

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.

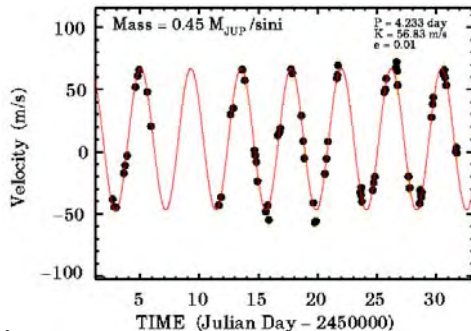
Contexte

A l'heure actuelle :

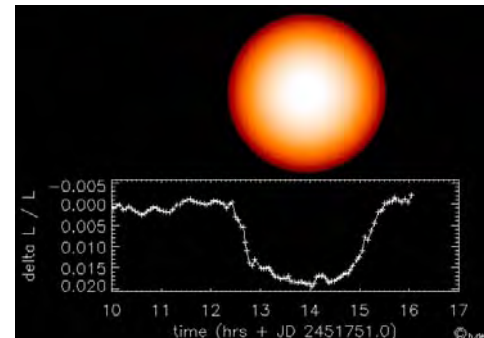
<i>Méthode de détection :</i>	<i>Nombre de planètes :</i>
Vitesse radiale	203 (175 systèmes)
Transit	15
μ -Lentille Gravitationnelle	4
Imagerie directe	4

Les détections indirectes

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

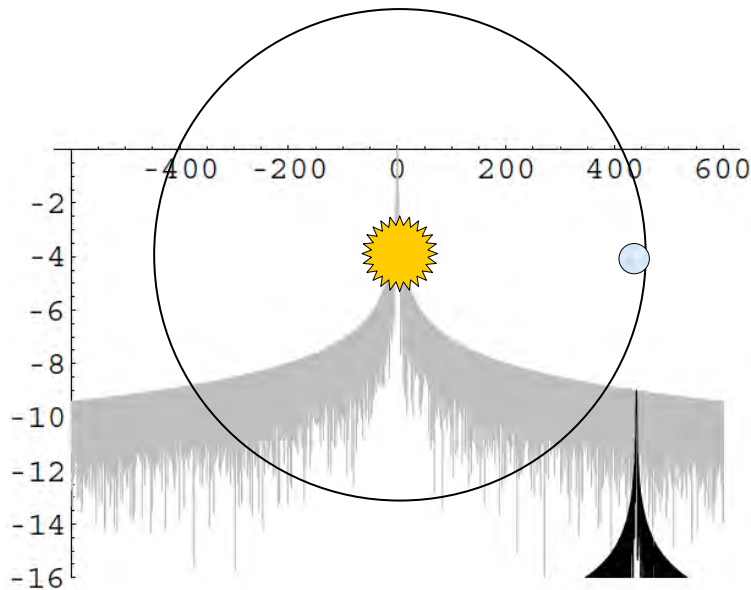


Figure de diffraction d'une étoile et de sa planète.

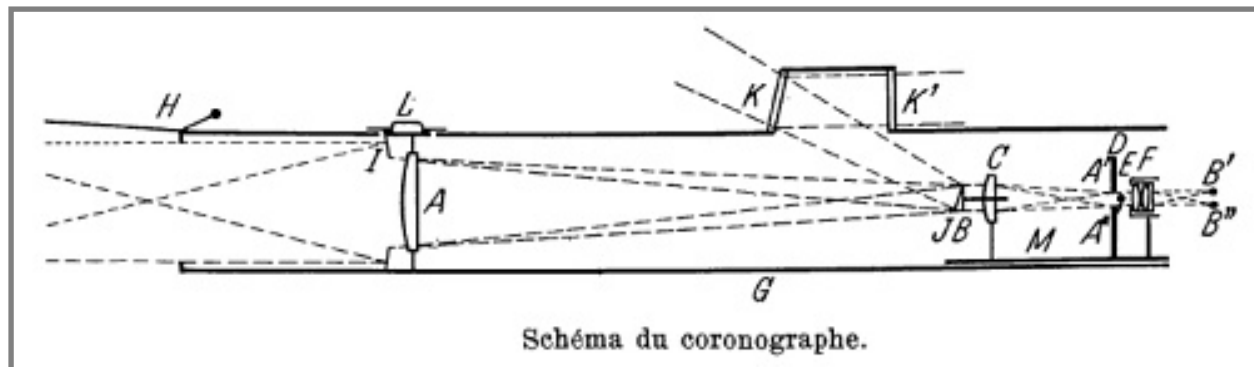
Les abscisses sont graduées en unité de λ/D (sép. angulaire).

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

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

Détection Directe : Méthodes

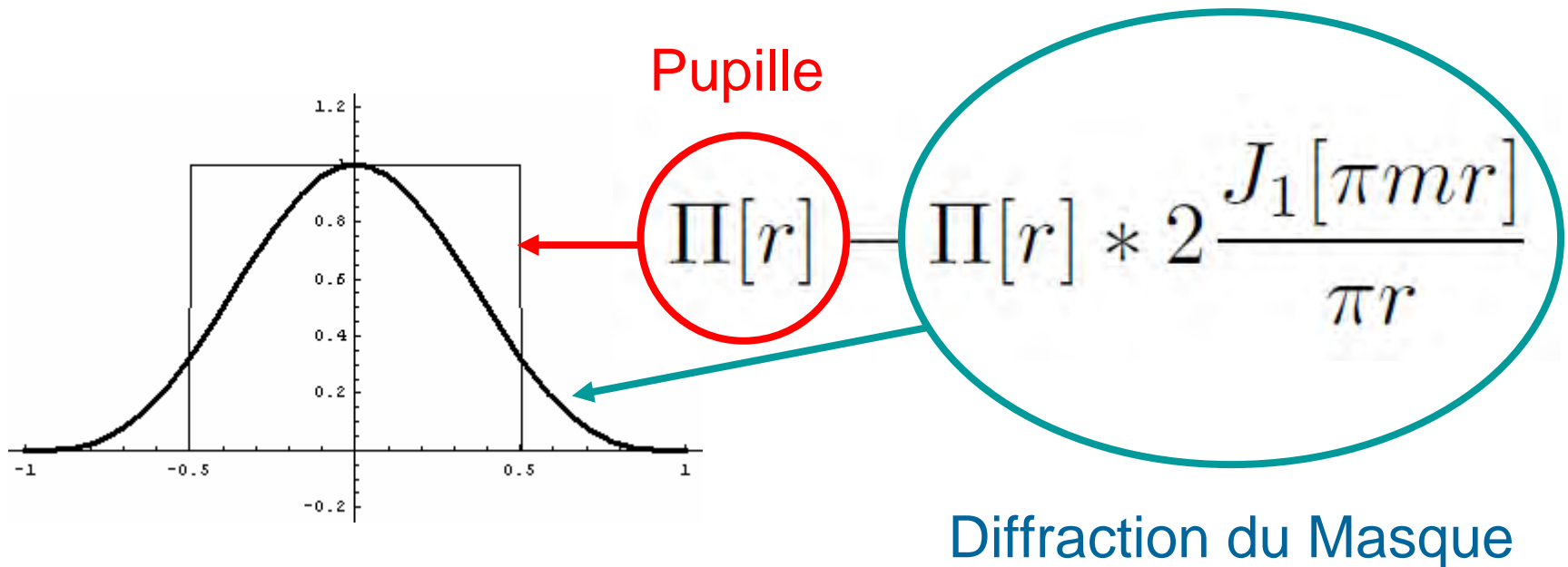
- Coronographie :
 - Inventée par Bernard Lyot en 1930 pour l'observation de la couronne solaire.
 - Un masque au centre du plan focal pour bloquer la lumière de l'étoile.



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

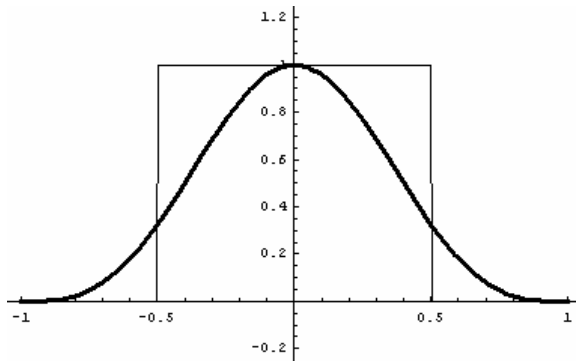
Limites du Lyot *Stellaire*

- Trop faible réjection :

