

Table ronde optique amateur francophone  
4 et 5 mars 2026 à 19h

## **Premiers essais avec la fonction de transfert optique différentielle**

Faire une image des aberrations d'un télescope ou d'une optique  
uniquement à l'aide d'une caméra

Alain Spang

@barbidule! sur le discord ASTRO-FR  
@a s p 0 6 sur les forums d'Astrosurf

# Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h

Ce à quoi un télescope peut se résumer :

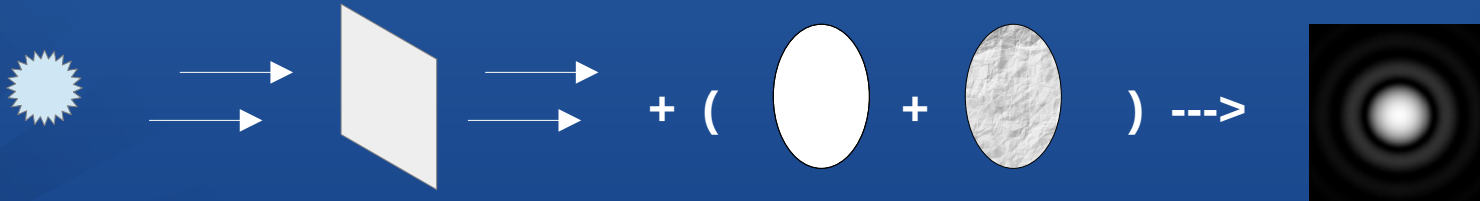
une pupille d'entrée, des aberrations à sa sortie et un foyer!

Un télescope est une succession d'une ou plusieurs ouvertures, par exemple celle des montures de ces optiques.

L'ouverture qui limite le plus la lumière arrivant au *foyer* du télescope, est la *pupille d'entrée* : [https://media4.obspm.fr/public/ressources\\_lu/pages\\_instruments-lunette/instru-lunette-pupille.html](https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_instruments-lunette/instru-lunette-pupille.html)

Individuellement les optiques ont des défauts de réalisation ou liés à l'usure et entre elles des défauts d'alignements et de positionnements. Ces défauts sont appelées *aberrations* et sont exprimées en fonction de la longueur d'onde de la lumière (« lambdas »).

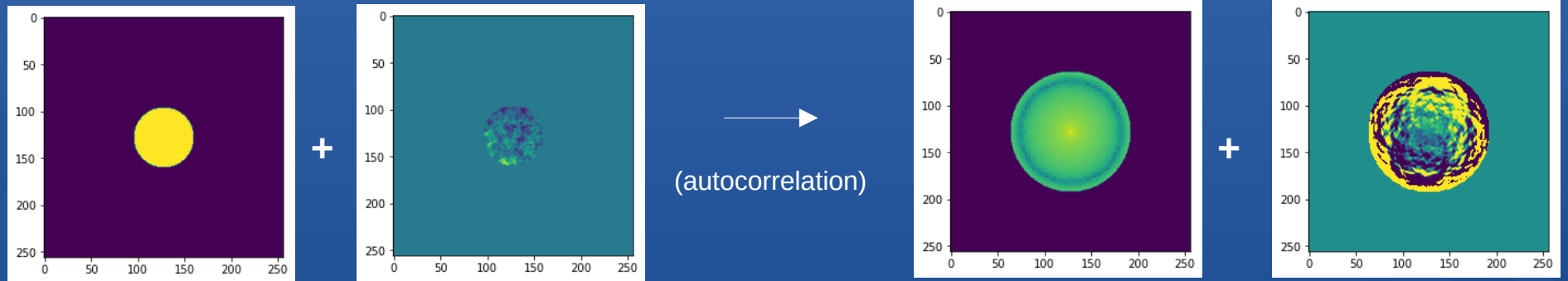
Généralement les aberrations sont caractérisées par rapport à la pupille d'entrée.



# Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h

la fonction de transfert du télescope est un objet mathématique (résultat d'une "autocorrelation") liant directement la pupille d'entrée et ses aberrations.

