

# Apodisation par Interférométrie

Utilisation d'un interféromètre de Mach-Zehnder  
pour la détection *directe* d'exoplanètes.

Carlotti A. , Aime C. , Ricort G.  
UNSA - LUAN

# Plan

- Mise en Contexte.
- Détection directe : les difficultés.
- Notre approche interférométrique.
- Résultats actuels.
- Perspectives.

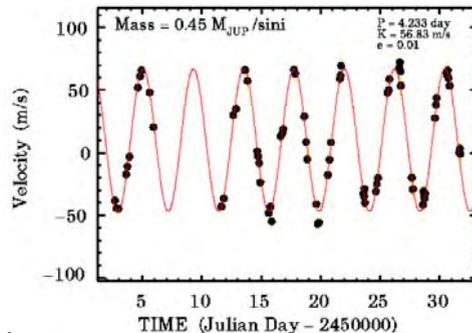
# Contexte

A l'heure actuelle :

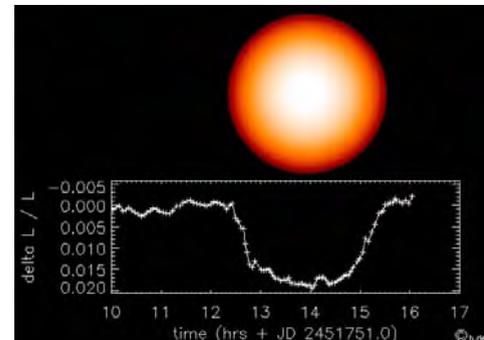
<i>Méthode de détection :</i>	<i>Nombre de planètes :</i>
Vitesse radiale	203 (175 systèmes)
Transit	15
$\mu$ -Lentille Gravitationnelle	4
Imagerie directe	4

# Les détections indirectes

- **Vitesse radiale** : masse (valeur minimum fonction de l'inclinaison).
- **Transit** : orbite, rayon, inclinaison et température de la planète.
- **$\mu$ -Lentille** : masse et orbite de la planète.



Butler & Marcy



# Détection directe

- Deux problèmes majeurs
  - Contraste élevé :  $10^6 - 10^{10}$  (IR ou Visible)
  - Diffraction : l'étoile s'étale sur la planète.

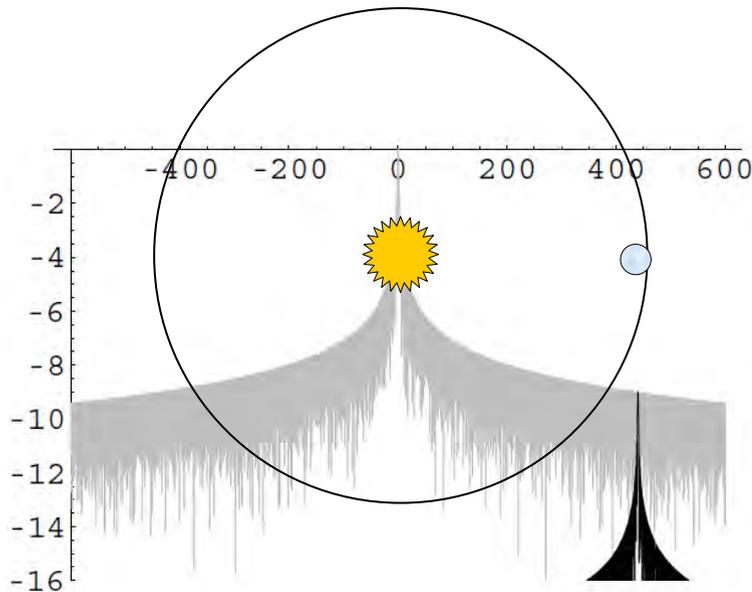


Figure de diffraction d'une étoile et de sa planète.

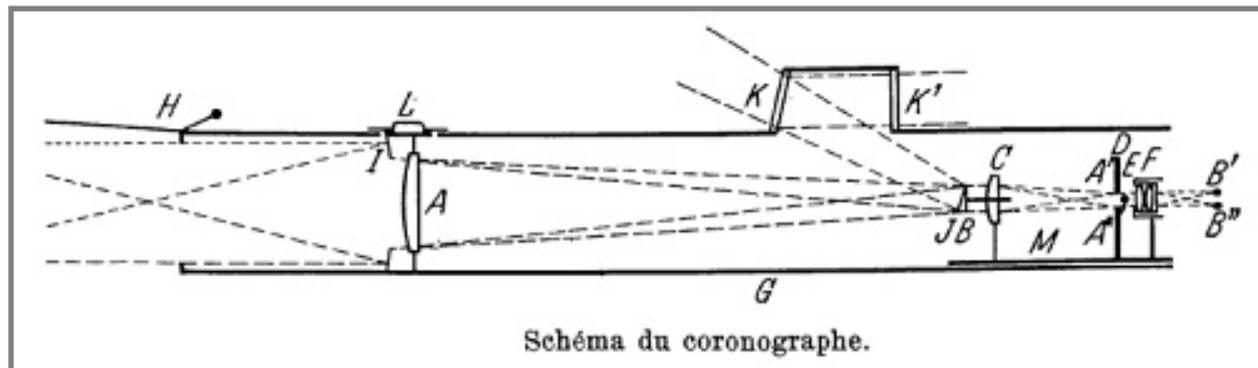
Les abscisses sont graduées en unité de  $\lambda/D$  (sép. angulaire).

L'angle qui les sépare est le plus petit assurant sa détection.

$$(\text{Flux}_{\text{planet}} = \text{Flux}_{\text{star}})$$

# Détection Directe : Méthodes

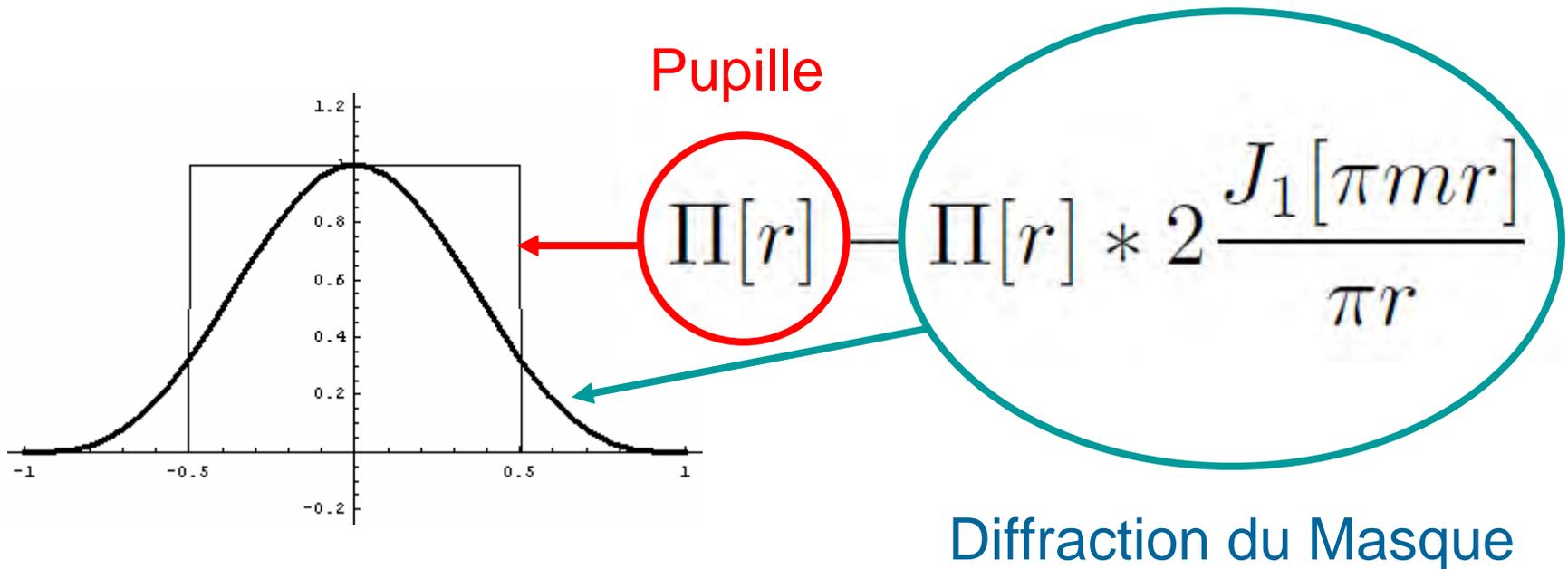
- Coronographie :
  - Inventée par Bernard Lyot en 1930 pour l'observation de la couronne solaire.
  - Un masque au centre du plan focal pour bloquer la lumière de l'étoile.



B. Lyot, Zeitschrift für Astrophysik, Vol. 5, p.73

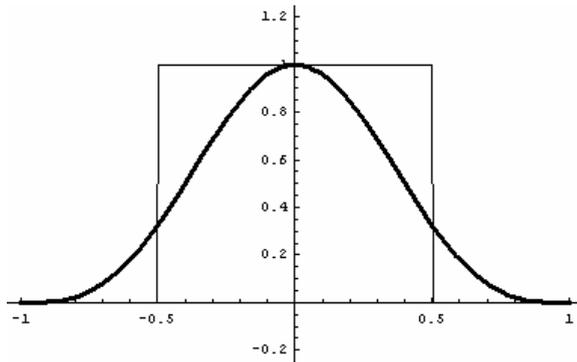
# Limites du Lyot *Stellaire*

- Trop faible réjection :

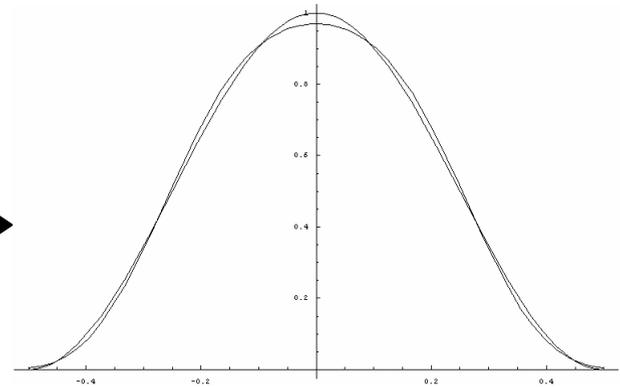


# Apodisation

- Pupille modifiée : on baisse de façon optimale les pieds de diffraction.