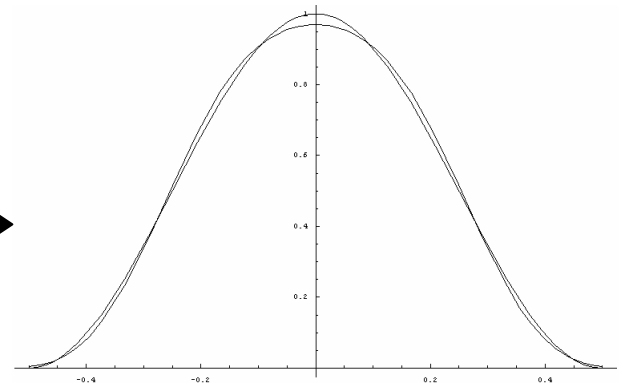


Apodisation

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



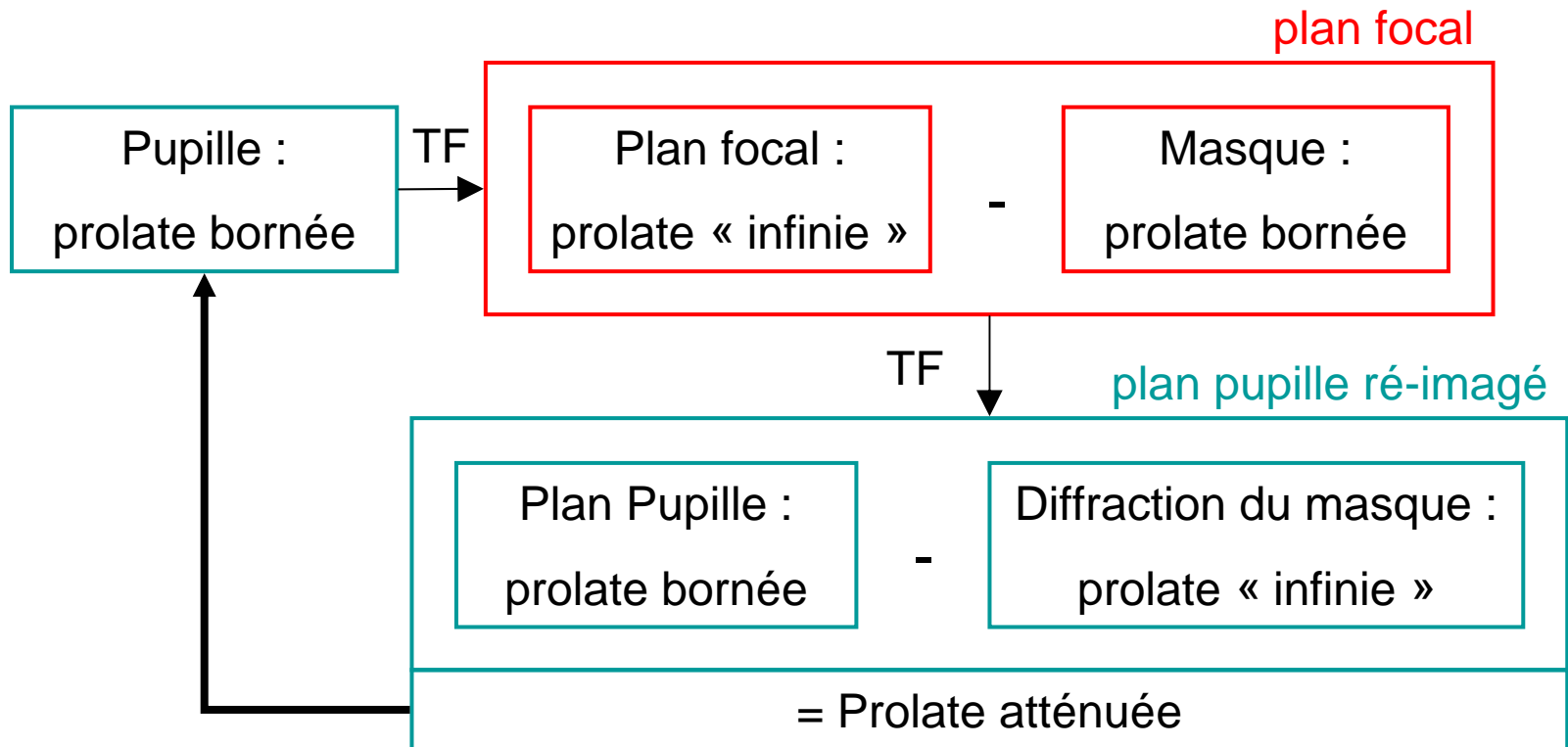
Cas d'un Lyot classique



Cas d'un Lyot apodisé en Cos^2

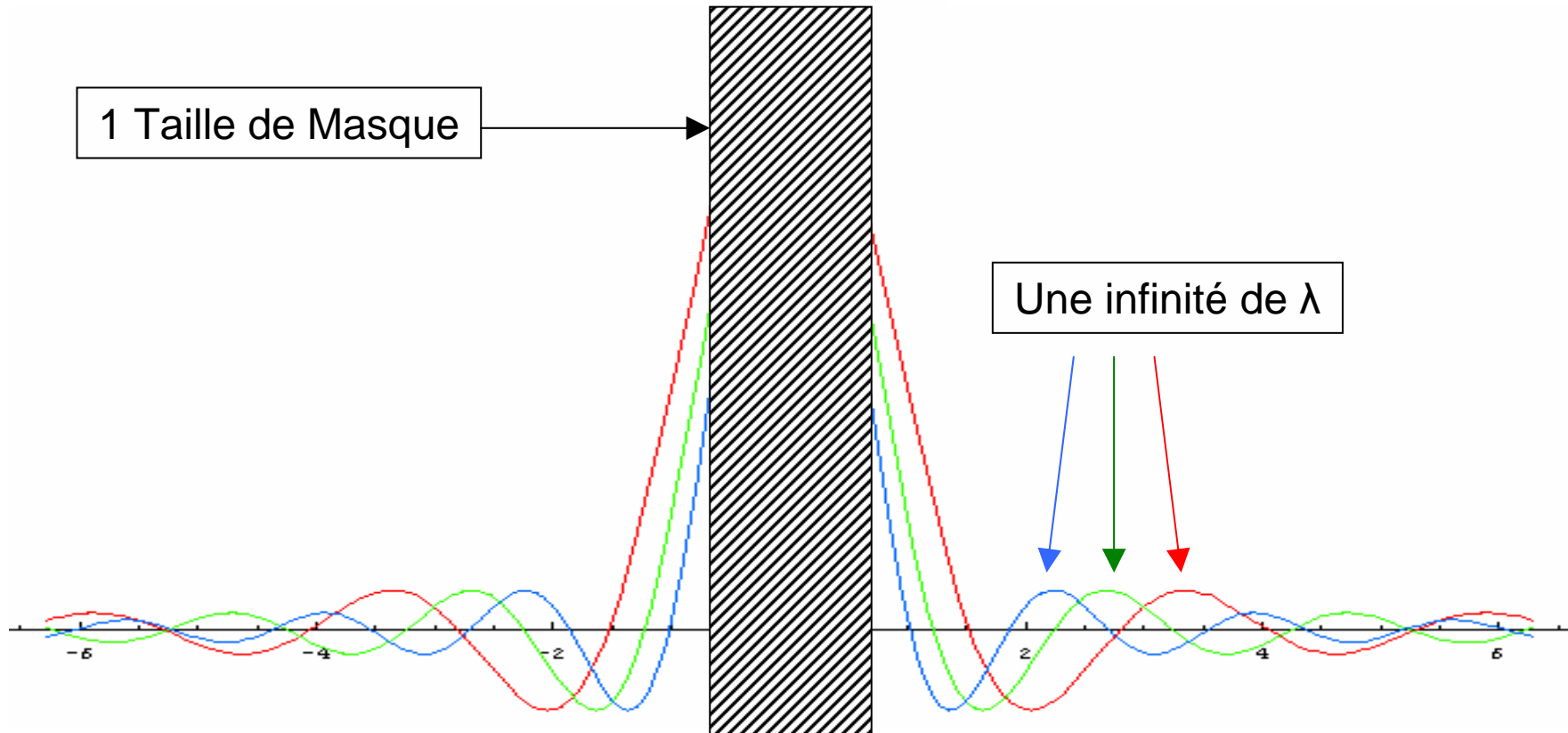
Prolates Sphéroïdales

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



Diffraction & Chromatisme

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



On a besoin :

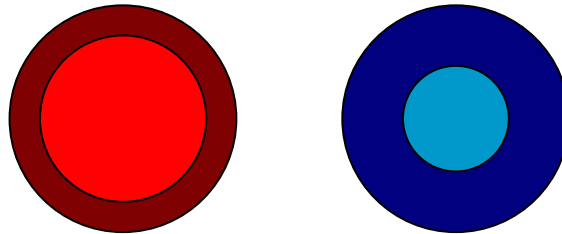
- D'un coronographe prolata apodisé.
- D'un instrument achromatique.

La diffraction est chromatique !

On va créer une apodisation
 λ -dépendante, compensant
le chromatisme de la diffraction !

Idée !

- On doit partir d'une apodisation prolate dont la largeur varie avec λ :



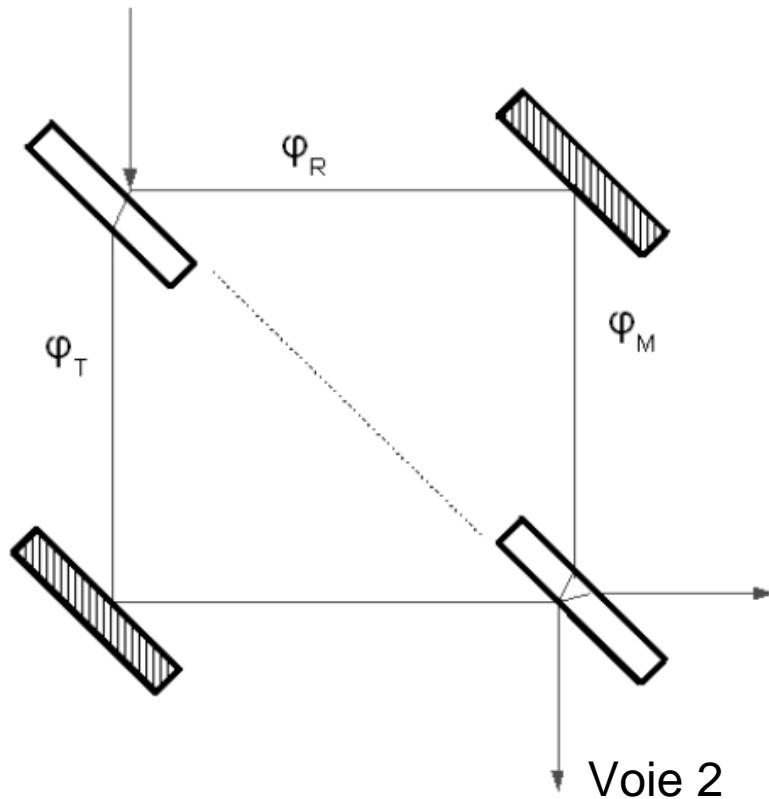
- Au plan focal on compense au mieux l'effet chromatique de la diffraction.

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 π :

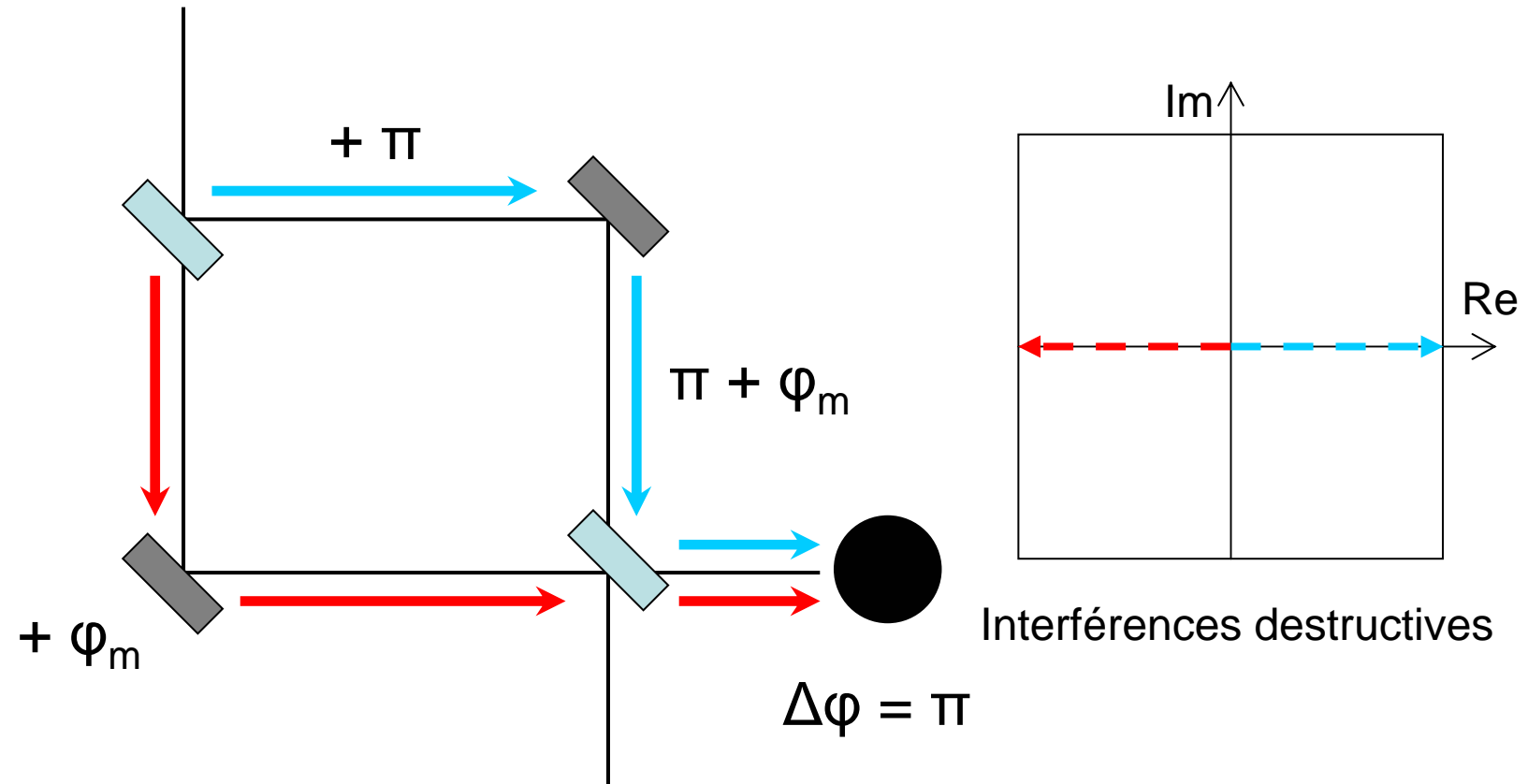
- Une voie additive.
- Une voie soustractive.

