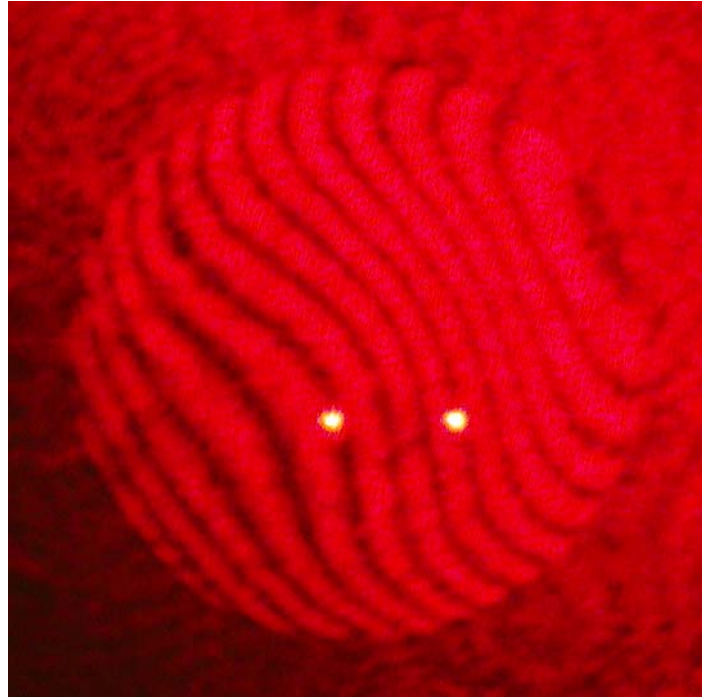


# Démocratiser l'interférométrie



Valdrome août 2007

Rydel\_charles@yahoo.com

# Le test des miroirs de télescope

- La méthode utilisée par 90% des amateurs est celle décrite par Foucault au 19ème siècle.
- Elle consiste à mesurer l'**aberration longitudinale** du miroir.
- A partir de là, un programme informatique calcul la forme de la surface selon une méridienne.

# Pour Foucault

- Ses qualités indéniables :
  - Elle est simple et rapide à mettre en œuvre pour la suite d'un travail/d'une retouche.
  - Elle est généralement accessible à chacun dans un stade où une grande précision n'est pas nécessaire.
  - Enfin, elle est consacrée par l'usage, considération essentielle dans un milieu traditionaliste...

# Contre Foucault

- Ses limites :
  - Son caractère **subjectif**, «expert» dépendant.
  - Son échantillonnage faible rendant invisible certains défauts.
  - Absence de caractérisation de la surface.
  - En particulier l'extrême bord rabattu n'est généralement pas accessible.
  - Nécessité d'un test ultime sur le ciel quand tout est monté.

# Le test des miroirs de télescope

- D'autres méthodes existent :
  - Ronchi
  - Ecran de Hartmann
  - Shack/Hartmann...
- Soit elles sont qualitative (Ronchi),
- soit elles demandent une mise en œuvre peu pratique (masque de Hartmann).
- Soit elles demandent des composants chers ou difficiles à trouver (Shack/Hartmann).
- Alors ?

# Un nouveau test

**...Pourrions-nous espérer faire beaucoup mieux que nos devanciers en utilisant les mêmes moyens ?**

**A.Danjon**

# L'interférométrie

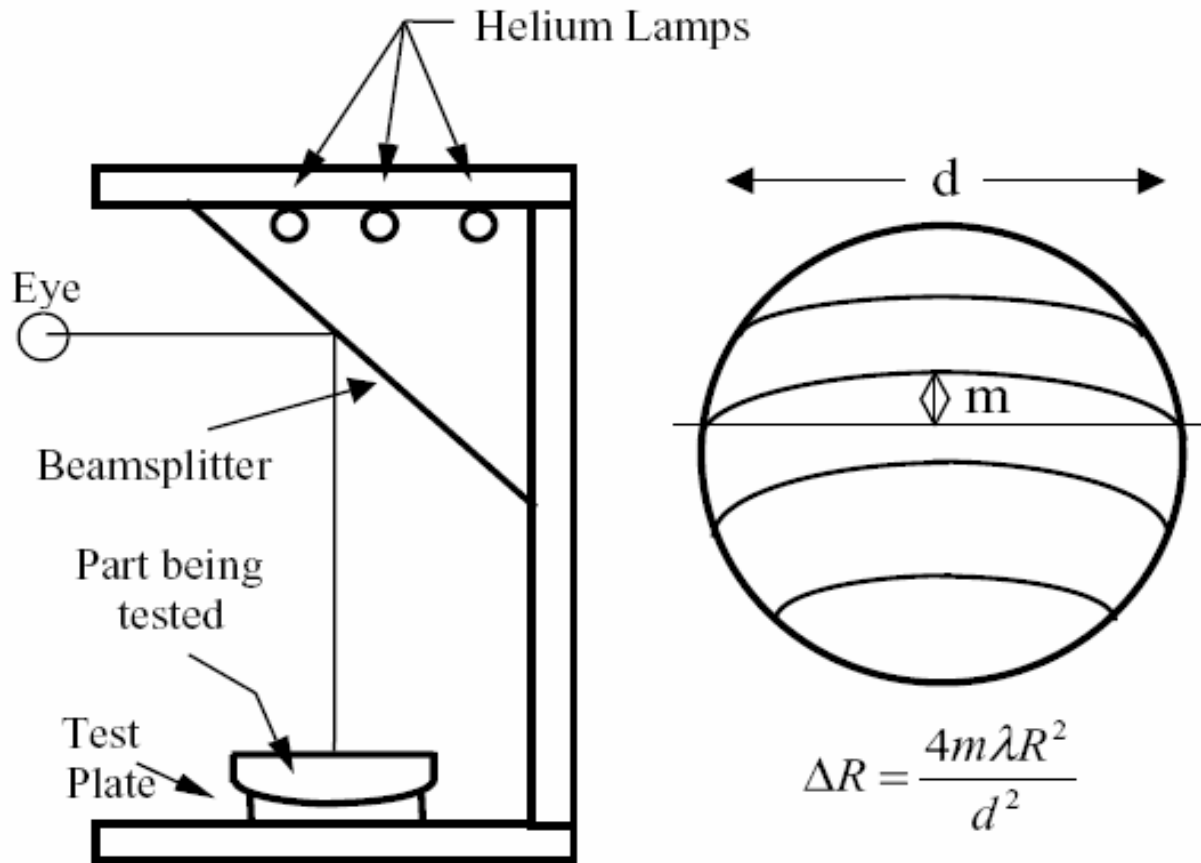
- Newton est le premier à avoir noté l'existence des interférences.
- Au 19ème siècle, l'interférométrie permet des avancées fondamentales en physique avec Michelson, Fizeau(1862) etc.
- Les progrès n'ont pas cessés depuis et l'interférométrie sert couramment à mesurer l'optique (Zigo, Wigo).
- Elle est considérée (à tort) comme le test ultime.

# Interferometry speaks with data !

- L'interférométrie est (relativement) **impersonnel**.
- Elle donne énormément d'information **quantitatives** sur la surface.
- Elle permet accessoirement de recalculer le Foucault
- Des logiciels de calculs gratuits existent.
- Mais !
  - Elle demande un apprentissage
  - Un bon sens/compréhension physique
  - Elle éteint certaines illusions...
- Examinons deux interféromètres utiles

