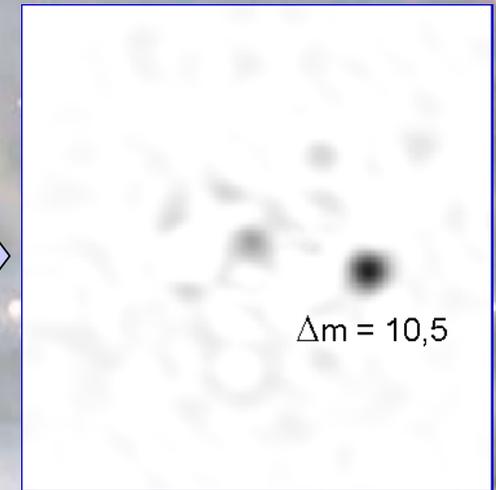
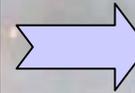
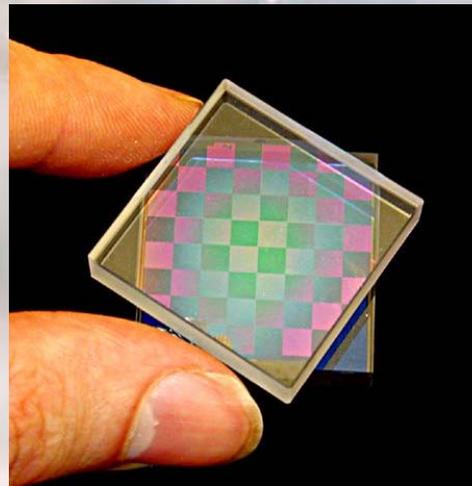
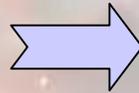
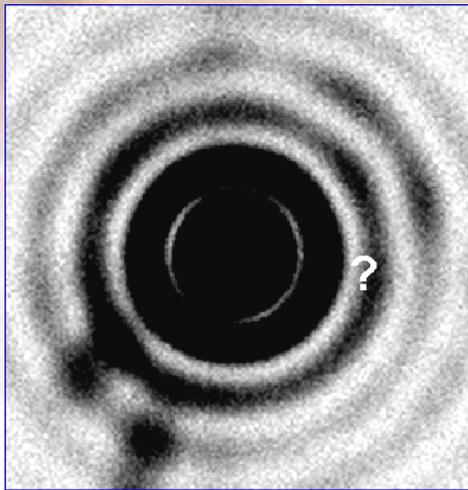




La coronographie à 4 Quadrants

Laboratoire
d'Interférométrie
Stellaire et
Exoplanétaire

P. Riaud (LISE – LESIA)





Plan de la thèse

- 1 Les différents domaines d'application de la coronographie**
- 2 Principe du coronographe de phase à 4 Quadrants**
- 3 Résultats en laboratoire sur le banc du LESIA**
- 4 Etudes théoriques de l'achromatisation du déphasage de π**
 - Achromatisation en transmission**
 - Achromatisation en réflexion**
 - Achromatisation avec des lames $\lambda/2$ du commerce**
- 5 Les différents projets d'instrumentaux utilisant un coronographe**
 - VLT-PF (Planet Finder) 2006-2007**
 - NGST-MIRI \sim 2010**
 - TPF/DARWIN $>$ 2015**
- 6 Conclusion et perspectives**



Science

1. Les disques circumstellaires

Détection de la lumière diffusée en visible ou bien le rayonnement des grains de poussière dans l'infrarouge thermique des disques circumstellaires.

+ **Contraste de 10^{-2} à 10^{-6} selon la densité du disque**

+ **Informations à différentes longueurs d'ondes**

=> **taille des grains, Albédo, composition chimique**

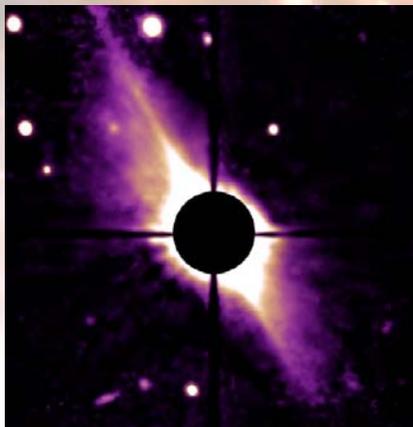


Image de β Pictoris
en visible $0.6-0.8 \mu\text{m}$
(Smith & Terrile 1984)

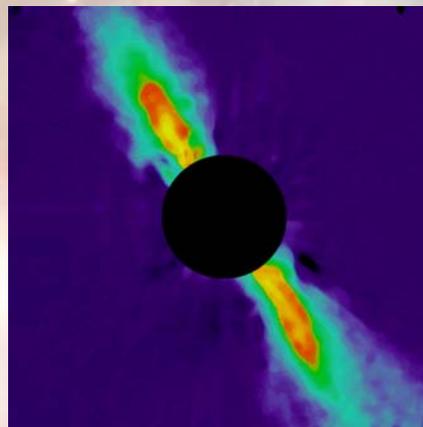


Image de β Pictoris
en proche IR $2.2 \mu\text{m}$
(Lagrange A.M. et al. 1996)

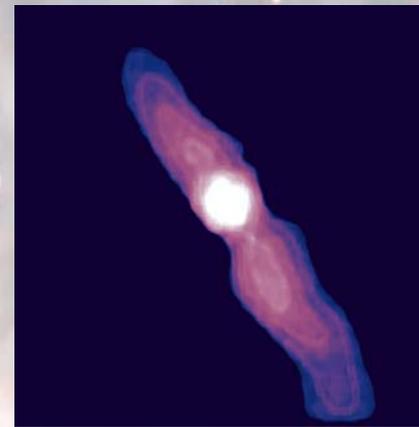


Image de β Pictoris
en IR $10 \mu\text{m}$
(Lagage P.O., Pantin E. 1994)

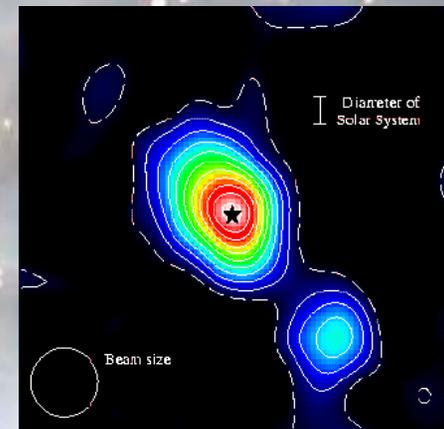


Image de β Pictoris
en mm $850 \mu\text{m}$
(Scuba 1998)



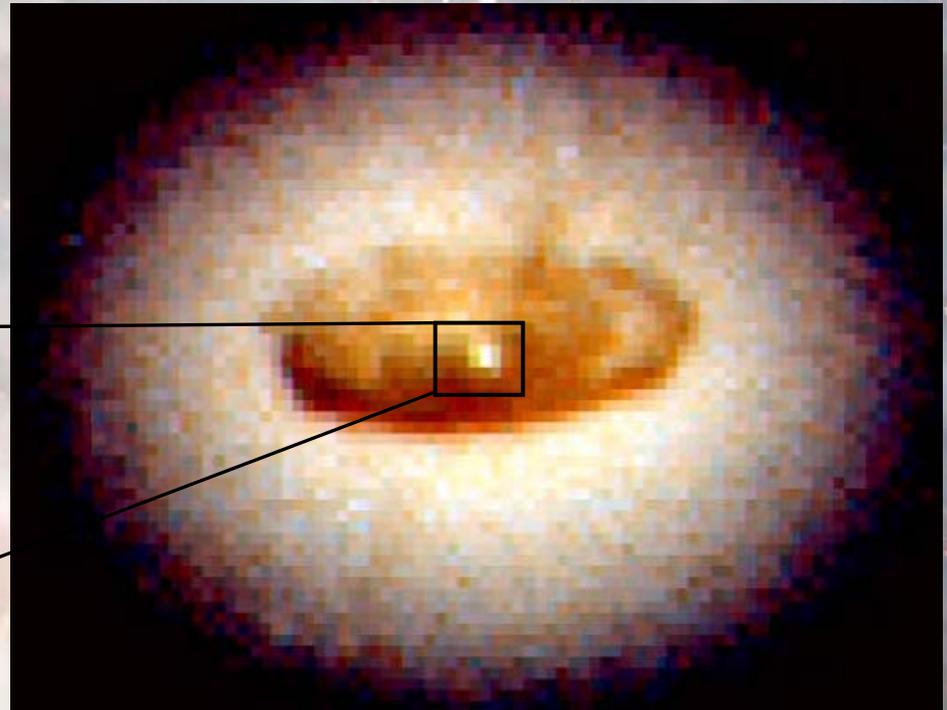
Science

2. Les disques autour des AGN

Caractérisation possible de la structure interne du disque d'accrétion autour des noyaux actifs de galaxies.

- + **Contraste de 10^{-2} à 10^{-5} selon la densité du tore de poussière**
- + **Informations spectroscopiques importantes**
- => **taille des grains, vitesse du gaz, composition chimique**

Observation par
le Hubble Space Telescope
du centre de la galaxie NGC 4261





Science

3. La détection exoplanétaire

↳ Détection des naines brunes et des planètes géantes chaudes autour des étoiles proches ($d < 50 \text{ pc}$) :

- + **Coronographie au sol en bande I,J,H,K,L avec VLT-PF**
- **Turbulence atmosphérique néfaste à la détection => OA**
- + **Coronographie avec NGST/MIRI (6-28 μm)**
- **Fond Zodiacal et Exo-Zodiacal limitant la détection**

↳ Détection des planètes telluriques autour des étoiles proches avec le projet TPF/DARWIN:

- + **Coronographie sur un interféromètre imageur en infrarouge thermique**
- **Fond Zodiacal et important, problèmes technologiques**
- **Nécessite l'achromatisation du déphasage de π en large bande**
- + **Coronographie sur un télescope de grand diamètre en visible**
- **Contraste très important ($> 10^9$), problèmes de la qualité des optiques**

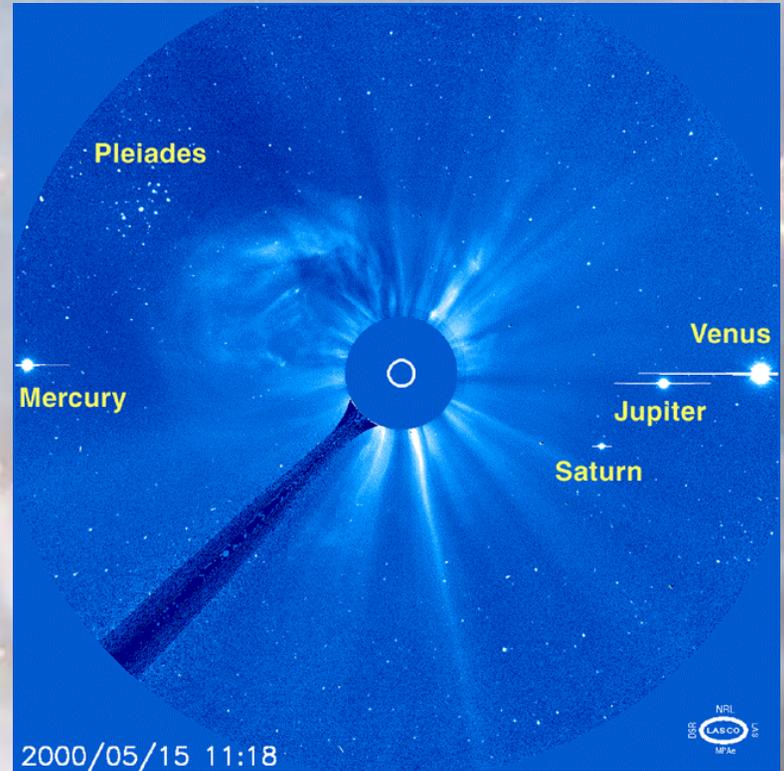


Historique

Utilisation du coronographe de Lyot: 1. Etude de la couronne solaire



Éclipse de Soleil au Zimbabwe le 21 juin 2001
(image Olivier Lardière)



LASCO coronographe sur le satellite SOHO (ESA)



Historique

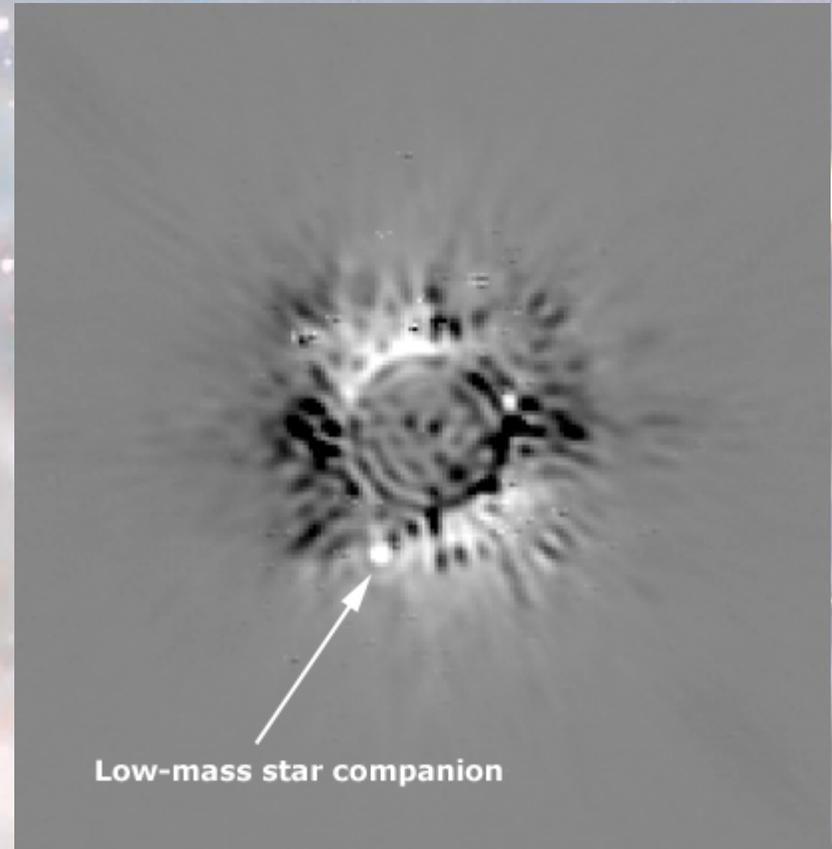
Utilisation du coronographe de Lyot: 2. Coronographie stellaire

Image coronographique de l'étoile HR7672 obtenue au 5m du Mont Palomar.

