

Systeme d'illumination compact pour la microlithographie

B. Plainchamp, F. Riguet, R. Mercier Ythier

/ 3^{ème} journée thématique Club Calcul Optique SFO 2016 /

SOMMAIRE

- 1. Rôle de l'illuminateur dans la microlithographie**
 1. Uniformiser l'éclairement au niveau du masque
 2. Assurer la fonction de scan de la machine
 3. Mettre en forme la pupille
- 2. Le design compact novateur de REOSC**
 1. Concept d'un illuminateur traditionnel
 2. La slit pupillaire → le design compact de REOSC
- 3. Spécifications, simulations et mesures**
 1. Les grandes spécifications dans le champ d'un illuminateur
 2. Uniformité d'illumination dans le champ
 3. Qualité image des grilles dans le plan du masque

/01/

Rôle de l'illuminateur dans la microlithographie

INTRODUCTION

→ **Microlithographie = réalisation de puces électroniques**

→ **Source**

- **DUV : laser ArF (193 nm)**, KrF (248 nm), lampe à mercure (365 nm)
- EUV : étain, xénon → 13,5 nm

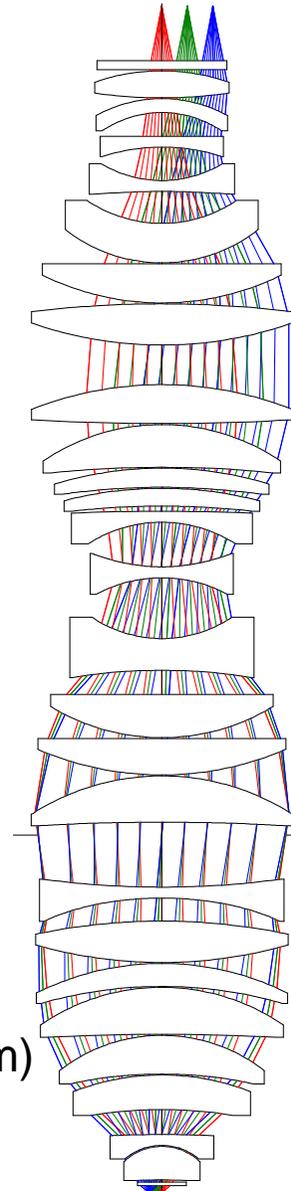
→ **Illuminateur (IL)**

- Mise en forme du faisceau
- Homogénéisation

→ **Optique de projection (PO)**

- Reproduction du masque sur un « wafer » en silicium
- Grandissement < 1 (typiquement 0,25)
- DUV : dioptrique, catadioptrique
- EUV : catoptrique

27 éléments
5 asphères (100 – 900 μm)
1300 mm
NA 0,75



LES RÔLES DE L'ILLUMINATEUR

→ Homogénéiser

- Défaut d'uniformité d'éclairement du masque $< 1 \%$
- Profil rectangulaire dans une direction, trapézoïdal dans l'autre

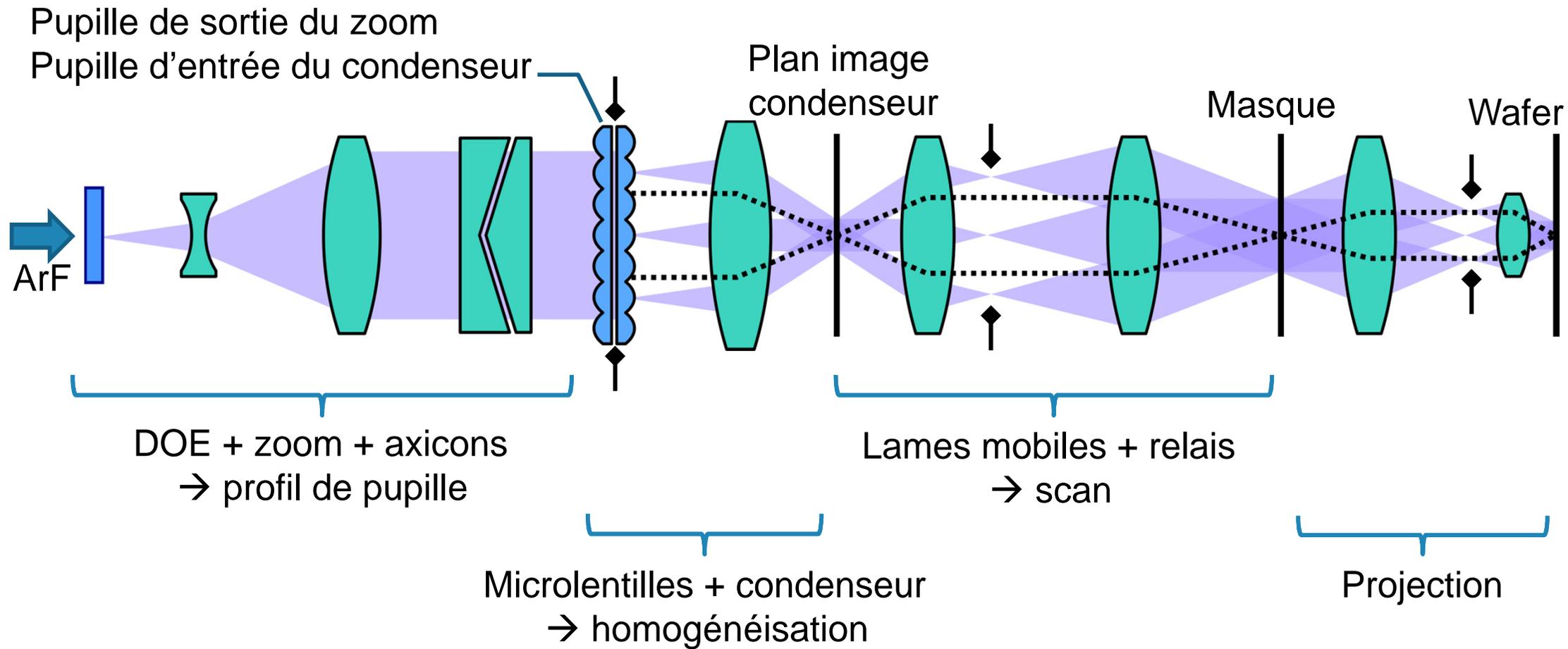
→ Scanner

- Le masque est plus grand que la zone illuminée
- Il ne faut pas déborder du masque (marge $< 2 \text{ mm}$)

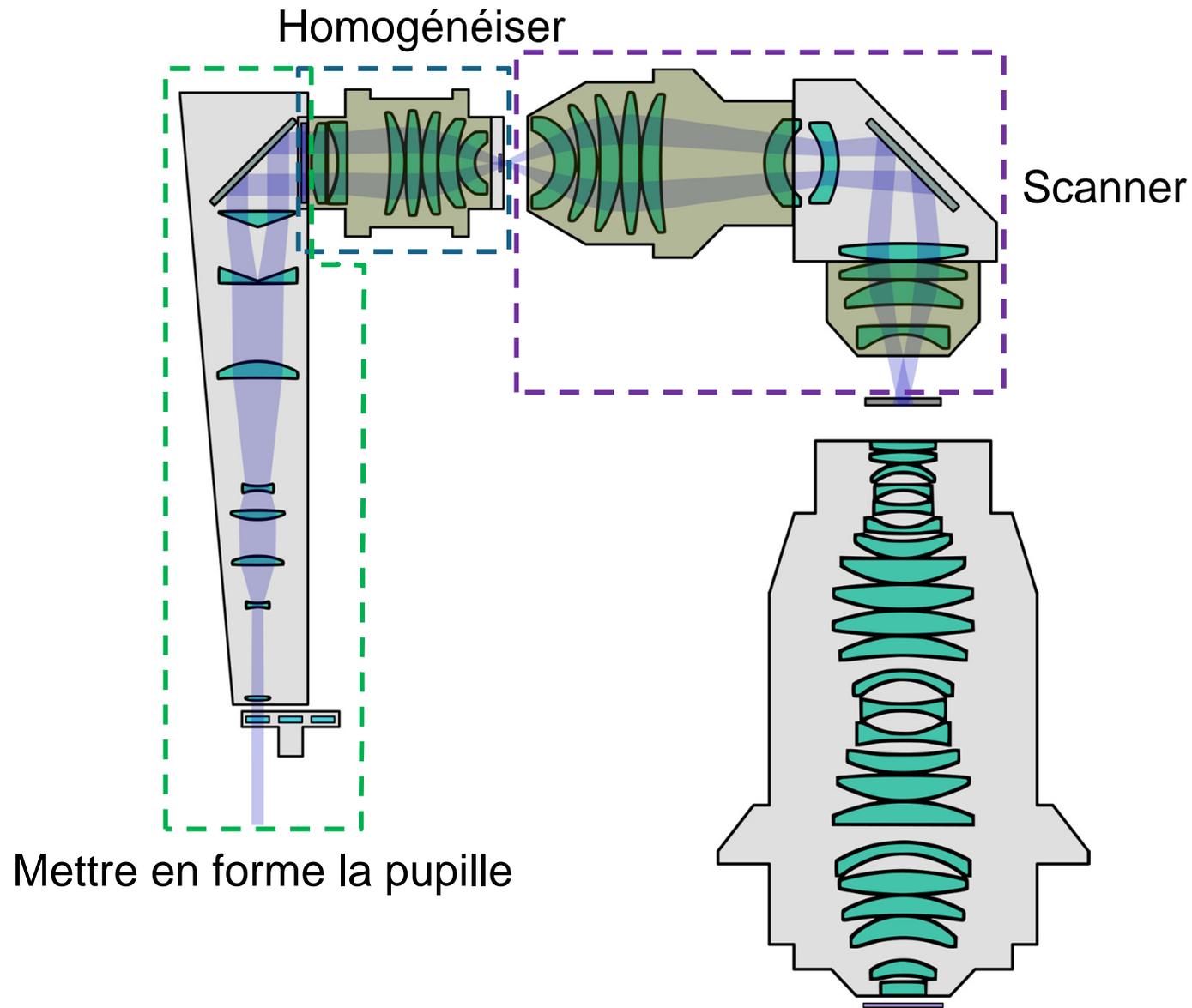
→ Mettre en forme le profil de pupille

- Illumination Köhler = source imagée dans la pupille intermédiaire du PO
- Profil optimisé en fonction des motifs à résoudre

LES RÔLES DE L'ILLUMINATEUR



LES RÔLES DE L'ILLUMINATEUR

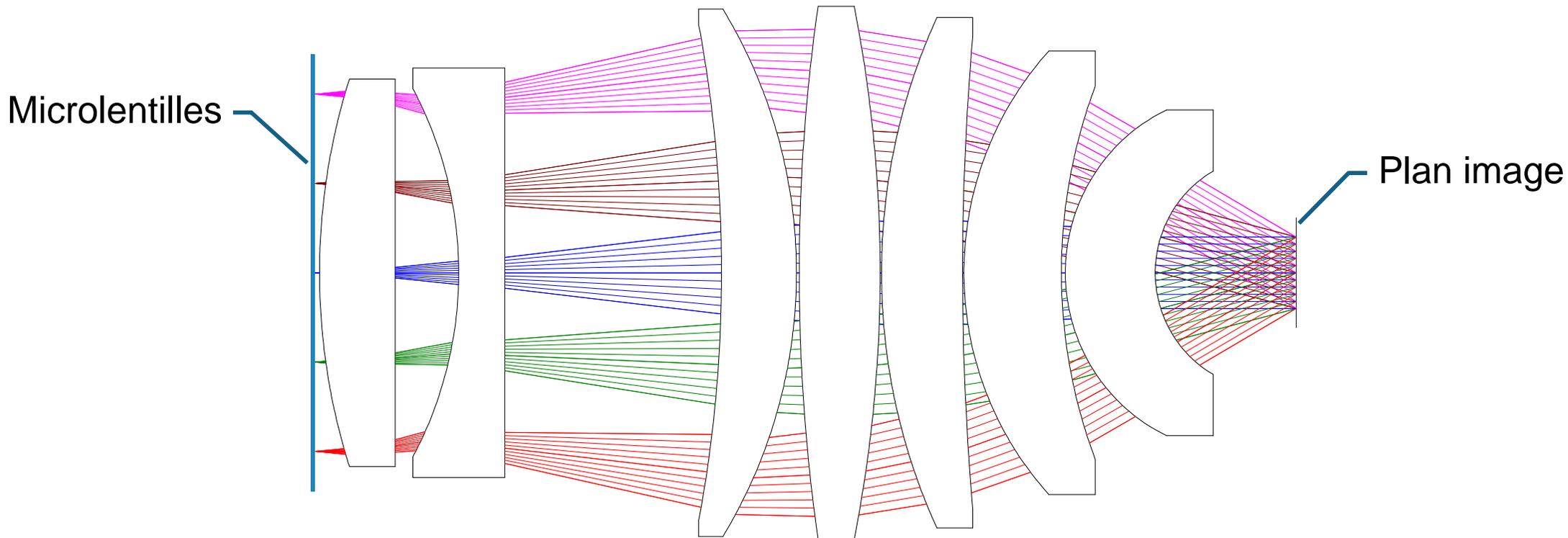


HOMOGÉNÉISER

→ Faisceau divisé grâce à des microlentilles

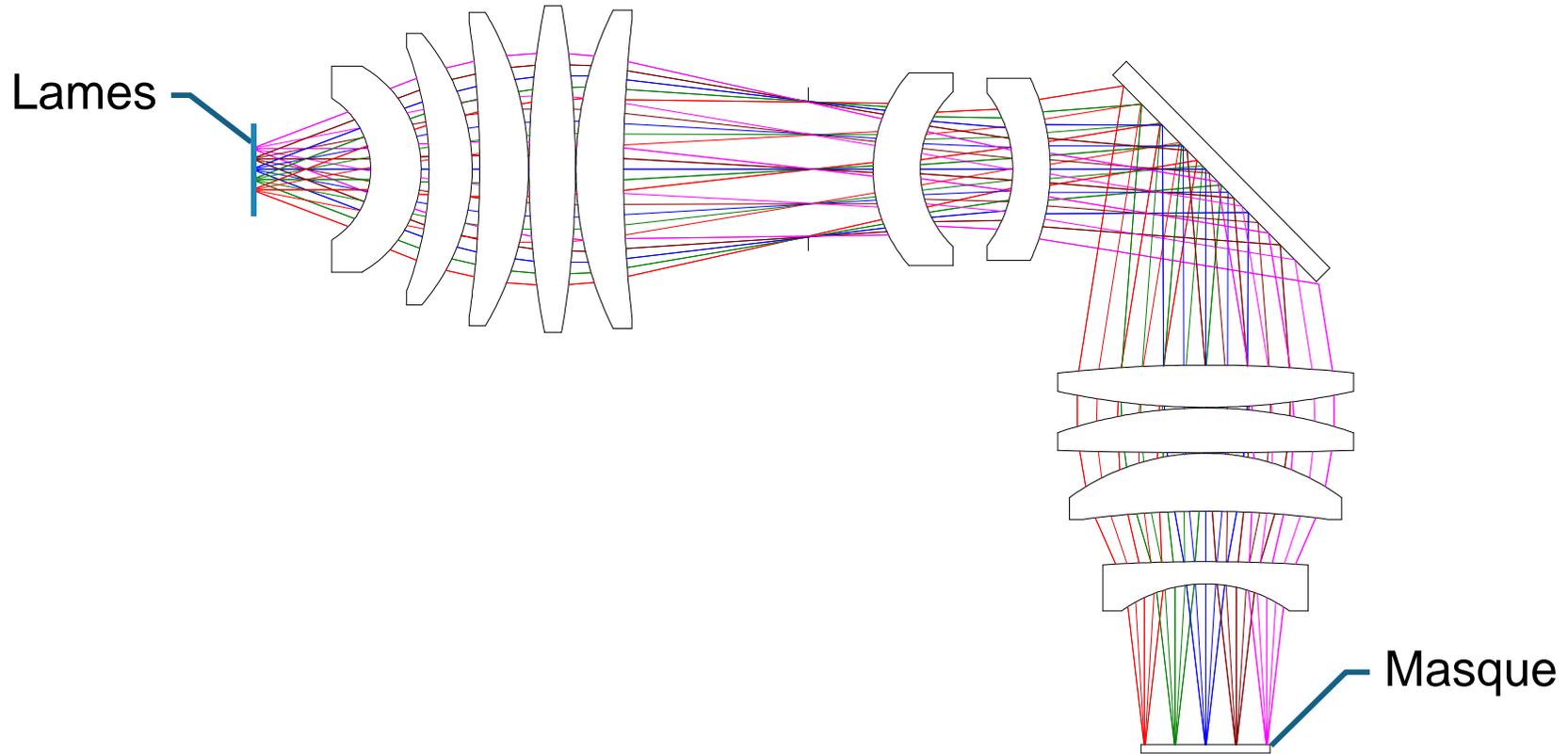
→ Superposition des faisceaux avec un condenseur