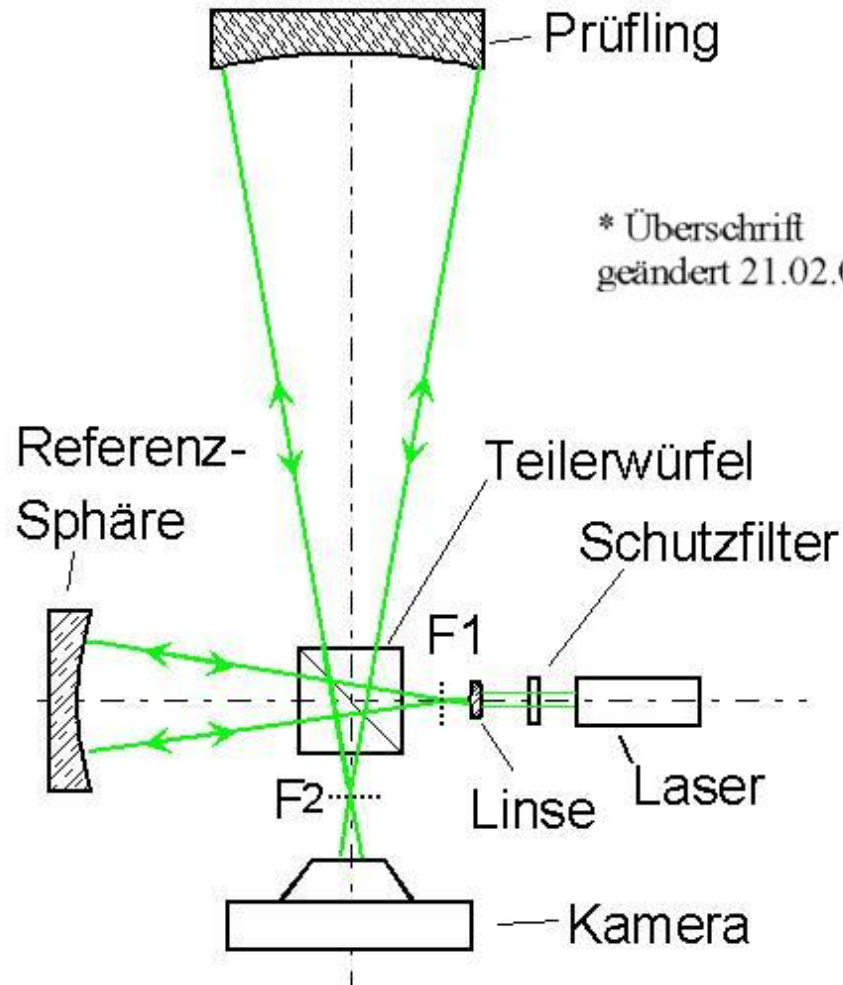


# L'interféromètre de Fizeau



# Michelson Sphérique

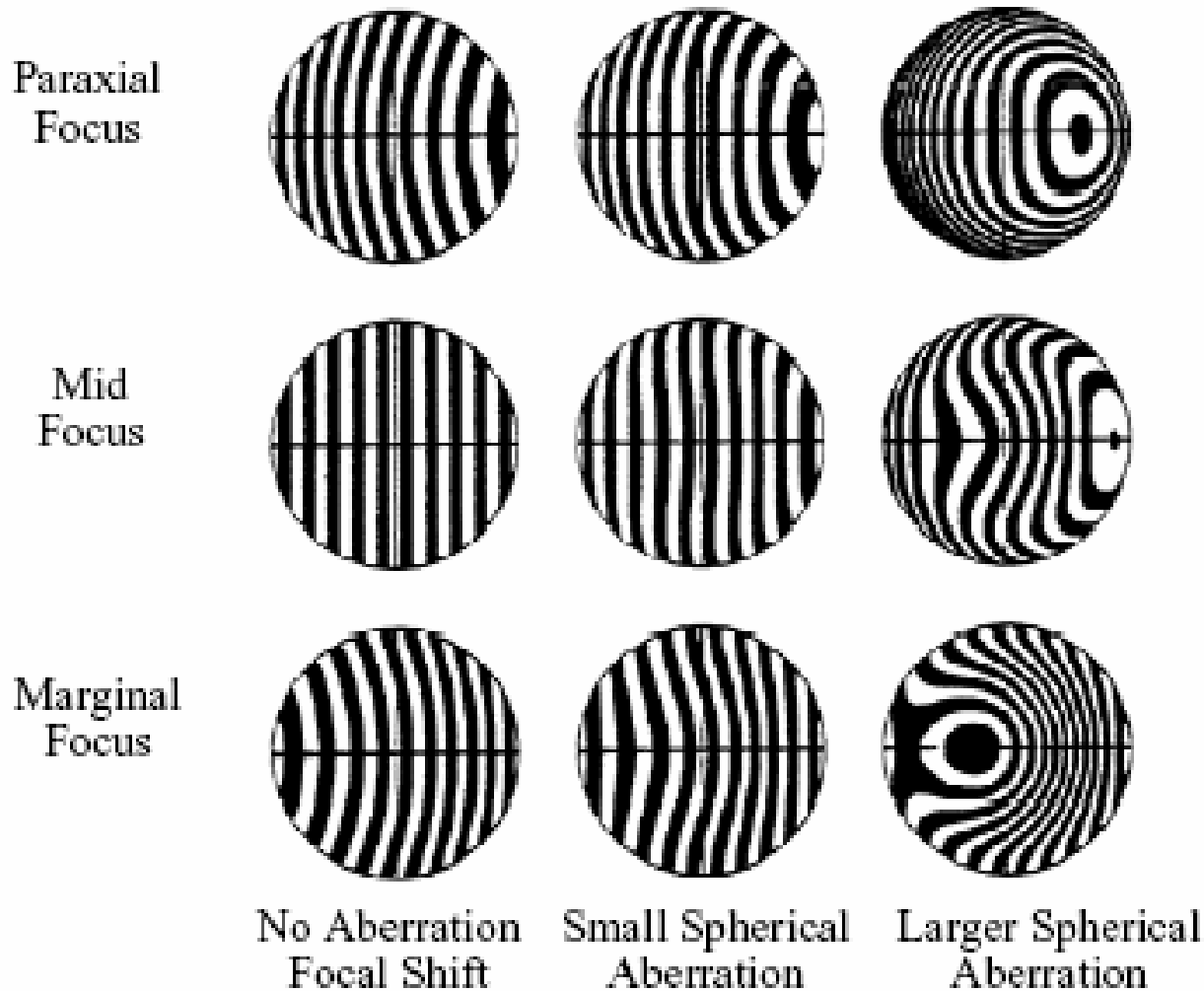
Schema des "etwas anderen" I- Meters  
nach dem Prinzip von Michelson \*