Un compagnon de faible masse, préalablement détecté sur Keck et Gemini (Hawaii), est visible en bord du masque à $0,79''$ ($9 \lambda/d$) de l'étoile.

Le compagnon est plus faible de 8.7 magnitudes par rapport à l'étoile en bande K ($\lambda=2.2\mu\text{m}$).

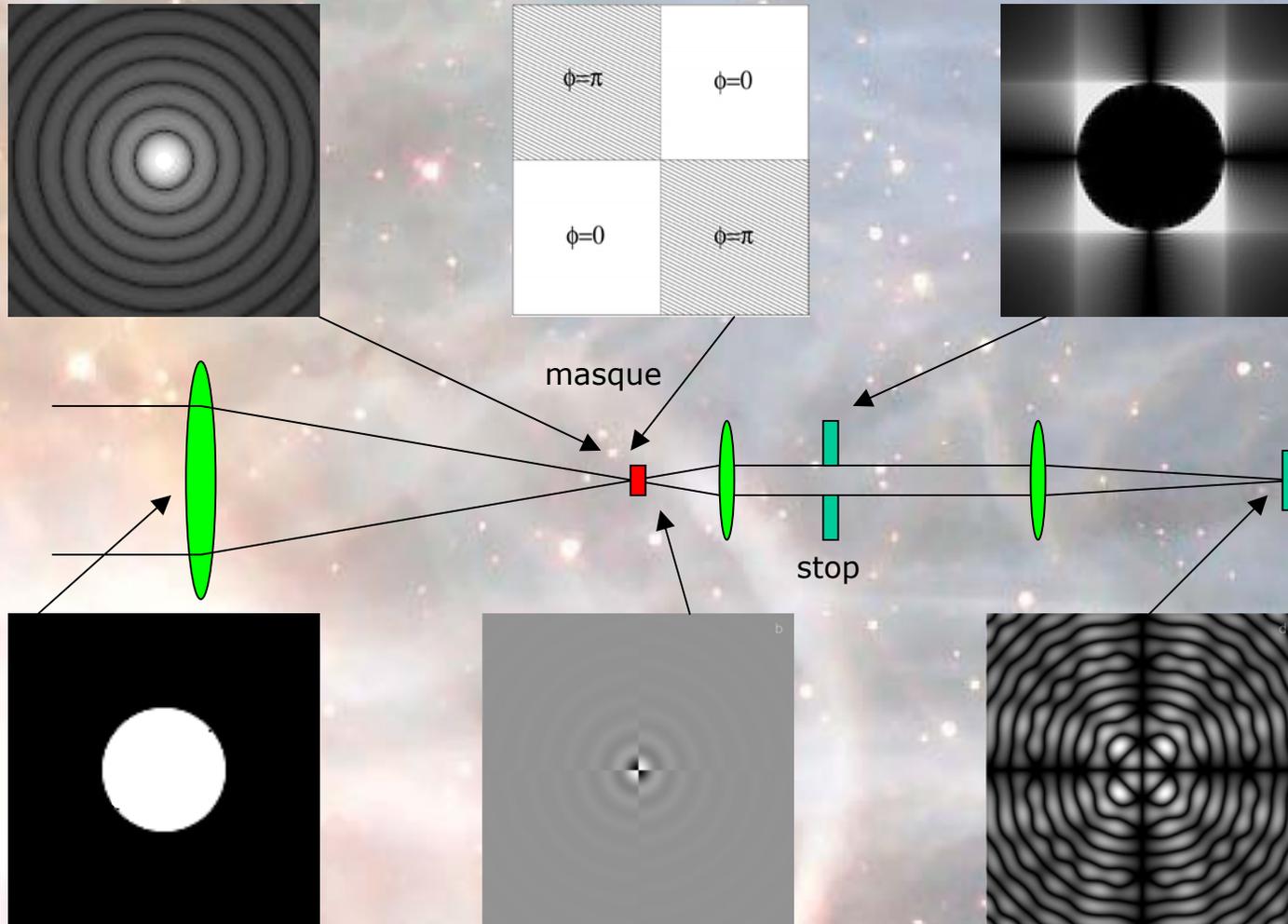
(image obtenue par A. Boccaletti)





I. Principe du coronographe

(Rouan D., Riaud P., Boccaletti A., Clénet Y., Labeyrie A. PASP 112, 1479)





I. Principe du coronographe

1. 4Q: Chromatisme de la phase

1 Etude de la réponse d'un masque monochromatique en lumière blanche:

$$\tau \approx 48/\pi^2 \cdot R^2$$

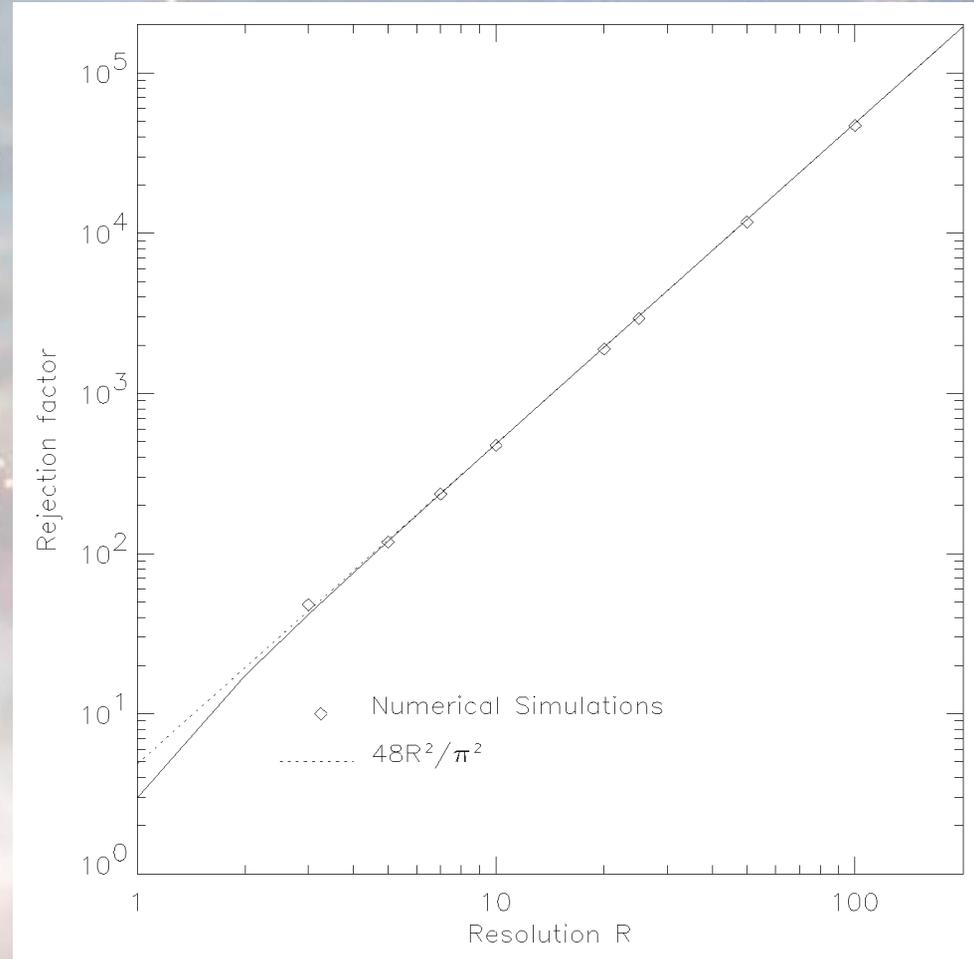
2 Utilisation possible au sol:

$$SR < 90\%$$

$$R \approx 60-10$$

3 Utilisation spatiale (NGST):

$$\tau \approx 210 \Rightarrow R \approx 10$$





I. Principe du coronographe

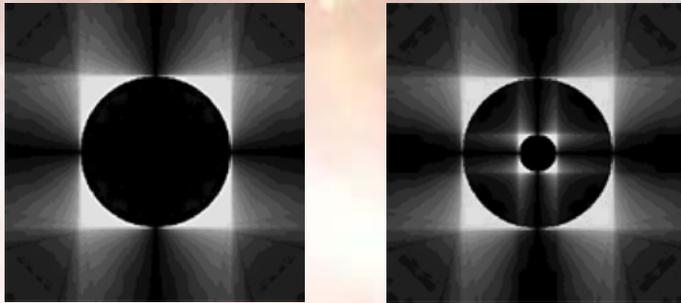
2. 4Q: Effet de l'obstruction centrale - Strehl

(Riaud P., Rouan D., Boccaletti A., Lemarquis F., Labeyrie A. PASP 113, 1145)

Grande sensibilité à l'obstruction centrale:

$$\tau \approx R^2_{(obs)} / (R^2_{(tel)} - R^2_{(obs)})$$

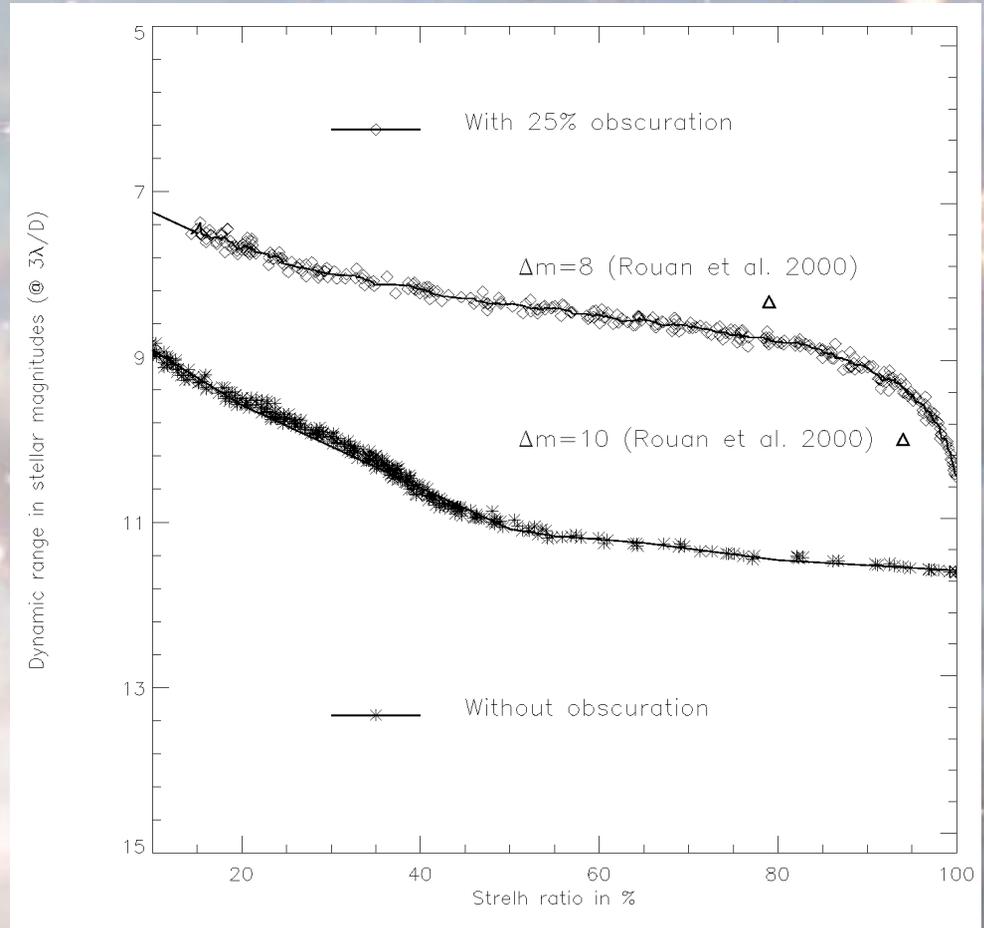
Utilisable sur le VLT (obs=14%)



Grande sensibilité au Tip-Tilt

$\theta < 10$ mas au sol (NAOS)

$\theta < 8$ mas dans l'espace (NGST)



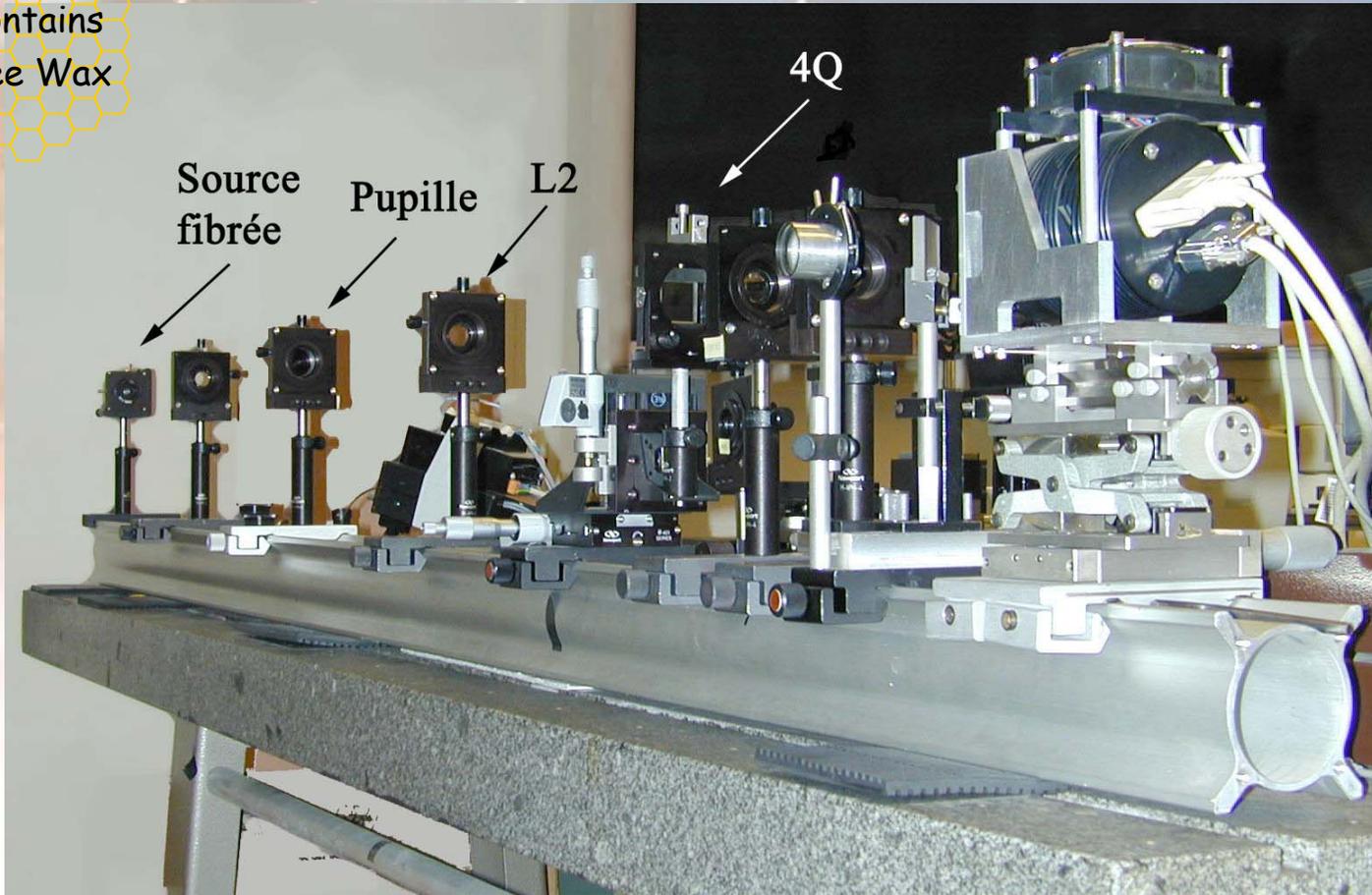
II. Résultats en laboratoire

1. Présentation du banc

(Riaud P., Baudrand J., Boccaletti A., Rouan D. PASP soumis)