- Plan image du condenseur illuminé uniformément
- Microlentilles rectangulaires → zone illuminée rectangulaire, rapport d'aspect identique



SCANNER

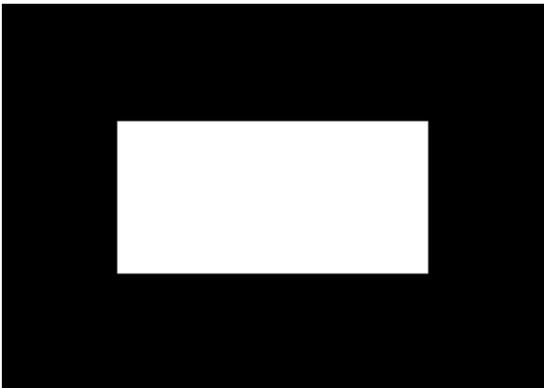
- On ne peut pas mettre de lames au niveau du masque → relais
- Déplacement rapide des lames → $G > 1$
- Profil trapèze → défocalisation entre plan image condenseur et plan objet relais



SCANNER

→ Lames fixes → profil rectangulaire sur les côtés

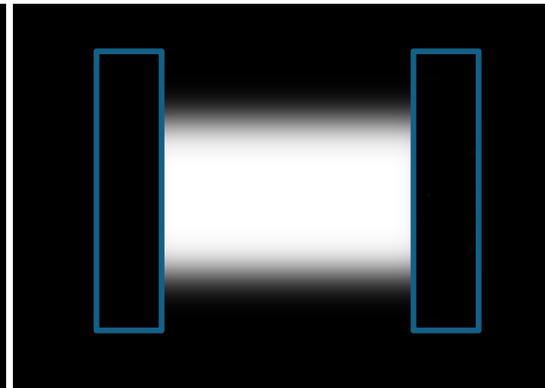
→ Lames mobiles → scan vertical, synchronisé avec le masque



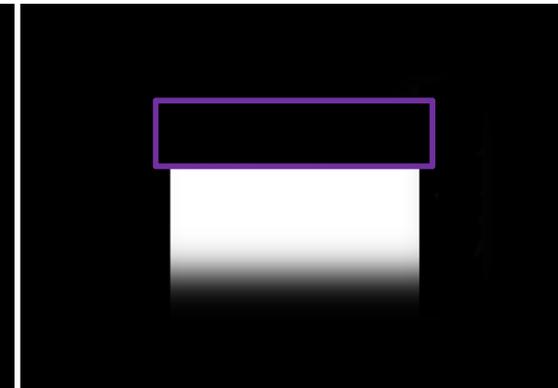
Plan image
condenseur



Plan objet
relais



+ lames fixes

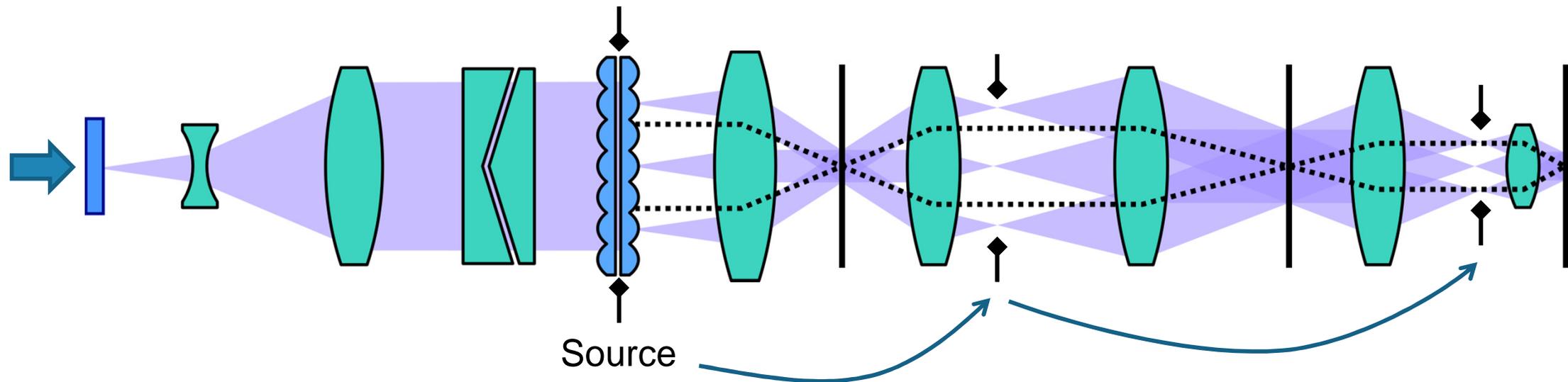


+ une lame mobile

METTRE EN FORME LA PUPILLE

→ Source conjuguée avec la pupille intermédiaire du PO

- Source = plan des microlentilles
- Condenseur télécentrique image
- Relais télécentrique objet/image
- PO télécentrique objet/image



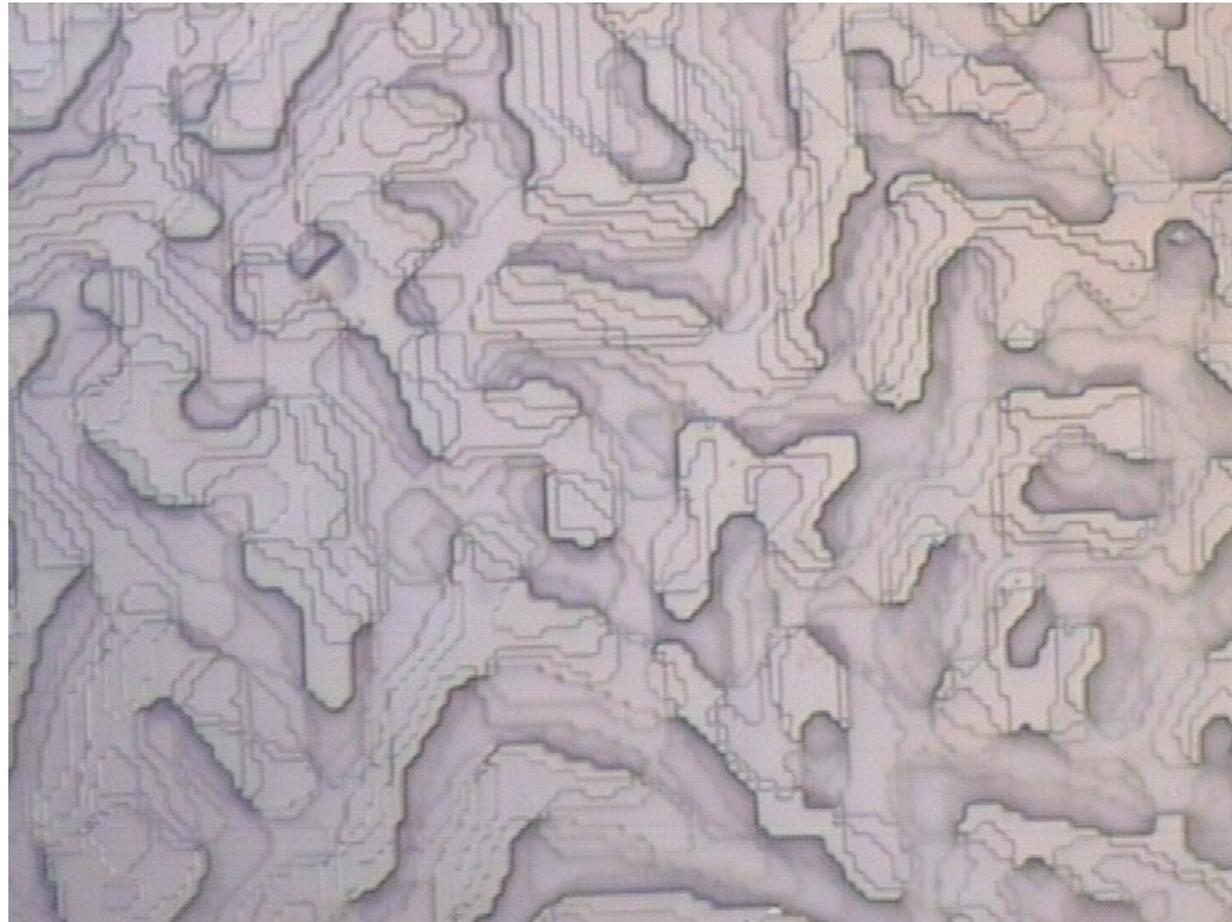
METTRE EN FORME LA PUPILLE

→ Profil d'illumination généré en amont des microlentilles

- Profil de base réalisé par un hologramme synthétique (diffuser diffractif, DOE)



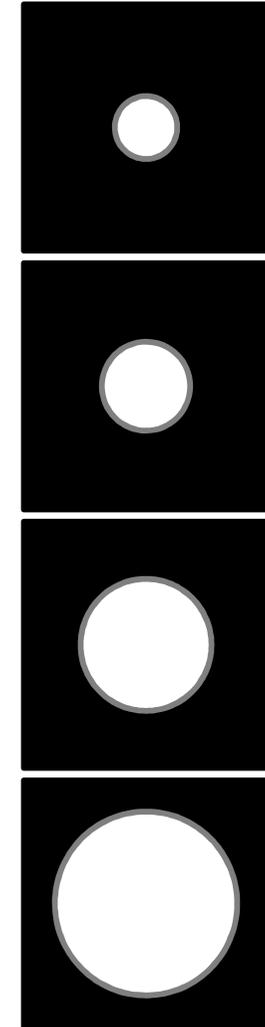
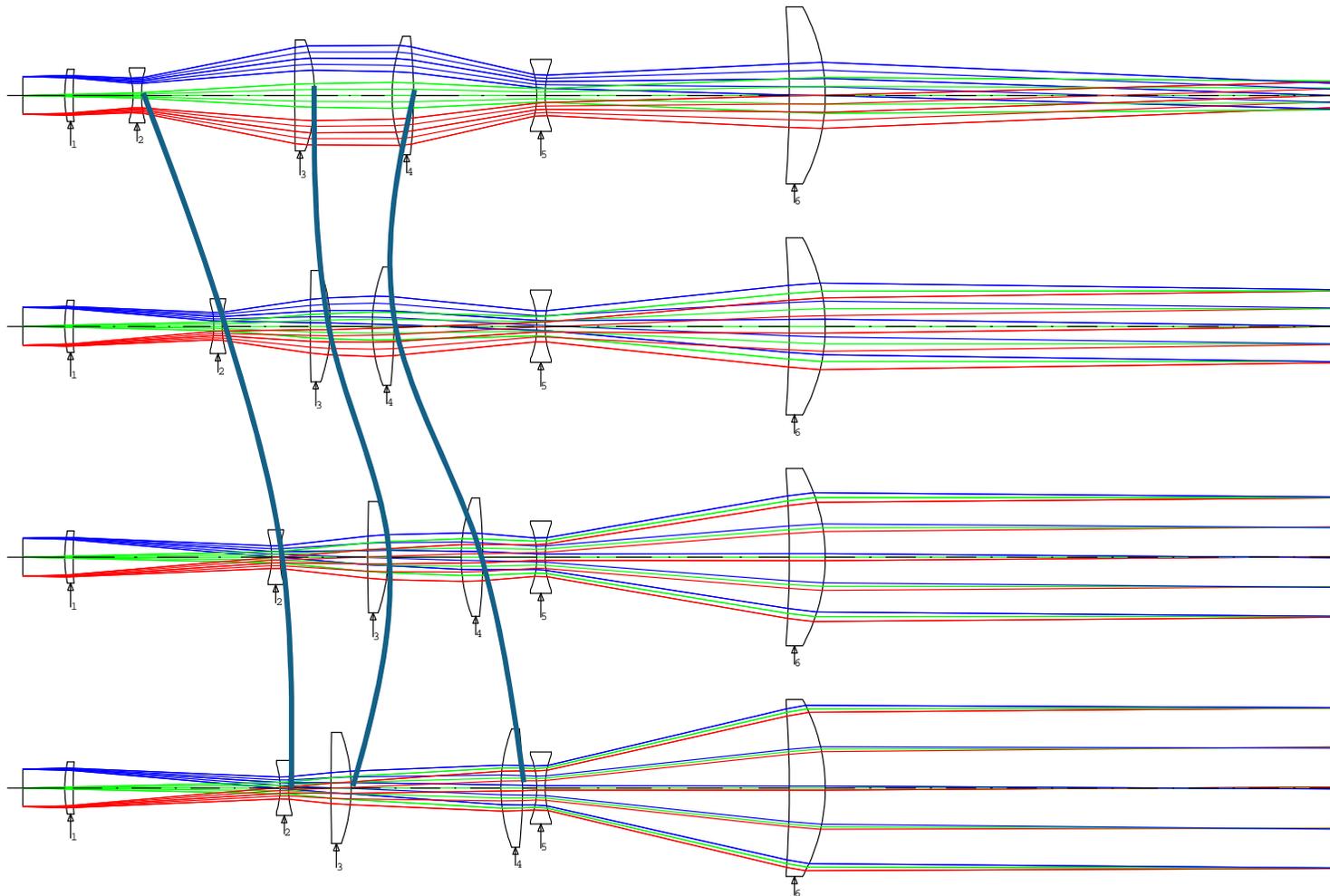
DOE illuminé par un stylo laser