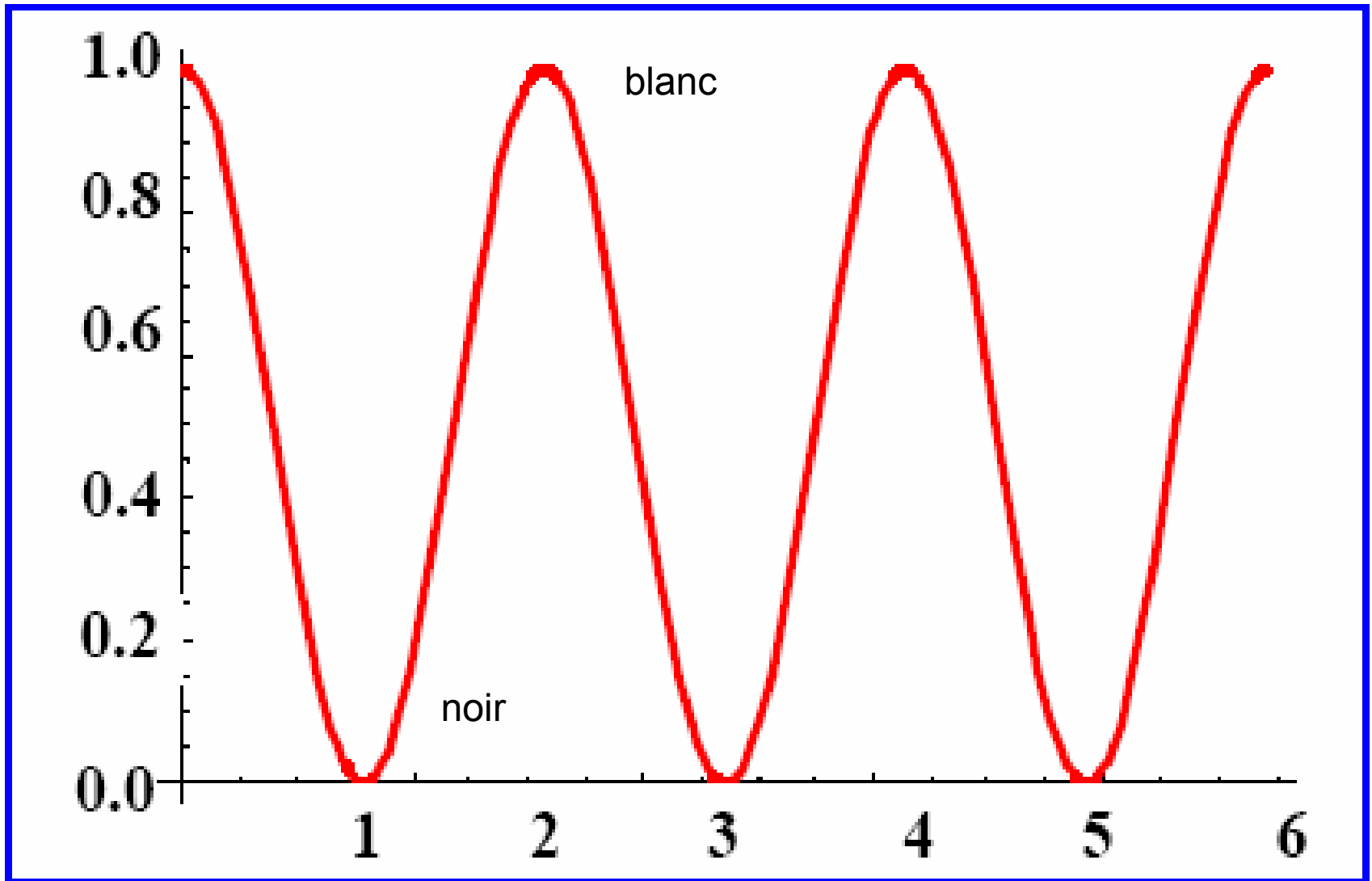
# Deux interféromètres commentés

- Le **Fizeau** est à la base des interféromètres du commerce.
  - Il permet de tester un plan ou une sphère contre une référence de même diamètre.
  - Il existe sous divers formes.
  - Certaines versions sont facilement réalisable par l'amateur.
- Le **Michelson** reste accessible :
  - Il permet de tester des plans, des sphères voire des paraboles très ouvertes **si** la référence est une parabole ou un groupe miroir sphérique + correcteur.
  - La stabilité doit être soignée car les chemins optiques sont orthogonaux.

# Quelques figures d'interférences



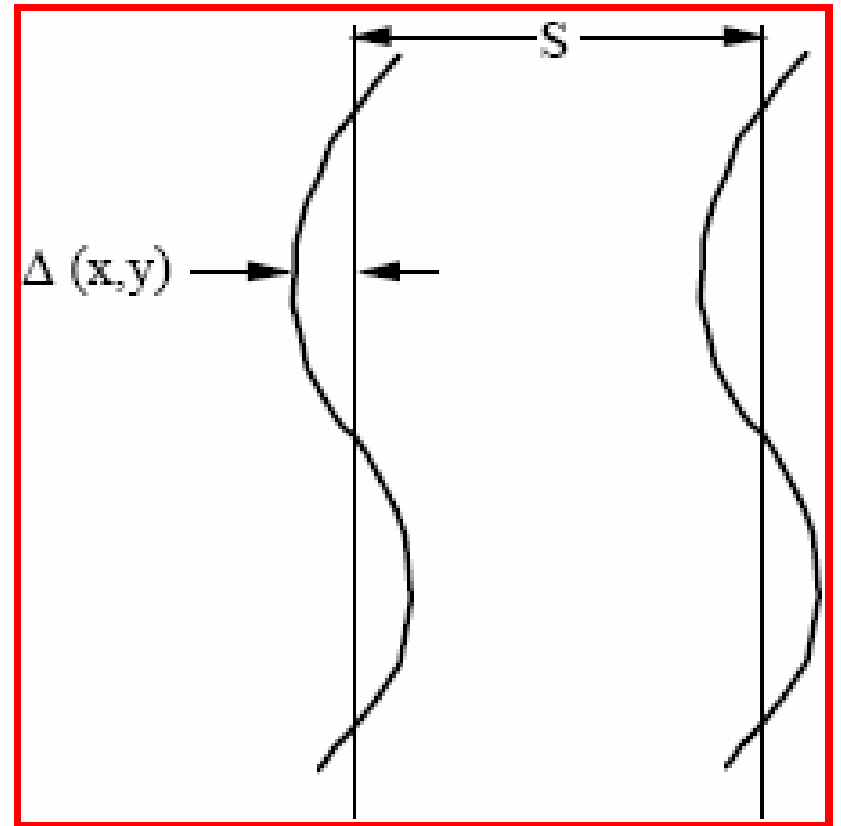
# Intensité des franges



# Calcul de l'erreur avec les franges

- Erreur sur la surface:

$$\left( \frac{\lambda}{2} \right) \left( \frac{\Delta}{S} \right)$$

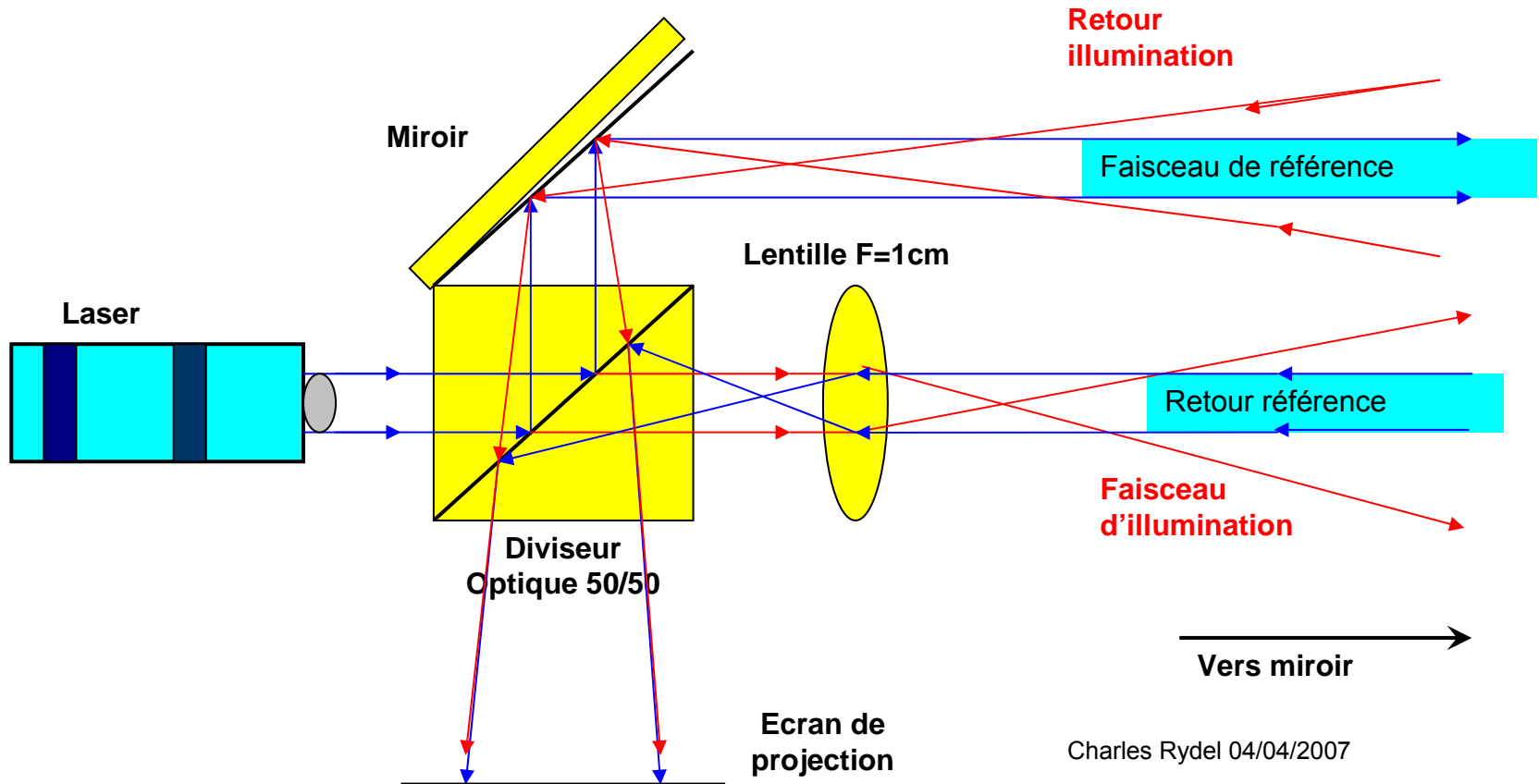


# Démocratiser l'interférométrie

- Tous les interféromètres disposent d'une **surface étalon** auquel ils comparent l'objet à mesurer.
- Cet étalon fait la qualité, le précision et le prix de l'instrument.
- Bath(1972) invente un interféromètre dans lequel la référence est constituée par une petite partie de la surface de **l'objet à mesurer**.
- On supprime ainsi un composant très coûteux !