Contains
Bee Wax

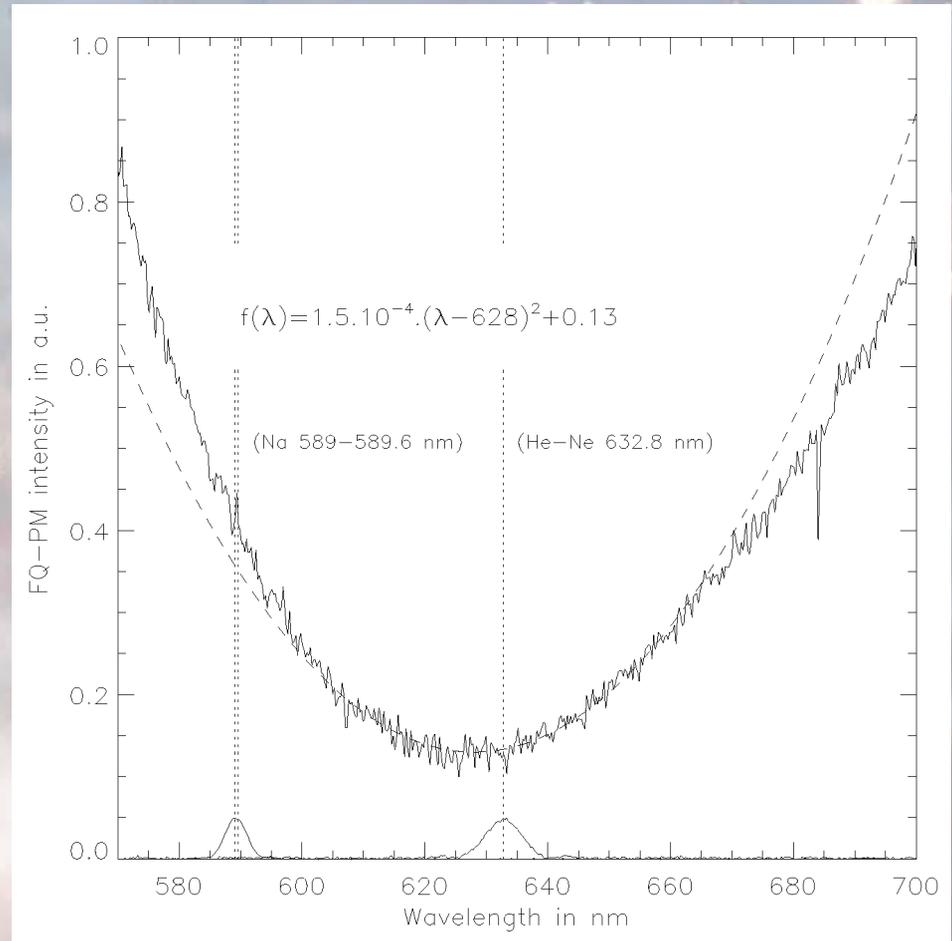




II. Résultats en laboratoire

2. Détermination de la longueur d'onde

- ↳ Masque monochromatique:
couche d'Al₂O₃, $e_p \approx 530$ nm
($n=1.6$ @ 632.8 nm)
sur verre Corning C2036
($n=1.616$ @ 632.8 nm)
- ↳ Zone de transition de **10 μm**
- ↳ Test spectro-photométrique
 $\lambda = 628 \pm 1$ nm



II. Résultats en laboratoire

2. Détermination de la longueur d'onde des masques infrarouges pour MIRI



1 Masque monochromatique:

couche de ZnSe
sur un substrat de ZnSe

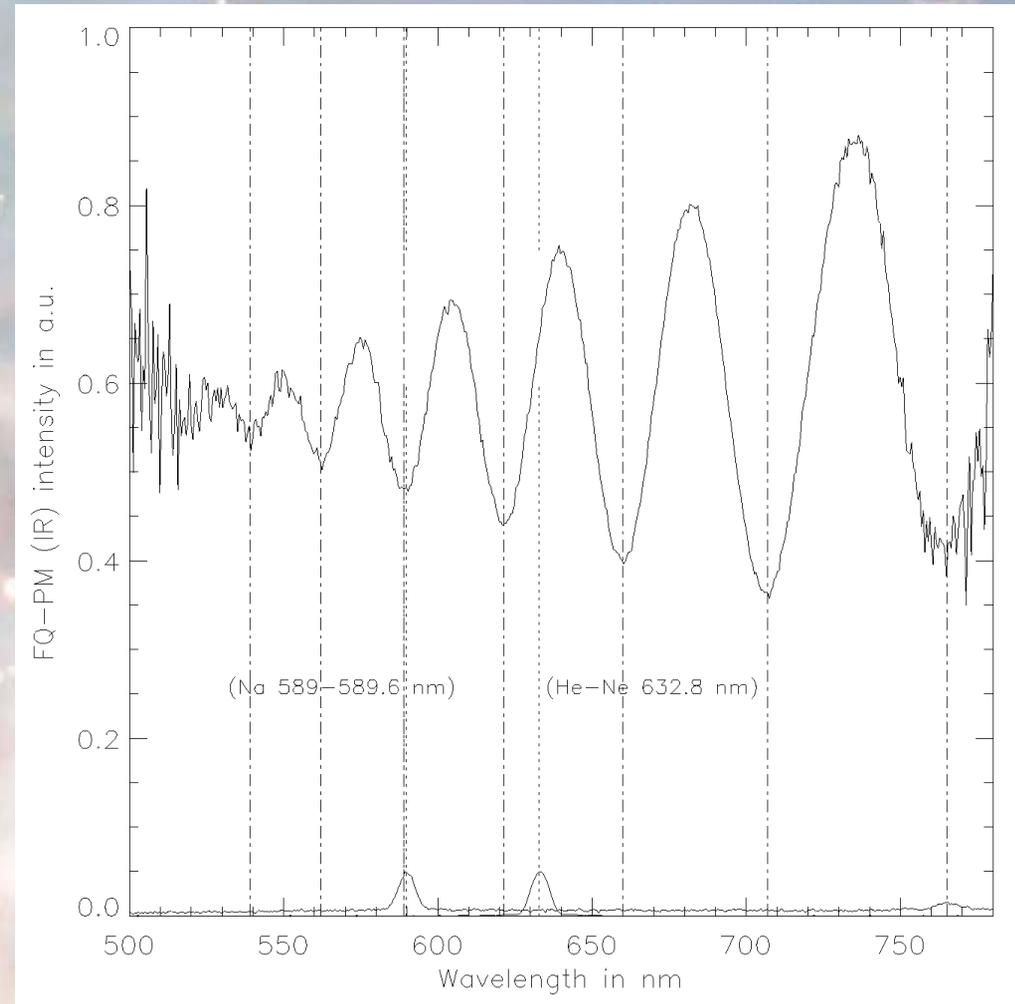
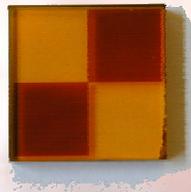
Zone de transition de **25 μm**

2 Test spectro-photométrique:

k | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | 33

λ | 765 | 707 | 660 | 621 | 589 | 562 | 539 nm

$$\lambda = \mathbf{14.215 \pm 0.004 \mu\text{m}}$$

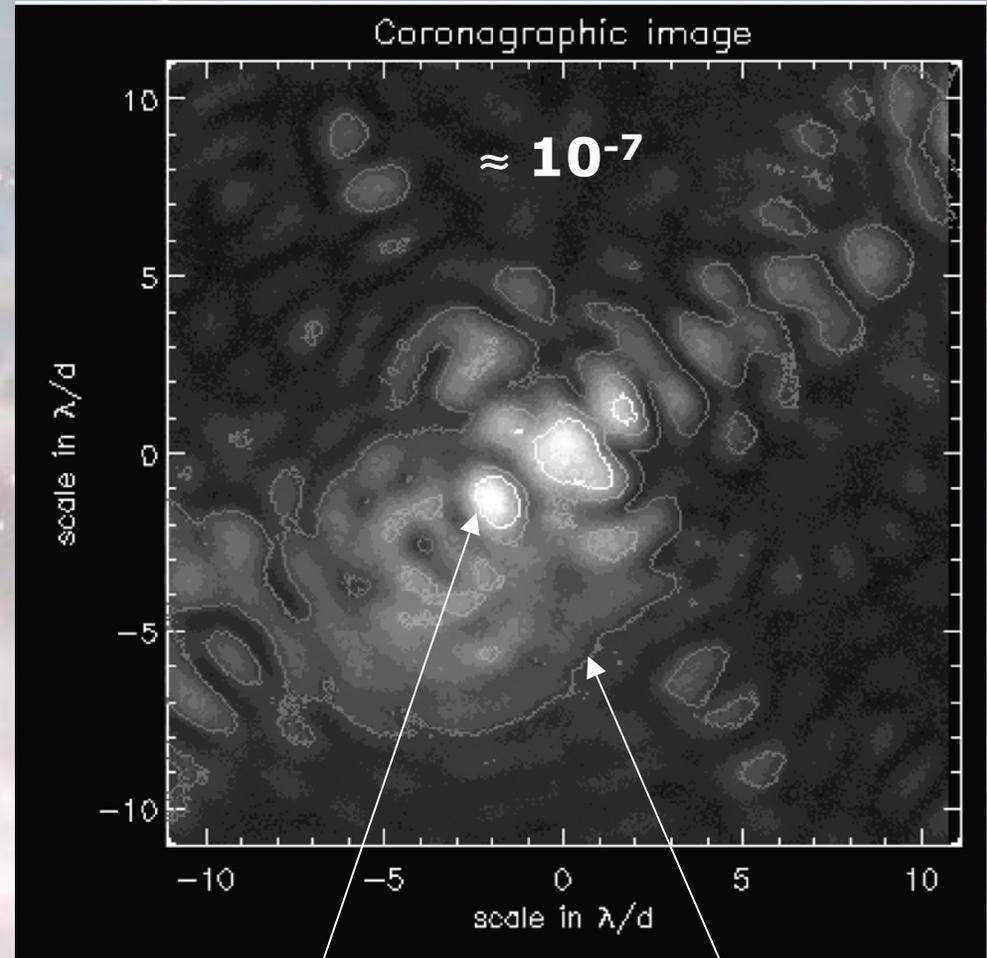




II. Résultats en laboratoire

3. Images coronagraphiques en visible

- Utilisation d'une diode LASER fibrée et accordable autour de 630-640 nm
- Atténuation du pic de:
44000 +/- 2000
- Atténuation globale de:
4400 +/- 200
- Niveau des tavelures entre:
 10^{-6} - 10^{-7}
- Gain avec la soustraction des quadrants opposés