Voie 1

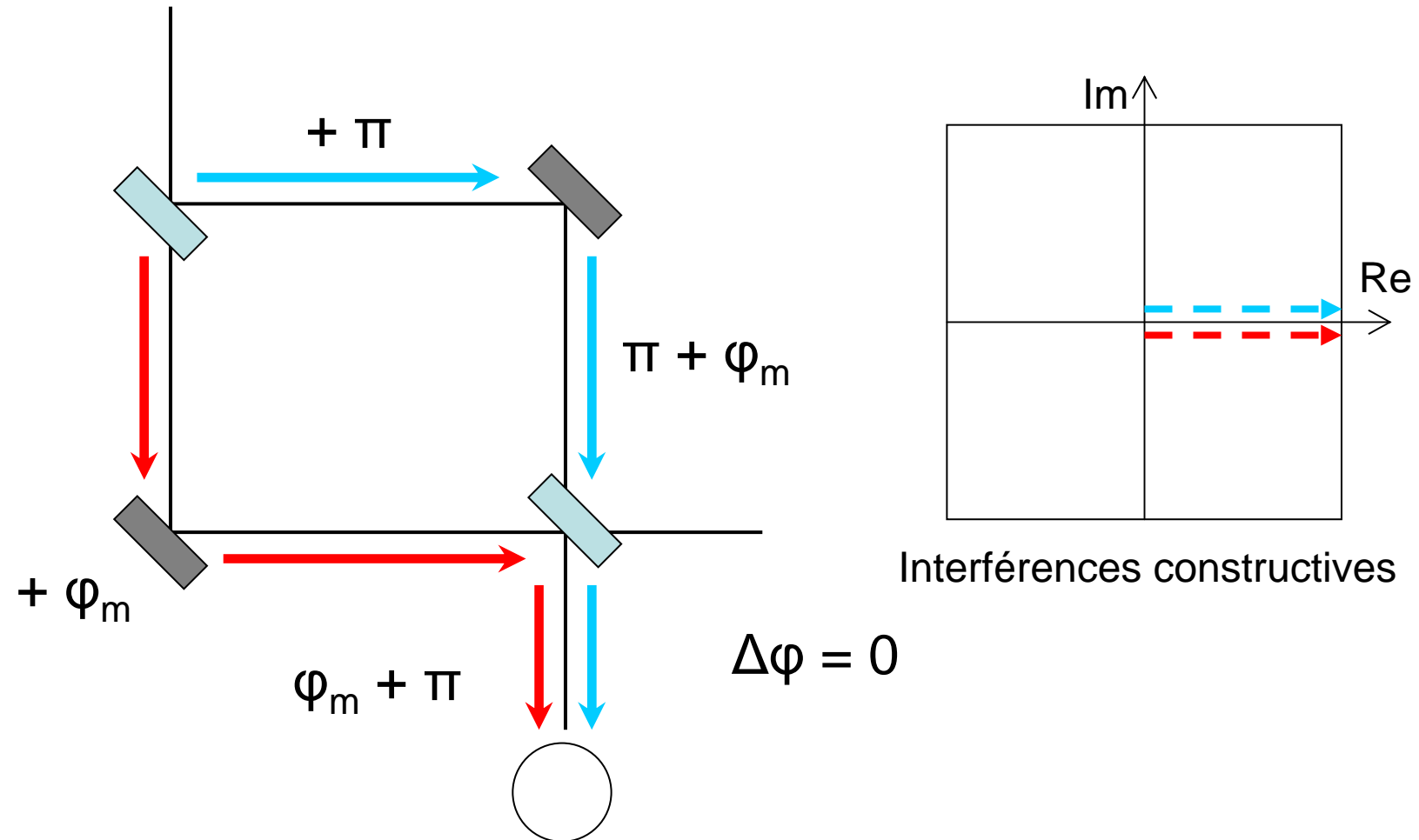
Deux voies !

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

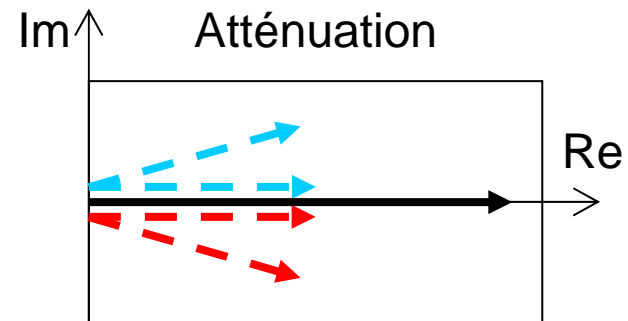
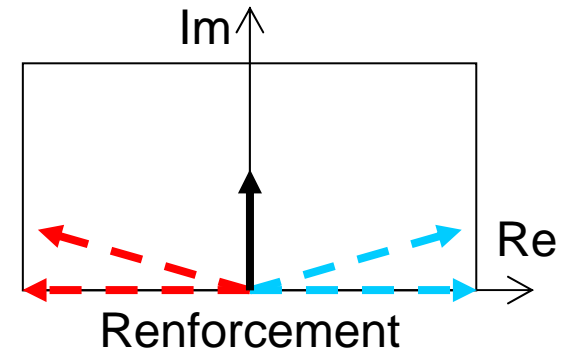
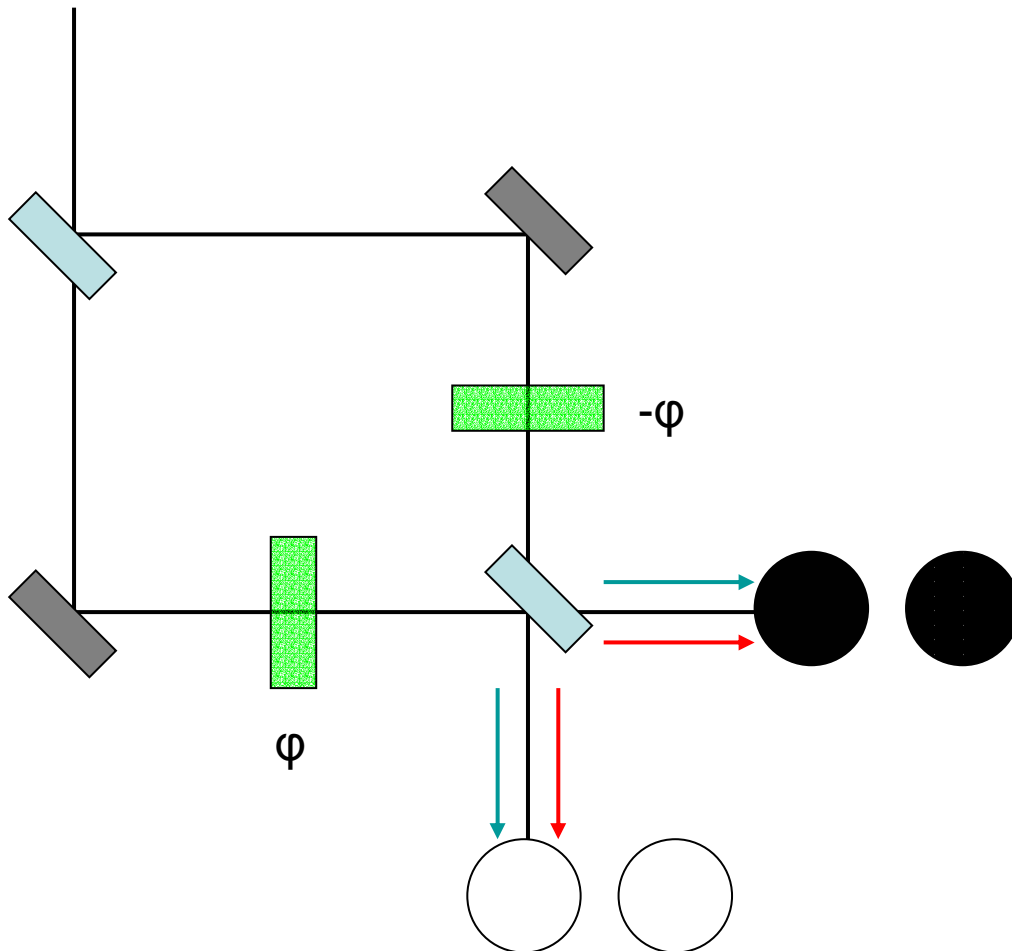
Voie 1 : Soustractive



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

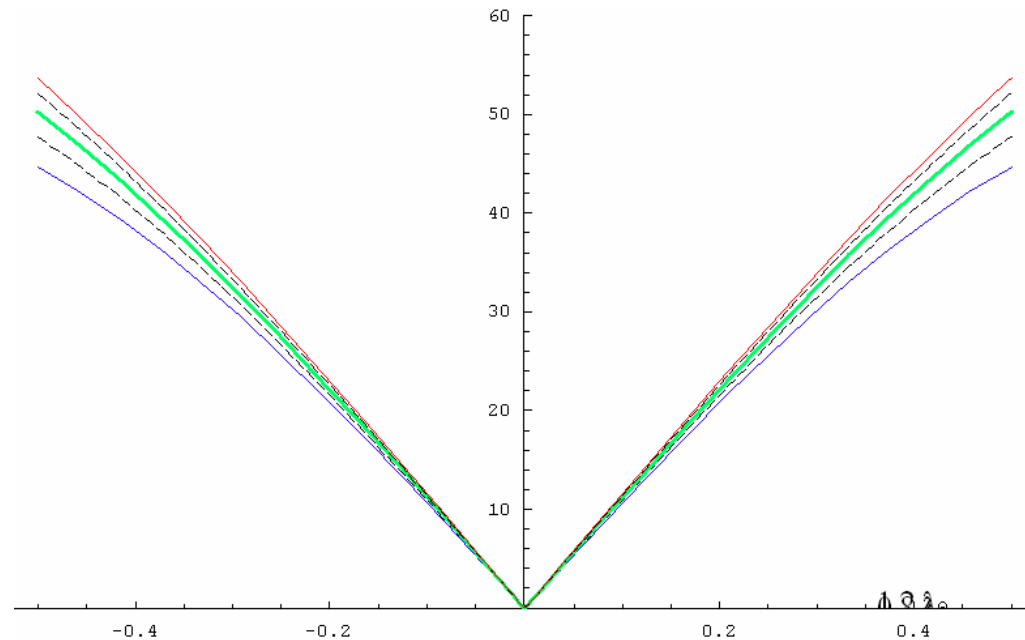
- On va faire dépendre ϕ de la position sur le faisceau :

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

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

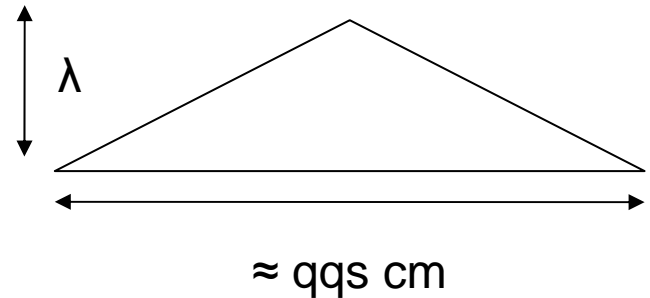
Phase « prolates »

- Phase désirée : une forme cônique.



Pour l'obtenir :

Un cône d'angle 10 arcsec !