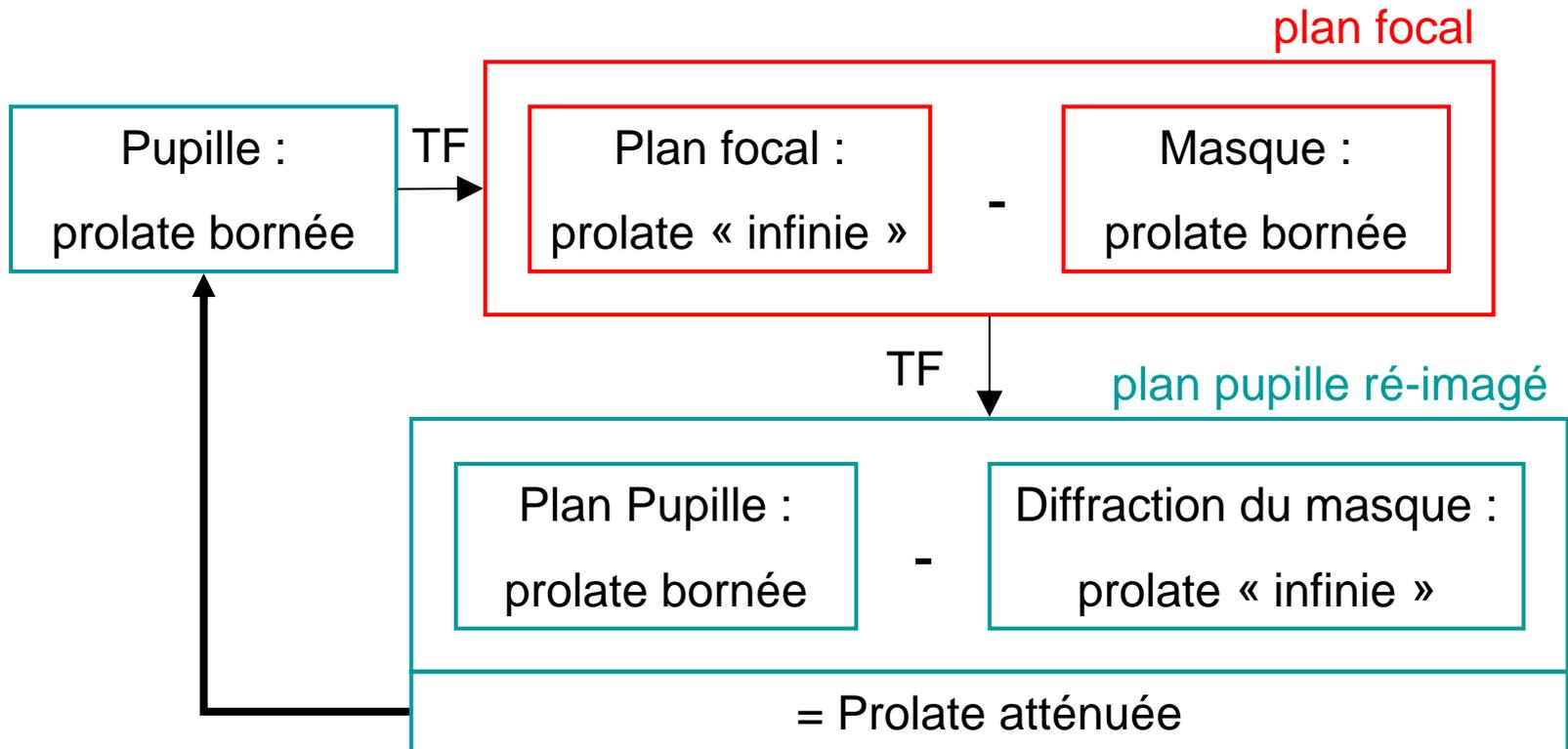
Cas d'un Lyot classique



Cas d'un Lyot apodisé en  $\text{Cos}^2$

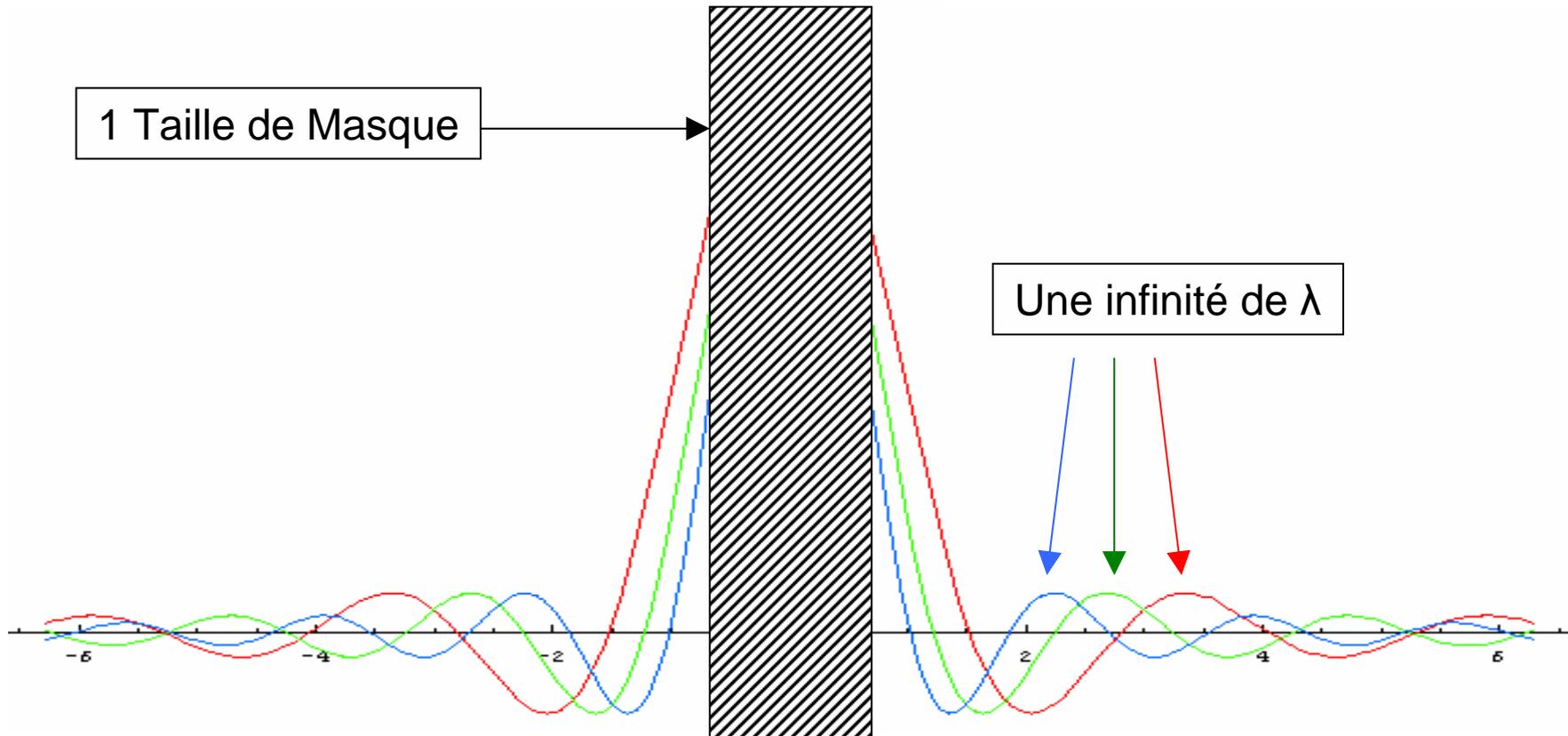
# Prolates Sphéroïdales

- $TF_{\text{bornée}} [\text{prolate}] \equiv \text{prolate} \llcorner \text{infinie} \llcorner$



# Diffraction & Chromatisme

- Unité du plan focal :  $\frac{\lambda F}{D}$  , dépend de  $\lambda$



# On a besoin :

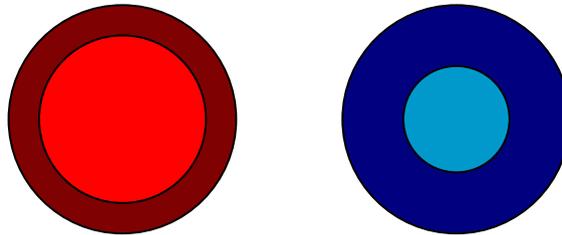
- D'un coronographe prolata apodisé.
- D'un instrument achromatique.

**La diffraction est chromatique !**

On va créer une apodisation  
 $\lambda$ -dépendante, compensant  
le chromatisme de la diffraction !

# Idée !

- On doit partir d'une apodisation prolate dont la largeur varie avec  $\lambda$  :



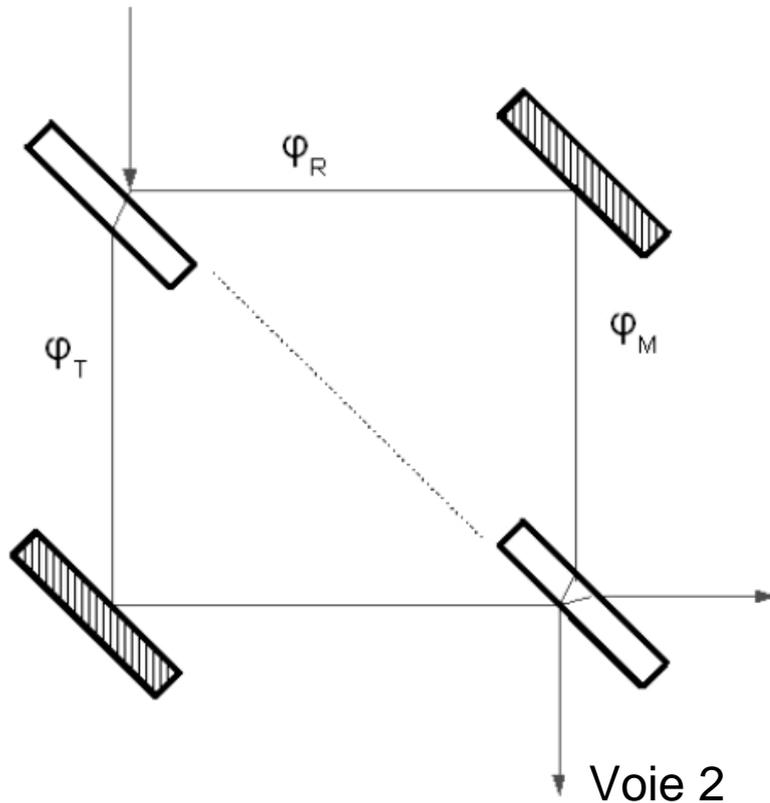
- Au plan focal on compense au mieux l'effet chromatique de la diffraction.

# Mais comment faire ?!

***Modifier la transmission de la pupille par interférence !***

- Via un interféromètre de Mach-Zehnder.
- Phénomène chromatique en  $1/\lambda$  .

# Interféromètre de Mach-Zehnder



Diviseur de faisceau.

Deux voies déphasées de  $\pi$  :

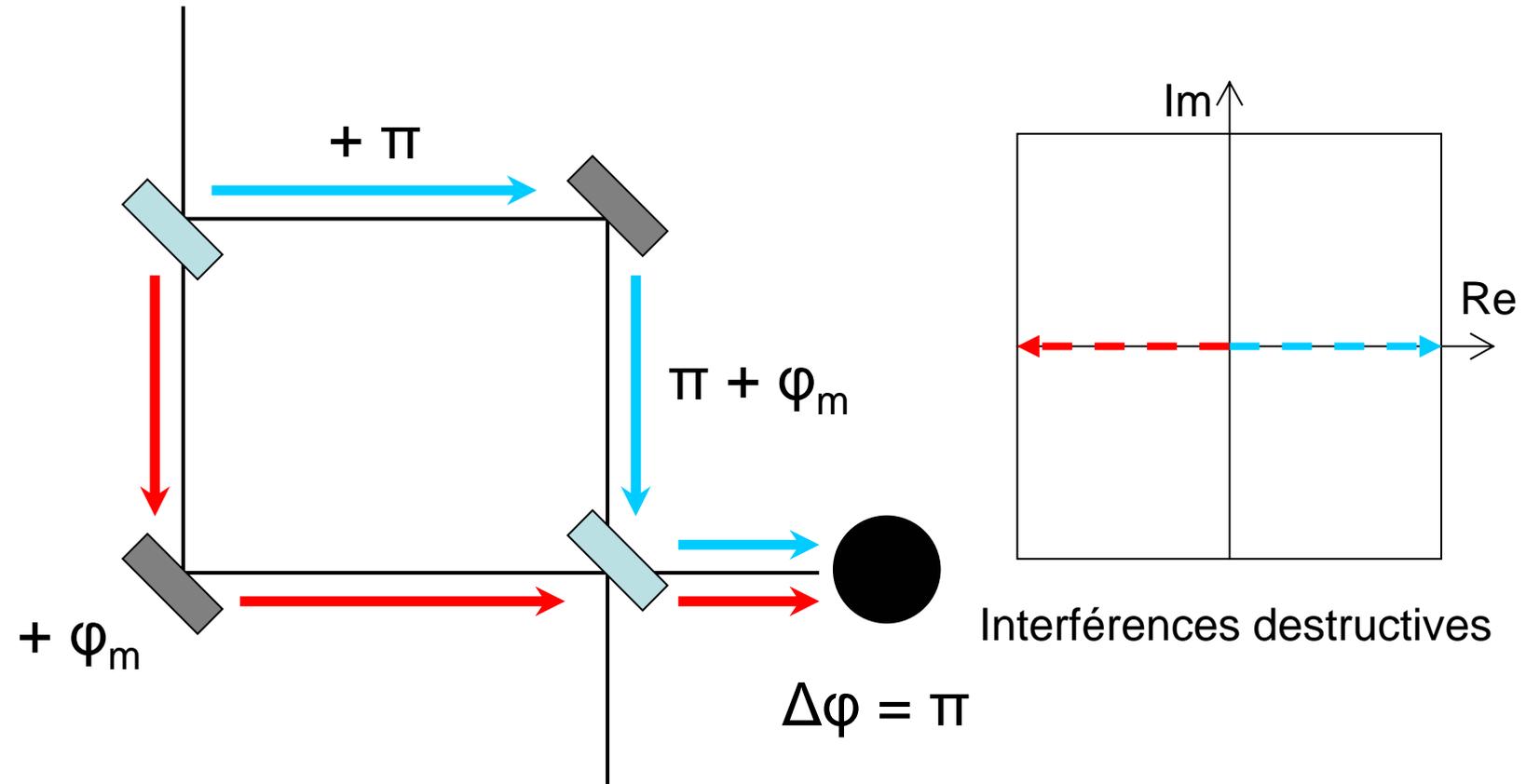
- Une voie additive.
- Une voie soustractive.

