

Stage Master 1 Physique Fondamentale et Application

---

# Optimisation numérique d'un coronographe pour l'imagerie directe d'exoplanètes avec le télescope DAG

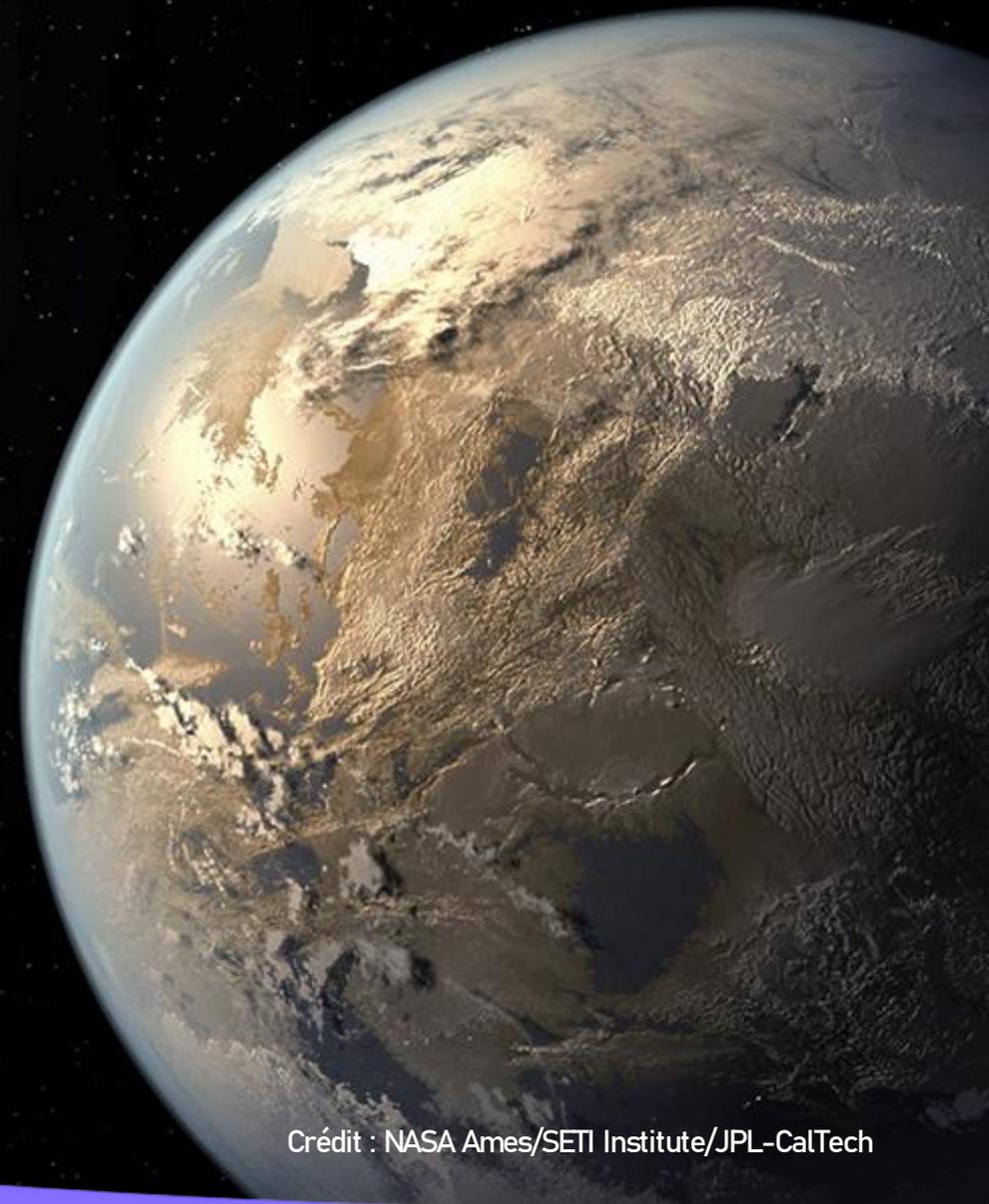
Hugo FRALIN

Sous la tutelle de Axel POTIER et Raphaël GALICHER

Crédit : Photo par J-M. Astesana, sous licence CC BY-SA 2.0

# Le contexte

---



Crédit : NASA Ames/SETI Institute/JPL-CalTech

# L'imagerie d'exoplanètes

→ Deux contraintes majeures : RAPPORT DE LUMINOSITÉ EXOPLANÈTE / ÉTOILE + FAIBLE SÉPARATION ANGULAIRE

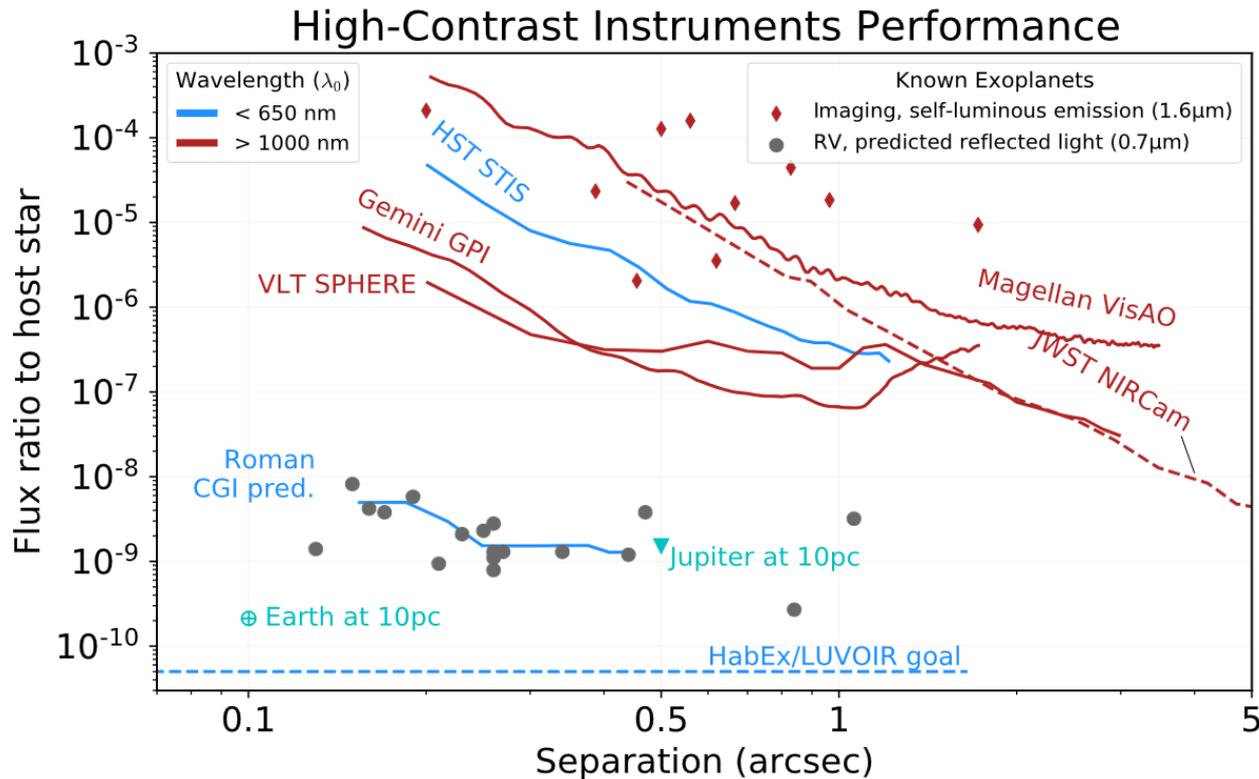


Figure 1 - Galicher et Mazoyer (2024)

Besoin d'améliorer les techniques actuelles d'un facteur  $10^5$

# Coronographe : atténuation de l'étoile

---

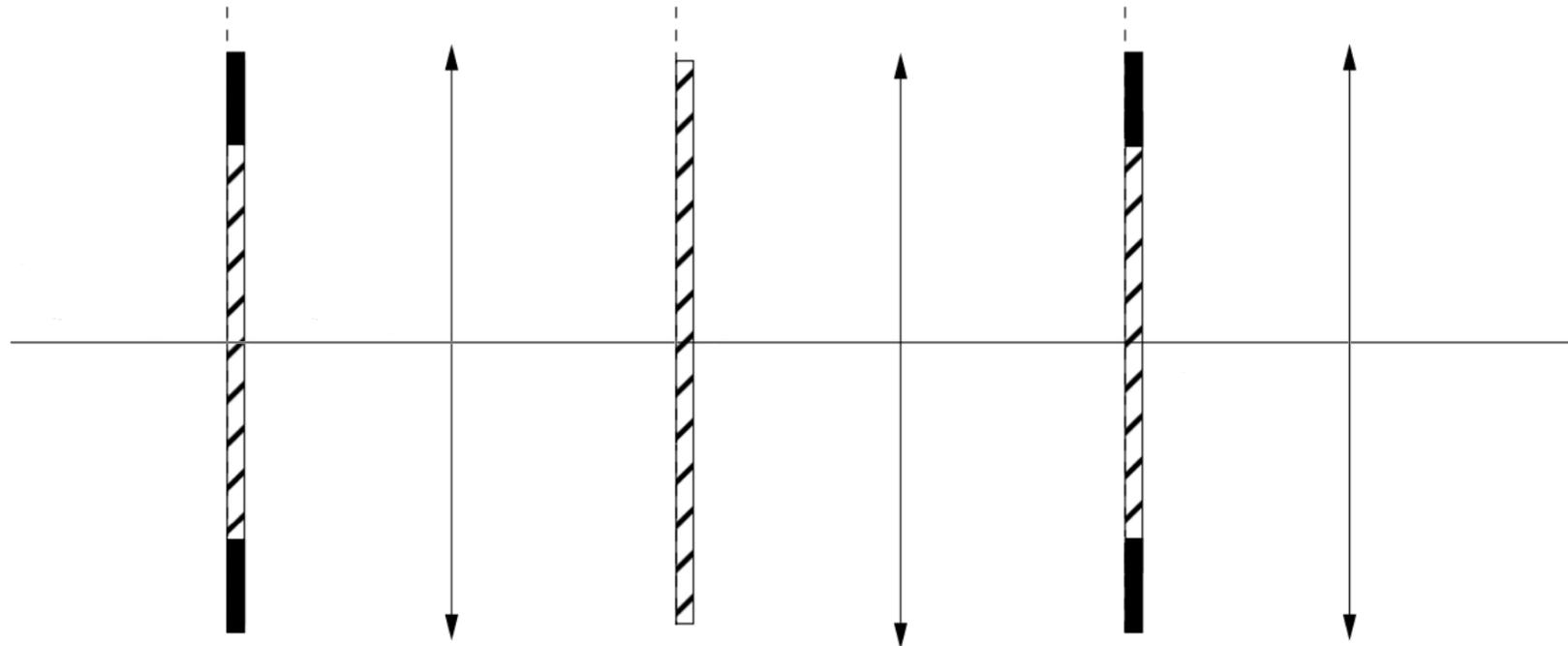


Figure 2 -  
Schéma modifié  
Galicher et  
Mazoyer (2024)

# Coronographe : atténuation de l'étoile

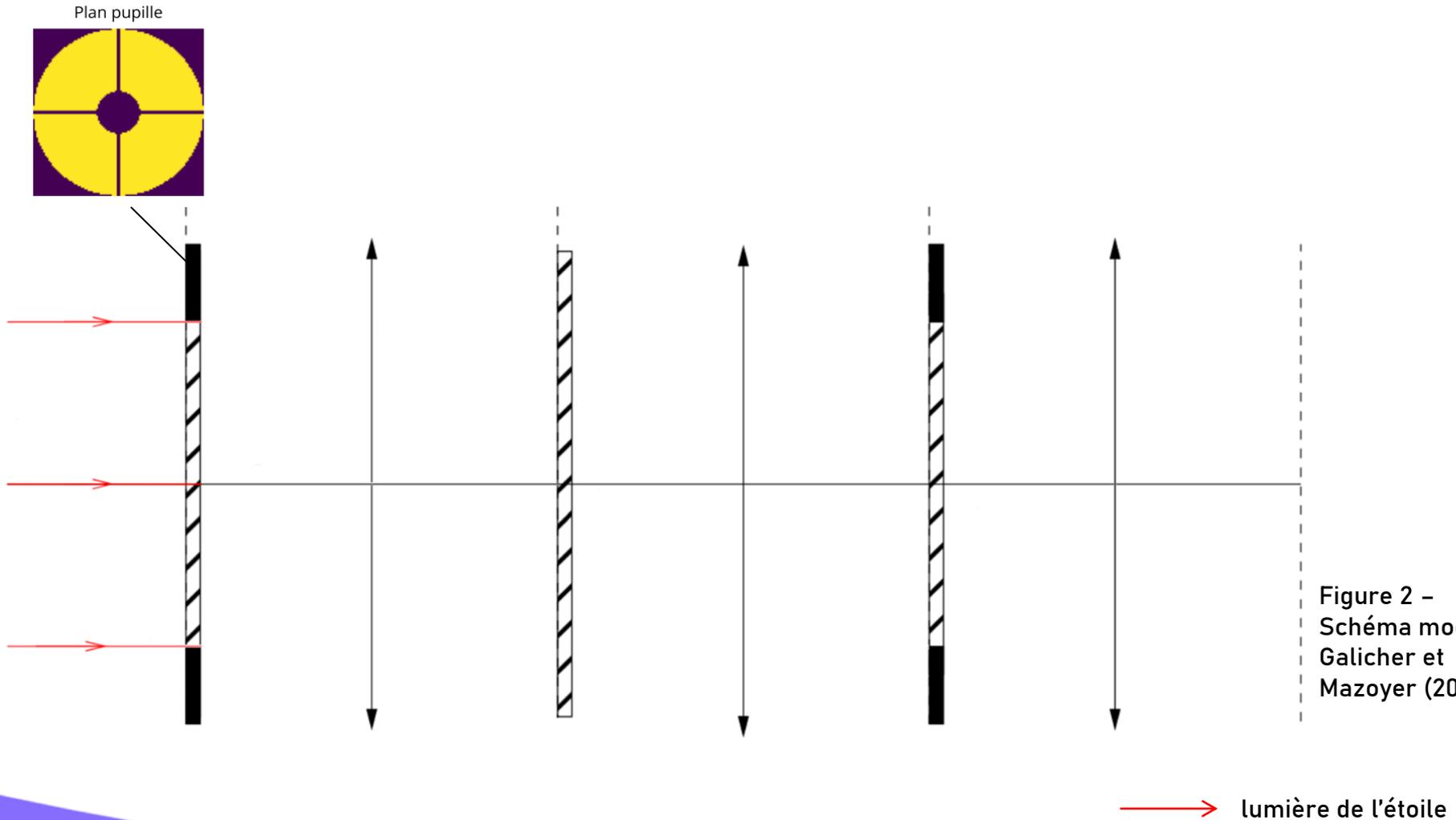


Figure 2 -  
Schéma modifié  
Galicher et  
Mazoyer (2024)