DOE 8 niveaux x800

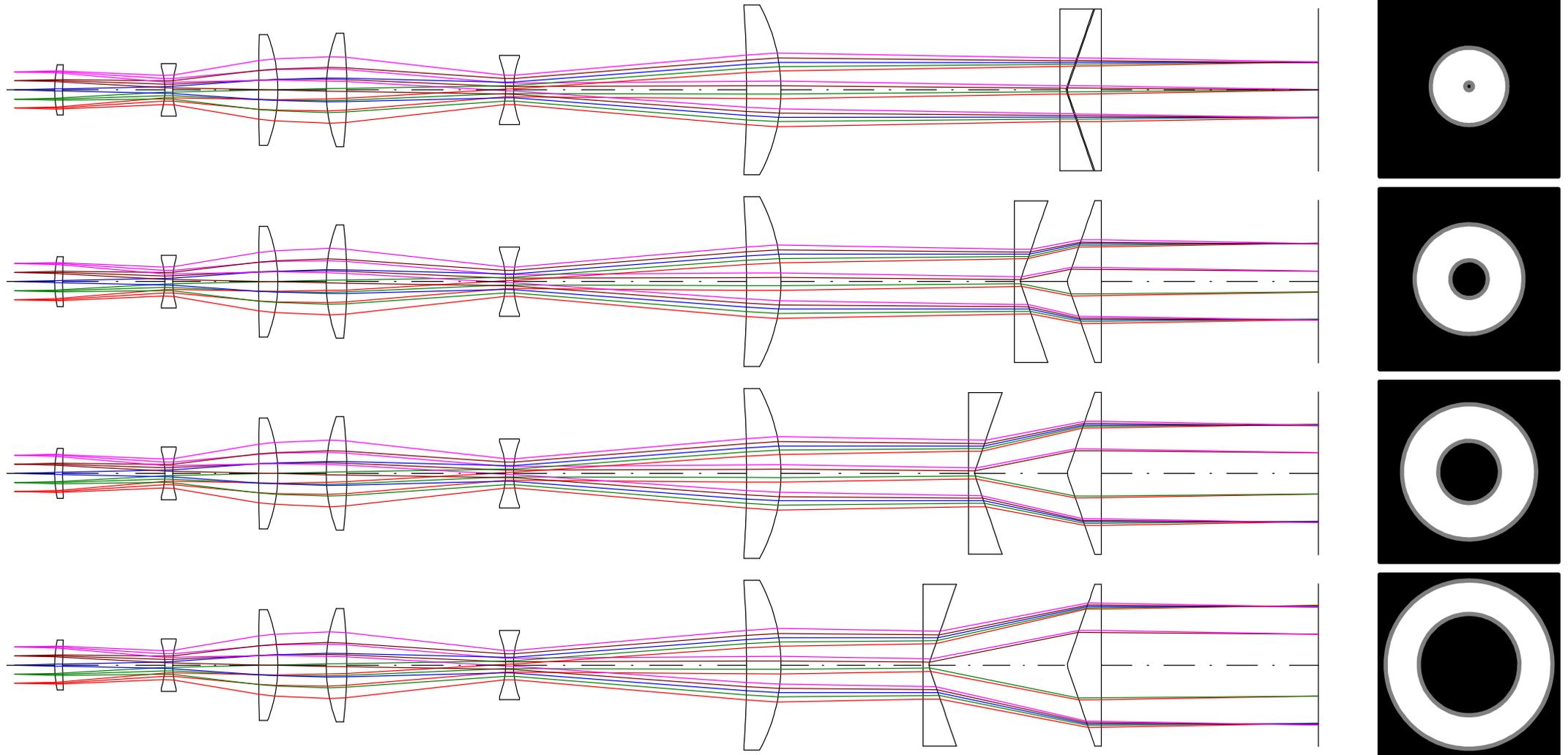
METTRE EN FORME LA PUPILLE

→ Profil modifié par l'ensemble zoom + axicons



METTRE EN FORME LA PUPILLE

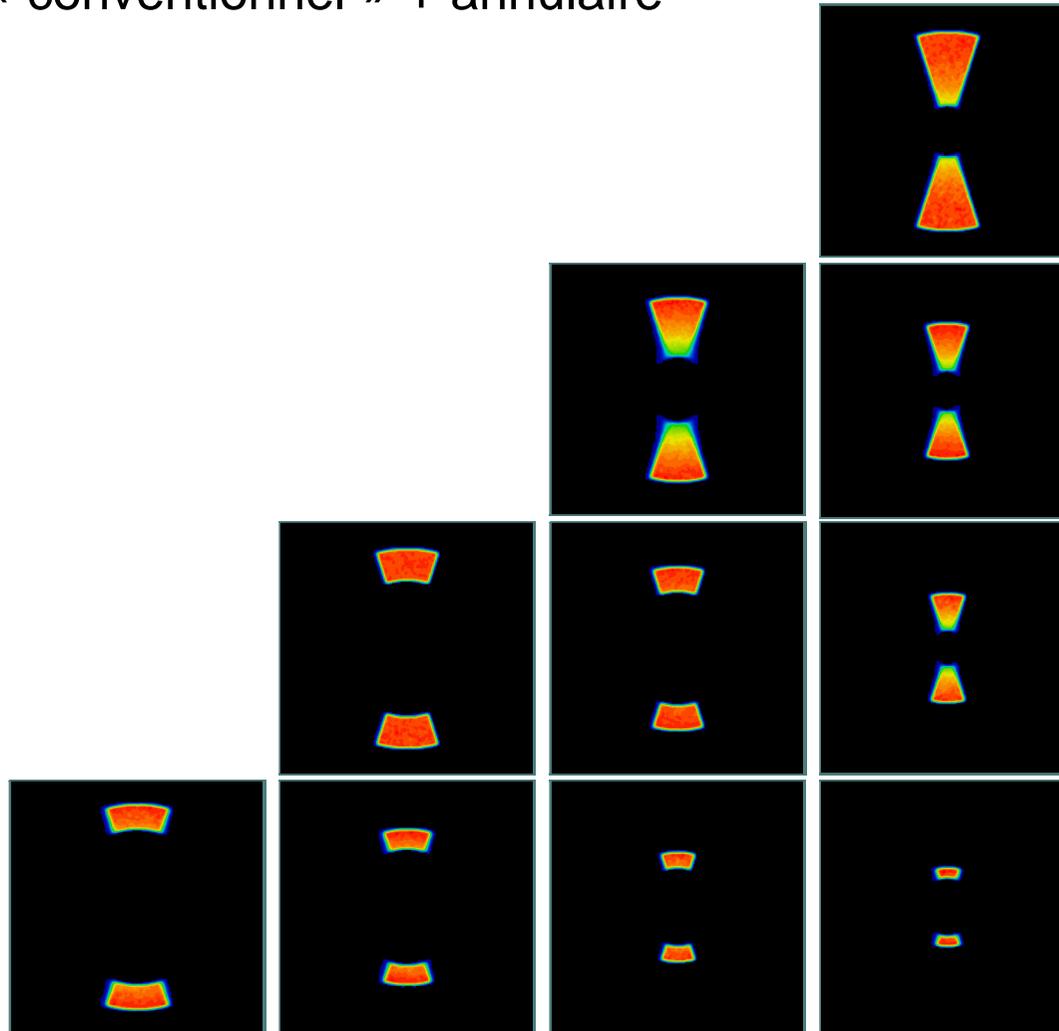
→ Profil modifié par l'ensemble zoom + axicons



METTRE EN FORME LA PUPILLE

→ Plusieurs DOE

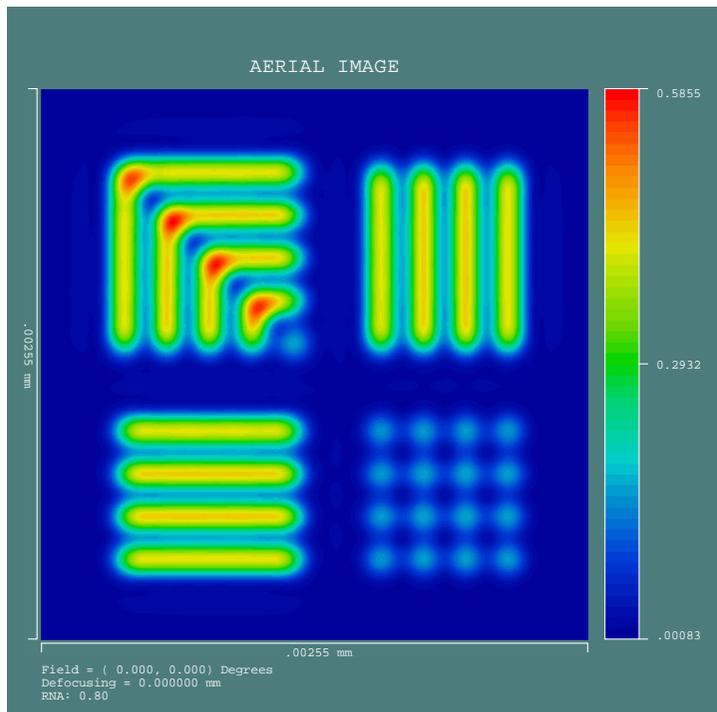
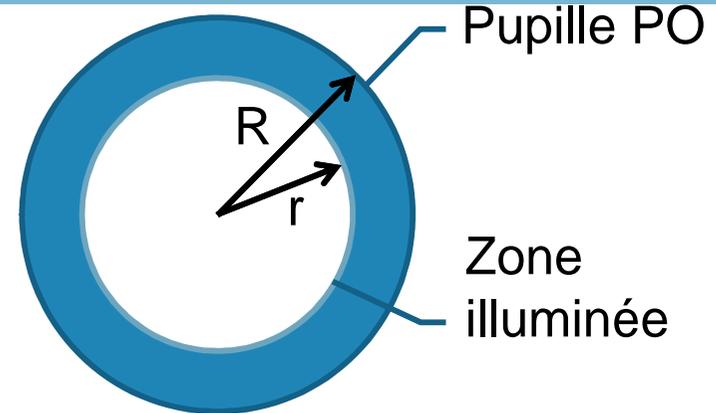
- Profil circulaire → « conventionnel » + annulaire
- Dipôle X
- Dipôle Y
- Quadripôle



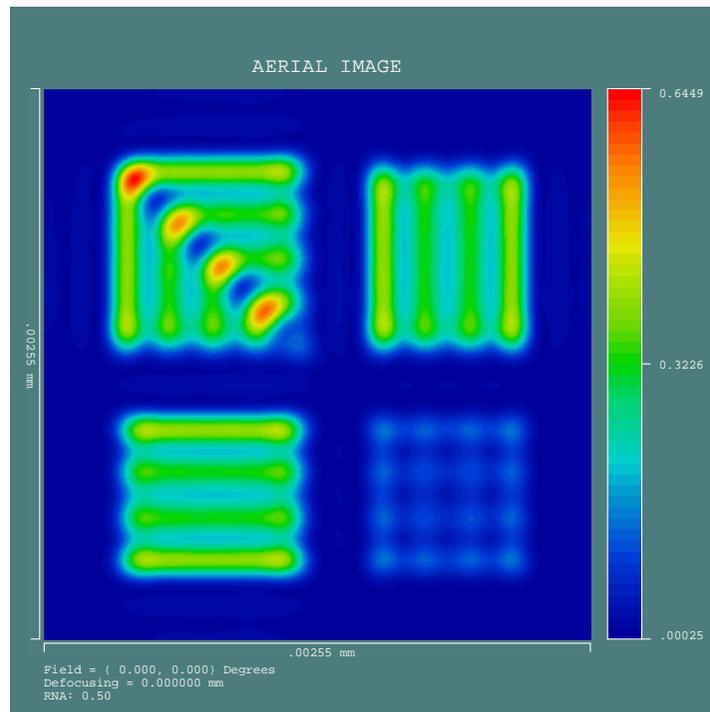
INFLUENCE DU PROFIL DE PUPILLE

→ Illumination « conventionnelle »

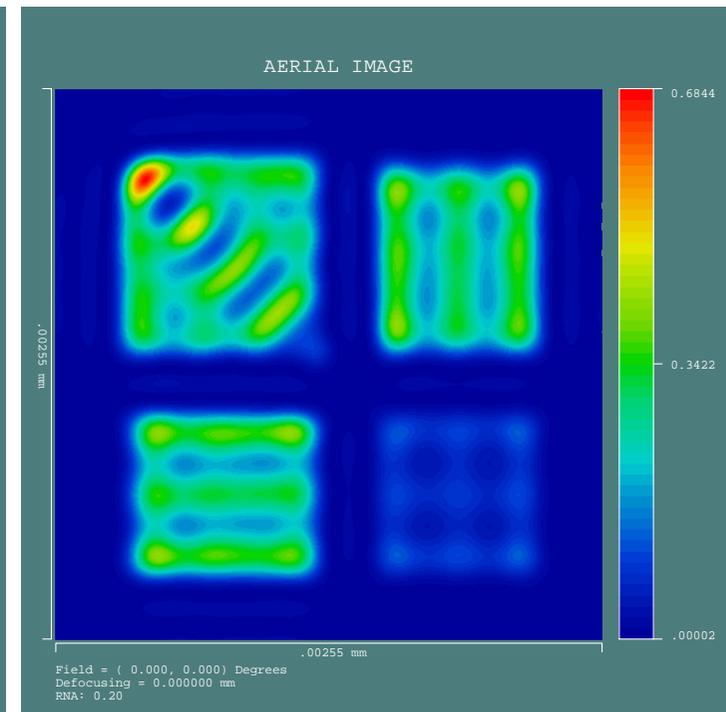
- $\sigma = r/R \rightarrow$ facteur de cohérence