Voie 1

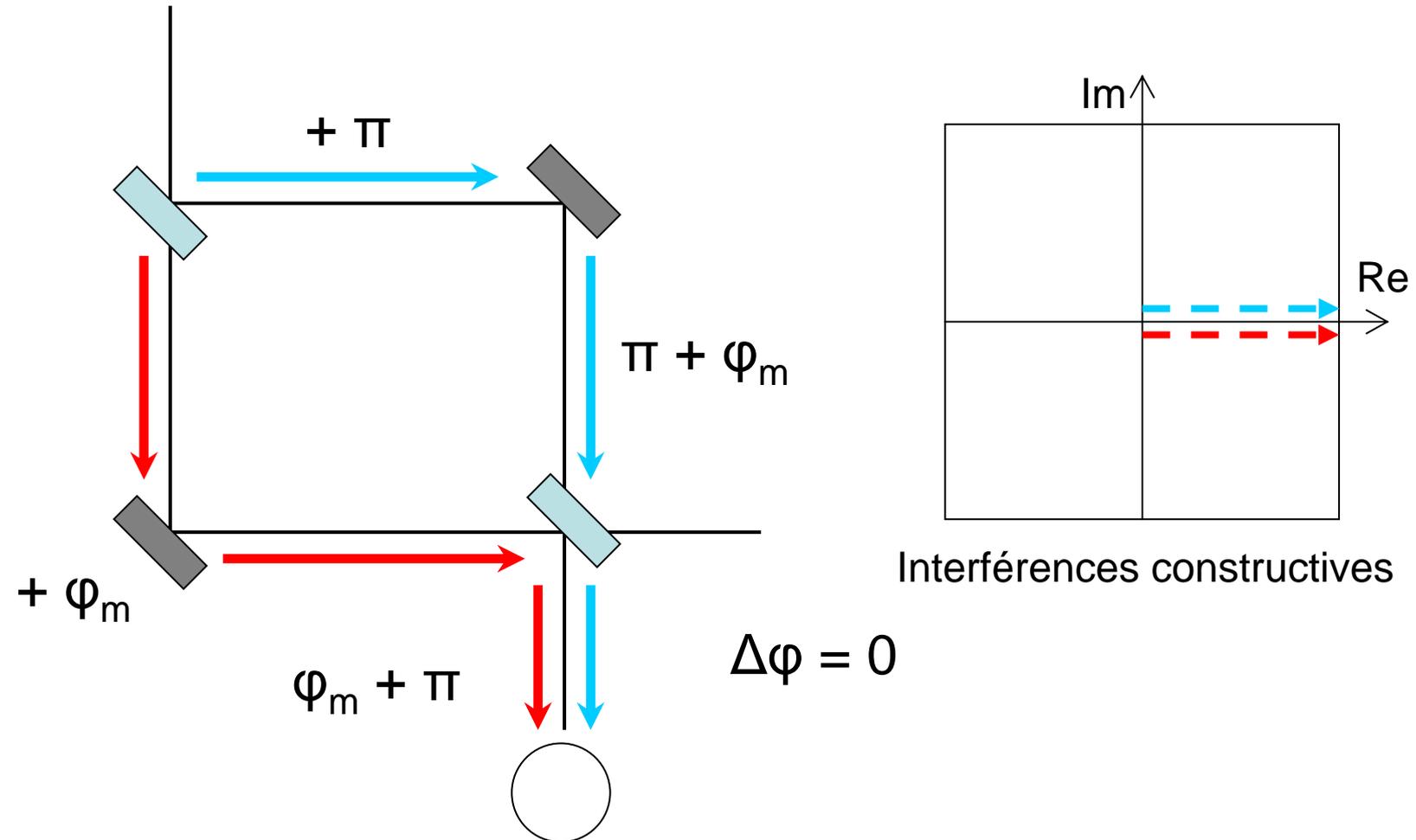
Deux voies !

- Une voie pour l'imagerie.
- Une voie pour le monitoring.

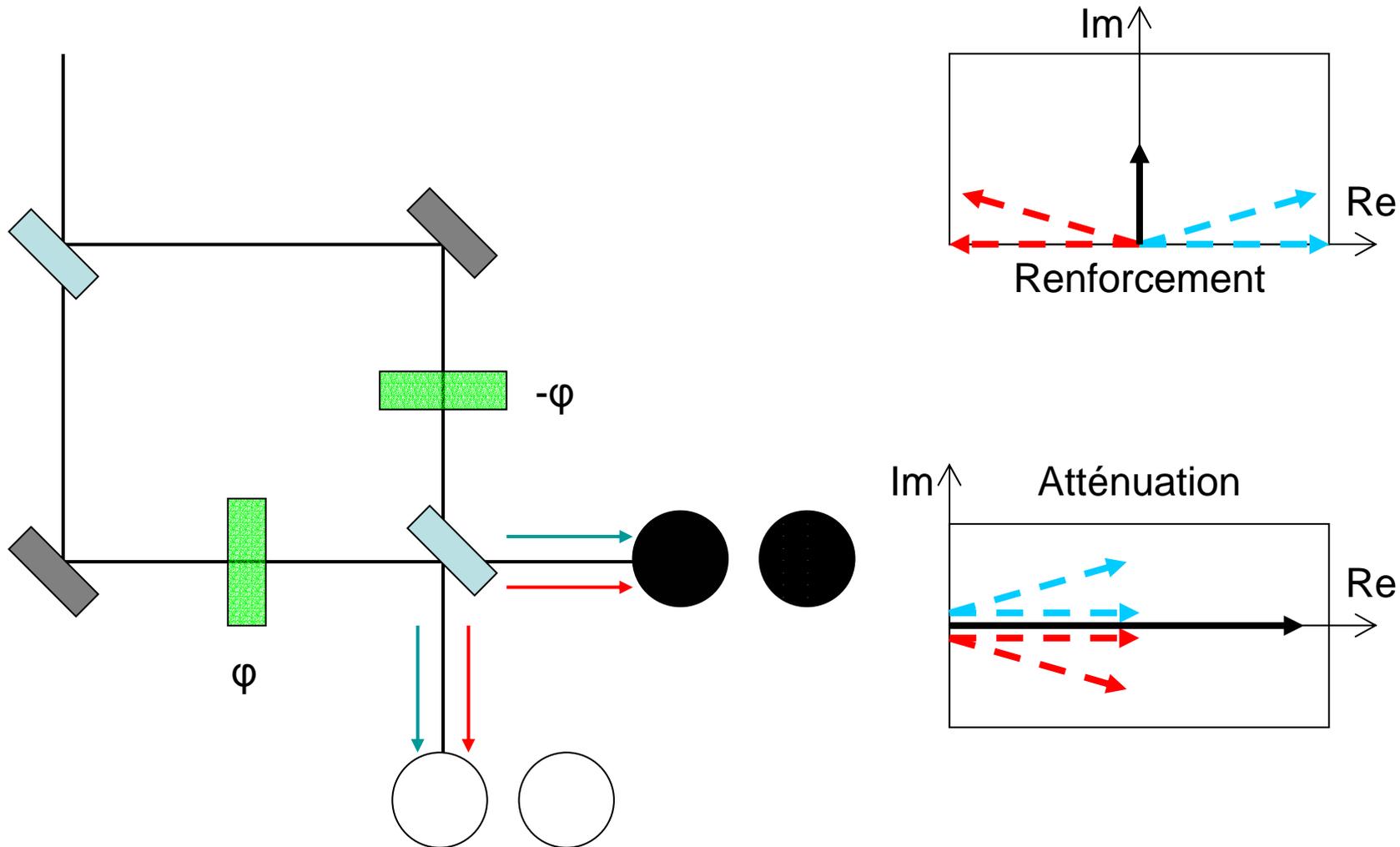
# Voie 1 : Soustractive



# Voie 2 : Additive



# Sculpter la pupille



# Sculpter la pupille

- Voie - :  $\frac{1}{2}e^{i\phi} + \frac{1}{2}e^{i\pi}e^{-i\phi} = i \text{Sin}(\phi)$

- Voie + :  $\frac{1}{2}e^{i\phi} + \frac{1}{2}e^{-i\phi} = \text{Cos}(\phi)$

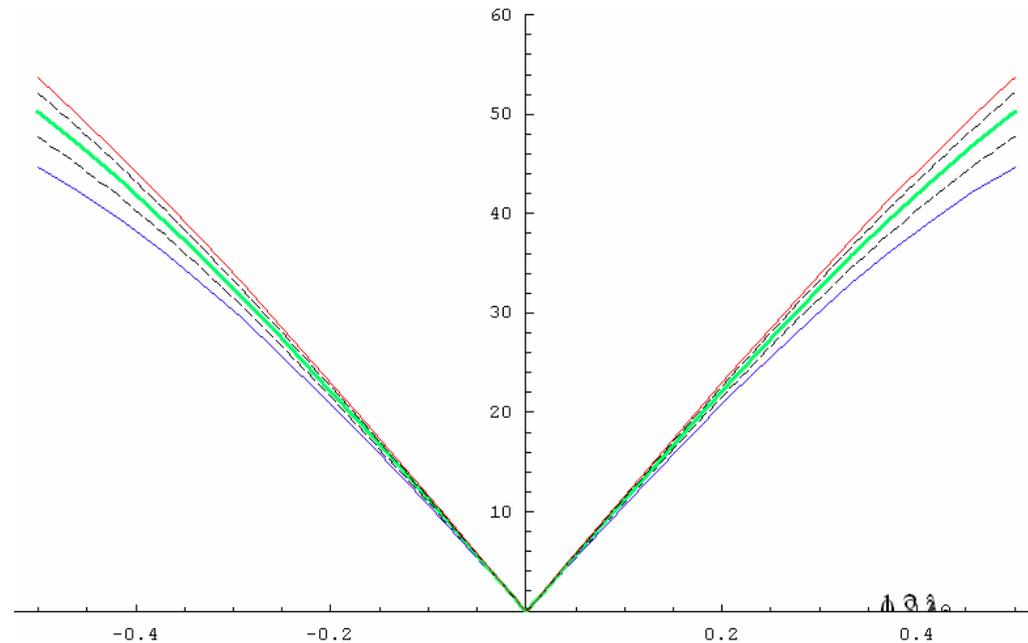
- On va faire dépendre  $\phi$  de la position sur le faisceau :

$$\phi \rightarrow \phi(x)$$

$$f(x) = \text{Cos}(\phi(x)) \rightarrow \phi(x) = \text{ArcCos}(f(x))$$

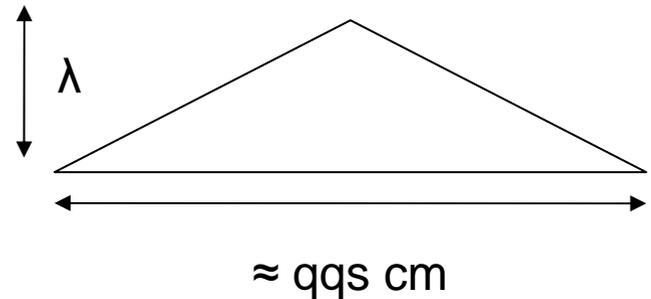
# Phase « prolates »

- Phase désirée : une forme cônique.



Pour l'obtenir :

Un cône d'angle 10 arcsec !

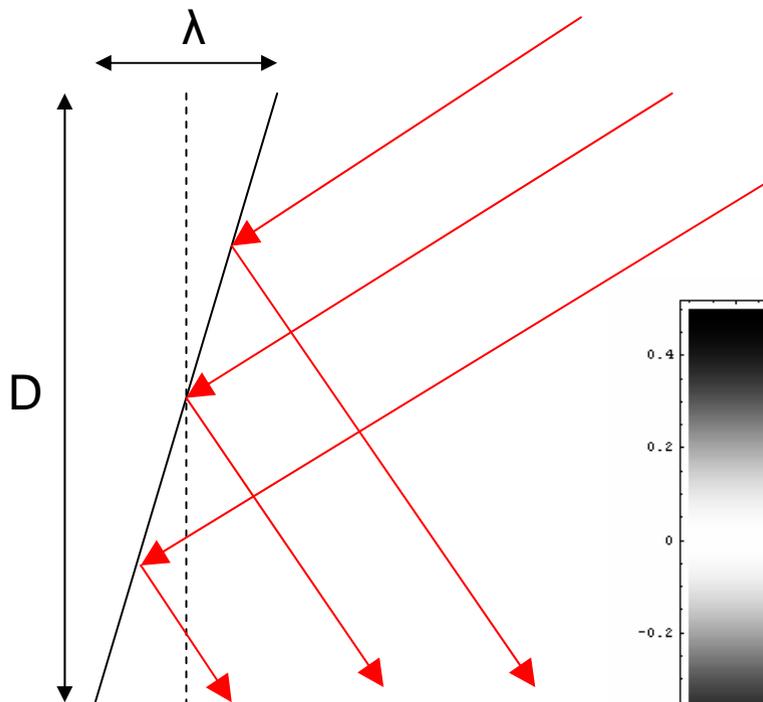


# Apodisations actuelles

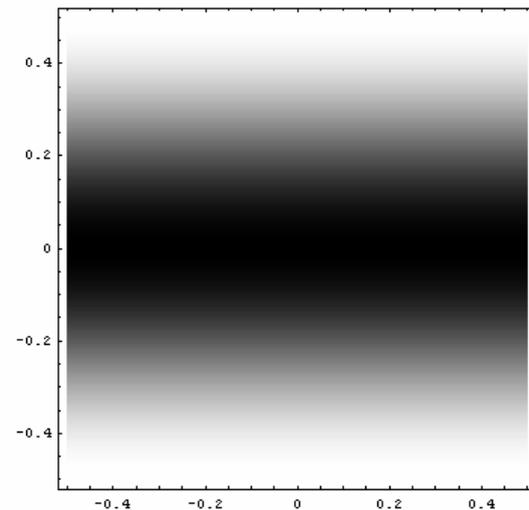
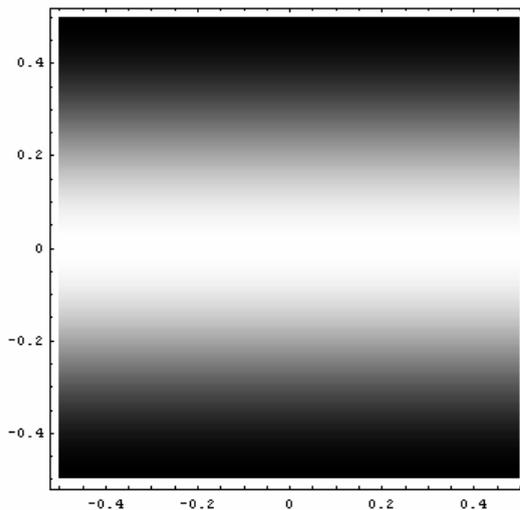
- 1-Axe :
  - Apodisation par franges du coin d'air.
  - Obtenue en tiltant les miroirs latéraux.
- Circulaire :
  - Interférence de deux ondes sphériques.
  - Obtenue par l'ajout de deux lentilles.