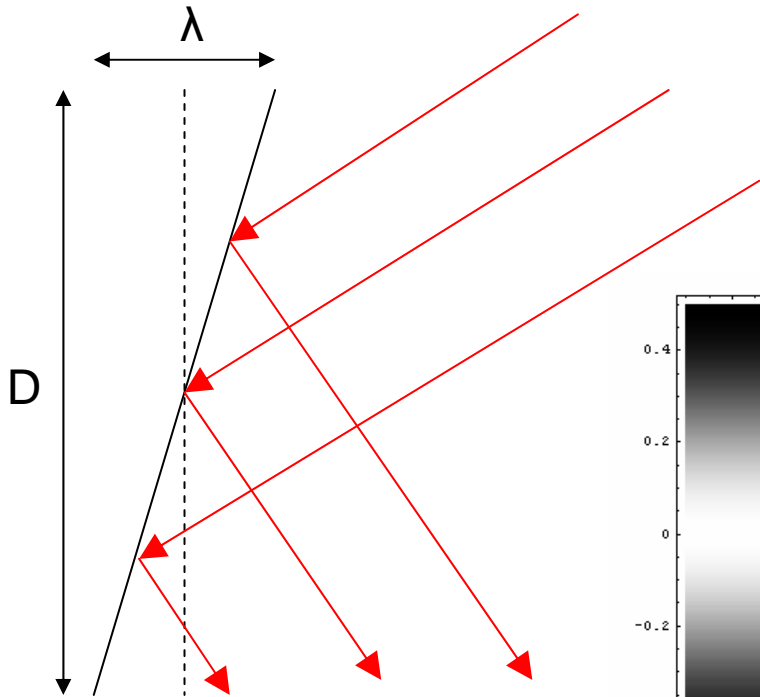


Apodisations actuelles

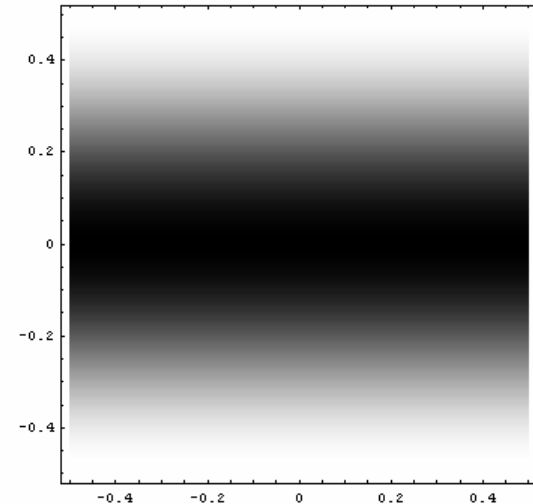
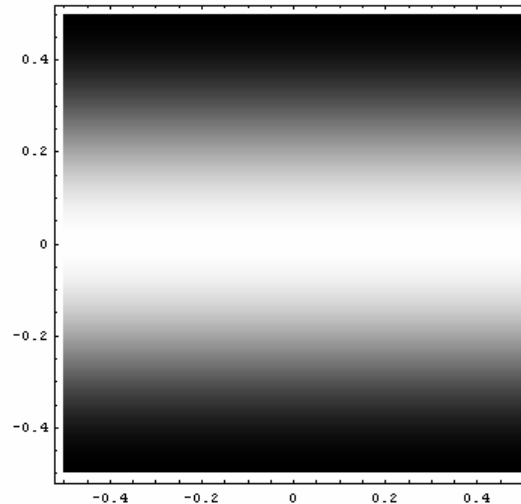
- 1-Axe :
 - Apodisation par franges du coin d'air.
 - Obtenue en tiltant les miroirs latéraux.
- Circulaire :
 - Interférence de deux ondes sphériques.
 - Obtenue par l'ajout de deux lentilles.

Apodisation 1-axe

- Inclinaison d'un miroir :

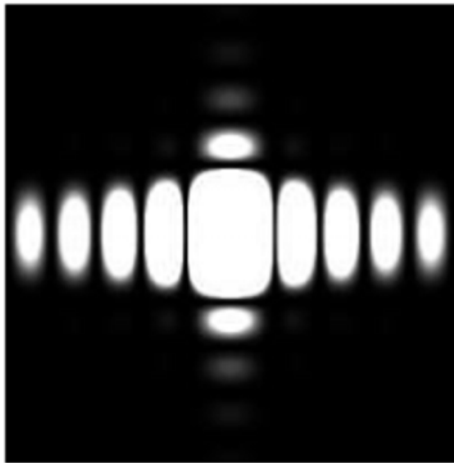


$$\phi \rightarrow \phi(x) = \pi \frac{\alpha x}{\lambda}$$

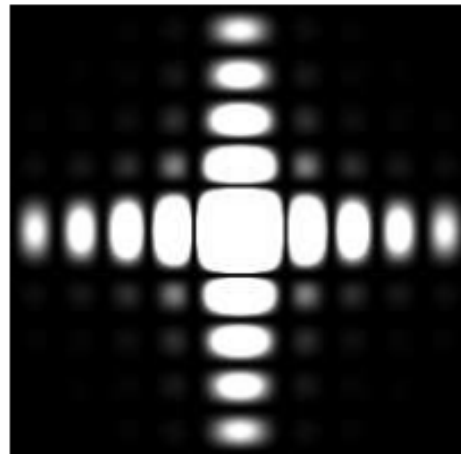


Figures de Diffraction

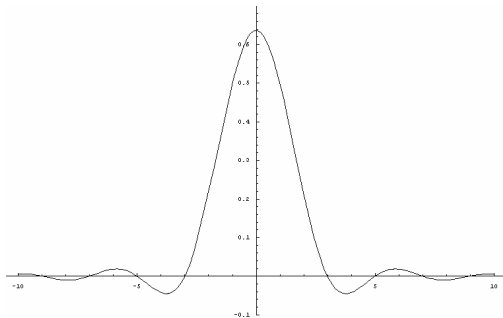
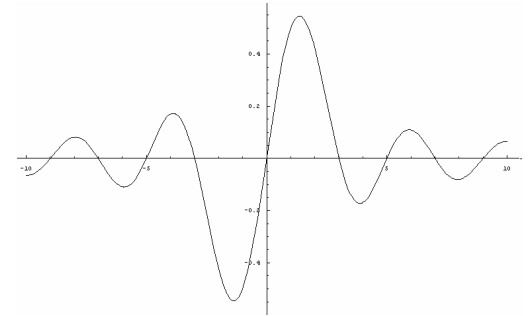
Apodisation 1-Axe



Apodisation



Non Apodisation

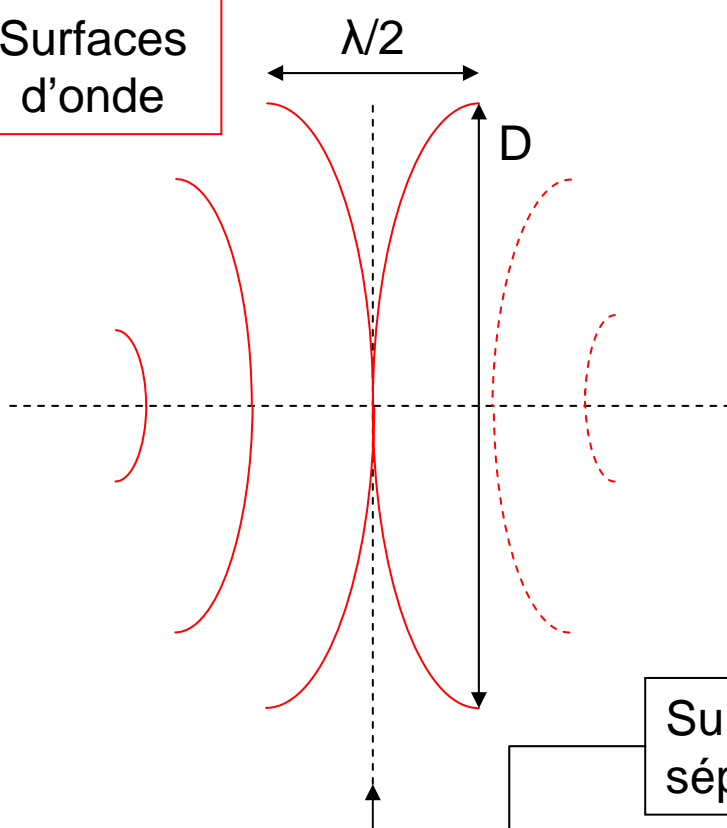


Anti Apodisation

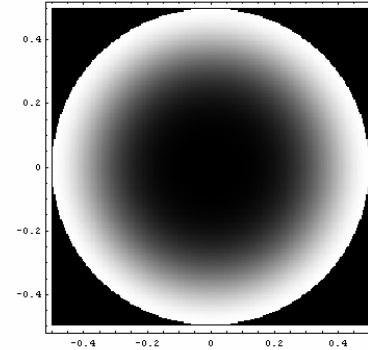
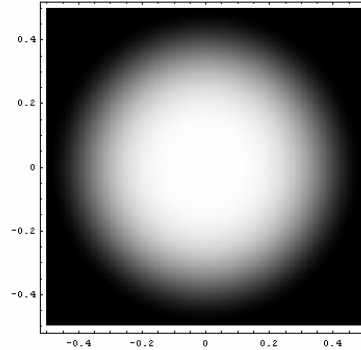
Apodisation circulaire

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

Surfaces
d'onde



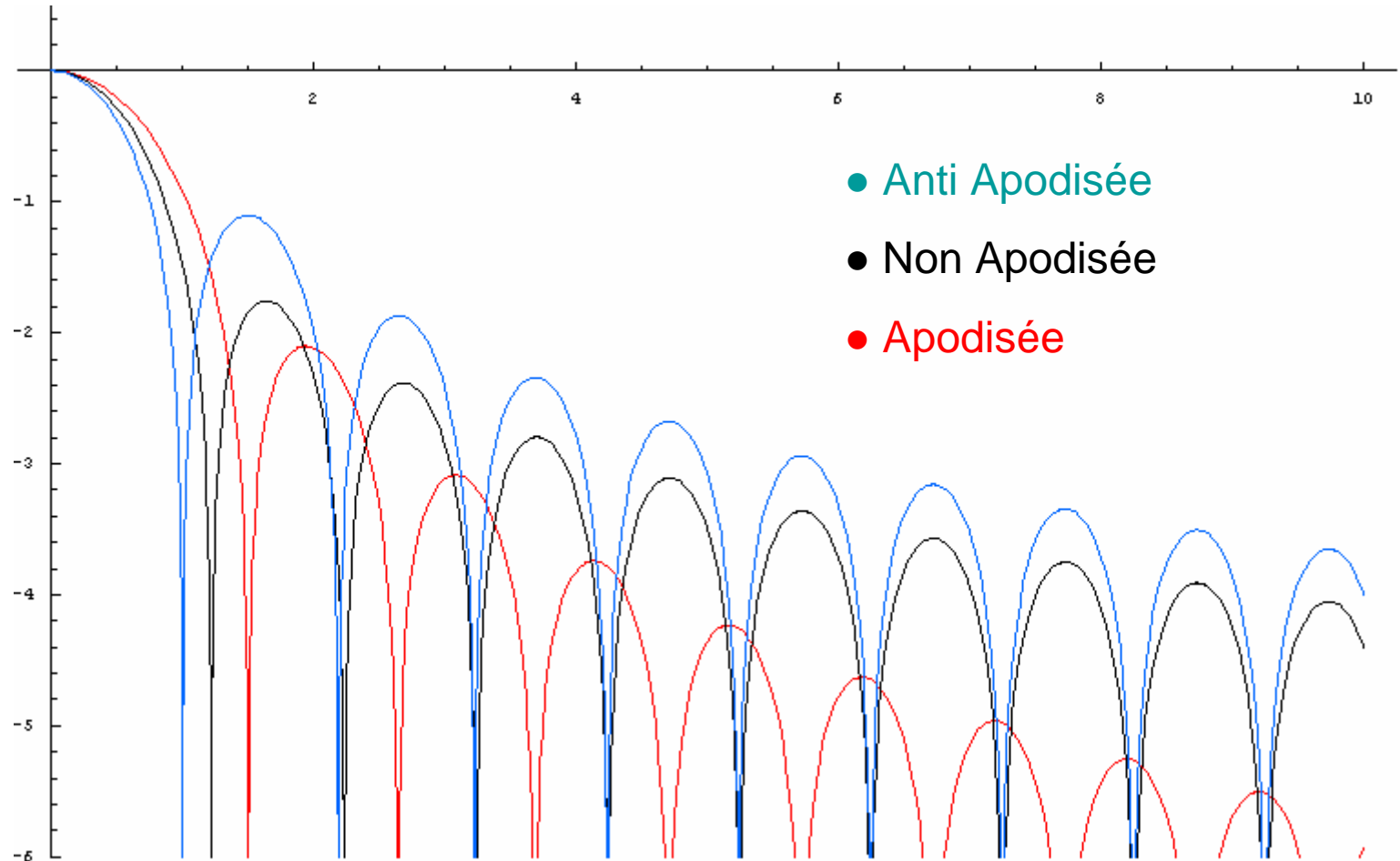
$$\phi \rightarrow \phi(r) = \pi \frac{r^2}{\lambda F}$$