Elle exprime comment est restituée par l'observation l'information représentée par une étoile ("ponctuelle et non résolue").



Pupille d'entrée

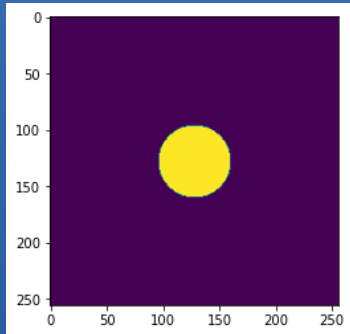
Aberrations

Module

Phase

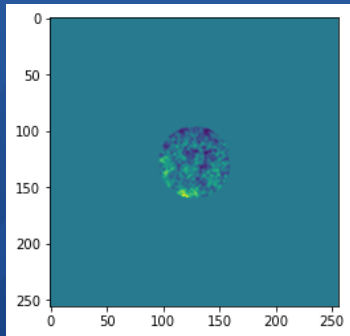
On remarque que la phase d'une seule fonction de transfert montre déjà des détails intrigants...

# Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h



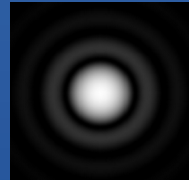
Pupille d'entrée

+



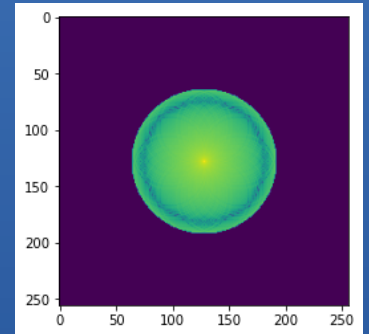
Aberrations

transformée  
de  
Fourier **optique**



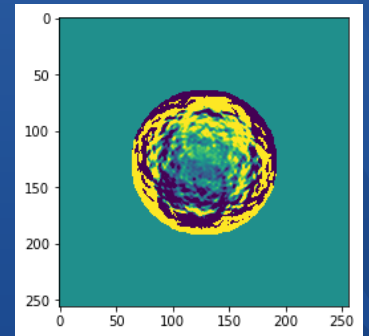
transformée  
de  
Fourier **numérique**

Il est possible de calculer numériquement  
la fonction de transfert optique du télescope  
à partir d'une image de sa tache de diffraction



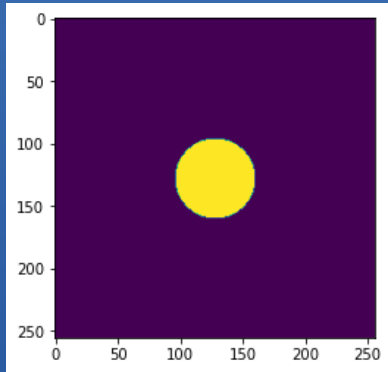
Module

+

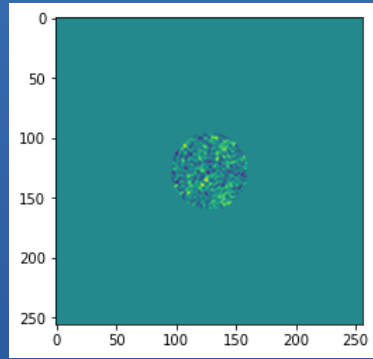


Phase

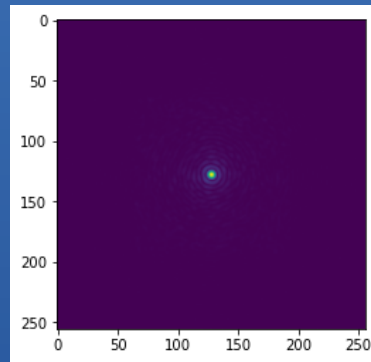
# Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h



