



# Étude de techniques d'imagerie à haut contraste basées sur la cohérence

**Raphaël Galicher**

Encadrant : Pierre Baudoz

Directeur de thèse : Gérard Rousset

Observatoire de Paris

Jeudi 24 septembre 2009

# Plan de l'exposé

## Introduction

Exoplanètes et leur détection  
Imagerie à haut contraste

## Coronographe à quatre quadrants à étages multiples

Principe du MFQPM  
Démonstration expérimentale

## Self-Coherent Camera

Principe de la SCC  
Prévisions / simulations  
Résultats expérimentaux

# Plan de l'exposé

## Introduction

Exoplanètes et leur détection

Imagerie à haut contraste

## Coronographe à quatre quadrants à étages multiples

Principe du MFQPM

Démonstration expérimentale

## Self-Coherent Camera

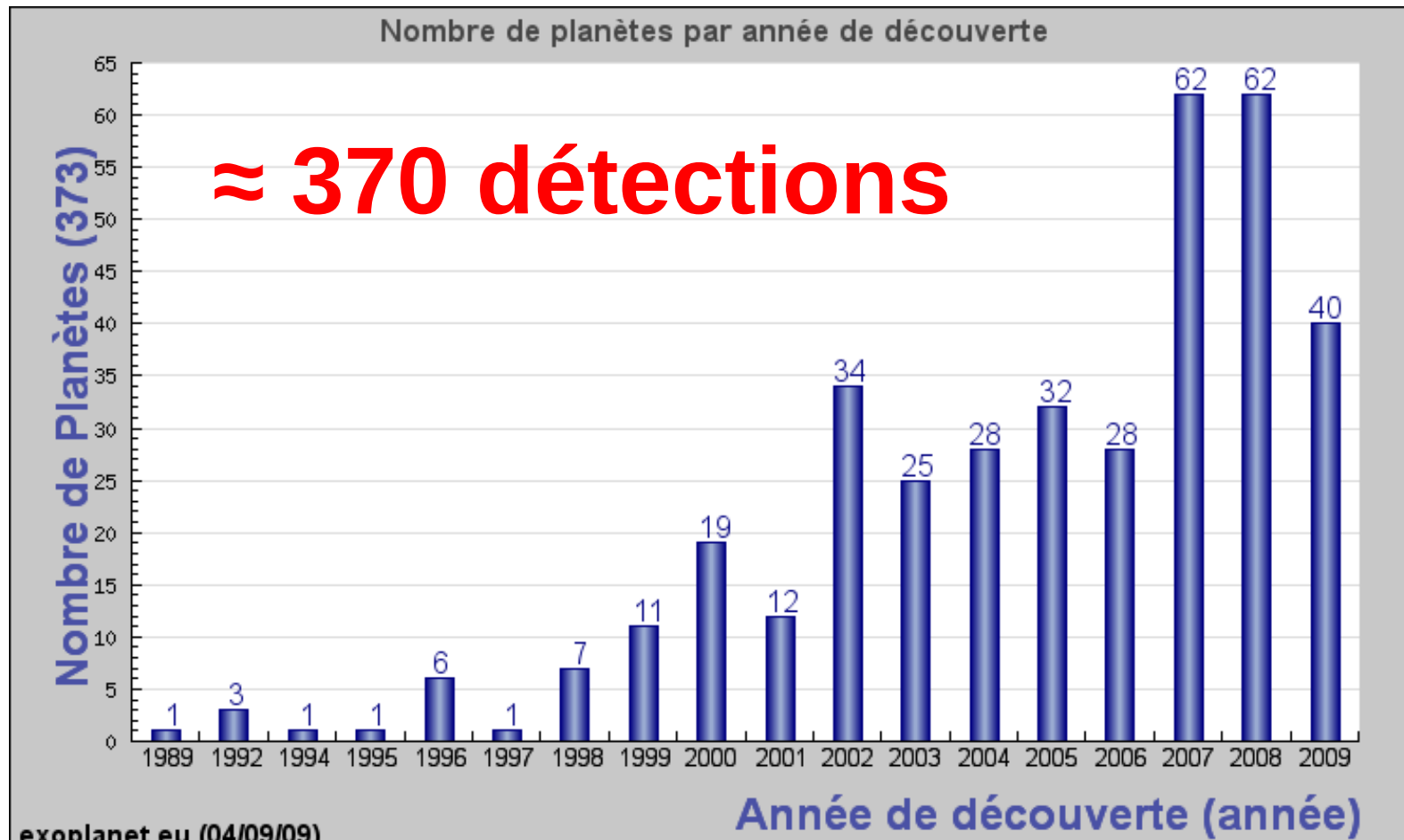
Principe de la SCC

Prévisions / simulations

Résultats expérimentaux

# Les exoplanètes, aujourd'hui

- Planètes en dehors du système solaire
- 1<sup>ère</sup> détection en 1995



# Pourquoi les étudier ?

- Origines de la vie, **exo-biologie**  
→ qu'est-ce que la vie ?



Nous



Végétaux



Rimicaris exoculata  
*Williams&Rona 1986*  
*Minic 2006*



Autres

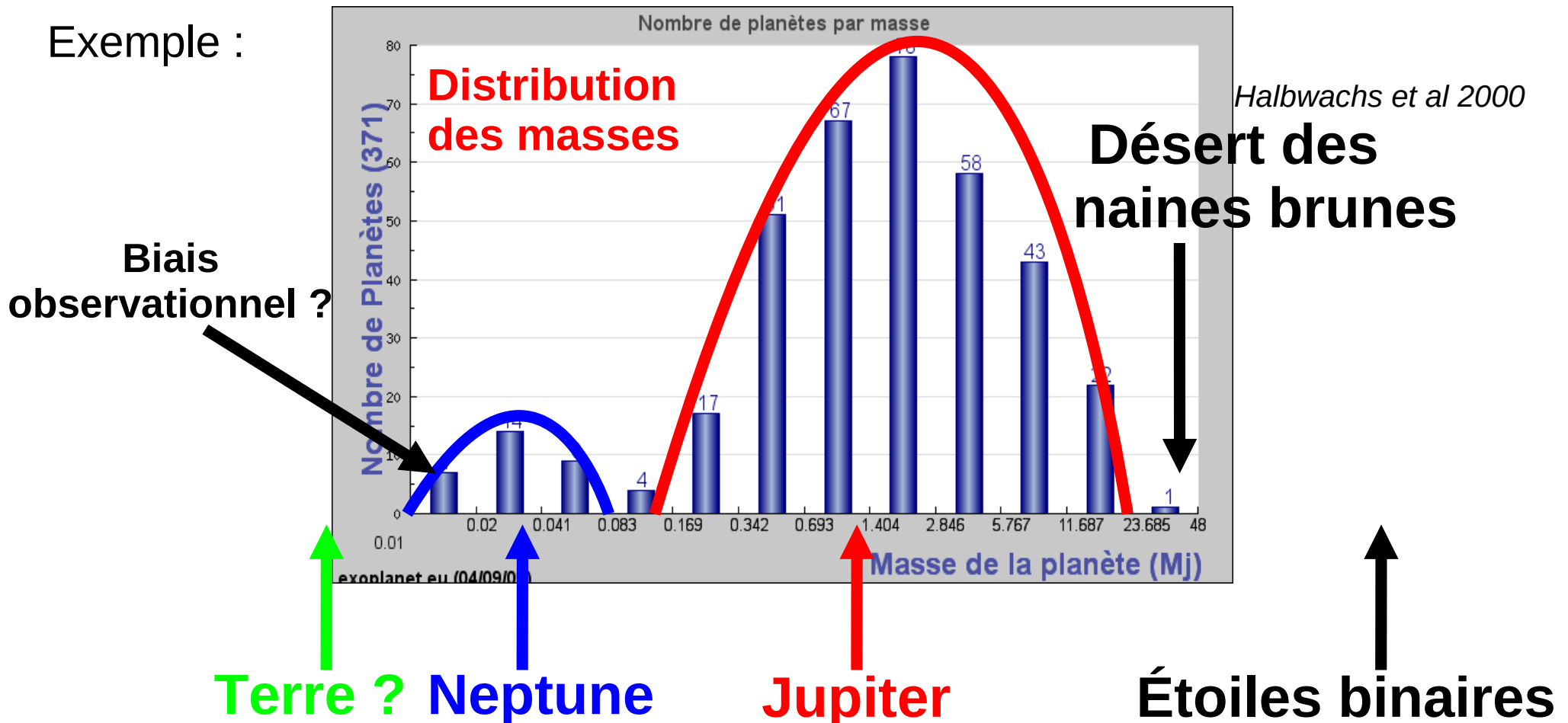
- **Formation et évolution, atmosphère : vérifier les modèles**  
→ accrétion, instabilité gravitationnelle ou les deux ?  
→ migration ou non ?  
→ quelle atmosphère ?

*Papaloizou&Terquem 2006, Boss 2006*  
*Trilling et al 1998, Rice&Armitage 2003*  
*Pätzol&Rauer 2002, Tinetti&Beaulieu 2009, etc.*

# Quels résultats ?

- Nouveaux types de planètes : Jupiter chaud, super-Terre
- Études statistiques *Udry&Santos 2007, Santos 2008, Cumming et al 2008, etc.*

Exemple :

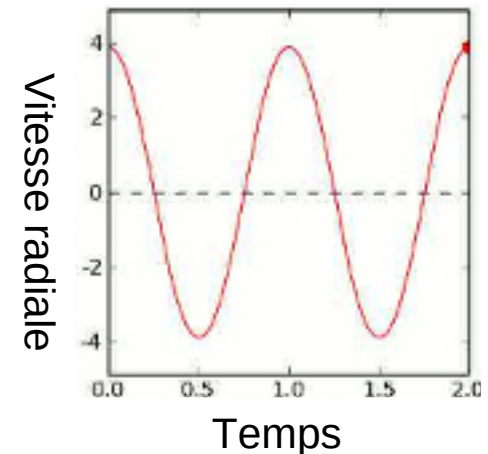


# Comment les détecter ? (I)

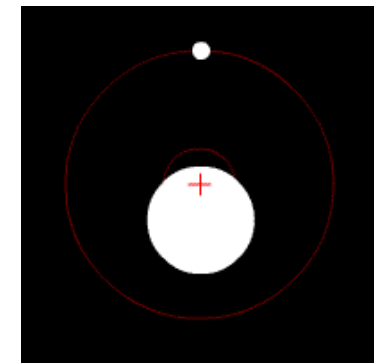
## Mouvement propre de l'étoile

Détections indirectes

- **Vitesse radiale** : effet Doppler  
Compagnons massifs et proches  
**>80% des détections actuelles**  
*Harps (ESO), Espresso (VLT), Codex (E-ELT)*



- **Astrométrie**  
Compagnons massifs et éloignés  
Étoiles jeunes  
*Prima (VLTI), Gaia, Sim*



La planète fait bouger l'étoile

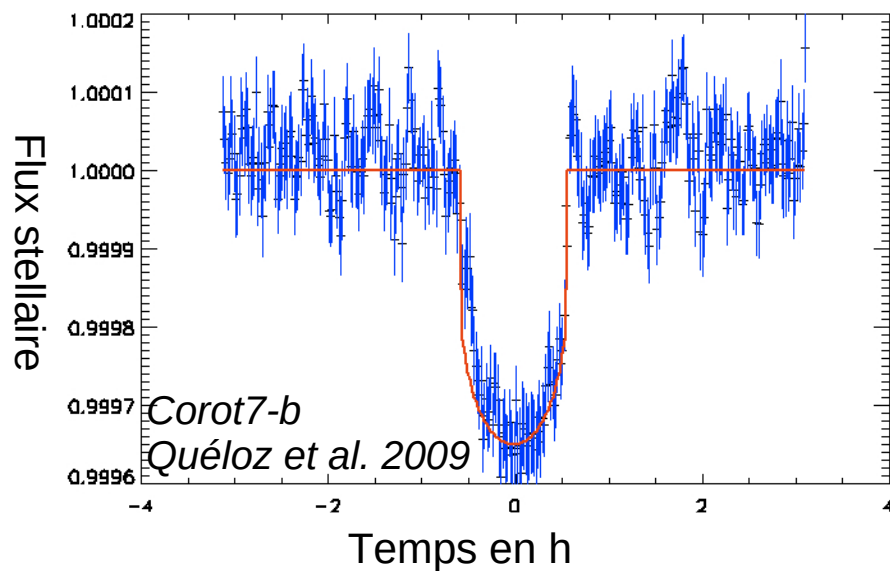
# Comment les détecter ? (II)

## Mesure du flux stellaire

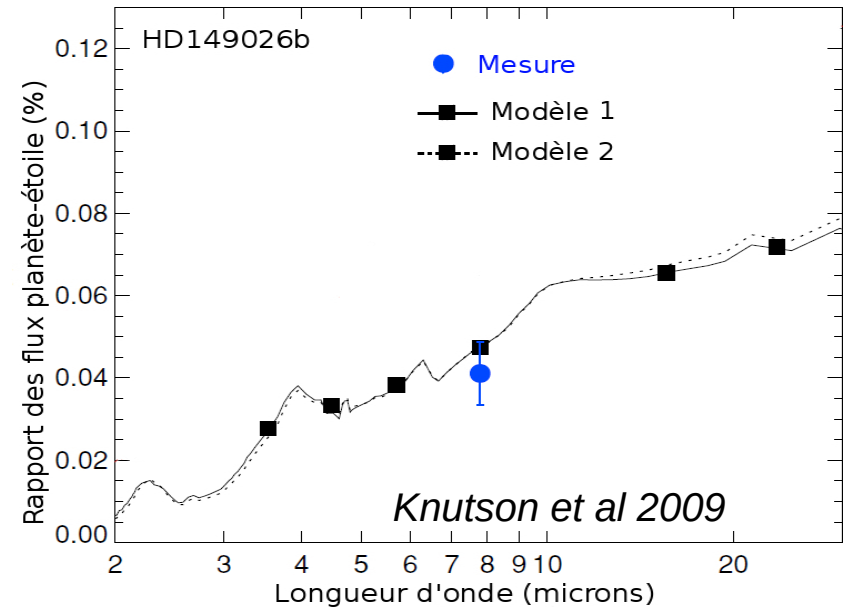
Compagnons proches

Corot, Képler

→ **Transit primaire**  
(détection indirecte)



→ **Transit secondaire**  
(détection directe)  
Spectres basse résolution

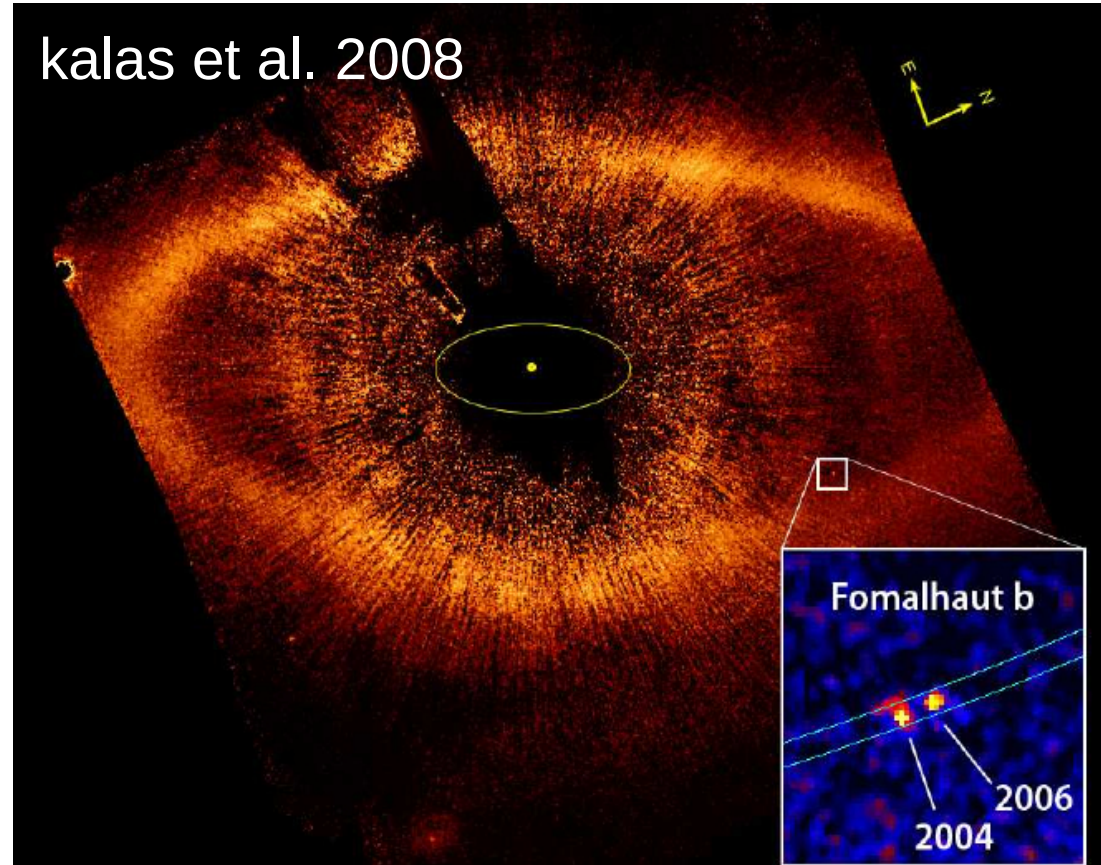


# Comment les détecter ? (III)

## Imagerie directe de la planète

Compagnons brillants  
et pas trop proches

*ADI + Keck, Gemini, etc.  
Télescope spatial de 1.5m*



**Spectre → Physico-chimie atmosphère et surface**

# Plan de l'exposé

## Introduction

Exoplanètes et leur détection

Imagerie à haut contraste

## Coronographe à quatre quadrants à étages multiples

Principe du MFQPM

Démonstration expérimentale

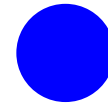
## Self-Coherent Camera

Principe de la SCC

Prévisions / simulations

Résultats expérimentaux

# Étoile - exoplanète



- ( $\approx$ ) Deux points sources

- Faible séparation angulaire :

Quelques fractions de secondes d'arc

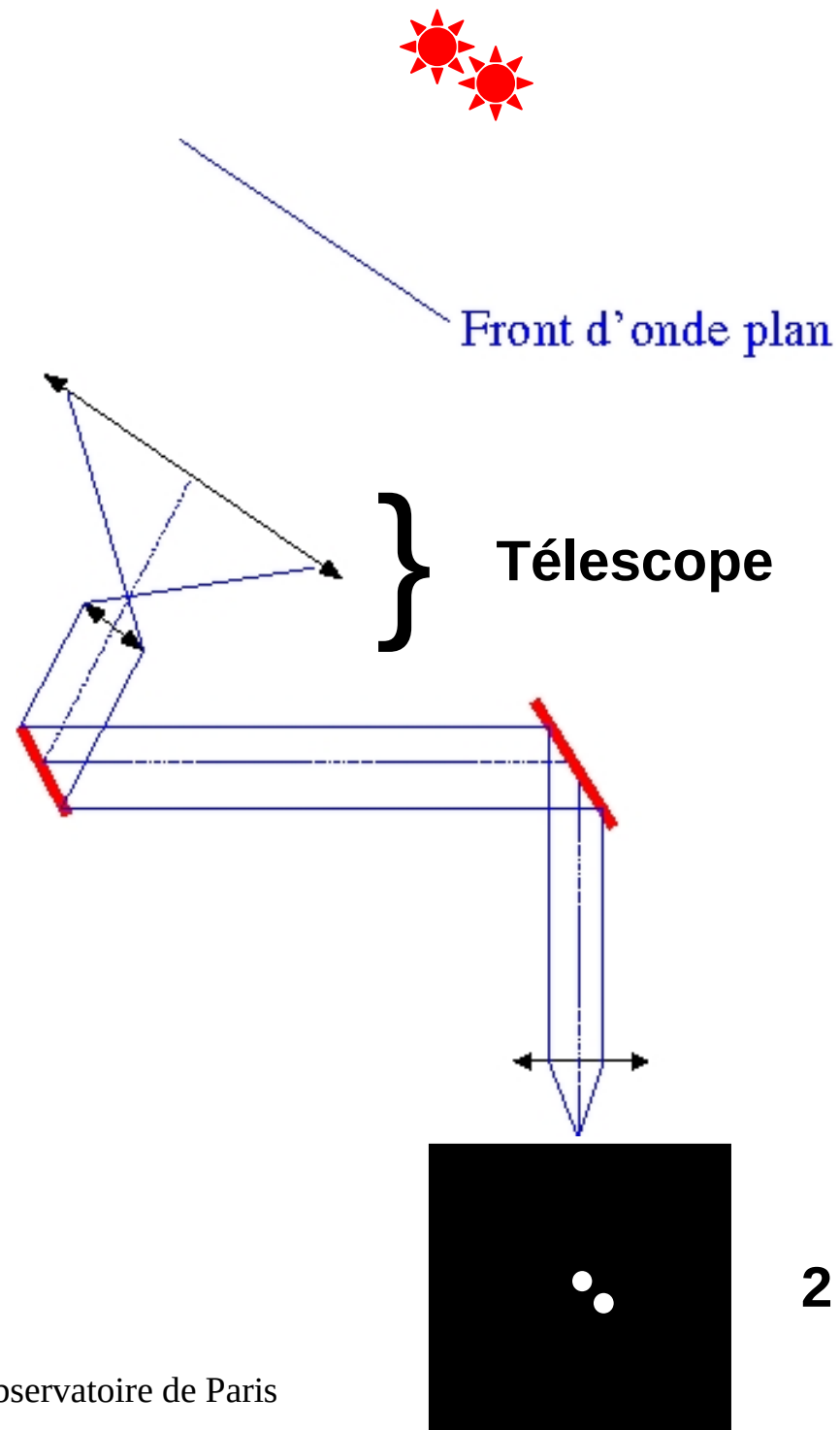
→ Grand télescope, espace ou optique adaptative