# Apodisation 1-axe

- Inclinaison d'un miroir :

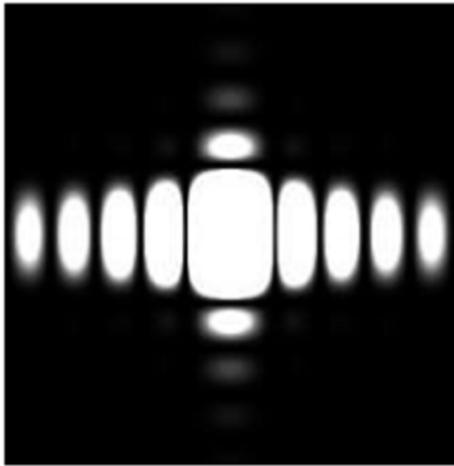


$$\phi \rightarrow \phi(x) = \pi \frac{\alpha x}{\lambda}$$

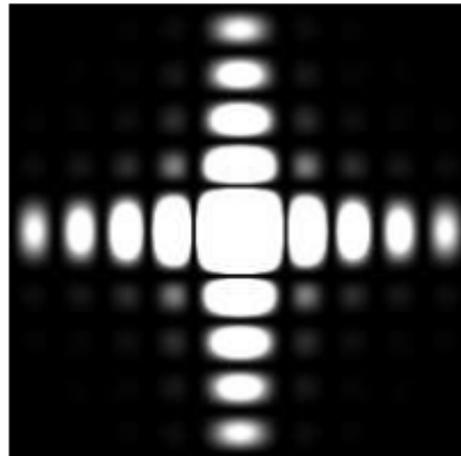


# Figures de Diffraction

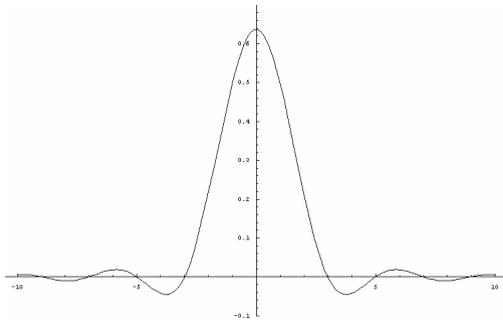
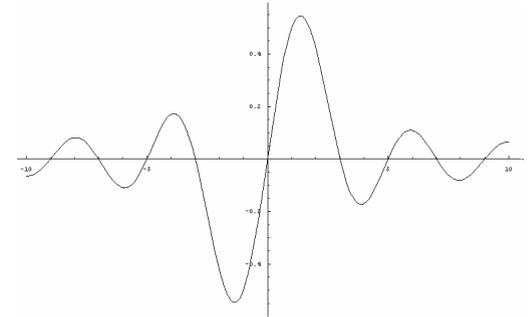
Apodisation 1-Axe



Apodisation



Non Apodisation

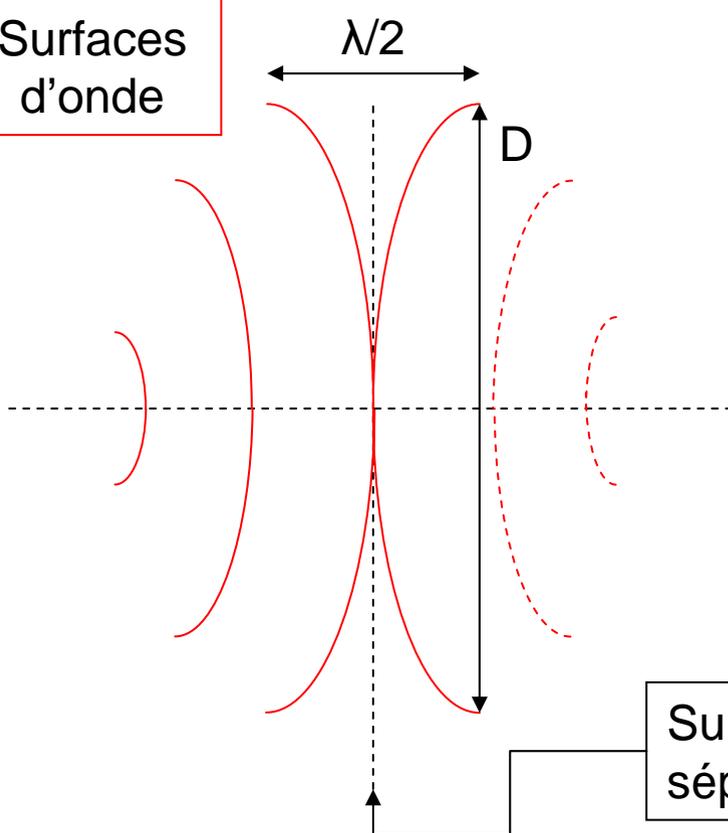


Anti Apodisation

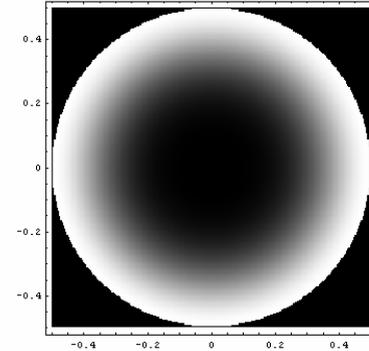
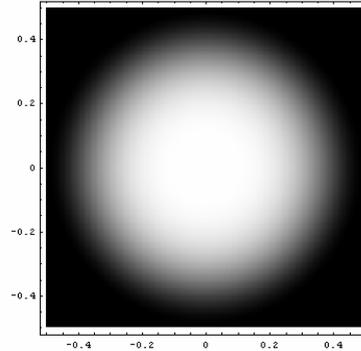
# Apodisation circulaire

- Effets de 2 lentilles {F, -F} :