# Le concept

## Interféromètre de Bath 90°





# Fonctionnement

- L'interféromètre est au rayon de courbure
- **Le cube éclate le faisceau en deux :**
  - Un faisceau de référence (en bleu) qui vient former un point sur le miroir,
  - Un faisceau de mesure (en rouge) qui éclaire tout le miroir car traversant la lentille.
- **Au retour :**
  - Le faisceau de référence bleu passe par la lentille biconvexe et éclaire le cube.
  - Le faisceau de mesure revient au rayon de courbure sur le petit miroir et interfère avec la référence.

# Points à retenir

- Chacun des deux faisceaux parcourt dans les deux directions, les deux chemins optiques.
- Les deux faisceaux accumulent donc les mêmes erreurs (mode commun).
- Celles-ci se soustraient sur le cube.
- Il ne reste donc que les interférences du miroir et du faisceau de référence.
- Les composants n'ont donc pas à être particulièrement précis.

# Réglages

- Écarter la lentille et ajuster le parallélisme des deux faisceaux sortant.
- Remettre la lentille en place.
- Collimater les faisceaux de retour en bougeant la position angulaire du miroir sous test et la position Z de l'interféromètre.
- Les faisceau de retour sont à hauteur de la lentille.
- Bouger l'axe Y jusqu'à ce que **deux taches** lumineuse apparaissent sur la surface réceptrice.
- Ces taches correspondant aux deux faisceaux de retour du miroir sous test.

# Réglages, suite

- En agissant sur les commandes XYZ on **superposera** les deux taches.
- Des franges **doivent** alors apparaître.
- Ces franges sont des figures circulaires qui bougent très rapidement avec le réglage XYZ
- Un détail important :
  - La luminosité des deux taches **doit être identique**.
  - A cette fin, tourner le laser sur son axe car sa lumière ainsi que le cube sont polarisés.

# Détails cosmétiques

- 1) Il y a deux points lumineux sur la surface de visualisation :
  - Pour les éviter, tourner le cube de quelques degrés. Ce sont des reflets parasites du cube.
- 2) L'image peut apparaître spongieuse :
  - Ceci est lié aux poussières sur le cube ou la lentille et à la mauvaise qualité de l'optique du laser.
  - Une bombe à air ou un peu d'alcool sur un coton tige diminuera le problème.

# L'interféromètre de Bath

- Composants :

- Laser semi-conducteur 3-100€
- Deux piles 1,5v(laser rouge) 2€
- Alim 3V & >500mA (laser vert) 15€
- Cube diviseur de faisceau 20€
- Petit miroir première surface ?
- Une lentille D=8-10mm et F=10mm 2€
- Une table XYZ 20-300€
- La certitude que ça va marcher 0€

# Où trouver les composants ?

- SurpluShed.com pour l'optique
- Ebay pour la table XYZ et laser vert
- Conrad Electronic ou RadioSpare pour le reste.

# Choix de la source

- Miroirs non aluminé :
  - Laser vert 20mW
- Miroir aluminé sphérique :
  - Laser vert 5-20mW
  - Laser bleu ou violet quand accessible !
  - Sinon rouge 630-670nm (peut devenir une LED)
- Miroir aluminé parabolique
  - Laser rouge 630-670nm, =>5mw
- LED ou Tungstène filtré pour les lunettes (mesure chromatique des performances).
- Le diamètre de faisceau sera de 2mm environ
- La couleur verte donne la meilleur résolution à cause de la matrice de Bayer des APN.



# Avantages:

- Existence d'un test final très **quantitatif**
- Comme les chemins optiques sont communs il y a peu d'effets thermiques.
- Poly chromatique (tests de lunette apo/achromatiques) avec LED bi/tricolore collimatée.
- Coût de l'ordre de 100€ avec laser vert.
- Le temps de réalisation est court.
- Existence d'un groupe de discussion international sur internet depuis 5 ans

# Limite du Bath

- Différence de marche astigmatique P/V entre les deux faisceaux au rayon de courbure :

$$OPD = \frac{D^2 \cdot d^2}{16 \cdot R^3 \cdot \lambda}$$

- **Exemple 1:** D=200mm, R=2400mm, F/D=6, d=8mm,  $\lambda=0,000633\text{mm}$ .  $1/OPD = \lambda/54,7$
- **Exemple 2:** D=200mm, R=1600mm, F/D=4, d=8mm,  $\lambda=0,000633\text{mm}$ .  $1/OPD = \lambda/16$
- Si d=6mm alors  $1/OPD = \lambda/28$

# Limite du Bath

- On peut réécrire OPD:

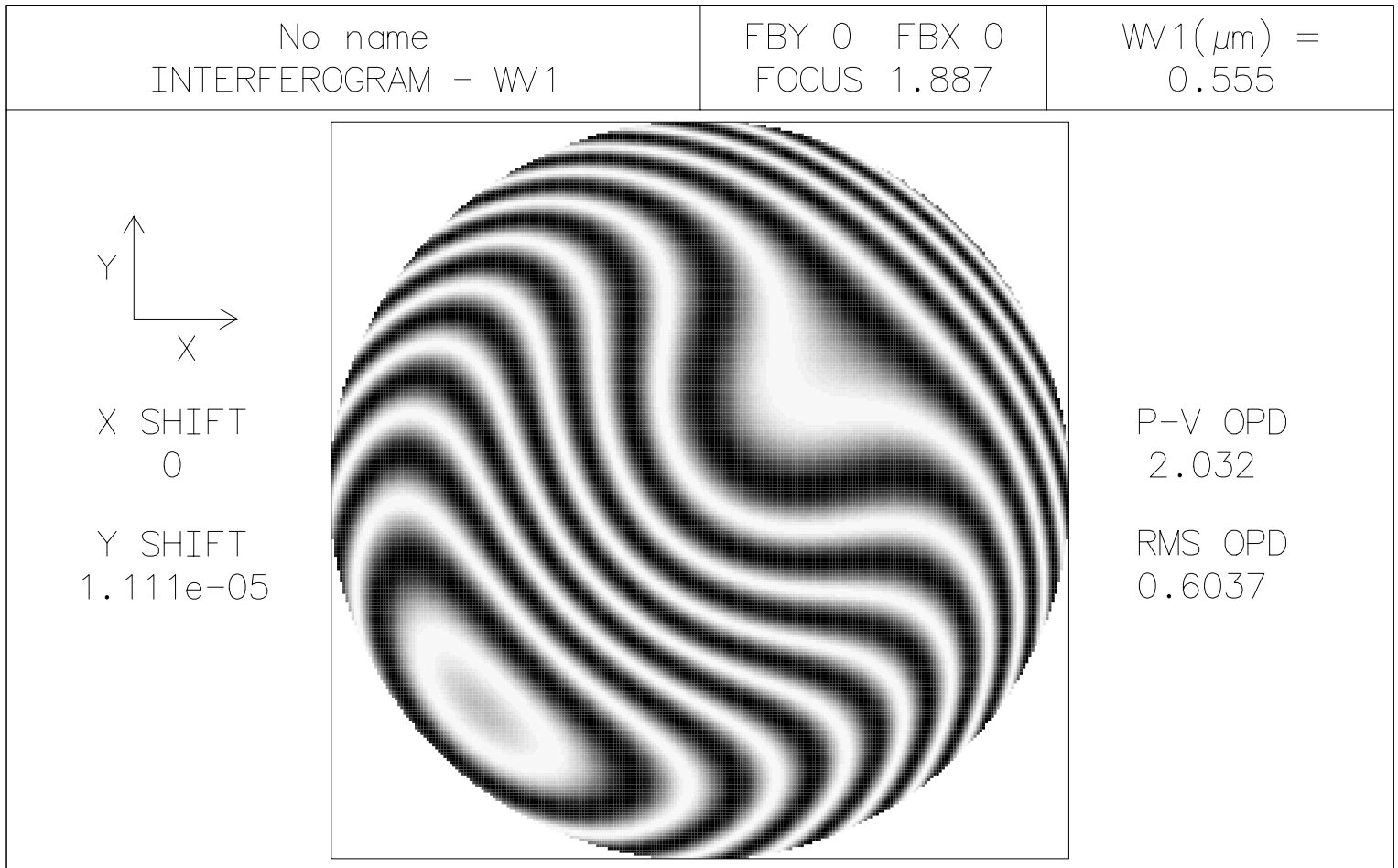
$$OPD = \frac{d^2}{128 \cdot \left(\frac{F}{D}\right)^2 \cdot F \cdot \lambda}$$

- OPD varie inversement avec le carré de F/D pour F constant.
- OPD varie inversement à F si F/D est constant
- Le logiciel OpenFringe calcul (en nm) la valeur de l'astigmatisme à soustraire.