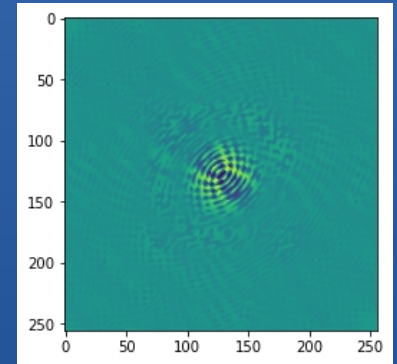
+



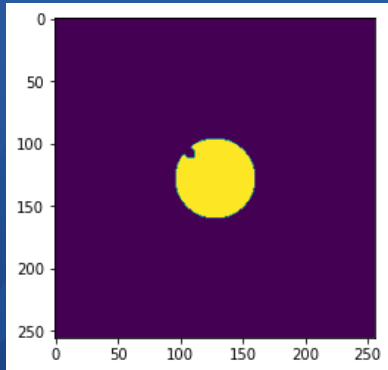
=>



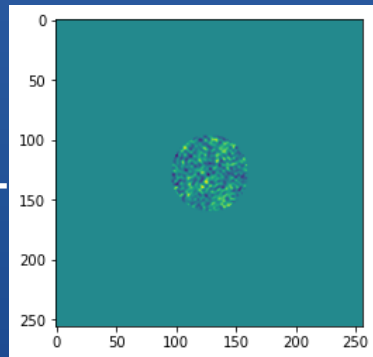
> -



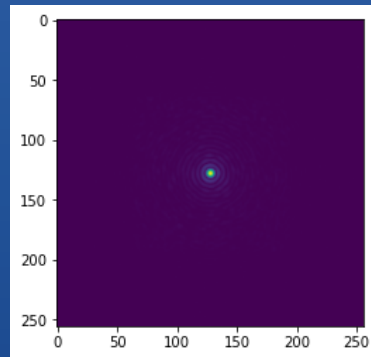
La modification est visible  
dans la différence des  
images des taches de  
diffraction



+

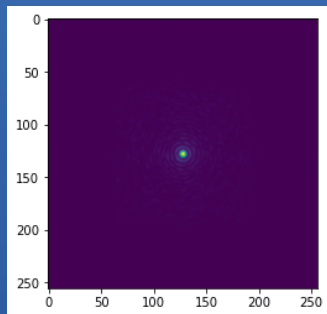


=>

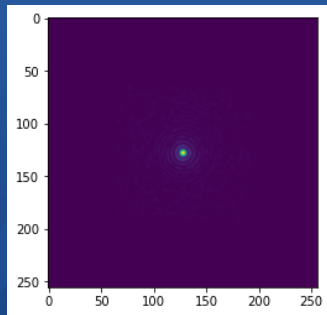


La pupille est modifiée au bord

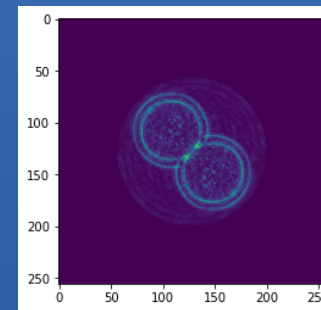
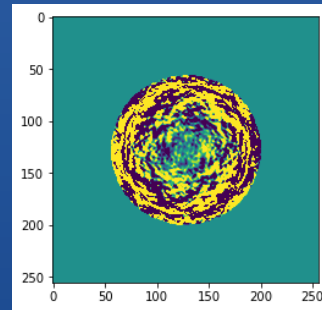
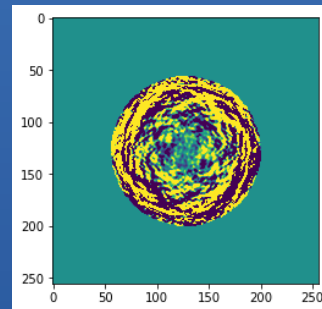
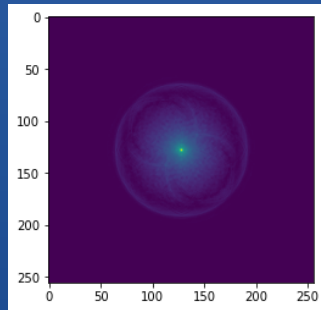
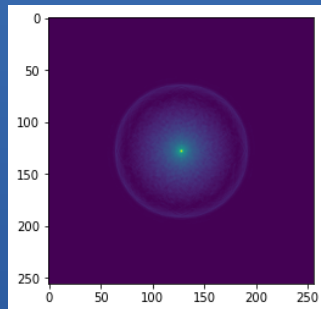
# Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h