II. Résultats en laboratoire

4. Coupes photométriques



1 Moyenne sur 16 images coronographiques ($t=1s$)

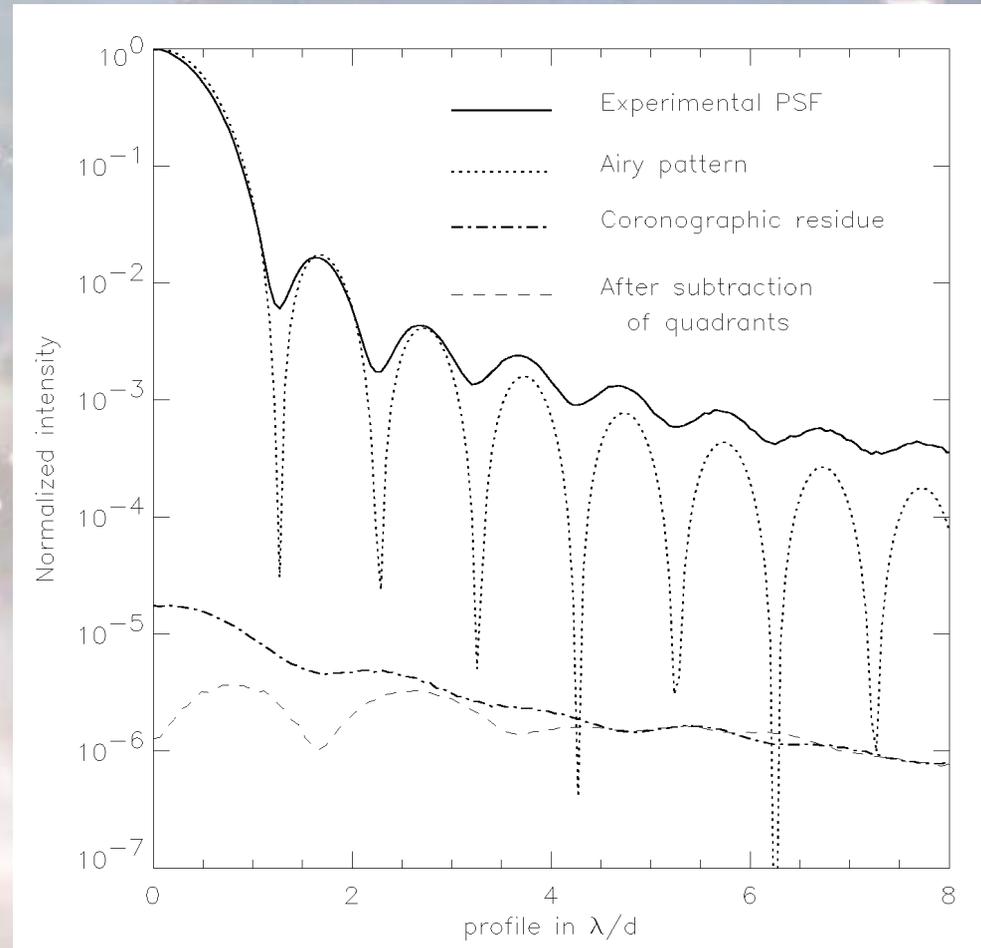
2 Niveau de 10^{-6} @ $5 \lambda / d$

3 Soustraction des quadrants:

$3 \cdot 10^{-6}$ @ $0 - 3 \lambda / d$

4 Soustraction d'une référence:

$10^{-6} - 10^{-7}$

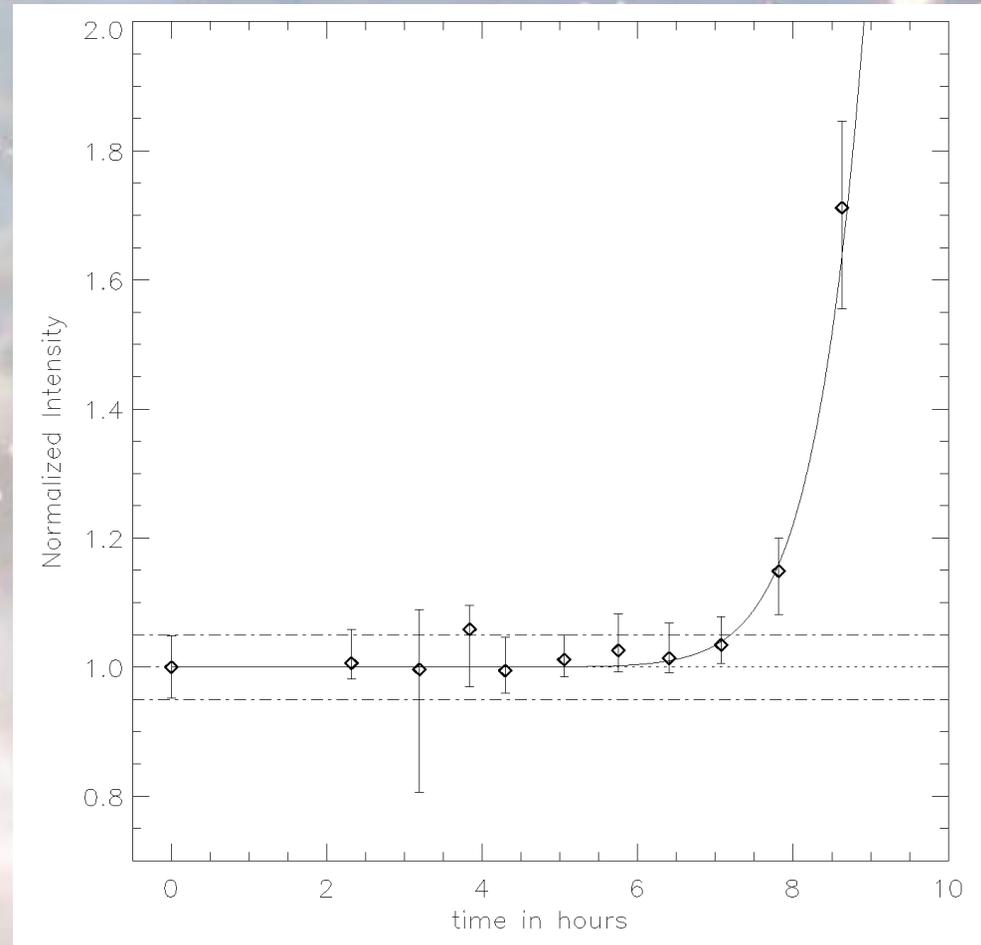


II. Résultats en laboratoire

5. Stabilité photométrique

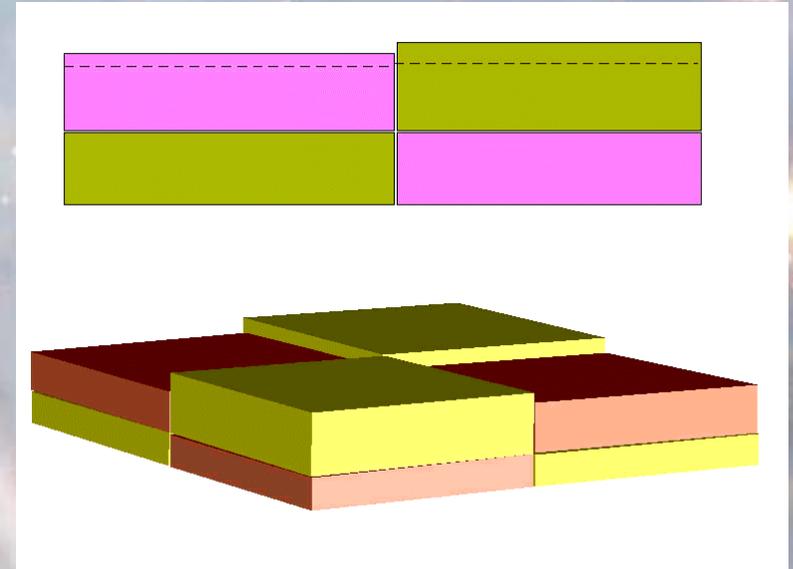
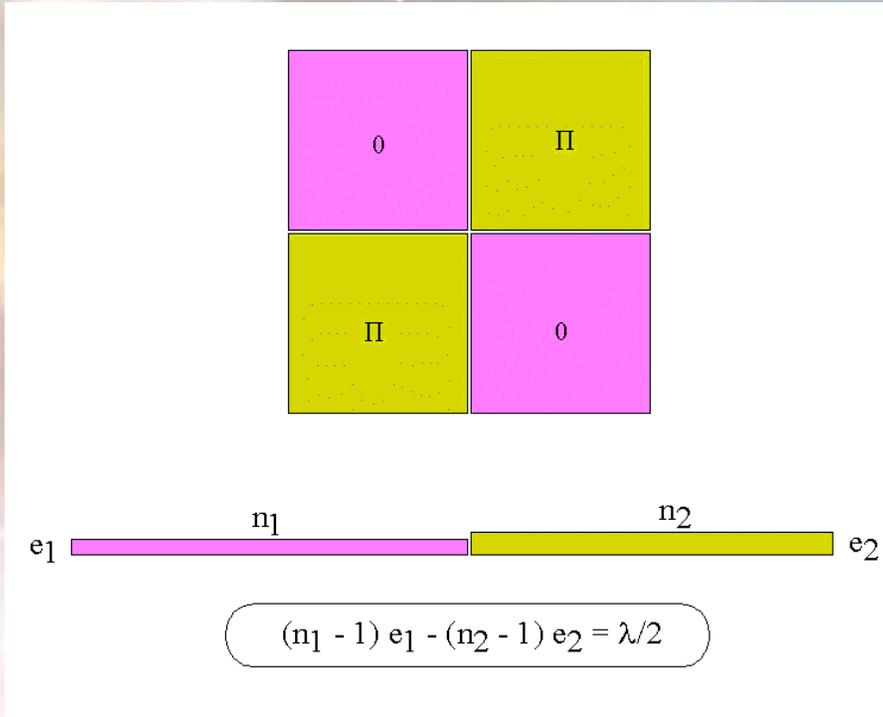


- Stabilité photométrique sur près de **7h**
- Amplitude de vibrations: **+/- 0.5 μm PTV**
- Stabilité de l'air: **$> \lambda / 200$ rms**



III. Achromatisation

1. En transmission



Epaisseurs trop faibles: de 40 - 500 μm difficilement réalisable (voir la partie lame demi-onde)

Possibilité d'un empilement de 8 plaques épaisses:

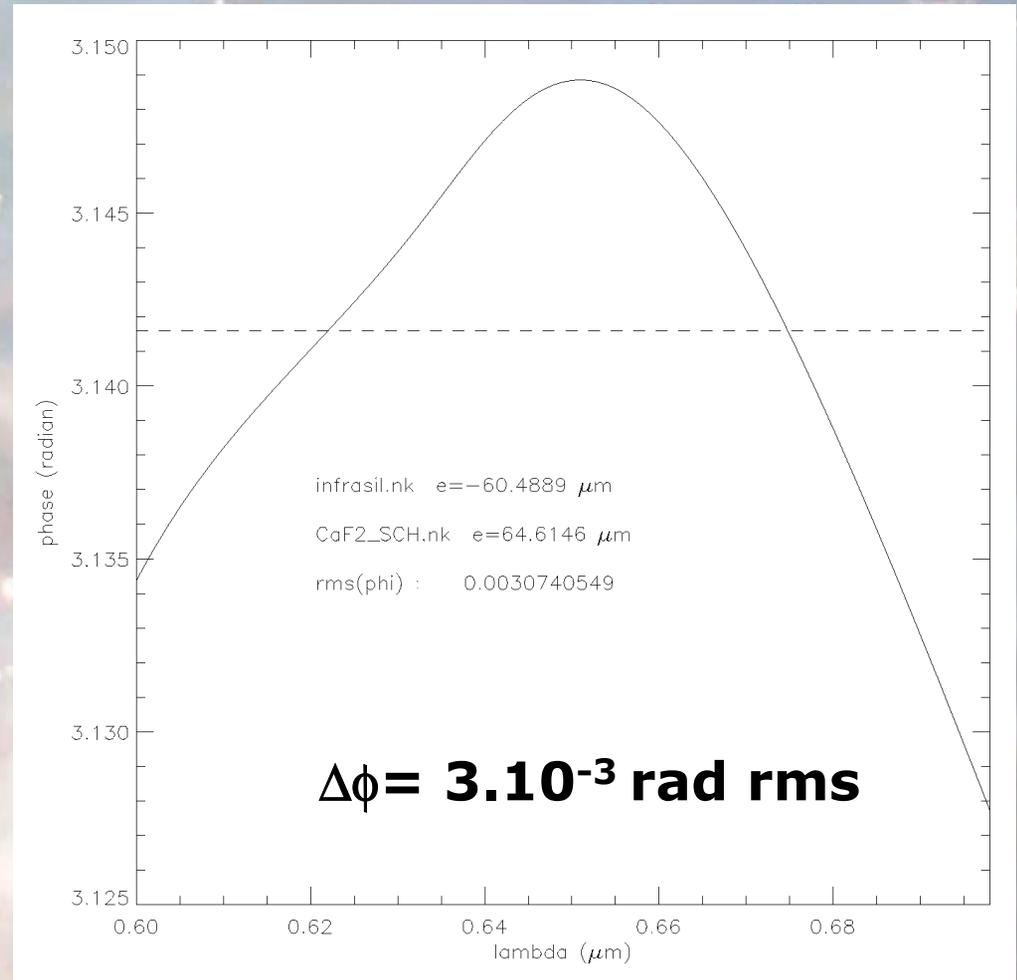
- + **Grande rigidité**
- + **Pas de problème de déphasage des anti-reflets**
- **Mécanique plus complexe du support**



III. Achromatisation

1. En transmission: cas de la bande R

- Utilisation de deux matériaux classiques: **SiO₂ / CaF₂**
- Bonne connaissance des indices de réfraction: $\Delta n = +/- 3 \cdot 10^{-5}$
- Grande facilité pour le polissage:
planéité à $\lambda/20$ **PTV** possible
- Usinage ionique possible pour la silice => contrôle au nm
- $\Delta e_1 = 60.489 \mu\text{m}$ (SiO₂)
 $\Delta e_2 = 64.615 \mu\text{m}$ (CaF₂)