# Coronographe : atténuation de l'étoile

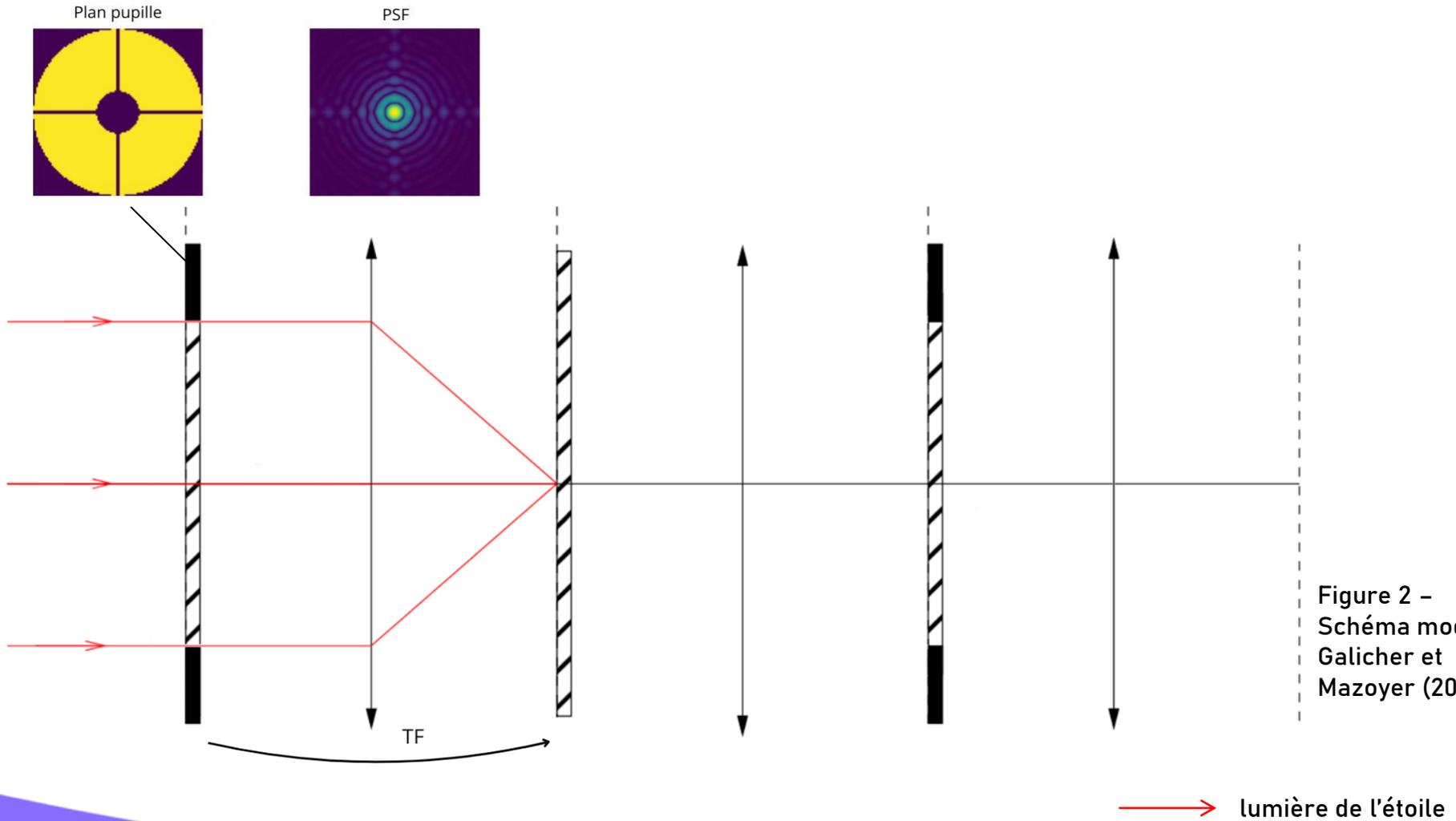


Figure 2 -  
Schéma modifié  
Galicher et  
Mazoyer (2024)

# Coronographe : atténuation de l'étoile

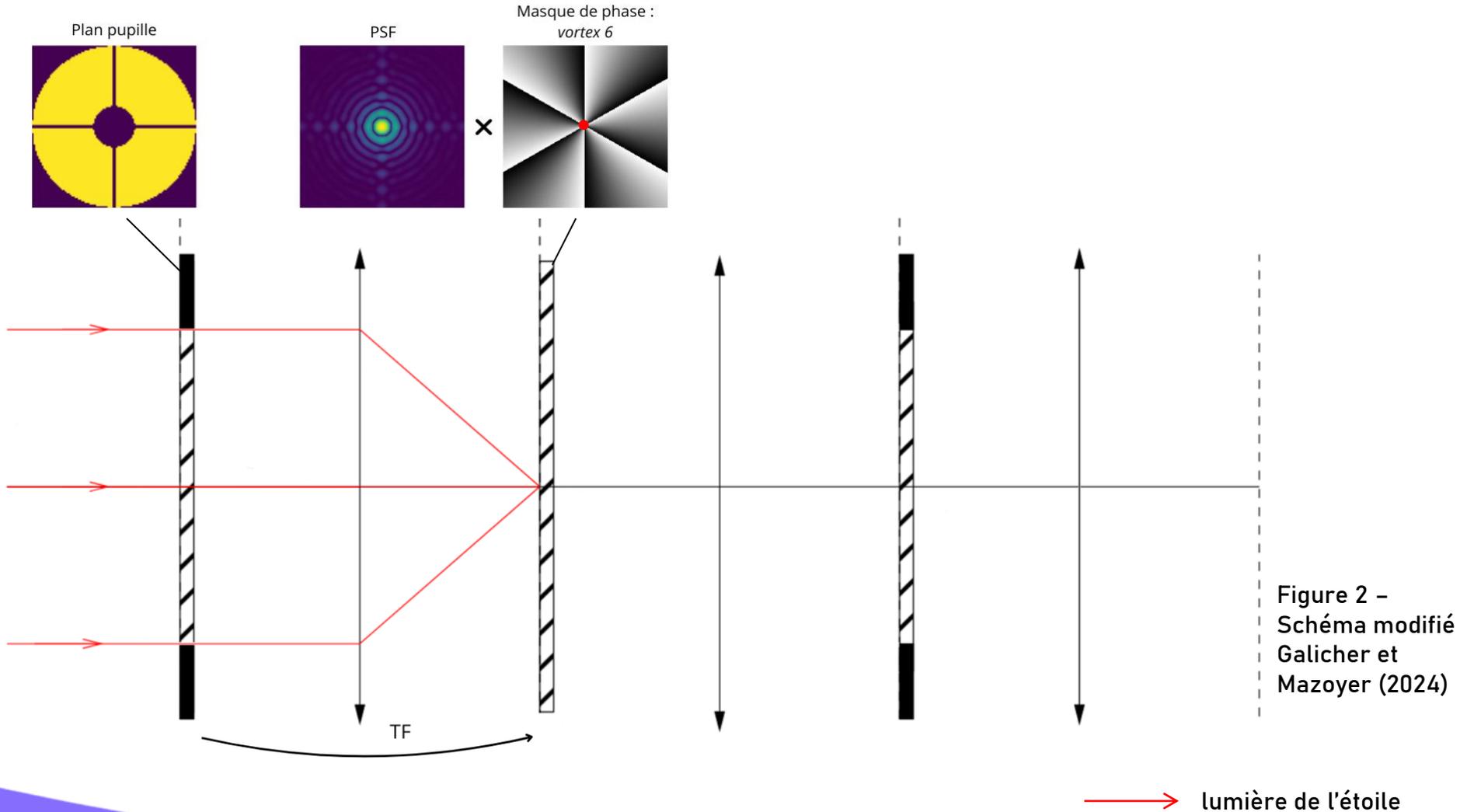


Figure 2 -  
Schéma modifié  
Galicher et  
Mazoyer (2024)

# Coronographe : atténuation de l'étoile

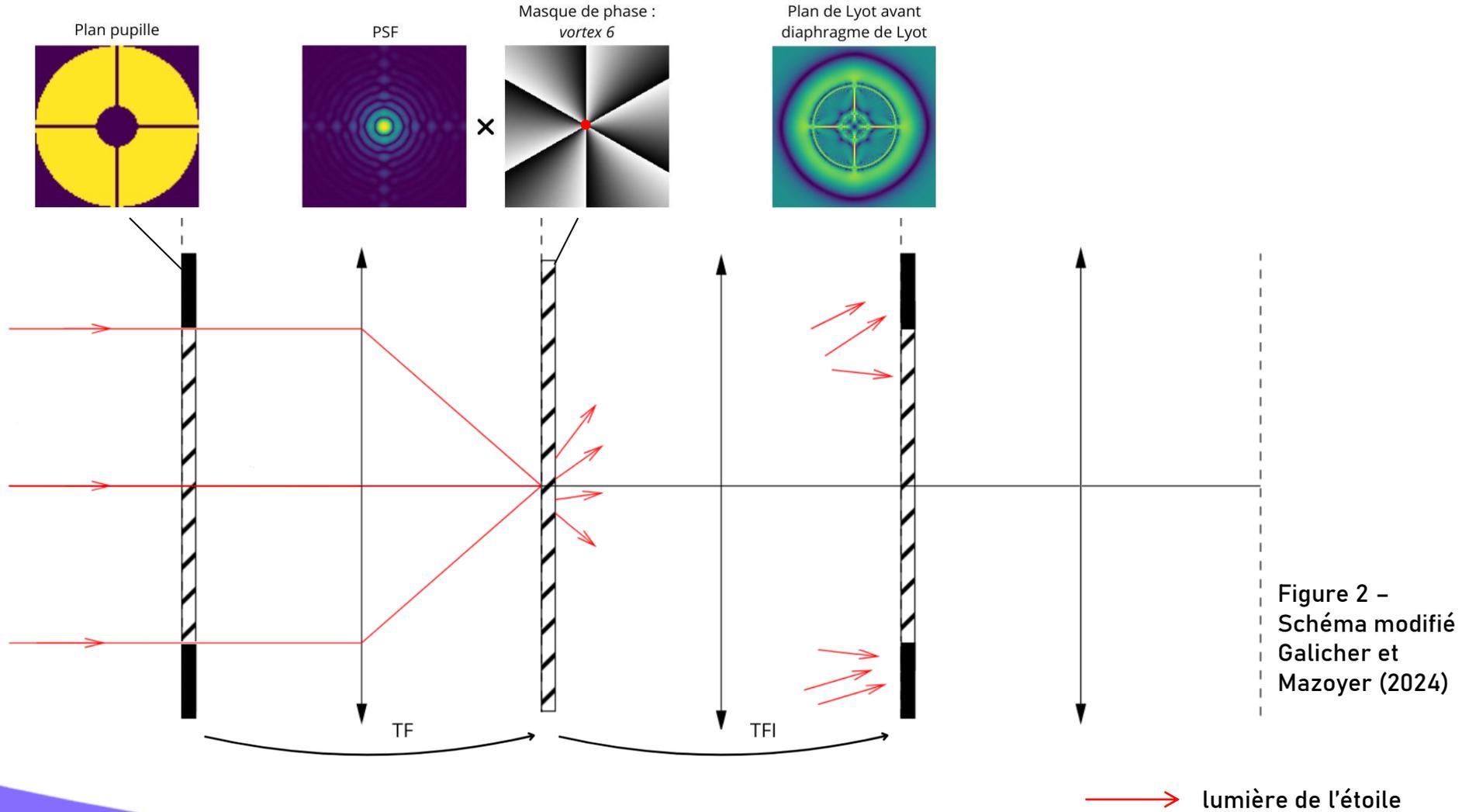


Figure 2 -  
Schéma modifié  
Galicher et  
Mazoyer (2024)

# Coronographe : atténuation de l'étoile

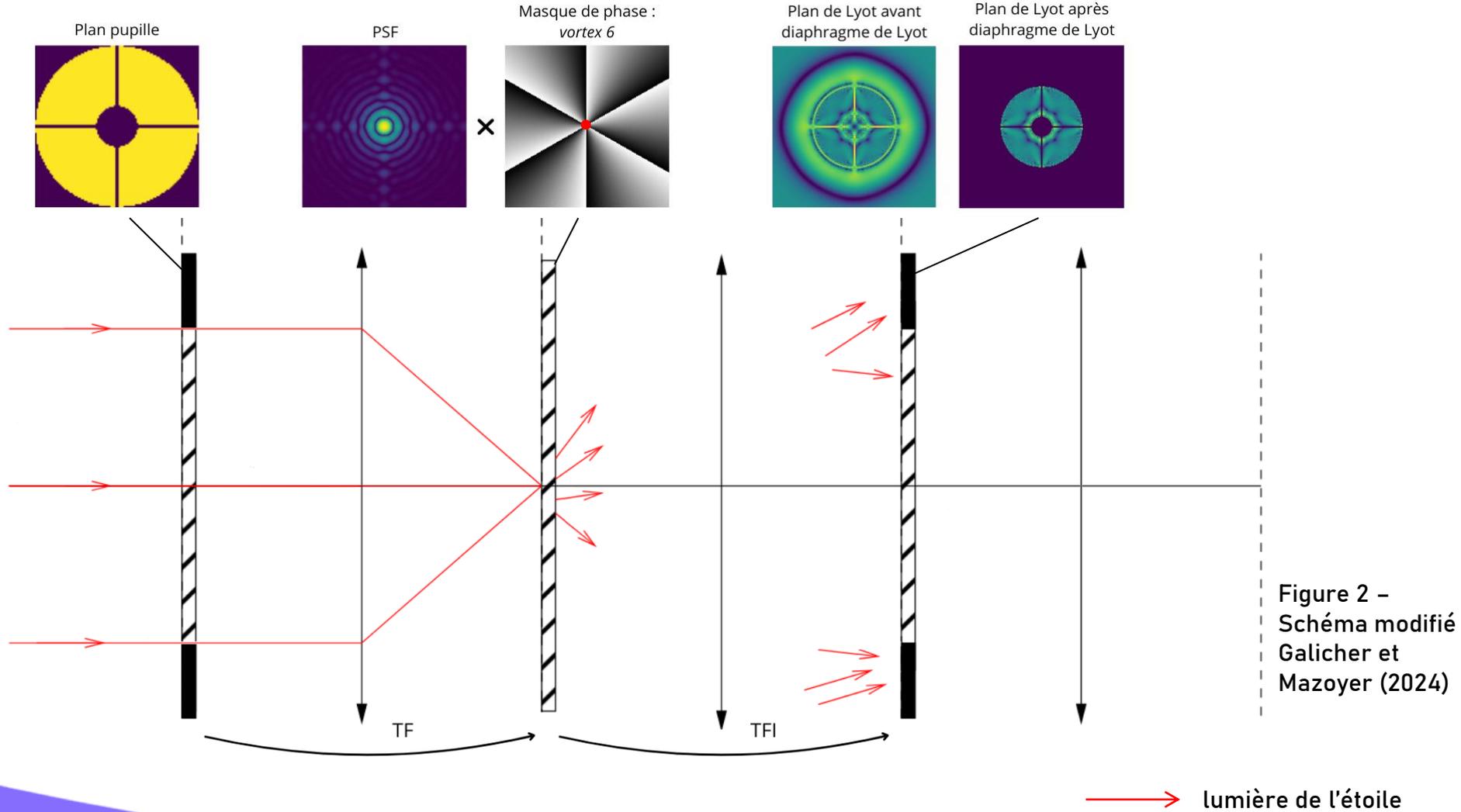


Figure 2 -  
Schéma modifié  
Galicher et  
Mazoyer (2024)