- Grande différence des intensités lumineuses :

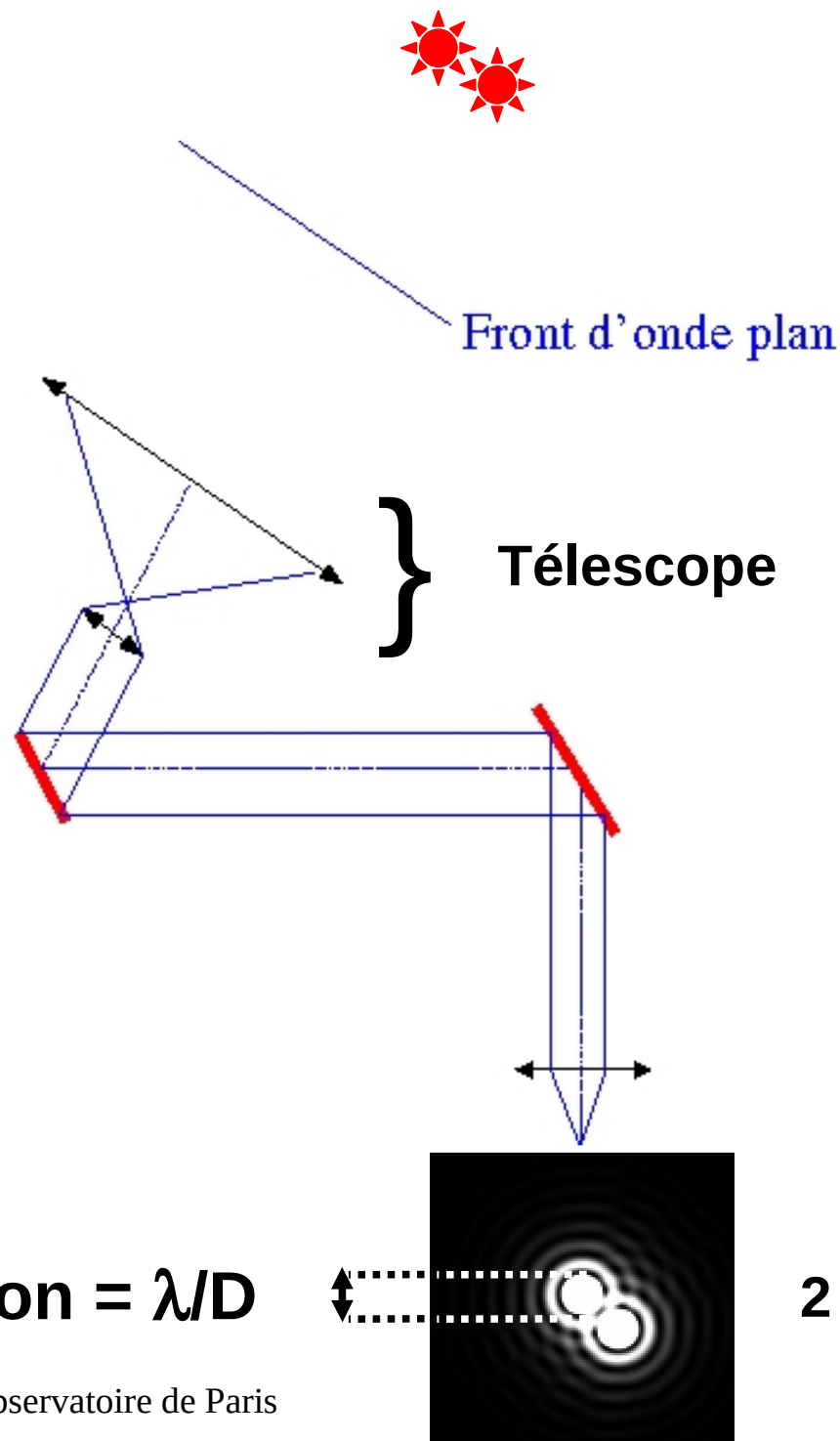
$$I_{\text{étoile}} / I_{\text{planète}} = 10\,000 \text{ à } 10 \text{ milliards}$$

→ Coronographie, imagerie différentielle, dark hole

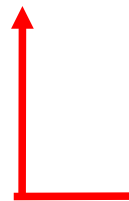
# Optique géométrique



# Diffraction par le télescope dans l'espace



**D (diamètre télescope)**  
→ quelques mètres

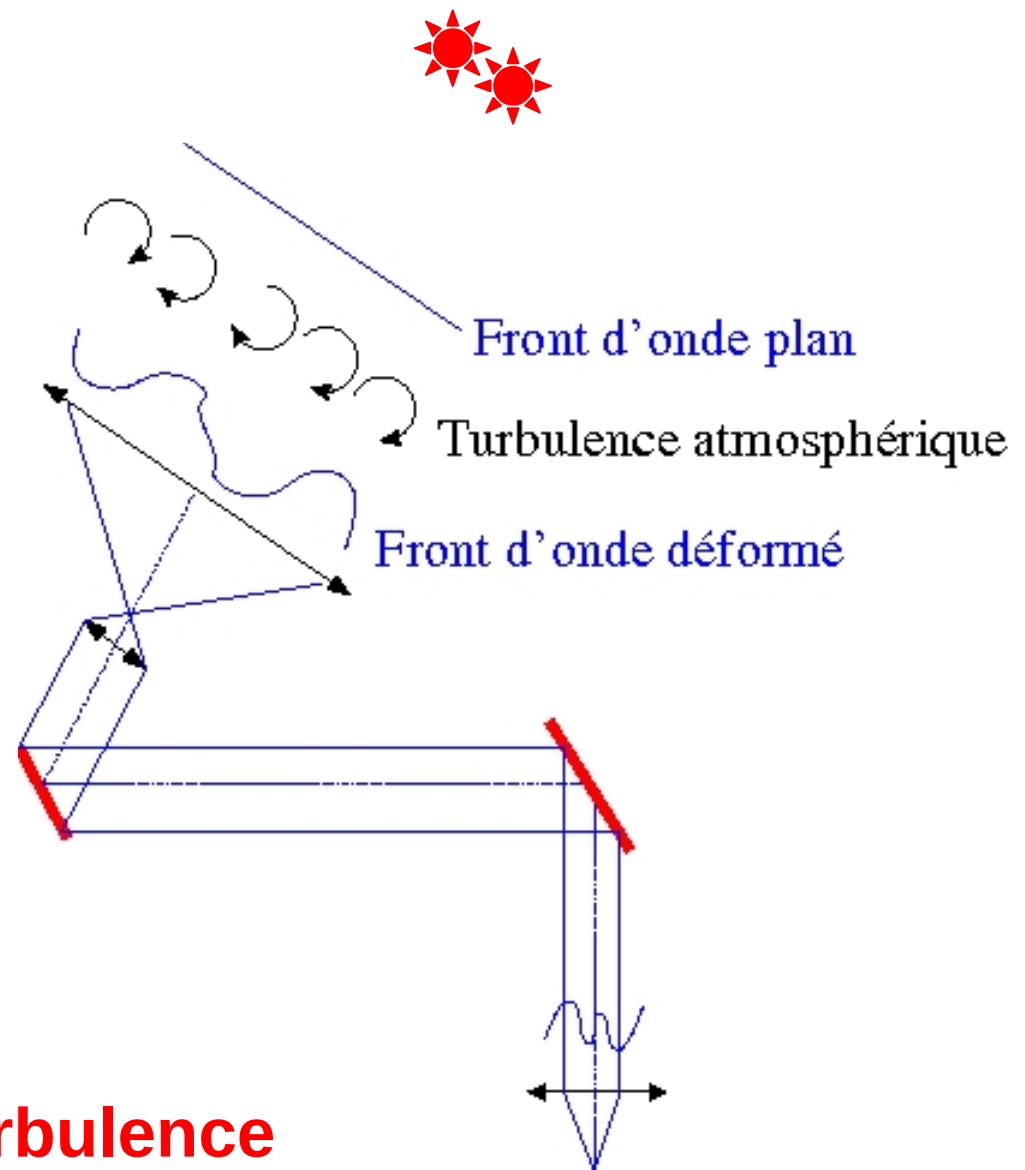


$$\text{Résolution} = \lambda/D$$



**2 taches**

# Impact de l'atmosphère au sol



1) Ciel de qualité

2) Compensation de la turbulence



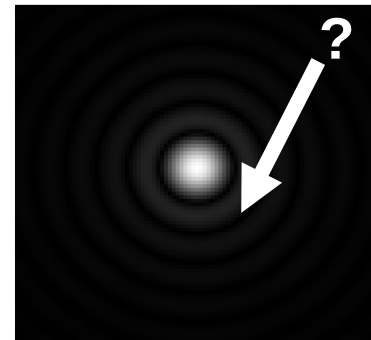
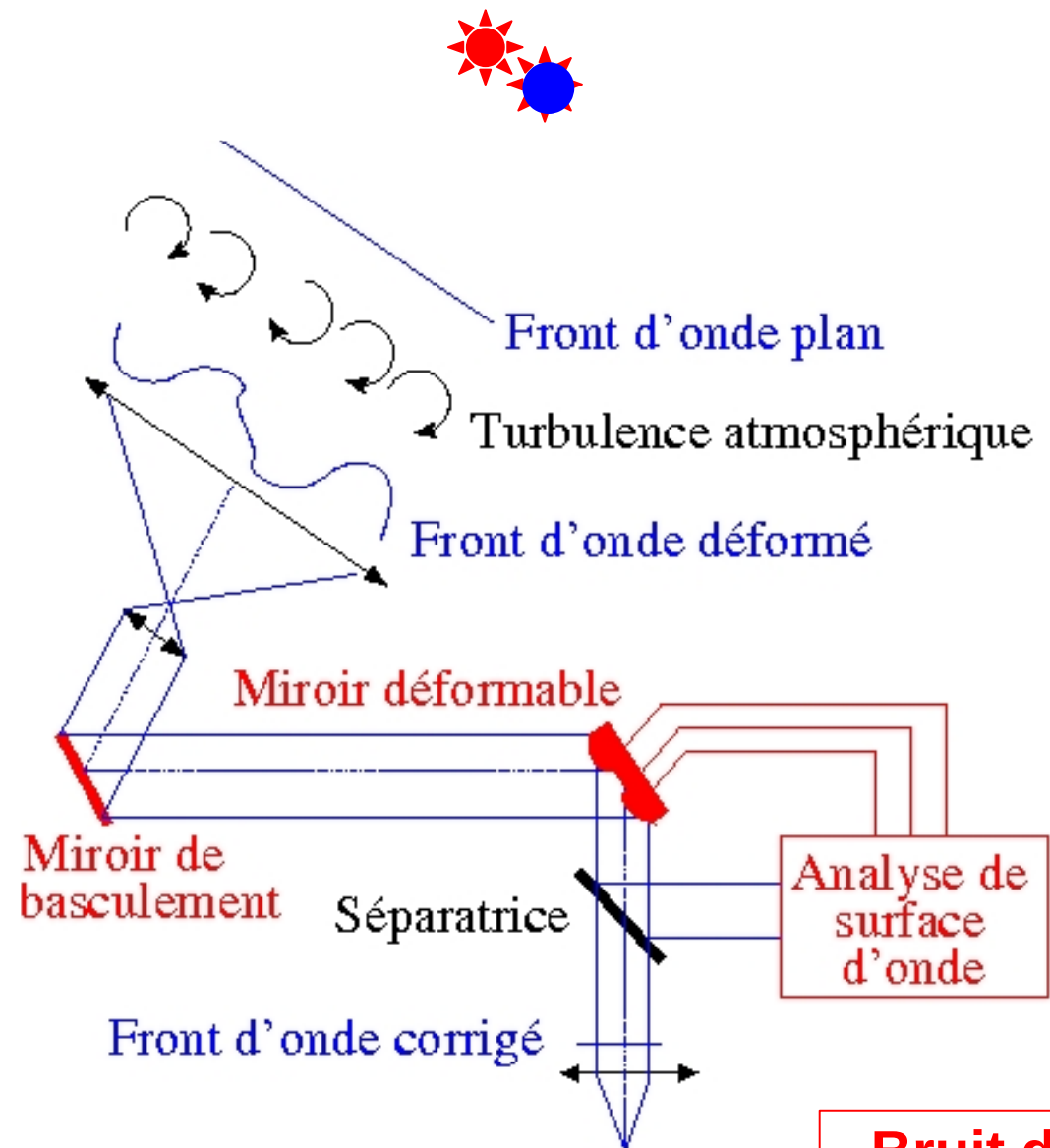
**Système non résolu**

# Optique adaptative

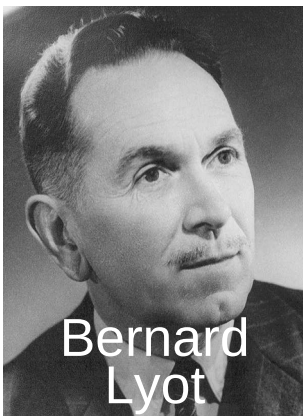
Haute résolution angulaire

Résolution  $\approx \lambda/D$

$$I_{\text{étoile}} / I_{\text{planète}} = 10^4 - 10^{10}$$



**Bruit de photons de l'étoile**



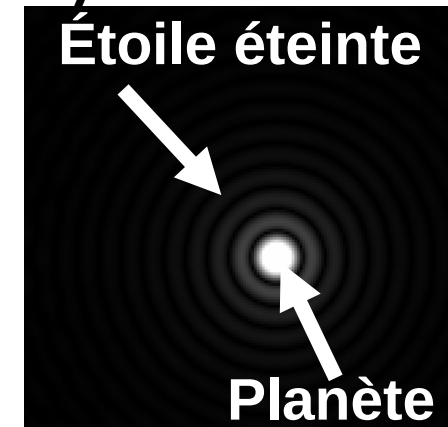
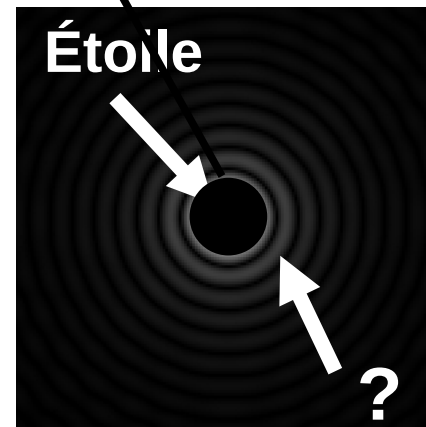
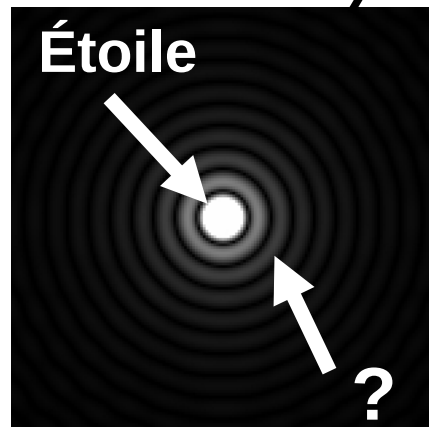
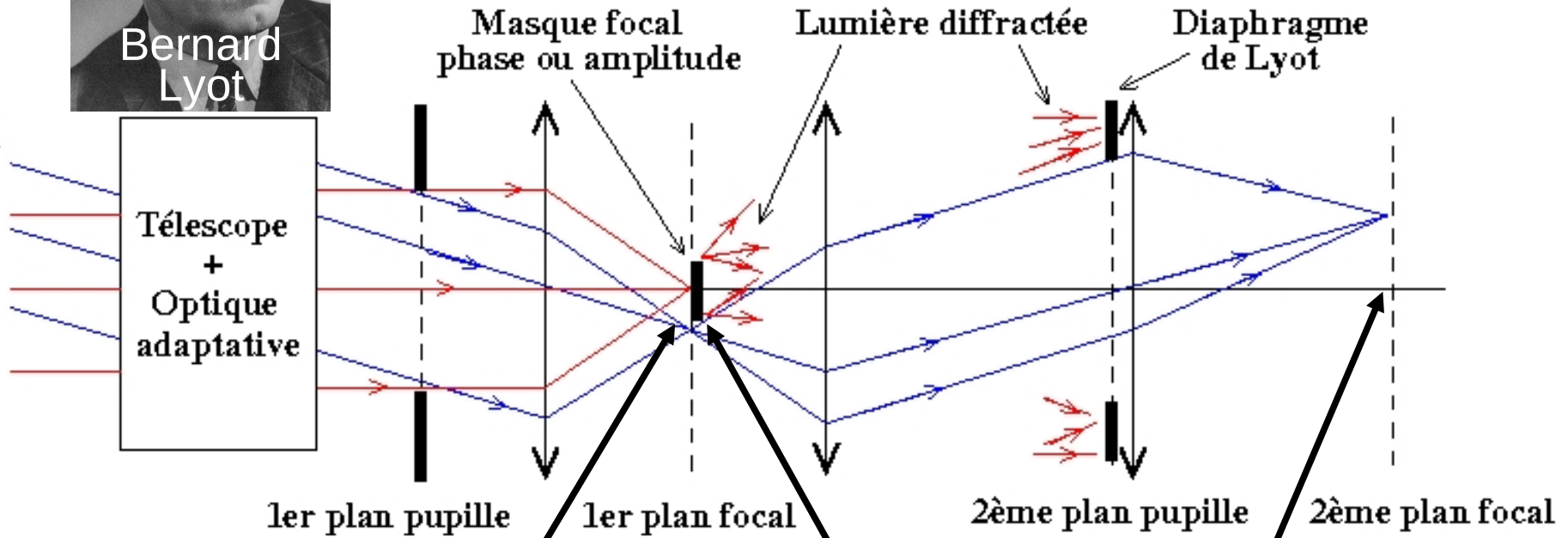
Bernard Lyot