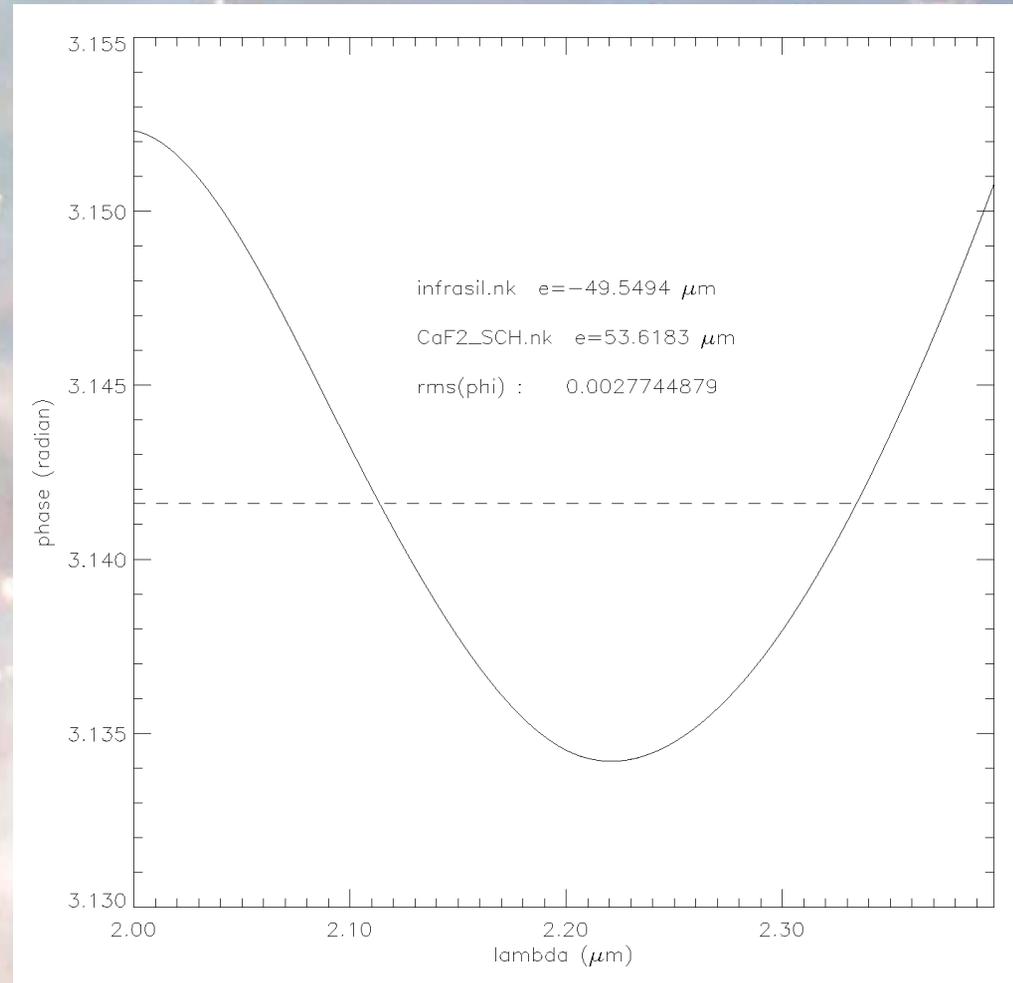




III. Achromatisation

1. En transmission: cas de la bande K

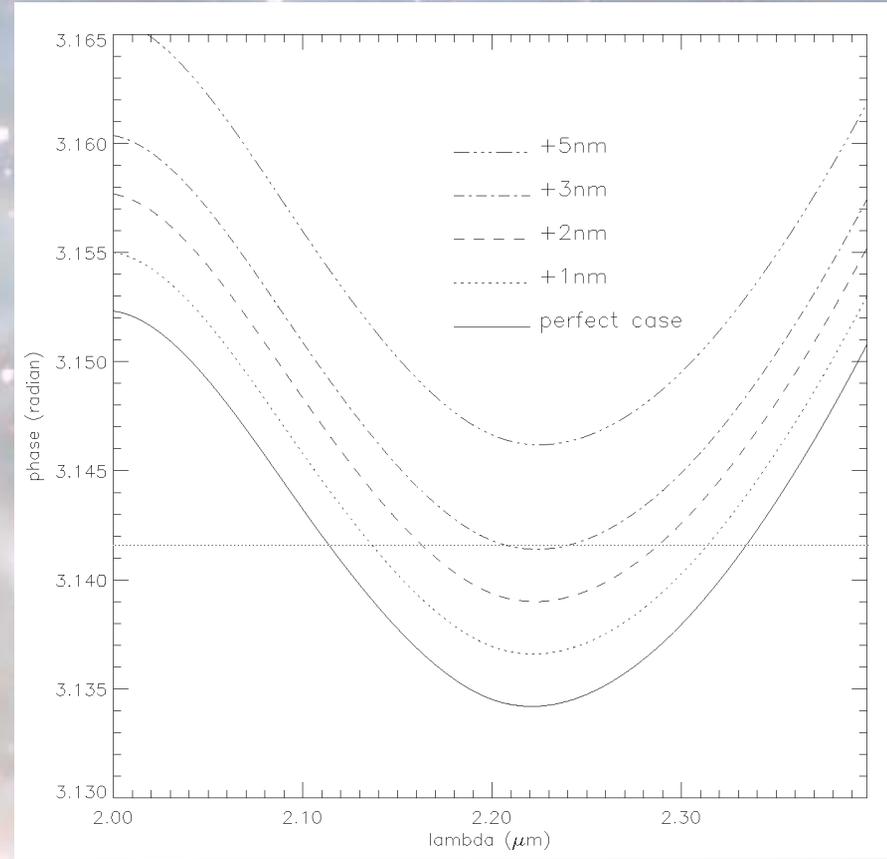
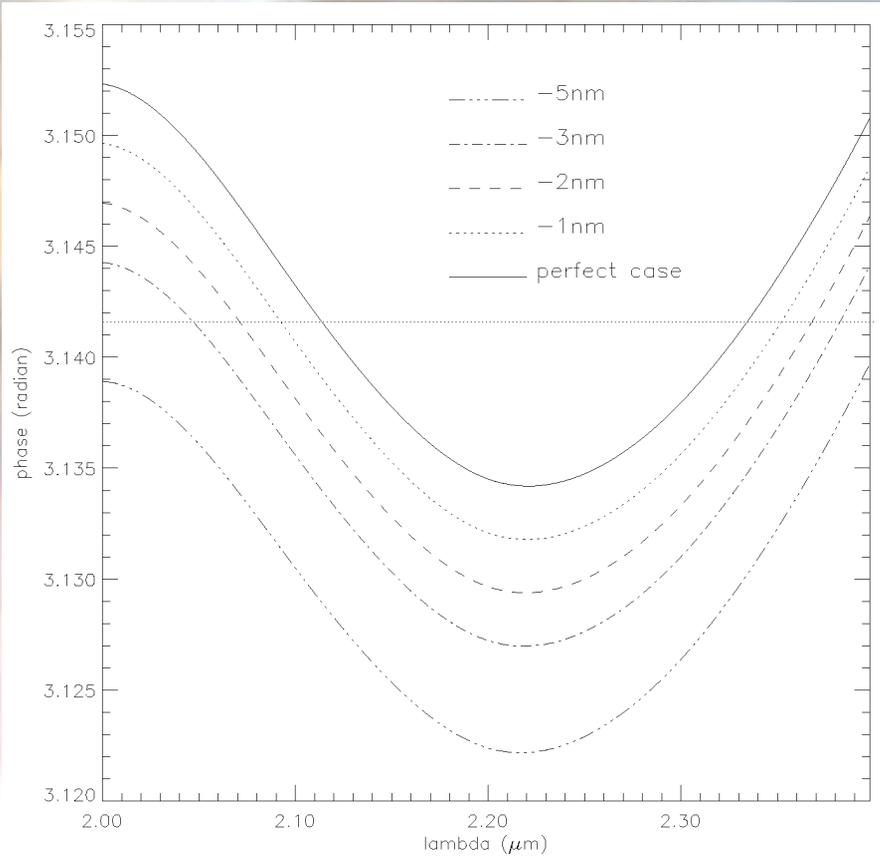
- Utilisation des deux mêmes matériaux: **$\text{SiO}_2 / \text{CaF}_2$**
- Achromatisation de toute la bande K: $\Delta\phi = \mathbf{3 \cdot 10^{-3} \text{ rad rms}}$ (résultat similaire à la bande R)
- Possibilité du contrôle interférométrique à 632.8 nm
- Anti-reflets (**ZnS/YF_3**) performant (**$R < 0.25 \%$**)
- $\Delta e_1 = \mathbf{49.550 \mu\text{m}}$ (**SiO_2**)
 $\Delta e_2 = \mathbf{53.618 \mu\text{m}}$ (**CaF_2**)





III. Achromatisation

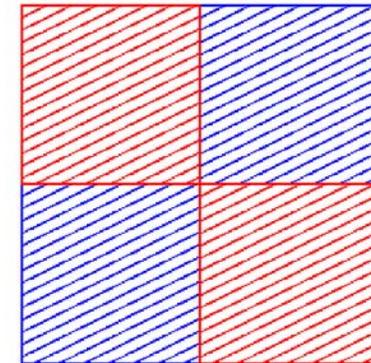
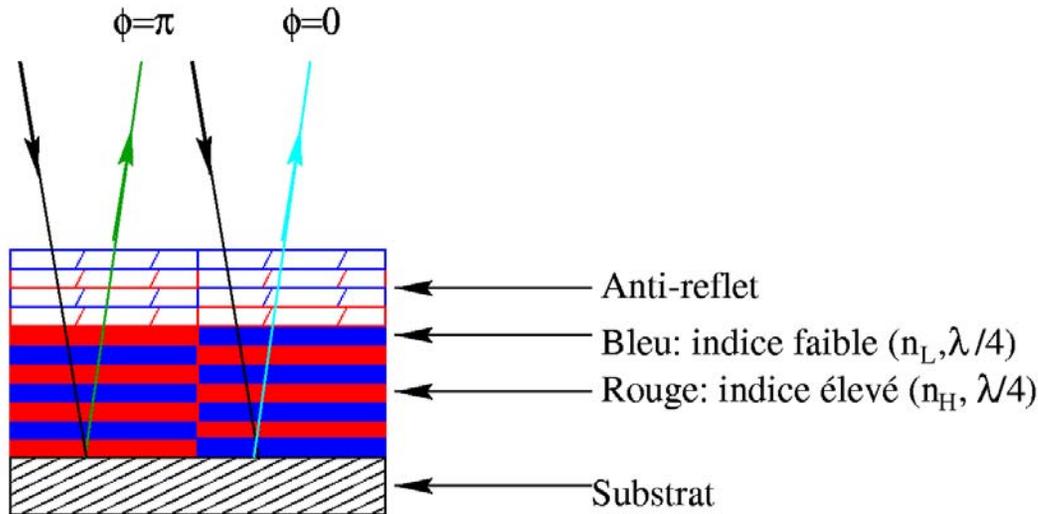
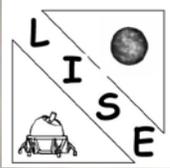
1. En transmission: Erreurs sur les épaisseurs



- Erreurs sur les épaisseurs < 5 nm
- Comportement linéaire
- Problème du parallélisme des plaques ($1'' = 4 \text{ nm}$)

III. Achromatisation

2. En réflexion



Empilement de miroirs quart-d'onde + anti-reflet:

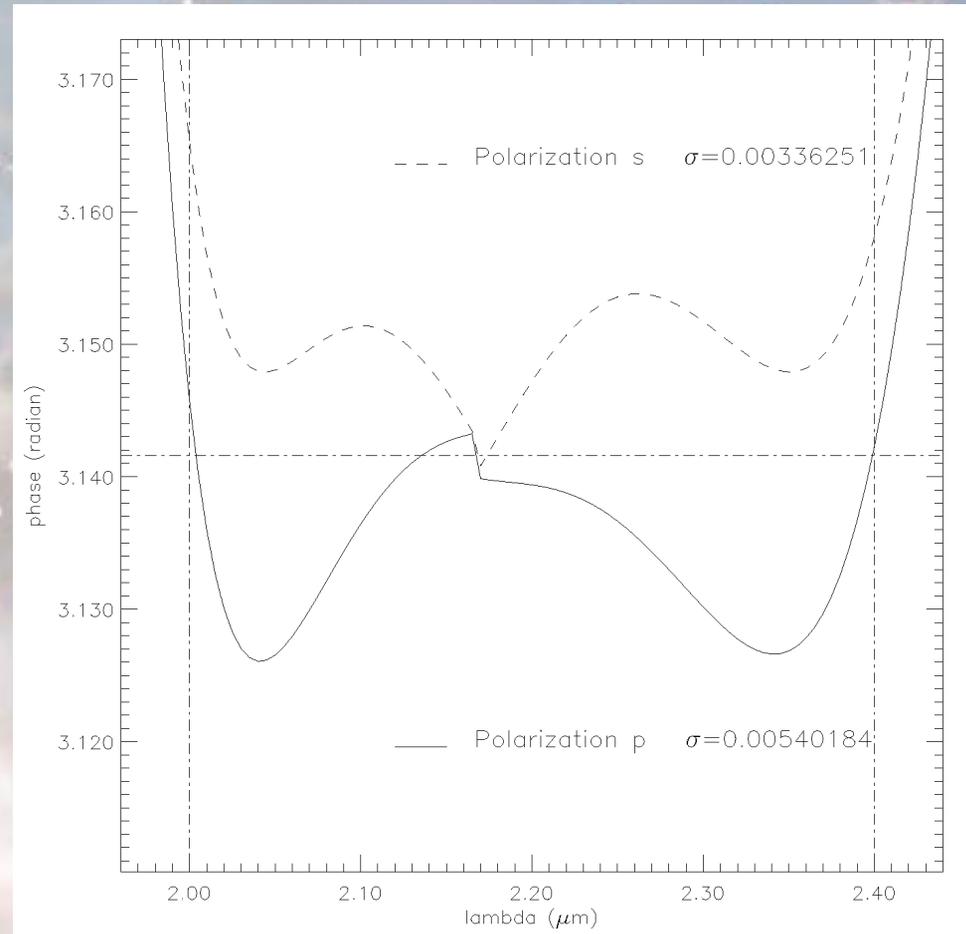
- + **Rendement élevé du taux de réflexion (>99%)**
- + **Processus de dépôt bien connu**
- **Précision sur l'épaisseur de seulement 3%**
- + **Possibilité de faire du contraste de phase**