# Coronographe : atténuation de l'étoile

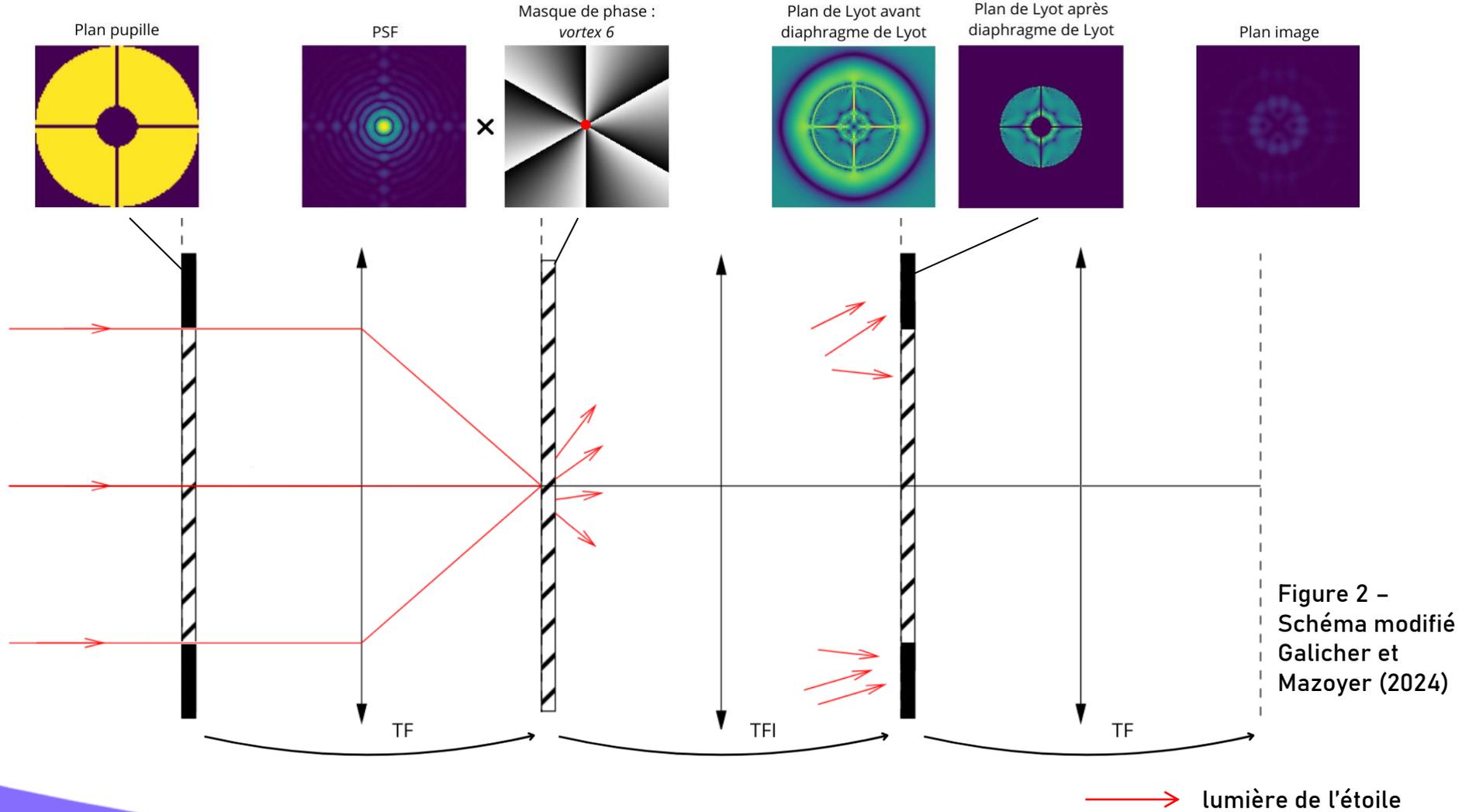
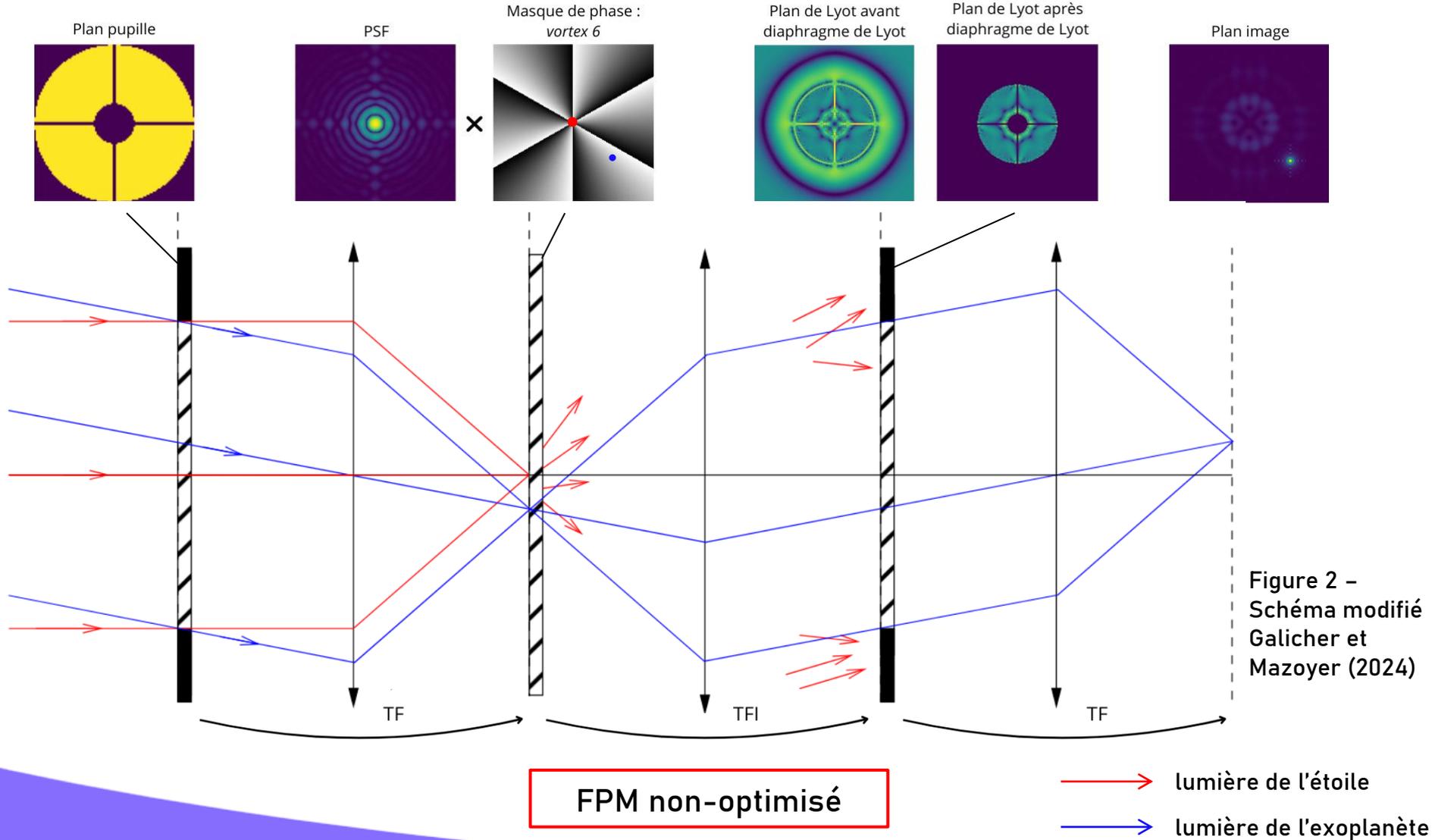


Figure 2 -  
Schéma modifié  
Galicher et  
Mazoyer (2024)

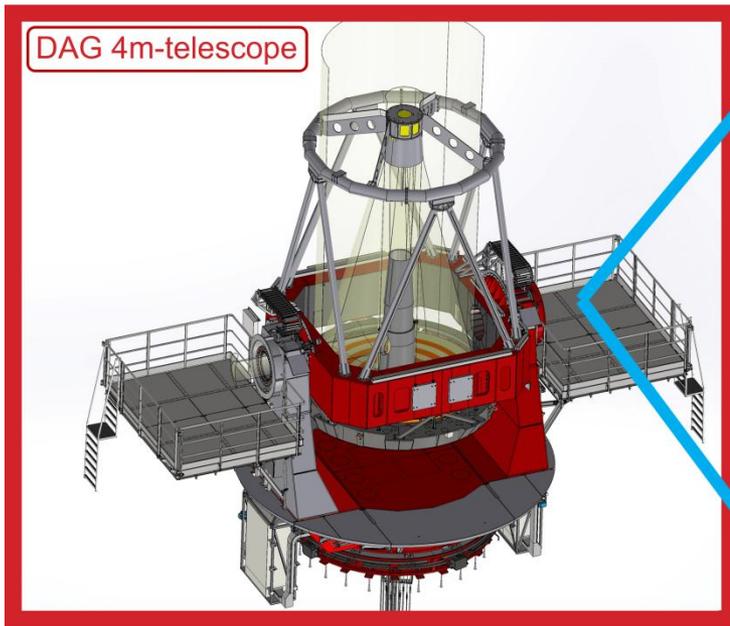
# Coronographe : atténuation de l'étoile



# L'instrument PLACID

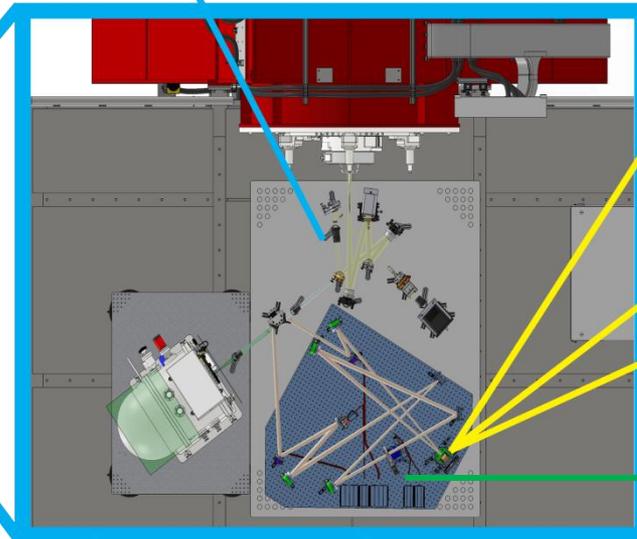


Crédit : Projet RACE GO



TROIA AO system

Spatial Light Modulator (SLM)



