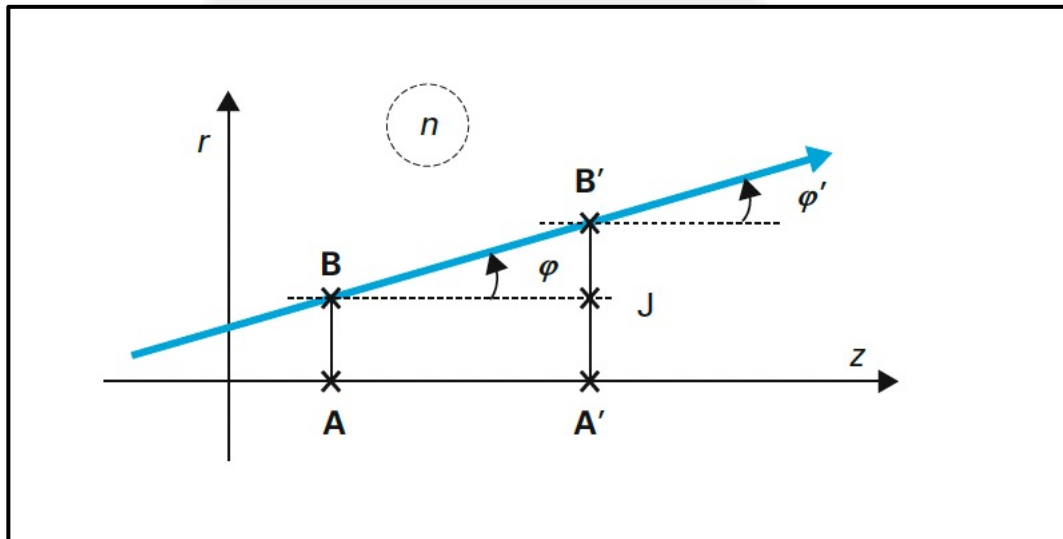
$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = M_1 \times M_\Sigma \times M_5$$

$\uparrow \qquad \qquad \uparrow \qquad \qquad \uparrow$
 Matrices élémentaires de transfert



Matrices élémentaires aux sommets

Matrice de translation



Relations géométriques

$$\begin{cases} \overline{A'B'} = \overline{AB} + \overline{AA'}\varphi \\ \varphi' = \varphi \end{cases} \text{ approx paraxiale!}$$

Relation matricielle

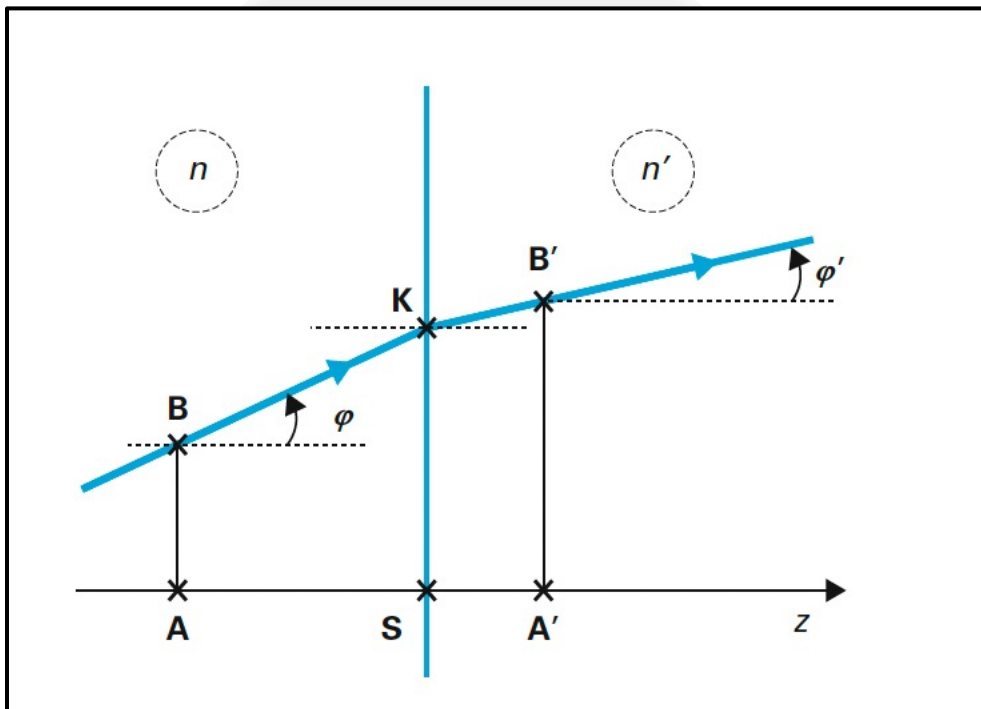
$$\begin{pmatrix} \overline{A'B'} \\ n\varphi' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{AB} \\ n\varphi \end{pmatrix}$$

Matrice de transfert

$$M_{Trans} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \overline{AA'}/n \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Matrices élémentaires aux sommets

Matrice du dioptre plan



Relations géométriques au point K

$$\begin{cases} \overline{S'K'} = \overline{SK} \\ n'\varphi' = n\varphi \end{cases} \text{ approx paraxiale!}$$

Relation matricielle

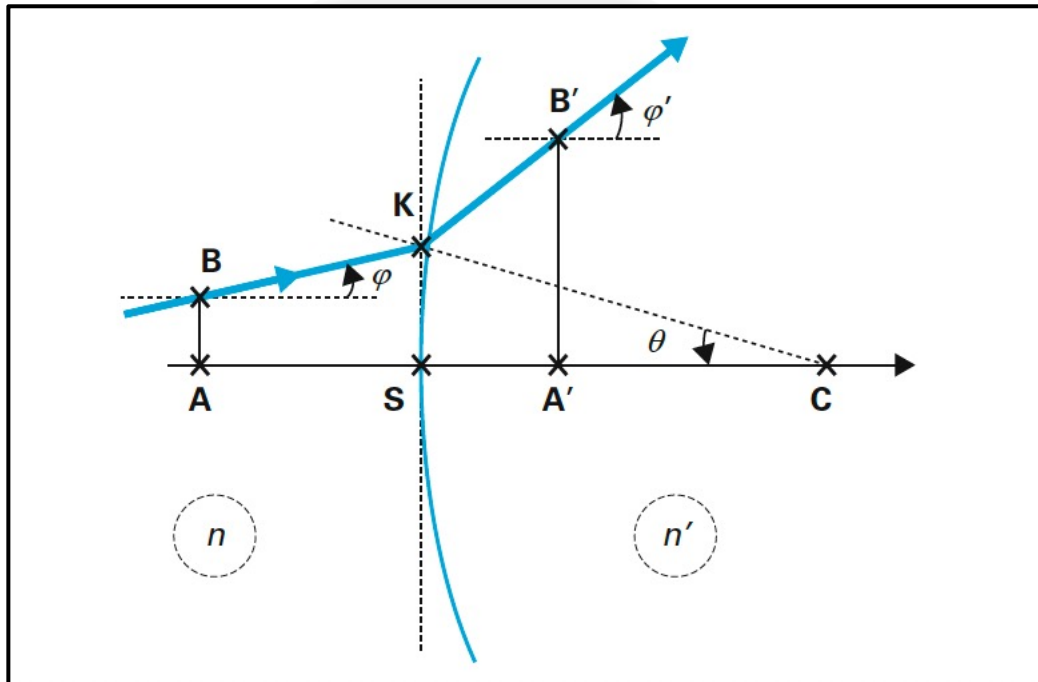
$$\begin{pmatrix} \overline{S'K'} \\ n\varphi' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{SK} \\ n\varphi \end{pmatrix}$$

Matrice de transfert

$$M_{Plan} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Matrices élémentaires aux sommets

Matrice du dioptre sphérique



Avec $\Phi = \frac{n' - n}{\overline{SC}}$

Relations géométriques au point K

$$\begin{cases} \overline{S'K'} = \overline{SK} \\ n'\varphi' = n\varphi - \Phi \overline{SK} \text{ approx paraxiale!} \end{cases}$$

Relation matricielle

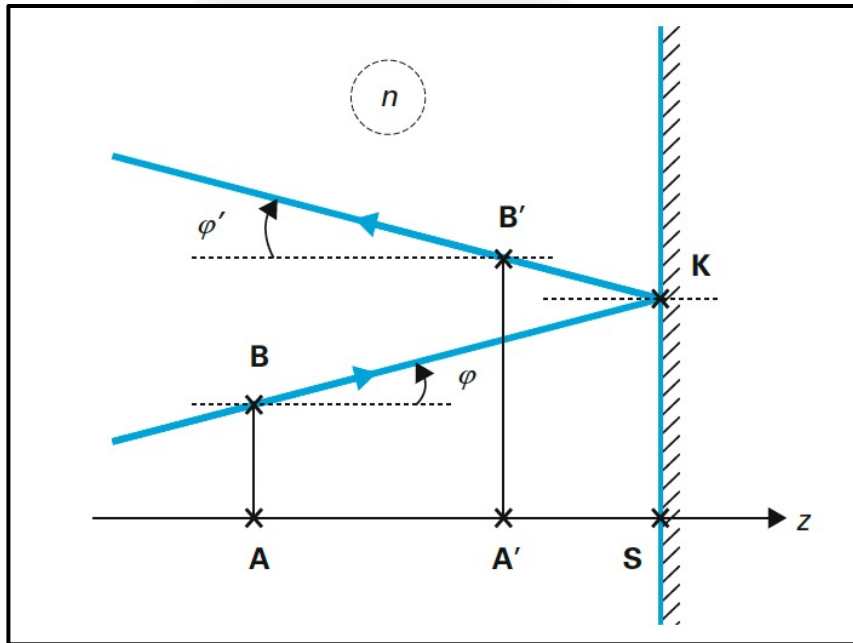
$$\begin{pmatrix} \overline{S'K'} \\ n\varphi' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{SK} \\ n\varphi \end{pmatrix}$$