III. Achromatisation

2. En réflexion: cas de la bande K

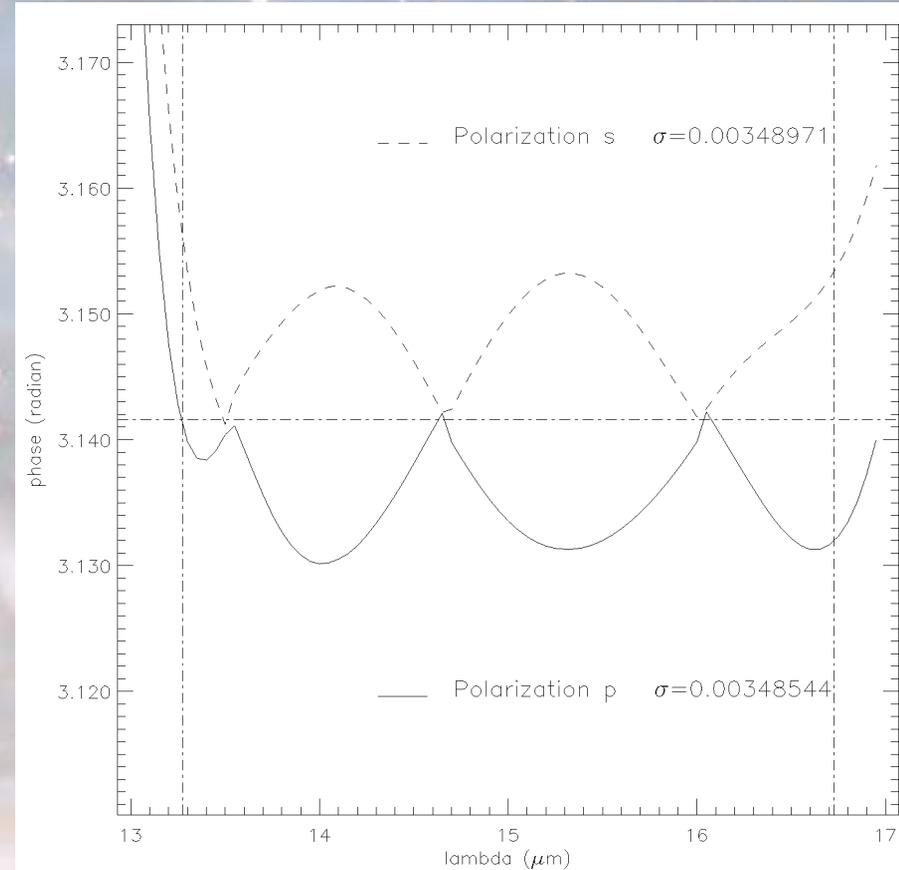
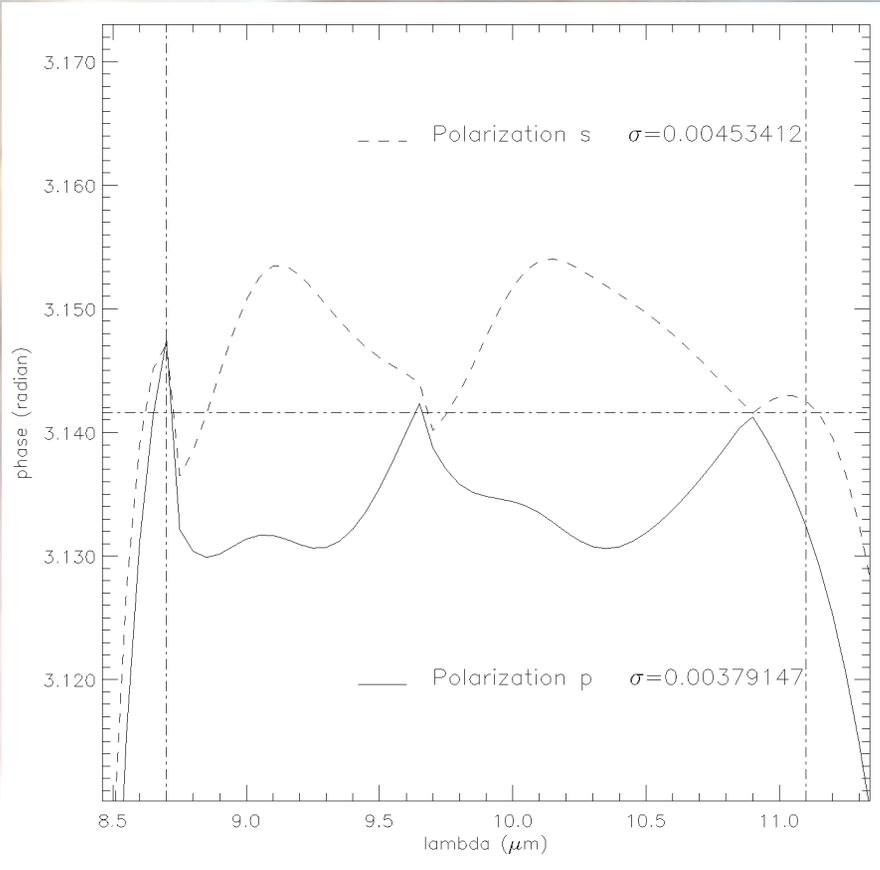
- Utilisation de deux matériaux:
ZnS / YF₃ (milieu extérieur: air)
- Miroir: 20 couches (**R > 99%**)
Anti-reflet: 7 couches
- Erreur maximale admissible:
 $\Delta e = 1-2 \text{ nm} !$
- Pas d'effet du rapport F/D pour des valeurs supérieures à 20
- Pas d'effet des erreurs de surface avec un poli classique
 $\Delta\phi = 5.10^{-3} \text{ rad rms}$





III. Achromatisation

2. En réflexion: cas pour 10 μm et 15 μm



Utilisation de trois matériaux: **Ge / ZnS / YF₃** (milieu extérieur: **ZnSe**)

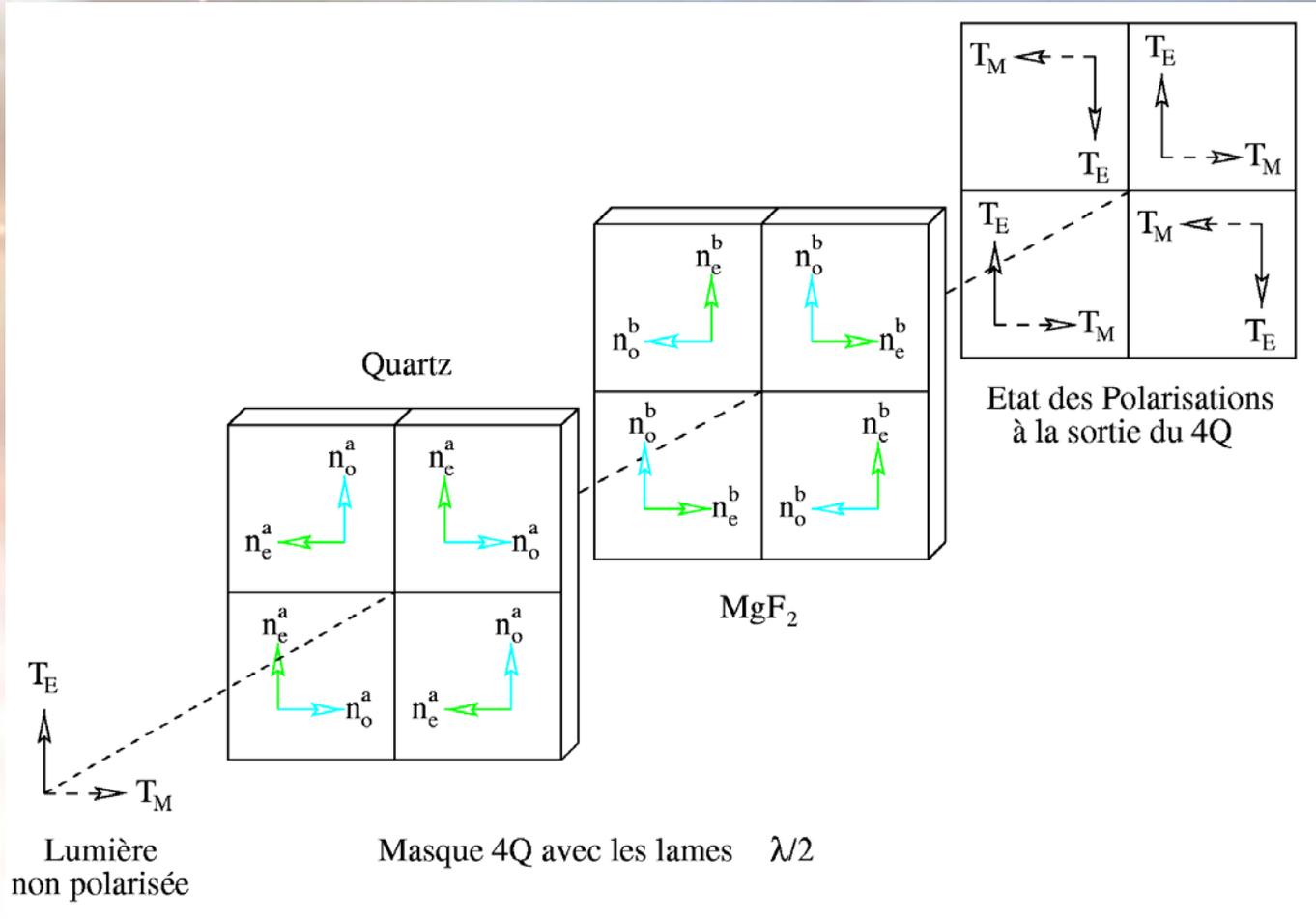
Miroir: >10 couches (**Ge / ZnS**) Anti-reflet: 11 couches (**ZnS / YF₃**)

$$\Delta\phi < 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ rad rms}$$



III. Achromatisation

3. Les lames $\lambda/2$



III. Achromatisation

3. Les lames $\lambda/2$



Utilisation de deux matériaux:

Quartz / MgF₂

Achromatisation similaire au cas par transmission avec 4 indices différents (n_o/n_e quartz et n_o/n_e MgF₂).

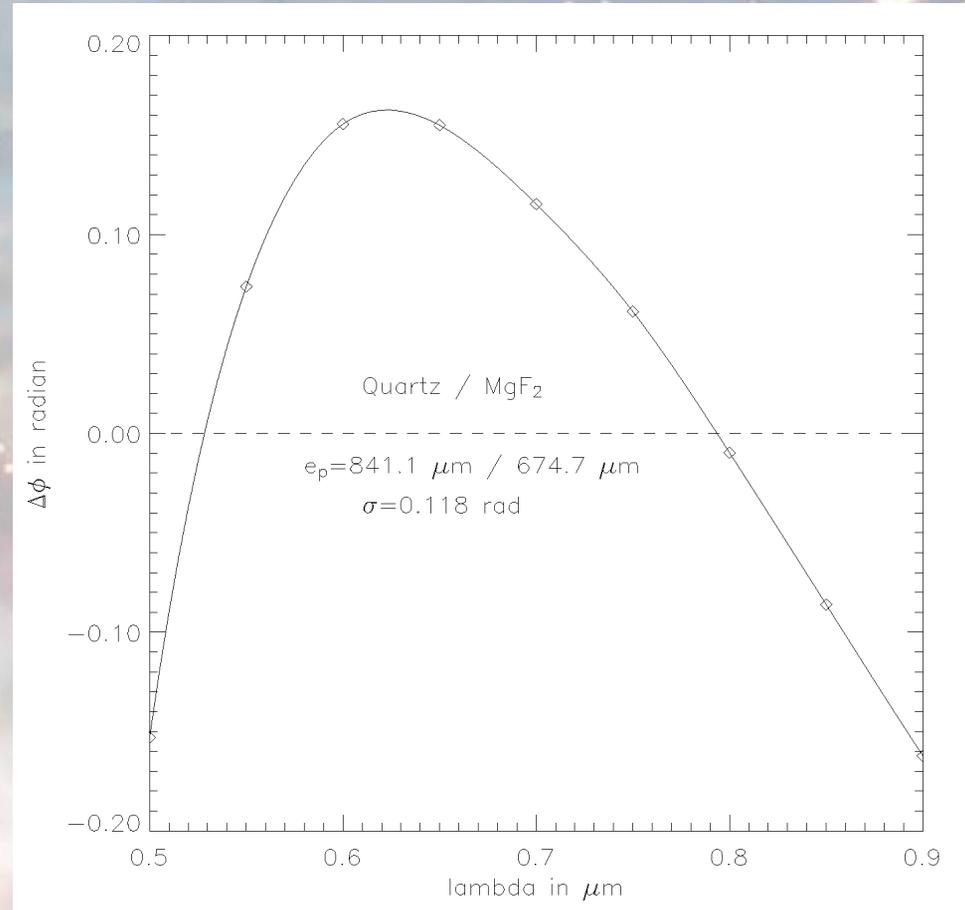
Achromatisation possible:

de 700 à 2500 nm

Erreurs sur la phase importantes:

$\Delta\phi = 10^{-2} - 10^{-1}$ rad rms

Utilisation au sol (**SR < 95%**)



III. Achromatisation

4. Conclusions



- ⌋ Grandes difficultés de réalisation des achromatisations par transmission:
 - **Connaissance très précise des indices (problème en cryogénie)**
 - **Mesures absolue des épaisseurs compliquées**
 - + **Possibilité de recourir à l'usinage ionique avec Si, SiO₂, Ge**
 - + **Pas de compensation possible avec la rotation des lames**

- ⌋ L'achromatisation par réflexion semble plus réalisable:
 - **Précision sur l'épaisseur des couches de seulement 3%**
 - + **Mesures de phase possible par contraste de phase @ 632.8 nm**
 - **Problème de tenue en ambiance cryogénique**

- ⌋ Le cas des lames $\lambda/2$ est très intéressant pour le visible et le proche infrarouge sur un télescope au sol.

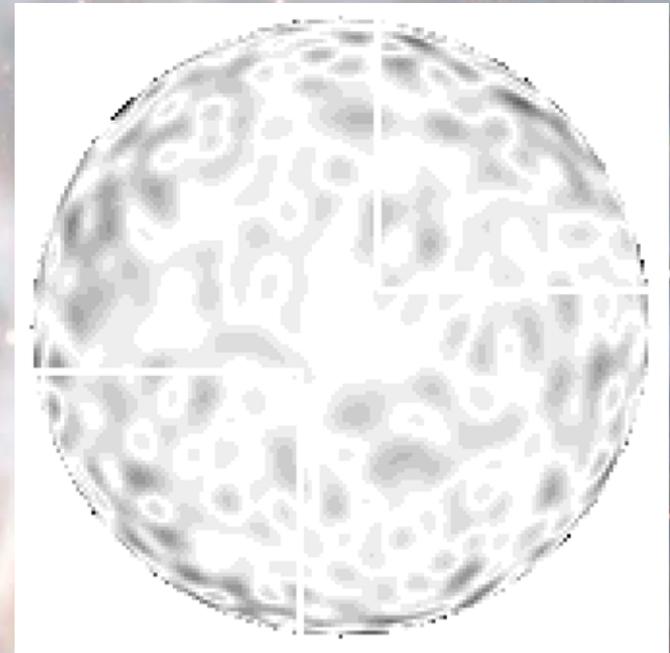
- ⌋ Erreurs sur la phase toujours supérieure à **10⁻³** radian rms



V. Utilisation du 4Q

1. Au sol avec le VLT

- Utilisation du 4Q sur le VLT
 - **Obstruction centrale de 14%**
 - **Présence d'araignée disymétrique**
- Etude dans le cadre de VLT-PF d'une optique adaptative à très haut strehl (91%)
- Développement d'un instrument complet pour 2006-2007
- Ecran de phase donné par une optique adaptative à 900 actuateurs (données de Thierry Fusco ONERA)





V. Utilisation du 4Q

1. Au sol avec le VLT

Simulation numérique du résidu stellaire coronographique
L'image est la somme de 4094 poses turbulées (SR=91%)