PLACID =  
Coronographe  
adaptatif

Objectif du stage : optimiser le FPM de PLACID

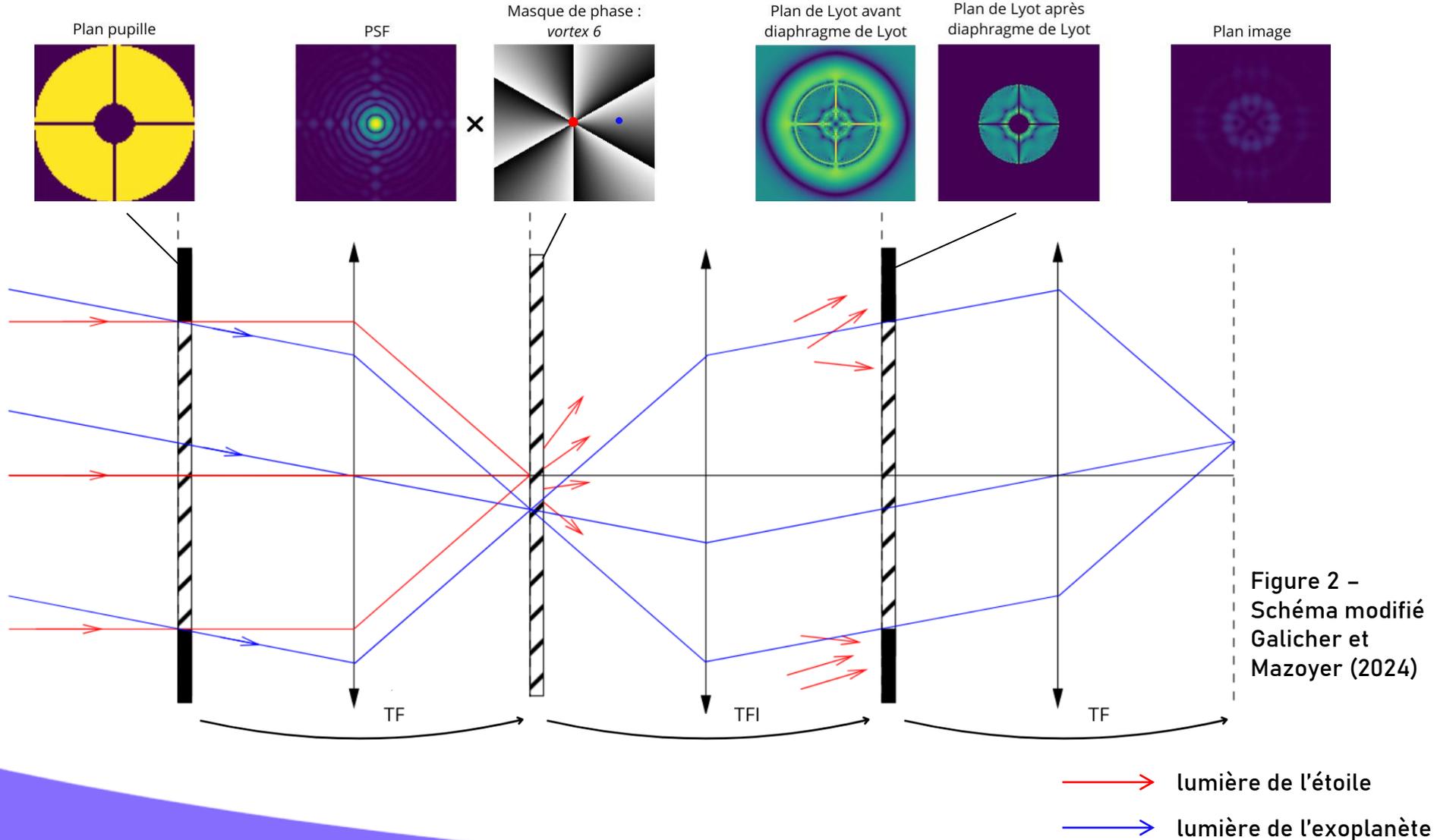
# La méthode

---

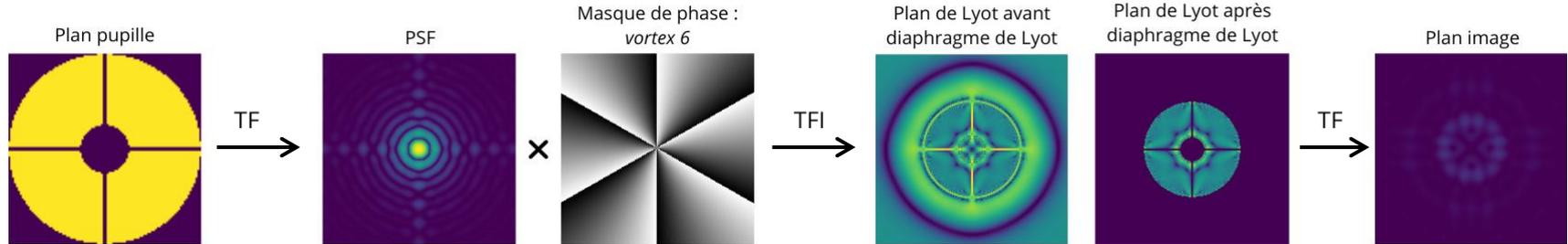


Crédit : NASA Ames/SETI Institute/JPL-CalTech

# Algorithme Gerchberg-Saxton pour coronagraphie

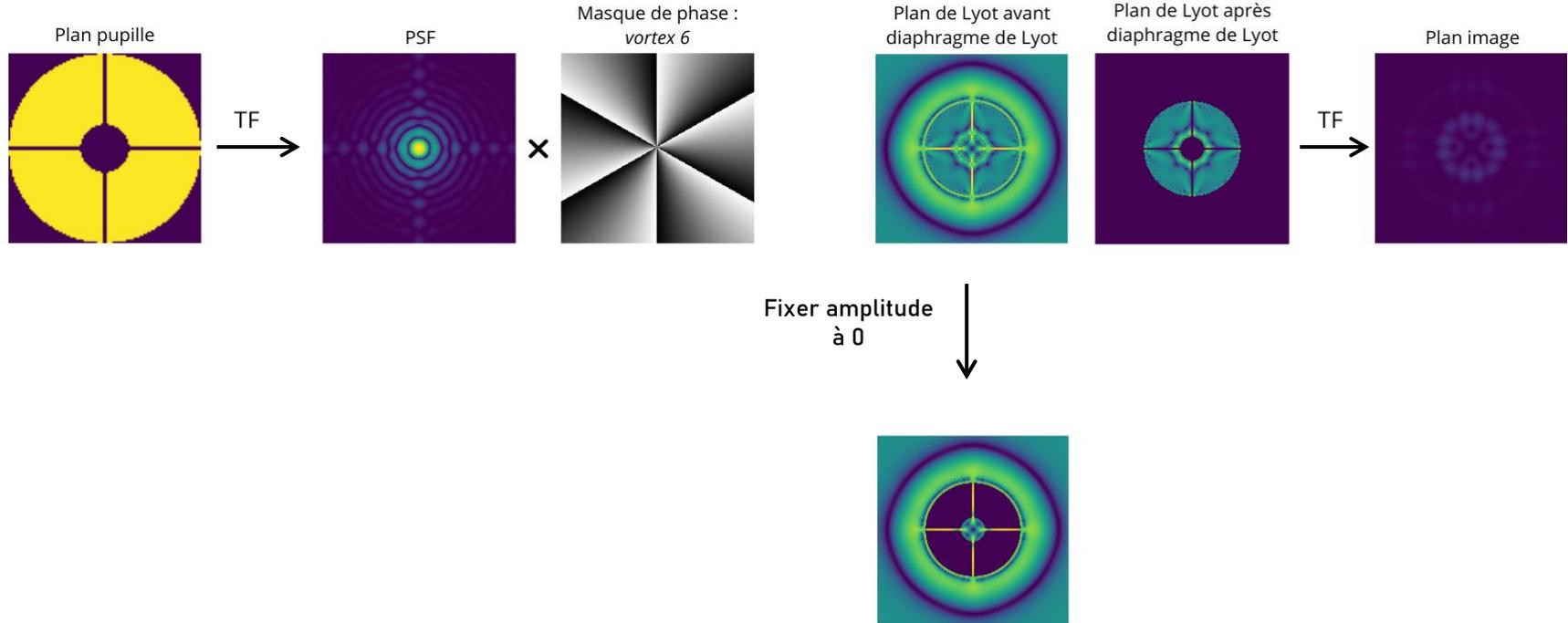


# Algorithme Gerchberg-Saxton pour coronographie



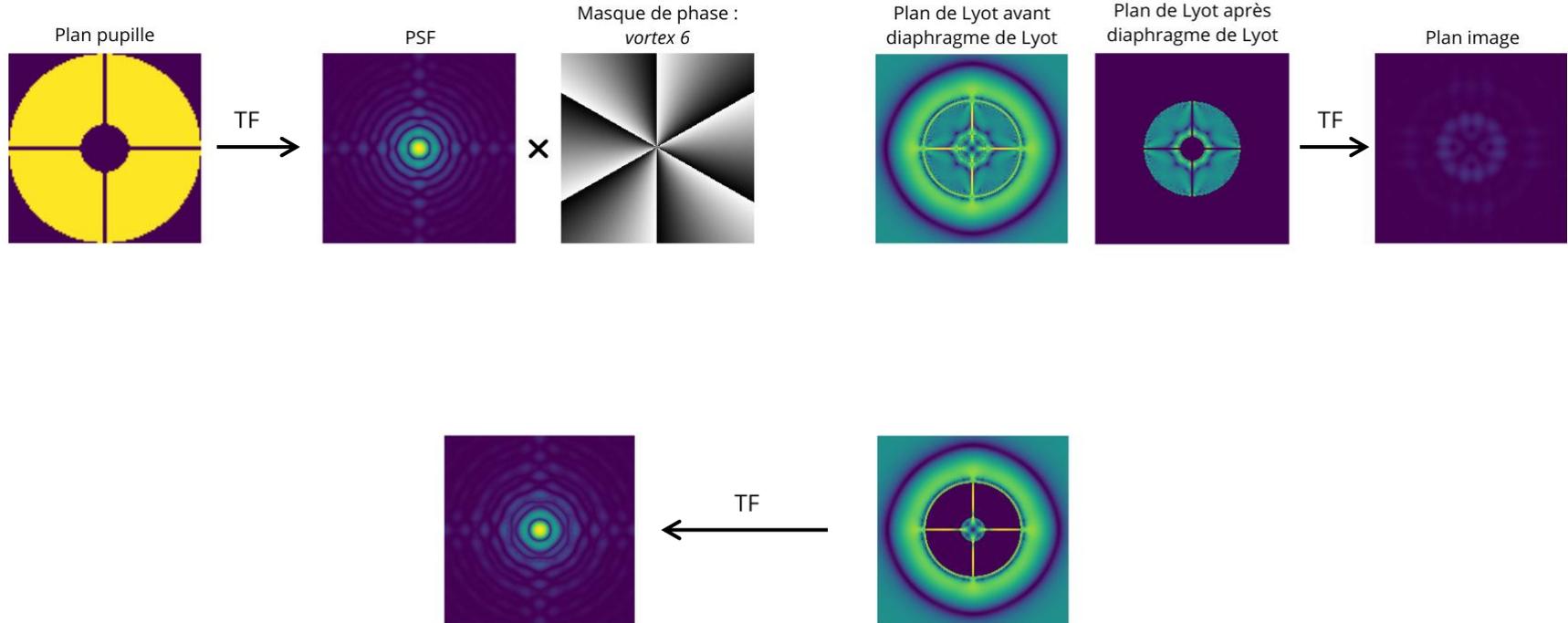
Objectif : Diminuer du flux lumineux dans le plan image

# Algorithme Gerchberg-Saxton pour coronographie



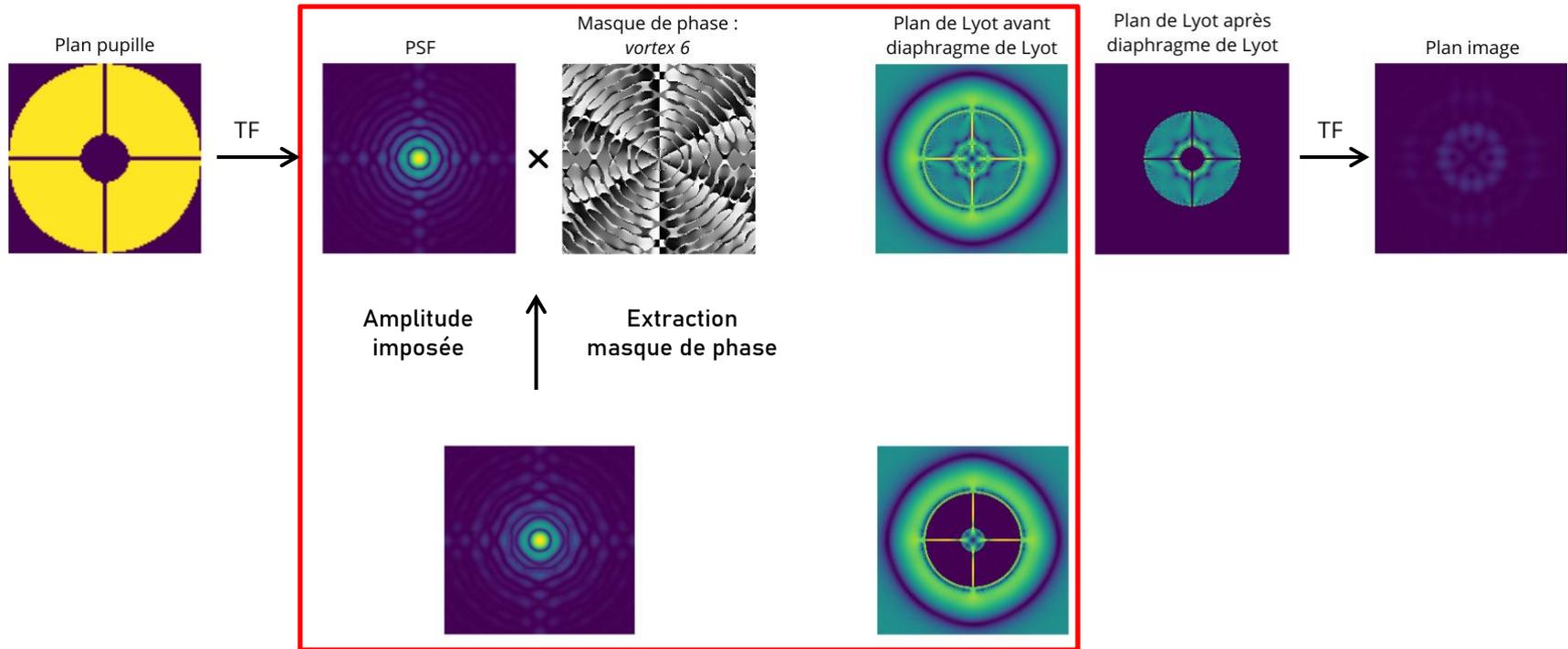
Objectif : Diminuer du flux lumineux dans le plan image