Surfaces  
d'onde

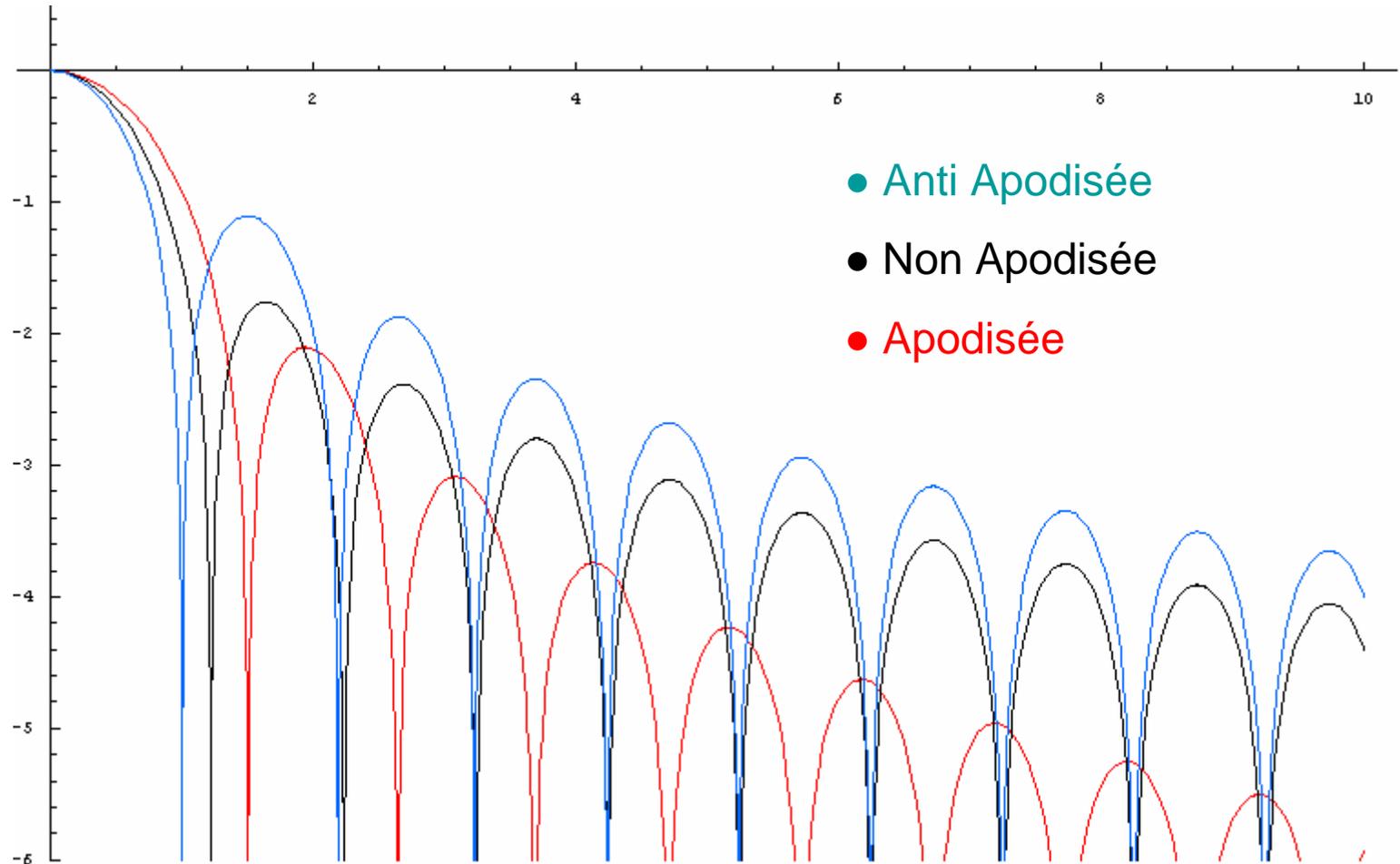


$$\phi \rightarrow \phi(r) = \pi \frac{r^2}{\lambda F}$$



# Figures de diffraction

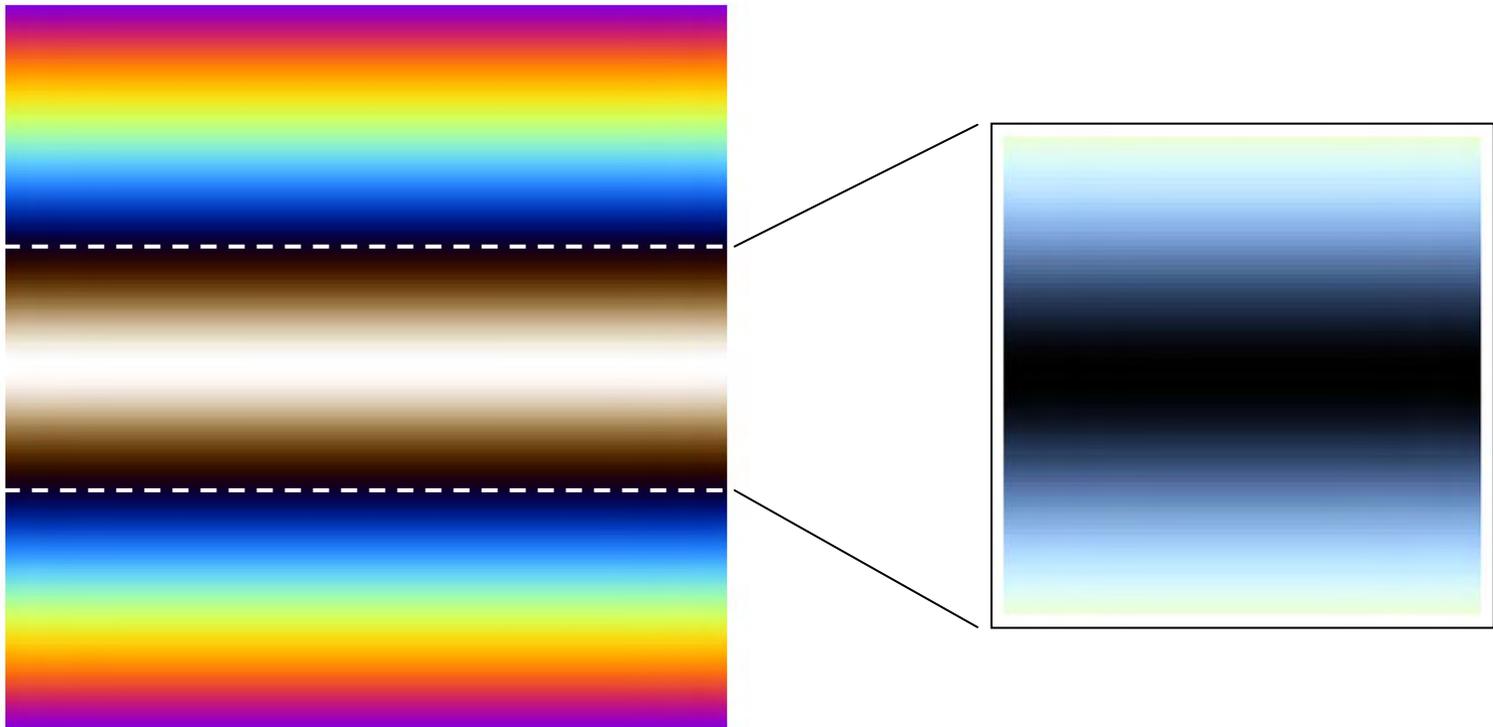
Apodisation circulaire



# Simulations Polychromatiques

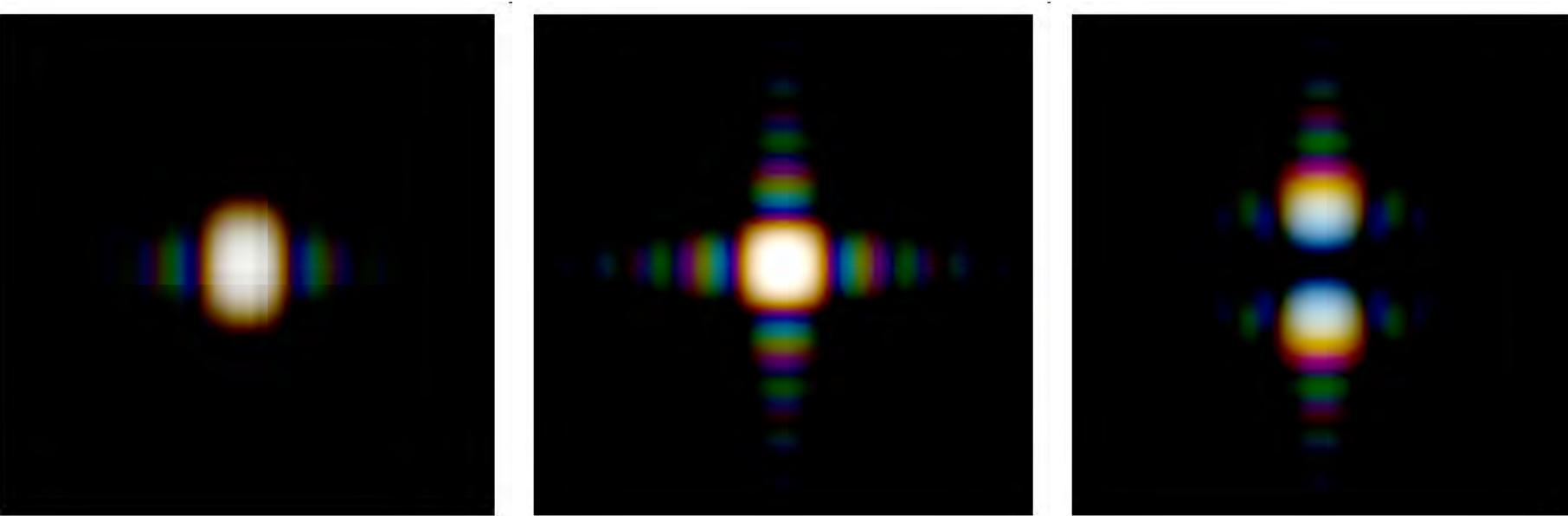
- Sommes des contributions RVB.

Teintes de Newton



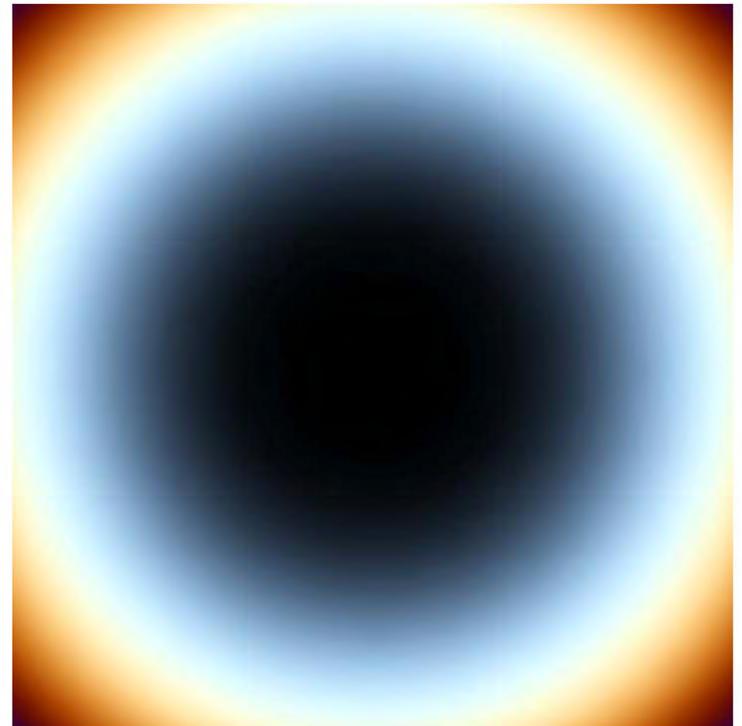
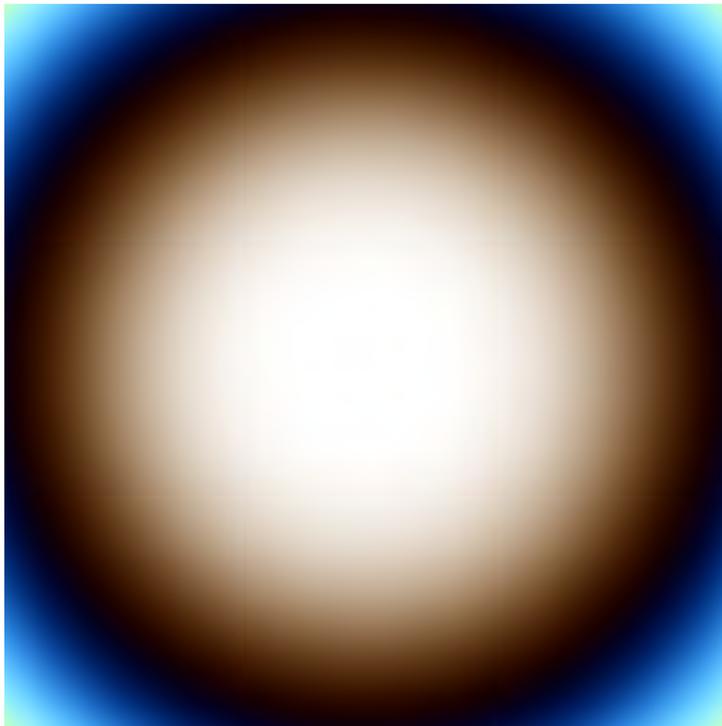
# PSF simulées

Figure de diffraction apodisée non-apodisée et anti-apodisée (échelle log)



# Simulations - 2D

Prévisions des apodisations et anti-apodisations 2D chromatiques.



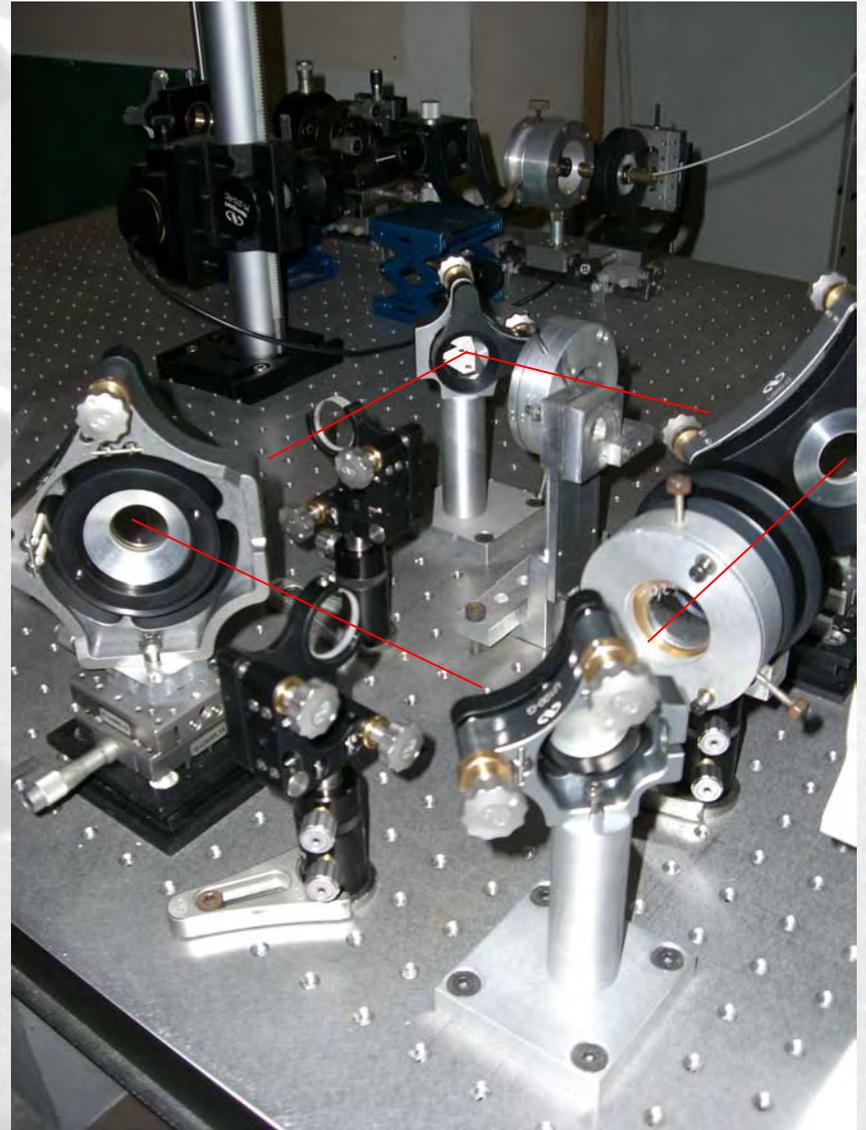
# L'expérience

Etapes :