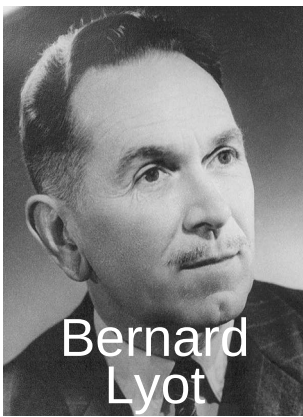
# Coronographie

Compagnon



Étoile





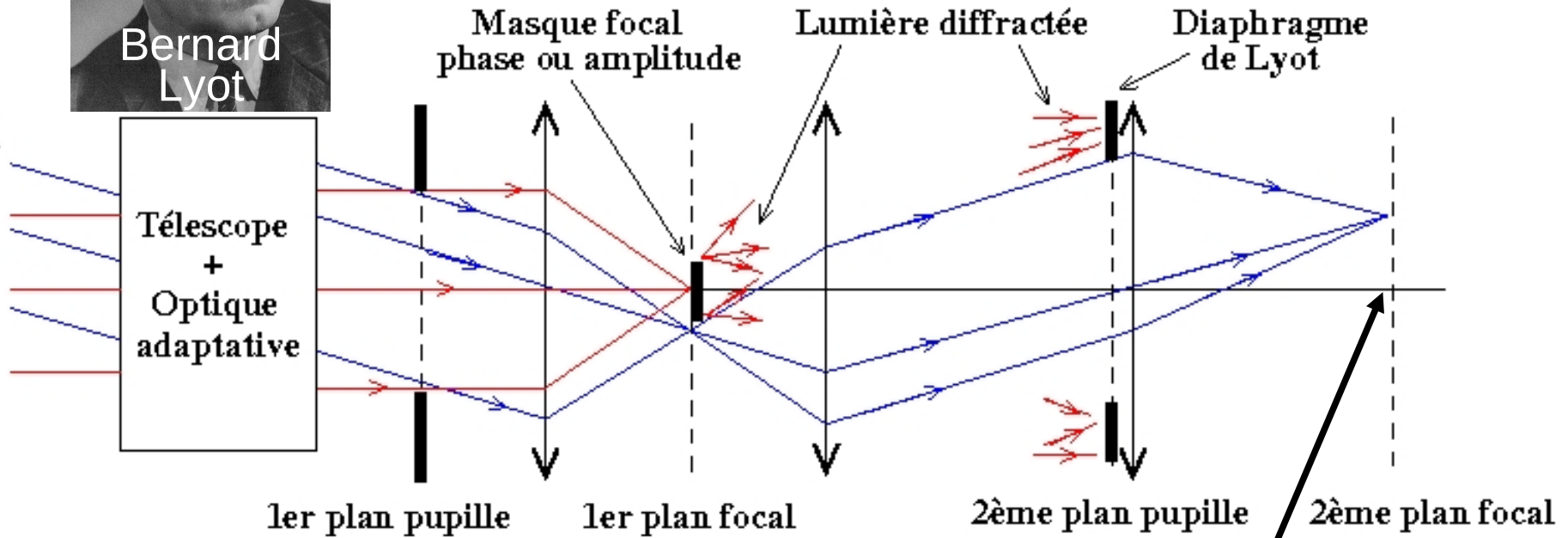
Bernard Lyot

# Coronographie

Compagnon



Étoile



Coronographe de Lyot

Coronographe à quatre quadrants

Band-limited mask coronagraph

Coronographe de Lyot apodisé

Phase Induced Amplitude Apodization coronagraph

**Coronographe à quatre quadrants à étages multiples**

et beaucoup d'autres

*Lyot 1932*

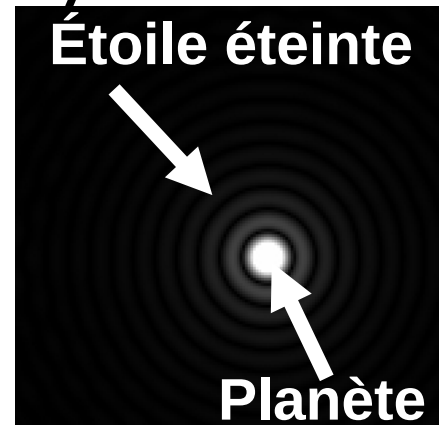
*Rouan et al. 2000*

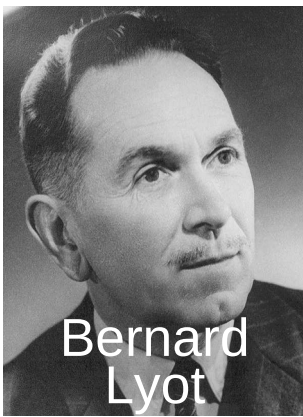
*Kuchner&Traub 2002*

*Aime 2005*

*Guyon et al. 2005*

*Baudoz et al. 2008*

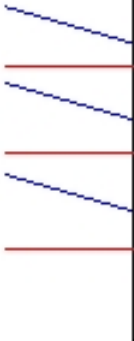




Bernard Lyot

# Coronographie

Compagnon



Télescope +  
Optique adaptative

Étoile

Résidu de l'OA  
Défauts optiques  
(qq 10nm)

Masque focal  
phase ou amplitude

Lumière diffractée

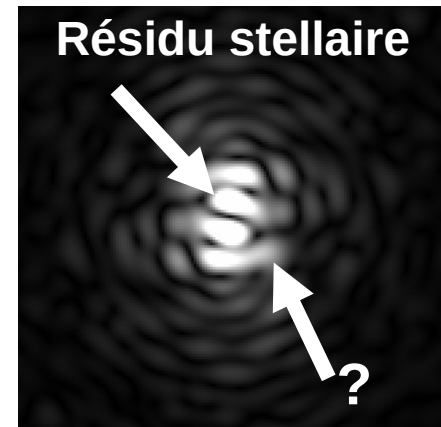
Diaphragme  
de Lyot

plan focal

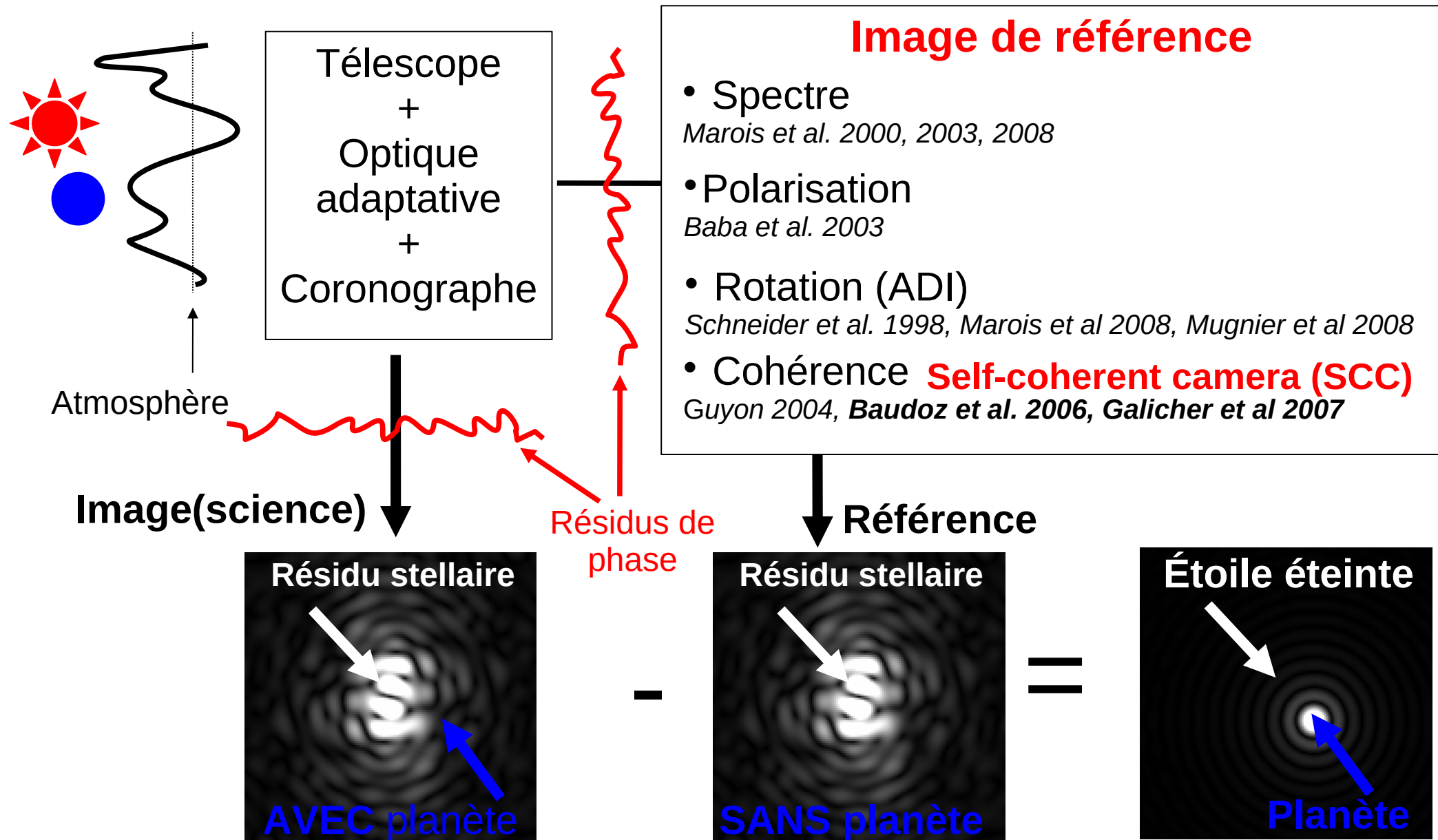
2ème plan pupille

2ème plan focal

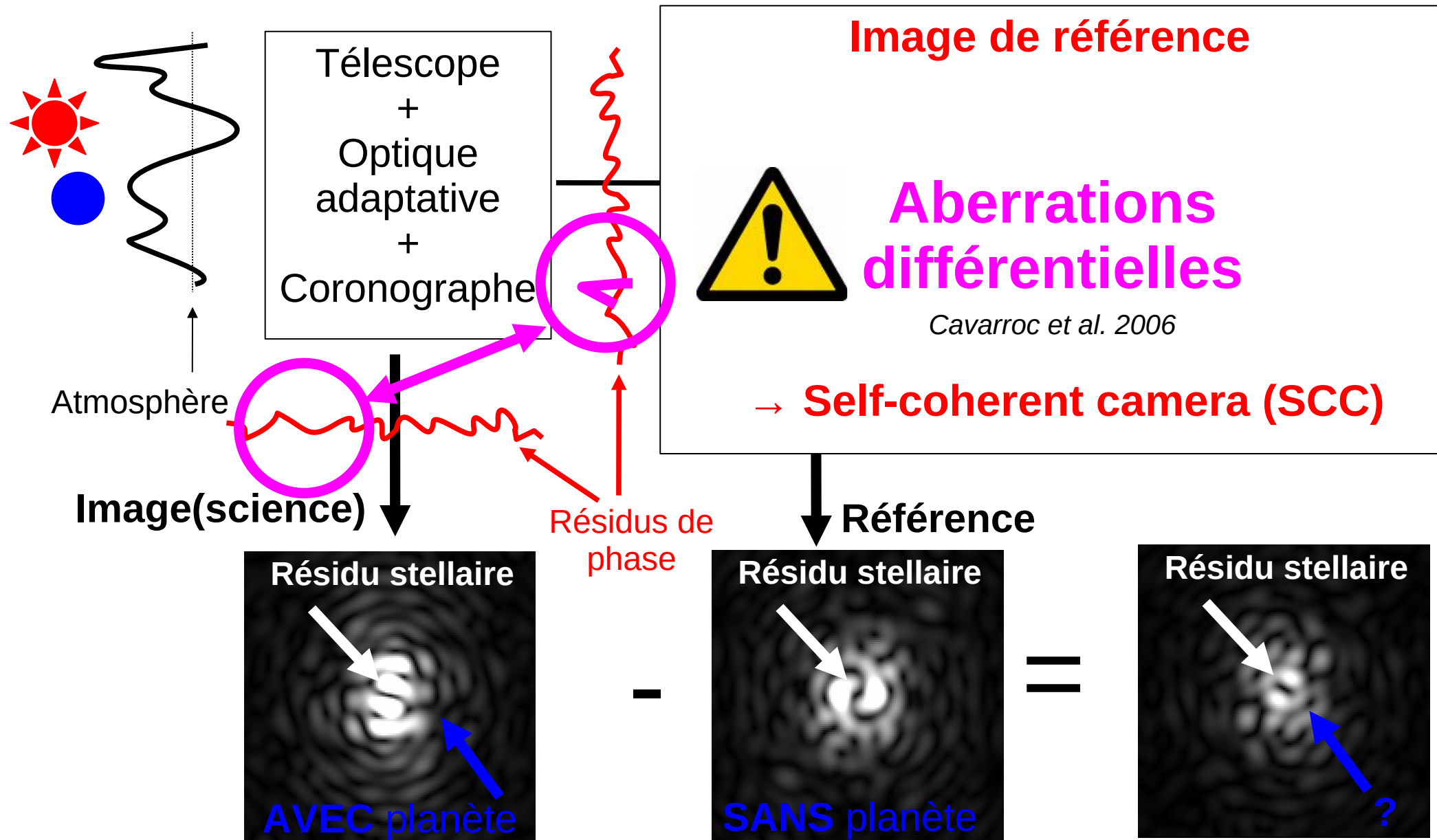
Bruit de  
speckles  
de l'étoile



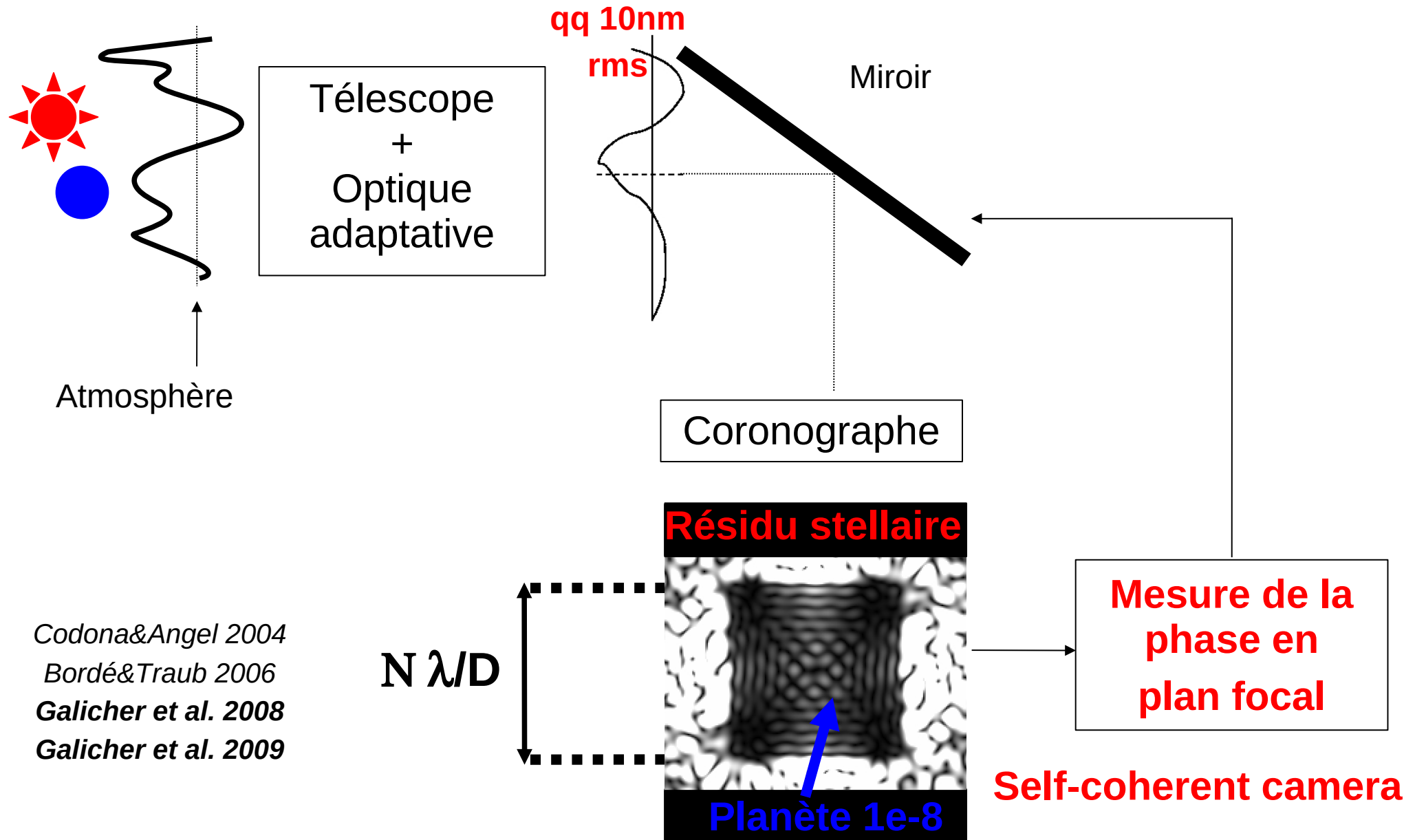
# Imagerie différentielle : étalonnage des speckles



# Imagerie différentielle : étalonnage des speckles



# Dark hole : suppression des speckles



Codona&Angel 2004  
Bordé&Traub 2006  
Galicher et al. 2008  
Galicher et al. 2009

# Imagerie haut contraste

## Partie 2

### Coronographe à quatre quadrants à étages multiples (MFQPM)

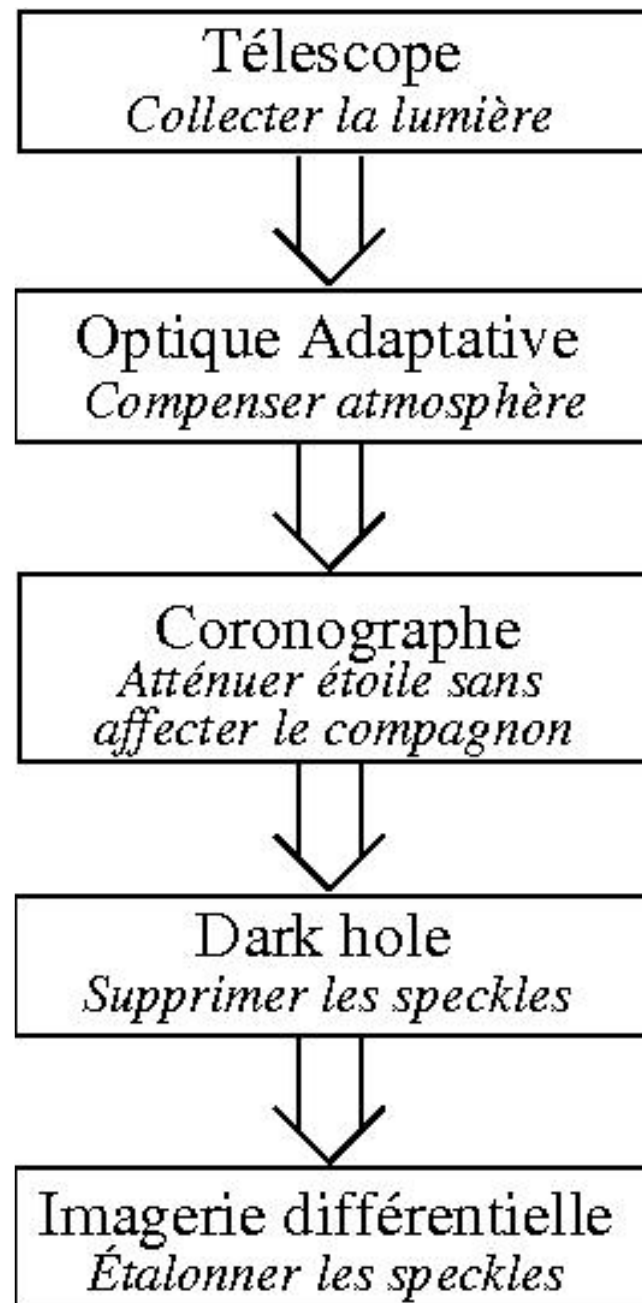
Baudoz et al. 2008

## Partie 3

### Self-coherent camera (SCC)

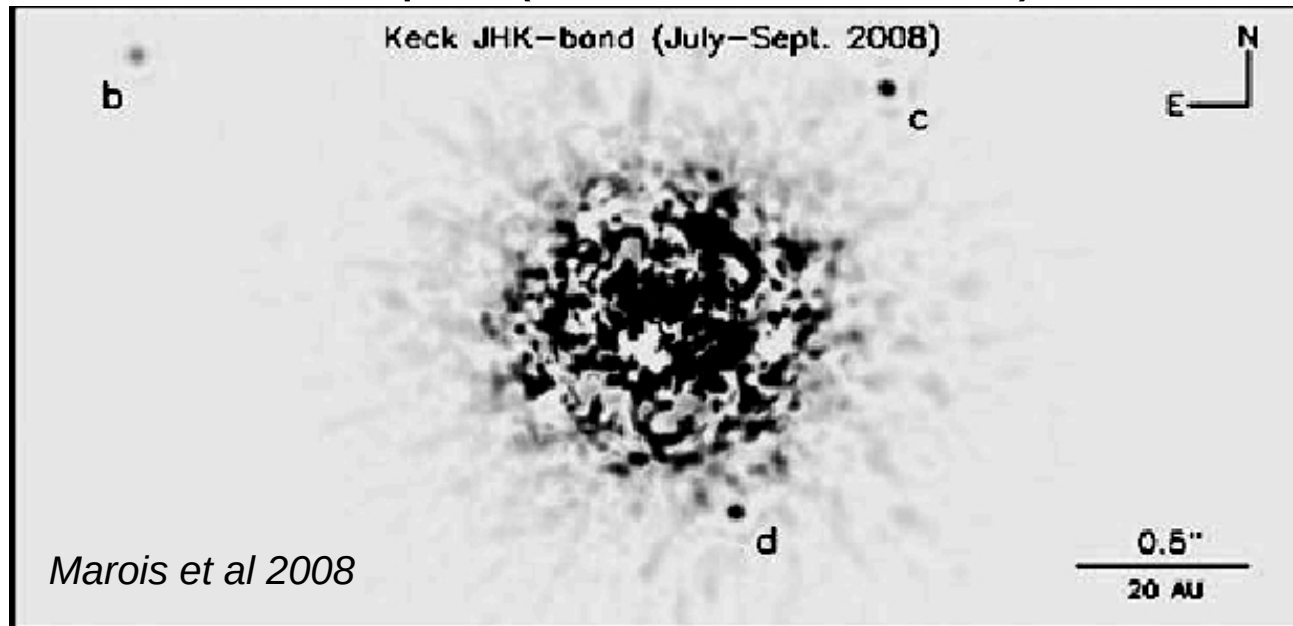
Galicher et al. 2008, Galicher et al. accepté

Baudoz et al. 2006, Galicher et al. 2007



# Instruments actuels et futurs

En 2009 : Grands télescopes (Gemini, Keck, VLT) + ADI



Prochainement : Europe : **SPHERE** → VLT (*Beuzit et al. 2006*)