Matrice de transfert

$$M_{Sphere} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi & 1 \end{pmatrix}$$

Matrices élémentaires aux sommets

Matrice du miroir plan



Relations géométriques au point K

$$\begin{cases} \overline{S'K'} = \overline{SK} \\ \varphi' = -\varphi \end{cases} \text{ approx paraxiale!}$$

Relation matricielle

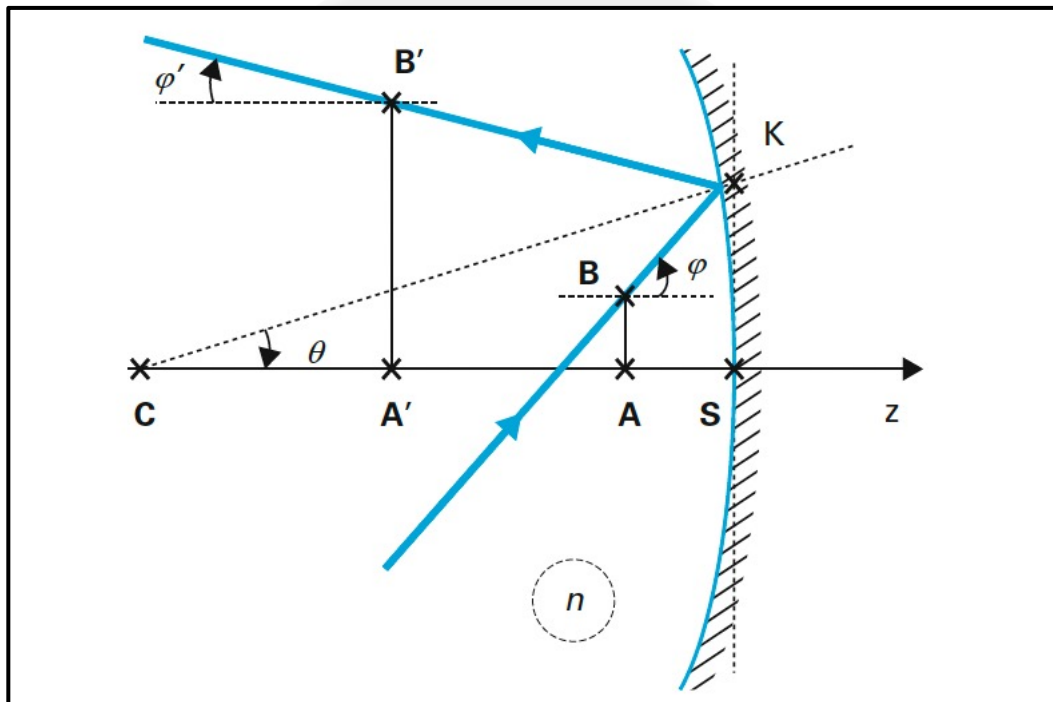
$$\begin{pmatrix} \overline{S'K'} \\ n\varphi' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{SK} \\ n\varphi \end{pmatrix}$$

Matrice de transfert

$$M_{MirPlan} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Matrices élémentaires aux sommets

Matrice du miroir sphérique



Avec $\theta = \frac{SK}{SC}$ et $\Phi = \frac{-2n}{SC}$

Relations géométriques au point K

$$\begin{cases} \overline{S'K'} = \overline{SK} \\ \varphi' + \theta = -\varphi - \theta \text{ approx paraxiale!} \end{cases}$$

Relation matricielle

$$\begin{pmatrix} \overline{S'K'} \\ n\varphi' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{SK} \\ n\varphi \end{pmatrix}$$

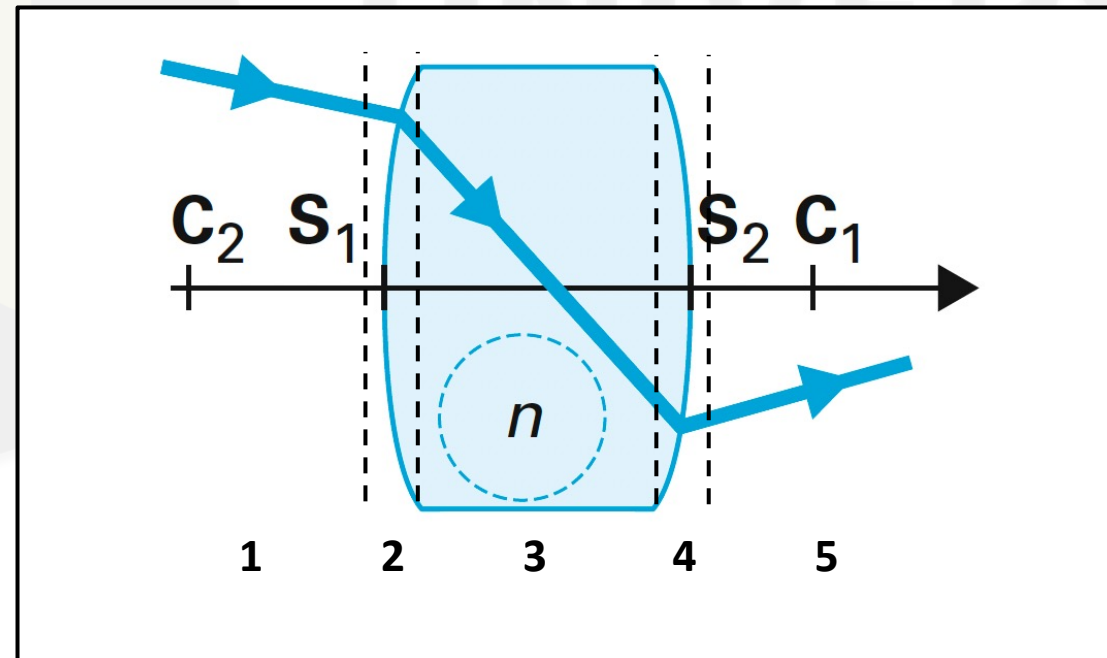
Matrice de transfert

$$M_{MirSphere} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \Phi & -1 \end{pmatrix}$$

Passage d'une lentille de verre

Décomposition en matrices élémentaires

$$M_{Lentille} = M_{Trans} M_{Sphere} M_{Trans} M_{Sphere} M_{Trans}$$



A vous de jouer !

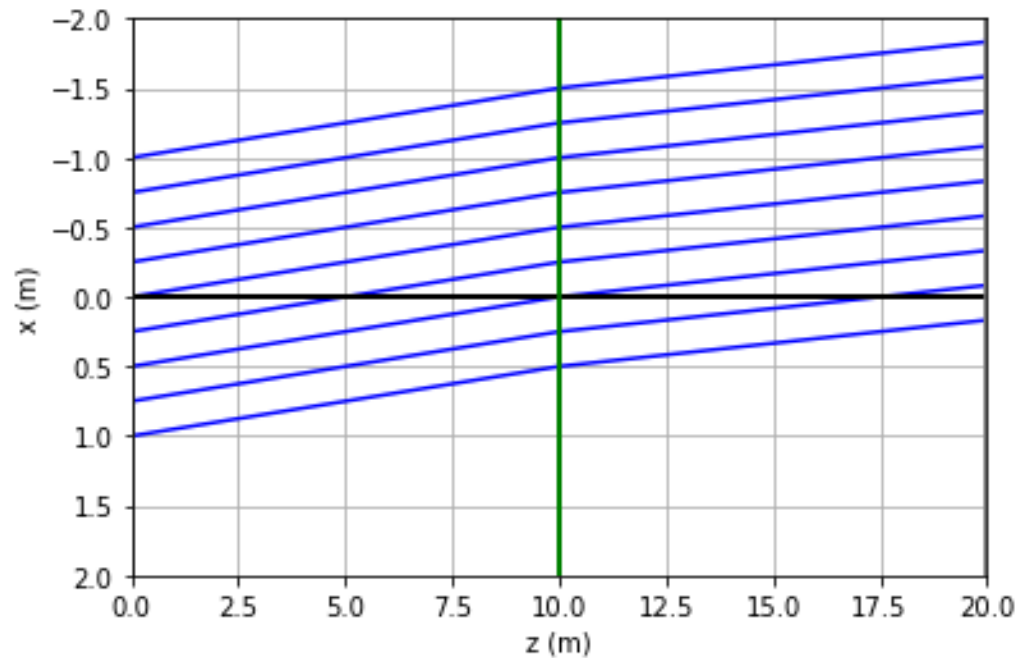
~ 2h pour coder votre propre algo de Ray-Tracing en Python

Quelques pistes pour démarrer :