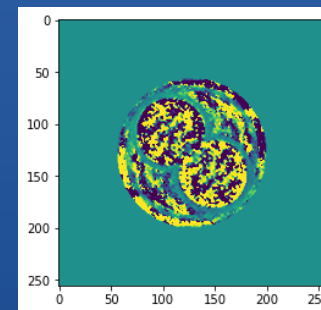
(on repart des deux  
taches de diffraction de  
la diapo précédente)



transformée  
de  
Fourier **numérique**  
(x2)



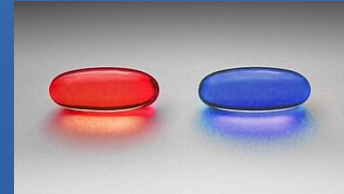
différence des modules:  
pupille x 2



différence des phases:  
aberrations x 2

## Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h

La fonction de transfert optique différentielle (FTOd ou dOTF en anglais) est limitée aux petites aberrations ( $<1\lambda$ )



Utilisations possibles:

- À l'atelier, contrôle au centre de courbure de miroirs (a)sphérique mais peu déformés.
- À l'atelier, contrôle d'un instrument en autocollimation sur un plan, évaluation possible des défauts liés au chromatisme.
- Sur le ciel, contrôle d'un instrument destiné à la haute résolution, comparaison de configurations (différentes barlow, impact des filtres ou de l'adc).
- Sur le ciel, caractériser la collimation selon la direction pointée (flexions instrumentales).

La mise en oeuvre implique quelques contraintes ...

## Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h

L'échantillonnage de la tache de diffraction pour la FTOD, :

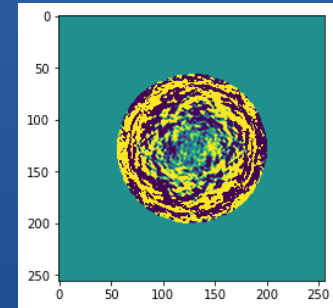
- 1) en théorie deux pixels par  $\lambda*f/D$  suffisent, en pratique il faut viser le double ou plus mais alors, numériquement, la FTOD devient de plus en plus petite.

La solution c'est d'augmenter la taille de l'image.

- 2)  $\lambda*f/D$ , c'est la largeur à mi hauteur de la tache de diffraction et elle est très petite, environ  $6,5\mu$  à  $f/D \sim 10$  dans le rouge, il faut avoir de petits pixels !

- 3) pour espérer commencer à détecter les aberrations de moyenne fréquence spatiale il faut enregistrer plusieurs anneaux de diffractions, voir solution en 1) ...

Pour respecter ces critères, l'échantillonnage surtout, on peut insérer une barlow ou un oculaire mais il faut mesurer l'influence de cet ajout dans la chaîne optique et éventuellement le retrancher aux résultats.



## Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h

Pour avoir un bon rapport signal à bruit dans la mesure, il faut avoir beaucoup de signal!

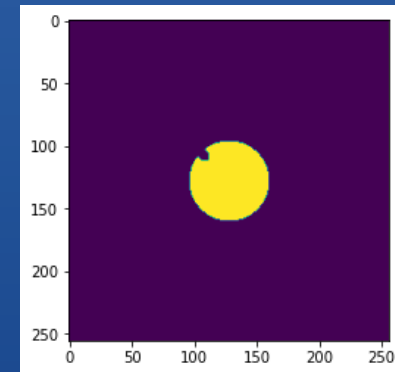
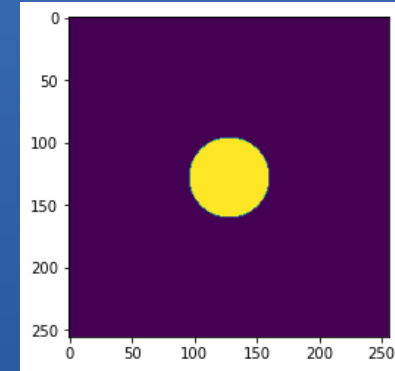
Malheureusement nous faisons une soustraction entre deux grandeurs quasi identiques et le signal de FTOd ne vient que de la petite surface de la première ouverture qui a été occultée au bord de l'ouverture de la seconde.