Surface de la
séparatrice

Figures de diffraction

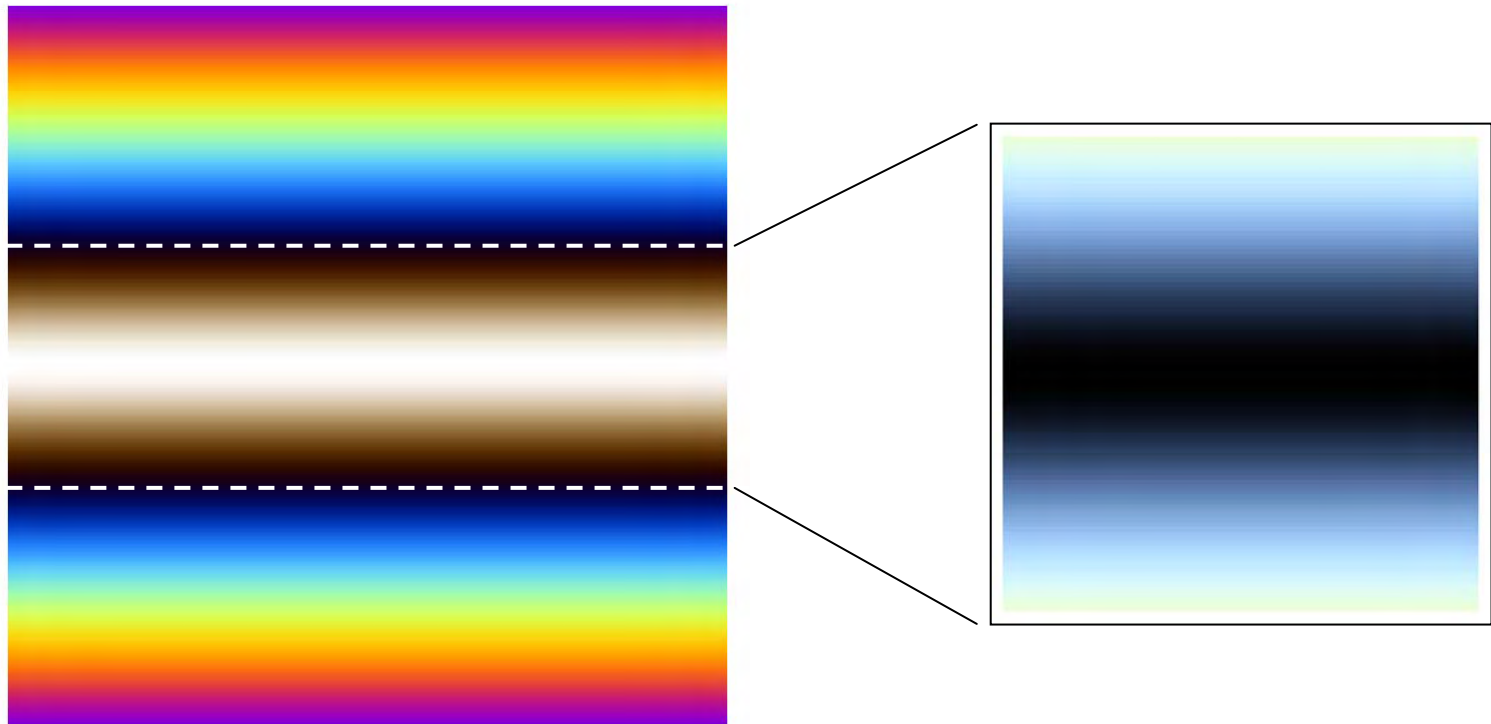
Apodisation circulaire



Simulations Polychromatiques

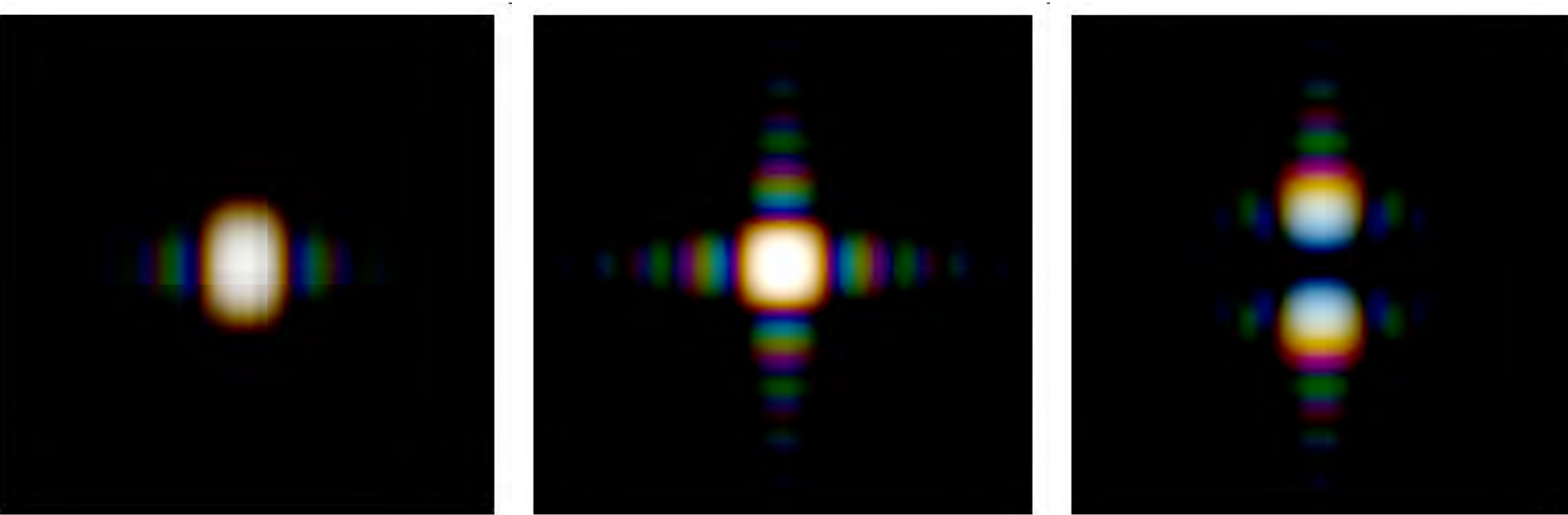
- Sommes des contributions RVB.

Teintes de Newton



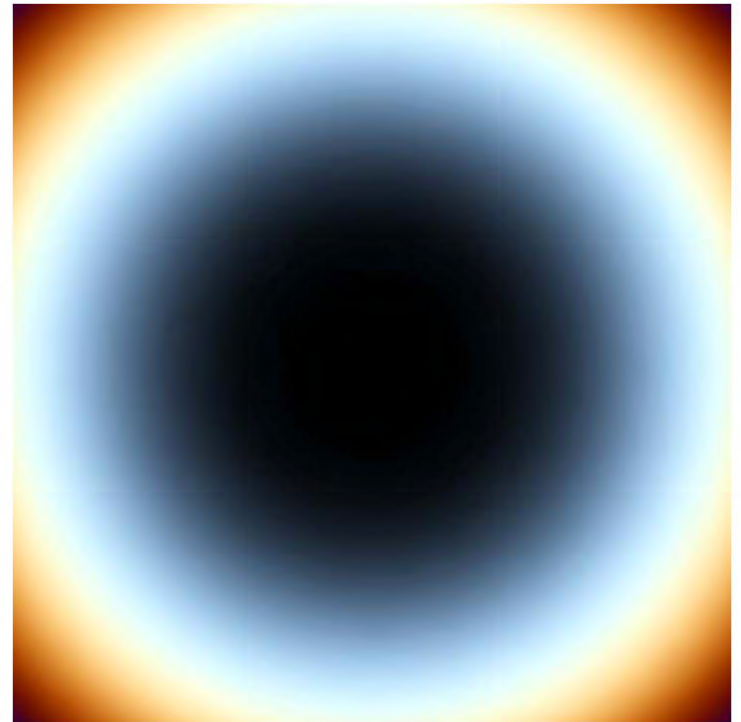
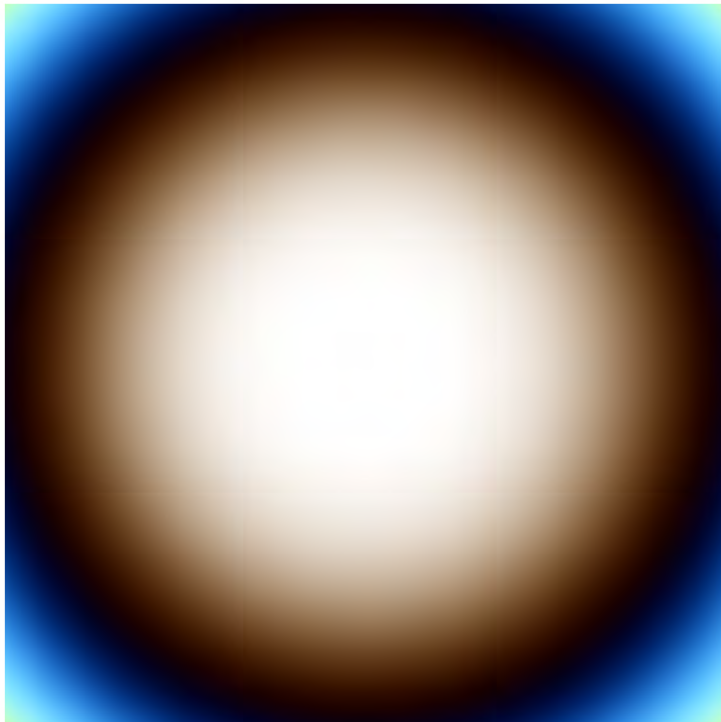
PSF simulées

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



Simulations - 2D

Prévisions des apodisations et anti-apodisations 2D chromatiques.



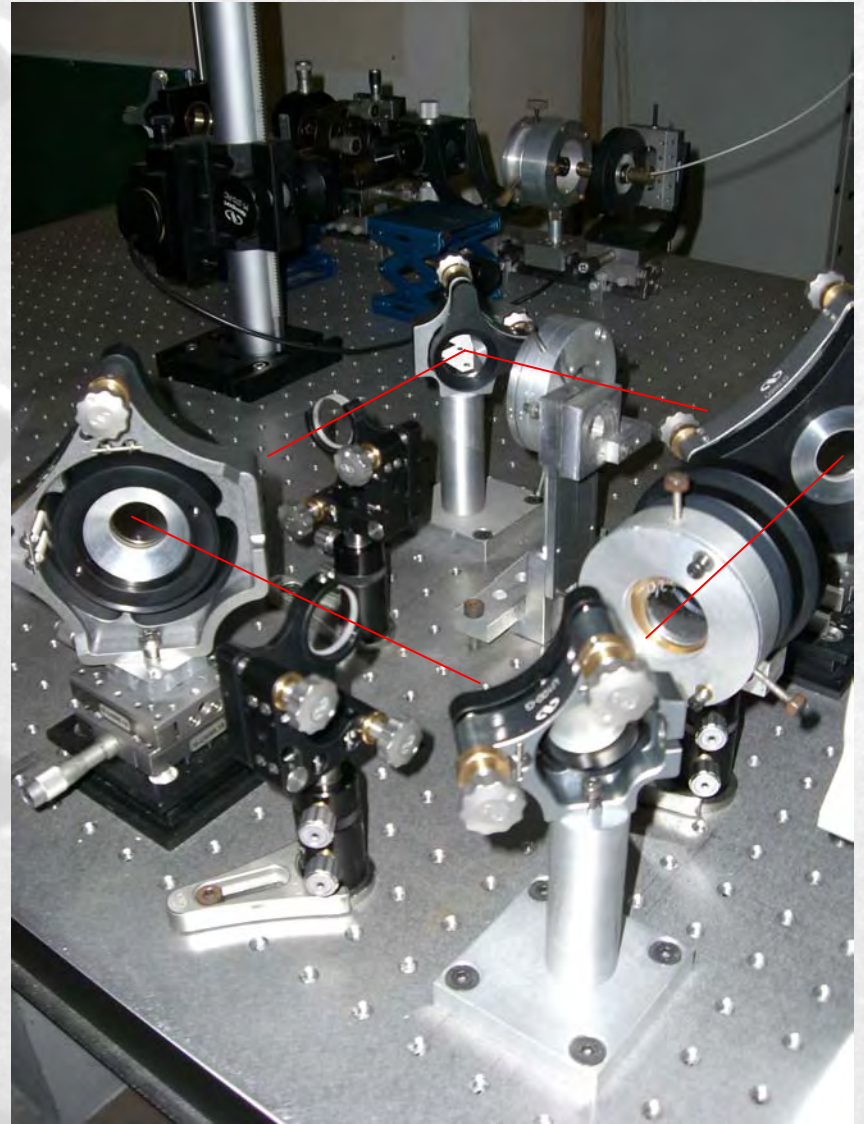
L'expérience

Etapes :