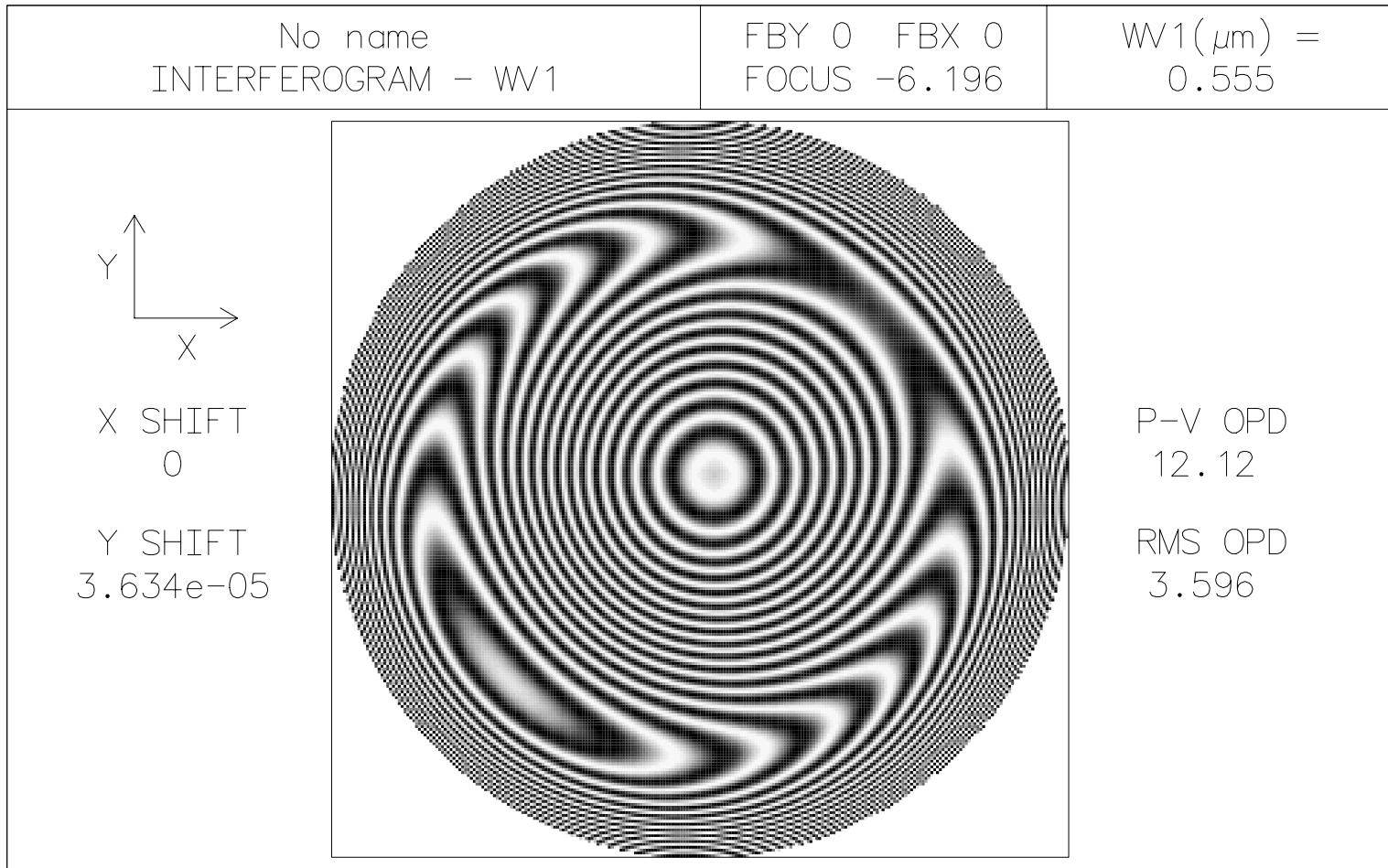
# Quelques résultats $\lambda/\dots$ P/V

(D=8mm; $\lambda$ =555nm)		Diamètre mm				
F/D	150	200	250	300	400	500
3,3	$\lambda/6.2$	$\lambda/8$	$\lambda/10$	$\lambda/12$	$\lambda/16$	$\lambda/20$
4	$\lambda/10.6$	$\lambda/14$	$\lambda/18$	$\lambda/21$	$\lambda/28$	$\lambda/35$
5	$\lambda/21$	$\lambda/27.8$	$\lambda/35$	$\lambda/41$	$\lambda/55$	NO
6	$\lambda/36$	$\lambda/48$	$\lambda/60$	$\lambda/72$	OK	OK

# 500mm F/6: exploitable



# 500mm F/3.3 non exploitable



# Conclusions

- Il convient de satisfaire à deux conditions :

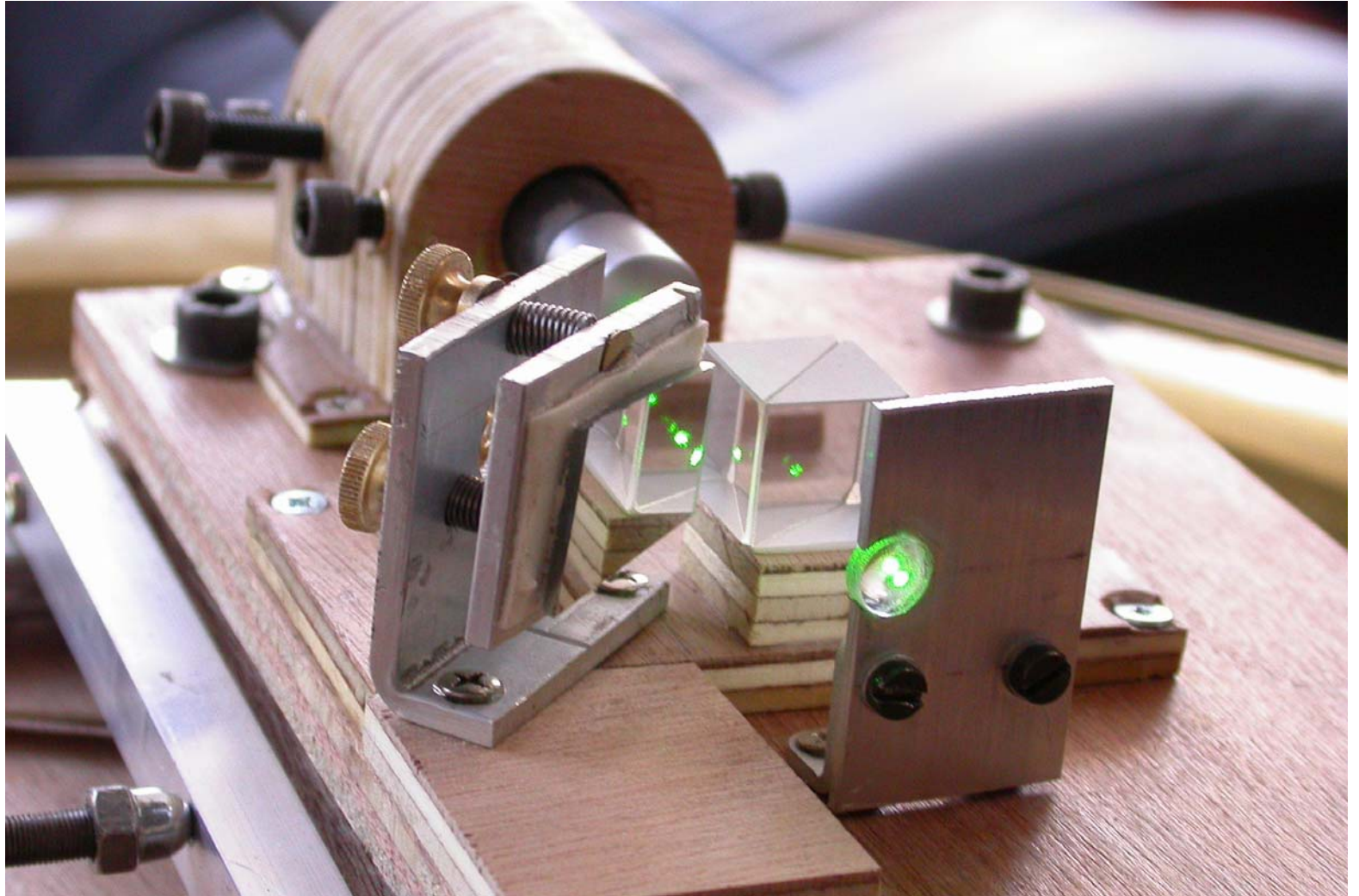
1) L'erreur due à l'astigmatisme doit être  $< \lambda/10$

2) L'interférogramme doit être directement exploitable.  
C'est la zone verte dans le tableau.