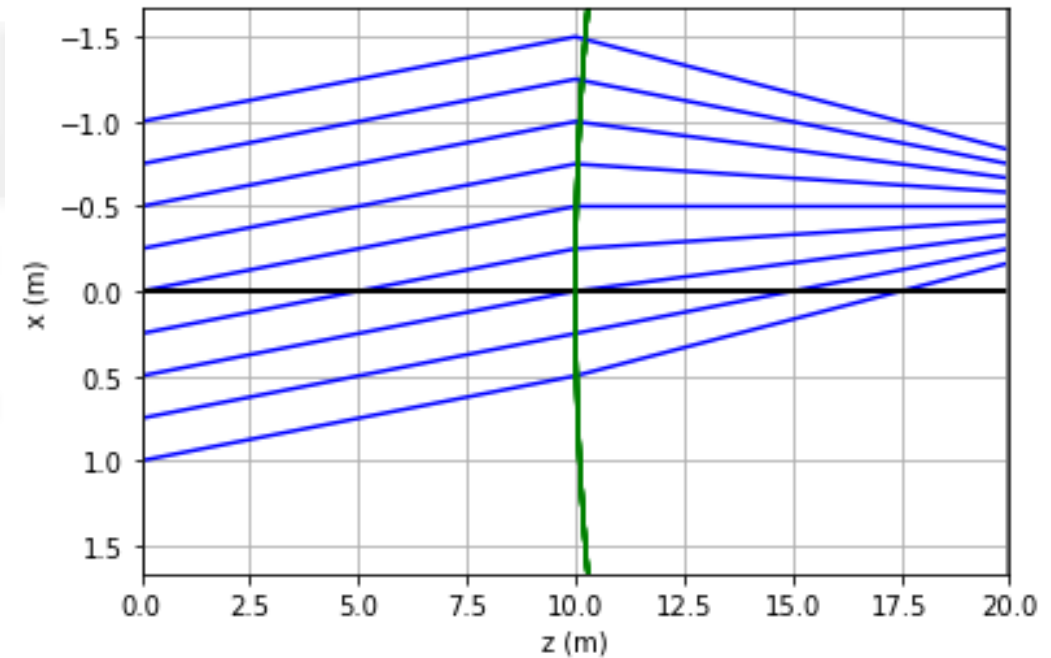
- Fonction de construction et multiplication des matrices élémentaires
- Fonction de dessin des éléments optiques
- Stockage puis affichage des trajectoires $(z; AB(z))$ le long de l'axe optique