USA : **GPI** → Gemini (*Macintosh et al. 2008*)

Japon : **HiCIAO** → Subaru (*Tamura et al. 2006*)

Europe+USA : **MIRI/NIRCAM** → JWST (*Rieke et al. 2007*)

À long terme : Europe : **EPICS** → ELT (*Kasper et al. 2007*)

USA : **PFI** → TMT (*Macintosh et al. 2006*)

# Imagerie haut contraste

## Partie 2

### Coronographe à quatre quadrants à étages multiples (MFQPM)

Baudoz et al. 2008

## Partie 3

### Self-coherent camera (SCC)

Galicher et al. 2008, Galicher et al. accepté

Baudoz et al. 2006, Galicher et al. 2007

Télescope  
*Collecter la lumière*

Optique Adaptative  
*Compenser atmosphère*

Coronographe  
*Atténuer étoile sans  
affecter le compagnon*

Dark hole  
*Supprimer les speckles*

Imagerie différentielle  
*Étalonner les speckles*

# Plan de l'exposé

## Introduction

Exoplanètes et leur détection

Imagerie à haut contraste

## Coronographe à quatre quadrants à étages multiples

Principe du MFQPM

Démonstration expérimentale

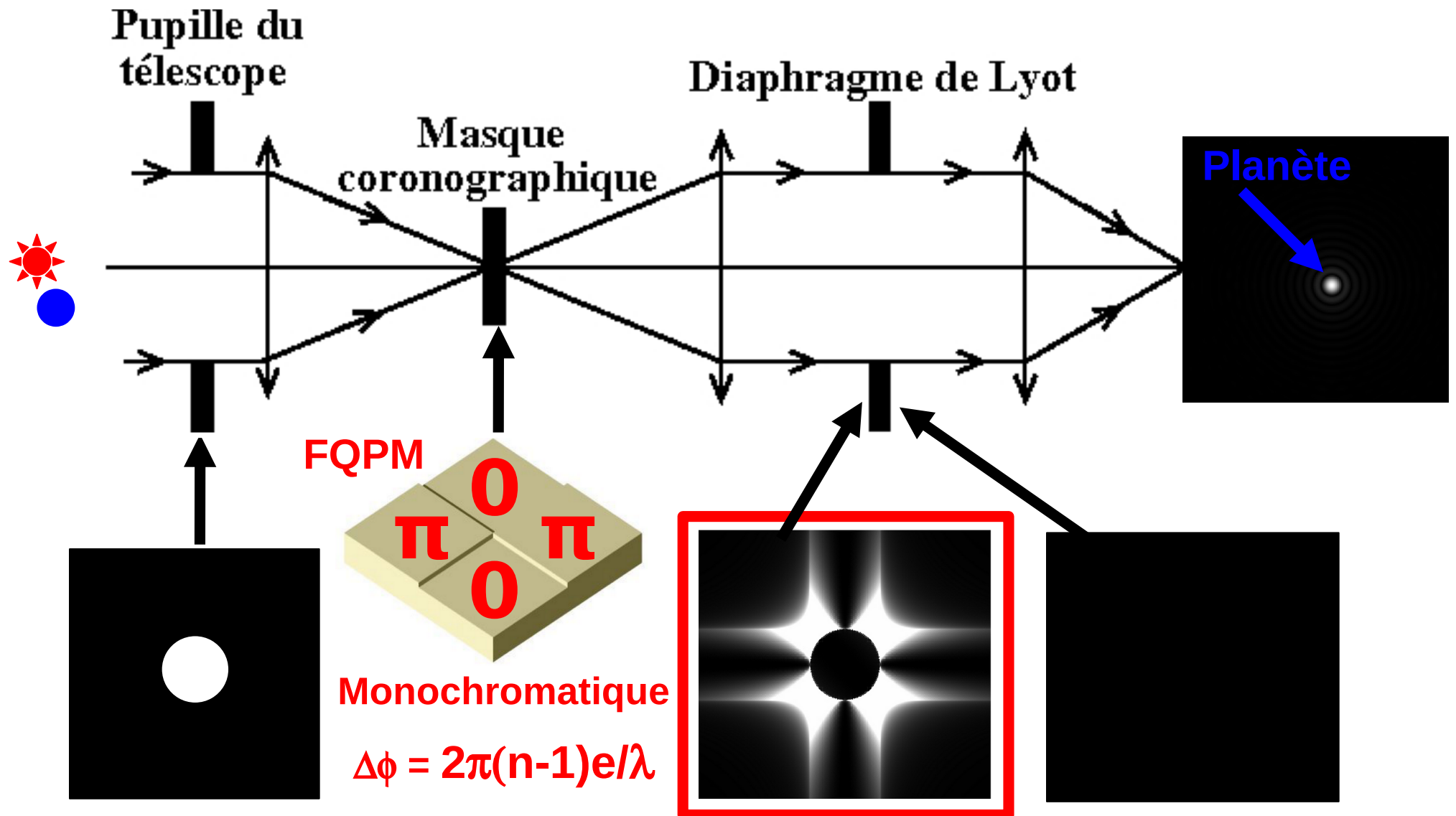
## Self-Coherent Camera

Principe de la SCC

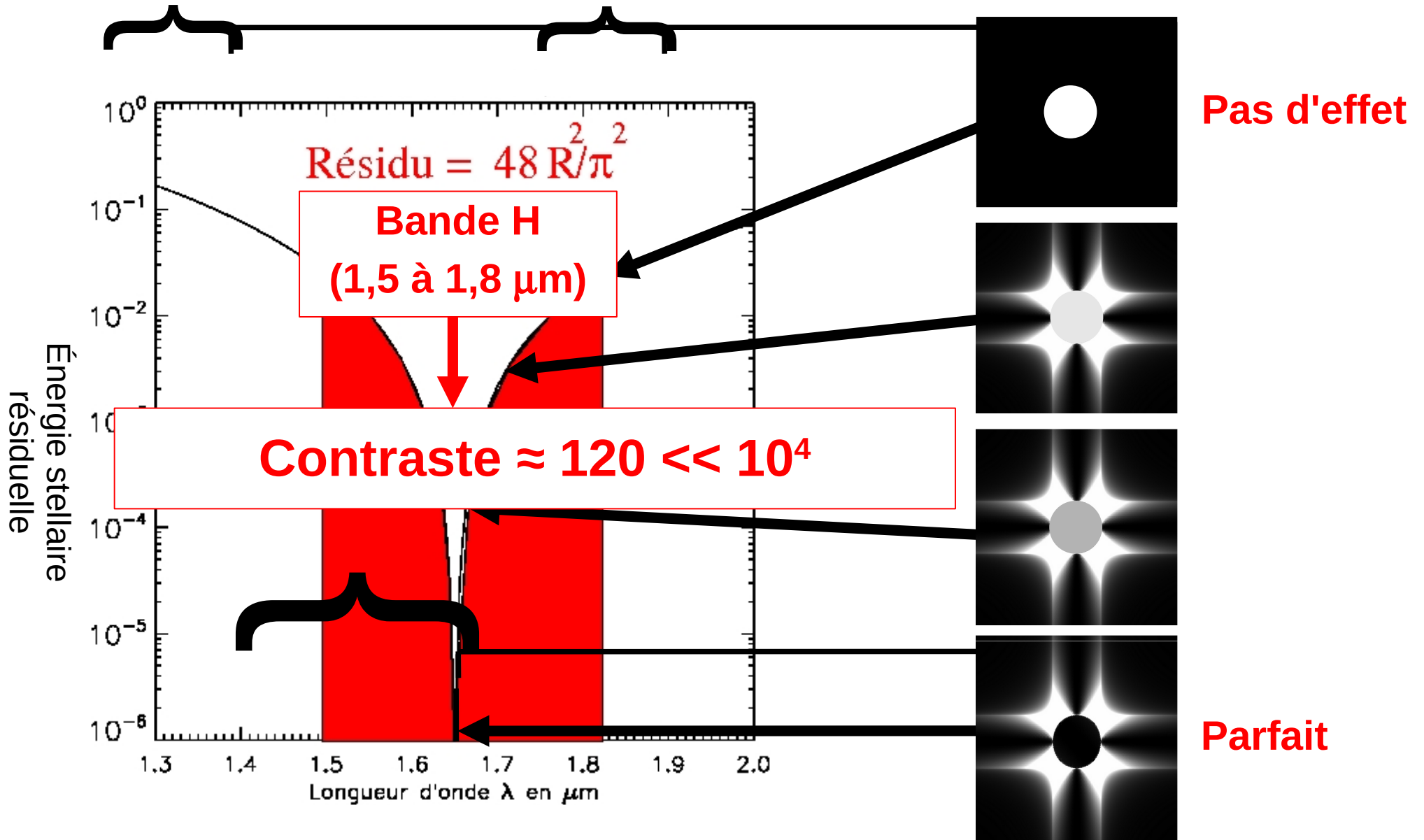
Prévisions / simulations

Résultats expérimentaux

# Coronographe à quatre quadrants



# FQPM achromatique

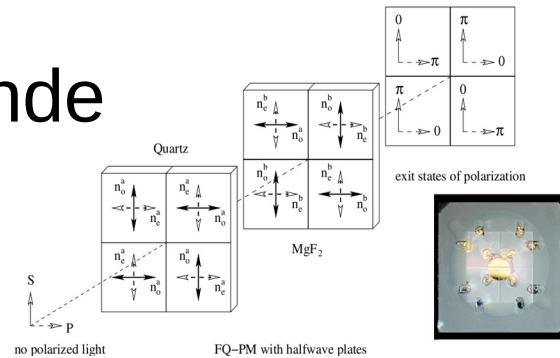


# Achromatisation du FQPM

- Lames demi-onde

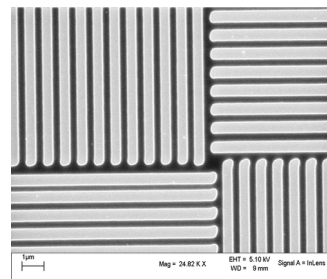
*Mawet et al. 2006*

*Boccaletti et al. 2008*



- Réseaux sub-lambda

*Mawet et al. 2005, 2006*



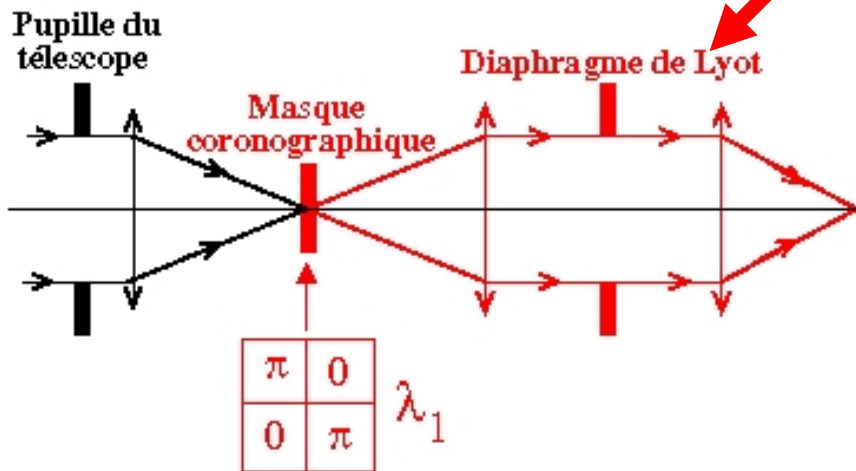
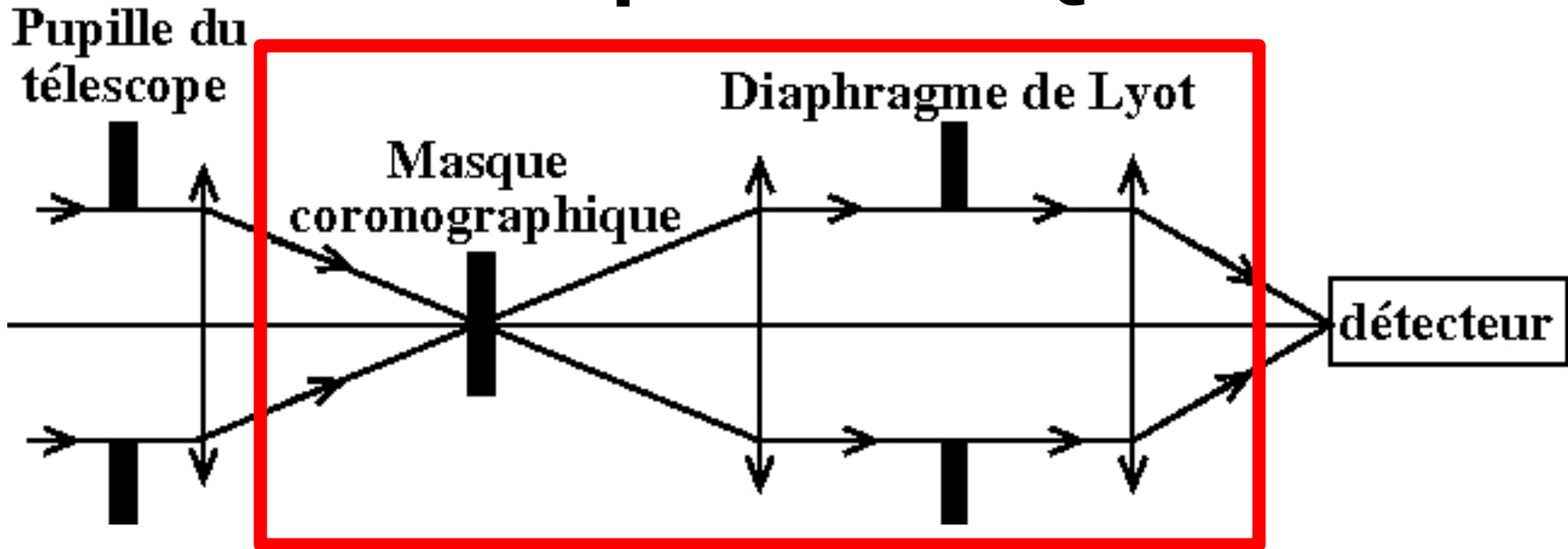
- Interféromètre de Mach-Zender

*Carlotti et al. 2008*

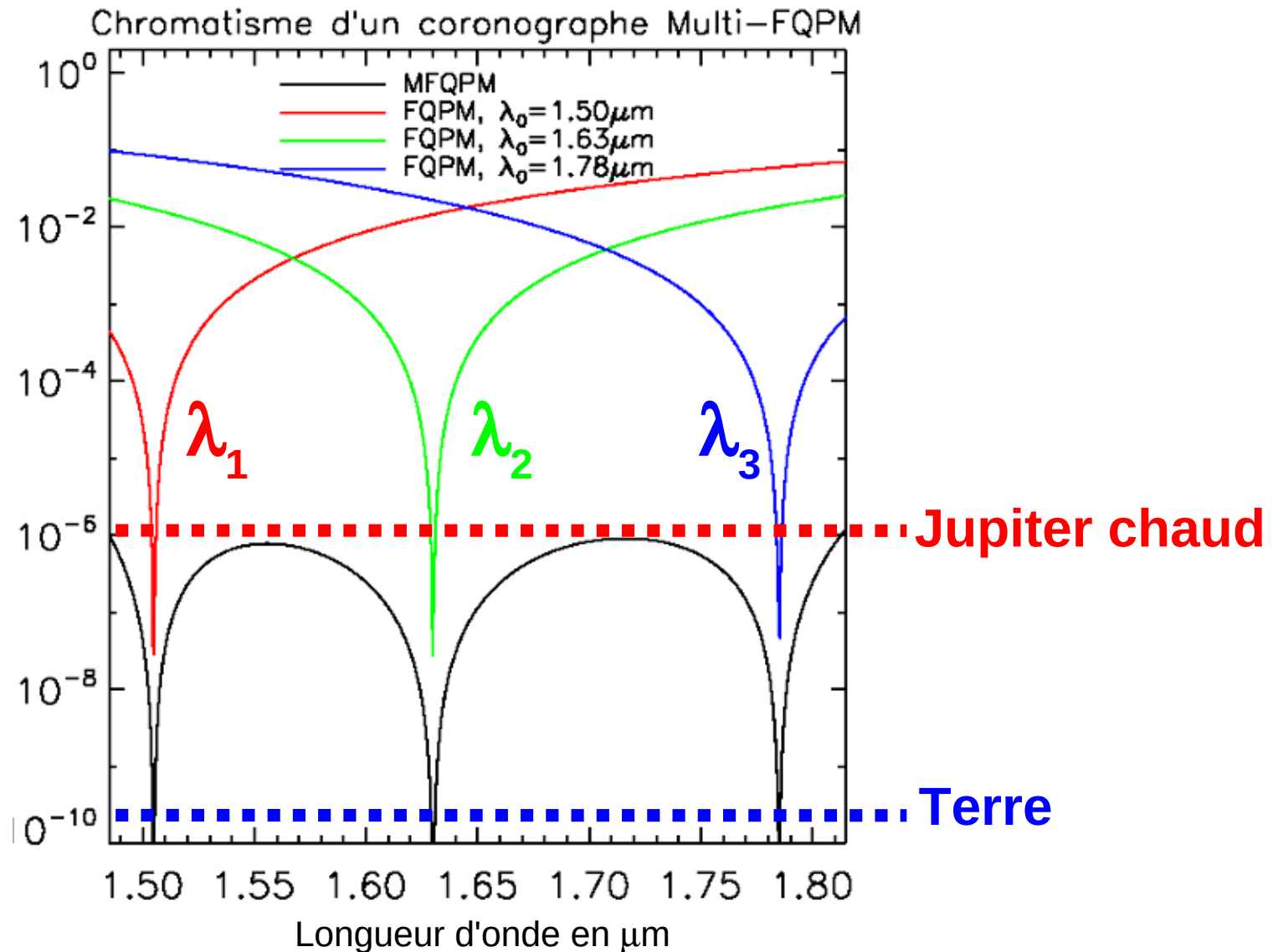
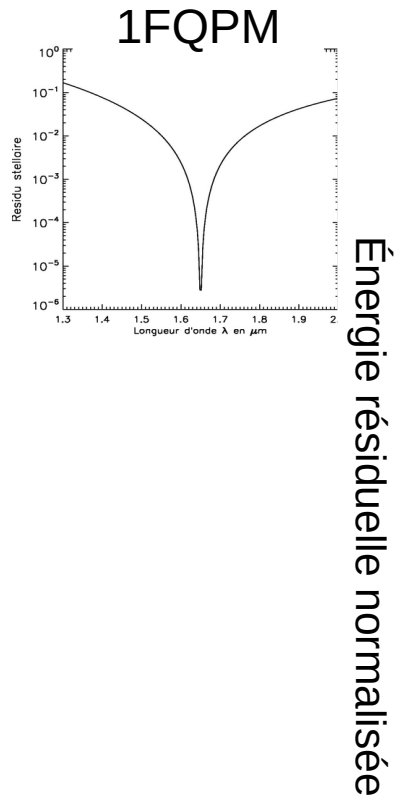
- Coronographe à quatre quadrants à étages multiples