$\sigma = 0,8$



$\sigma = 0,5$

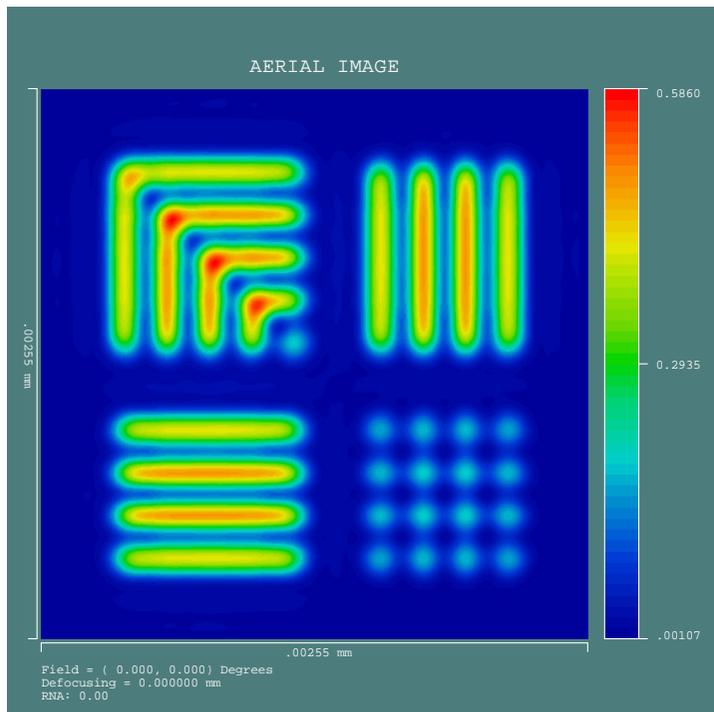
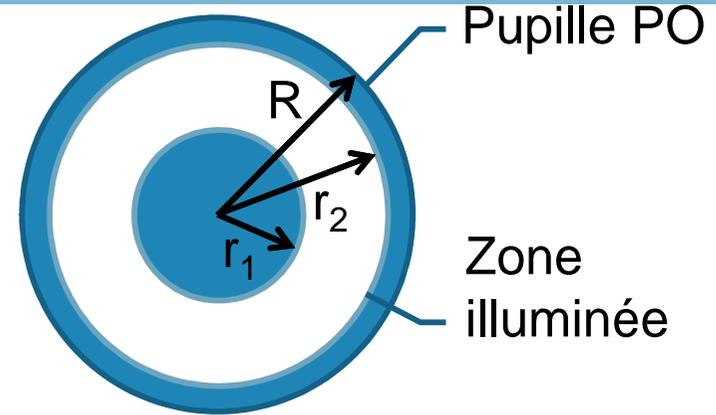


$\sigma = 0,2$

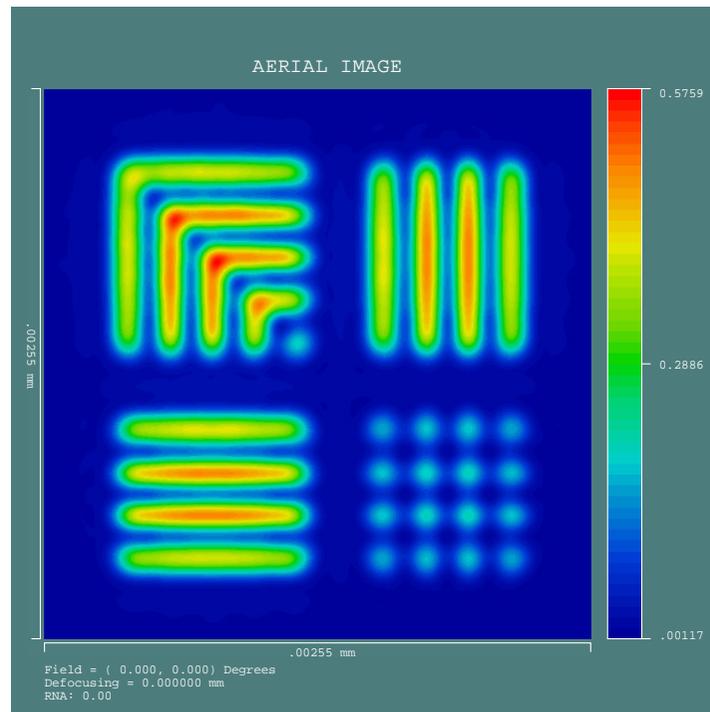
INFLUENCE DU PROFIL DE PUPILLE

→ Illumination annulaire

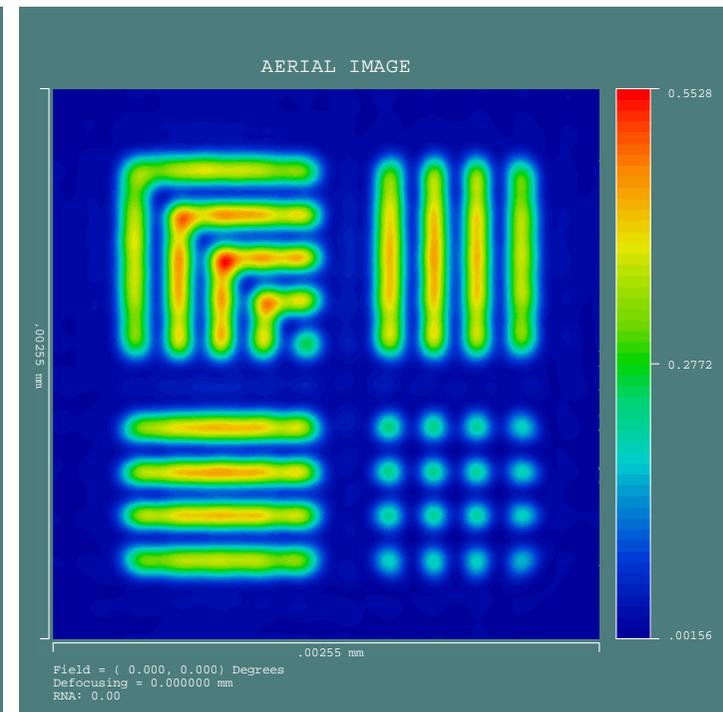
- $\sigma_1 = r_1/R$
- $\sigma_2 = r_2/R$



$\sigma = 0,45 / 0,9$



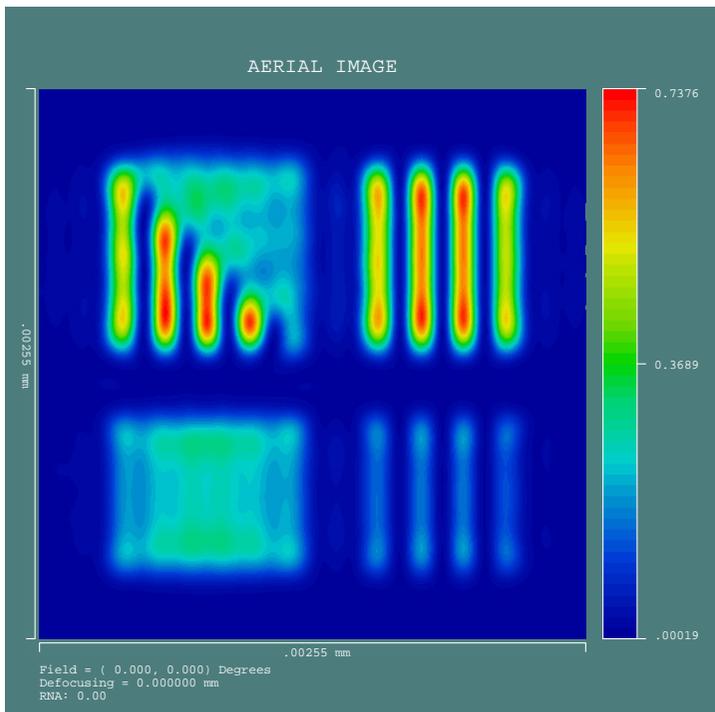
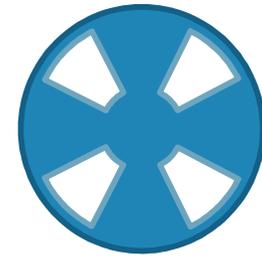
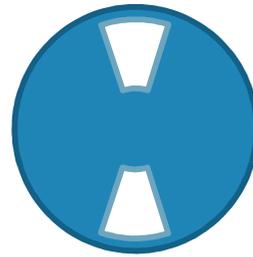
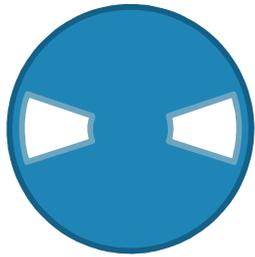
$\sigma = 0,65 / 0,9$



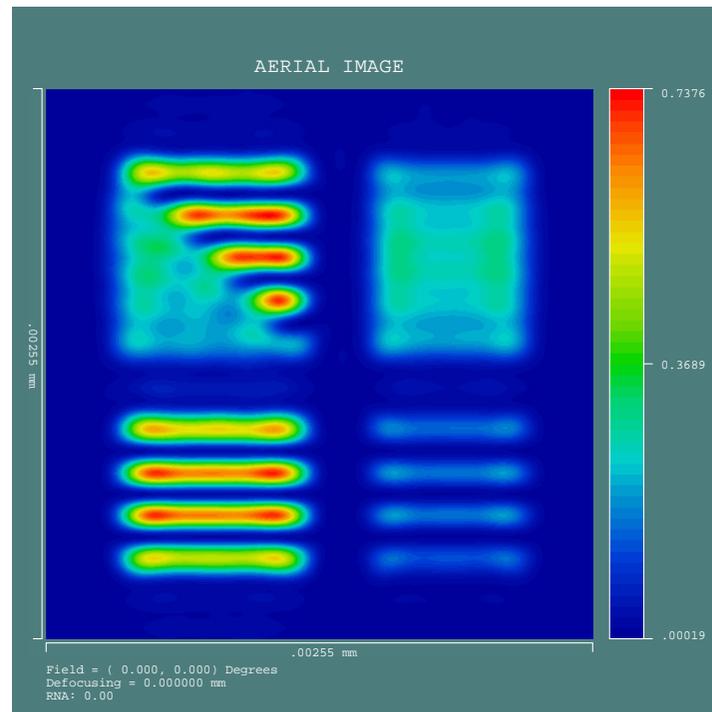
$\sigma = 0,85 / 0,9$

INFLUENCE DU PROFIL DE PUPILLE

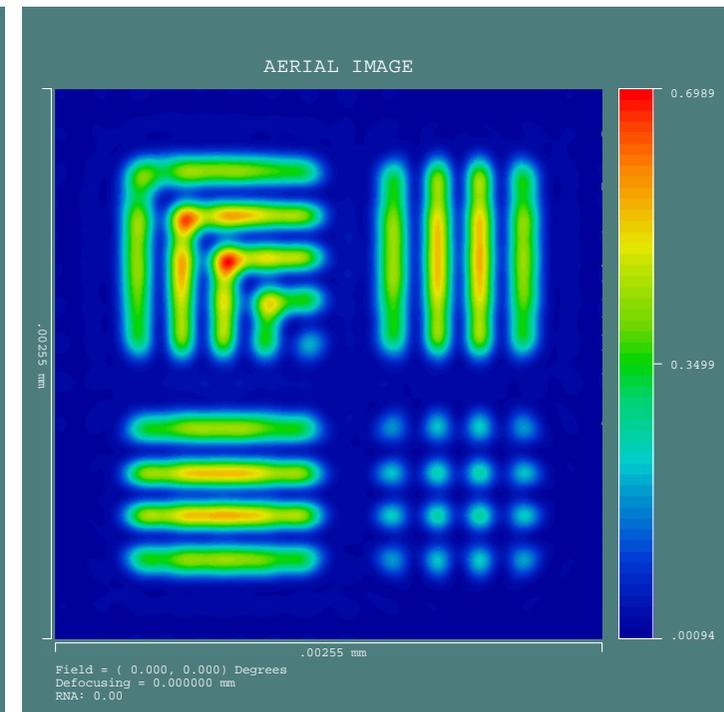
→ Eclairage dipolaire et quadripolaire



$$\sigma = 0,65 / 0,9$$



$$\sigma = 0,65 / 0,9$$



$$\sigma = 0,65 / 0,9$$

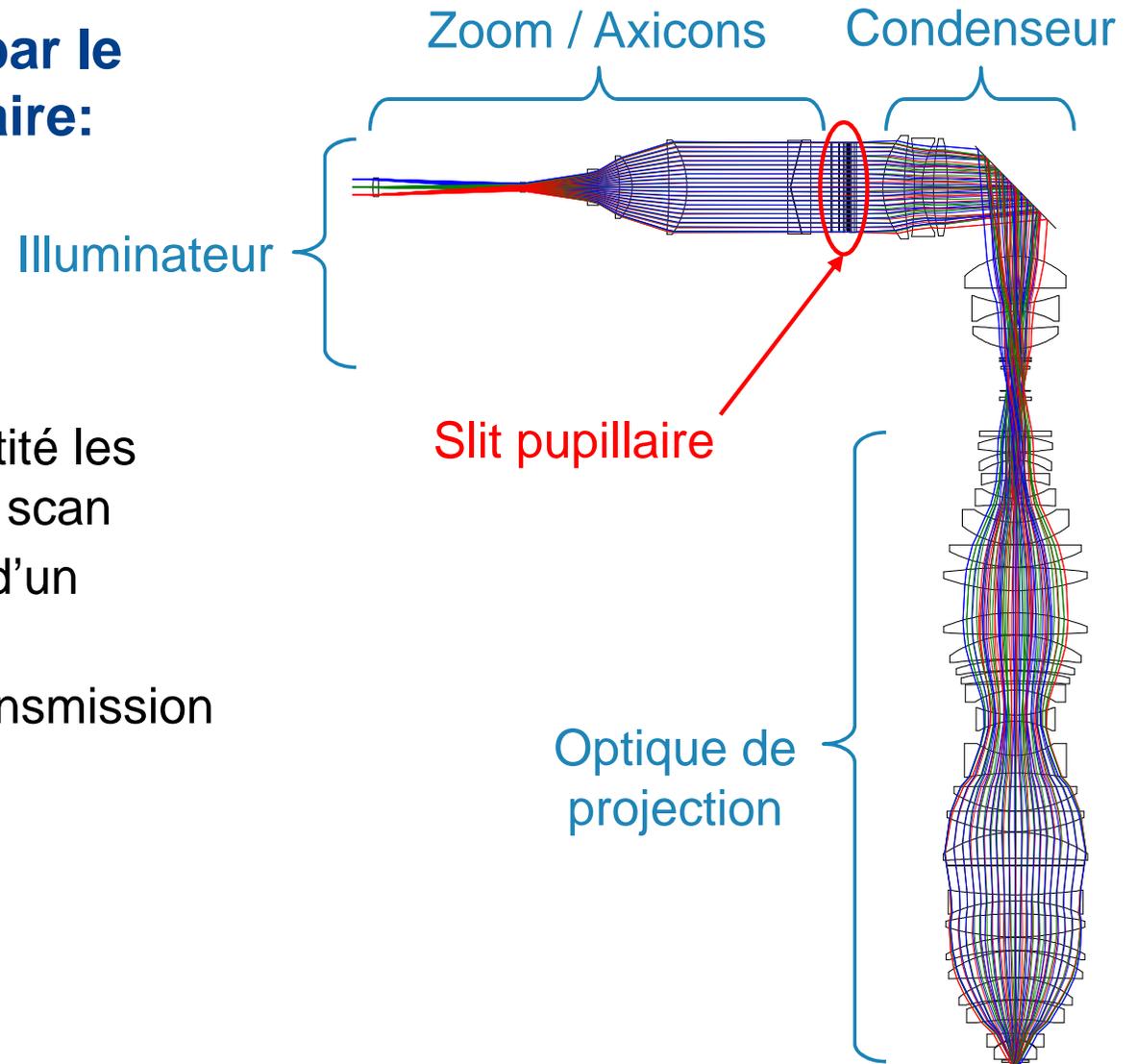
/02/

Le design compact novateur de REOSC

La Slit pupillaire → le design compact de REOSC

→ Les améliorations apportées par le concept REOSC de Slit pupillaire:

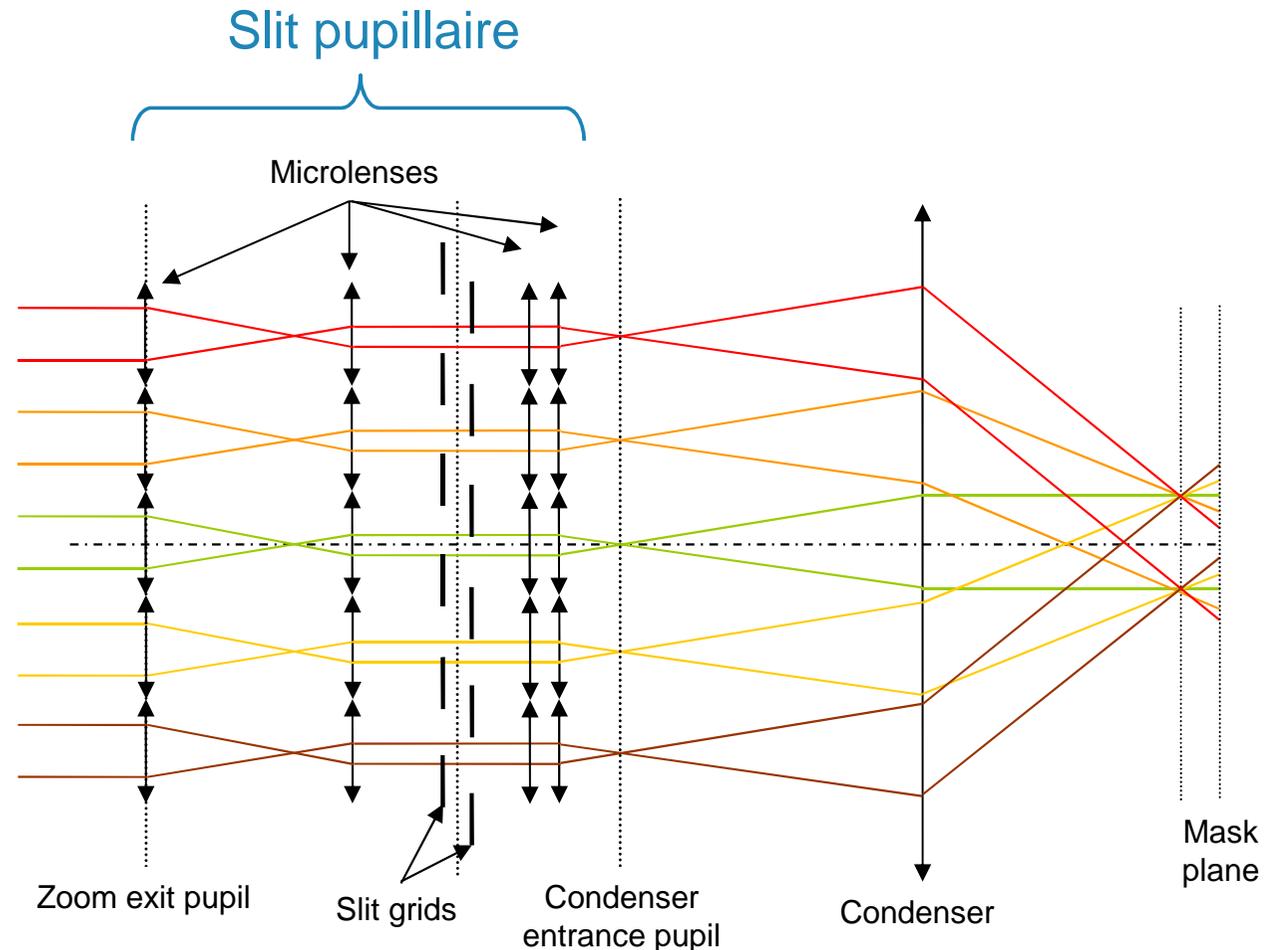
- Rassembler dans une seule entité les fonctions d'uniformisation et de scan
- Supprimer l'optique de reprise d'un illuminateur classique
- Améliorer la compacité et la transmission



La Slit pupillaire → le design compact de REOSC

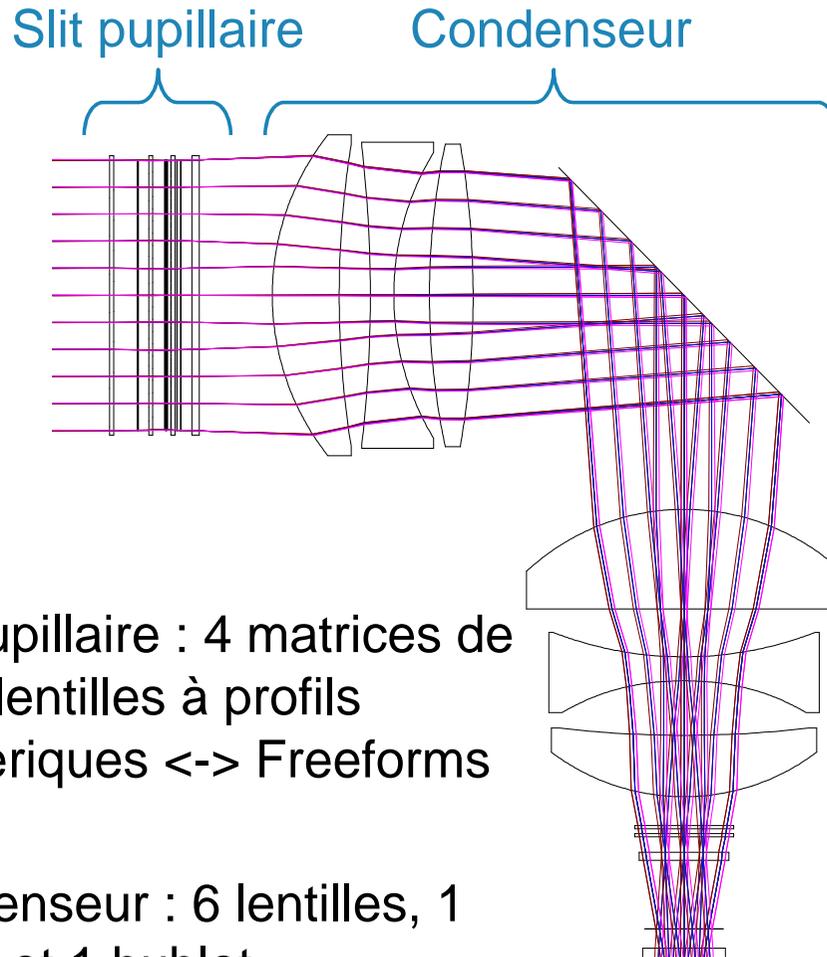
→ Principe:

- Pupille découpée en sous faisceaux
- Sommation des faisceaux sur le plan focal du condenseur -> bonne uniformité d'éclairement
- Grilles mobiles dans un plan intermédiaire -> fonction scan



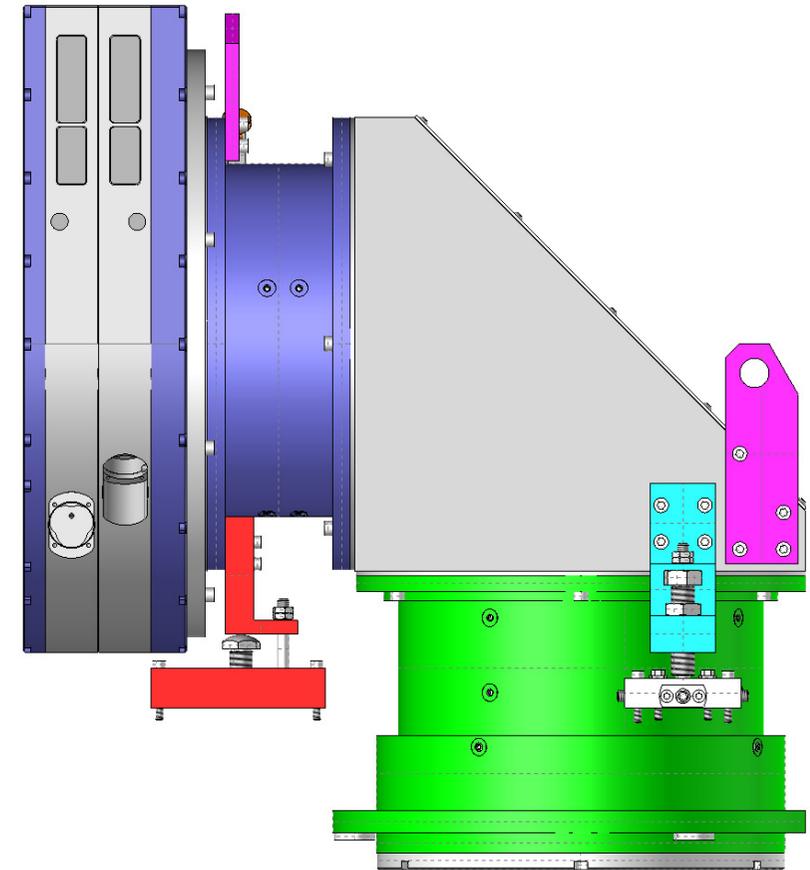
La Slit pupillaire → le design compact de REOSC

→ Design optique :



- Slit pupillaire : 4 matrices de microlentilles à profils asphériques <-> Freeforms
- Condenseur : 6 lentilles, 1 miroir et 1 hublot

Design mécanique:

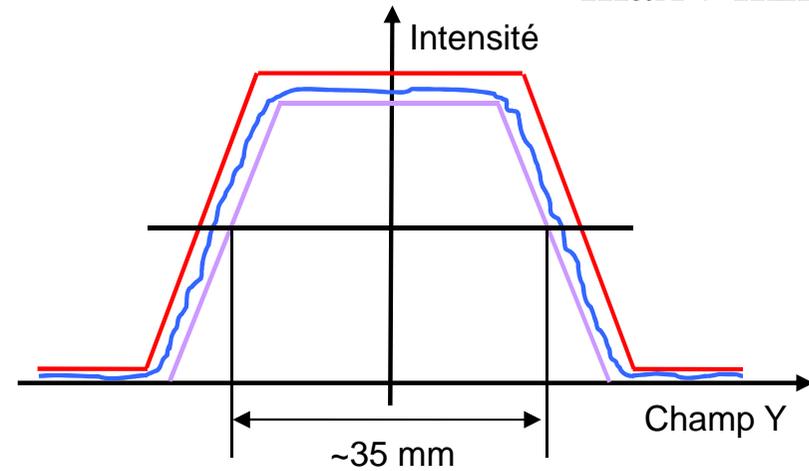
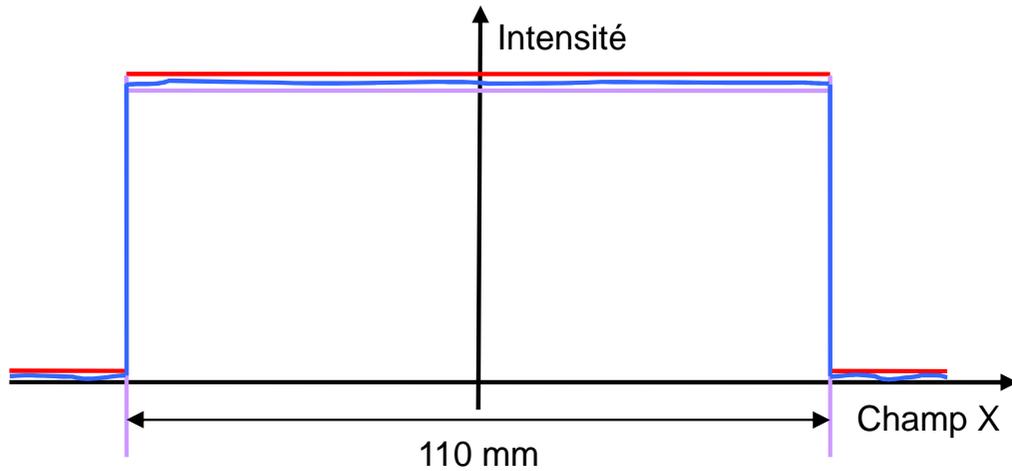


/03/

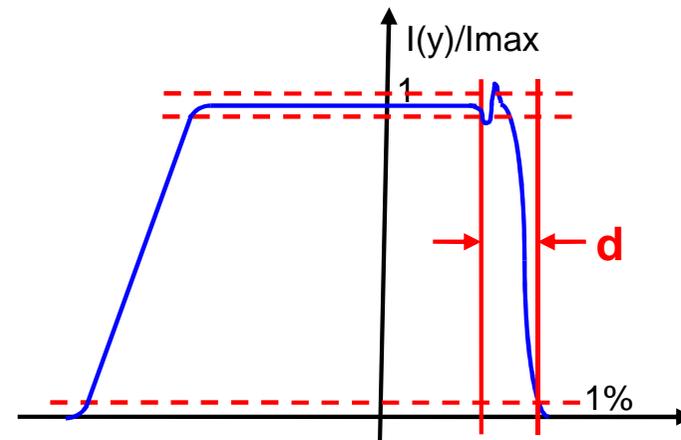
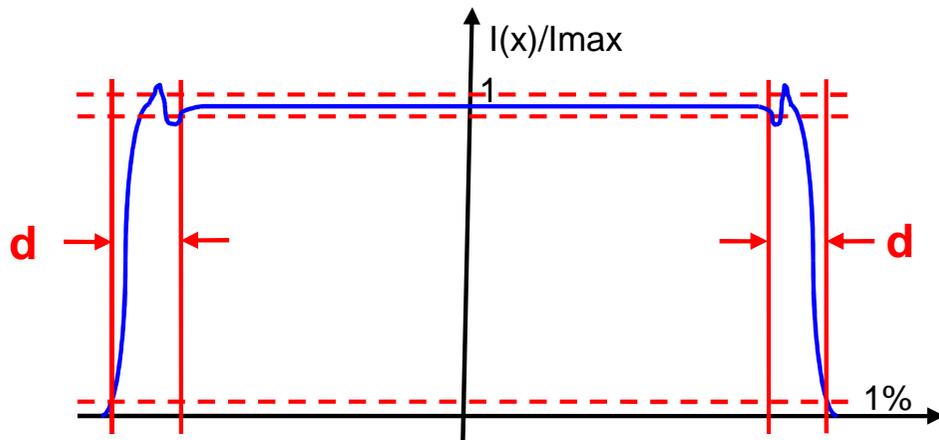
Spécifications, simulations et mesures

Les grandes spécifications de champ d'un illuminateur

→ Uniformité d'illumination « Top Hat » de l'ordre de 1% : $\frac{\max - \min}{\max + \min} < 1\%$



→ Image des grilles au niveau du masque « d » < 2 ou 3 mm



Uniformité d'illumination dans le champ

→ **L'uniformité d'illumination est simulée dans CodeV avec la fonction LUM par lancer de rayon classique.**

→ **Problème de simulation rencontré:**

- Précision d'uniformité d'illumination recherchée ~ 0,1%
- Taille du détecteur ~ 100 pixels dans 1 direction
- Le bruit de photons impose d'envoyer 100 millions de rayons pour obtenir la précision de simulation souhaitée
- Temps de calcul ~ 30 heures sur 1 processeur
- L'analyse de sensibilités (~250 paramètres) et le tolérancement du système d'illumination basé sur le critère d'uniformité d'illumination prend alors des années de simulation!