Quelques aperçus intermédiaires

Dioptre plan



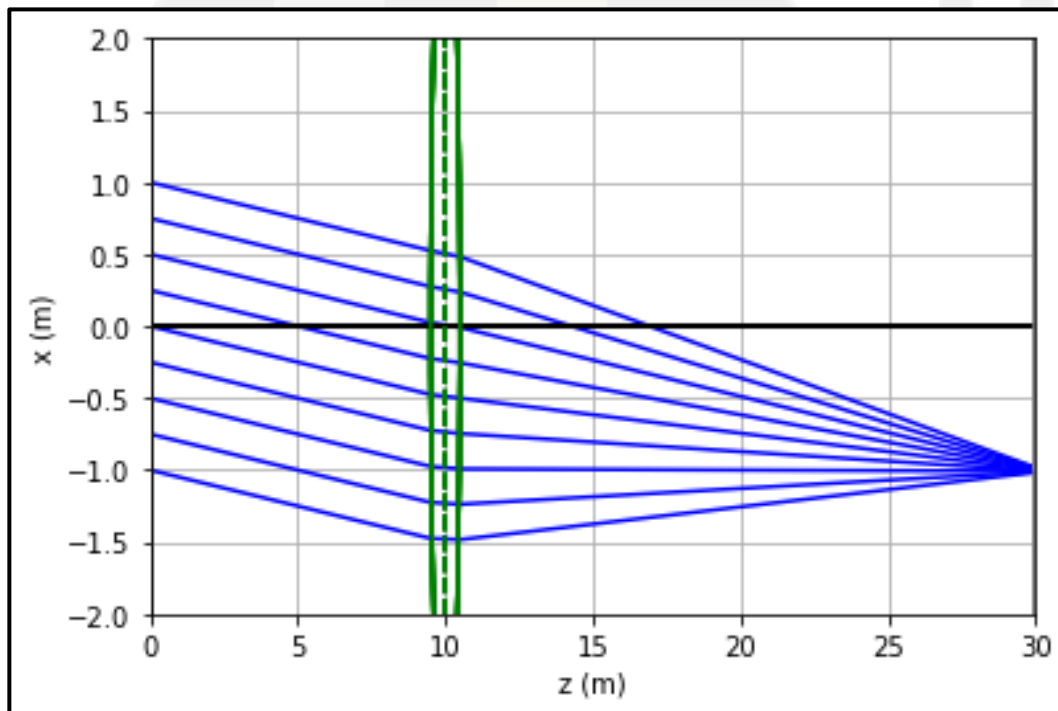
Dioptre sphérique



Objectif final

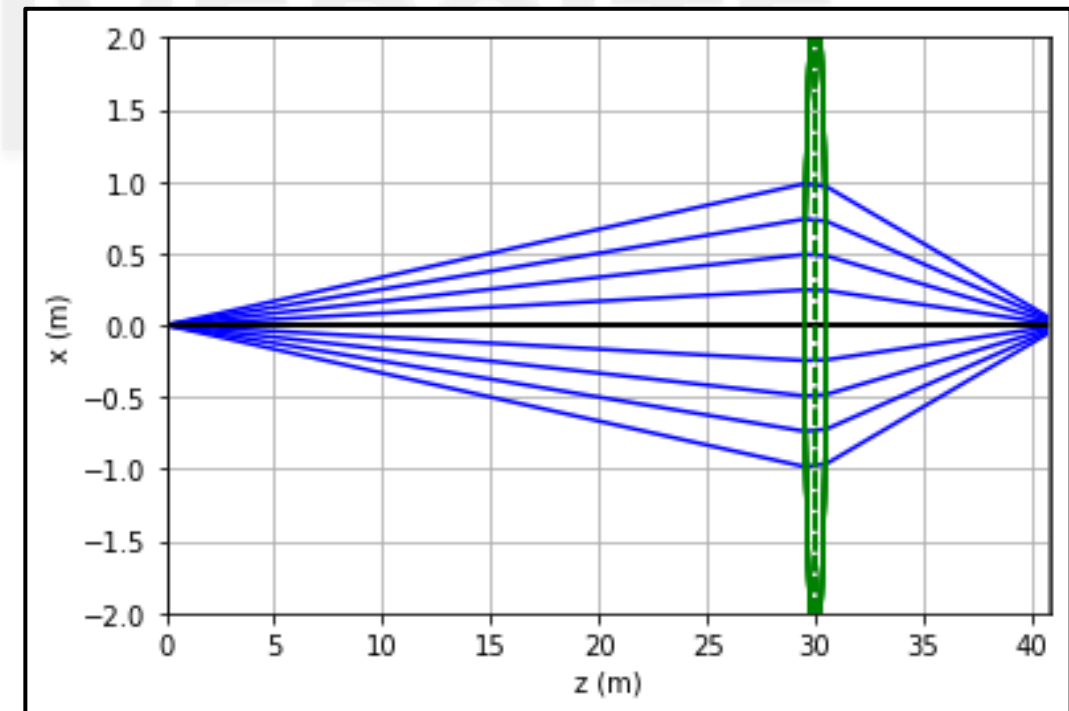
Conjugaison infini-foyer

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

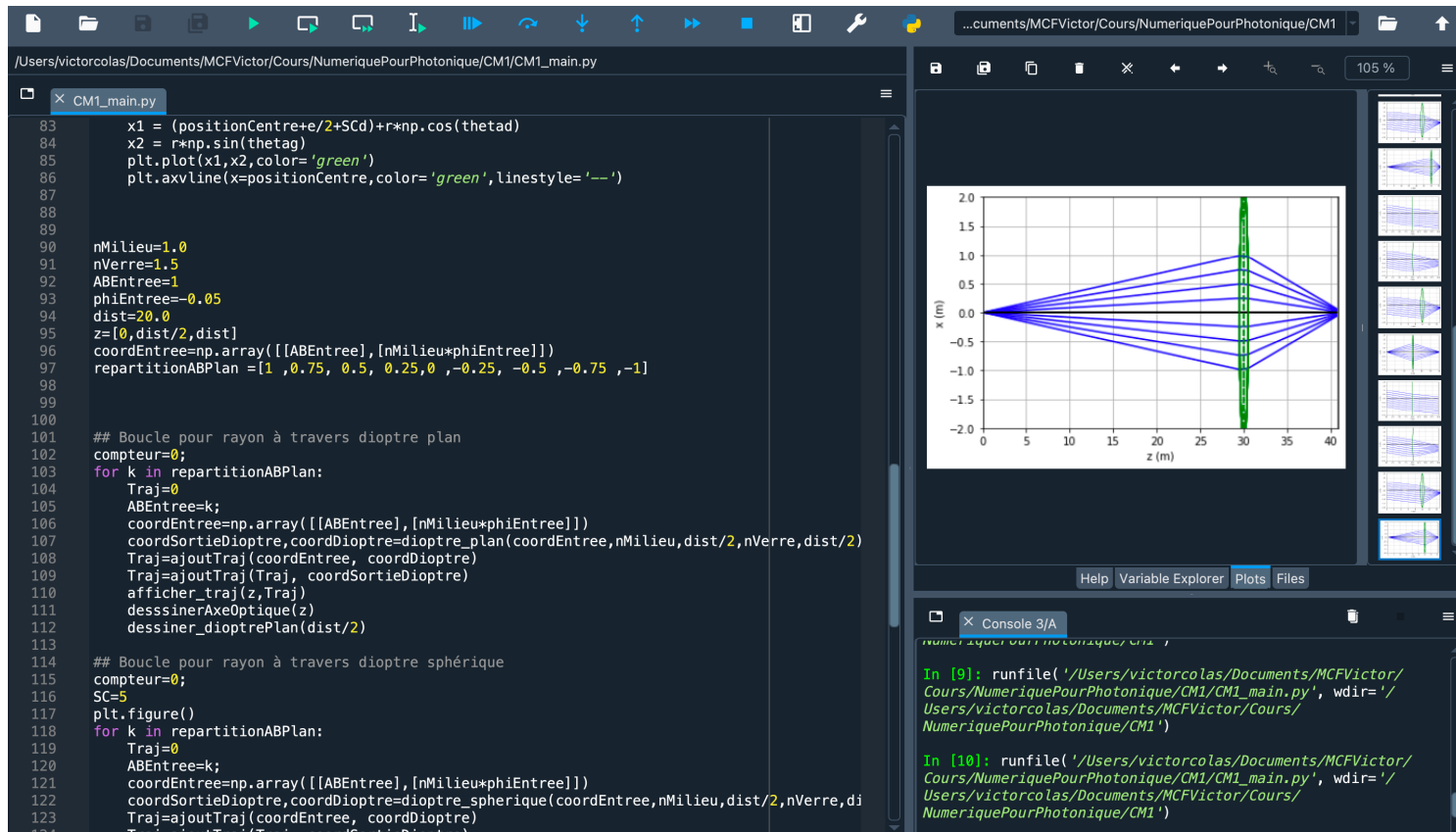


Conjugaison finie

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} \quad \checkmark$$



Discussions et correction



→ Disponible sur Arche

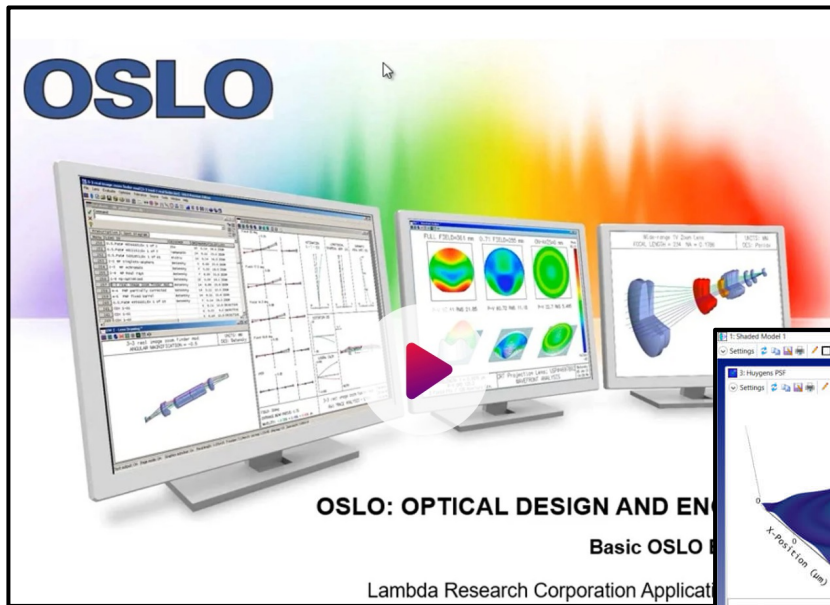
Présentation des sources

Ray Tracing Slides

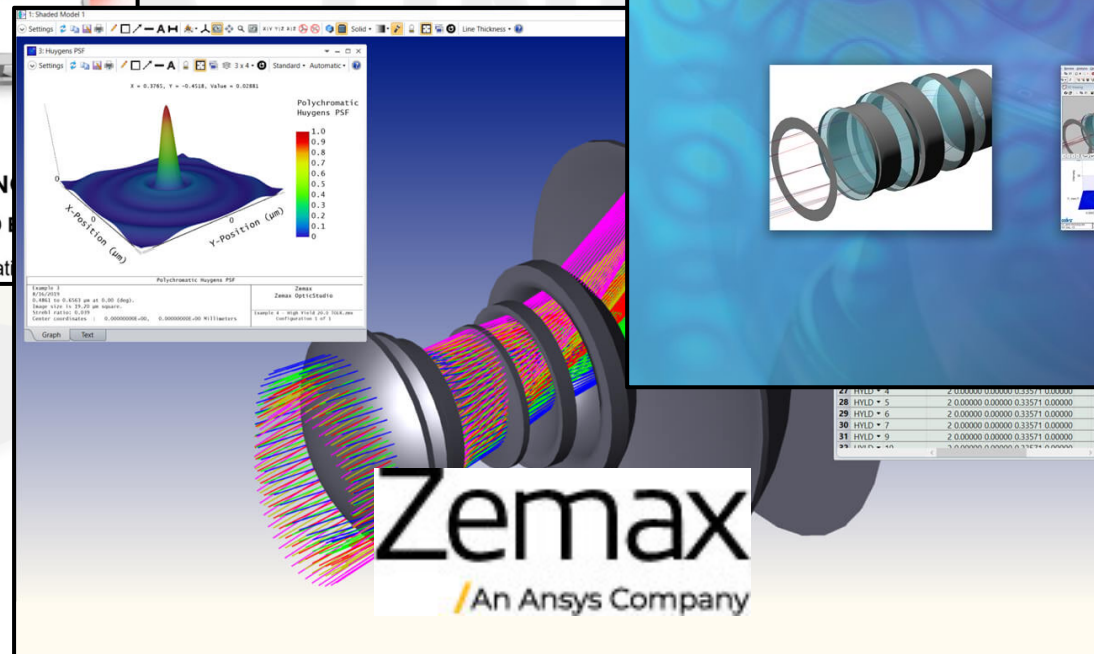
par Nicolas FRESSENGEAS Prof. au LMOPS

→ Disponible sur Arche

L'optique matricielle en plus poussée



\$\$\$



Des outils plus poussés et d'importantes bases de données

Exemple d'Oslo ? Tous « similaires » + licence étudiante dispo à l'UL

Les bases de données :

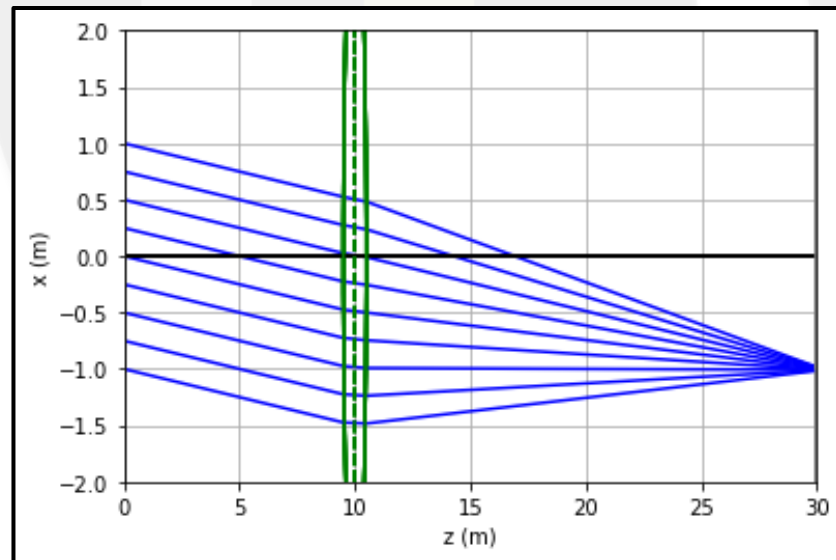
- Caractéristiques optiques et géométriques de nombreux matériaux (Verre, plastique ...) → fonction de λ
- Caractéristiques optiques et géométriques de nombreuses lentilles/miroirs du commerce (Thorlabs, Edmund Optics, Newport...)
- Caractéristiques optiques et géométriques de nombreux détecteurs

Des outils plus poussés et d'importantes bases de données

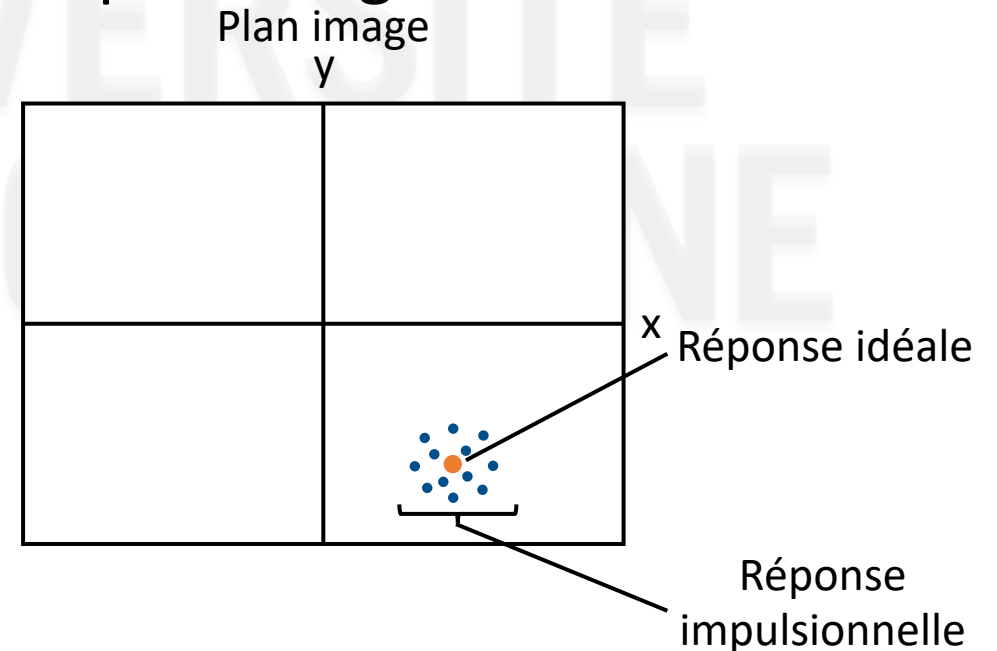
Des outils de caractérisation d'aberrations optiques :