# Algorithme Gerchberg-Saxton pour coronographie



Objectif : Diminuer du flux lumineux dans le plan image

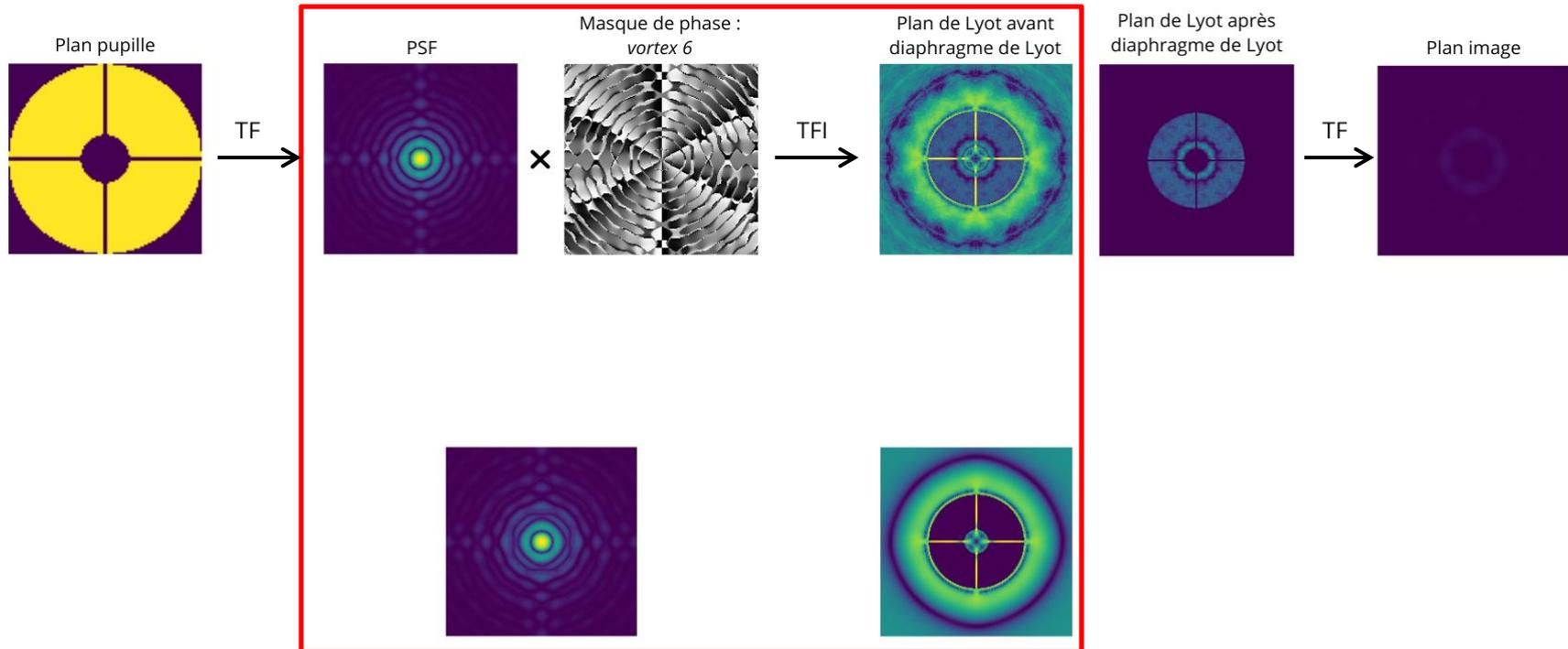
# Algorithme Gerchberg-Saxton pour coronographie



**Boucle**

**Objectif : Diminuer du flux lumineux dans le plan image**

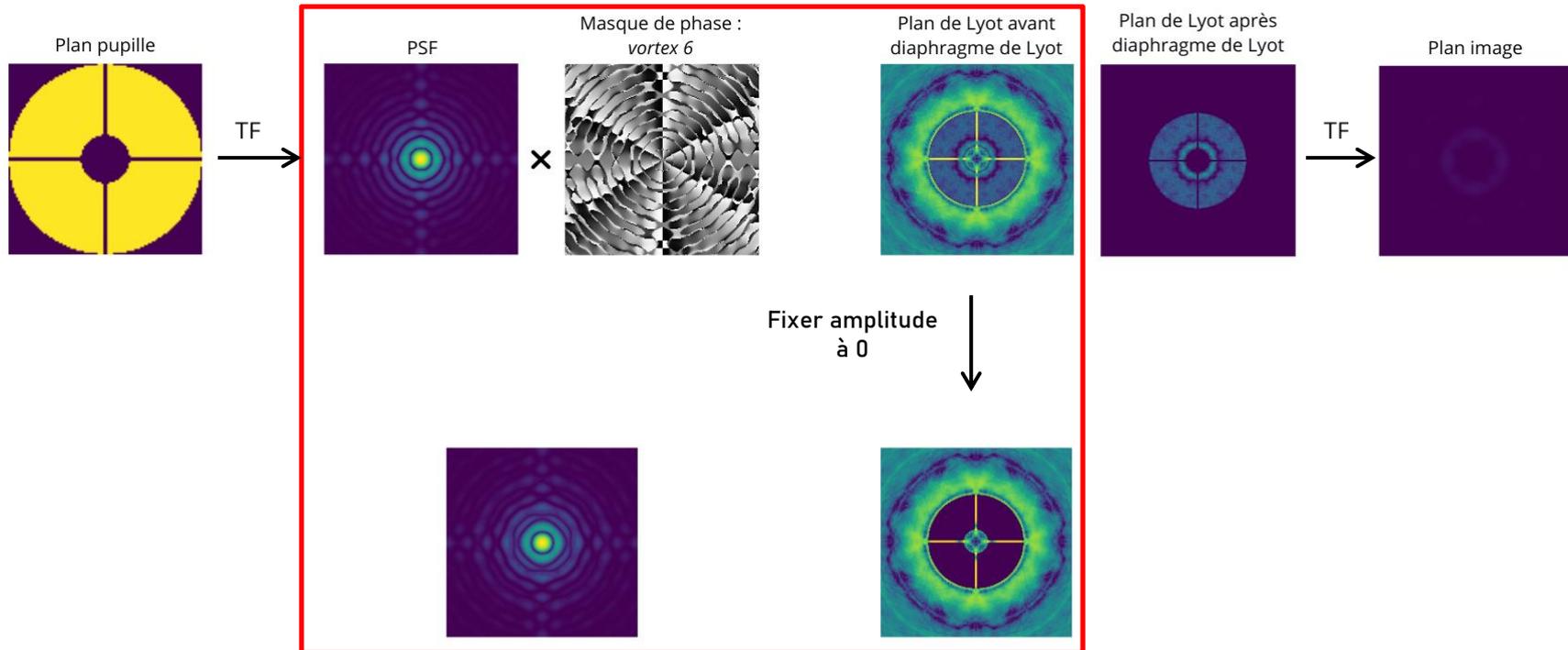
# Algorithme Gerchberg-Saxton pour coronographie



Boucle

Objectif : Diminuer du flux lumineux dans le plan image

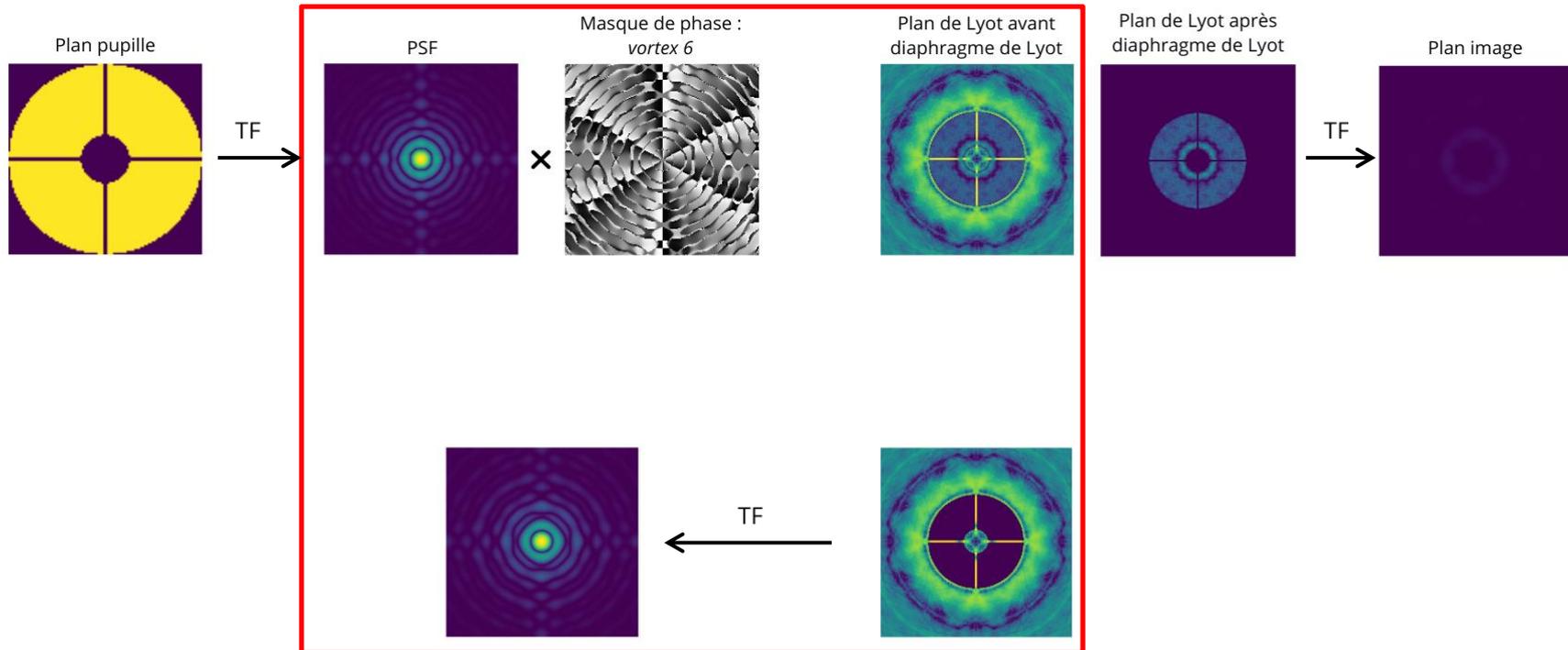
# Algorithme Gerchberg-Saxton pour coronographie



Boucle

Diminution du flux lumineux dans le plan image

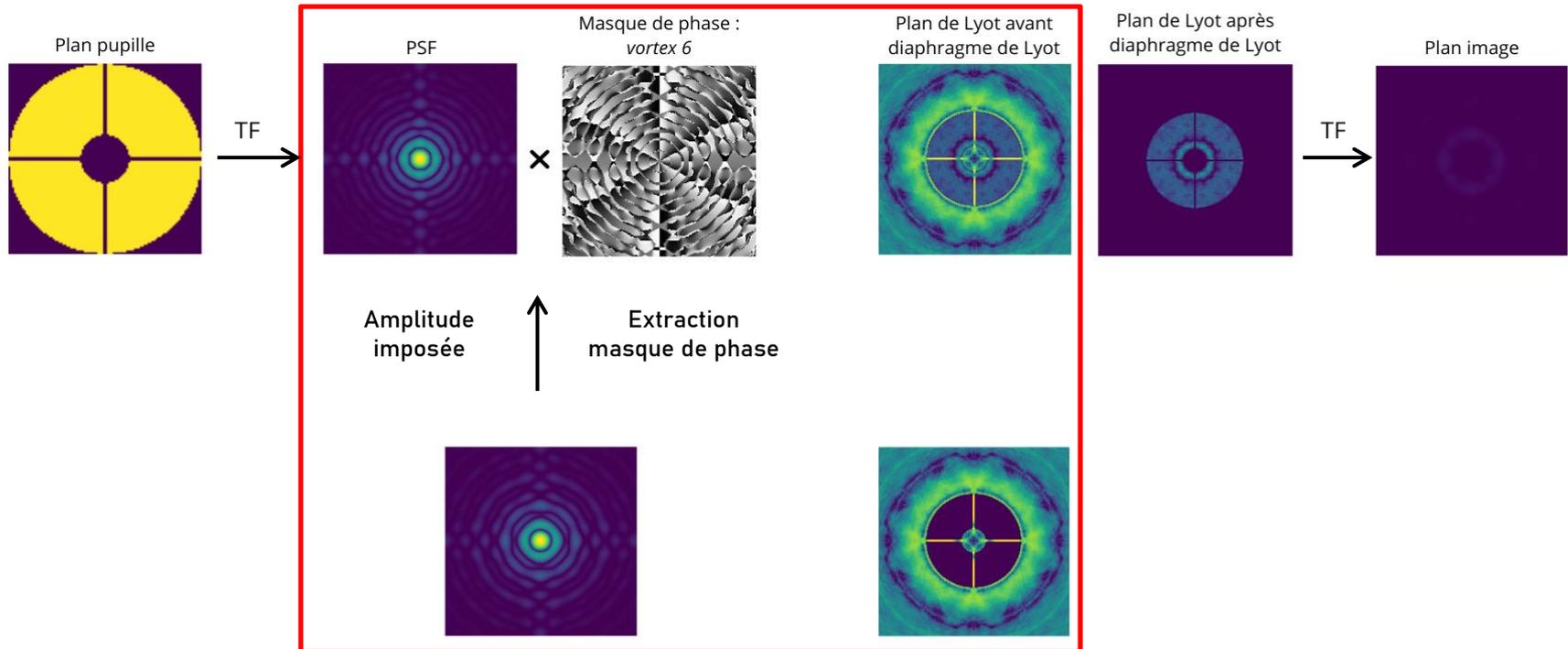
# Algorithme Gerchberg-Saxton pour coronographie



**Boucle**

**Objectif : Diminuer du flux lumineux dans le plan image**

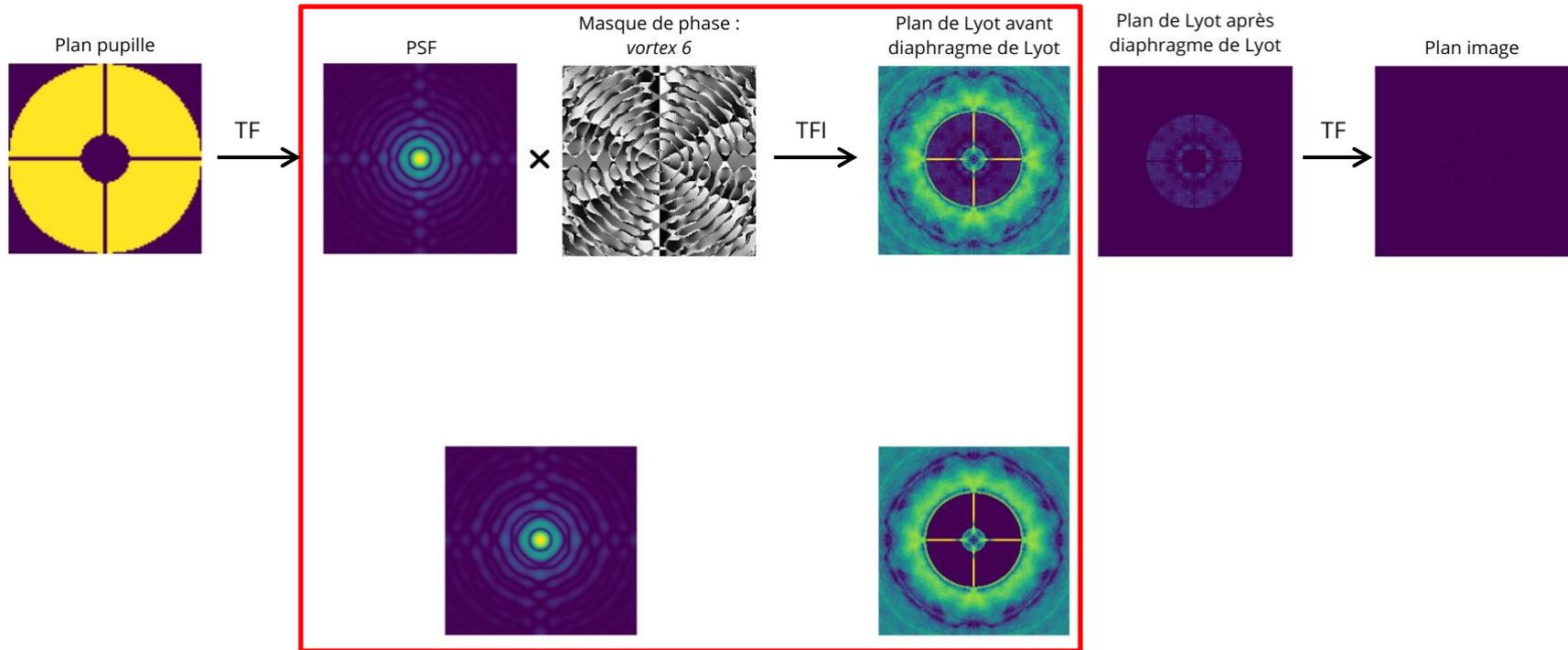
# Algorithme Gerchberg-Saxton pour coronographie