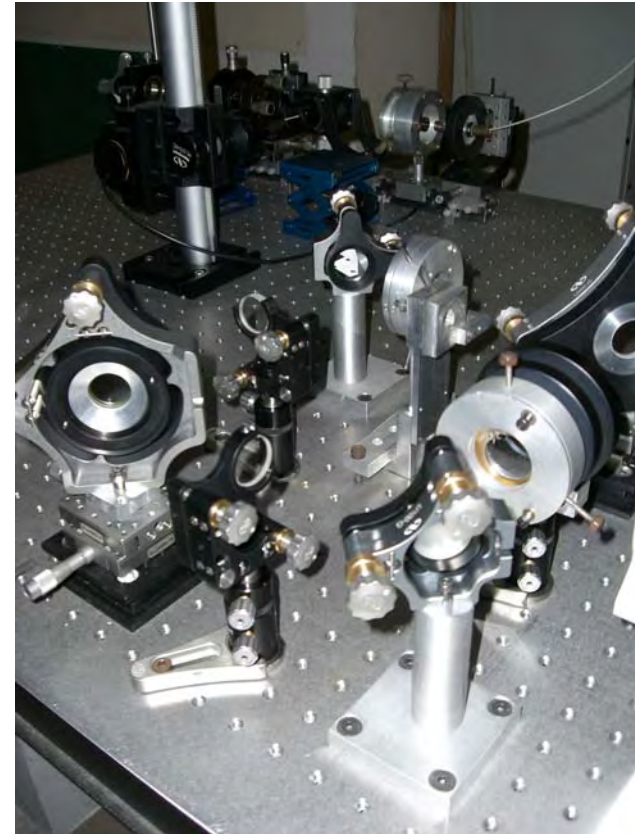
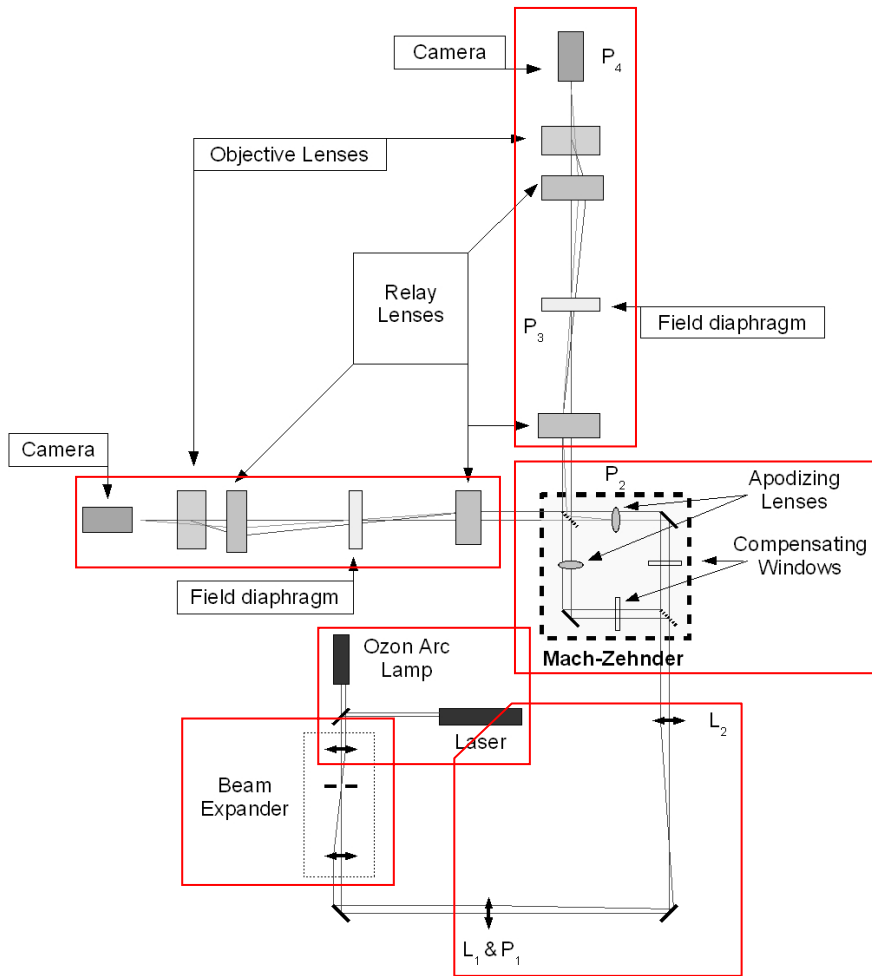
- Construction d'un prototype.
- Premières franges du coin d'air.
- Transfert & création d'un MZ abouti.
- Apodisations 1-axe puis circulaire.
- Réglage en lumière blanche.
- *En cours* : étude spectrale.

Le Montage

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

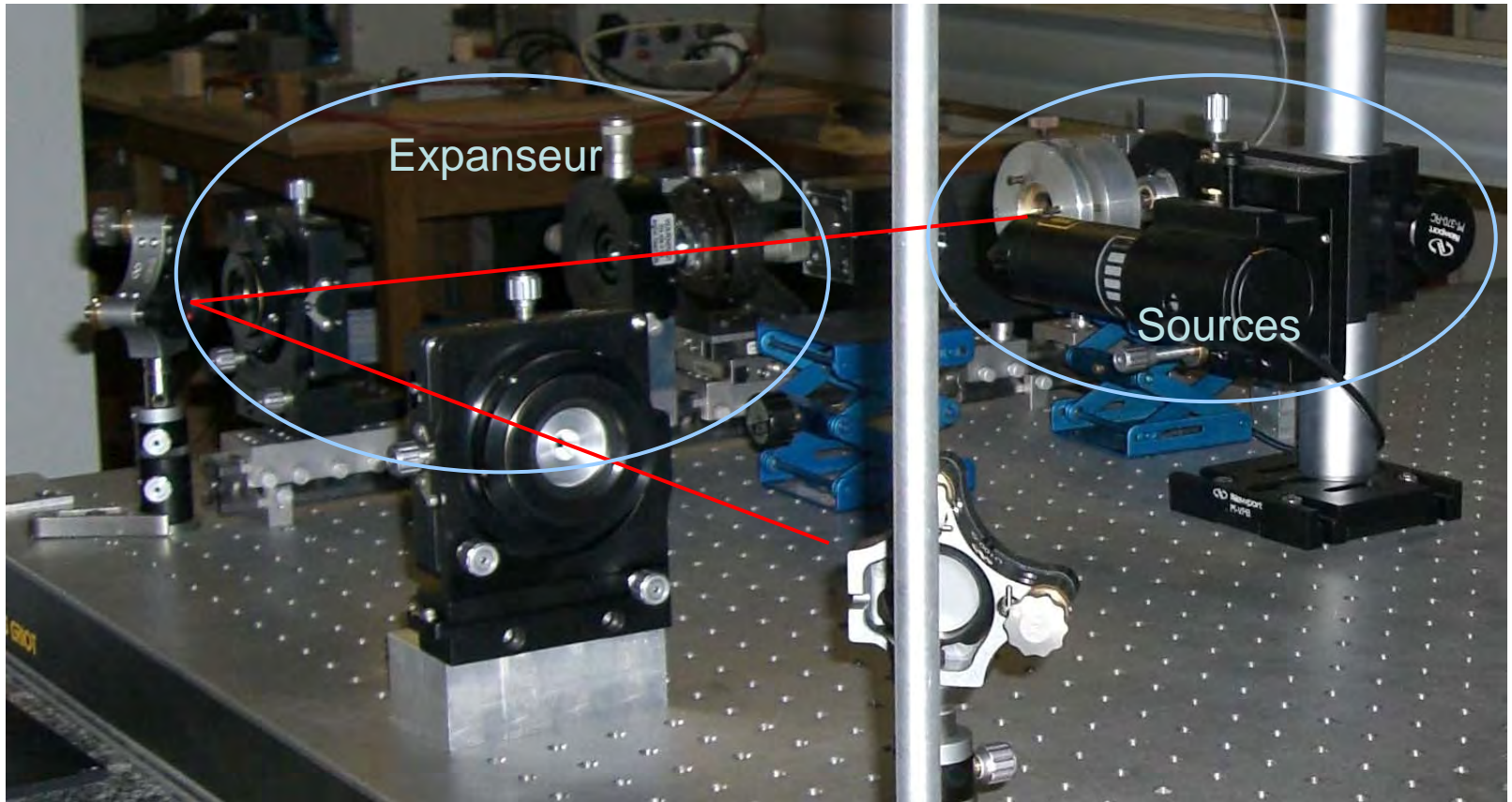


Le montage

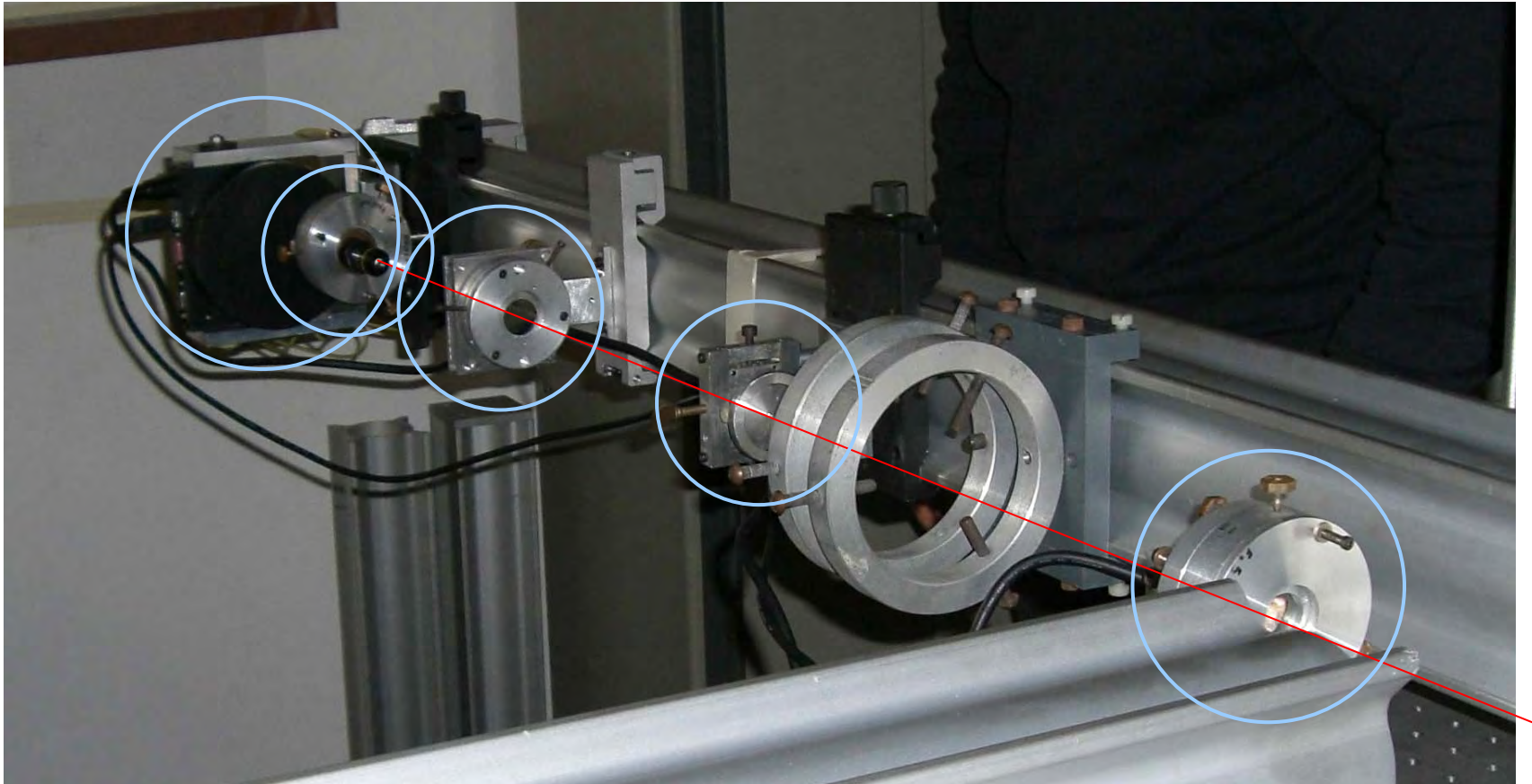


Zoom sur le Mach-Zehnder.