**MFQPM** = Multi-stage Four Quadrant Phase Mask

# Principe du MFQPM



# Prévisions / simulations numériques



# Plan de l'exposé

## Introduction

Exoplanètes et leur détection

Imagerie haut contraste

## Coronographe à quatre quadrants à étages multiples

Principe du MFQPM

Démonstration expérimentale

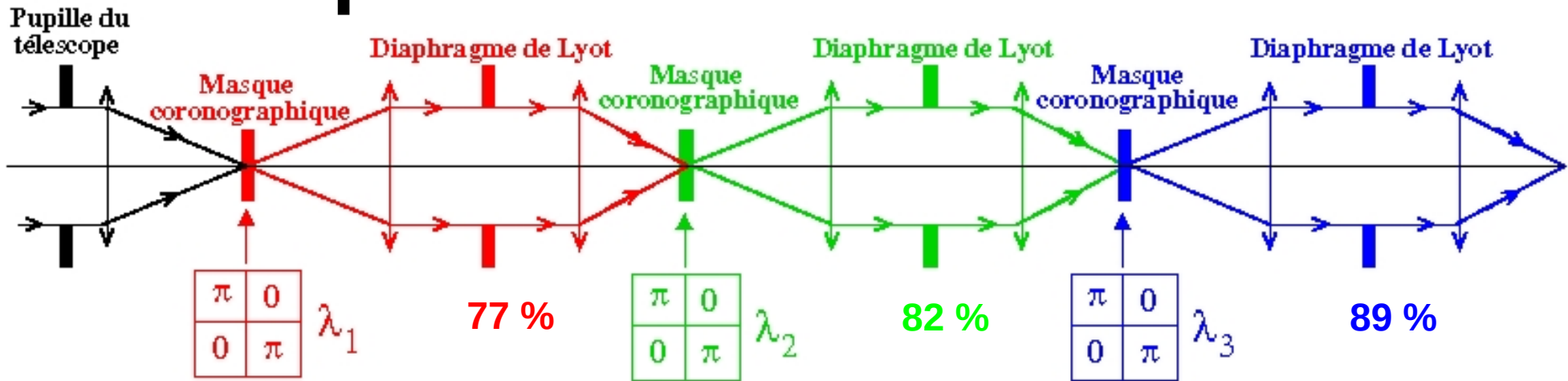
## Self-Coherent Camera

Principe de la SCC

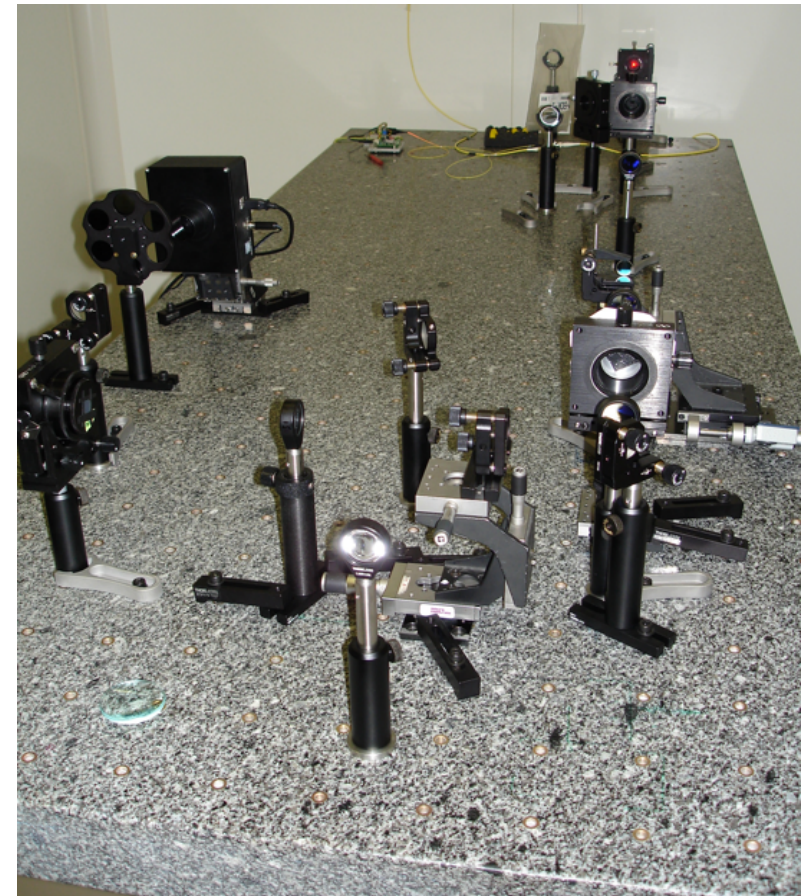
Prévisions / simulations

Résultats expérimentaux

# Expérience en laboratoire



- Source super lumineuse
- 3 FQPMs monochromatiques :
  - $\lambda_1 = 623 \text{ nm}$
  - $\lambda_2 = 633 \text{ nm}$
  - $\lambda_3 = 641 \text{ nm}$
- Lentilles standards (chromaticité, sphéricité)
- Pupille d'entrée : 1.78 mm
- $F/D \approx 250$

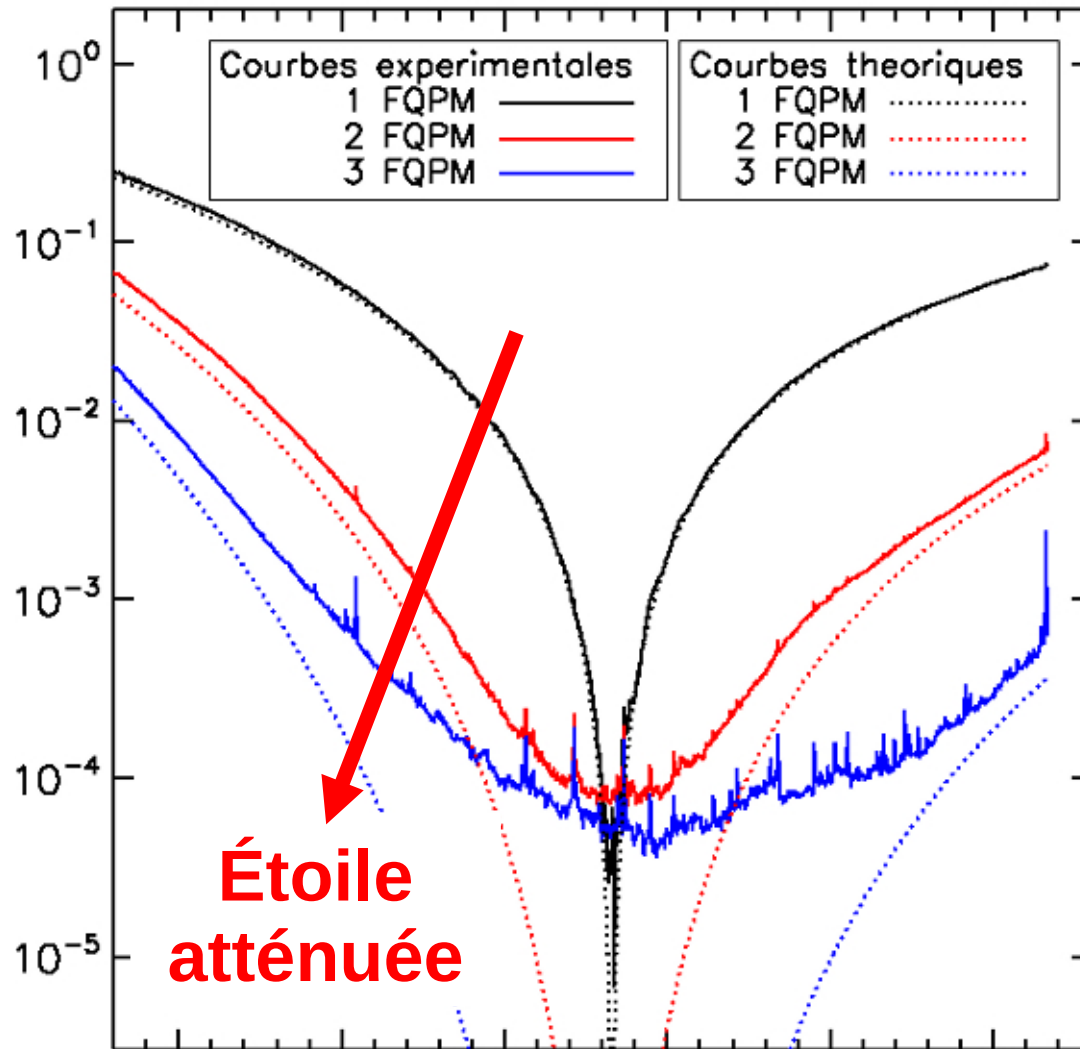


# Spectres expérimentaux

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$$

Énergie résiduelle normalisée

Atténuation d'un MFQPM en fonction de  $\lambda$



1 FQPM

2 FQPM

3 FQPM

**Étoile atténuée**

**Jupiter chaud**

Longueur d'onde en nm

# Image en visible, $R = \lambda/\Delta\lambda = 4,8$

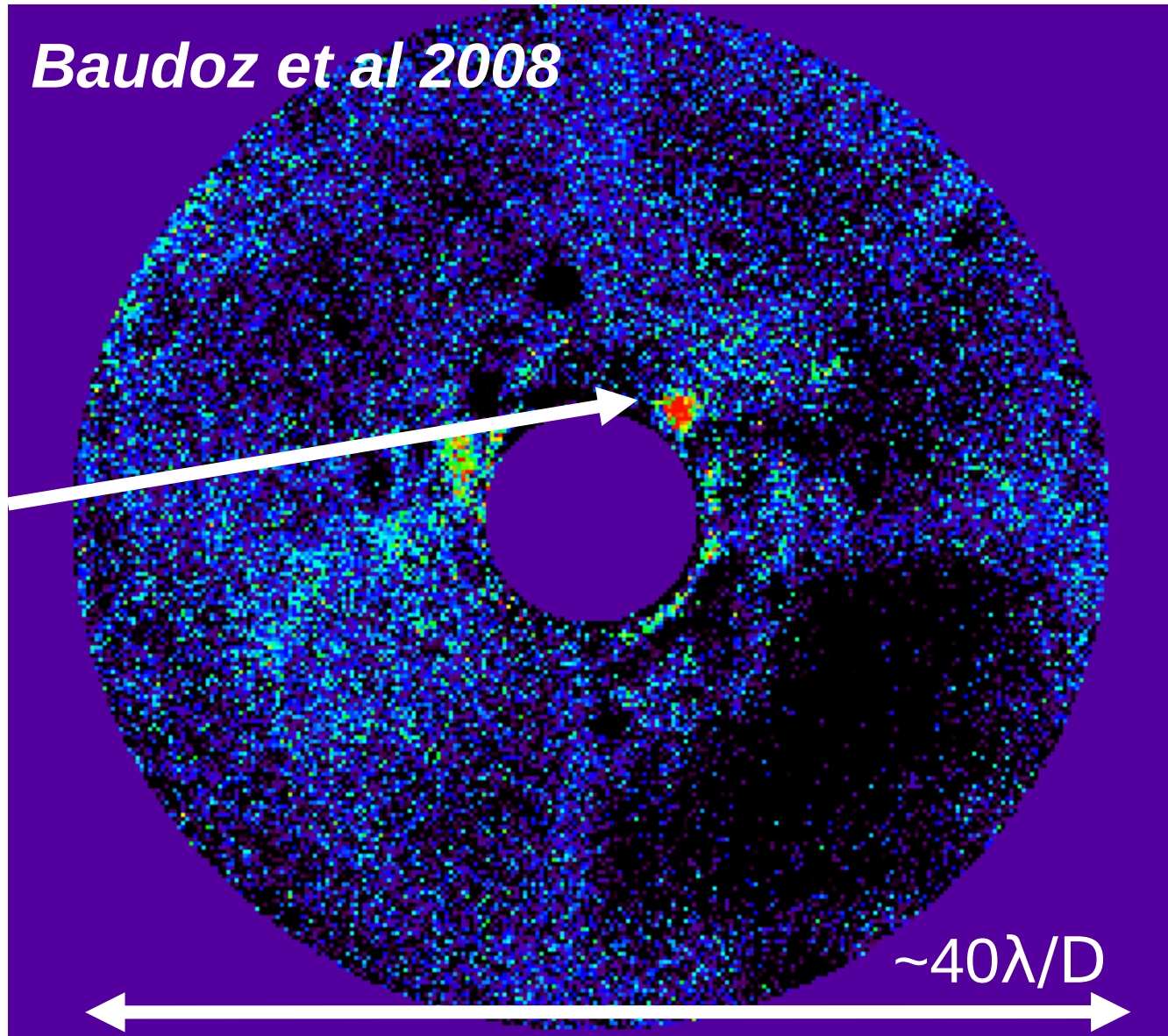
MFQPM + imagerie différentielle

3 FQPM

Image de référence = médiane de 14 images  
Image avec compagnon = médiane de 14 images  
Image finale = soustraction des deux

**Séparation  $\sim 4.5\lambda/D$**   
**Contraste  $\sim 6.7e-9$**   
**Détection à  $4.5\sigma$**

*Baudoz et al 2008*

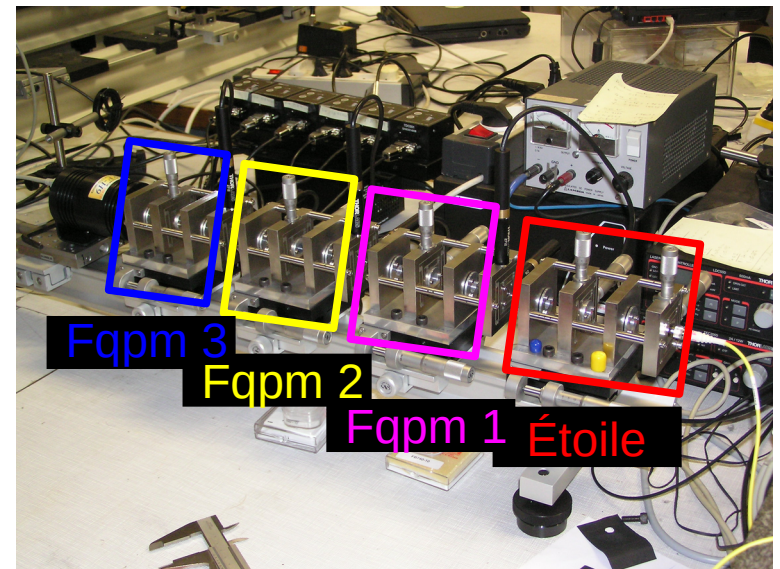


# Conclusions

- **Principe démontré** :  $\approx 10^5$  à  $4\lambda/D$  pour  $R=\lambda/\Delta\lambda=5$
- **Défauts optiques limitants**
  - Imagerie différentielle :  $7 \cdot 10^9$  à  $4,5\lambda/D$  pour  $R=5$

# Perspectives

- **Nouveau prototype**
  - × Compact
  - × Optimisé
  - ×  $10^8$  à  $4\lambda/D$  pour  $R=5$
  - × 600 à 900nm
  - ×  $F/D \approx 40$
- **Étude paramétrique** (obstruction centrale...)
- **Suppression de speckles (dark hole)**



# Imagerie haut contraste

## Partie 2

Coronographe à quatre quadrants  
à étages multiples (MFQPM)

Baudoz et al. 2008

## Partie 3

**Self-coherent camera (SCC)**

Galicher et al. 2008, Galicher et al. accepté

Baudoz et al. 2006, Galicher et al. 2007

Télescope  
*Collecter la lumière*

Optique Adaptative  
*Compenser atmosphère*

Coronographe  
*Atténuer étoile sans  
affecter le compagnon*

Dark hole  
*Supprimer les speckles*

Imagerie différentielle  
*Étalonner les speckles*

# Plan de l'exposé

## Introduction

Exoplanètes et leur détection

Imagerie à haut contraste

## Coronographe à quatre quadrants à étages multiples

Principe du MFQPM

Démonstration expérimentale

## Self-Coherent Camera

Principe de la SCC

Prévisions / simulations

Résultats expérimentaux

# Principe de la Self-coherent camera

Incohérence entre l'étoile et le compagnon

Interférences de Fizeau (trous d'Young)

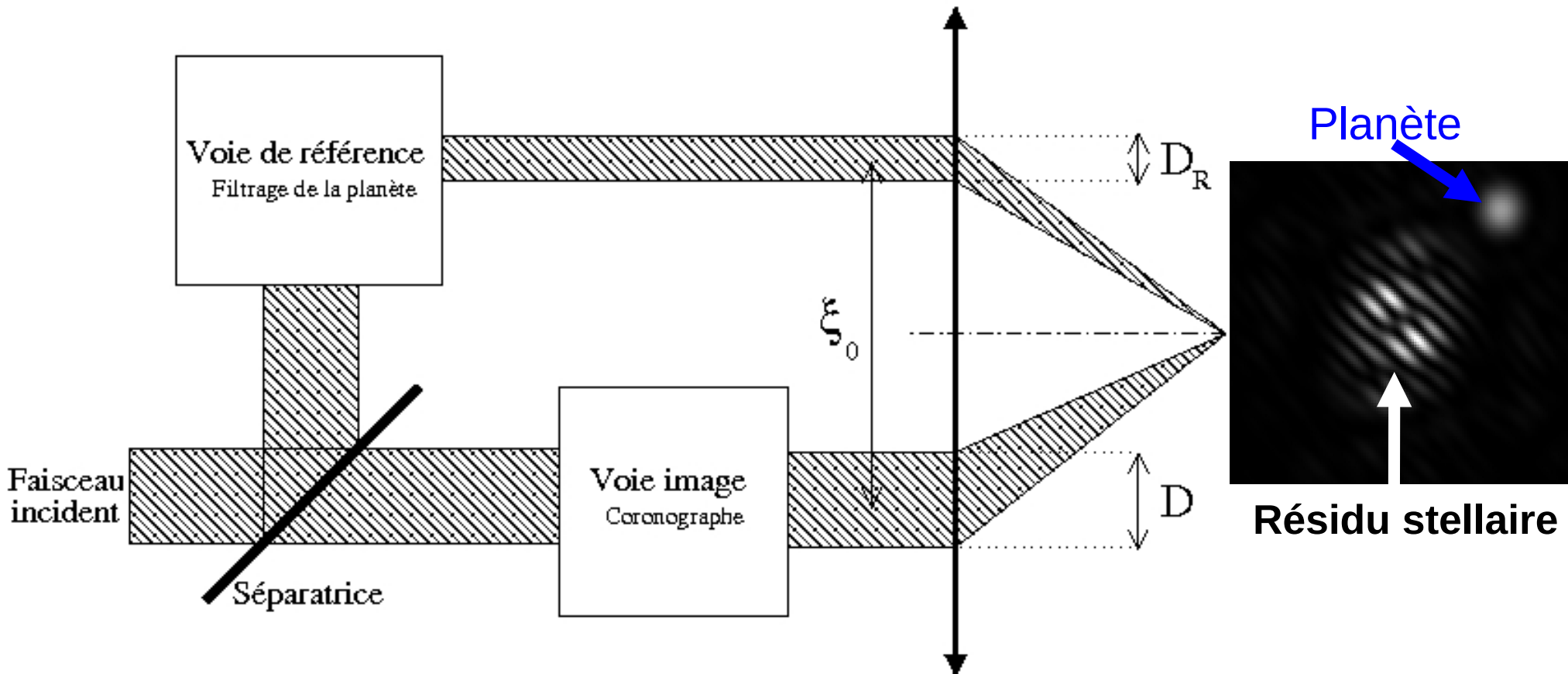
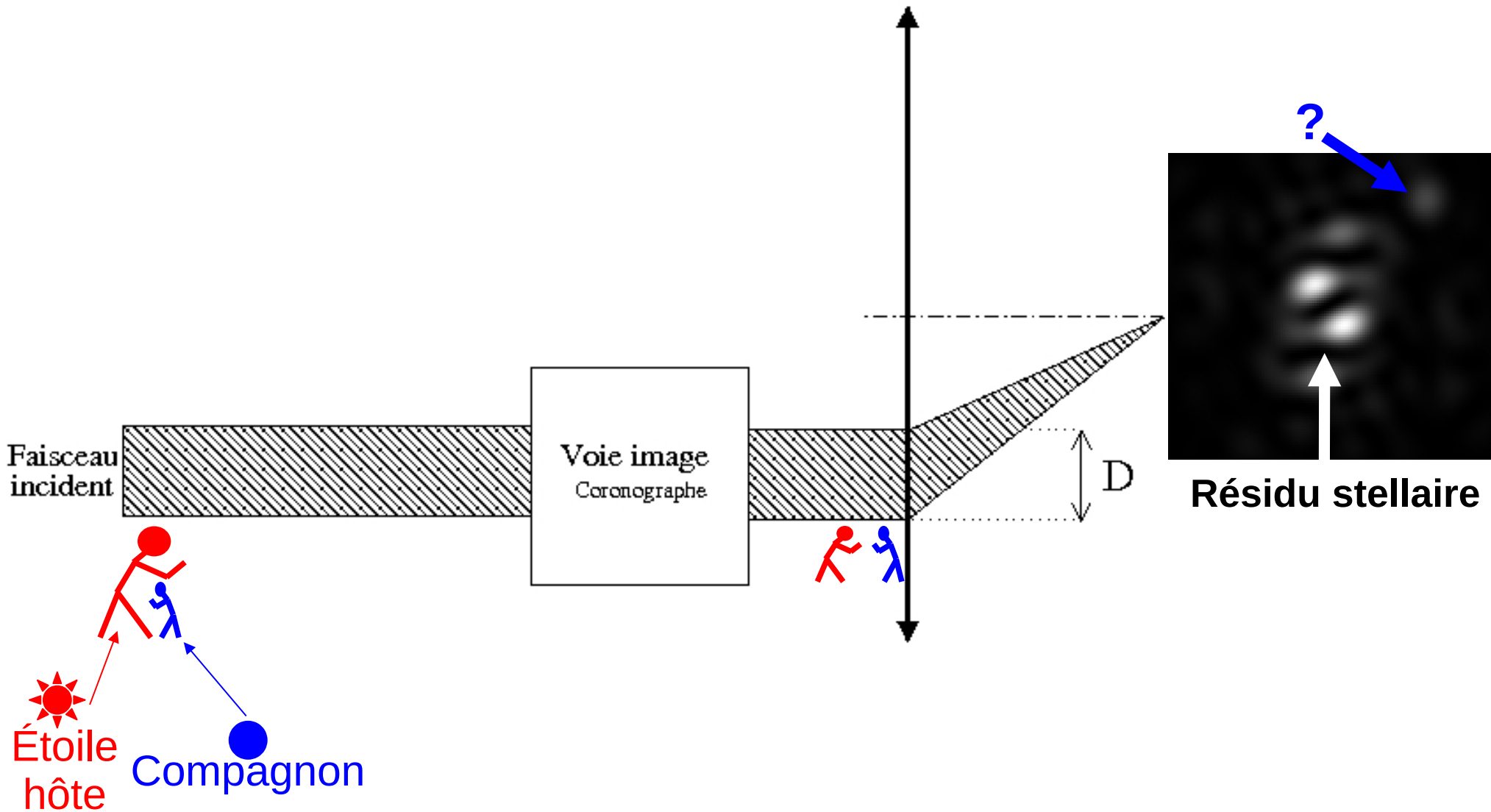