Pour ne pas rendre le résultat final trop flou, il faut viser une modification de l'ouverture qui ne représente que 1% de la surface totale de cette dernière.

Conséquence: il faut empiler beaucoup d'images d'une même tache de diffraction, des milliers ou plus encore, pour obtenir une mesure peu bruitée.

Avantage: on réussit ainsi à moyenner la turbulence sur le ciel comme dans l'atelier.

Inconvénient: les disques durs se remplissent à toute vitesse...



## Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h

Caractéristiques désirables de la source:

- la source doit être quasi ponctuelle (non résolue) et intense pour conserver un temps de pose court.

à l'atelier ou pour une étoile artificielle à quelques dizaines de mètres on peut prendre une fibre monomode telecom FC/UPC alimentée par une diode rouge intense (le laser n'est pas vraiment nécessaire, c'est selon la précision finale désirée).

Sur le ciel on prends une étoile à une grande élévation, vers le zenith et on utilise un filtre rouge.

- la source doit être stable mais comme pour la turbulence, le remède c'est le nombre d'images.

Le flux du testeur de fibre à bas prix est fluctuant même avec des piles neuves...



Table ronde optique amateur francophone  
4 et 5 mars 2026 à 19h

Les réglages de caméra :

- **Pas de gamma !** La réponse de la caméra doit être linéaire, sinon on ne sait pas ce qu'on mesure.
- Pas de coupure du fond (clipping) à l'enregistrement, on a besoin de tout le signal.
- un temps de pose court (<20ms) pour figer la turbulence sur le ciel comme à l'atelier.
- un format d'images enregistrées aussi brut que possible.
- ni dark, ni flat (youpi!) mais idéalement plus de 8bits de profondeur de numérisation.
- on mets l'étoile au milieu du capteur pour éviter des surprises au moment de l'empilement des images individuelles (shift and add).
- **on ne modifie aucun réglage entre les deux séries d'images, seule la modification de la pupille est introduite !**

Cela ressemble à de l'imagerie planétaire sauf que : **il ne faut pas mettre de gamma.**

## Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h

Dans l'exemple "d'atelier" qui suit:

- Le miroir de télescope aluminé, imparfait, vient d'un newton vixen des années 80.

Il a un diamètre de 135mm et une focale de 720mm.

- la caméra est monochrome au format 4K (3960 x 2160) avec des pixels de  $2\mu$ .

elle est réglée pour délivrer des images 1000 x 1000 sur 12bits qui sont enregistrées au format raw (format le plus simple, brut).

- la fibre monomode alimenté par un testeur de fibre laser est au centre courbure du miroir à deux fois la distance focale, de même pour la caméra à ses cotés.