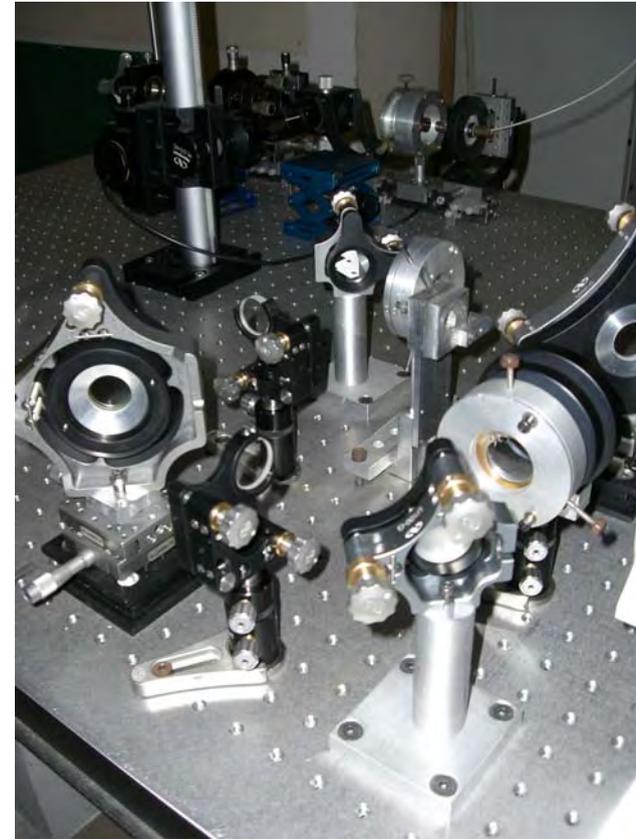
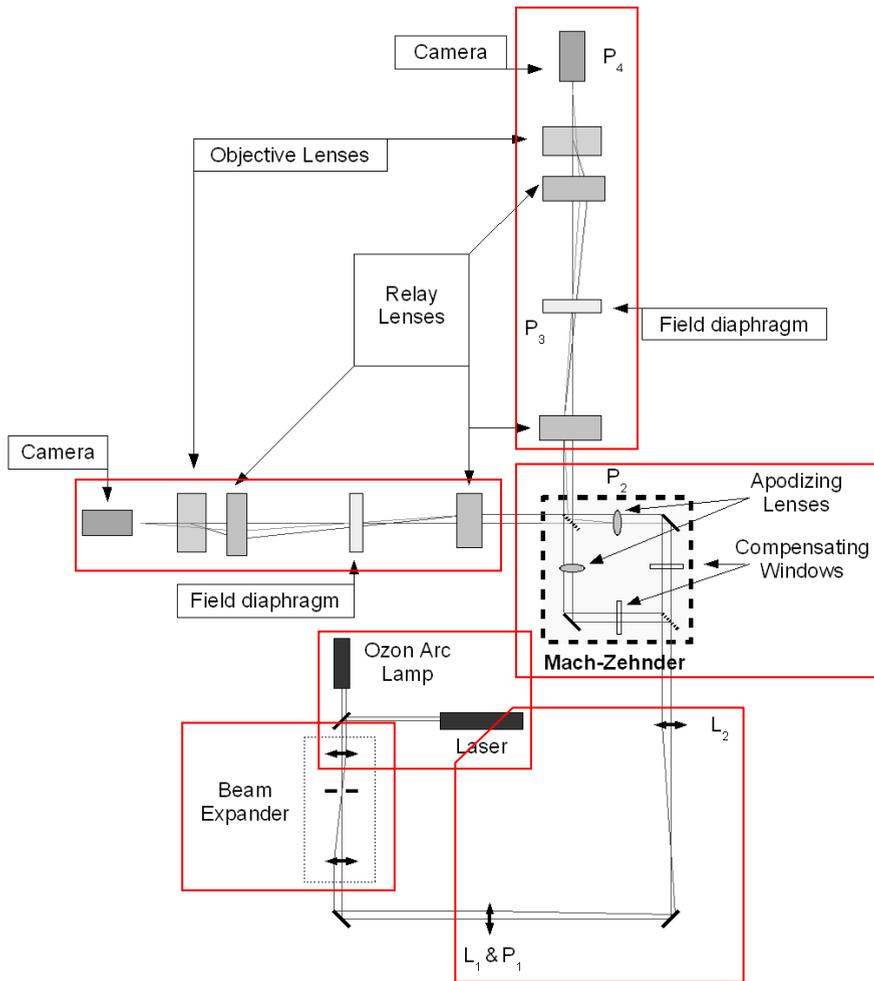
- Construction d'un prototype.
- Premières franges du coin d'air.
- Transfert & création d'un MZ abouti.
- Apodisations 1-axe puis circulaire.
- Réglage en lumière blanche.
- *En cours* : étude spectrale.

# Le Montage

- Table extrêmement stable.
- Montage en « U » : gain de place.
- 2 bras de sortie.

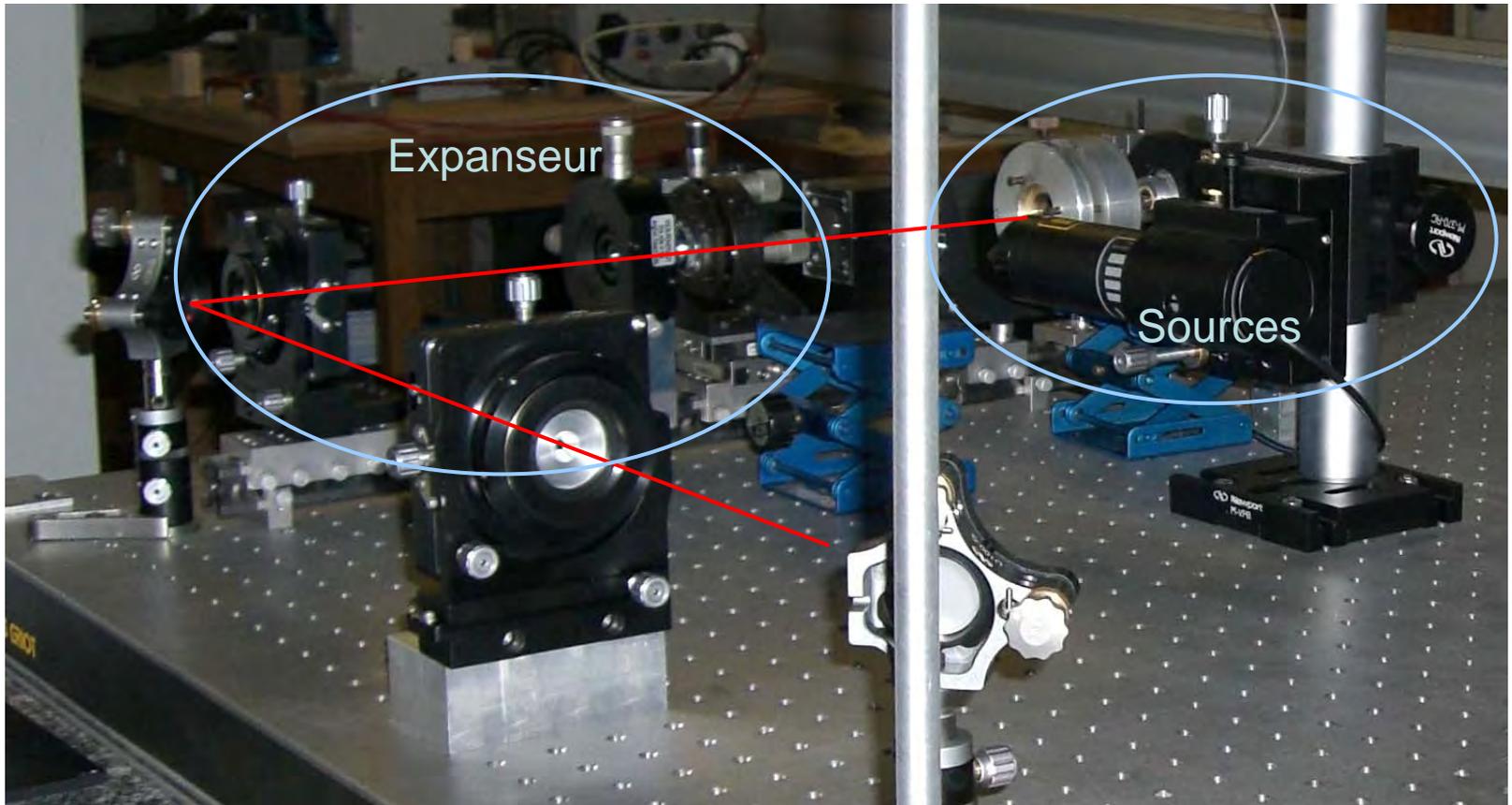


# Le montage

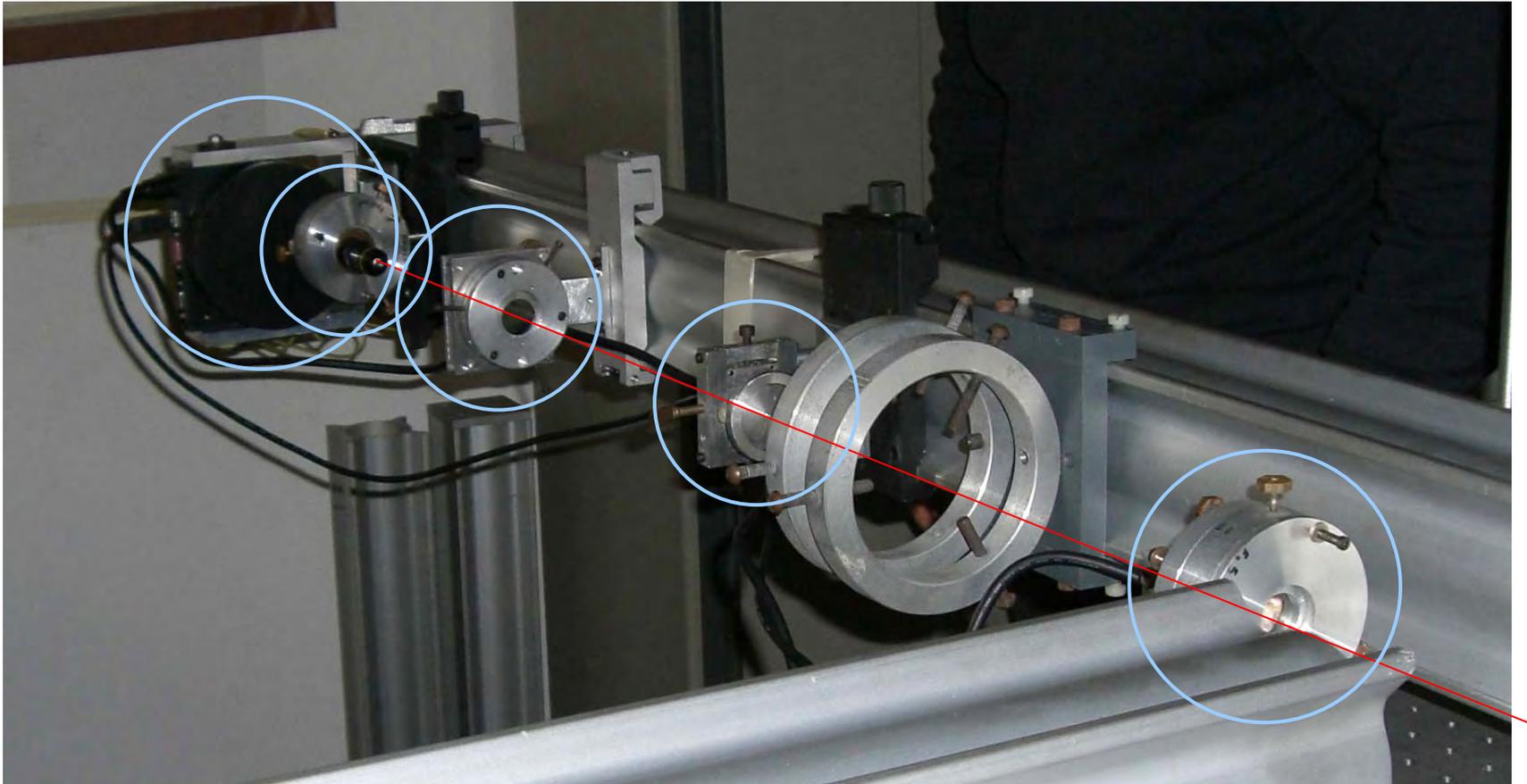


Zoom sur le Mach-Zehnder.

# Le montage



# Le Montage



Caméra  
Objetif de microscope  
Lentille

Diaphragme

Lentille de reprise

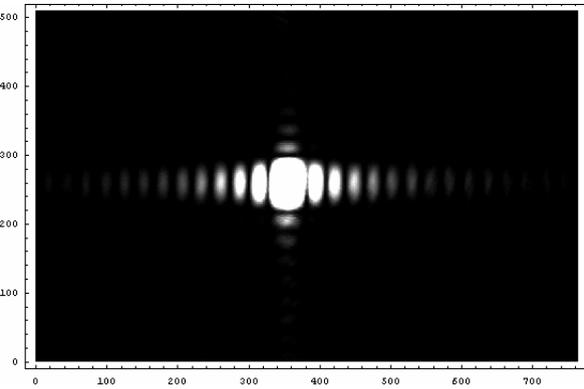
# Cas Monochromatique

- Plus simple car :
  - Très lumineux (Laser He-Ne @ 632.8 nm)
  - Longueur de cohérence  $\gg$  erreurs de réglage

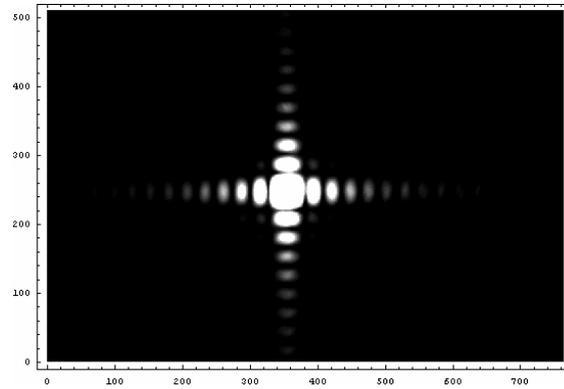


Etalonnage du MZ au début de sa construction.