Image codée = Image scientifique

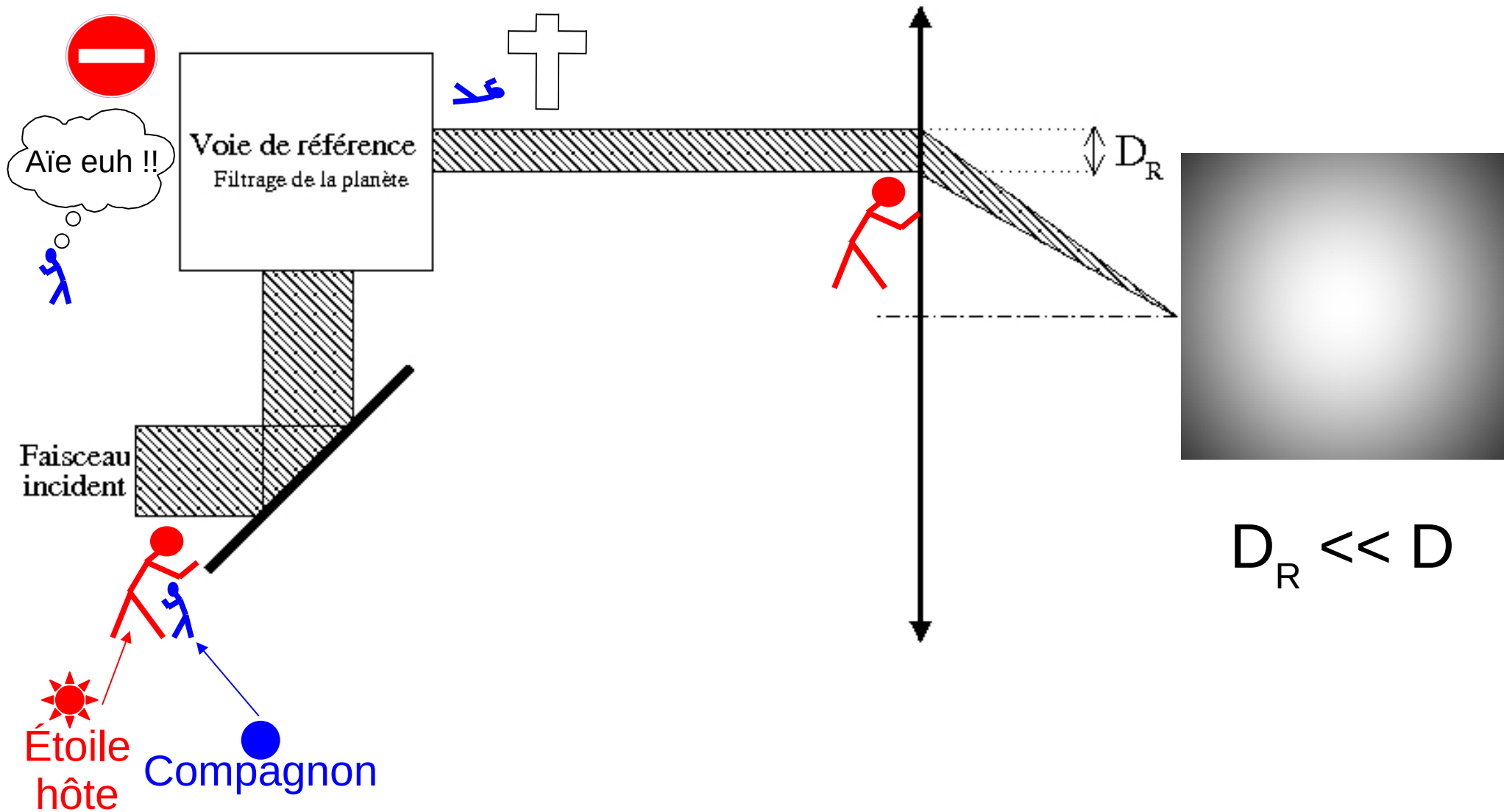
# Self-coherent camera : voie image

## Coronographe seul



# Self-coherent camera : voie de référence

## Filtrage de la planète



# Interférence de Fizeau (trous d'Young)

Incohérence entre l'étoile et le compagnon

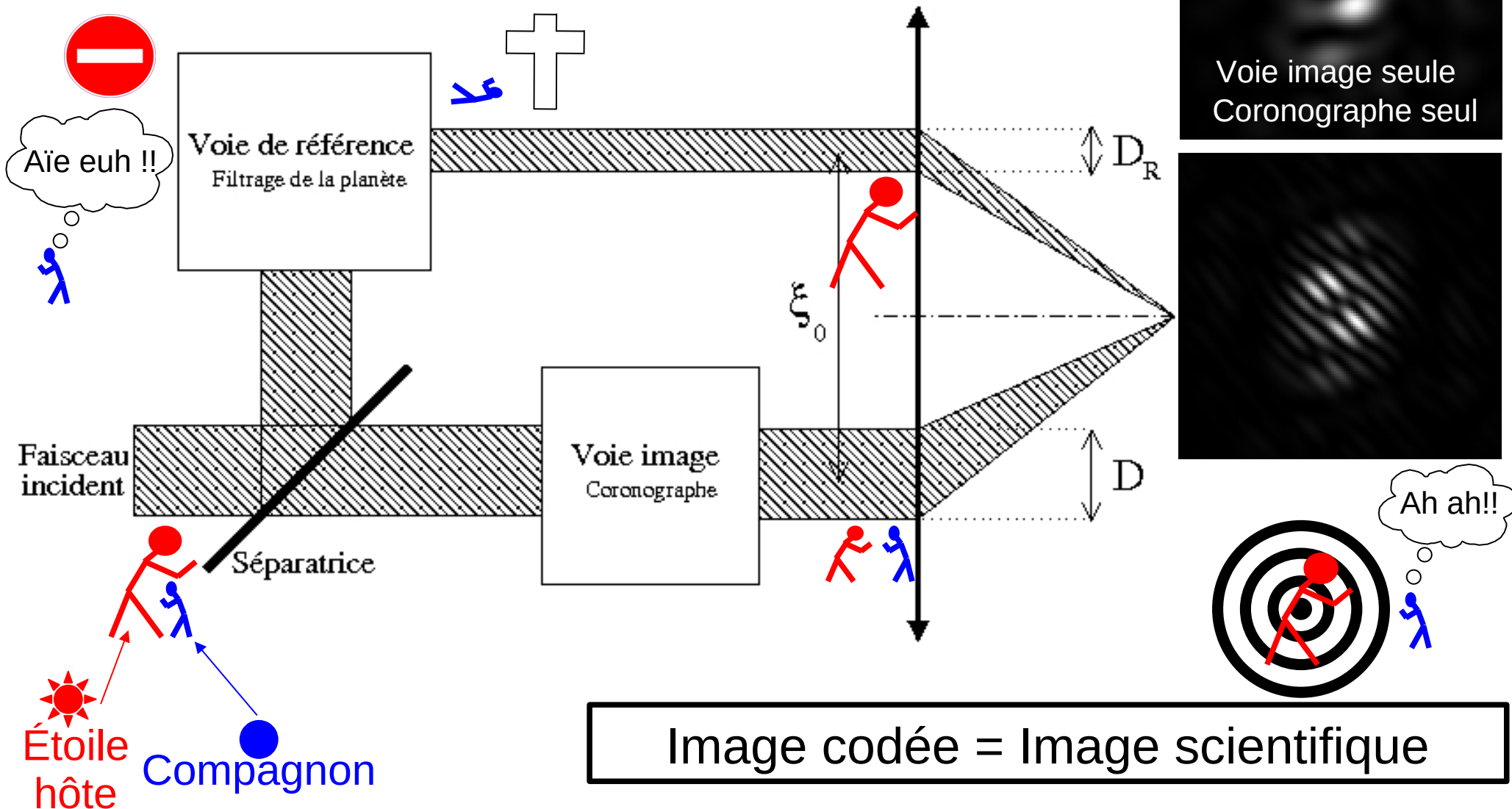
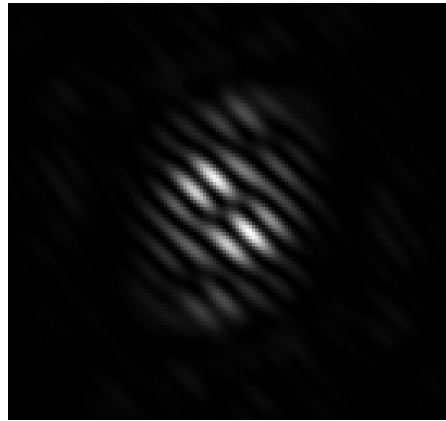
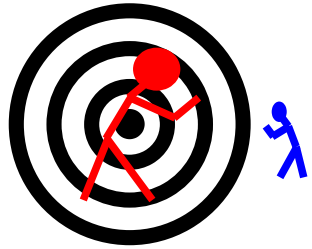
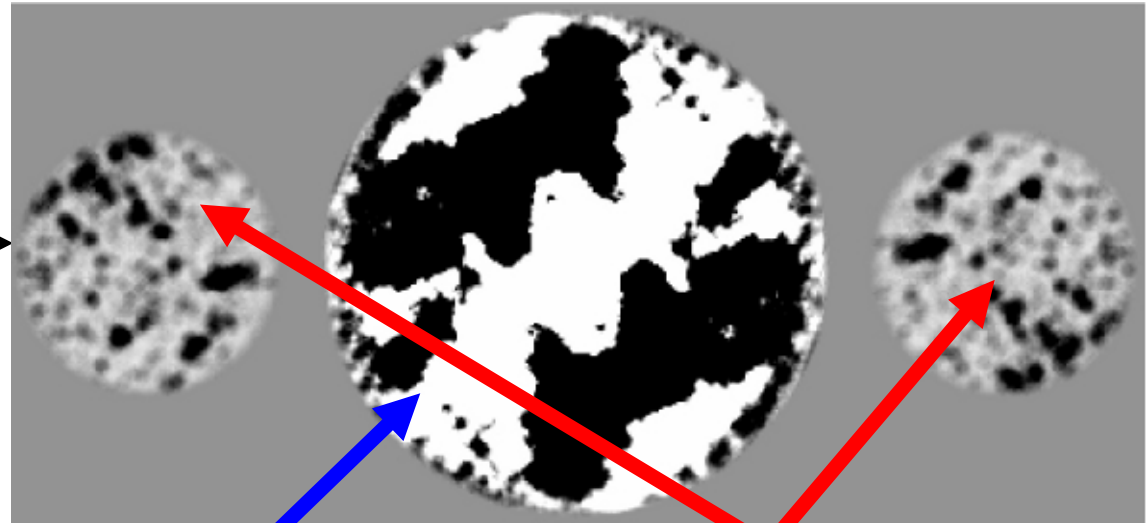


Image codée = Image scientifique

# Traitement de l'image SCC



Transformée  
de Fourier

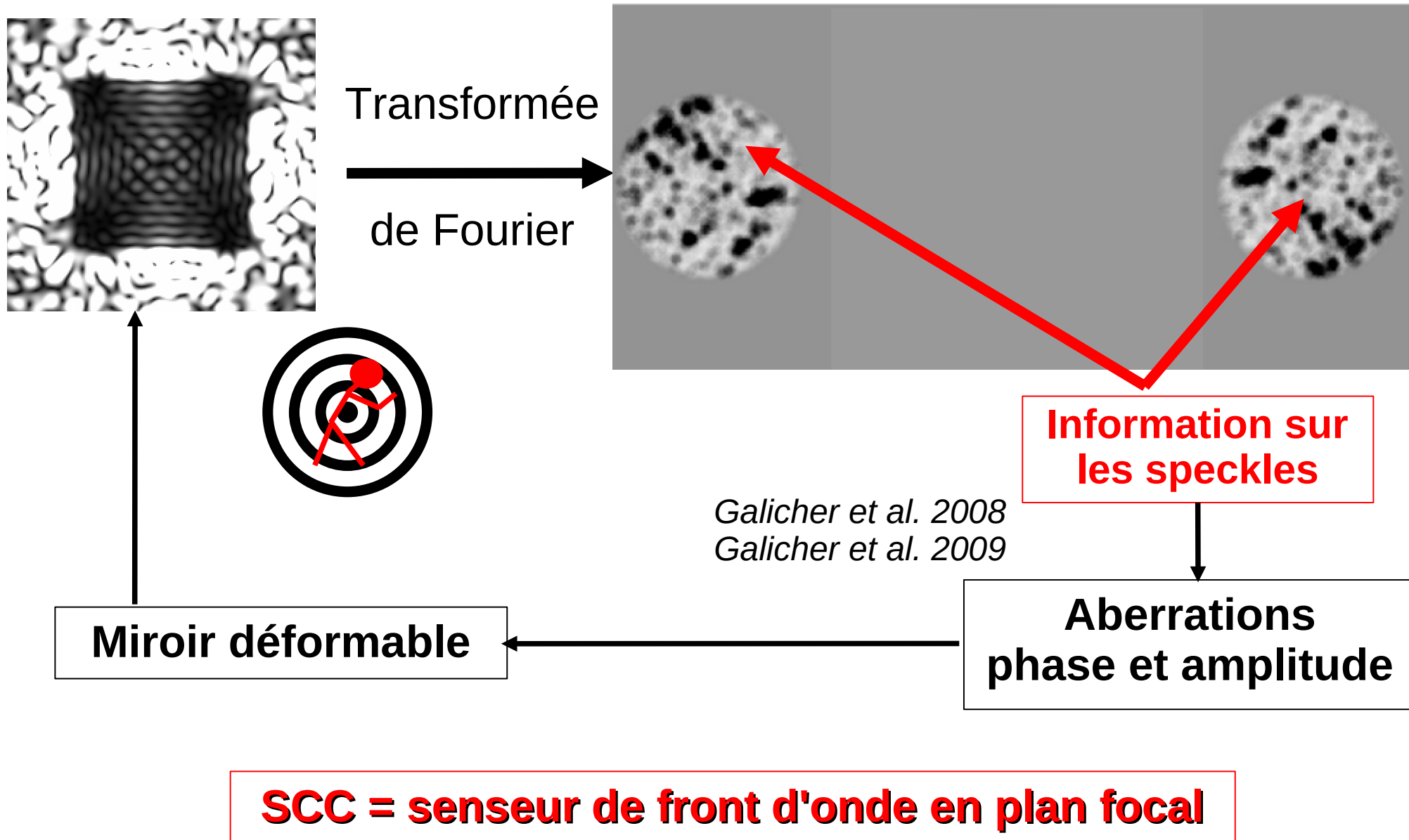


« Hologramme »  
des speckles

Information sur  
le compagnon + sur speckles

Information sur  
les speckles

# 1<sup>er</sup> mode : suppression des speckles



# 2ème mode : étalonnage des speckles

$$ddm(\lambda_0 \vec{f}) \approx \frac{\lambda_0^3}{2i\pi \hat{\Psi}_{*0}} FT \left( \frac{I_-}{\Psi_R \int_{\lambda} e^{-i2\pi \frac{\vec{x}}{\lambda} \cdot \vec{a}} d\lambda} \right) (\lambda_0 \vec{f})$$

$$\begin{cases} \hat{I}_c(\vec{f}) = \int_{\lambda} [\hat{I}_*(\lambda \vec{f}) + \hat{I}_{comp}(\lambda \vec{f}) + \hat{I}_R(\lambda \vec{f})] d\lambda \\ \hat{I}_+(\vec{f}) = \int_{\lambda} \frac{1}{\lambda^2} [\hat{\Psi}_*(\lambda \vec{f}) \otimes \hat{\Psi}_R(\lambda \vec{f}) \otimes \delta(\lambda \vec{f} - \vec{a})] d\lambda \\ \hat{I}_-(\vec{f}) = \int_{\lambda} \frac{1}{\lambda^2} [\hat{\Psi}_*(\lambda \vec{f}) \otimes \hat{\Psi}_R(\lambda \vec{f}) \otimes \delta(\lambda \vec{f} + \vec{a})] d\lambda \end{cases}$$

$$= \hat{I}_*(\lambda_0 \vec{f}) + \hat{I}_{comp}(\lambda_0 \vec{f}) + \hat{I}_R(\lambda_0 \vec{f})$$

$$= \frac{1}{\lambda_0^2} \hat{\Psi}_*(\lambda_0 \vec{f}) \otimes \hat{\Psi}_R(\lambda_0 \vec{f}) \otimes \delta(\lambda_0 \vec{f} - \vec{a})$$

$$= \frac{1}{\lambda_0^2} \Psi_* \left( \frac{\vec{x}}{\lambda_0} \right) \Psi_R \left( \frac{\vec{x}}{\lambda_0} \right) \exp(-i2\pi \frac{\vec{x}}{\lambda_0} \cdot \vec{a})$$

$$\alpha_{\lambda}(\vec{x}) = \frac{1}{\lambda^2} \Psi_* \left( \frac{\vec{x}}{\lambda} \right) \Psi_R \left( \frac{\vec{x}}{\lambda} \right) \exp(-i2\pi \frac{\vec{x}}{\lambda} \cdot \vec{a})$$

de Fourier

$$I_-(\vec{x}) = \int_{\lambda} \alpha_{\lambda}(\vec{x}) e^{-i2\pi \frac{\vec{x}}{\lambda} \cdot \vec{a}} d\lambda$$

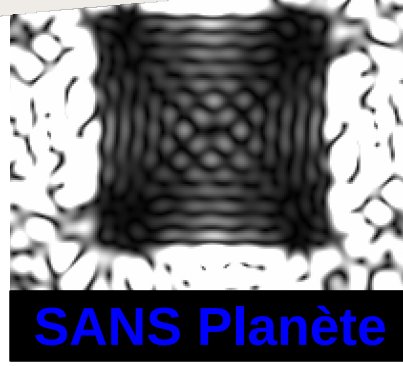
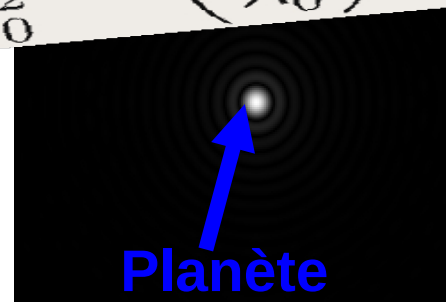


Information sur le compagnon + sur speckles (Inconnue) Mesures Information sur les speckles connus

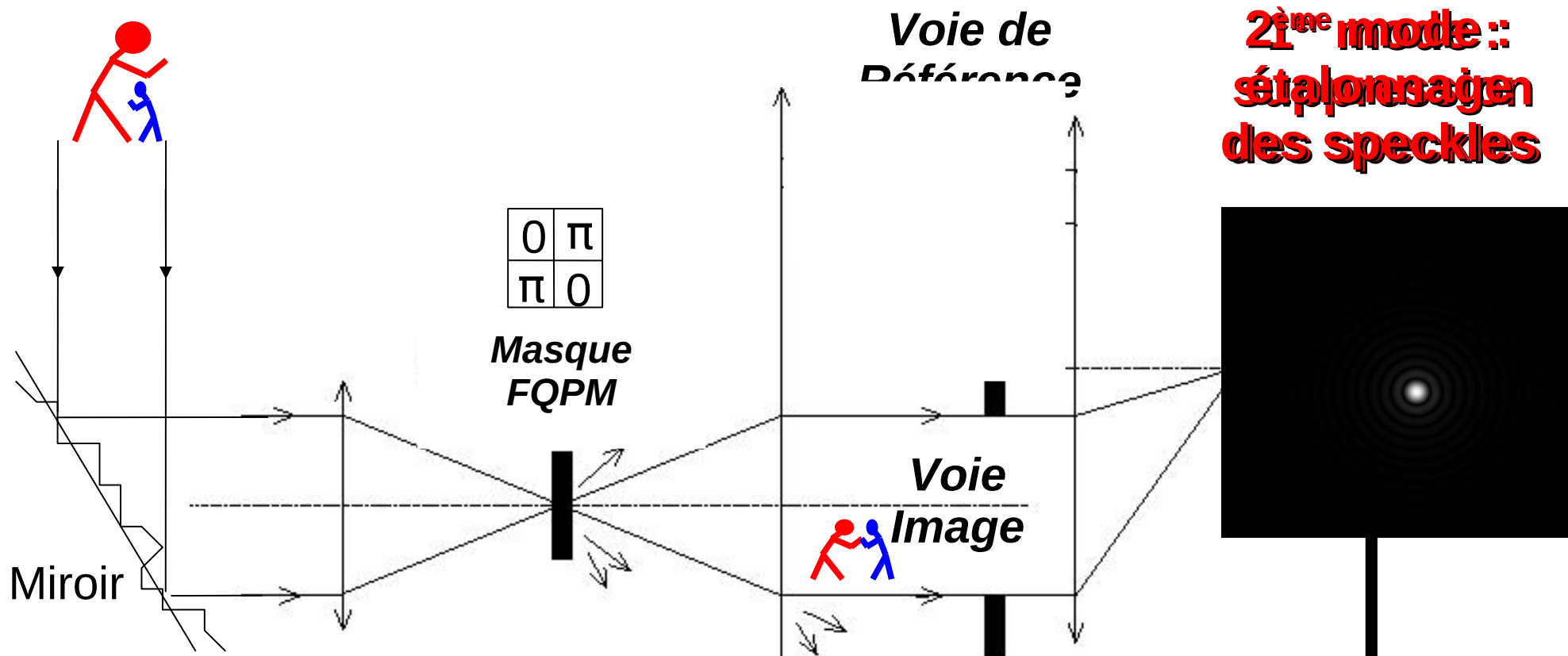
Baudoz et al. 2009  
Galicher et al. 2009