Le montage



Le Montage



Caméra
Objectif de microscope
Lentille

Diaphragme

Lentille de reprise

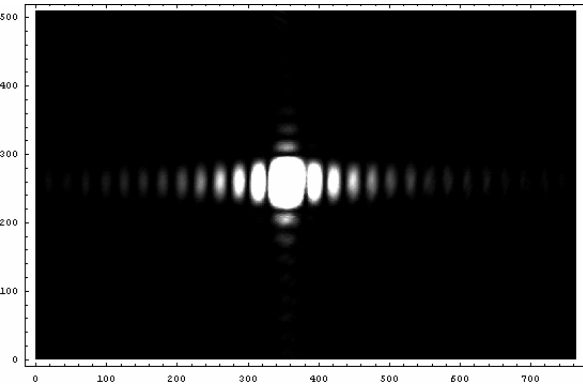
Cas Monochromatique

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

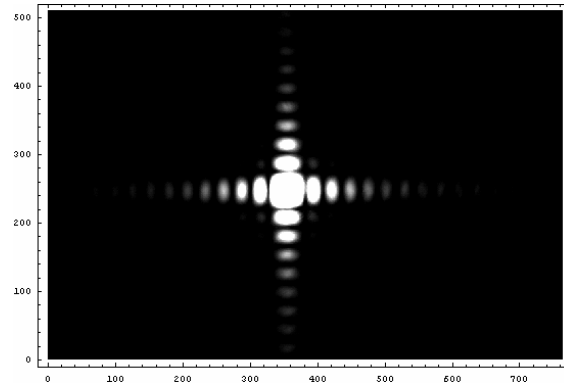


Etalonnage du MZ au début de sa construction.

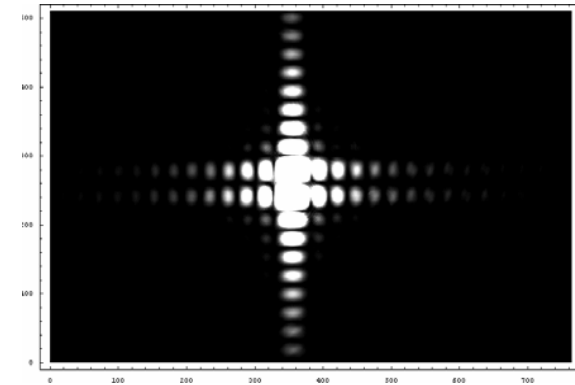
Apodisation 1D



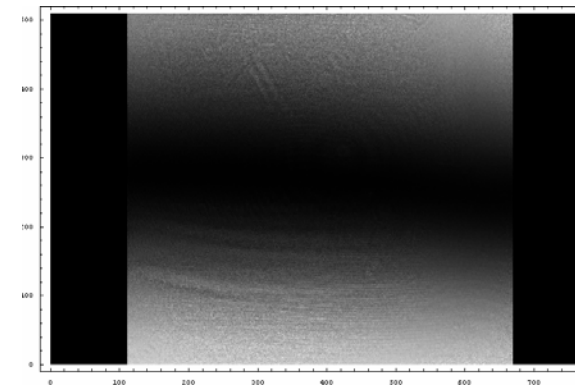
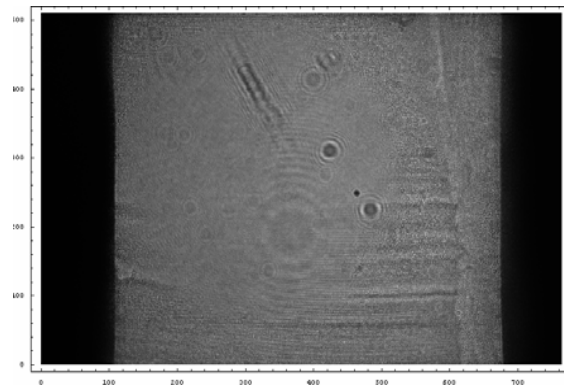
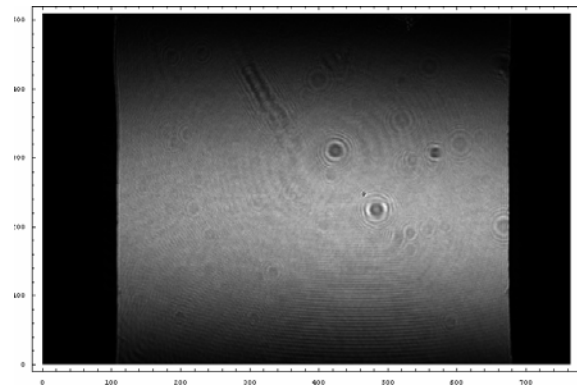
Avec apodisation



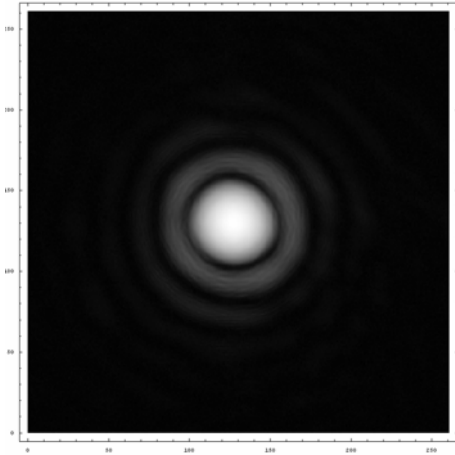
Sans apodisation



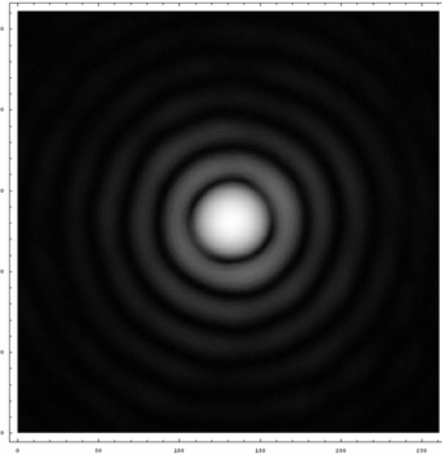
Anti apodisation



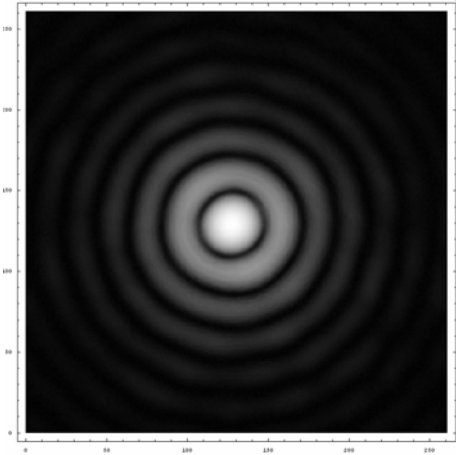
Apodisation 2D



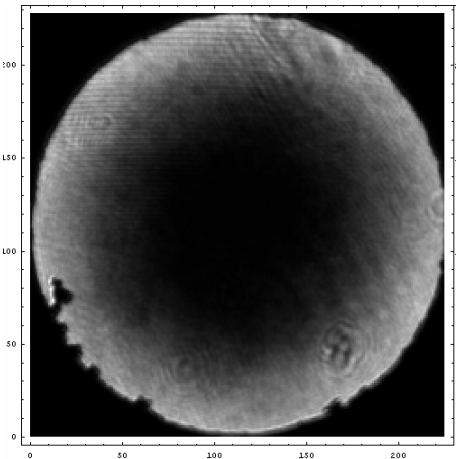
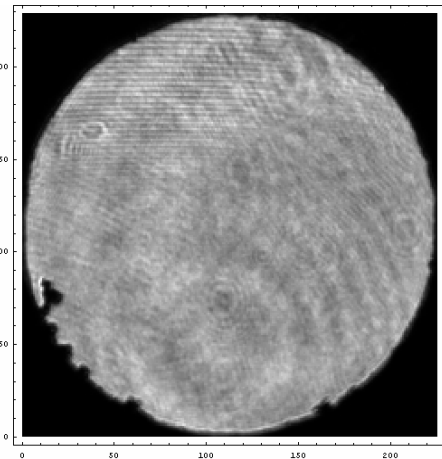
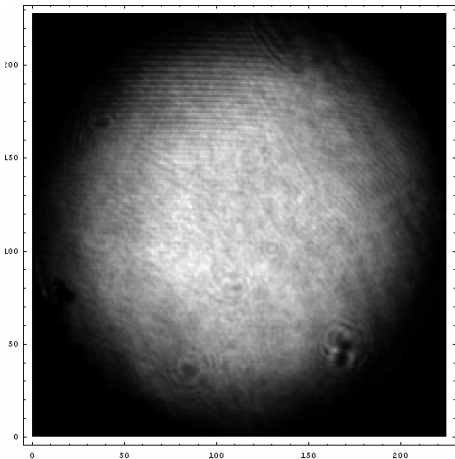
Avec apodisation



Sans apodisation

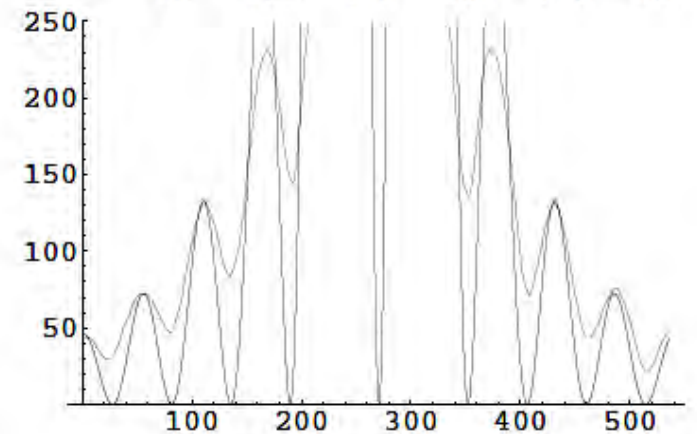
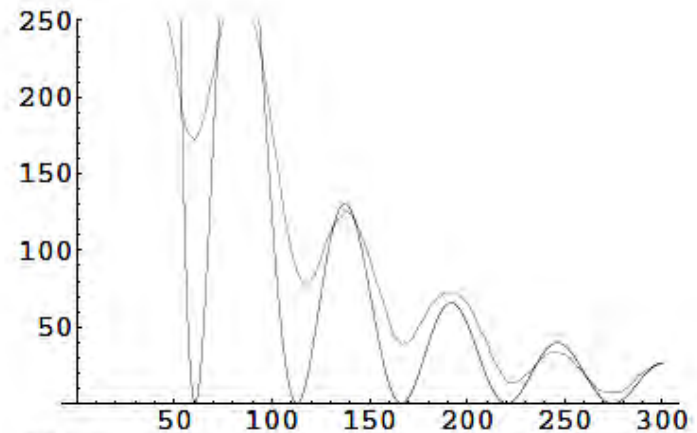
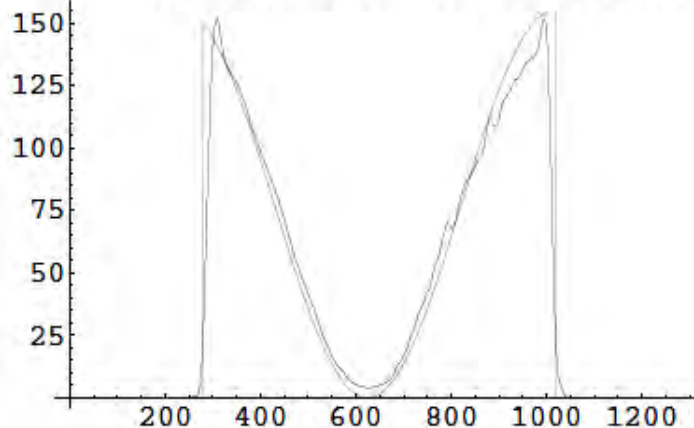
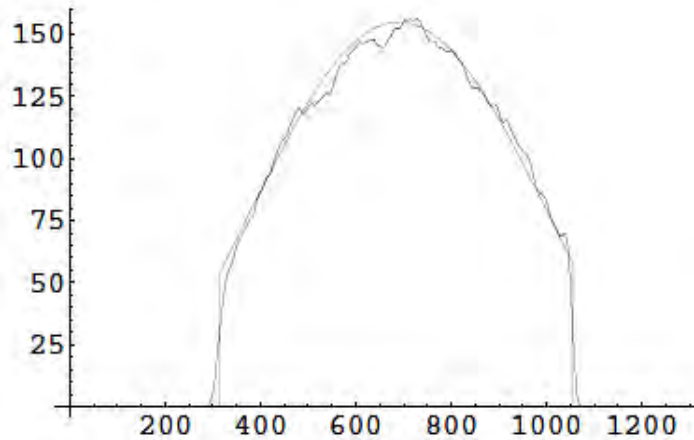