Aberrations géométriques : défaut d'imagerie qui implique que l'image d'un point objet n'est pas un point dans le plan image

Point
objet à
l'infini



z Réponse
impulsionnelle
dans le plan
image = tache

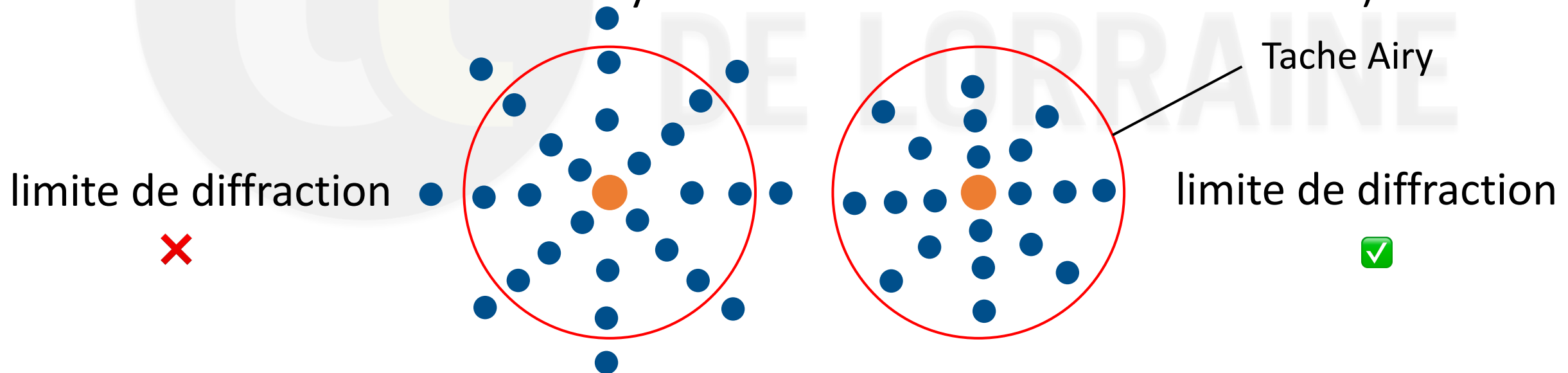


Des outils plus poussés et d'importantes bases de données

Des outils de caractérisation d'aberrations optiques :

En réalité : limité par la diffraction (i.e. tache d'Airy $\Phi_{Airy} = \frac{1,22\lambda}{ON}$)

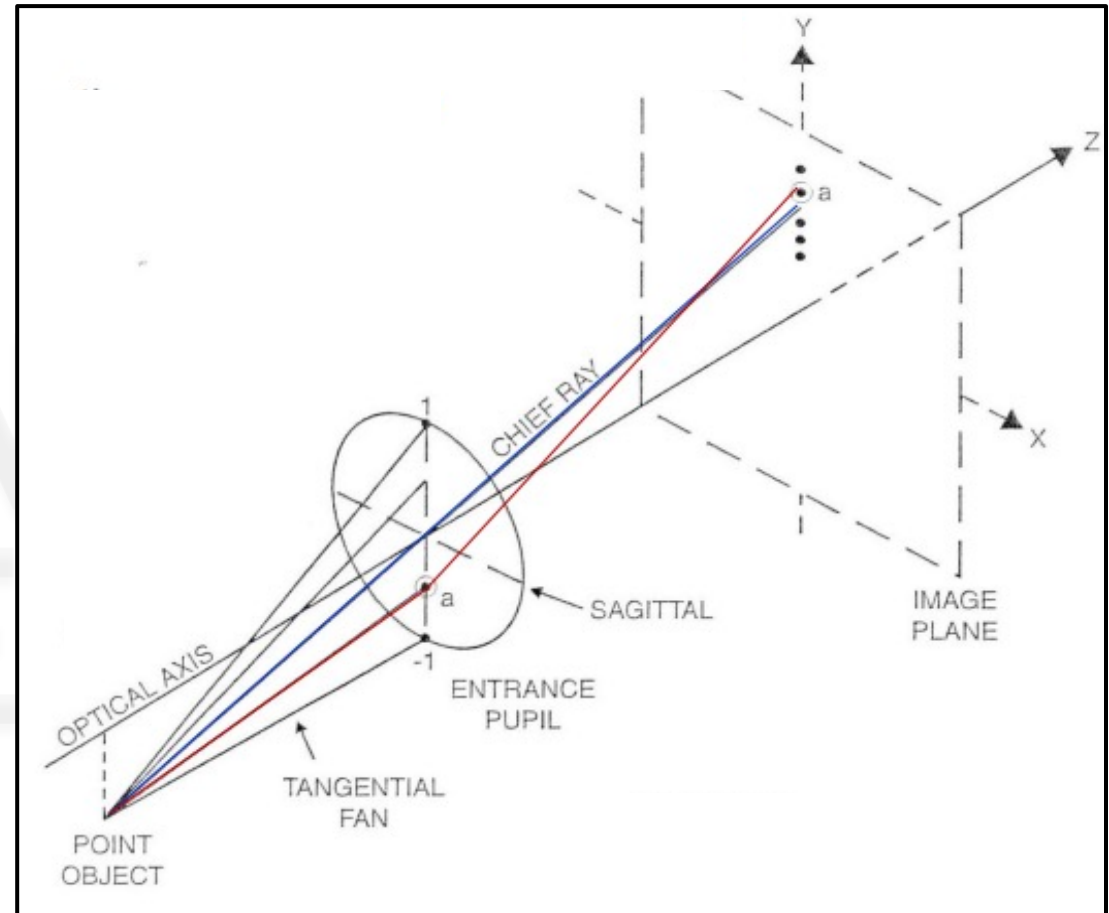
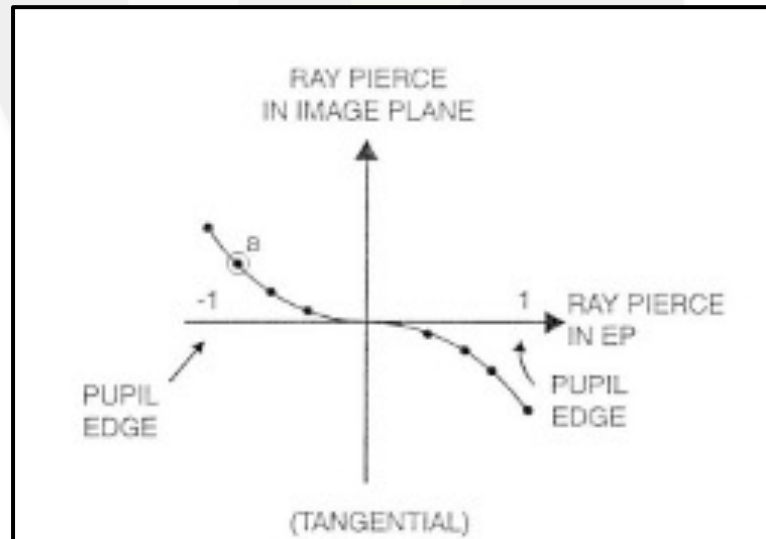
Objectif ultime : avoir un système optique dont l'erreur géométrique est contenue dans la tâche d'Airy → « travaille en limite de diffraction »



Des outils plus poussés et d'importantes bases de données

Des outils de caractérisation d'aberrations optiques :

Aberrations $\nearrow$ quand $(AB, \phi) \nearrow$
 $\rightarrow$ « moins paraxial »