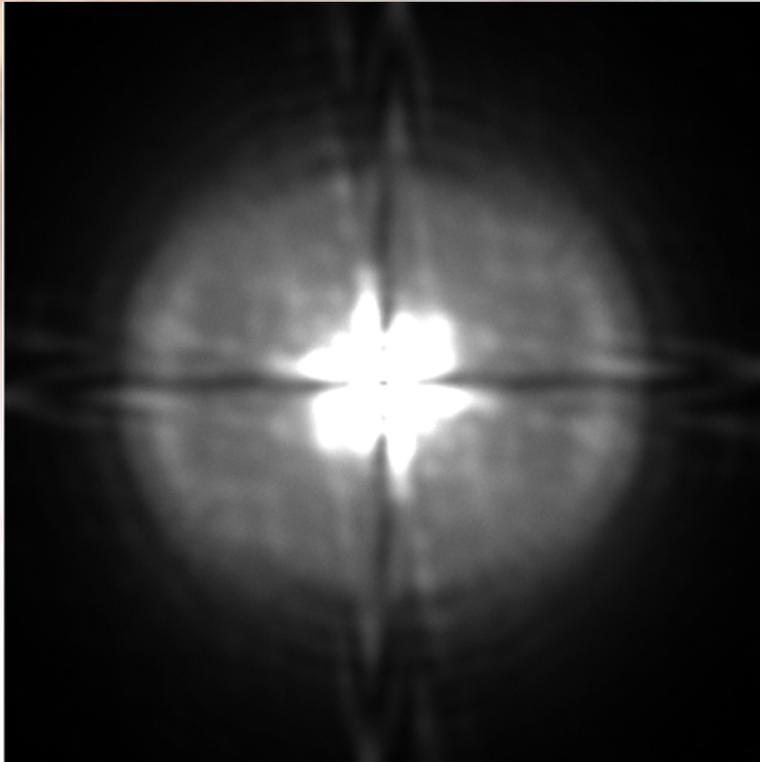
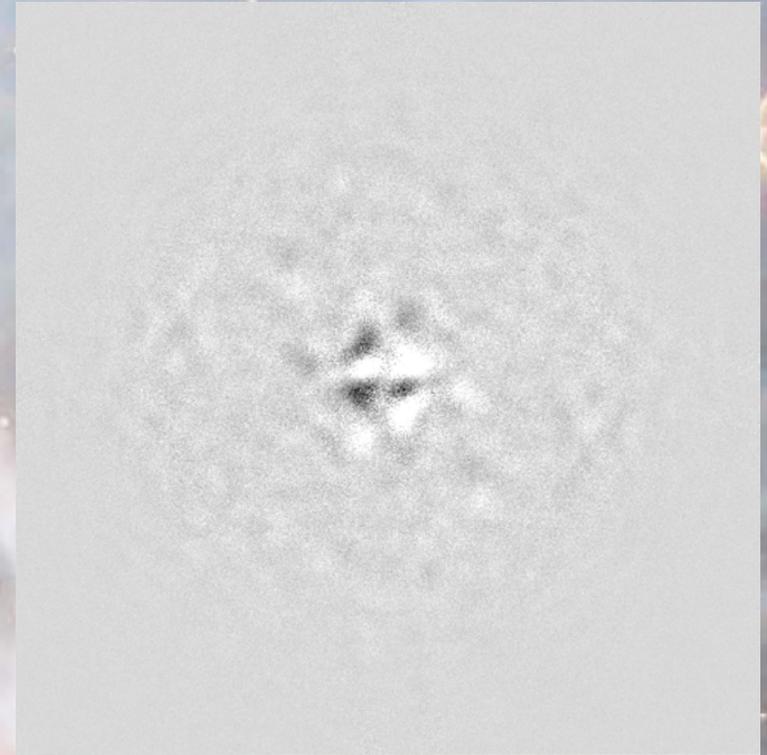


Image brute



Après la soustraction des quadrants



V. Utilisation du 4Q

1. Au sol avec le VLT

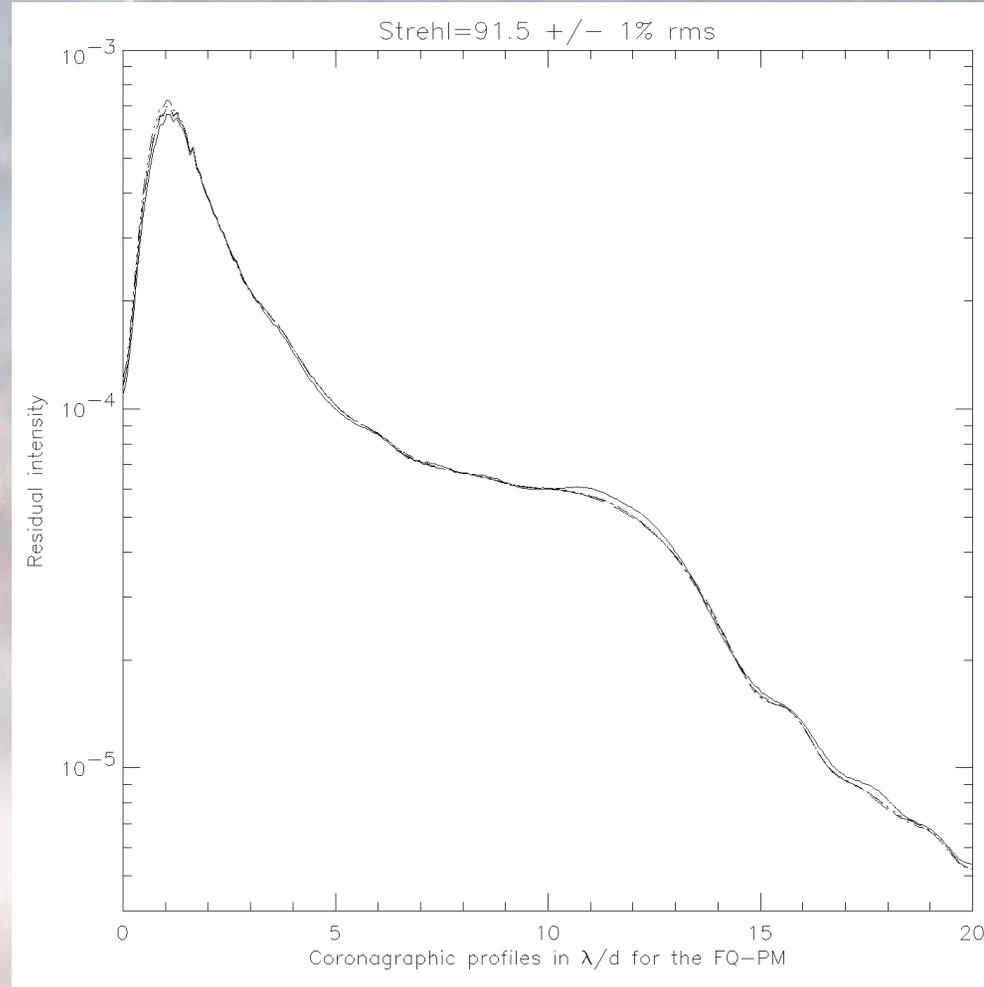
↳ Résultat de la simulation numérique:

$\tau \approx 1400$ (sur le pic)

↳ Un gain d'un facteur **70** apparaît après la soustraction des quadrants opposés

↳ Le taux de réjection total reste faible: ($\tau \approx$ **30-50**)

↳ Possibilité d'achromatiser le déphasage de π entre **700** et **2500 nm** avec des lames $\lambda/2$





V. Utilisation du 4Q

1. Au sol avec le VLT

Quelques remarques sur VLT-PF

Une étude est en cours sur la faisabilité d'un instrument au sol pour la détection d'exo-planètes chaudes dans les bandes J,H,K,L

- Deux équipes sont actuellement en concurrence:

Une équipe Germano-Italienne

Une équipe Franco-Anglaise avec une participation Canadienne

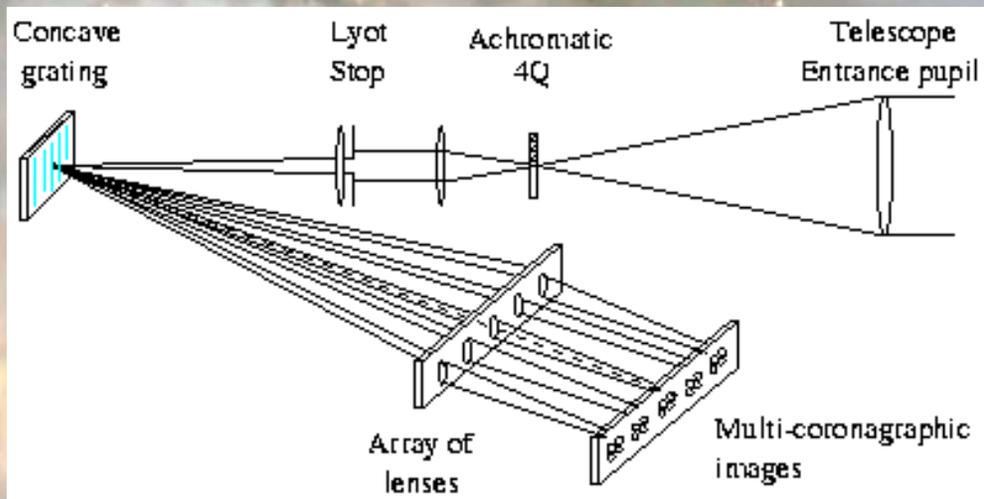
- Une étude comparative des différents coronographes reste à faire

+ Le 4Q dans ses premières simulations

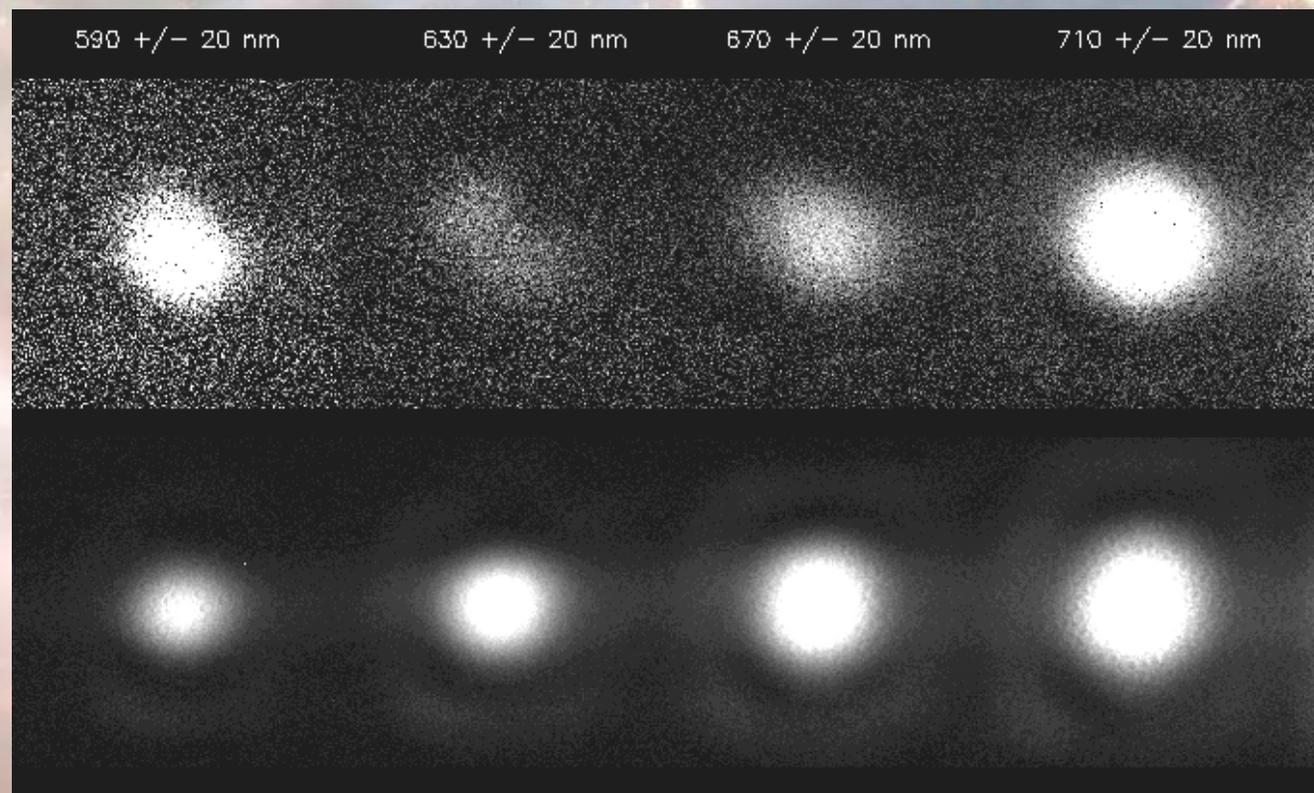
donne des taux de réjection intéressants

- La détection des exo-planètes au sol est peut être possible sur un télescope comme le VLT mais il faudra procéder à des traitements poussés des données coronographiques.

+ Enfin un Spectro-polarimètre Coronographique peut être proposé avec le 4Q si celui-ci est achromatisé avec des lames $\lambda/2$



Spectro-coronographe (montage Courtès)



Images coronagraphiques
 $\tau_{\max} = 170$

Images sans le coronographe

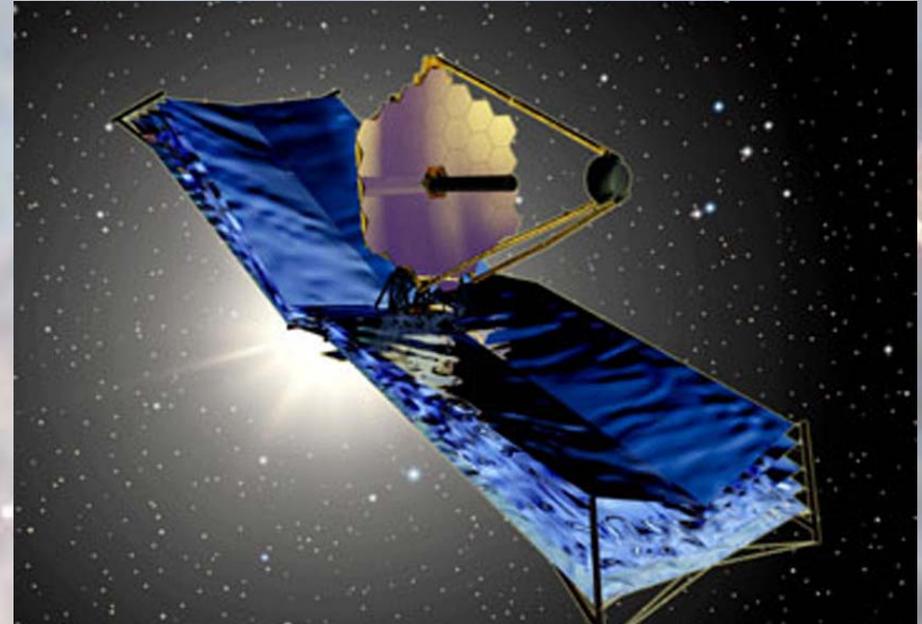
La coronographie à 4Q



V. Utilisation du 4Q

2. Dans l'espace: étude pour le NGST

- ↳ Télescope de **7 m** de diamètre
F/D = 16.7 déployable
- ↳ Pupille du type Keck
Composée de 36 hexagones
- ↳ Trois instruments:
NIRCAM (0.6-5 μm)
NIRSPEC (0.6-5 μm)
MIRI (spec + im) (6-28 μm)
- ↳ Refroidissement passif (**$\sim 40 \text{ K}$**)
- Qualité d'image: (**SR > 80% @ 2 μm**)