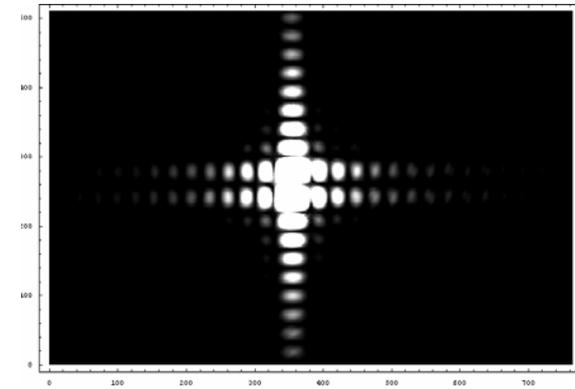
# Apodisation 1D



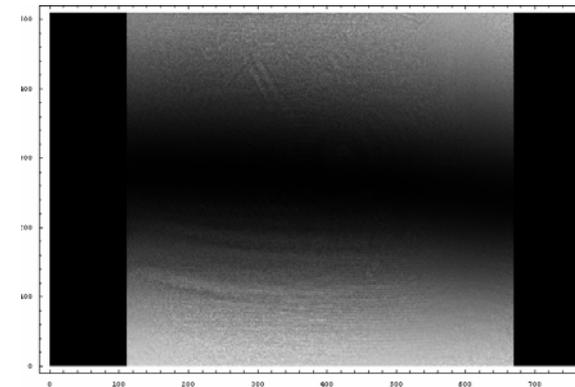
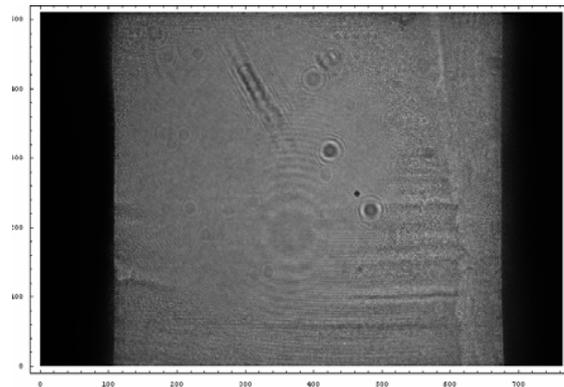
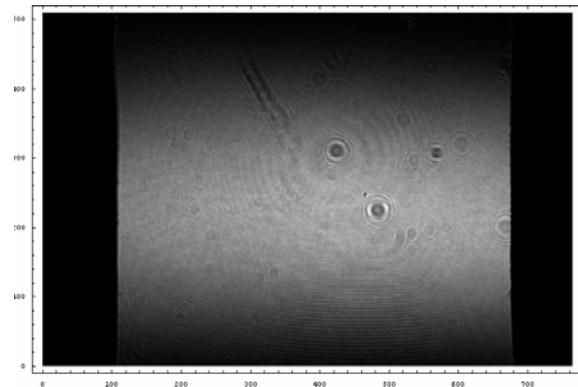
Avec apodisation



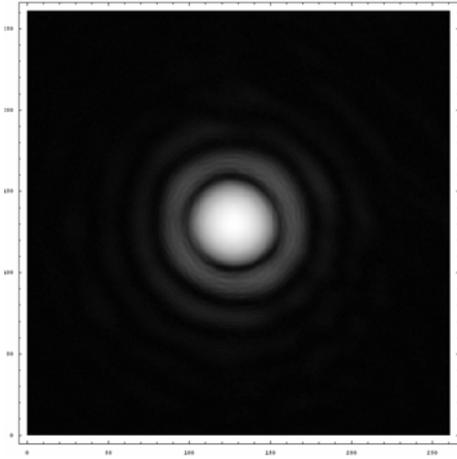
Sans apodisation



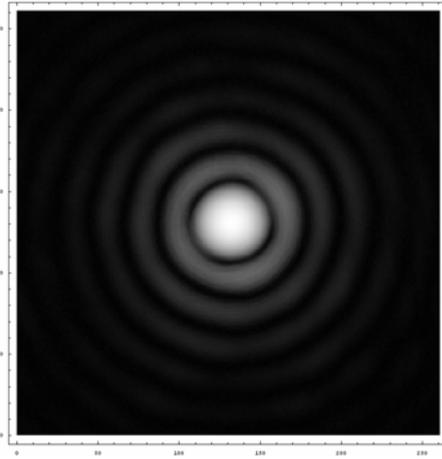
Anti apodisation



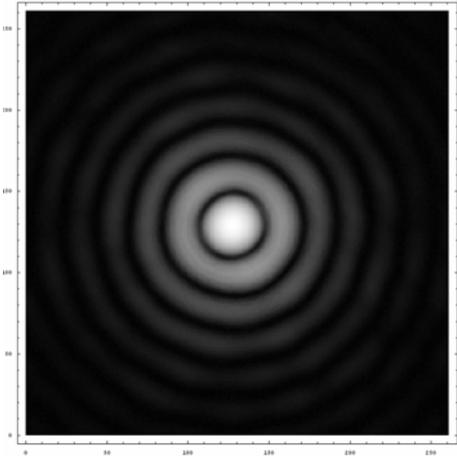
# Apodisation 2D



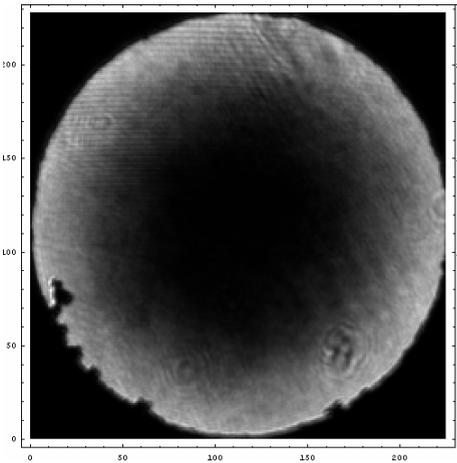
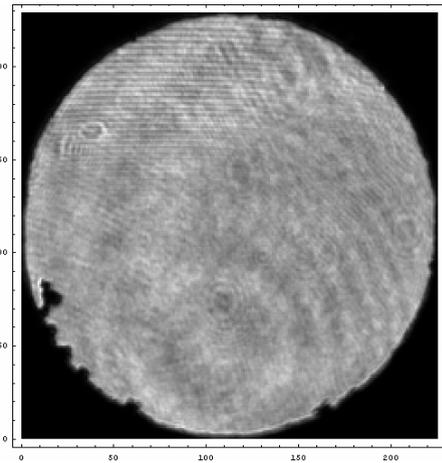
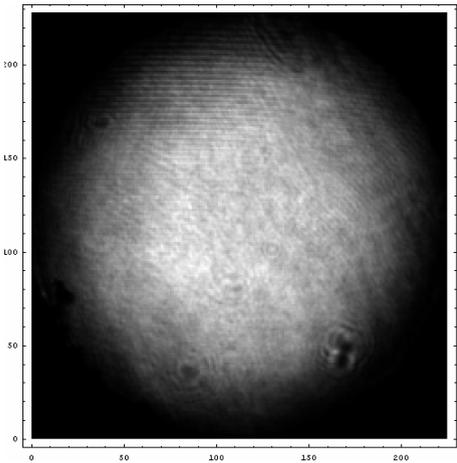
Avec apodisation



Sans apodisation

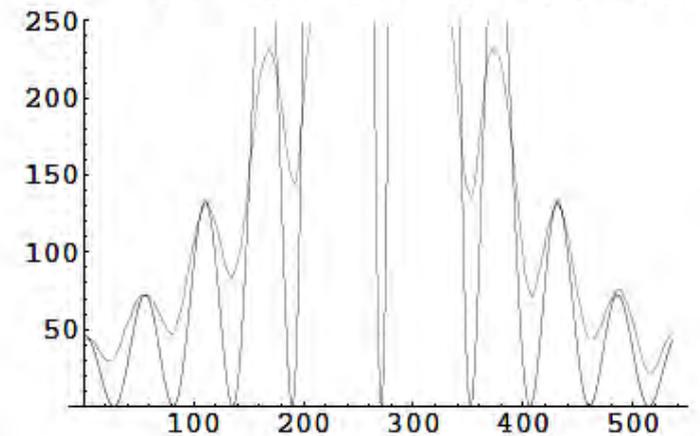
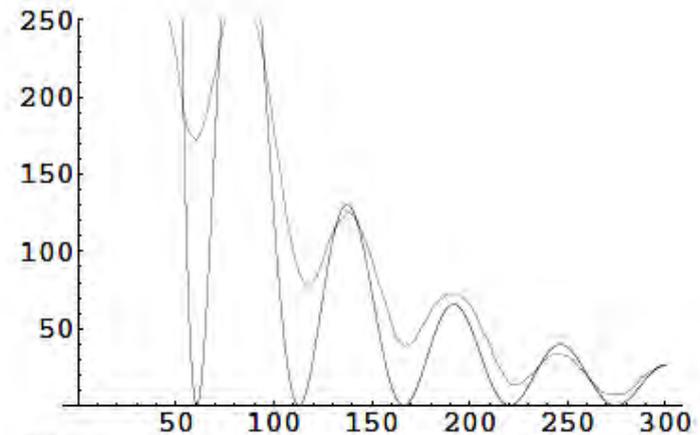
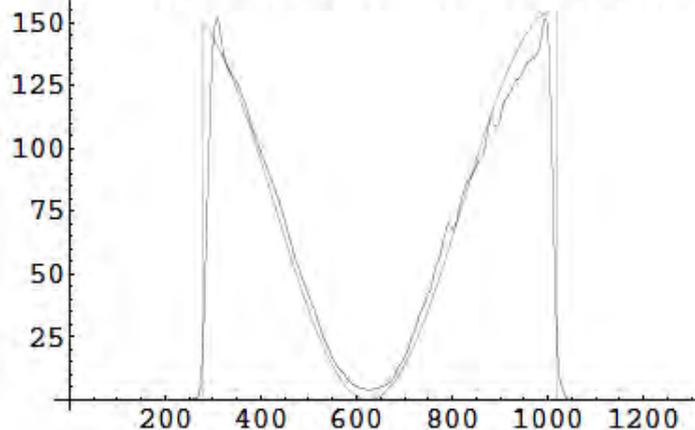
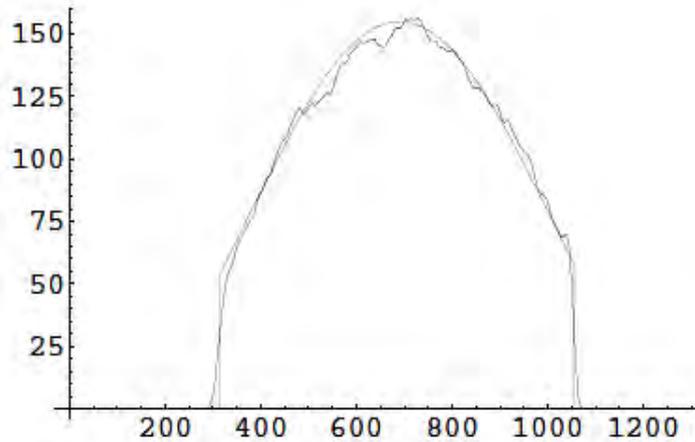