**SCC différentielle**

$$I_-(\vec{x}) \approx \frac{1}{\lambda_0^2} \Psi_* \left( \frac{\vec{x}}{\lambda_0} \right) \Psi_R^* \left( \frac{\vec{x}}{\lambda_0} \right) \int_{\lambda} e^{-i2\pi \frac{\vec{x}}{\lambda} \cdot \vec{a}} d\lambda$$



# Coronographe à quatre quadrants et SCC



***DDM = 0 et très stable !***

***100% de la planète***

***Réalisation très simple***

# Plan de l'exposé

## Introduction

Exoplanètes et leur détection

Imagerie à haut contraste

## Coronographe à quatre quadrants à étages multiples

Principe du MFQPM

Démonstration expérimentale

## Self-Coherent Camera

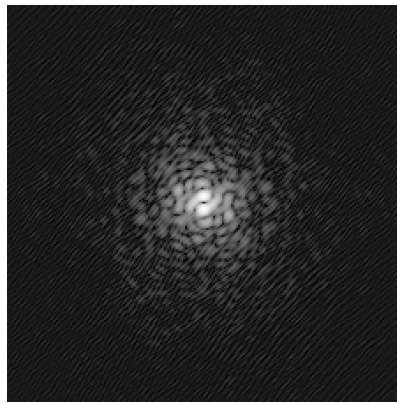
Principe de la SCC

Prévisions / simulations

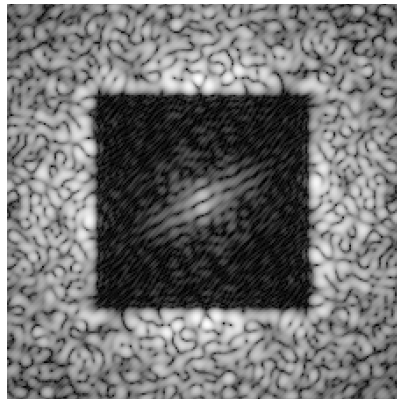
Résultats expérimentaux

# Un cas idéal

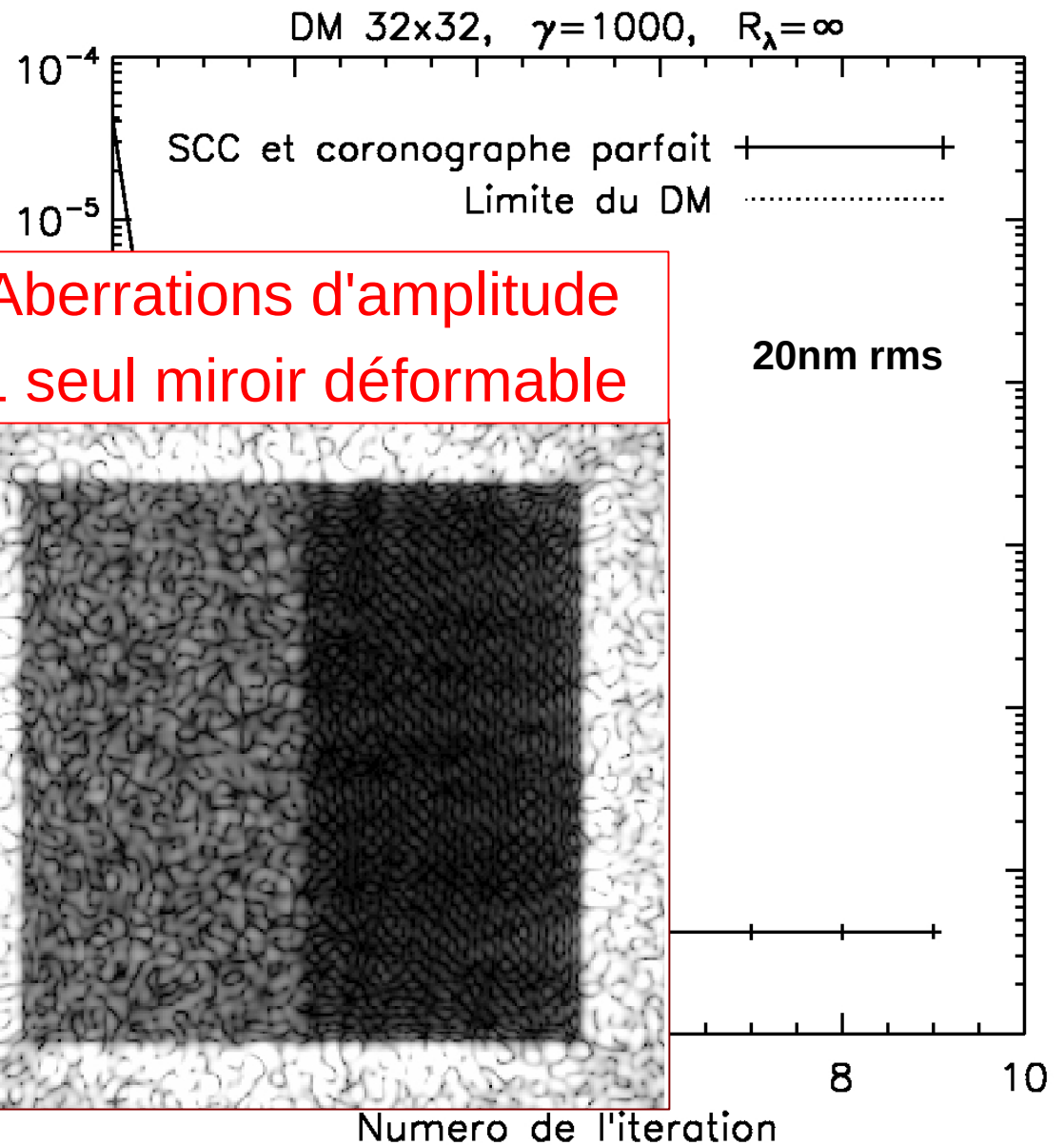
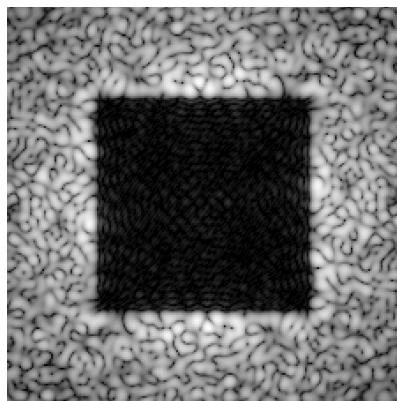
Itération 0



Itération 1



Itération 2

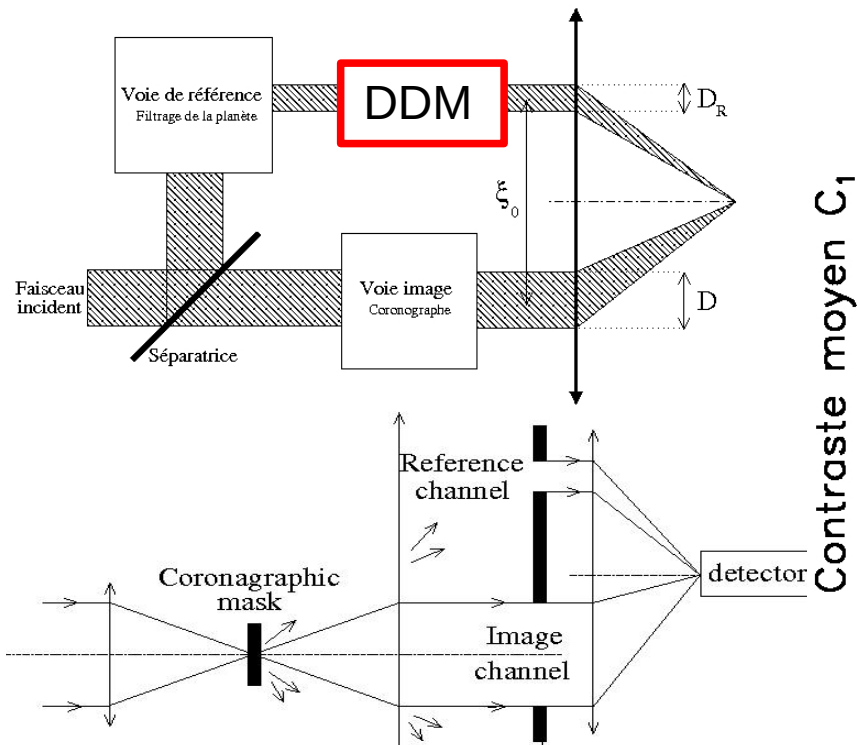


# Études réalisées

- Voie de référence
  - Diamètre de pupille
  - Stabilité de la DDM ←
  - Stabilité tip-tilt
- Aberrations d'amplitude
- Chromatisme ←
- Longue pose (préliminaire)
- Optimisation de la SCC-FQPM
- Performances ←

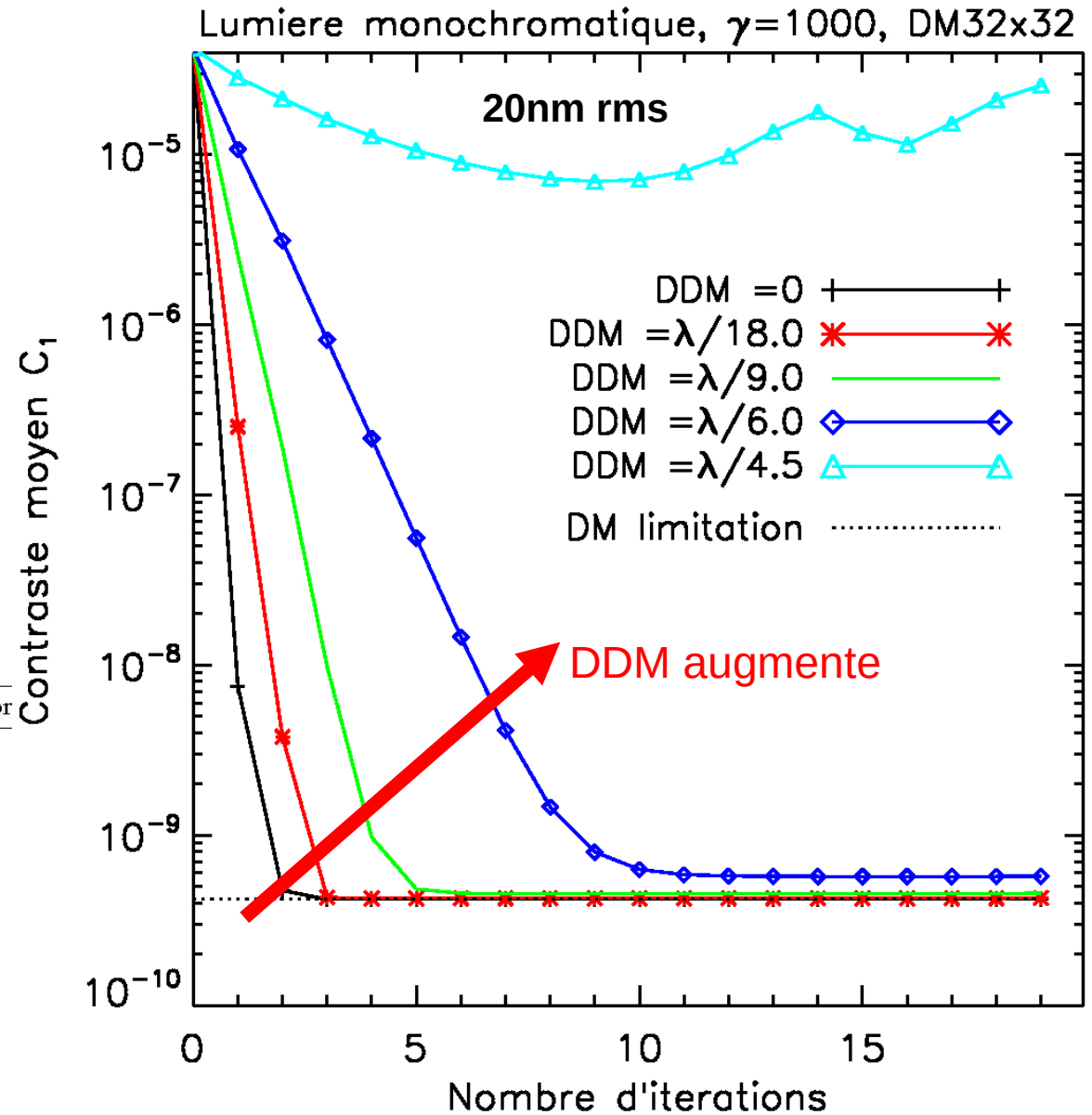
# Différence de marche

1<sup>er</sup> mode :  
suppression

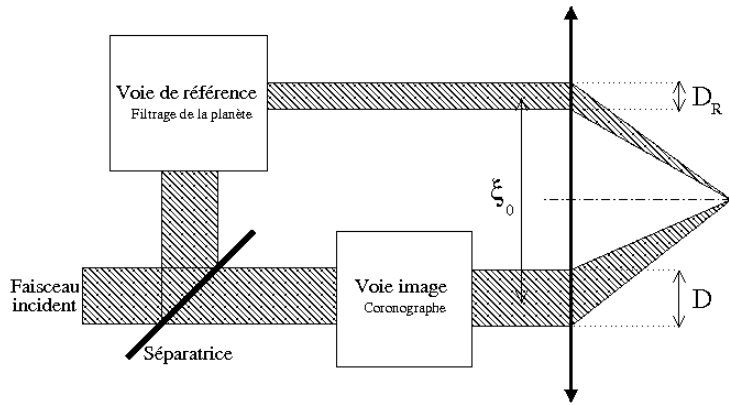


Stabilité requise pour  
la  $DDM \approx \lambda/10$

→ intérêt de la SCC-FQPM



# Chromatisme de la SCC

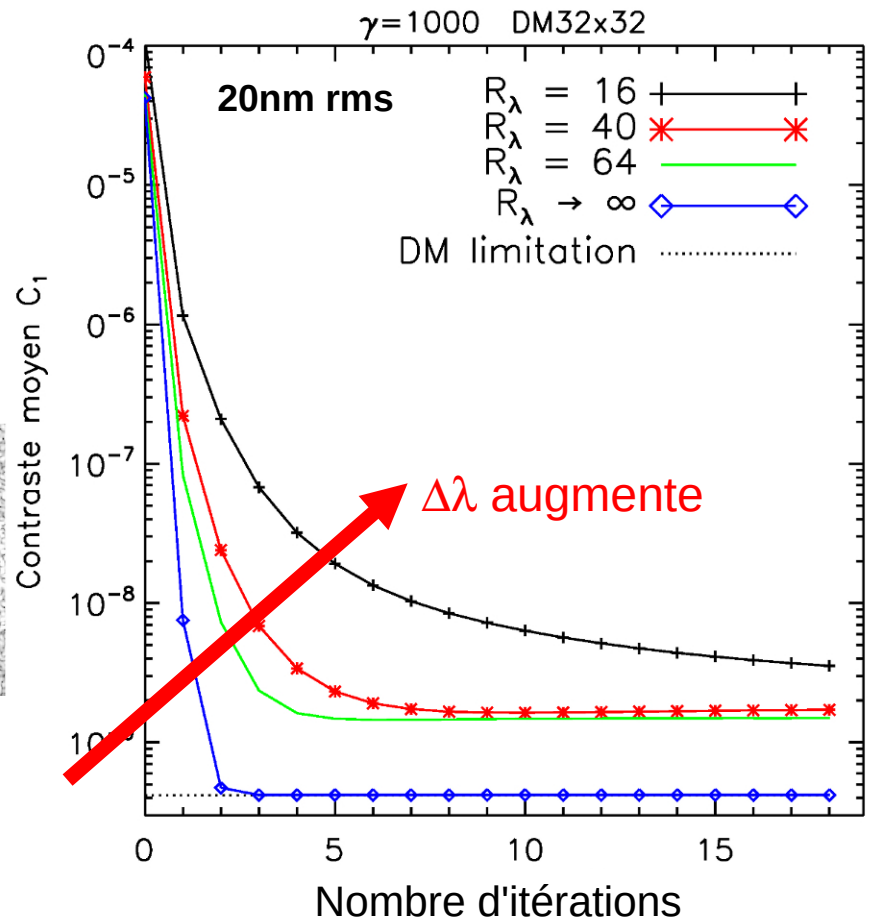
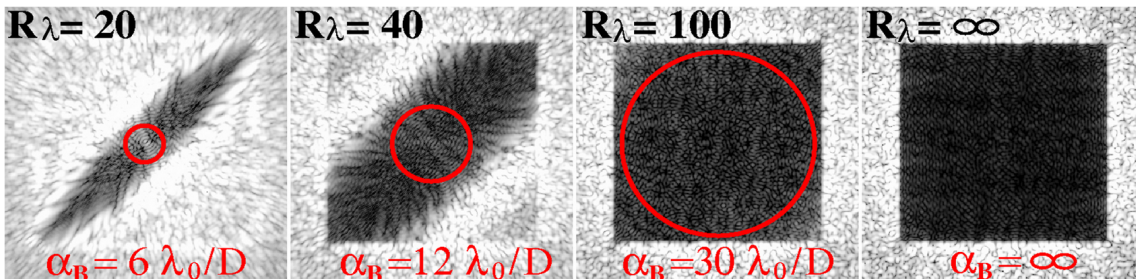


Fizeau →

- 1) Interfrange →  $\lambda/\xi_0$
- 2) Taille des speckles →  $\lambda/D$

**1<sup>er</sup> mode :  
suppression**

$\Delta\lambda$  augmente ←



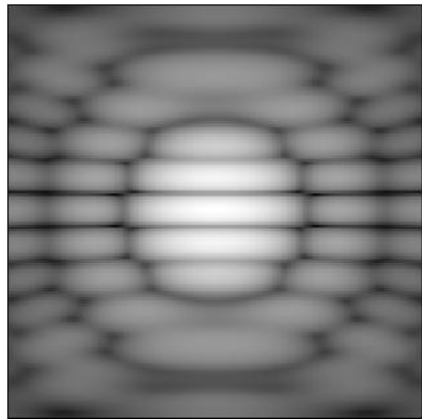
**Chromatisme = limitation**

**Idem pour le 2<sup>ème</sup> mode (étalonnage)**

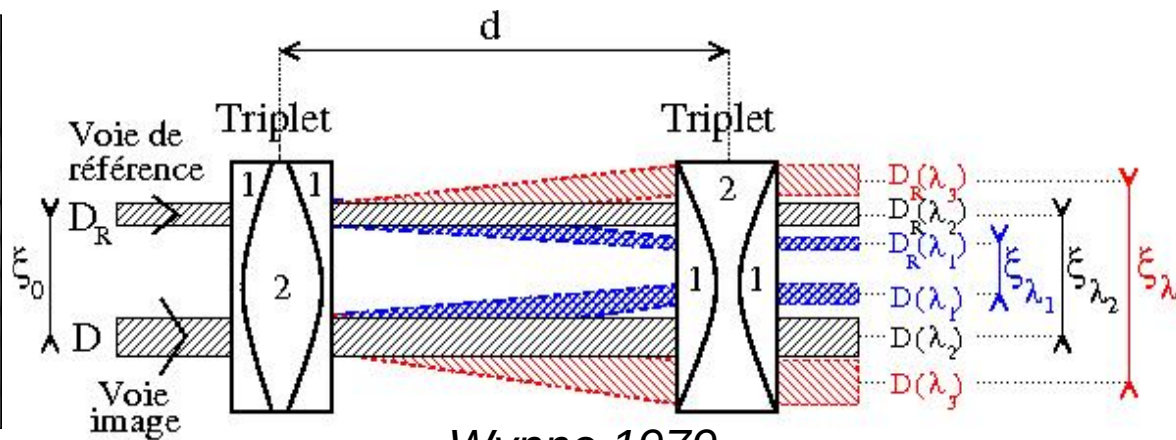
# Achromatisation de la SCC

- Fizeau →
- 1) Interfrange →  $\lambda/\xi_0$
  - 2) Taille des speckles →  $\lambda/D$

Changer  $\xi_0$  et  $D$  en fonction de  $\lambda$

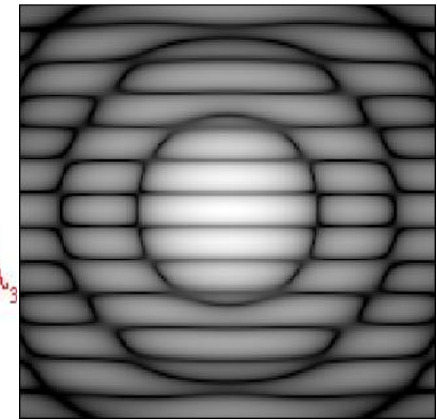


$$R = \lambda/\Delta\lambda = 6,5$$



Wynne 1979

Compensateur de Wynne



$$R_{\text{Wynne}} \approx 150$$

Séparer les  $\lambda$

Spectrographe à intégrale de champ (IFS) → à étudier !