3) Les 150 & 200mm F/3.3 sont rattrapable par calcul.  
Pour le reste, il faudra faire appel à l'auto-collimation.  
Dans ce cas,

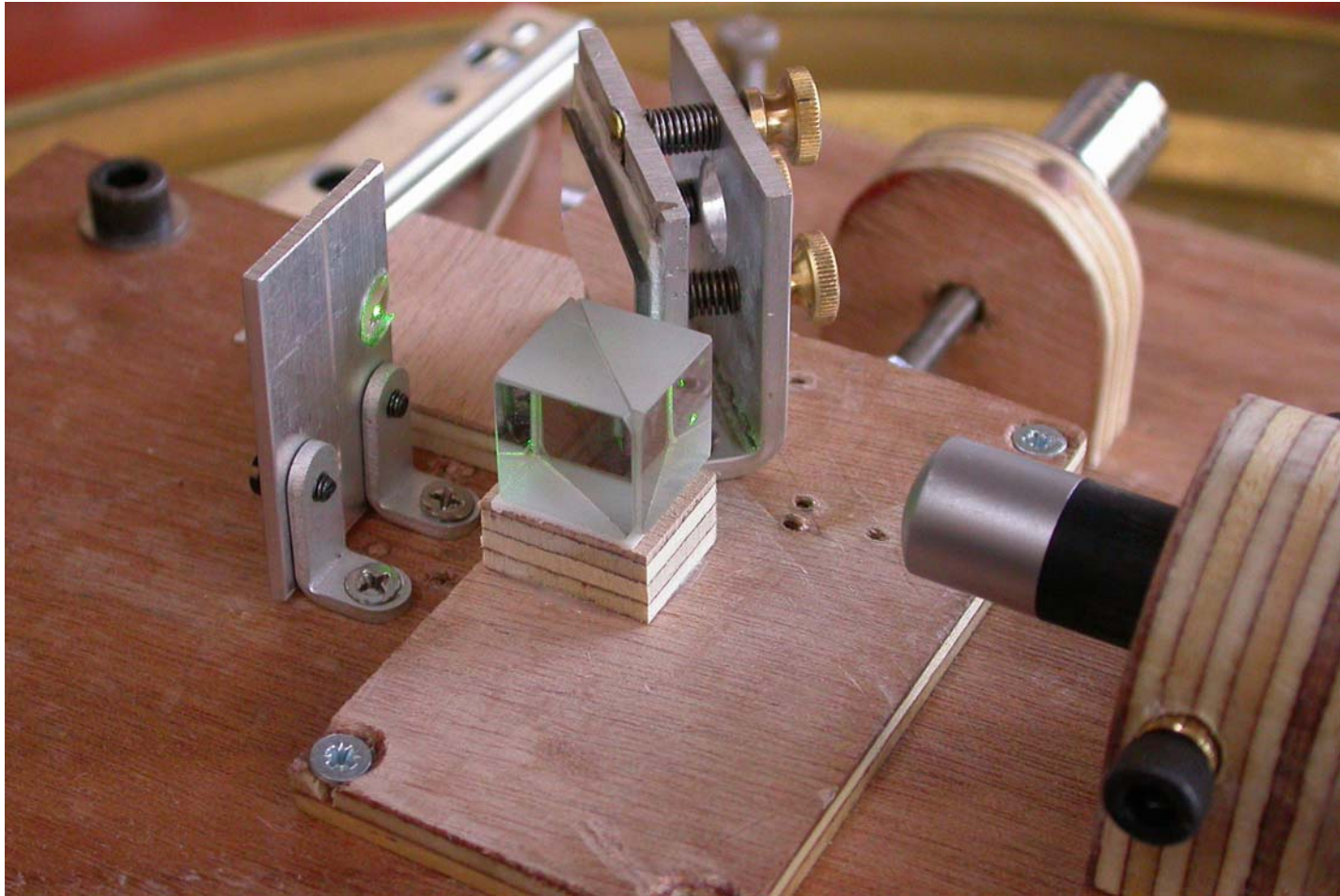
$$OPD = \frac{d^2}{32 \cdot \left(\frac{F}{D}\right)^2 \cdot F \cdot \lambda}$$

# Un exemple de réalisation

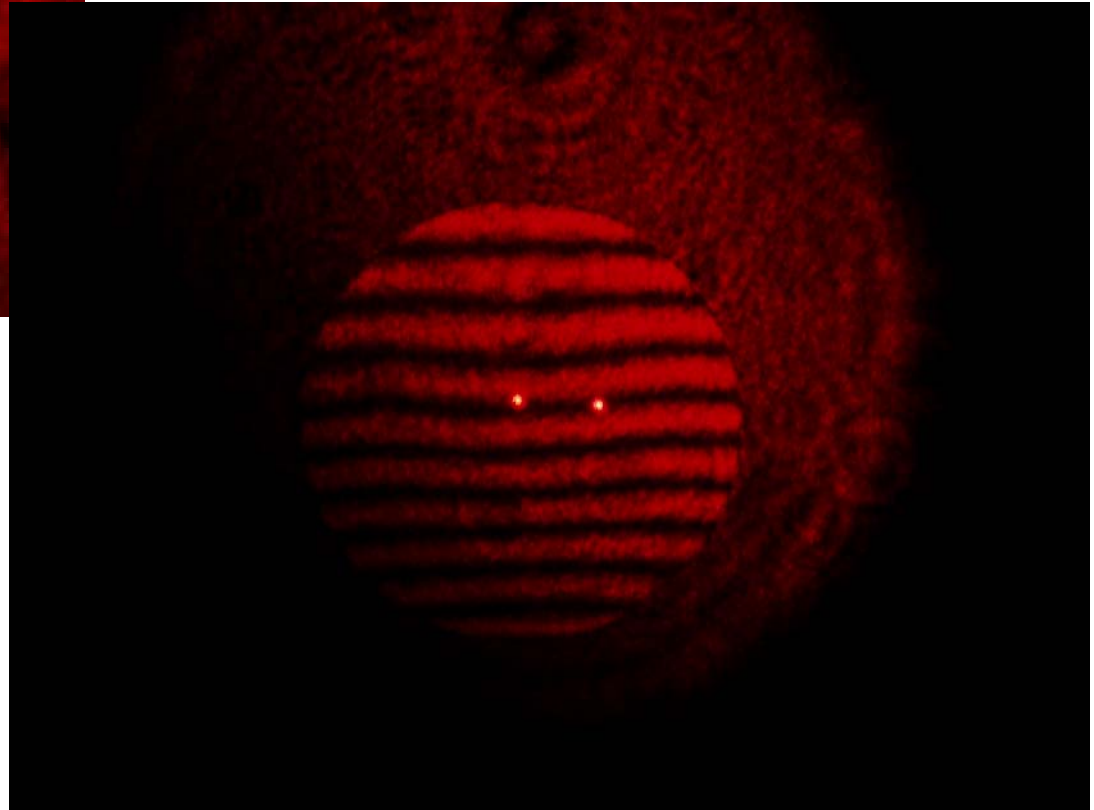
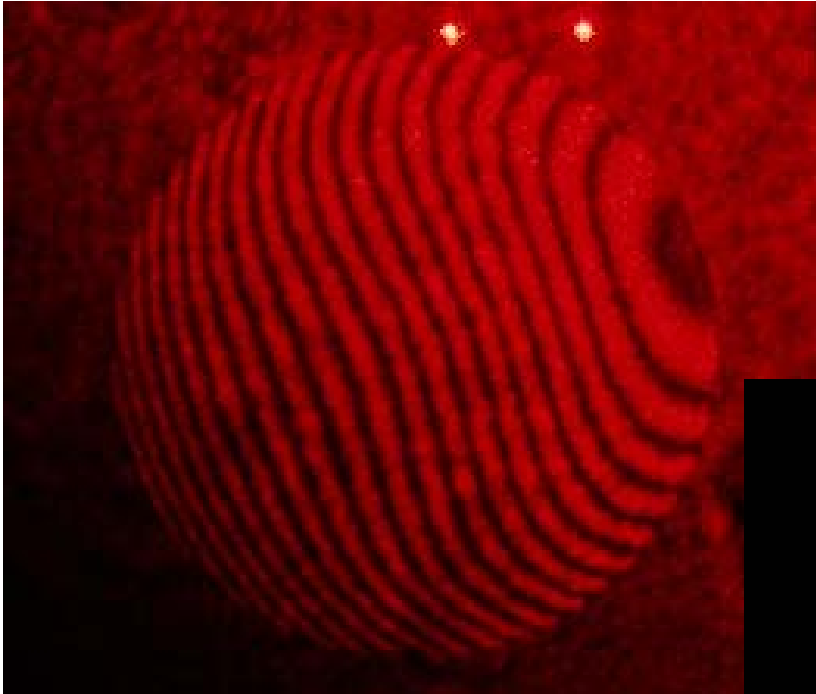