Boucle

Objectif : Diminuer du flux lumineux dans le plan image

# Algorithme Gerchberg-Saxton pour coronographie



Boucle

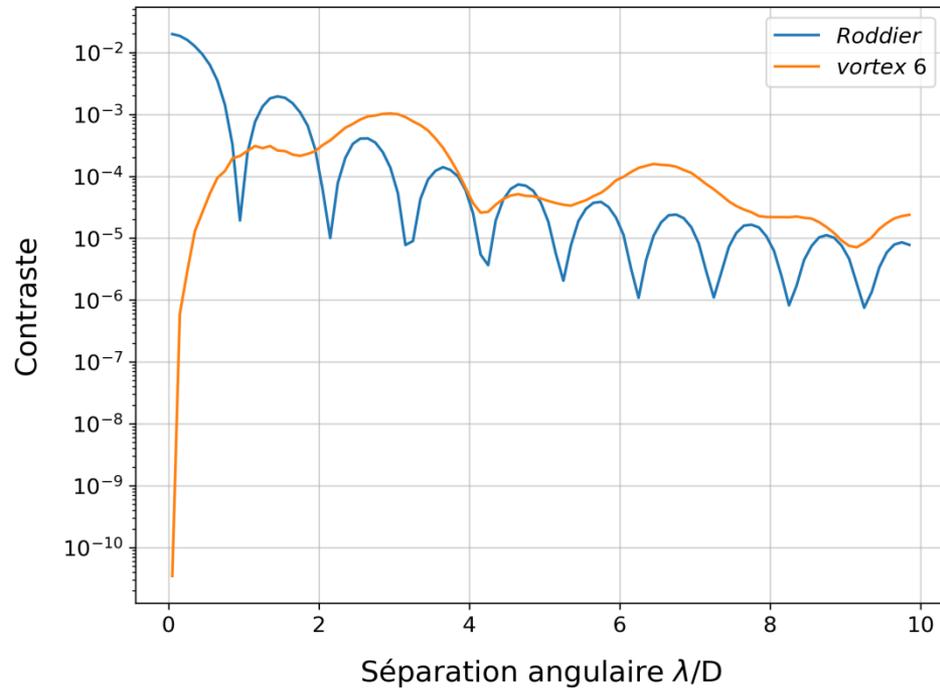
Objectif : Diminuer du flux lumineux dans le plan image

# Les métriques : contraste et transmission

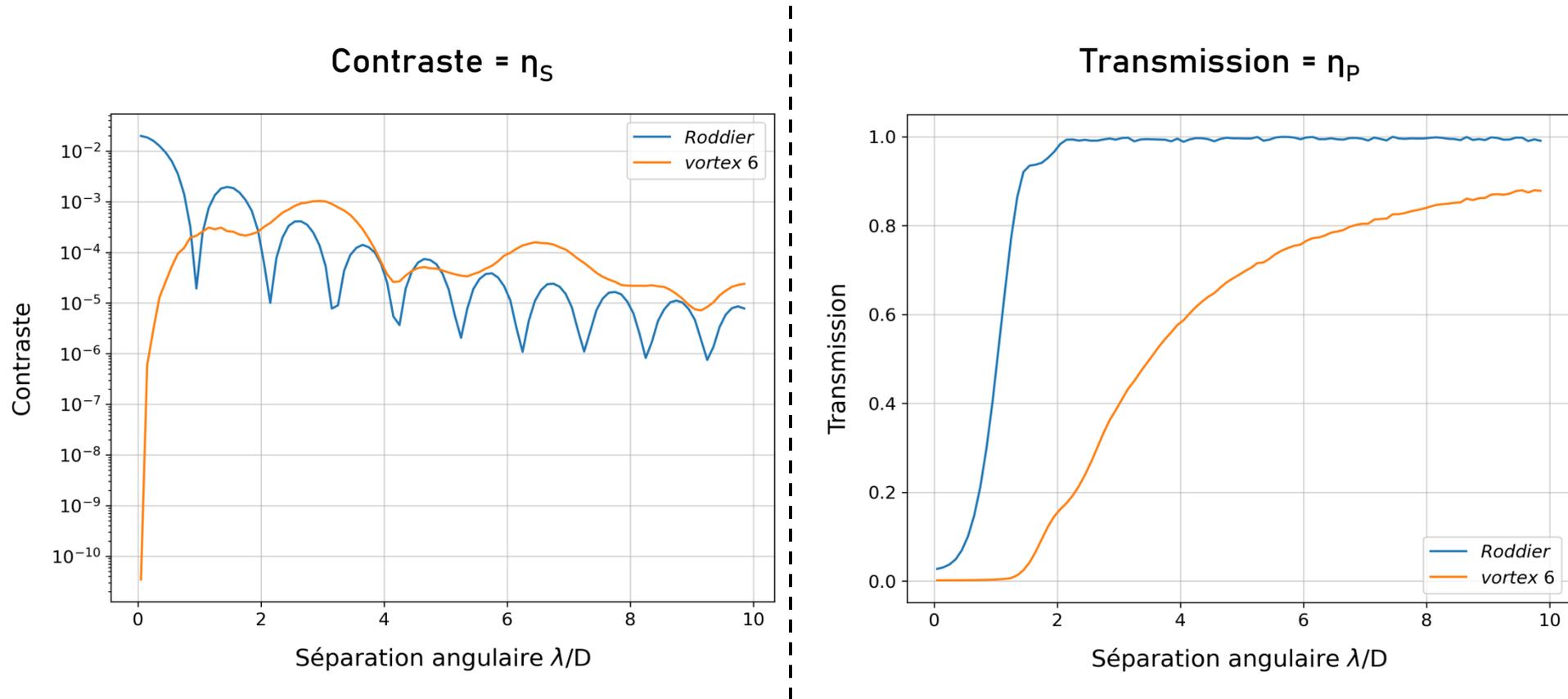
---

# Les métriques : contraste et transmission

Contraste =  $\eta_s$



# Les métriques : contraste et transmission



Besoin d'une métrique globale de mesure des performances du coronographe

# Les métriques : rapport signal à bruit

F : flux de lumière  
 $\eta$  : intensité normalisé  
 $T_{exp}$  : temps d'exposition

Signal de l'exoplanète

$$SNR_{P/S} = \frac{F_P \eta_P(\vec{x}) T_{exp}}{\sqrt{F_S^2 \eta_S^2(\vec{x}) T_{exp}^2 + F_P \eta_P(\vec{x}) T_{exp} + F_S \eta_S(\vec{x}) T_{exp}}}$$

Galicher et Mazoyer (2024)

Variance du résidu stellaire

Variance du bruit de l'exoplanète

Variance du bruit de photons du résidu stellaire

Cas n°1 : Images brutes

$$SNR_{P/S} \approx \frac{F_P}{F_S} \frac{\eta_P(\vec{x})}{\eta_S(\vec{x})}$$

Cas n°2 : Images post traitement

$$SNR_{P/S} \approx \frac{F_P T_{exp}}{\sqrt{F_S T_{exp}}} \frac{\eta_P(\vec{x})}{\sqrt{\eta_S(\vec{x})}}$$

# Résultats

---

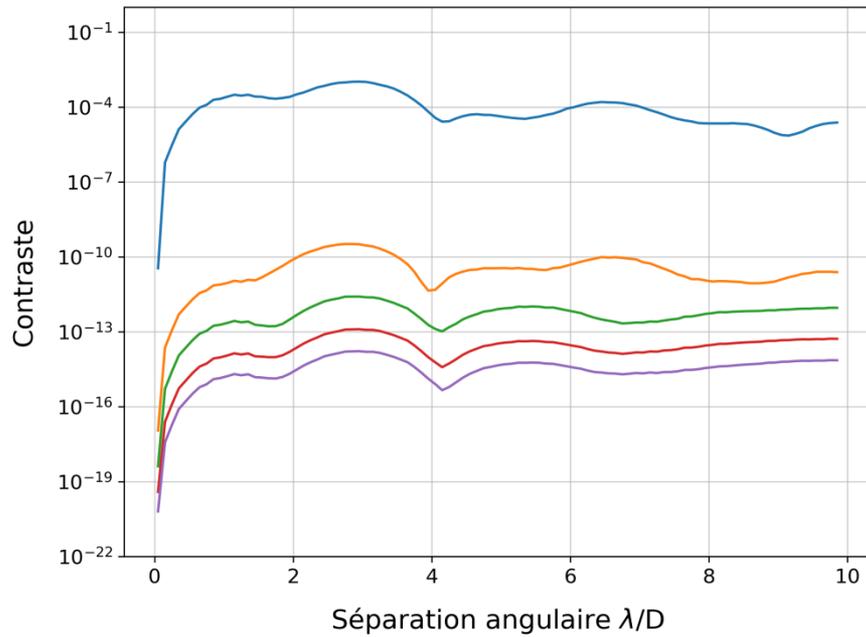


Crédit : NASA Ames/SETI Institute/JPL-CalTech

# Résultats : vortex 6

---

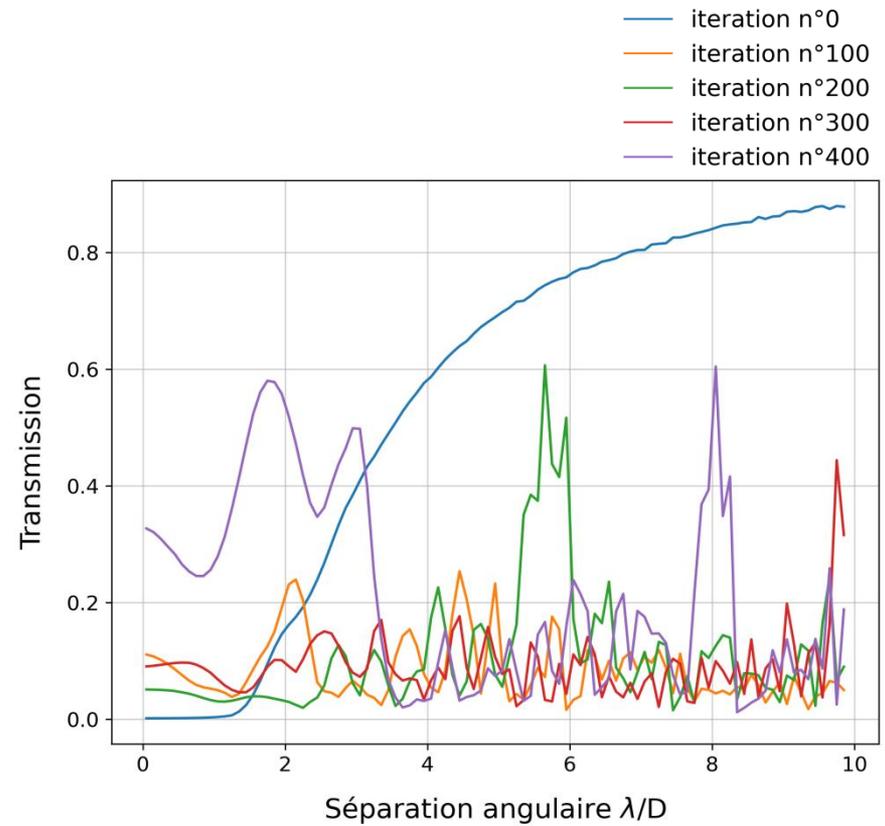
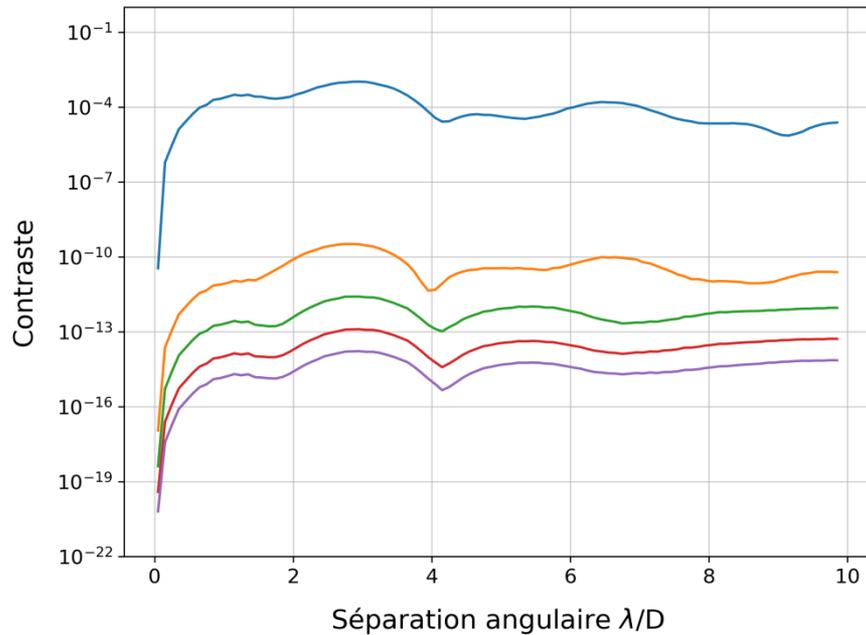
# Résultats : vortex 6



- iteration n°0
- iteration n°100
- iteration n°200
- iteration n°300
- iteration n°400