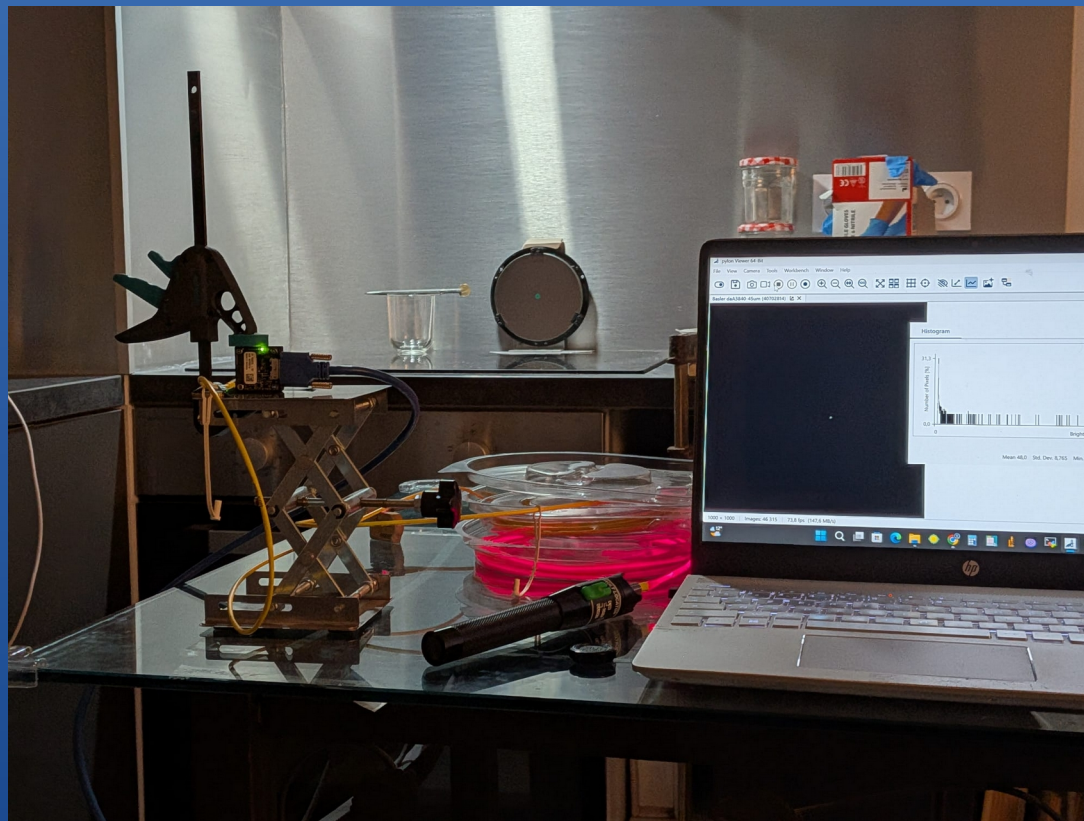
- la largeur à mi-hauteur de l'étoile est de 3,5 pixel, c'est peu.

- la meilleure solution de modification qui a été retenue, est l'introduction d'une pile bouton par le coté, pour une surface occultante d'environ 0,7% de la surface du miroir à tester.

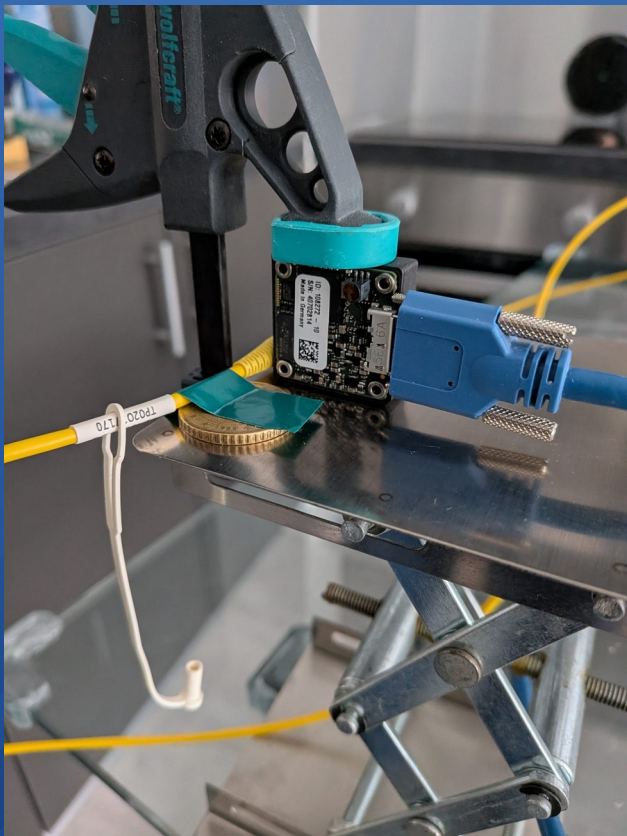
## Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h

Coin cuisine élevé au rang  
d'atelier d'optique:

- plaque de cuisson-table optique  
(en fait ça vibre beaucoup)
- table de cuisine/ translation  
linéaire (le moins pire du  
montage)
- table élévatrice ali-express, ne  
plus toucher une fois réglée.
- serre joint pour fixer la caméra
- fibre optique monomode avec  
laser rouge
- pc qui ventile donc qui vibre ...
- courants d'air bien visibles sur  
la vidéo en temps réel.