# Suite...



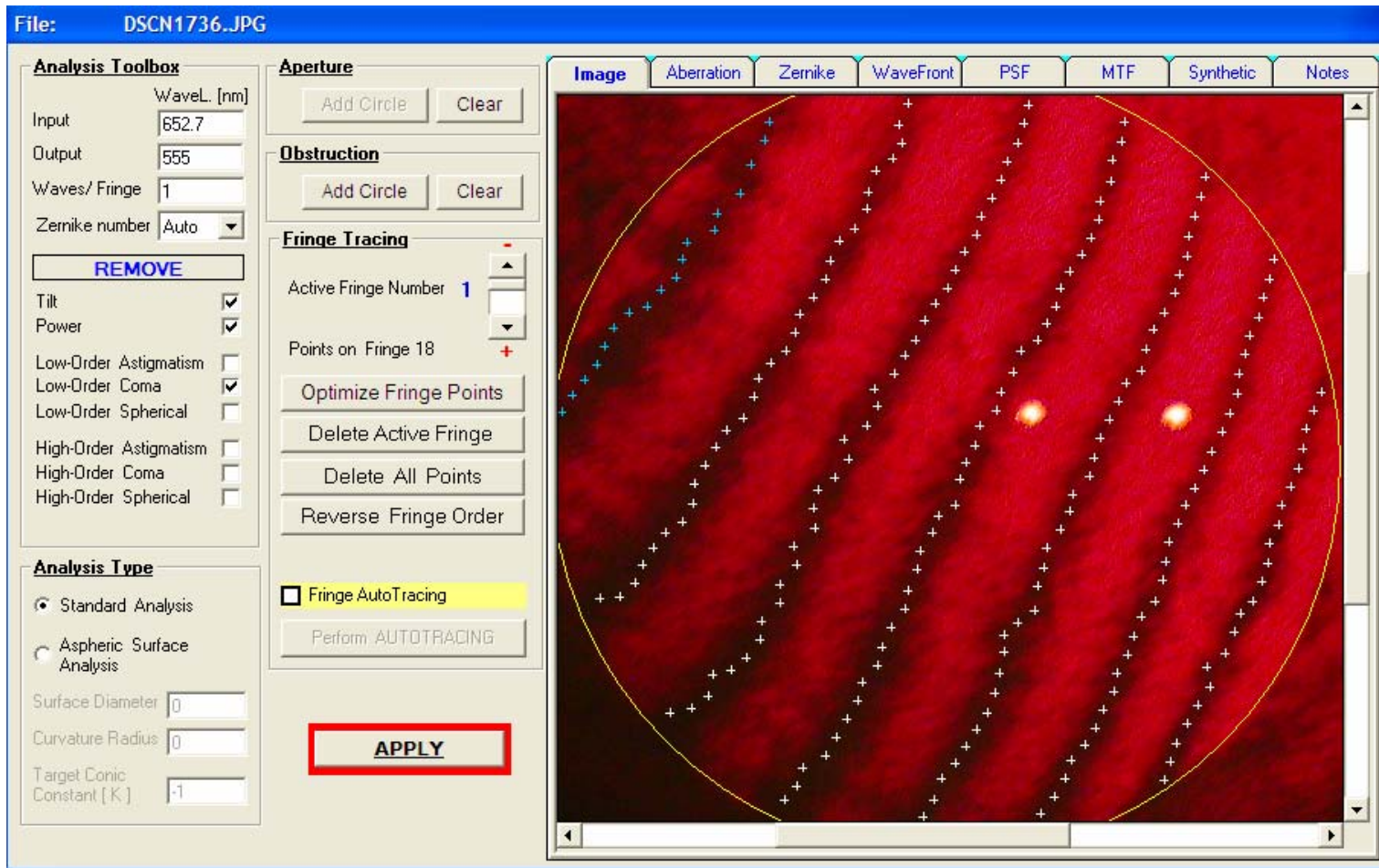
# Parabolique et sphérique



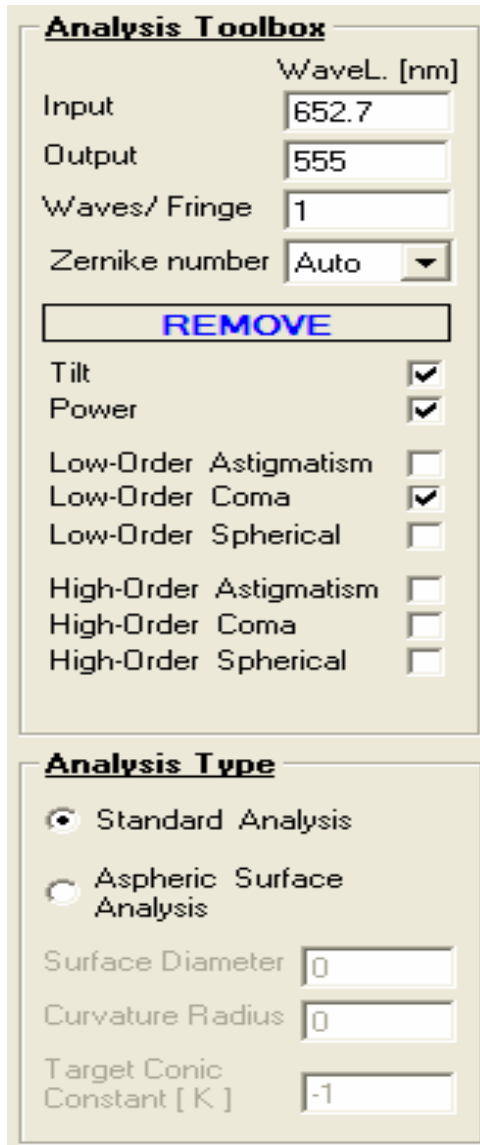
# Analyse des Igrammes

- Les logiciels :
  - OpenFringe
  - FringeXP
  - AtmosFringe
- Ils permettent de calculer divers paramètres
  - P/V
  - Strehl
  - MTF
  - Surface d'onde...

# Exemple d'analyse avec Atmosfringe



# Utilisation de Atmosfringe



The screenshot shows the Atmosfringe software interface, divided into two main sections: "Analysis Toolbox" and "Analysis Type".

**Analysis Toolbox**

- Wavelength (nm): 652.7
- Input: 652.7
- Output: 555
- Waves/ Fringe: 1
- Zernike number: Auto
- REMOVE button
- Tilt:
- Power:
- Low-Order Astigmatism:
- Low-Order Coma:
- Low-Order Spherical:
- High-Order Astigmatism:
- High-Order Coma:
- High-Order Spherical:

**Analysis Type**

- Standard Analysis:
- Aspheric Surface Analysis:
- Surface Diameter: 0
- Curvature Radius: 0
- Target Conic Constant [ K ]: -1

- Input & Output:
  - Longueur d'onde du laser et de l'analyse
  - Il y a une onde par frange.
- Tilt, Power et Coma sont annulés car il n'existe pas
- 

On a affaire à une sphère.

# Utilisation de Atmosfringe

The screenshot shows the Atmosfringe software interface with the following sections:

- Aperture:** Contains two buttons: "Add Circle" and "Clear".
- Obstruction:** Contains two buttons: "Add Circle" and "Clear".
- Fringe Tracing:** Contains a spin control for "Active Fringe Number" (set to 1), a spin control for "Points on Fringe 0" (set to 0), and buttons for "Optimize Fringe Points", "Delete Active Fringe", "Delete All Points", and "Reverse Fringe Order".
- Automation:** A checkbox labeled "Fringe AutoTracing" (highlighted in yellow) and a button labeled "Perform AUTOTRACING".
- Bottom:** A large button labeled "APPLY" with a red border.