# SCC-FQPM : suppression des speckles

$$R = \lambda/\Delta\lambda = 5$$

$$R_{\text{Wynne}} = 130$$

64x64

*rms phase = 20nm en  $f^3$*

*rms amplitude = 1% en  $f^3$*

$$\gamma = 20$$

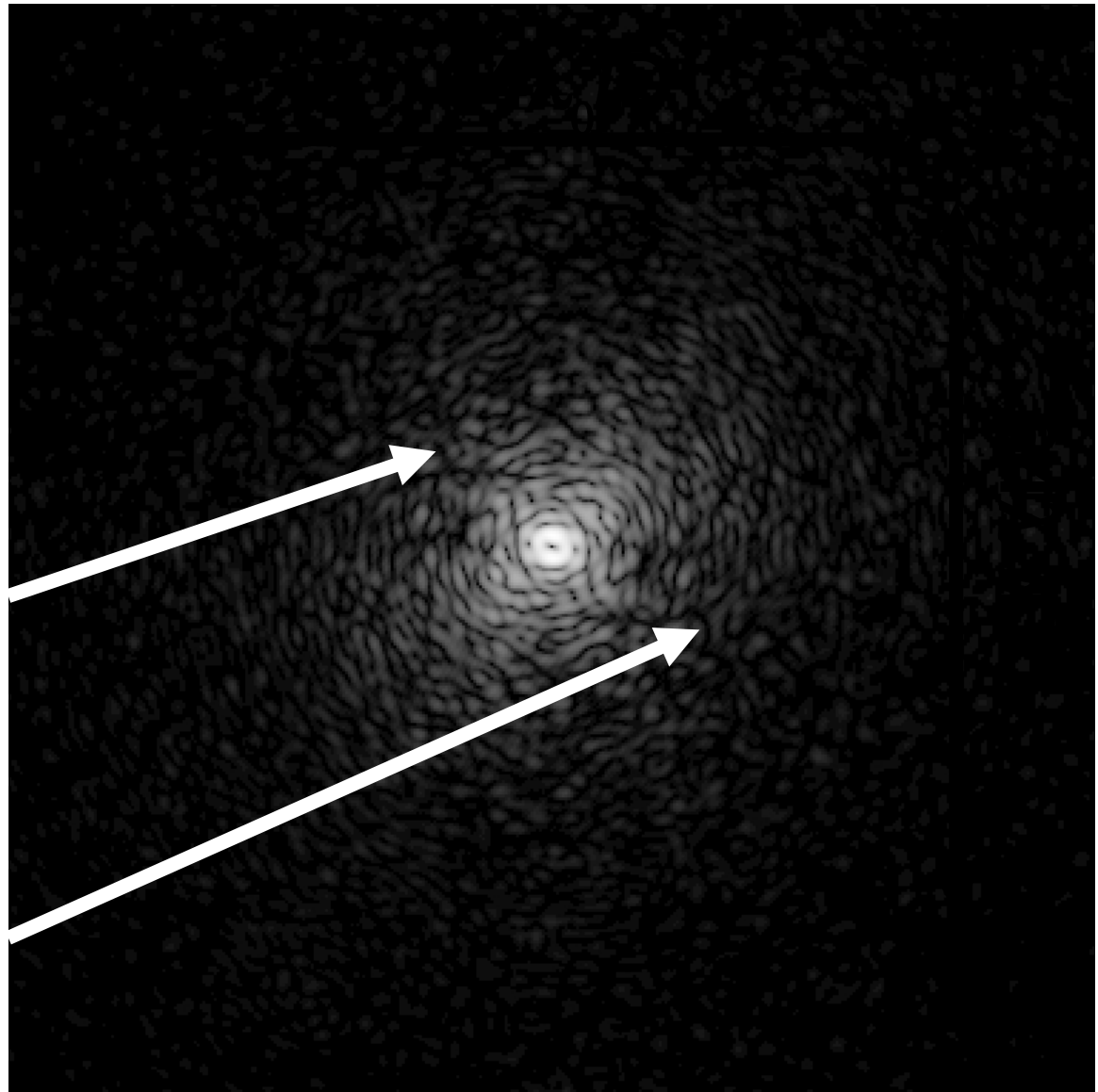
*bruit de photons*

*4m G2 10 parsec*

*temps de pose total ~ 8h*

Défauts  
d'amplitude

Dark hole



# SCC-FQPM : étalonnage des speckles

$$R = \lambda/\Delta\lambda = 5$$

$$R_{\text{Wynne}} = 130$$

64x64

rms phase = 20nm en  $f^3$

rms amplitude = 1% en  $f^3$

$$\gamma = 20$$

bruit de photons

4m G2 10 parsec

temps de pose total ~ 8h

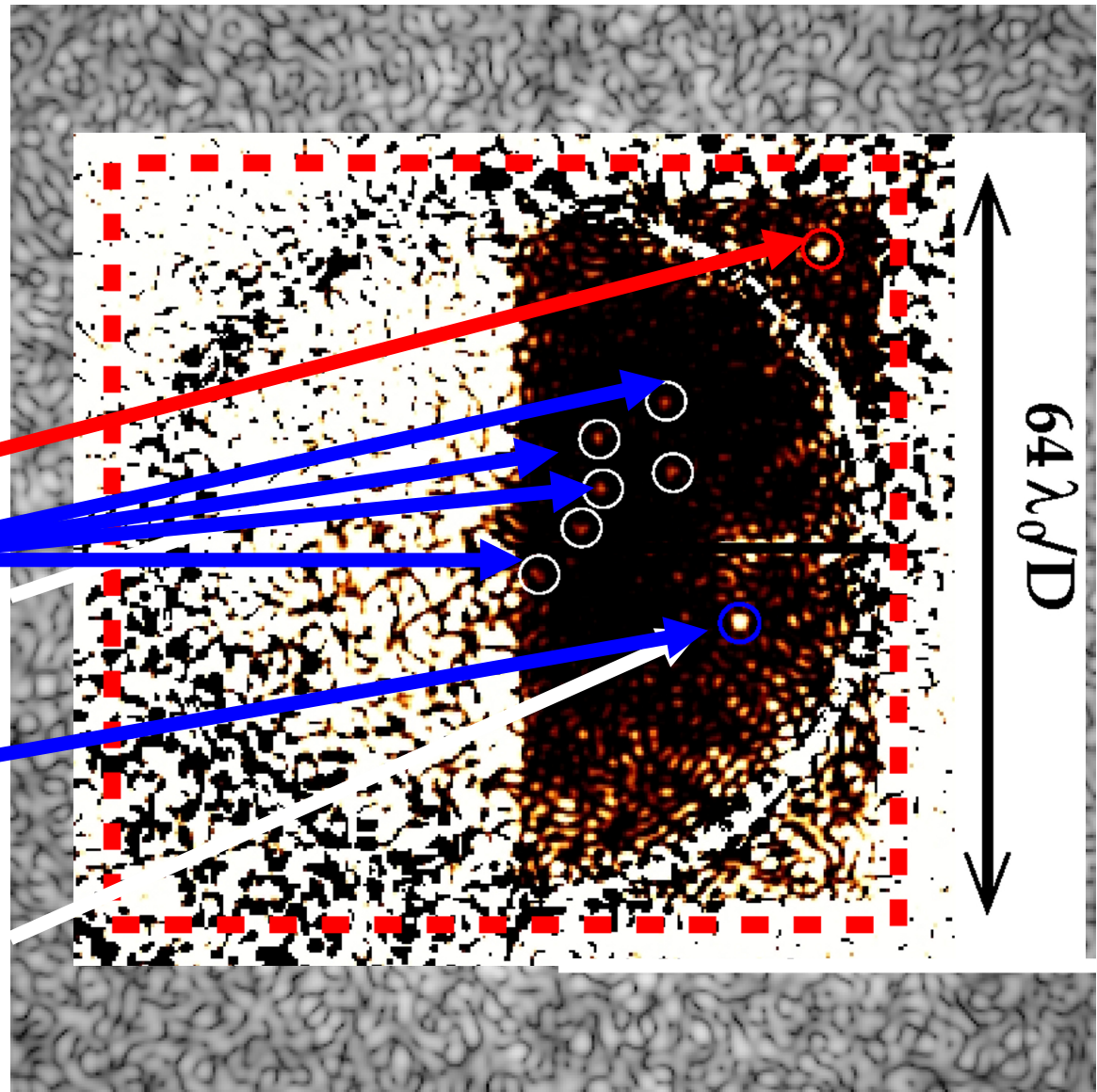
*Jupiter*

*Terre*

d'ampitude

*Super-Terre*

Dark hole



# Plan de l'exposé

## Introduction

Exoplanètes et leur détection

Imagerie à haut contraste

## Coronographe à quatre quadrants à étages multiples

Principe du MFQPM

Démonstration expérimentale

## Self-Coherent Camera

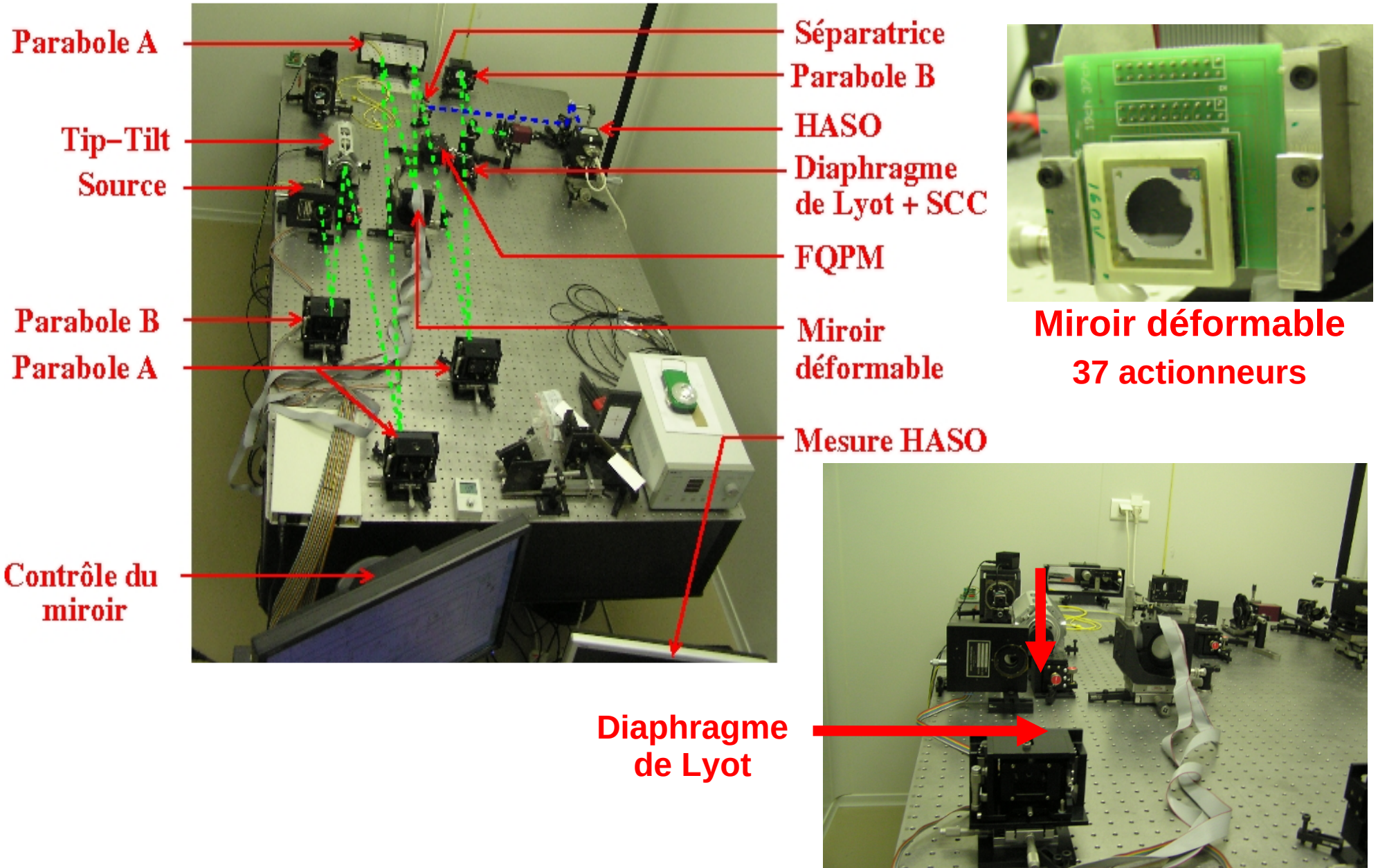
Principe de la SCC

Réalisations pratiques

Prévisions / simulations

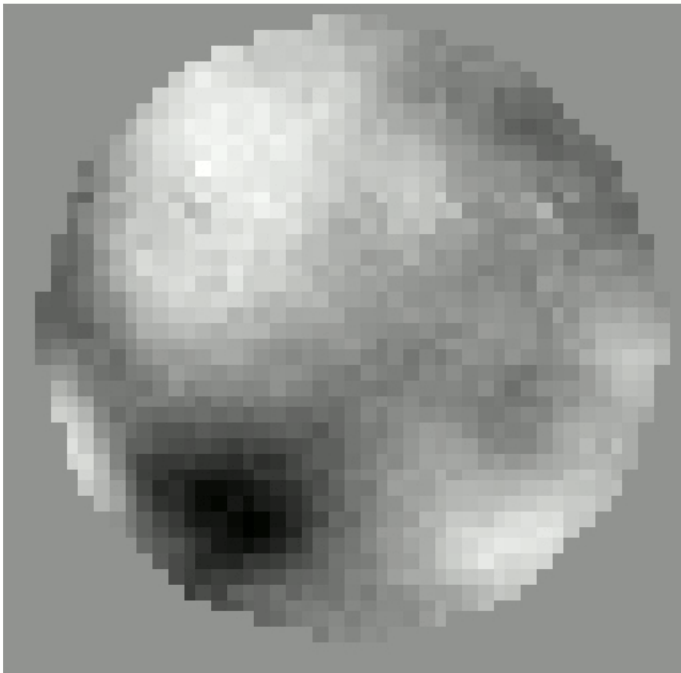
Résultats expérimentaux

# Banc optique ITHD

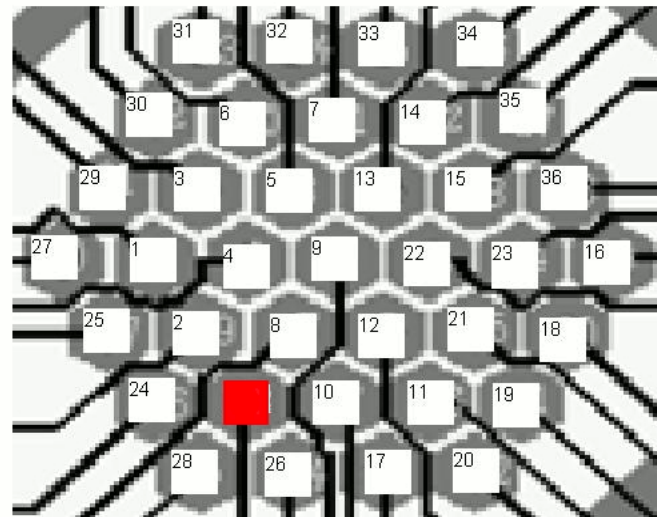


# Fonctions d'influence du DM Oko

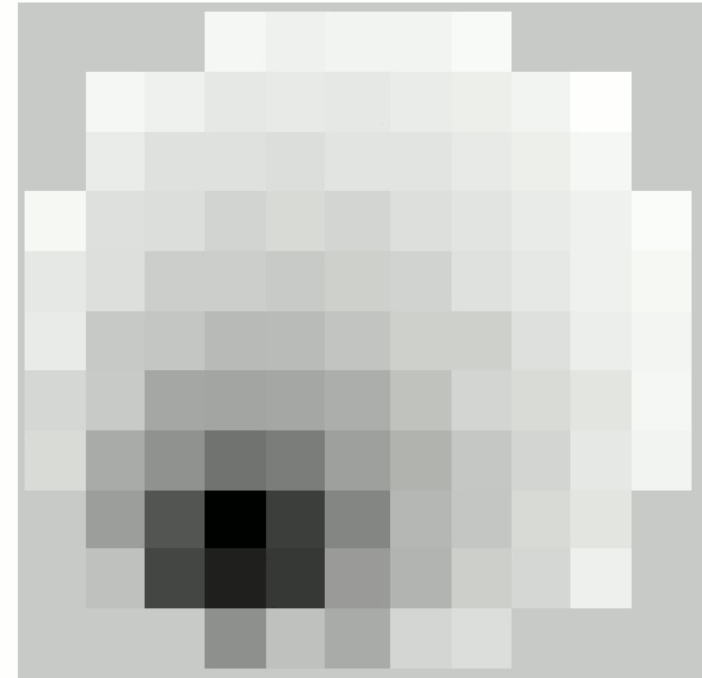
Mesure SCC



Positionnement de l'actionneur



Mesure Shack-Hartmann



Défauts de l'ordre de  $\sim 90\text{nm rms}$

# Conclusions

## Théorie

- Estimateurs 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> modes, propagation des bruits, poses longues

## Simulation

- Généralités

Nouvelle formule 3 en 1 !  
**SCC = instrument scientifique**  
Coronographe + imagerie différentielle + dark hole

• zér

• 2

• Pe

espace en 8h

## Étude expérimentale

- 1<sup>er</sup> mode : suppression des speckles

Mesure des fonctions d'influence du miroir Oko

# Perspectives

SCC = imagerie différentielle + dark hole + coronographe

## Études théorie/simulations

- Self-coherent camera (SCC)
  - \* SCC + spectrographe à intégrale de champ (IFS)
  - \* SCC + autres coronographes
  - \* SCC en longues poses

## Tests en laboratoire

- Coronographe à quatre quadrants à étages multiples (MFQPM)
  - \*  $10^8$  à  $4\lambda/D$  (600-900nm)
  - \* MFQPM + SCC
- SCC : fermeture de la boucle (1<sup>er</sup> mode) + étalonnage (2<sup>ème</sup> mode)

## Espace

- SCC : petits télescopes coronographiques (PECO, SEE-COAST, etc)

## Sol

- SCC/MFQPM : **1<sup>ère</sup> lumière d'ici 5 ans** (SPHERE, HiCIAO, GPI) ?
- SCC : **EPICS, E-ELT**

2M

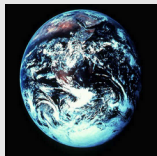


3 Picto



ESO PR P

ESO



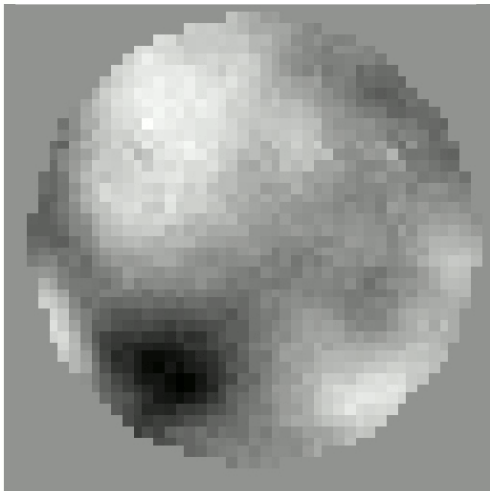
1

E-

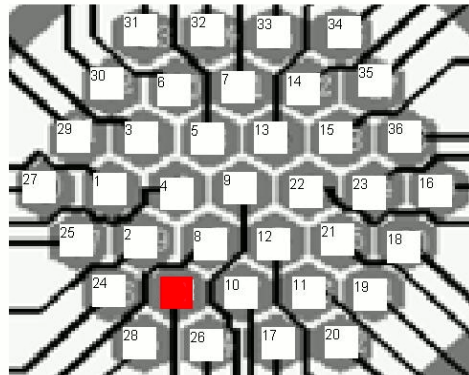


# Merci

Mesure SCC



Positionnement  
de l'actionneur



Mesure Shack-Hartmann