# Table ronde optique amateur francophone 4 et 5 mars 2026 à 19h



À gauche détail du calage et de la fixation de la fibre



Trois exemples de modifications au bord de l'ouverture optique

# Table ronde optique amateur francophone

## 4 et 5 mars 2026 à 19h

Mon script python qui lit les images, les empile et calcule la FTOd. Cette dernière est enregistrée dans un fichier .wft pour DFTFringe.

The image shows a Jupyter notebook interface with a Python script on the left and its execution output on the right. The script, named `dotf_discord.py`, processes two images (`im1` and `im2`) to calculate the Fringe Transfer Operator (FTO) difference (`dotf`). It includes steps for image loading, ROI selection, Fourier Transform (FT), and phase extraction. A window titled "Selection wft ('enter' si ok)" is overlaid on the script, showing a grayscale image of two bright spots with a white rectangular selection box around them. The Jupyter notebook output shows the execution of `runfile` and the resulting `dotf` values: `4999 5000.0 100.02` and `5000 5001.0 100.02`. The console also displays instructions: "Select a ROI and then press SPACE or ENTER button! Cancel the selection process by pressing c button!".

```
img_type = np.uint16 # daA3840-45um 4k raw 12 bits / 2 bytes
bpp = 2 # bytes per pixel
i_mx = 4095. # pixel saturation
im1 = glob(base+'Basler_daA3840-45um_4070')
im2 = glob(base+'Basler_daA3840-45um_4070')

# image size roi, swap h and w <- np.from
w = 1000
h = 1000
count = w * h * bpp

nbpx = 256 # puissance de 2, taille de ROI
chkbd = -2. * (np.indices((nbpx,nbpx)).sum

psf1 = shift_add_pond(im1, count, i_mx) # e
psf2 = shift_add_pond(im2, count, i_mx) # e

psf1 -= np.median(psf1)
psf2 -= np.median(psf2)

otf1 = np.fft.ifft2(psf1 * chkbd) * chkbd
otf2 = np.fft.ifft2(psf2 * chkbd) * chkbd

tmp = np.log(np.abs(otf1) + 1.)
tmp[nbpx//2,nbpx//2] = np.min(tmp)
# iok = tmp > np.sqrt(np.mean(tmp**2))
iok = tmp > np.mean(tmp)
plt.matshow(iok.astype(np.float16), fignum=1)

k = np.min(np.abs(otf1[iok]/otf2[iok]))
otf2 *= k

dotf = otf1 - otf2
```

In [140]: runfile('/home/voyageur/dotf/dotf\_discord.py', wdir='/home/voyageur/dotf')  
4999 5000.0 100.02  
5000 5001.0 100.02  
Select a ROI and then press SPACE or ENTER button!  
Cancel the selection process by pressing c button!

# Table ronde optique amateur francophone

## 4 et 5 mars 2026 à 19h

Le fichier .wft du script précédent est chargé dans DFTFringe qui apporte beaucoup de fonctionnalités qui ne sont plus à recoder.

asp/ essai12b.wft

Diameter: 135.000  
 Roc: 1440.000

Wavefront RMS at 550.0 nm: **0.206**

Strehl: **0.186**

Best Fit Conic: **-0.000**

Desired Conic: -1.00 SAnull: -0.4457  
 Waves Per Fringe: 1.0  
 Igram laser wavelength: 650.00 nm

recompute    Disable ALL

Enable Spherical only

Zernike Values

Zernike Term	ant	RM
Piston	<input type="checkbox"/>	0.006...
X Tilt	<input type="checkbox"/>	-0.031...
Y Tilt	<input type="checkbox"/>	0.028...
Defocus	<input type="checkbox"/>	0.042...
X Astig	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.023...
Y Astig	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.011...
X Coma	<input type="checkbox"/>	0.004...
Y Coma	<input type="checkbox"/>	0.016...
Spherical	<input checked="" type="checkbox"/>	0.446...
X Trefoil	<input checked="" type="checkbox"/>	0.013...
Y Trefoil	<input checked="" type="checkbox"/>	0.013...
X 2nd ...	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.002...