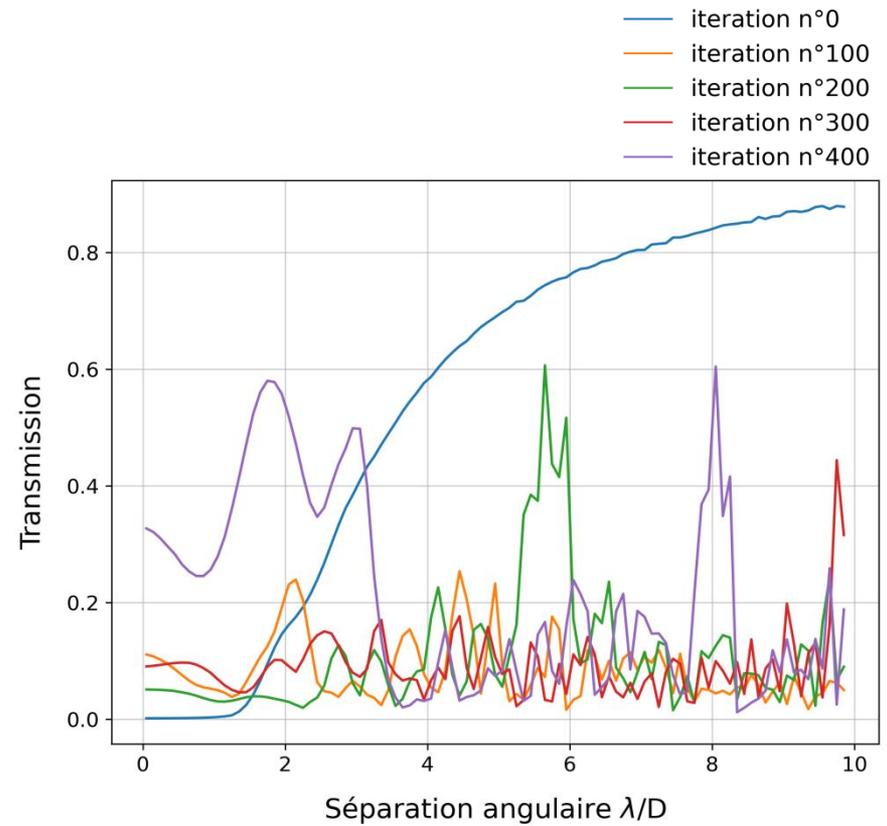
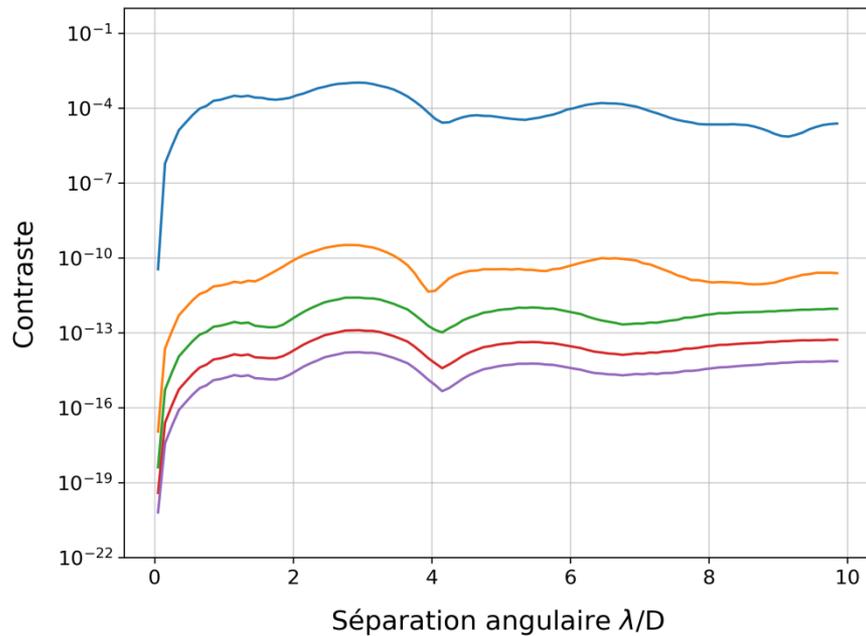
- FPM vortex 6
- 400 itérations
- diamètre pupille = 100 px
- images = 1000 x 1000 px
- échantillonnage numérique des pixels
- échantillonnage du FPM

# Résultats : vortex 6



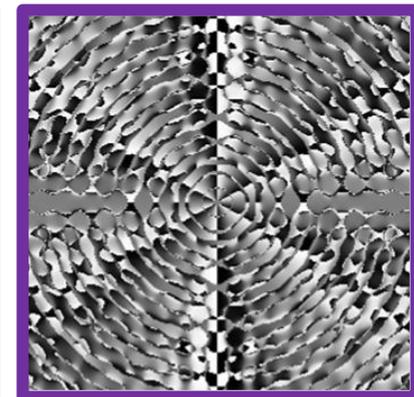
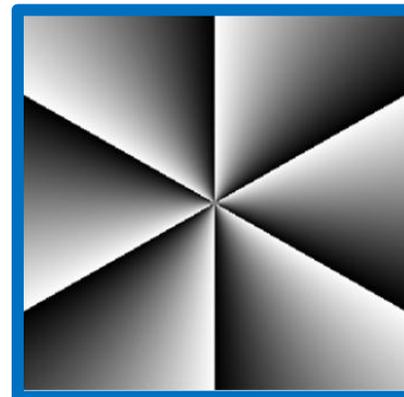
- FPM vortex 6
- 400 itérations
- diamètre pupille = 100 px
- images = 1000 x 1000 px
- échantillonnage numérique des pixels
- échantillonnage du FPM

# Résultats : vortex 6



- FPM vortex 6
- 400 itérations
- diamètre pupille = 100 px
- images = 1000 x 1000 px
- échantillonnage numérique des pixels
- échantillonnage du FPM

Résultats non concluants



# Conclusion

---

## Tests réalisés :

- Changement de diaphragme de Lyot
- Ajout d'un facteur de relaxation

# Conclusion

---

## Tests réalisés :

- Changement de diaphragme de Lyot
- Ajout d'un facteur de relaxation

## Bilan du stage

- Mise en place de la simulation du coronographe
- Intégration d'un algorithme Gerchberg-Saxton appliqué à la coronographie
- Obtention de premiers résultats
- Limites de la méthode dans sa forme actuelle

# Conclusion

---

## Tests réalisés :

- Changement de diaphragme de Lyot
- Ajout d'un facteur de relaxation

## Bilan du stage

- Mise en place de la simulation du coronographe
- Intégration d'un algorithme Gerchberg-Saxton appliqué à la coronographie
- Obtention de premiers résultats
- Limites de la méthode dans sa forme actuelle

## La suite ?

- Méthodes de régularisation
- Optimisation du code

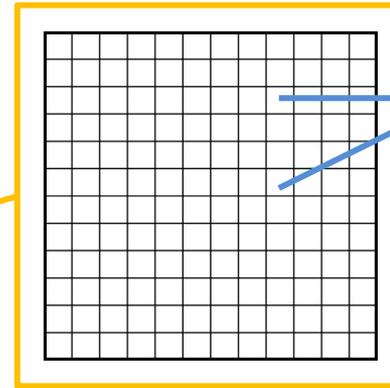
# Compléments

---

# SLM (Spatial Light Modulator)

---

LCOS SLM : *Liquid Crystal On-Silicon Spatial Light Modulator*



Cristaux liquides  
biréfringents

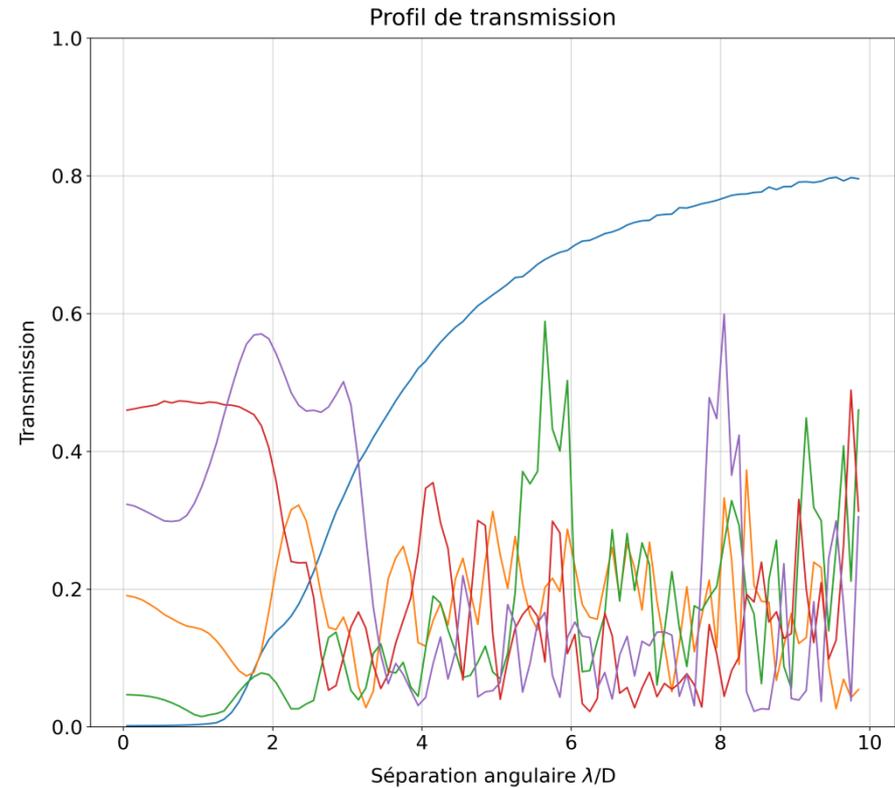
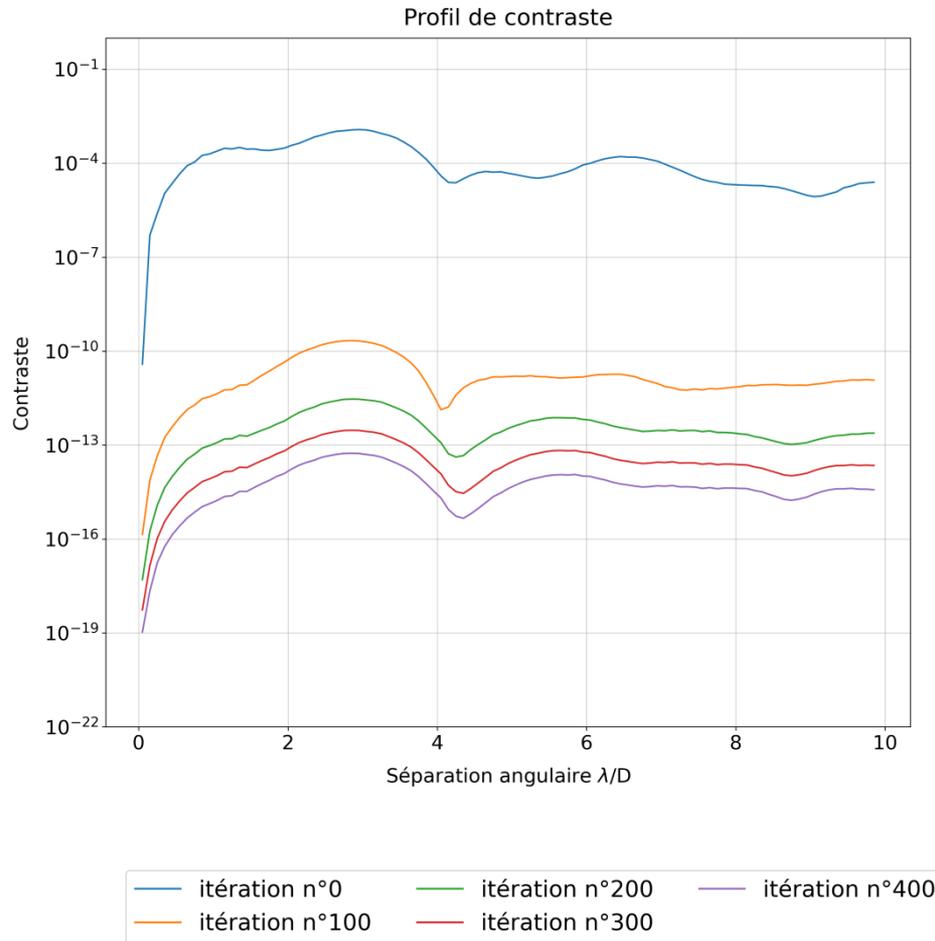
## Avantages