$\rightarrow$ Ray intercept curves

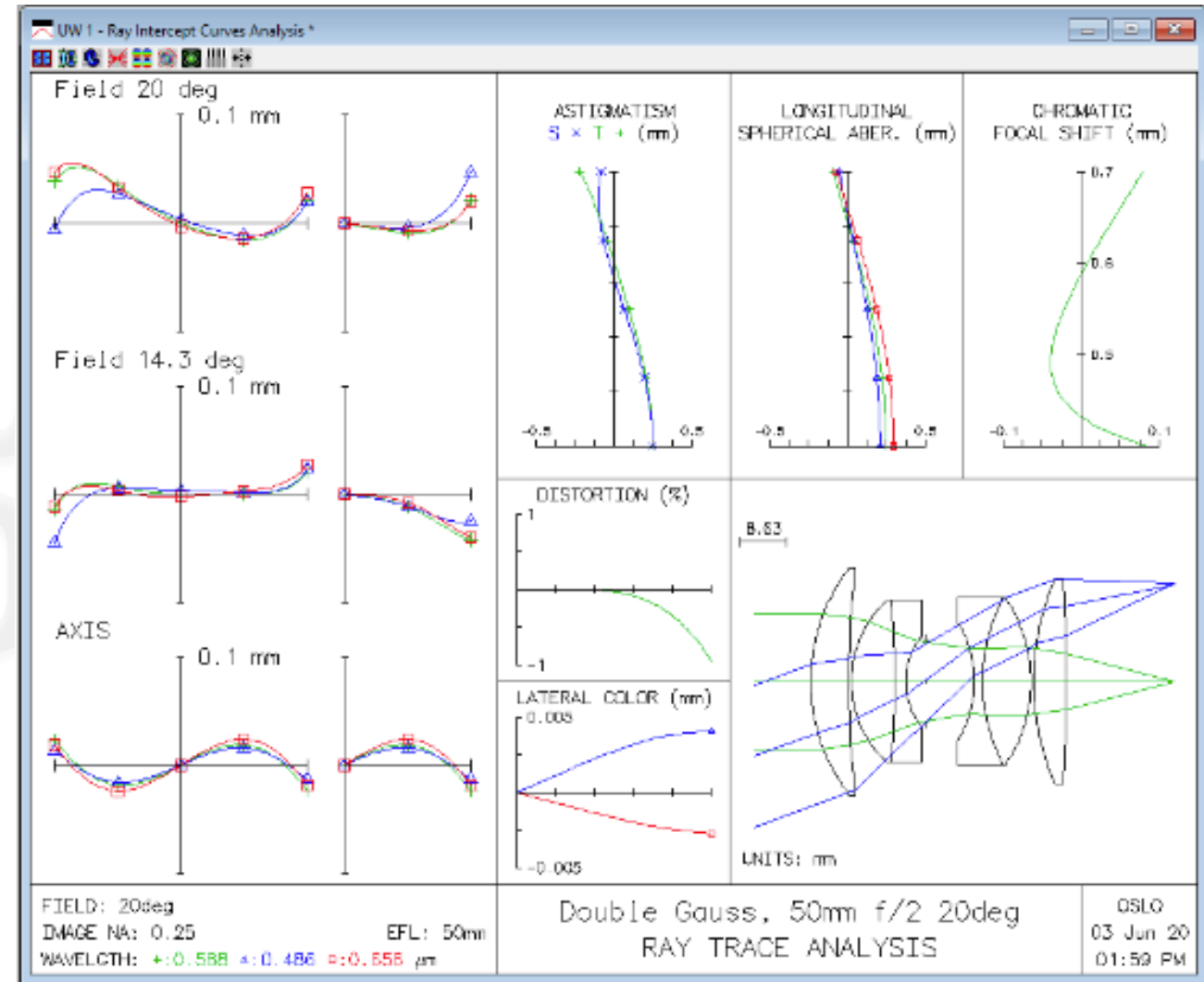
Des outils plus poussés et d'importantes bases de données

Des outils de caractérisation d'aberrations optiques :

Ray intercept curves Analysis

User Guide :

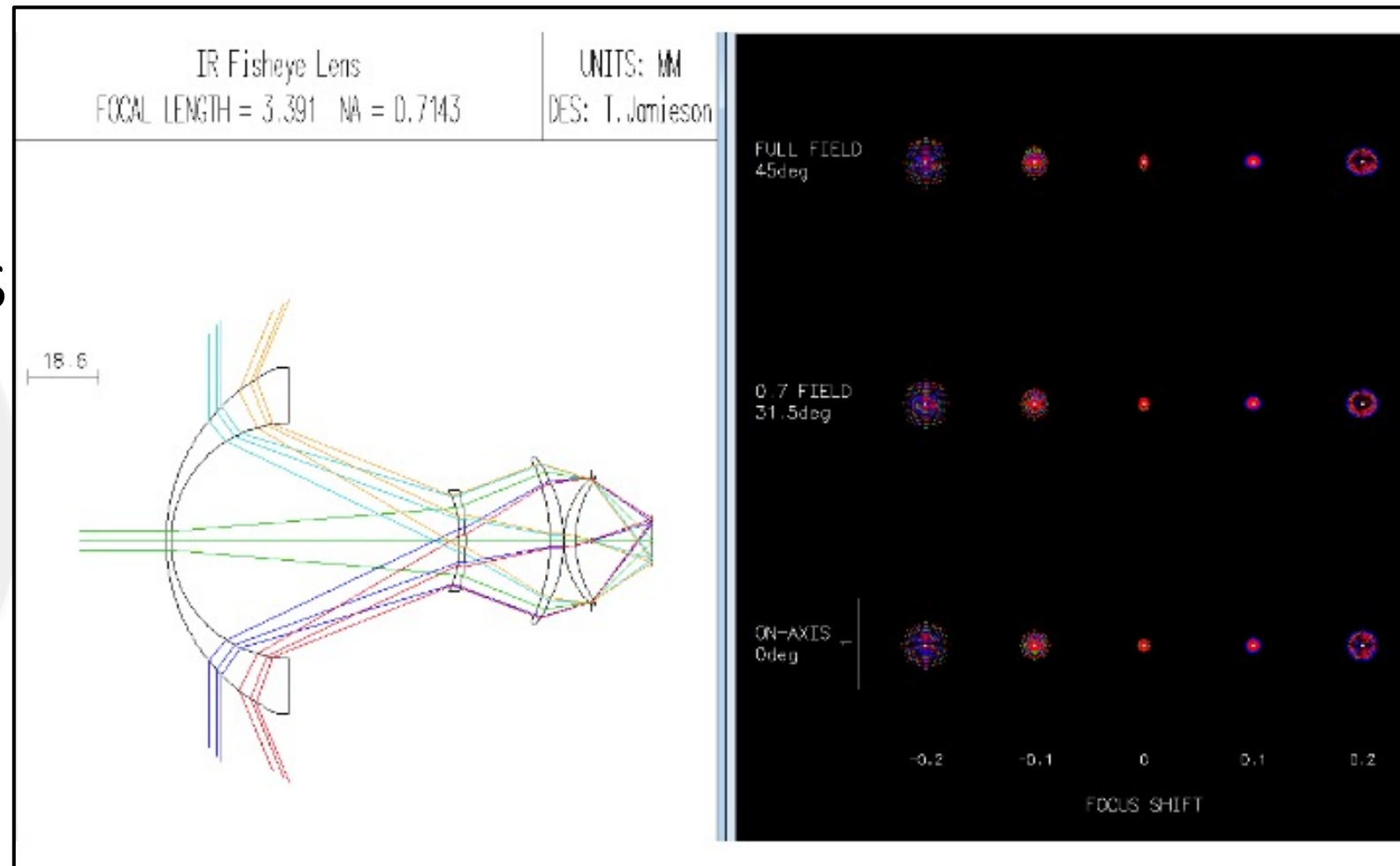
https://lambdaresfiles.com/wp-content/uploads/support/oslo/oslo_releases/OSLOUserGuide.pdf



Des outils plus
poussés et
d'importantes bases
de données

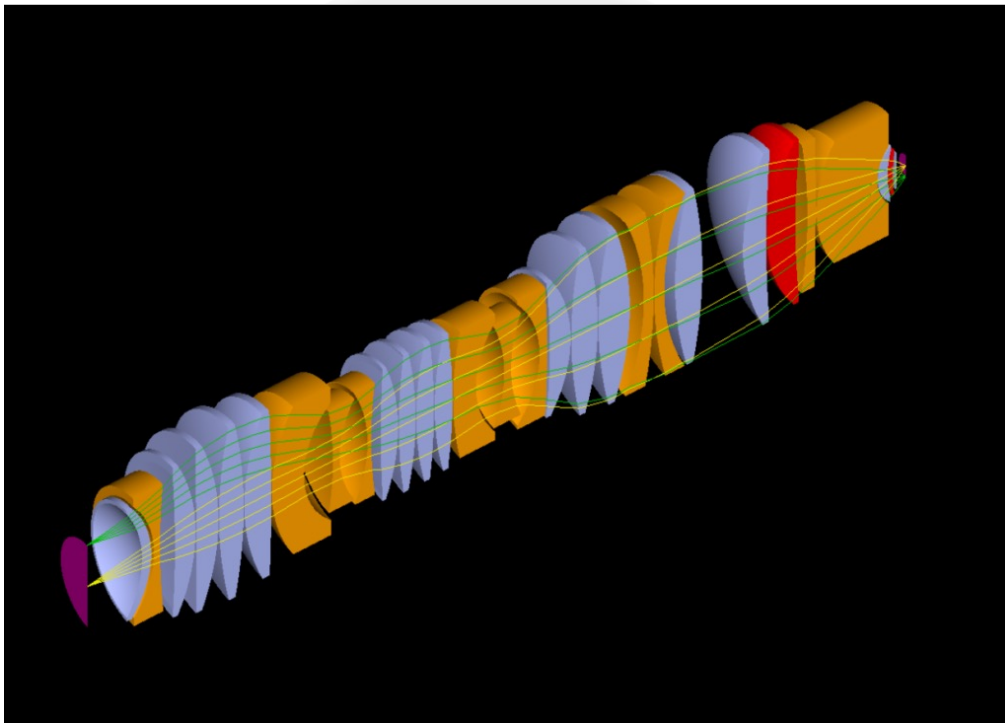
**Des outils de
caractérisation
d'aberrations optiques :**