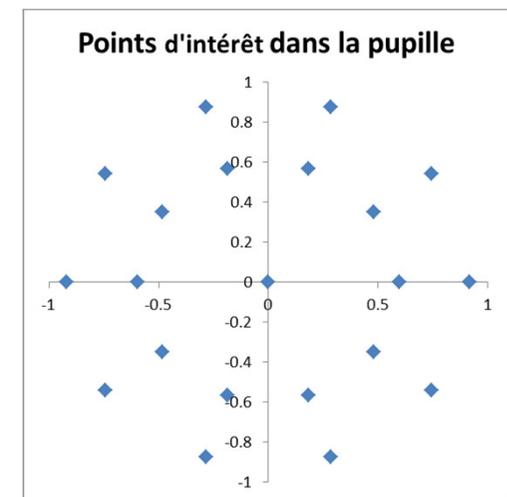
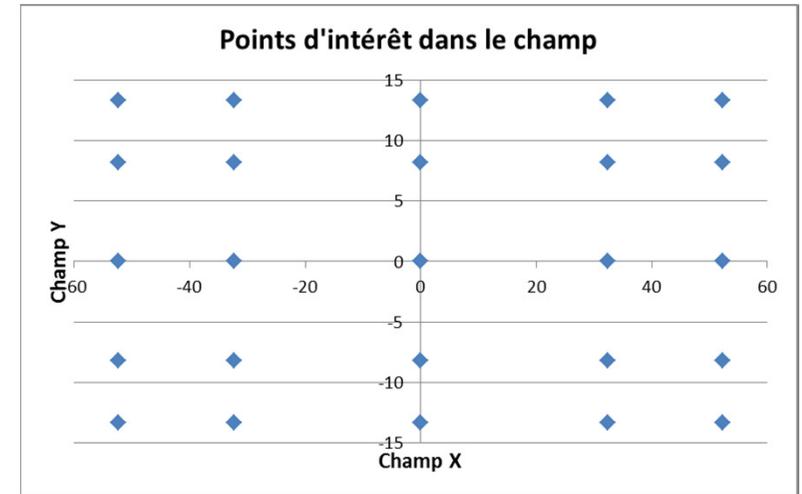
→ **Besoin:**

- Diminuer drastiquement le temps de calcul (facteur 100 à 1000) !

Uniformité d'illumination dans le champ

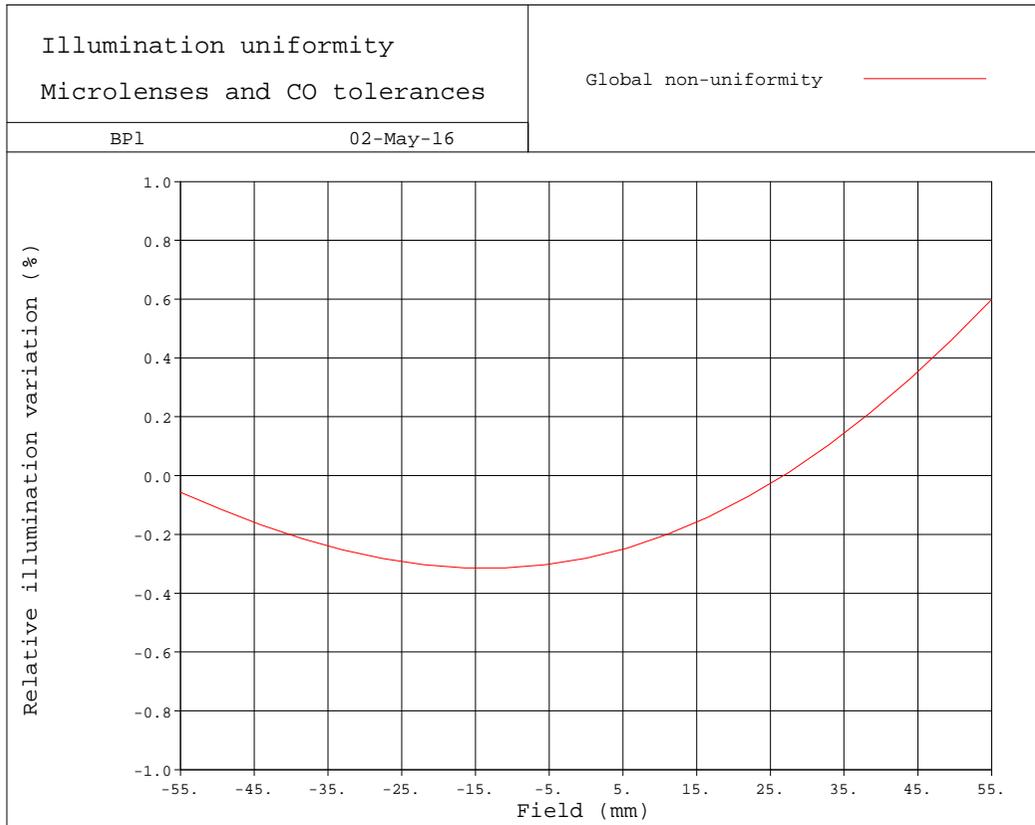
→ Principe et hypothèses de la méthode de résolution du problème:

- La modification d'un paramètre provoque une variation régulière de l'éclairement dans le plan focal
- Cette variation peut être interpolée par des polynômes de bas degré
- Quelques points du champ judicieusement choisis suffisent à établir cette interpolation
- La modification d'un paramètre a un effet lentement variable vis-à-vis de la position de la microlentille dans la pupille donc un échantillonnage judicieux de la pupille suffit pour réaliser l'interpolation
- La variation d'éclairement est calculée par la variation d'aire d'un tube de flux triangulaire défini par 3 rayons.
- Au total $25 \times 21 \times 3 = 1575$ rayons (vs 100 millions)

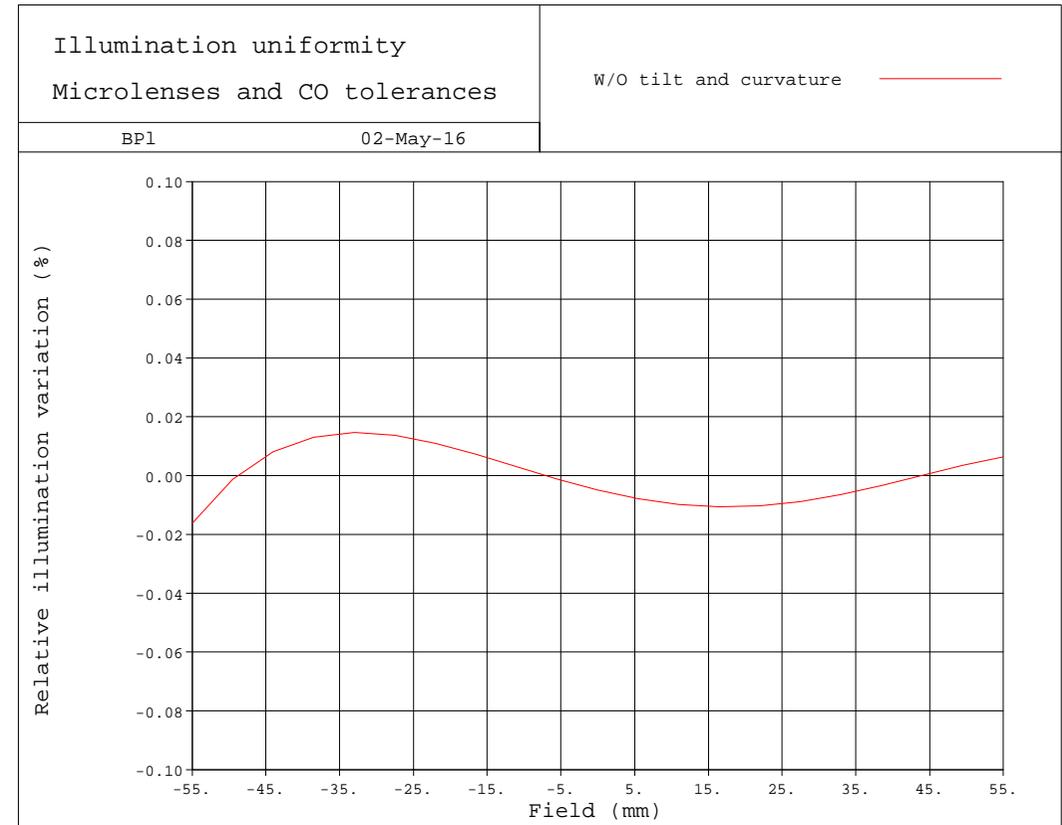


Uniformité d'illumination dans le champ

→ Temps de calcul pour 1 cas simulé = 2 sec => Gain d'un facteur 50000!



Uniformité d'illumination globale

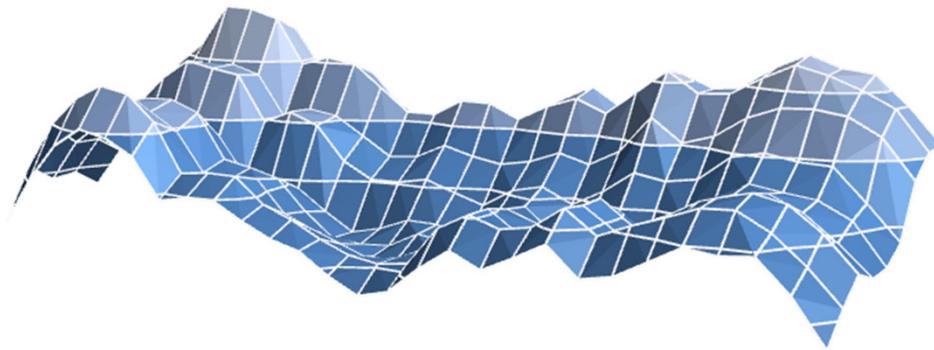


Sans tilt ni courbure d'illumination

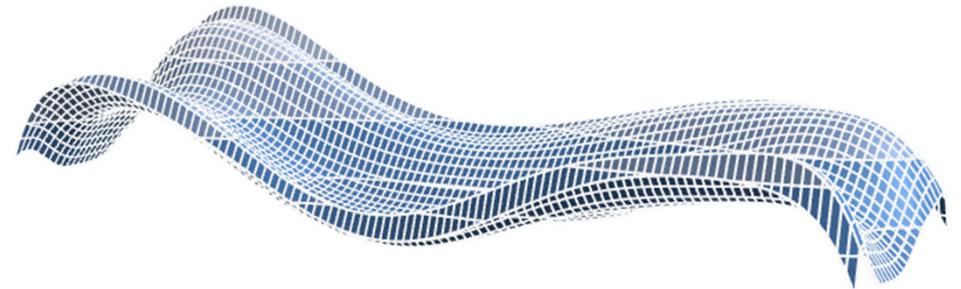
Uniformité d'illumination dans le champ

→ Résultats de mesure sur banc de test et validation :