- Programmable
- Adaptabilité, flexibilité
- Mise en place rapide

## Inconvénients

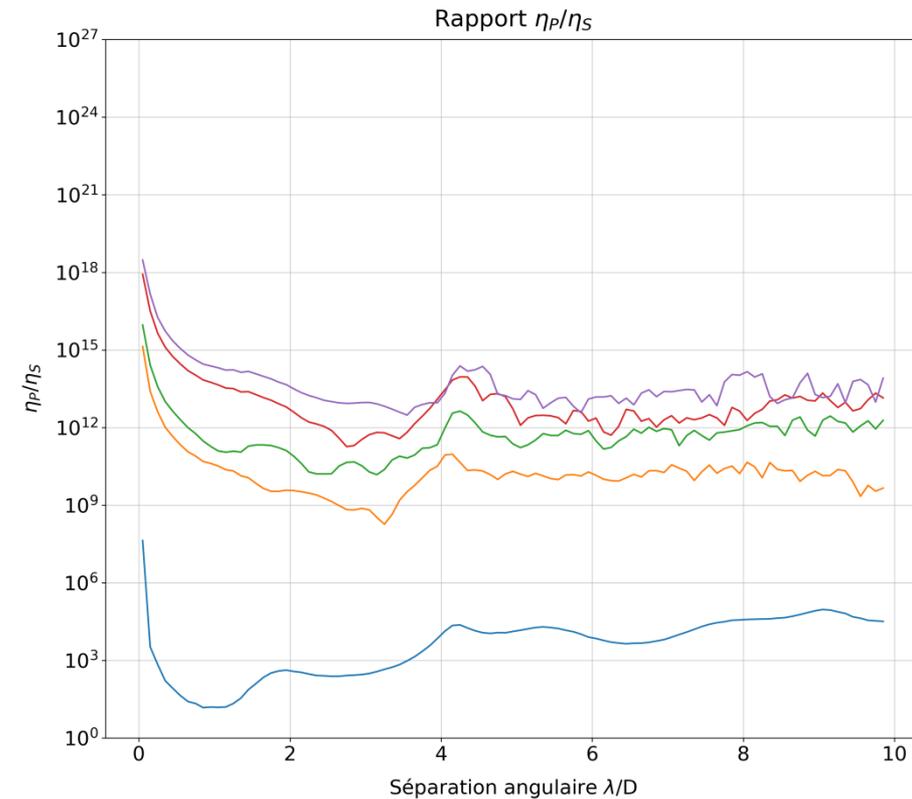
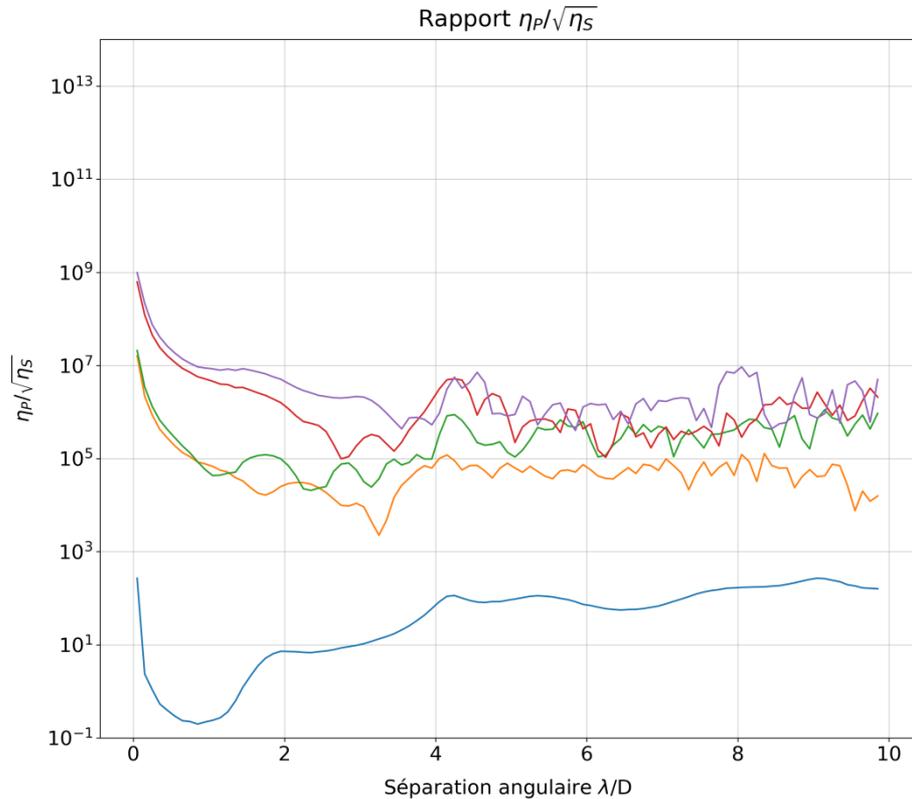
- Perte de 50 % de la lumière

# Résultats : Changement Diaphragme de Lyot



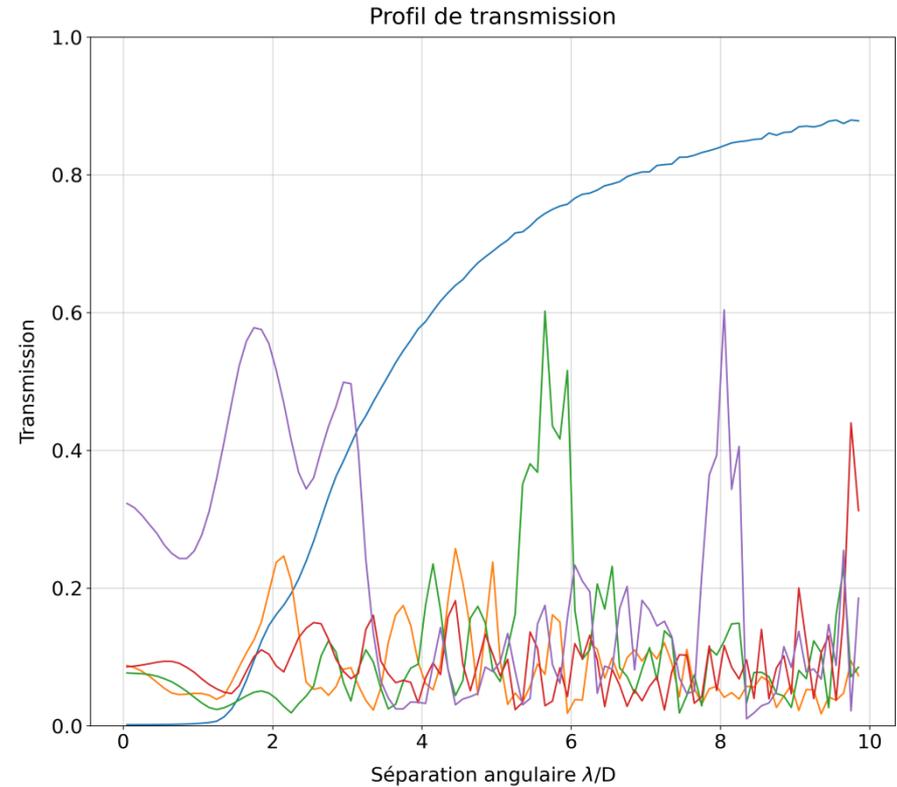
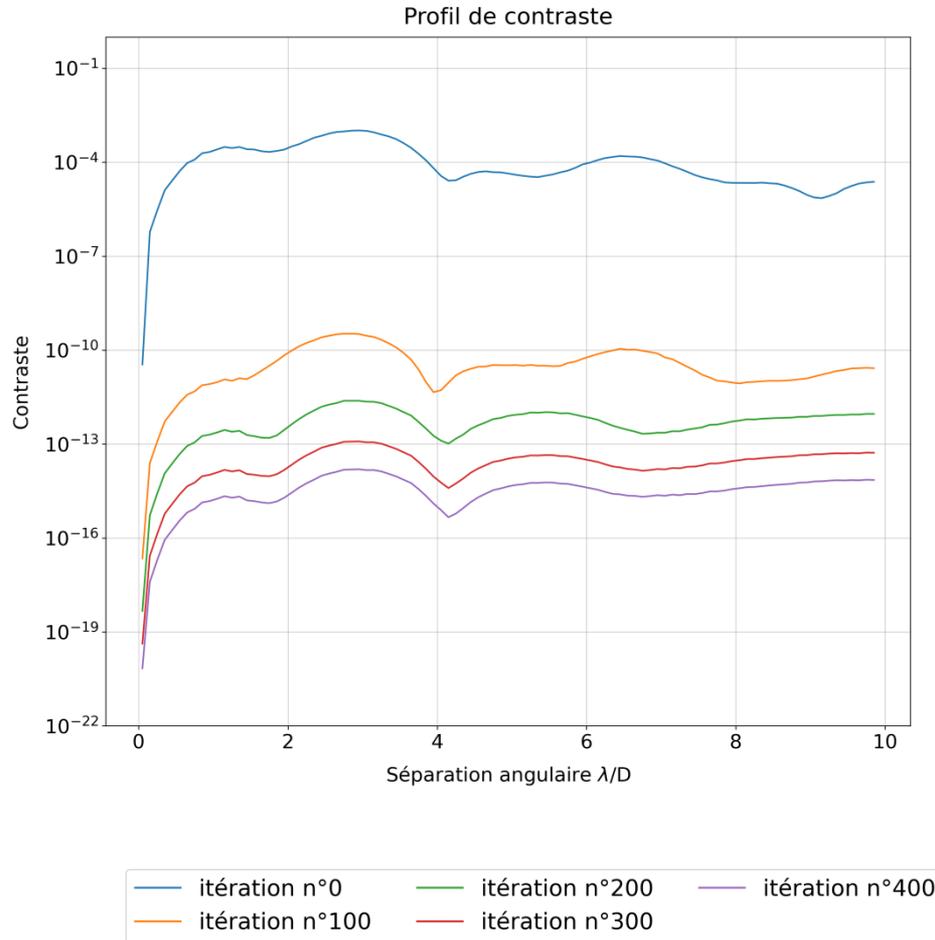
- diamètre diaphragme de Lyot x 0.98
- obstruction centrale x 1.2

# Résultats : Changement Diaphragme de Lyot



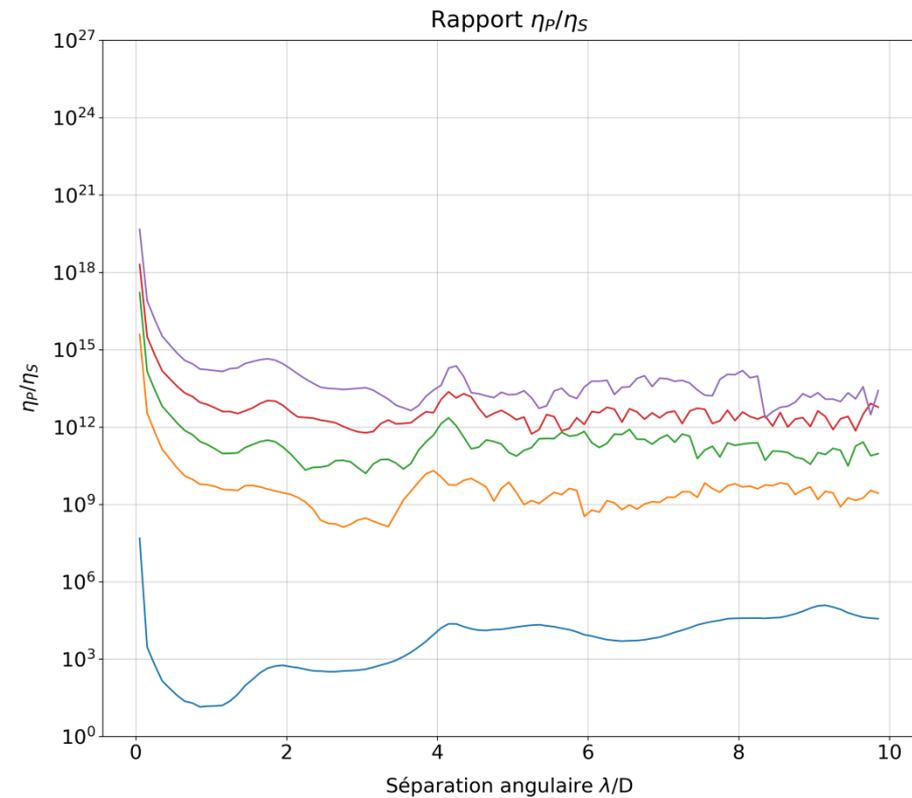
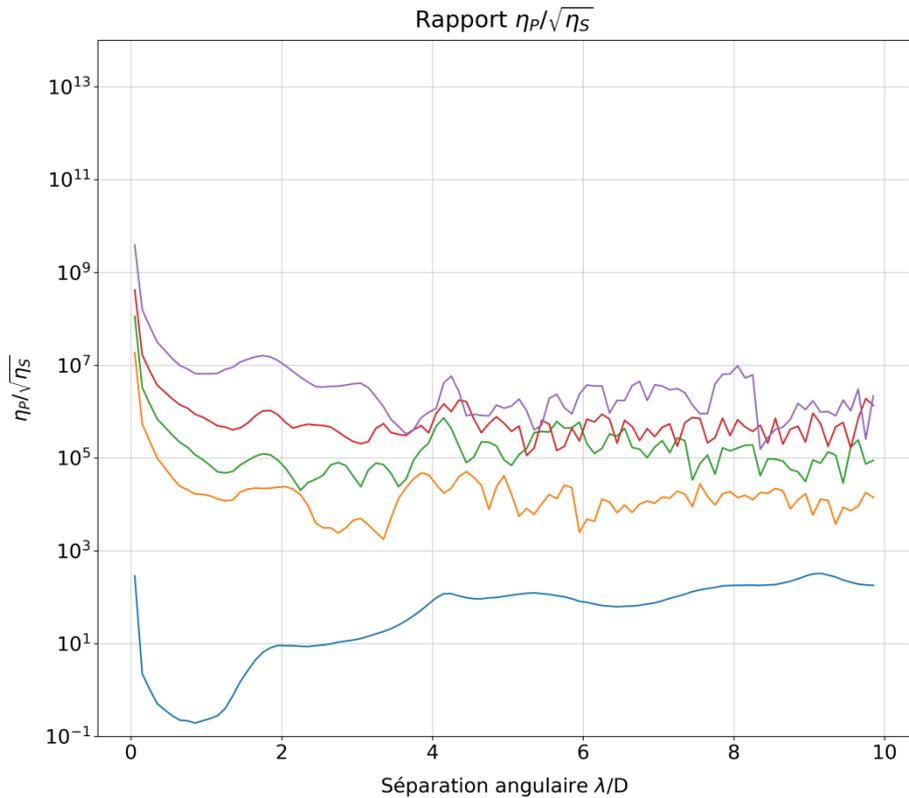
- diamètre diaphragme de Lyot x 0.98
- obstruction centrale x 1.2

# Résultats : Ajout facteur de relaxation



• facteur de relaxation = 0,5

# Résultats : Ajout facteur de relaxation



— itération n°0    — itération n°200    — itération n°400  
— itération n°100    — itération n°300

• facteur de relaxation = 0,5

# Les métriques : rapport signal à bruit

F : flux de lumière  
 $\eta$  : intensité normalisé  
 $T_{exp}$  : temps d'exposition

Signal de l'exoplanète

$$SNR_{P/S} = \frac{F_P \eta_P(\vec{x}) T_{exp}}{\sqrt{F_S^2 \eta_S^2(\vec{x}) T_{exp}^2 + F_P \eta_P(\vec{x}) T_{exp} + F_S \eta_S(\vec{x}) T_{exp}}}$$

Galicher et Mazoyer (2024)

Variance du résidu stellaire

Variance du bruit de l'exoplanète

Variance du bruit de photons du résidu stellaire

Cas n°1 : Images brutes

$$SNR_{P/S} \approx \frac{F_P \eta_P(\vec{x})}{F_S \eta_S(\vec{x})}$$

Cas n°2 : Images post traitement

$$SNR_{P/S} \approx \frac{F_P T_{exp}}{\sqrt{F_S T_{exp}}} \frac{\eta_P(\vec{x})}{\sqrt{\eta_S(\vec{x})}}$$

# Les métriques : rapport signal à bruit