- On définit la pupille d'entré
- Les franges peuvent être tracées automatiquement.
- On peut gérer les les points sur les franges.
- Le bouton APPLY réalise tous les calculs.
- Voyons un exemple...

# Utilisation de Atmosfringe

The screenshot displays the 'Aberration' tab in the Atmosfringe software. It features a table of aberrations with columns for the aberration name, its value, the number of waves, and the value in nanometers. The 'PEAK to VALLEY', 'RMS', and 'STREHL RATIO' rows are highlighted in yellow. Below the table, there are input fields for 'Number of fringes' (set to 7) and 'Total Points on Fringes' (set to 219), along with the 'Rms Fit Error (quality of Fit)' (0.035). At the bottom, there is a 'Best Fit Conic Constant' field and a legend for 'Conic Constant (K) range'.

Aberrations	Waves	NanoMeters
PEAK to VALLEY	0.740 [1/1.4 waves]	410.4 nm.
RMS	0.143 [1/7.0 waves]	79.4 nm.
STREHL RATIO	0.446	
TILT	Removed	
DEFOCUS	Removed	
ASTIGMATISM (low-order)	0.658 -4.72 (degree)	365.2 nm.
COMA (low-order)	Removed	
SPHERICAL (low-order)	0.737	408.8 nm.

Number of fringes: 7  
Total Points on Fringes: 219  
Rms Fit Error (quality of Fit): 0.035

Best Fit Conic Constant: [ ]

Conic Constant (K) range:  
K < -1 Hyperbola  
K = -1 Parabola  
-1 < K < 0 Prolate Ellipsoid  
K = 0 Sphere  
K > 0 Oblate Ellipsoid

- La pièce est très astigmatique
- Cela est du probablement à la distance entre les deux faisceaux
- Supprimons l'astigmatisme...

# Utilisation de Atmosfringe

File: DSCN1736.JPG

**Analysis Toolbox**

WaveL. [nm]  
 Input: 652.7  
 Output: 555  
 Waves/ Fringe: 1  
 Zernike number: Auto

**REMOVE**

Tilt   
 Power   
 Low-Order Astigmatism   
 Low-Order Coma   
 Low-Order Spherical   
 High-Order Astigmatism   
 High-Order Coma   
 High-Order Spherical

**Analysis Type**

Standard Analysis  
 Aspheric Surface Analysis

Surface Diameter: 0  
 Curvature Radius: 0  
 Target Conic Constant [K]: -1

**Aperture**

Add Circle Clear

**Obstruction**

Add Circle Clear

**Fringe Tracing**

Active Fringe Number: 1  
 Points on Fringe: 18

Optimize Fringe Points  
 Delete Active Fringe  
 Delete All Points  
 Reverse Fringe Order

Fringe AutoTracing  
 Perform AUTOTRACING

**APPLY**

Image **Aberration** Zernike WaveFront PSF MTF Synthetic Notes

PEAK to VALLEY	0.263	[1/3.8 waves]	145.7 nm.
RMS	0.059	[1/17.0 waves]	32.7 nm.
STREHL RATIO	0.872		
TILT	Removed		
DEFOCUS	Removed		
ASTIGMATISM (low-order)	Removed		
COMA (low-order)	Removed		
SPHERICAL (low-order)	0.737		408.8 nm.

Number of fringes: 7  
 Total Points on Fringes: 219  
 Rms Fit Error (quality of Fit): 0.035

**Best Fit Conic Constant**

Conic Constant (K) range

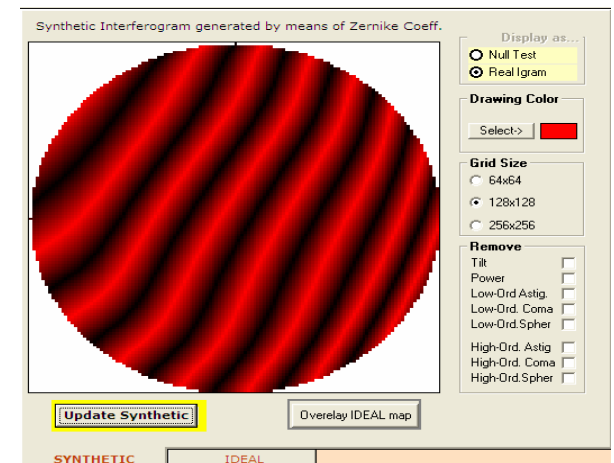
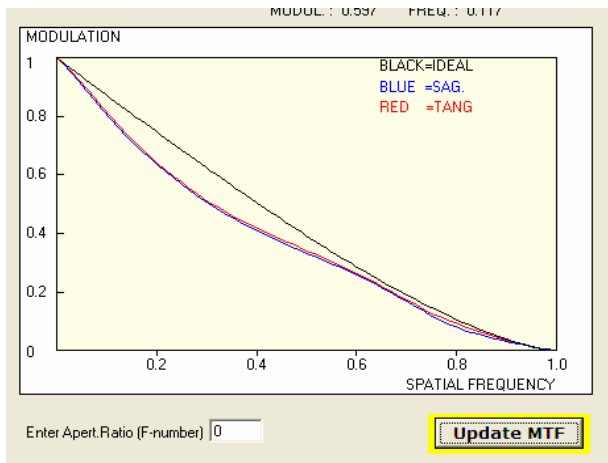
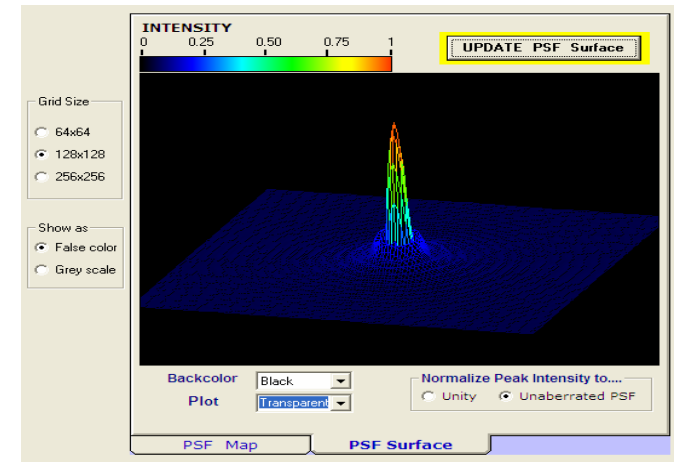
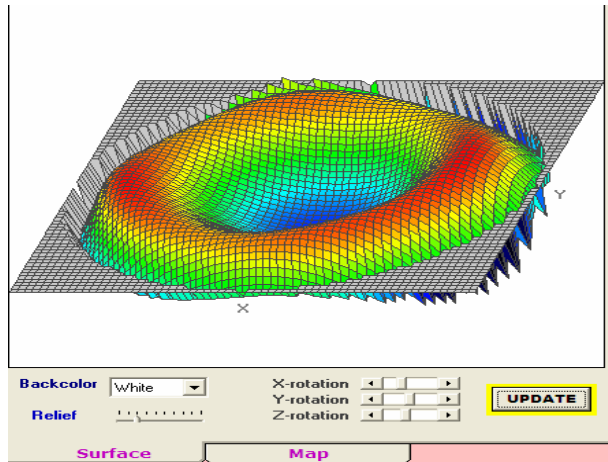
K < -1 Hyperbola  
 K = -1 Parabola  
 -1 < K < 0 Prolate Ellipsoid  
 K = 0 Sphere  
 K > 0 Oblate Ellipsoid



# Utilisation de Atmosfringe

- On est presque à  $\lambda/4$
- Examinons plus précisément les performances...
- Front d'onde
- MTF
- PSF
- Interférogramme synthétique

# Utilisation de Atmosfringe



# Conclusions

- L'interférométrie donne énormément de renseignements sur les performances réelles de l'optique.
- Elle est objective mais demande des précautions.
- Les limites pour les paraboles ont été précisées.
- Le coût du Bath le met à la portée de chaque amateur, de chaque club.
- Il ne remplace pas le Foucault mais l'un et l'autre se complèteront harmonieusement.

# Utilisation de Atmosfringe

# Utilisation de Atmosfringe