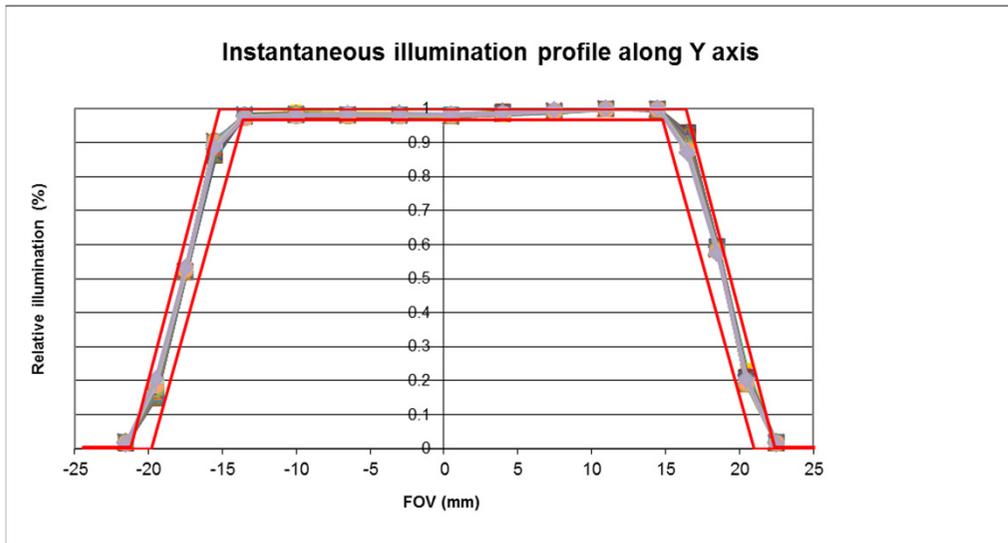
Scan haute résolution



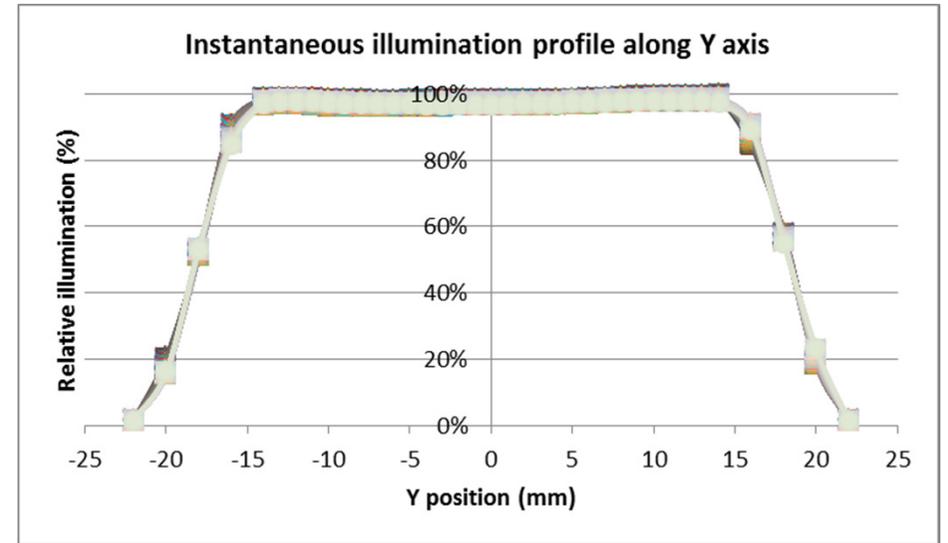
Scan interpolé



Instantaneous illumination profile along Y axis

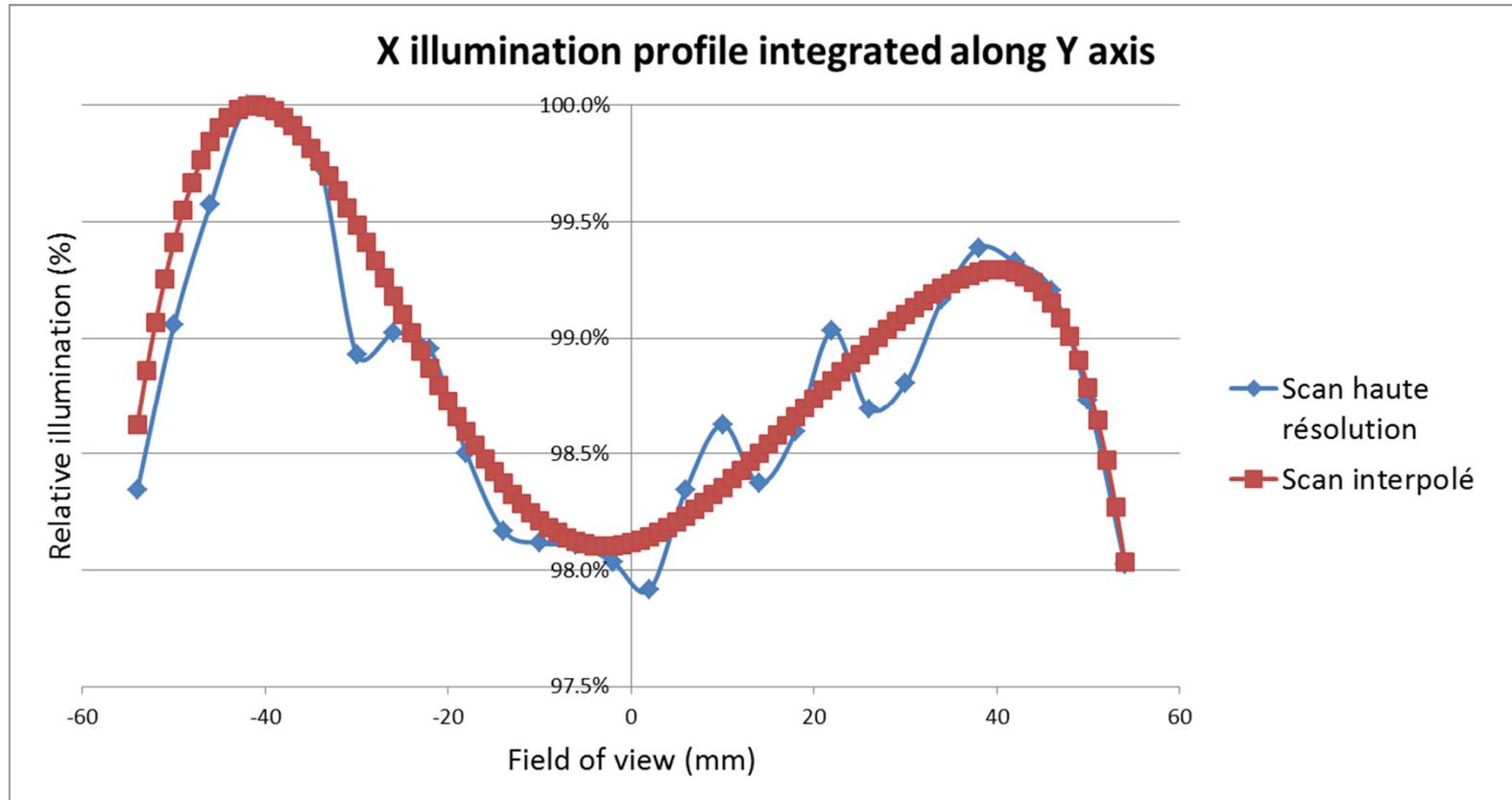


Instantaneous illumination profile along Y axis



Uniformité d'illumination dans le champ

→ Profil d'illumination intégré:



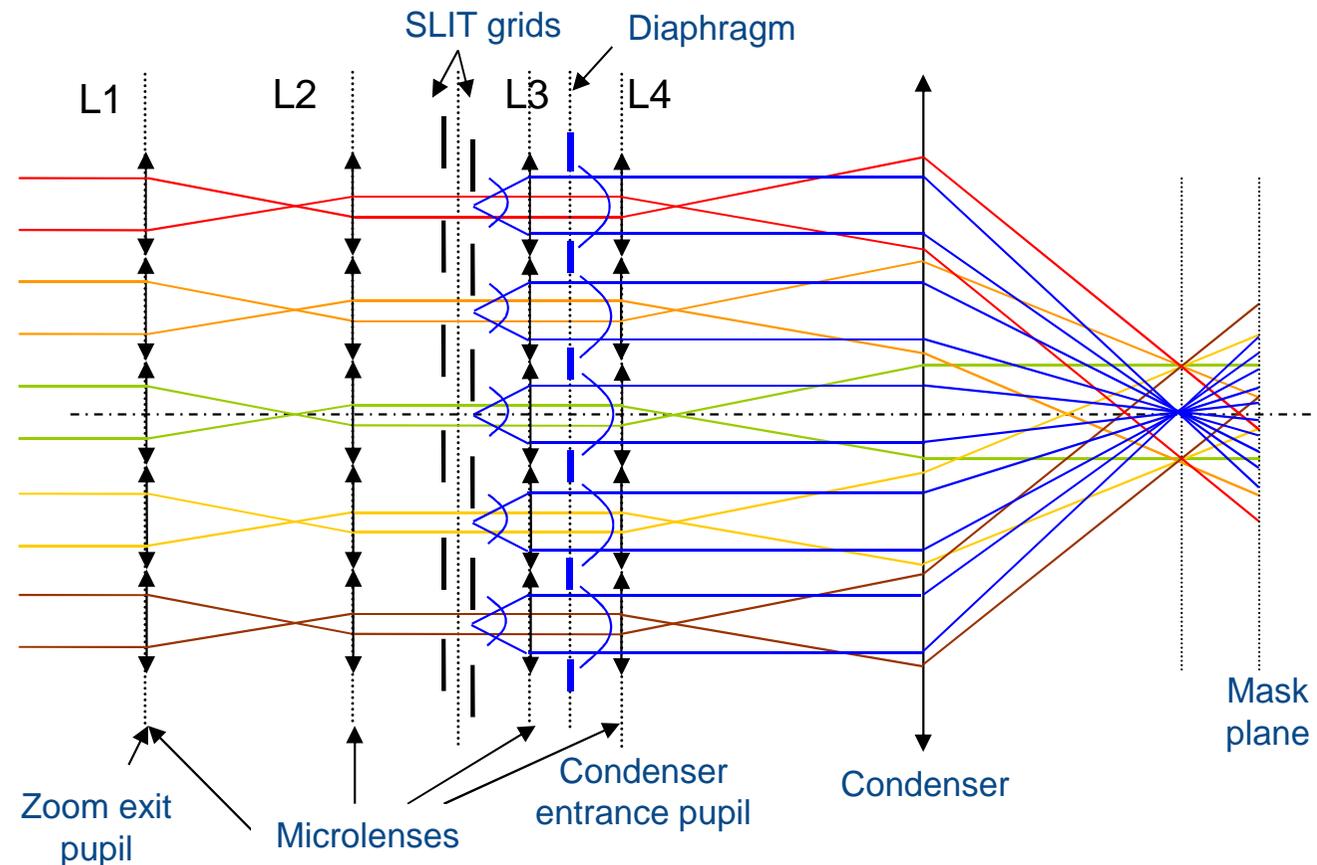
→ Bonne corrélation entre le scan haute résolution et l'interpolation

Qualité image des grilles dans le plan du masque

→ Imagerie des grilles au niveau du masque:

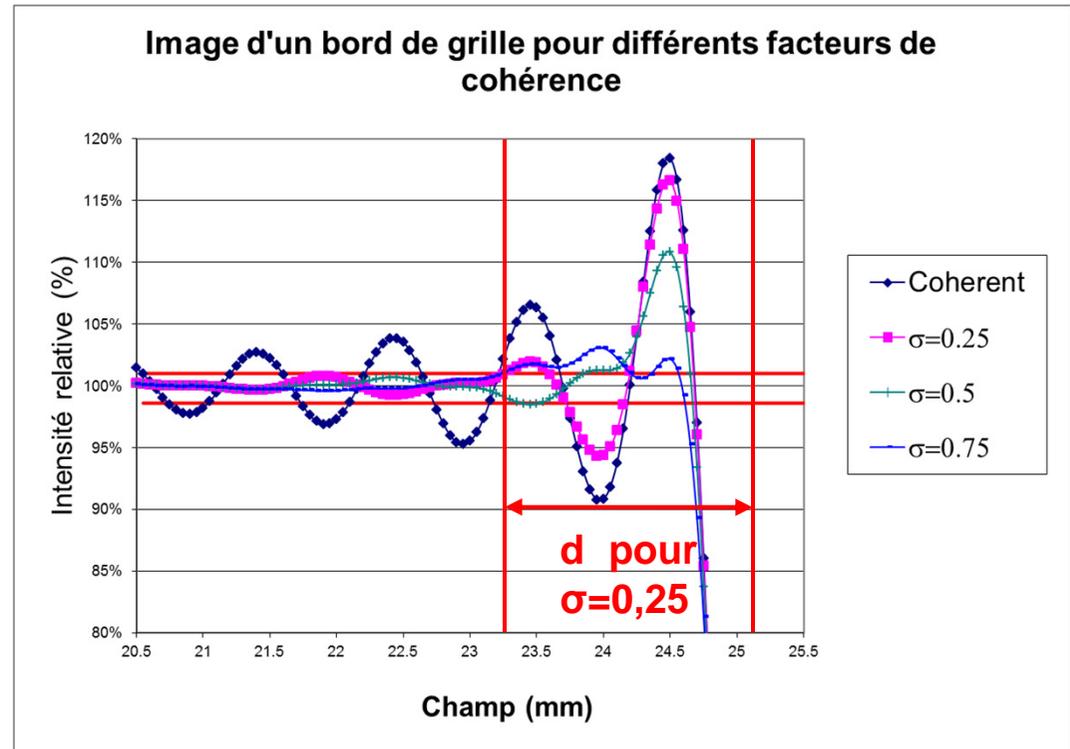
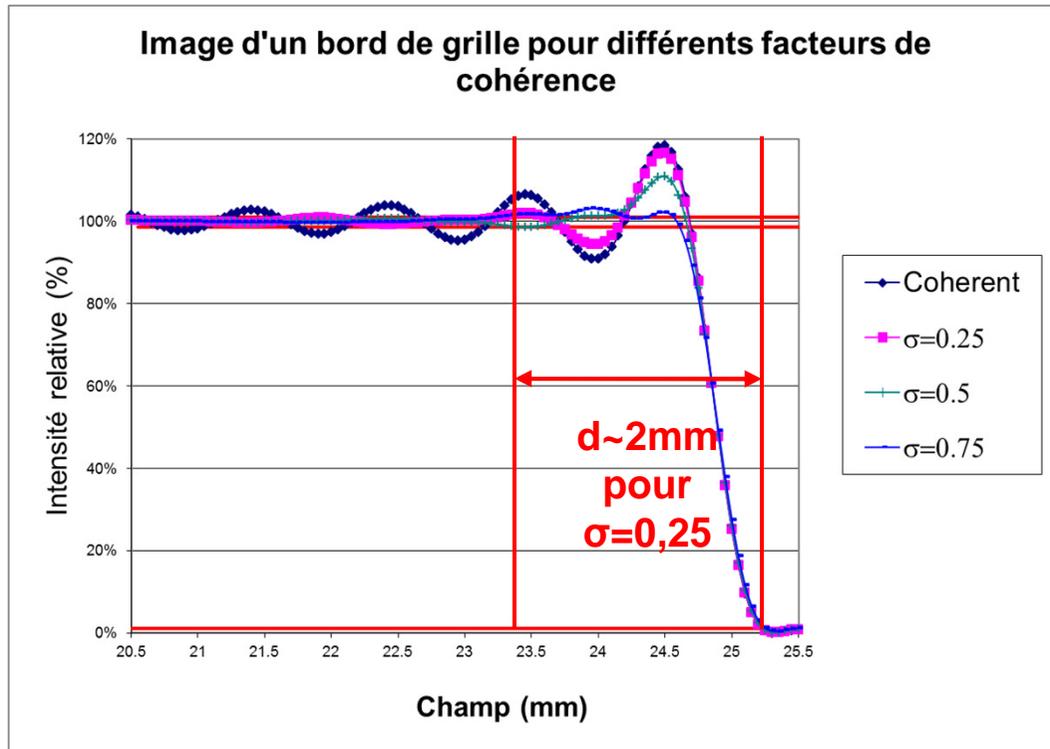
- Montage de double diffraction en illumination partiellement cohérente
- Le diaphragme pupillaire limite l'ouverture du système {L3, L4, Condenseur} et évite la diaphonie entre microlentilles
- On définit le facteur de cohérence par :