Anti apodisation



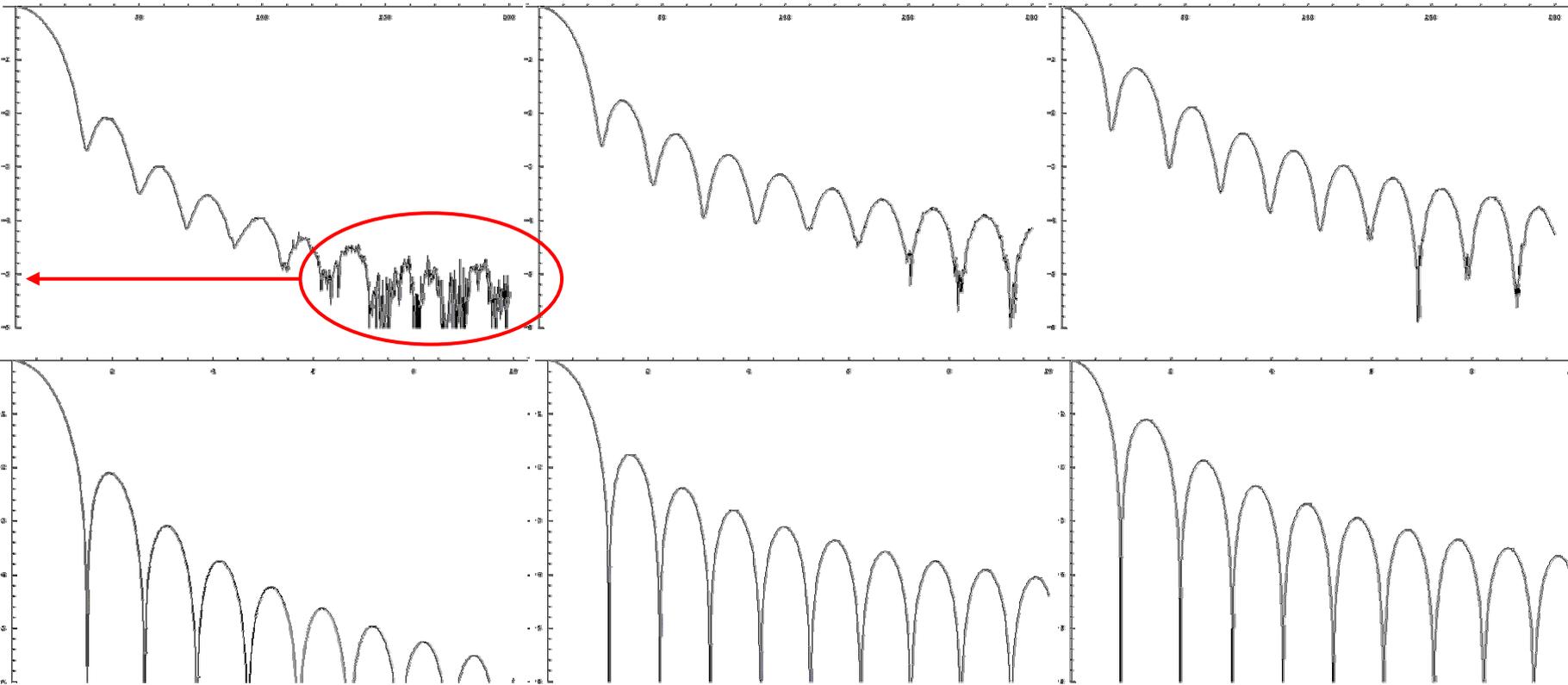
# Théorie vs. Expérience

Pupilles et PSF dans le cadre des apodisations 1D



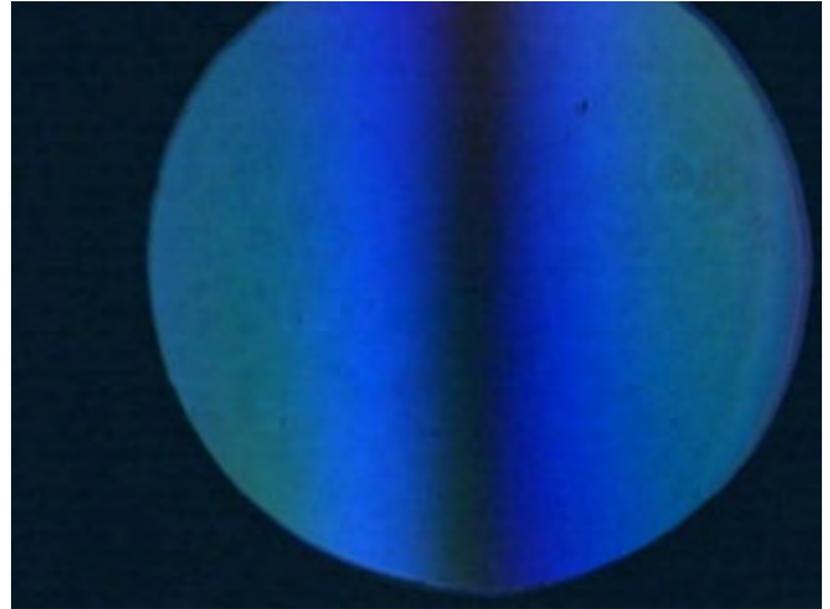
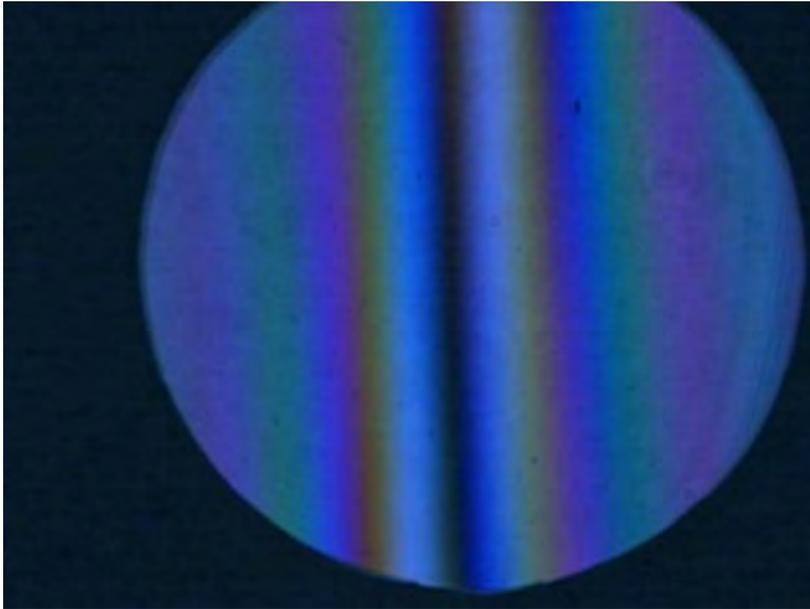
# Théorie vs. Expérience

Coupes des PSF dans le cadre des apodisations 2D

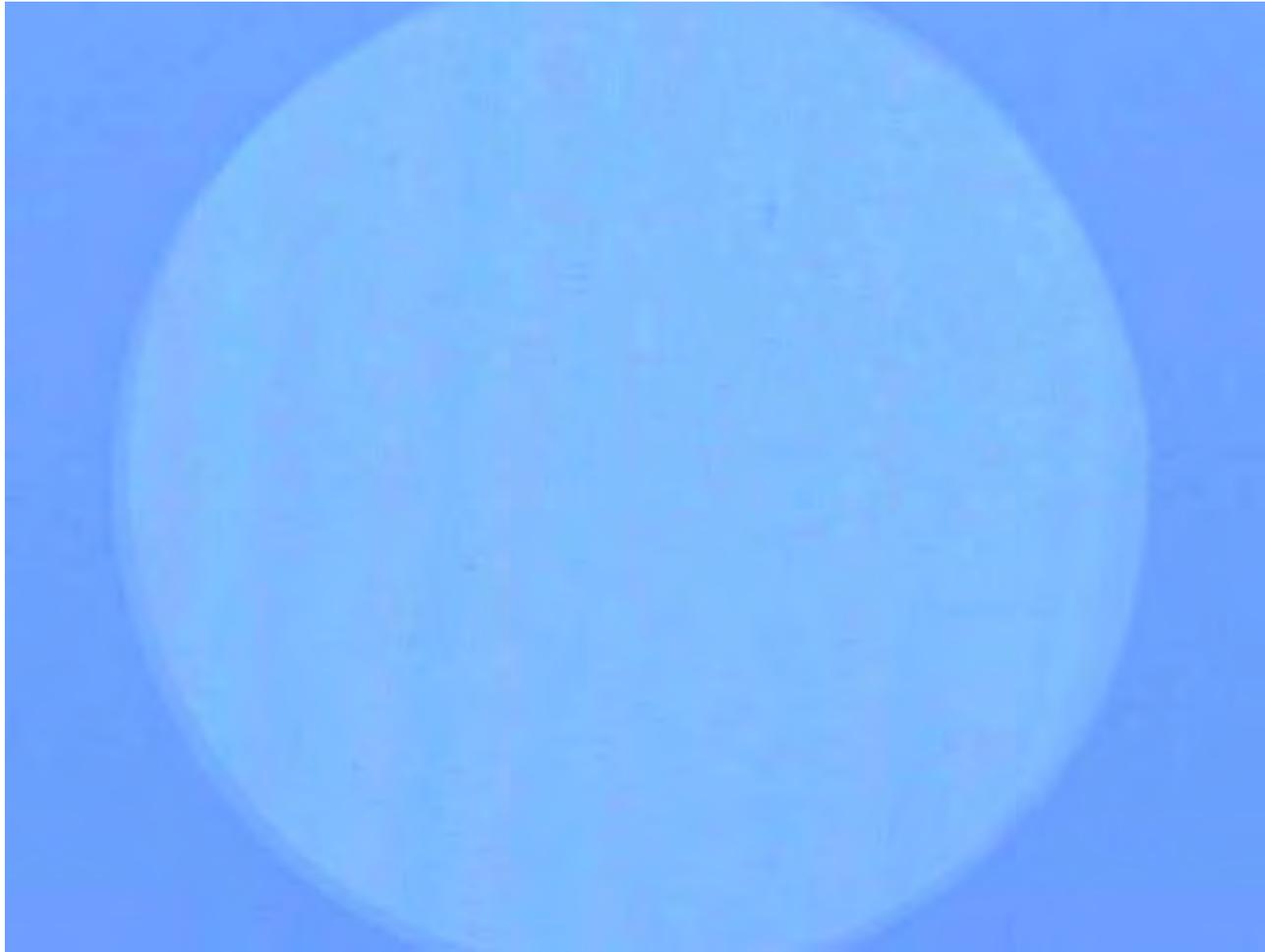


# Cas Polychromatique

- Plus délicat car :
  - $L_{\text{cohérence}} = \lambda^2/\Delta\lambda \approx 0.75 \mu\text{m}$  .
  - Lumière plus faible.

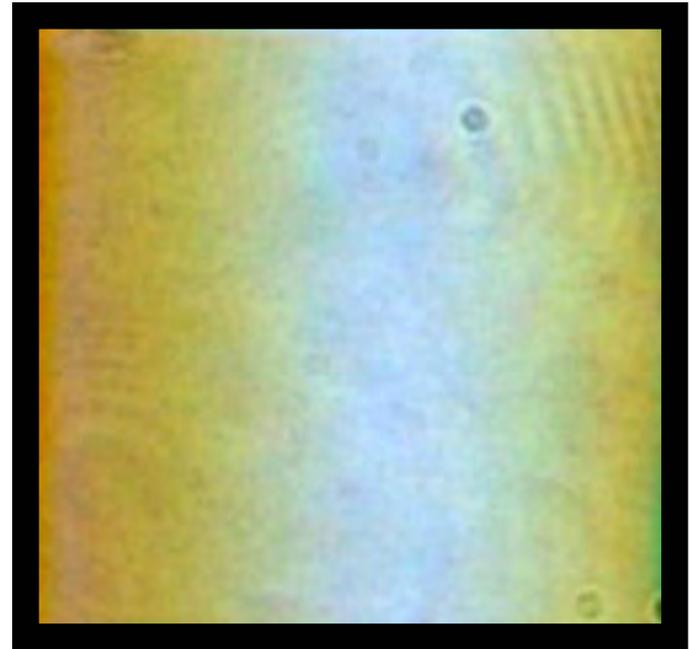
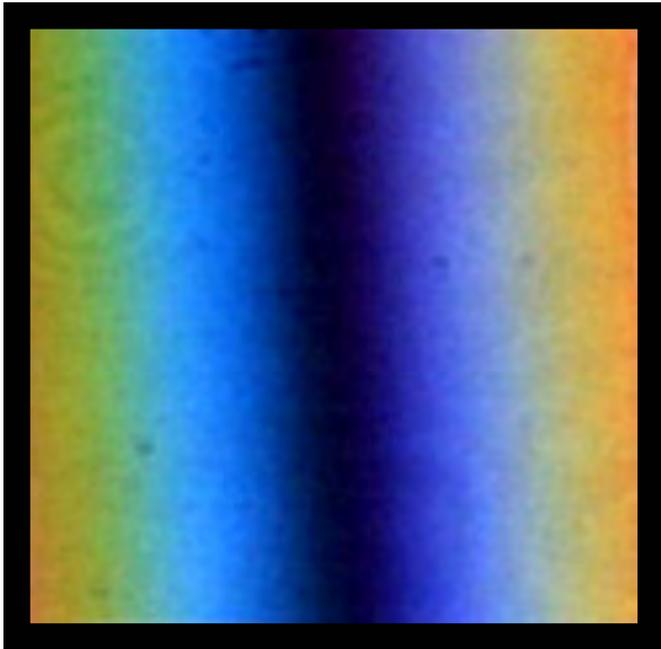


# Maîtrise des franges



# Apodisation 1D

- En cours...

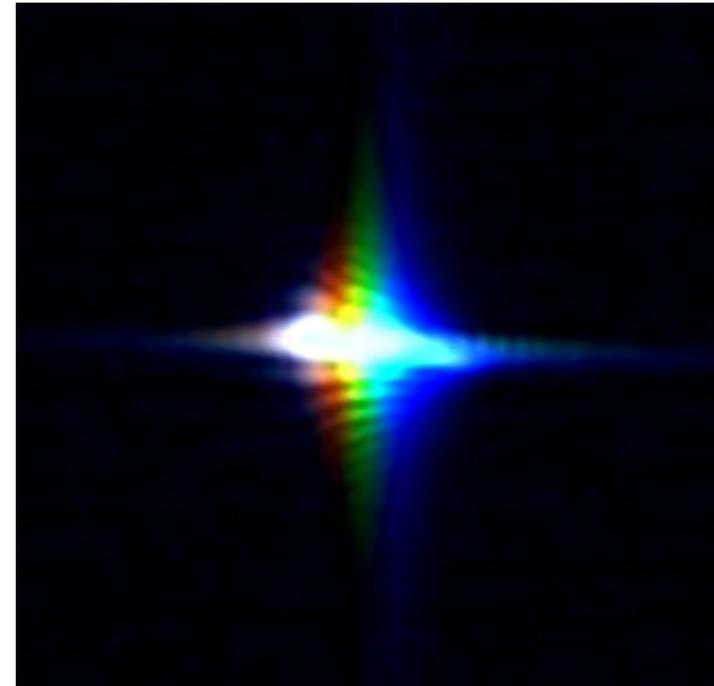


# Figures de diffraction



Chromatisme dû à un mauvais alignement des lentilles.

Illustration de la variation de la PSF avec  $\lambda$ .



# Perspectives

- Apport de nouveaux éléments au montage pour améliorer sa stabilité et le contrôle du chromatisme.
- Travail en lumière blanche.
  - Obtention de pupilles apodisées 1d et 2d.
  - Caractérisation spectrales des apodisations.
- Etude des lames de phase ‘prolates’.