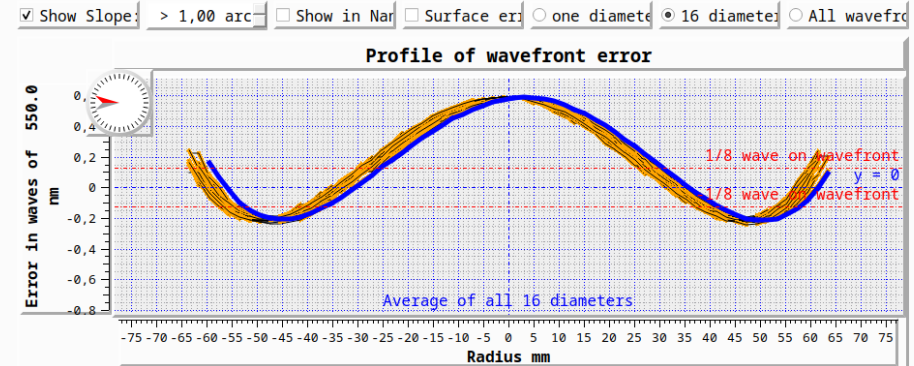
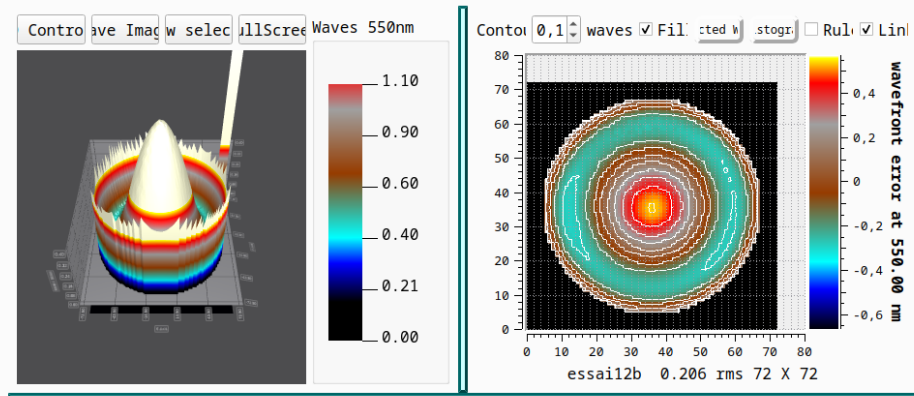


Table ronde optique amateur francophone  
4 et 5 mars 2026 à 19h

Comparaison Bath versus FTOD :

Strehl 0,149 / 0,186

lambda RMS 0,220 / 0,206

Spherical 0,516 / 0,446

Les valeurs ne correspondent pas exactement mais il n'y a pas le même nombre de mesures (quelques milliers pour le Bath, quelques dizaines pour la FTOD)

le diamètre et la position de la FTOD sont mal déterminés dans le script python, c'est également une cause majeure d'erreur.

Table ronde optique amateur francophone  
4 et 5 mars 2026 à 19h

La FTOd est un nouvel outil pour les amateurs mais tout ou presque est à explorer.

C'est un outil qui est complémentaire aux précédents, avec de nouveaux cas d'usages.

Le développement logiciel est à faire mais on peut s'appuyer sur l'existant (DFTFringe) pour ne pas tout réinventer.

Pour les anglophones curieux de connaître les fondements de cette méthode :

“Differential optical transfer function wavefront sensing”, Johanan L. Codona

(librement accessible en ligne, chez l'éditeur ou via scholar)