Anti apodisation



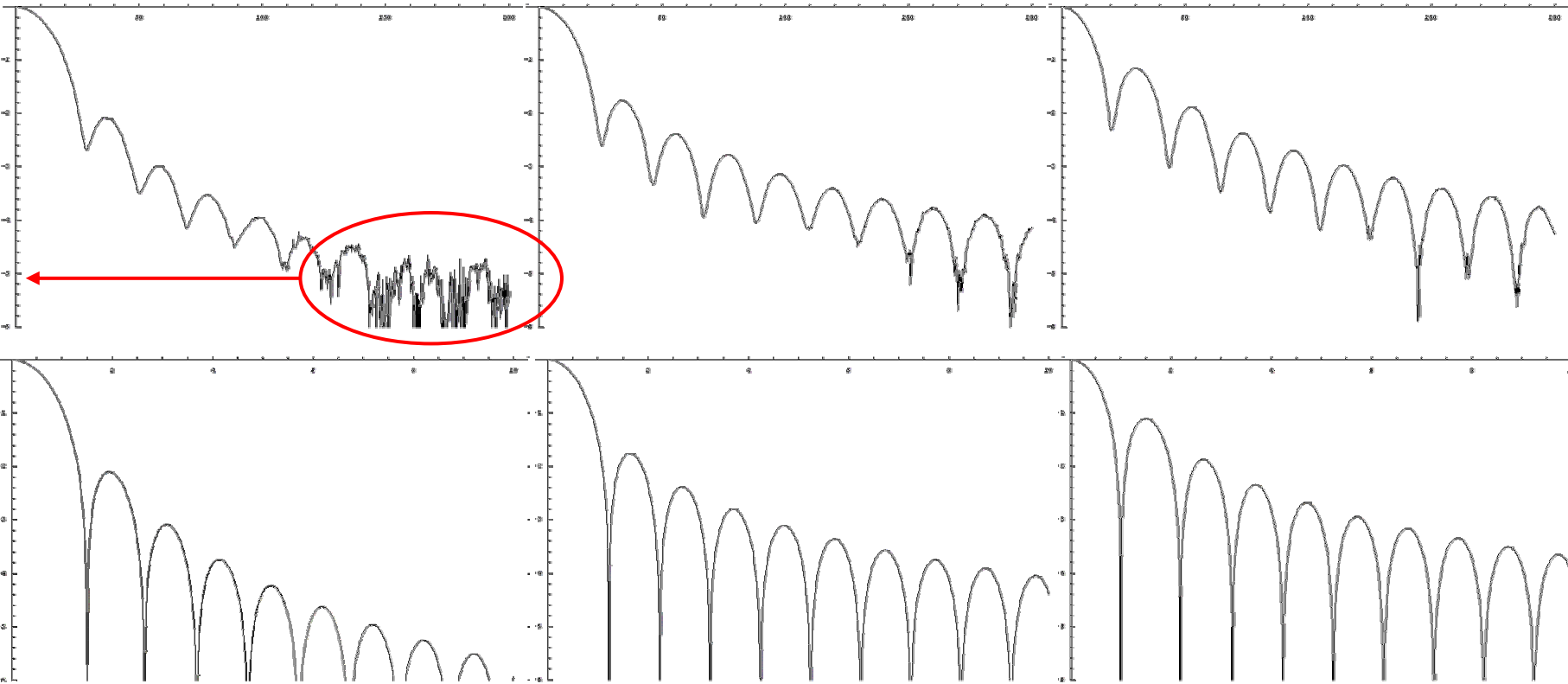
Théorie vs. Expérience

Pupilles et PSF dans le cadre des apodisations 1D



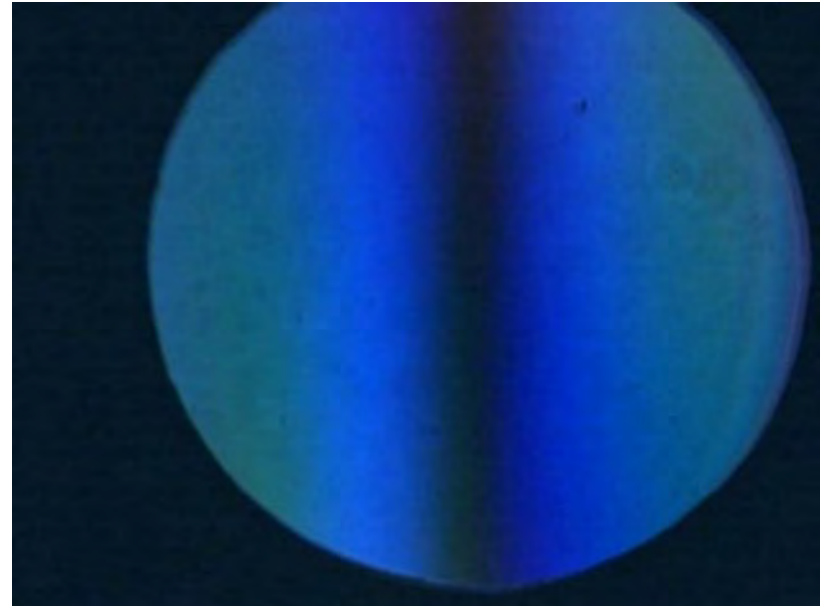
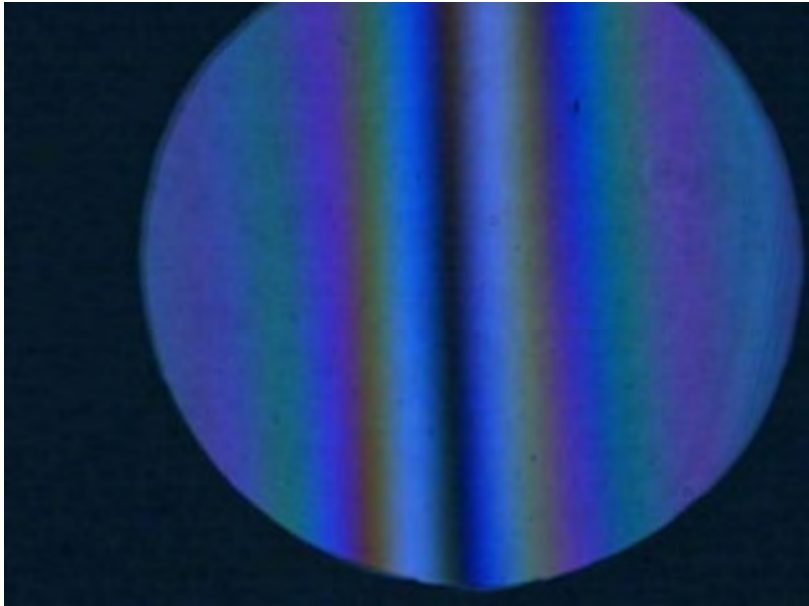
Théorie vs. Expérience

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.

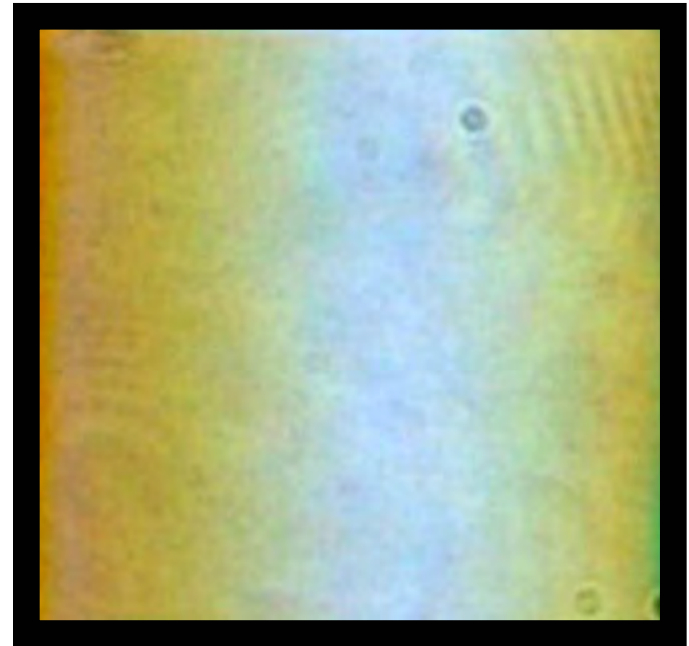
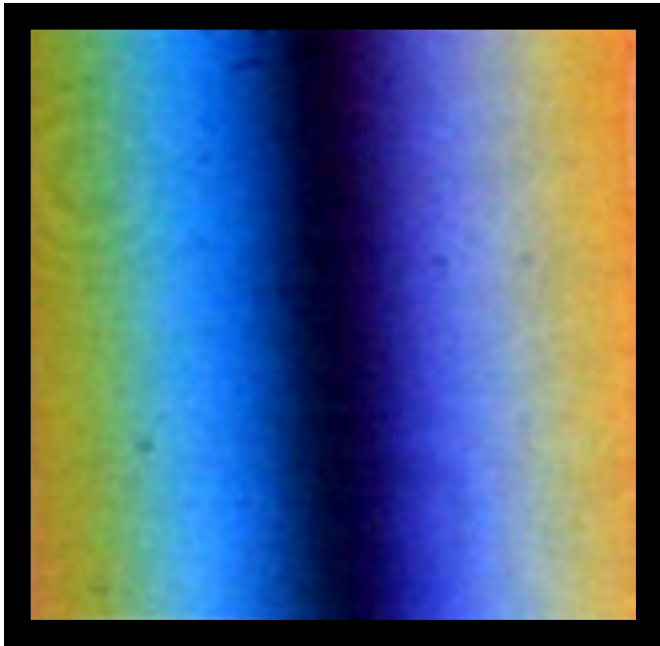


Maîtrise des franges



Apodisation 1D

- En cours...

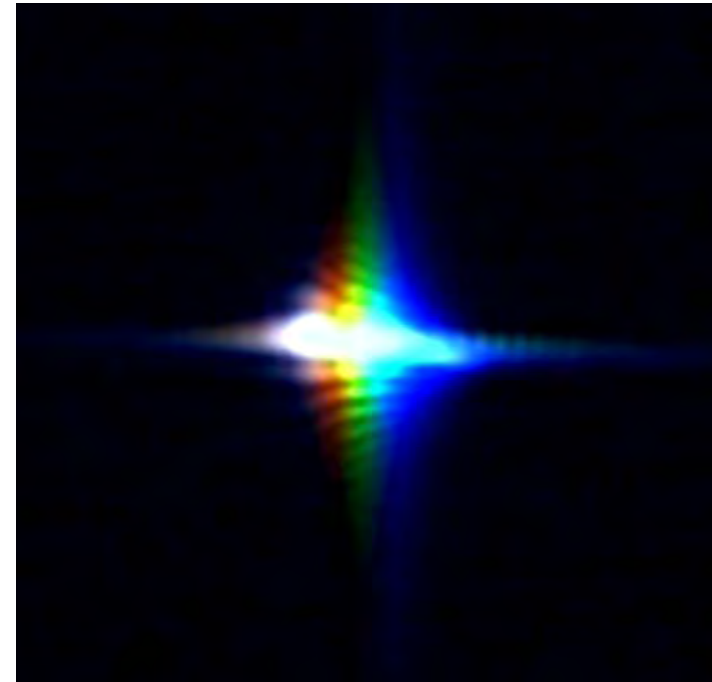


Figures de diffraction



Chromatisme dû à un mauvais alignement des lentilles.

Illustration de la variation de la PSF avec λ .



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’.