$$\sigma = \frac{NA_{L_1 L_2}}{NA_{L_3 L_4}}$$



Qualité image des grilles dans le plan du masque

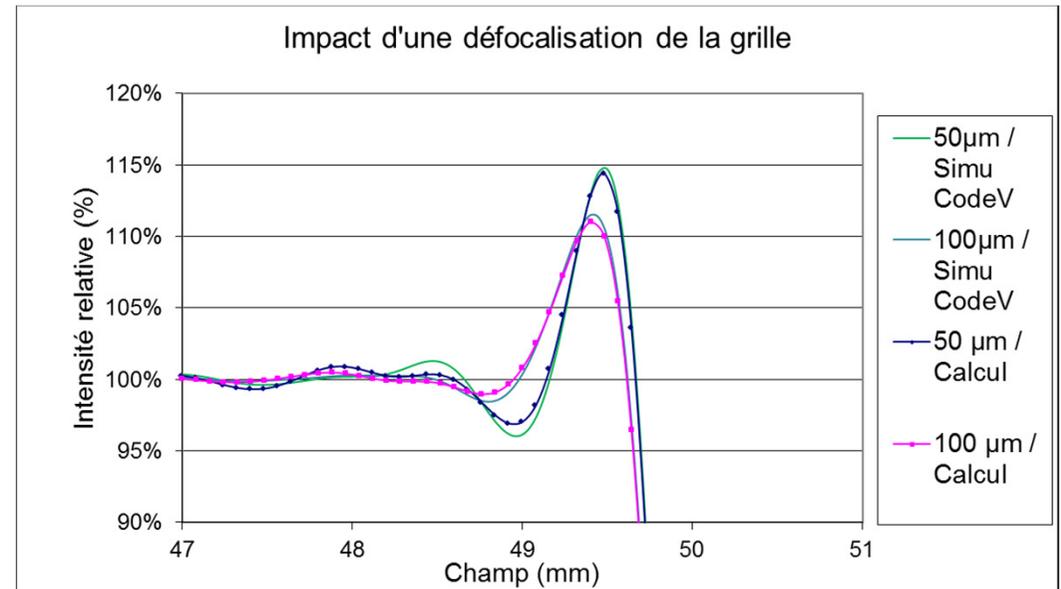
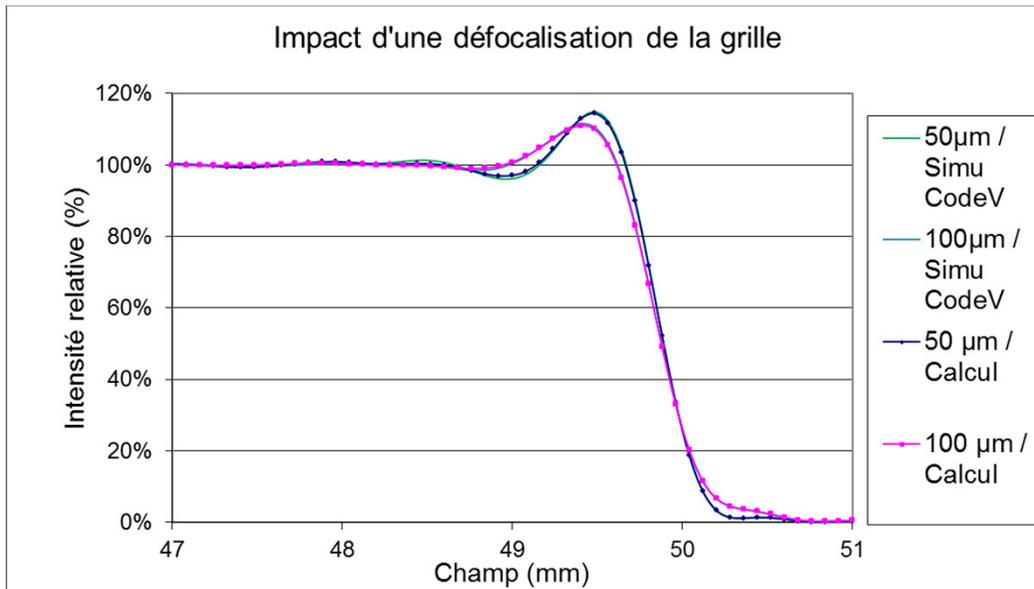
→ Impact du facteur de cohérence sur l'image d'un bord de grille pour un canal:



→ Cette étude a permis de dimensionner le diaphragme d'ouverture

Qualité image des grilles dans le plan du masque

→ Impact de la défocalisation d'une grille par rapport au plan focal objet du système {L3, L4, Condenseur}

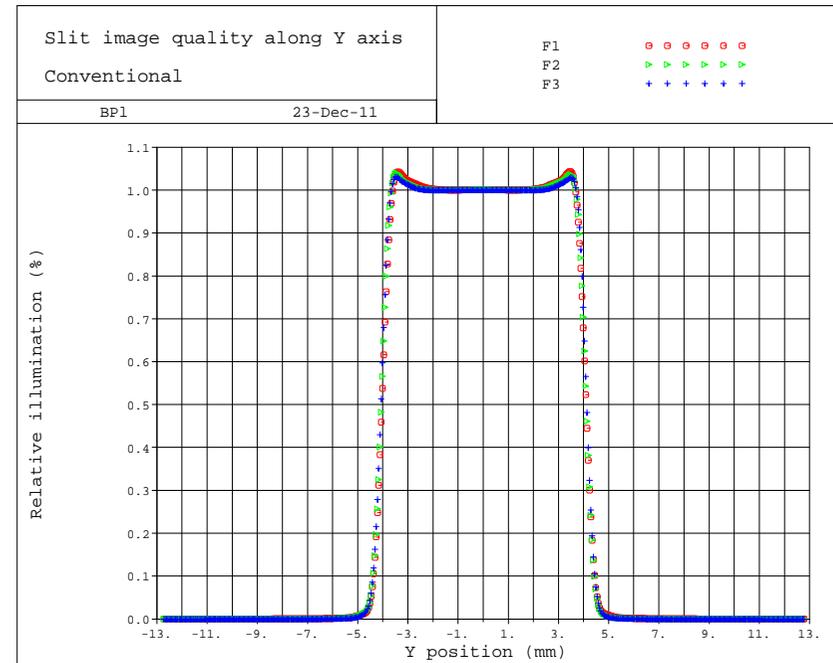
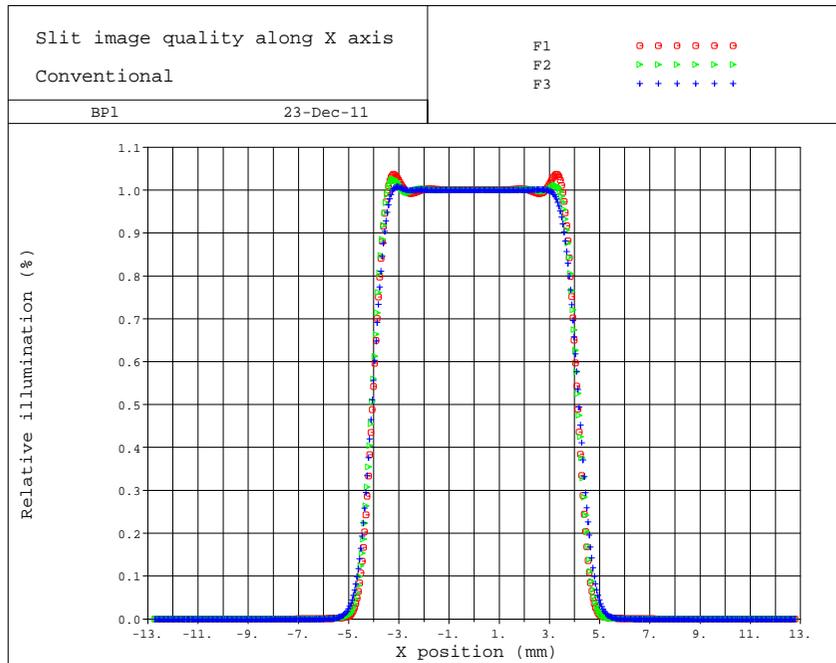
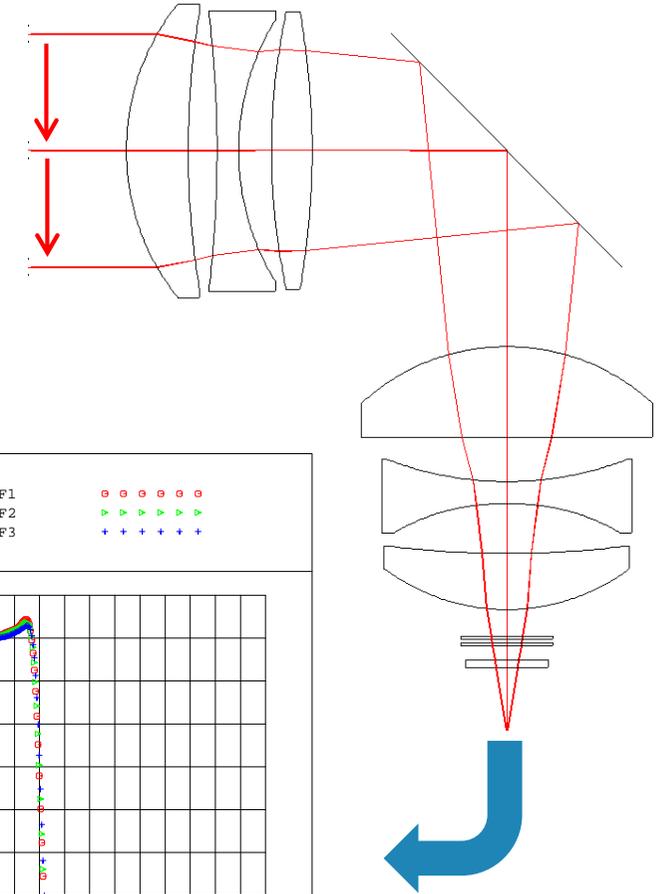


- Cette étude a permis de définir la tolérance de positionnement des grilles par rapport aux microlentilles ainsi que l'écartement maximal admissible entre elles
- Bonne corrélation entre la simulation avec CodeV effectuée avec la fonction PAR et et l'étude analytique

Qualité image des grilles dans le plan du masque

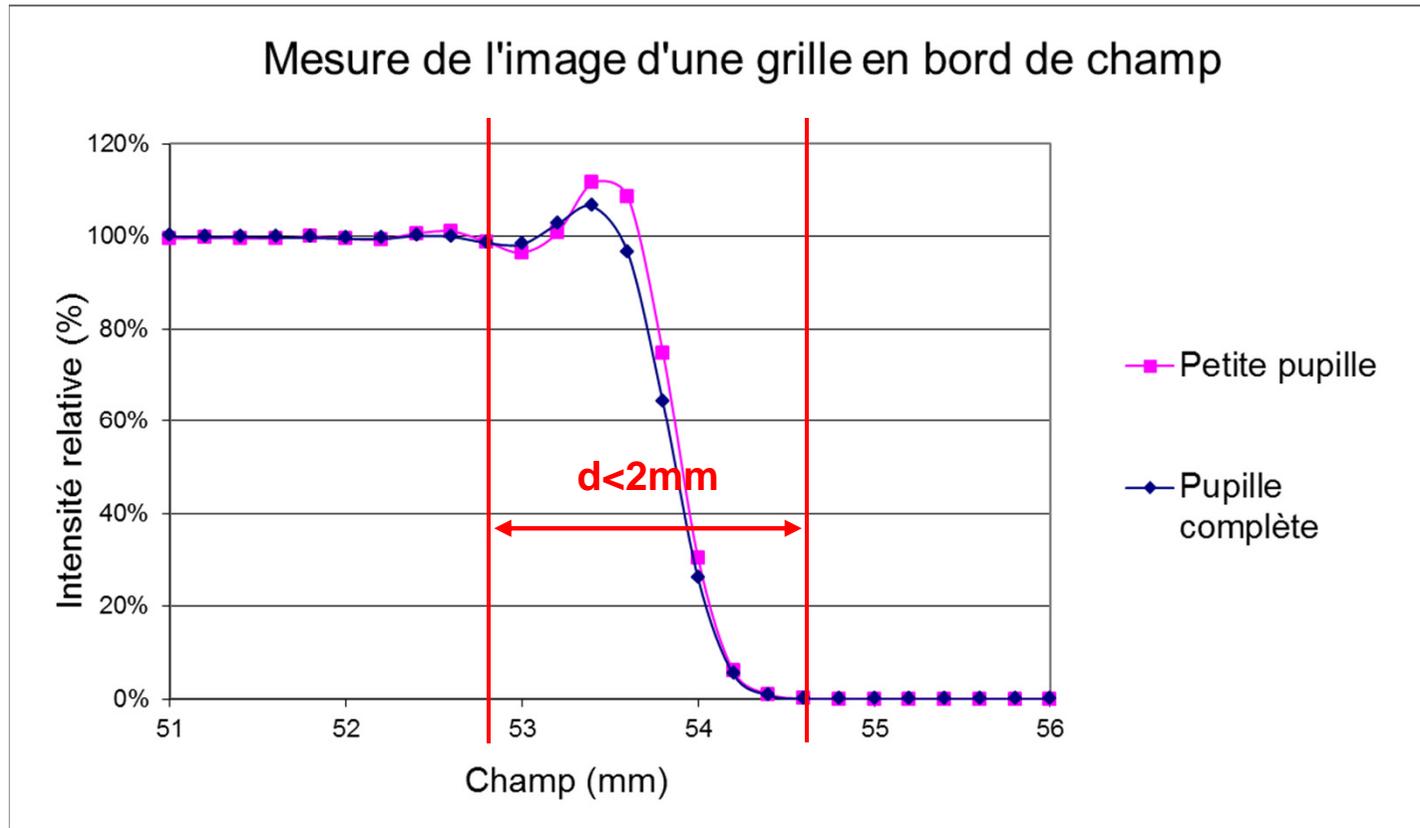
→ Imagerie des grilles au niveau du masque pour l'ensemble des microlentilles:

- Le microcanal est déplacé dans la pupille d'entrée du condenseur
- Hypothèse : l'image d'une grille est la somme des intensités dans le plan focal pour chaque microcanal



Qualité image des grilles dans le plan du masque

→ Résultats de mesure sur banc de test:



- Très bonne corrélation entre les résultats de mesure et les simulations

CONCLUSION

- **Tout en conservant les performances clés d'un illuminateur traditionnel, le nouveau concept de Slit pupillaire de Reosc a apporté de nombreuses améliorations:**
 - Diminution de la masse du système de 50%
 - Transmission du système multipliée par 2,5
 - Réduction des vibrations dues au scan
- **Plusieurs années ont été nécessaires pour valider ce nouveau design depuis les études et les simulations jusqu'à la réalisation des optiques, leurs montages et l'alignement de l'ensemble.**
- **Nous avons validé la bonne cohérence entre les modèles théoriques spécifiquement développés pendant la phase de conception et les résultats expérimentaux.**
- **Aujourd'hui un premier modèle est intégré dans un scanner de lithographie et permet d'imprimer des wafers à la résolution souhaitée.**