Spot diagrams

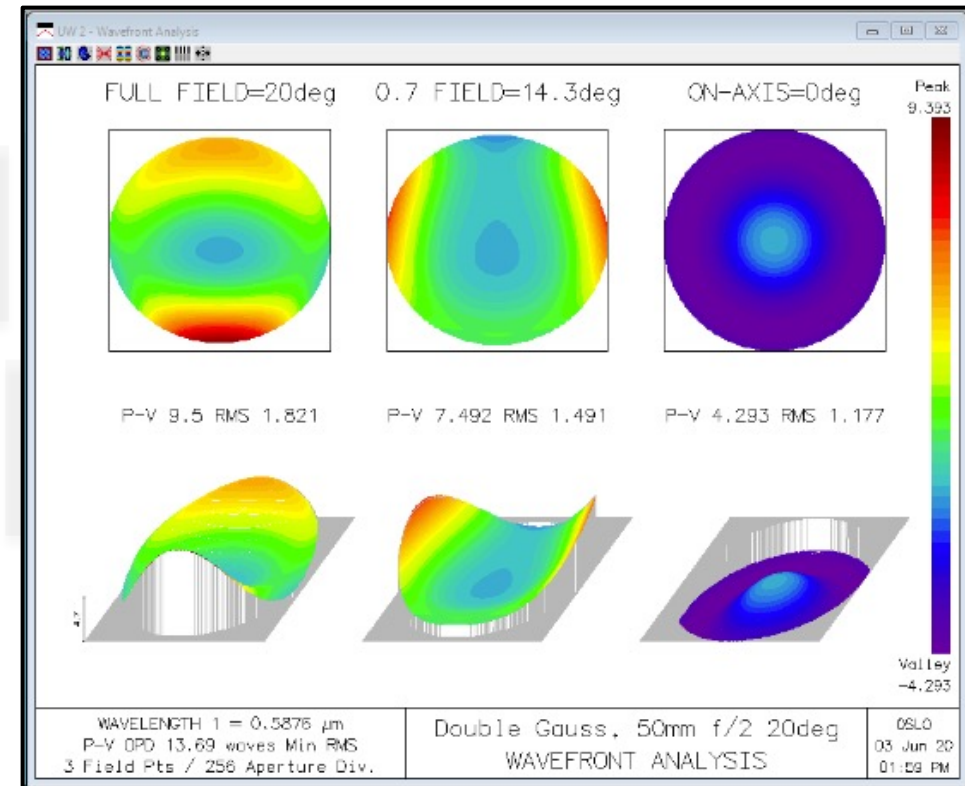


Et plein d'autres possibilités

3D



Analyse de front d'onde



En conclusion

Un outil très puissant et complet pour le design de systèmes optiques !

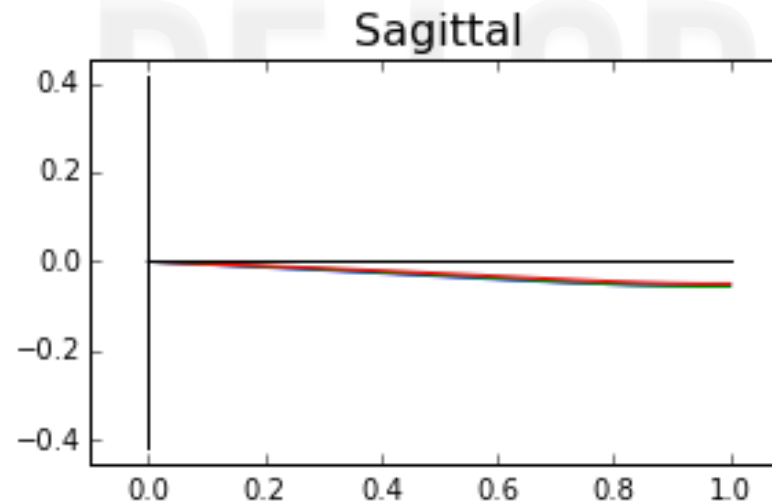
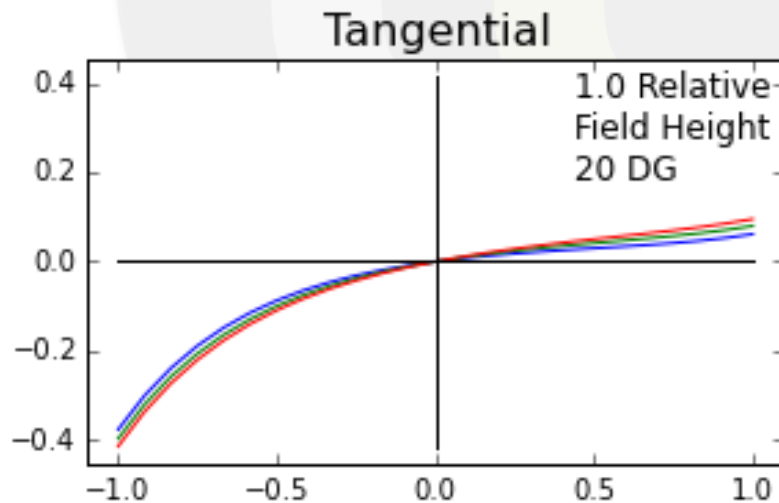
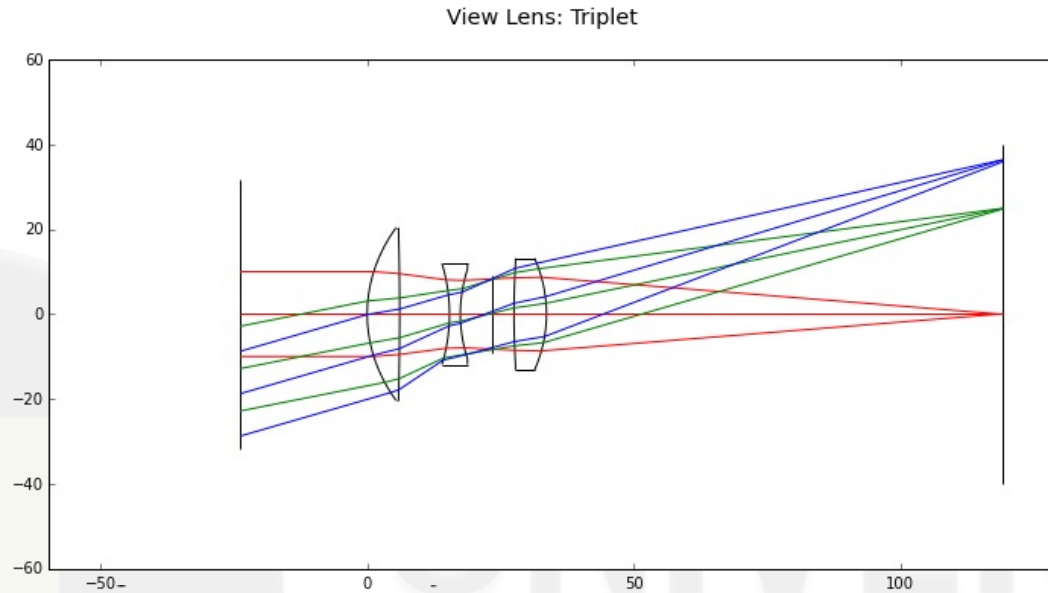
Possibilité d'avoir une licence étudiante : intéressant pour le projet ?

Mais cher... Priorité au solution open source
→ Librairies de Python!

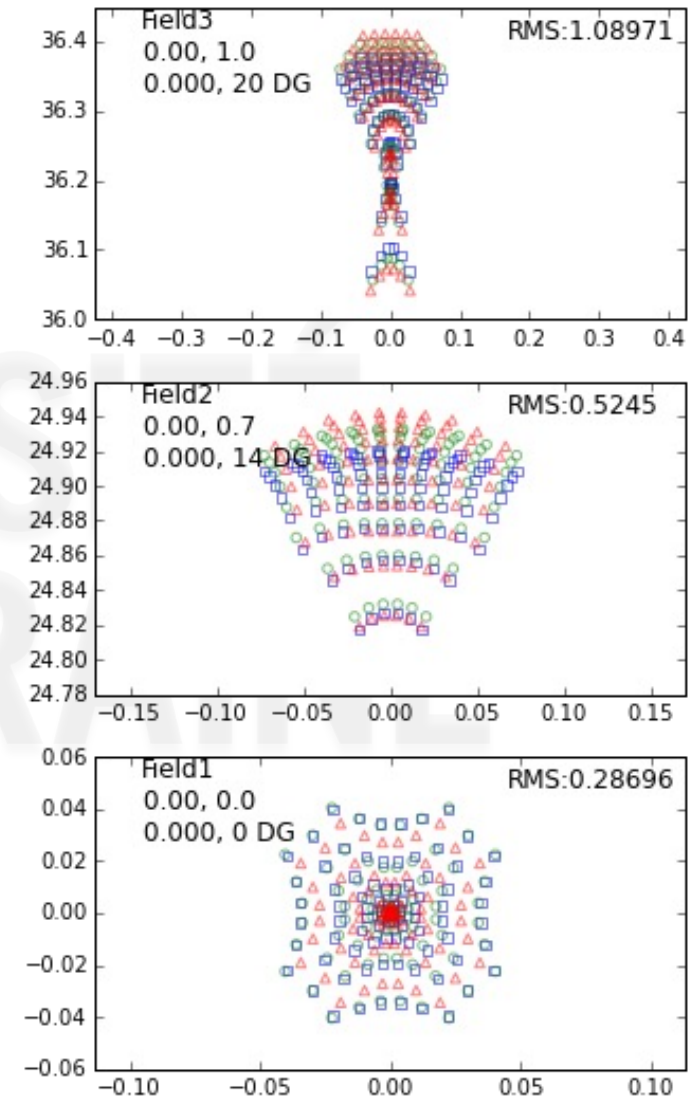
Opticspy

Lien vers doc :

https://faster-than-light.net/files/Real_Ray_Tracing.html



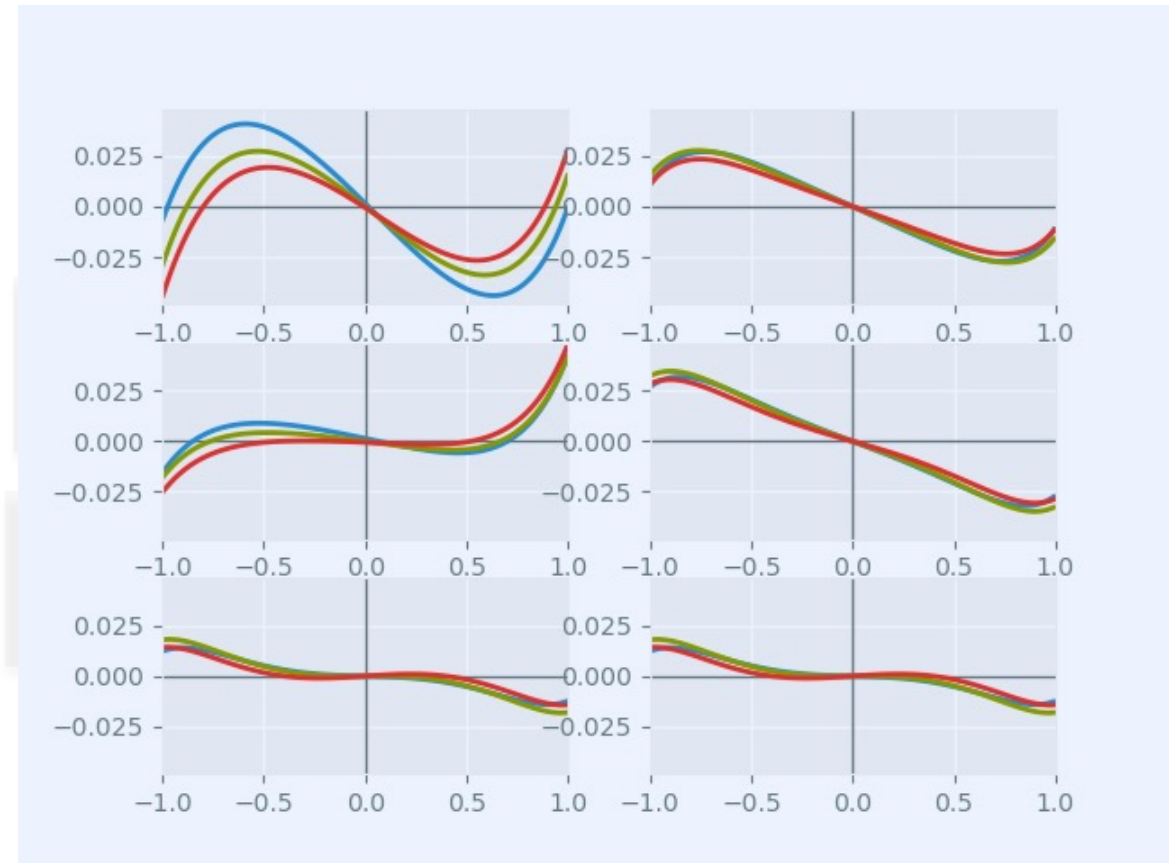
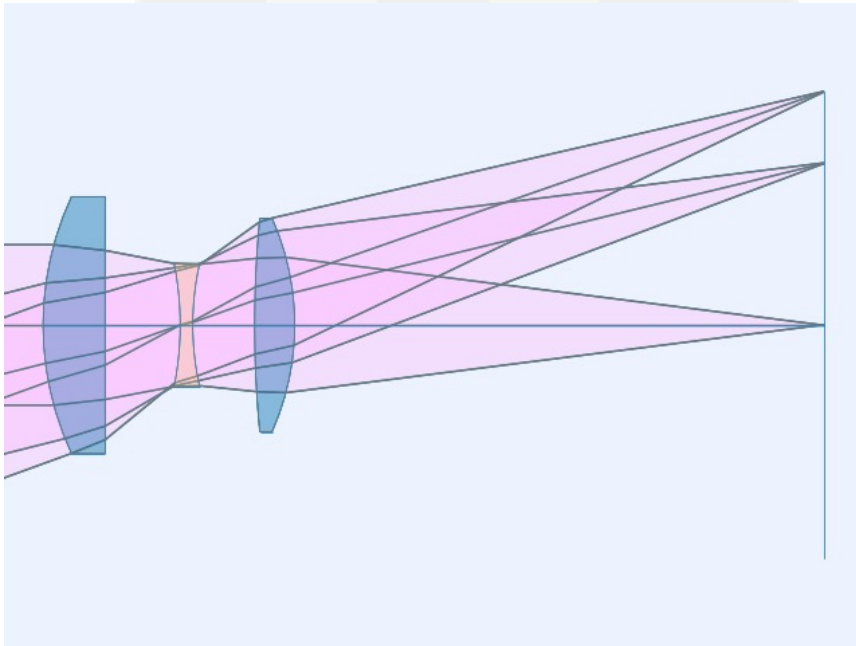
Spotdiagram



Rayoptics

Lien vers doc :

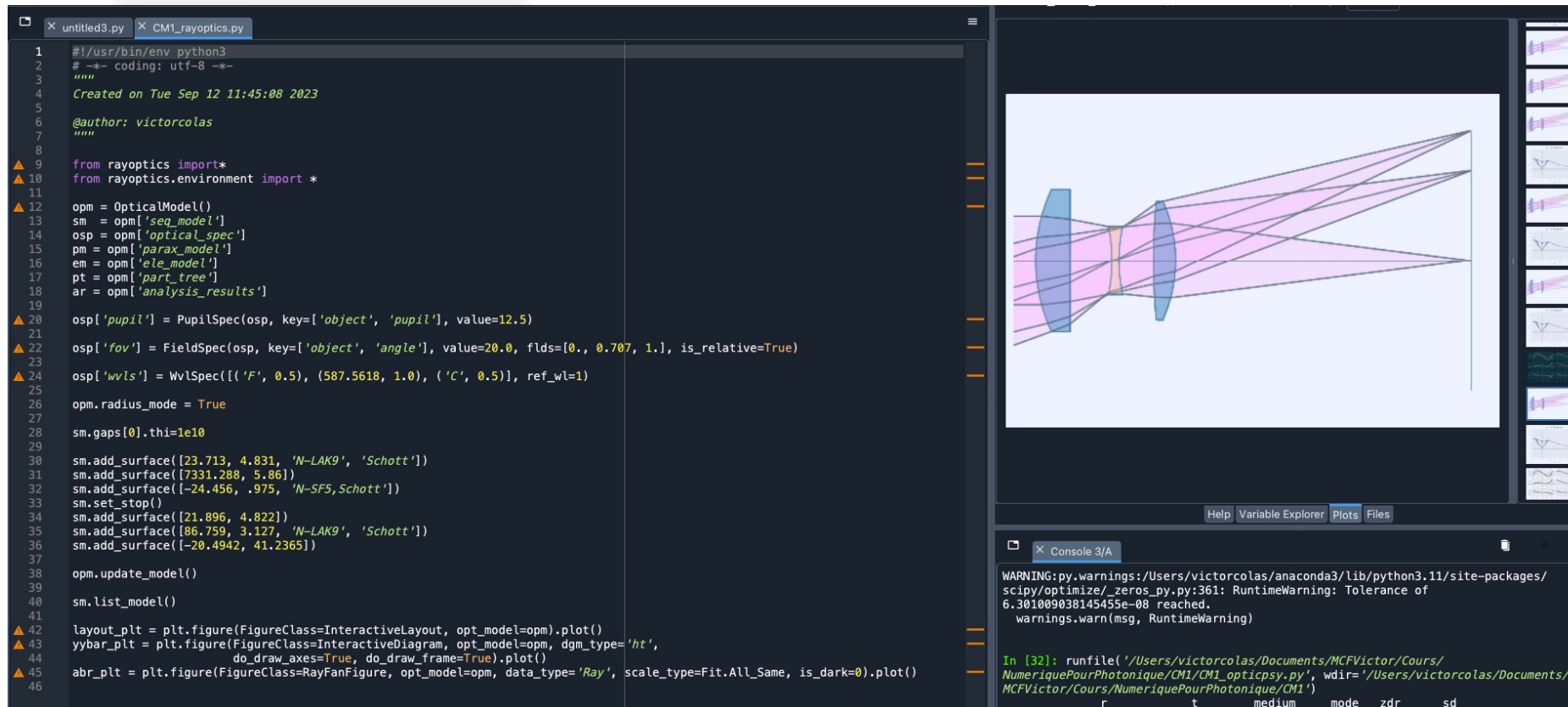
<https://ray-optics.readthedocs.io/en/latest/>



Découverte libre

D'autres librairies ? Rayopt, RayTracing ...

A vous de jouer !



Projets sur cette thématique

- Etude de l'aberration sphérique pour une lentille plan convexe
 - Etude d'une lentille achromatique
- Etude d'un dispositif complexe : télescope James Webb
 - Exemples dispo sur Arche