Concept de TRW



V. Utilisation du 4Q

2. Dans l'espace: étude pour le NGST

L'Instrument **MIRIM**:

Imagerie entre (**6 et 28 μm**)

Spectroscopie (**$R=78$, 6 - 10 μm**)

Coronagraphie (**Lyot, 4Q, ...**)

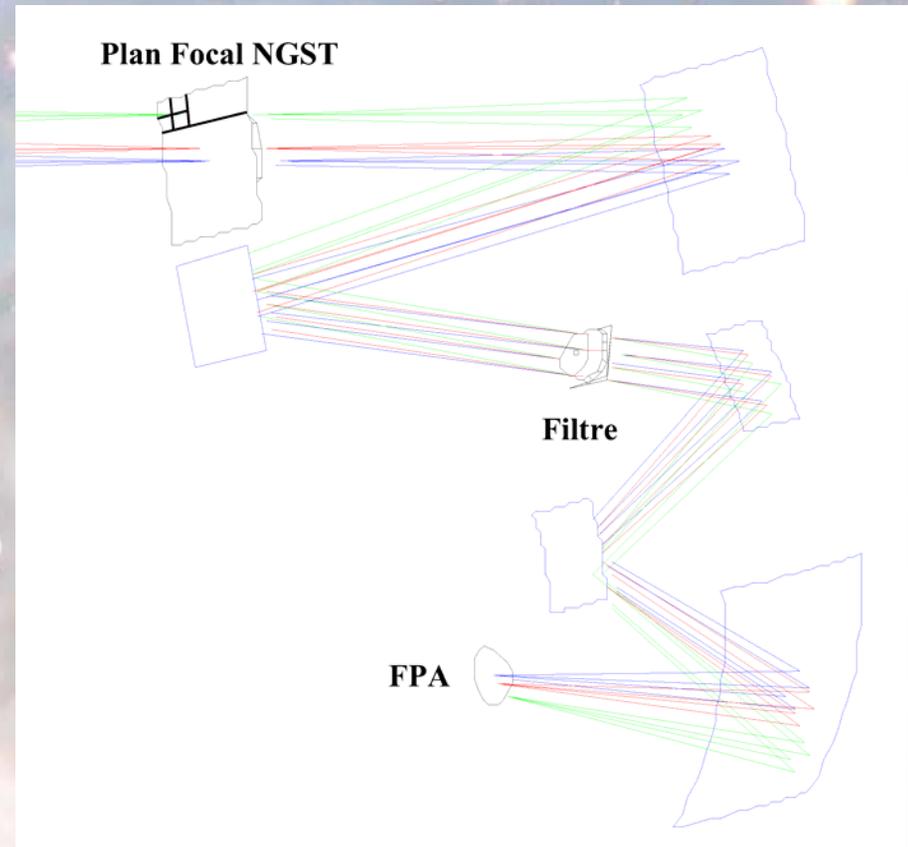
Etude du masque de phase 4Q:

Masques (**6 - 10 - 17 μm**)

Monochromatiques (**$R = 10$**)

Optimisation du diaphragme

Etude de Pre Phase B en cours ...

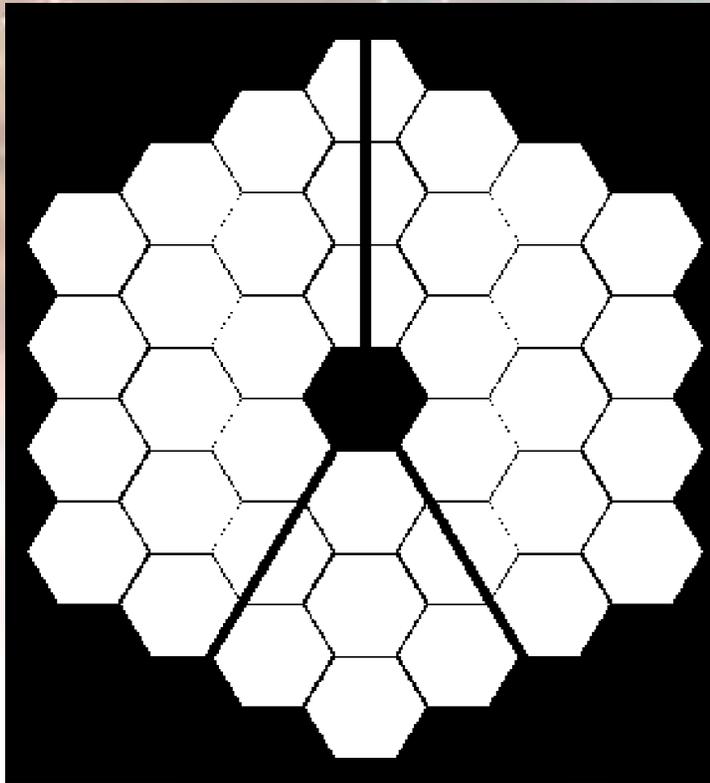




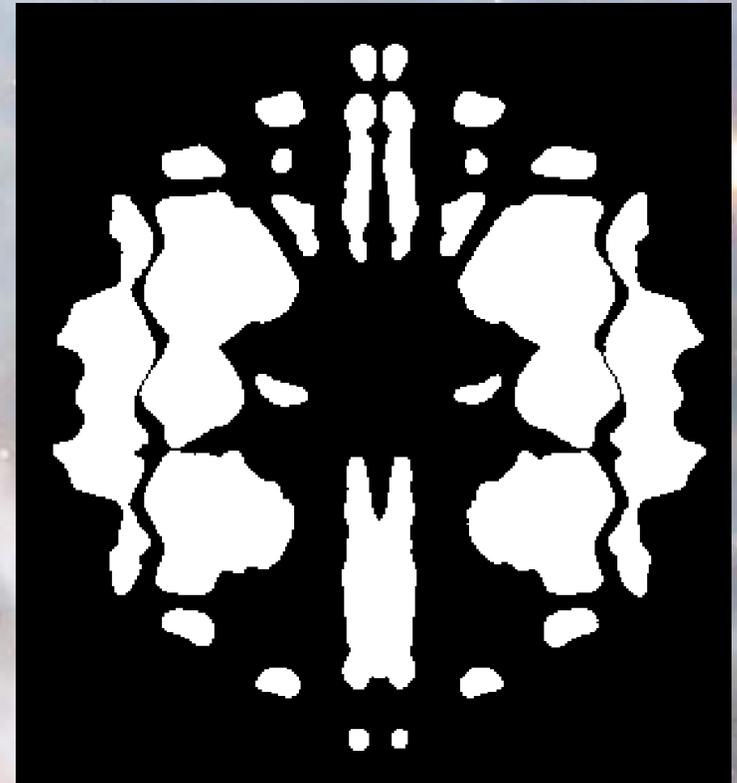
V. Utilisation du 4Q

2. Dans l'espace: étude pour le NGST

Forme de la pupille du NGST



Pupille d'entrée du TRW (Keck)



Diaphragme Optimisé: 50%



V. Utilisation du 4Q

2. Dans l'espace: étude pour le NGST

Simulation numérique des profils coronographiques à **5 (M) 10 (N) 20 μ m (Q)**

Pointage: **7 mas rms**

Erreurs de piston: **50 nm rms**

Erreurs de tilt: **50 nm rms**

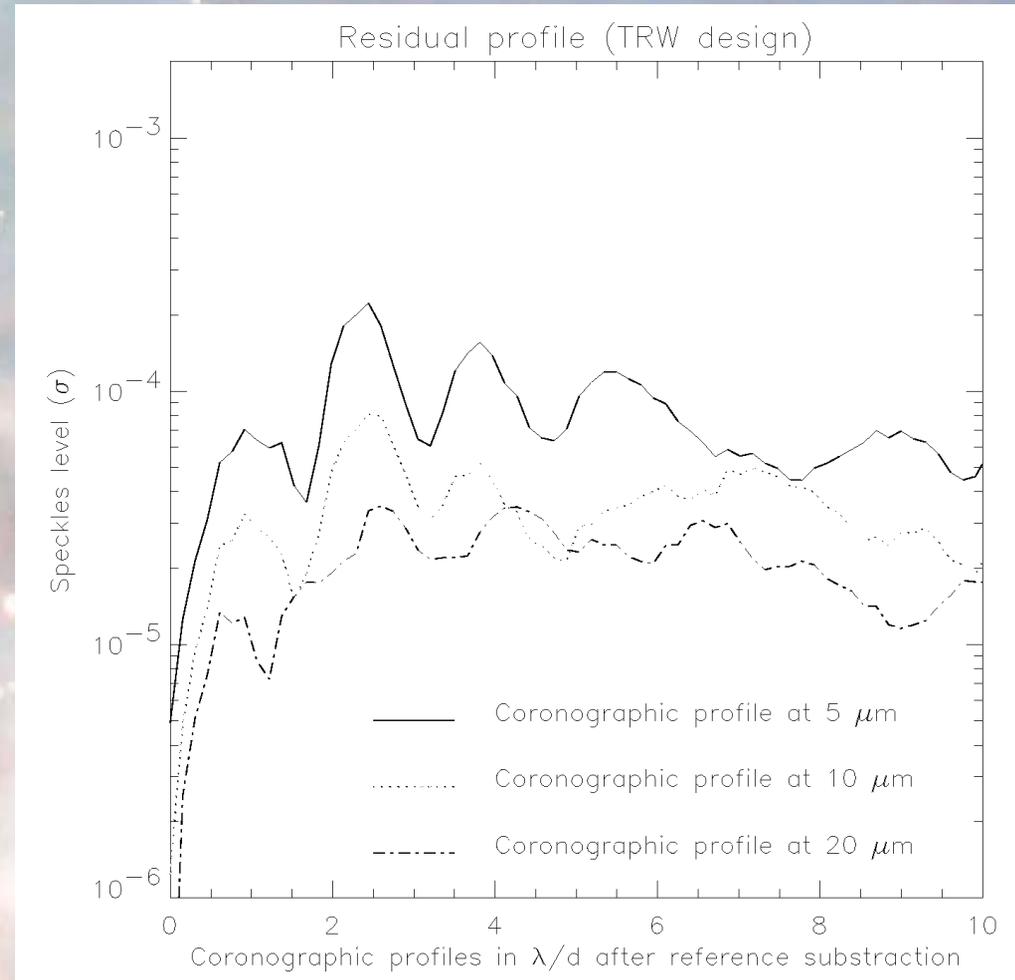
Erreurs de surface: **50 nm rms**

Réjection calculée:

Totale: $\tau \approx 285$

Maximum: $\tau \approx 3000$

Résolution spectrale (**R = 10**)





V. Utilisation du 4Q

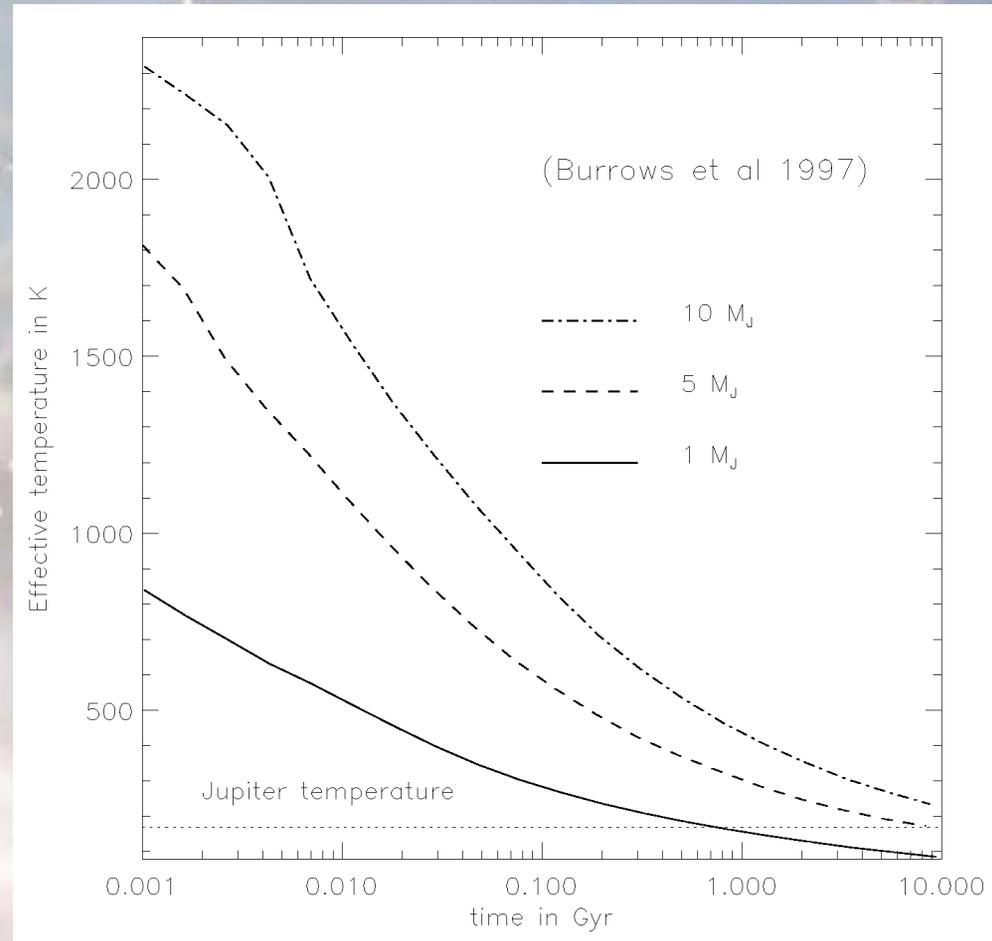
2. Dans l'espace: étude pour le NGST

1) Modèle des exo-planètes du type Jupiter: Les températures sont données par Burrows et al. 1997

2) Spectre de corps noir du fait de trop grandes différences entre les modèles d'atmosphère

3) Deux types de compagnon:
Naines brunes (42 M_J)
Planètes (1 - 5 - 10 M_J)

4) Prise en compte des dix températures les plus faibles





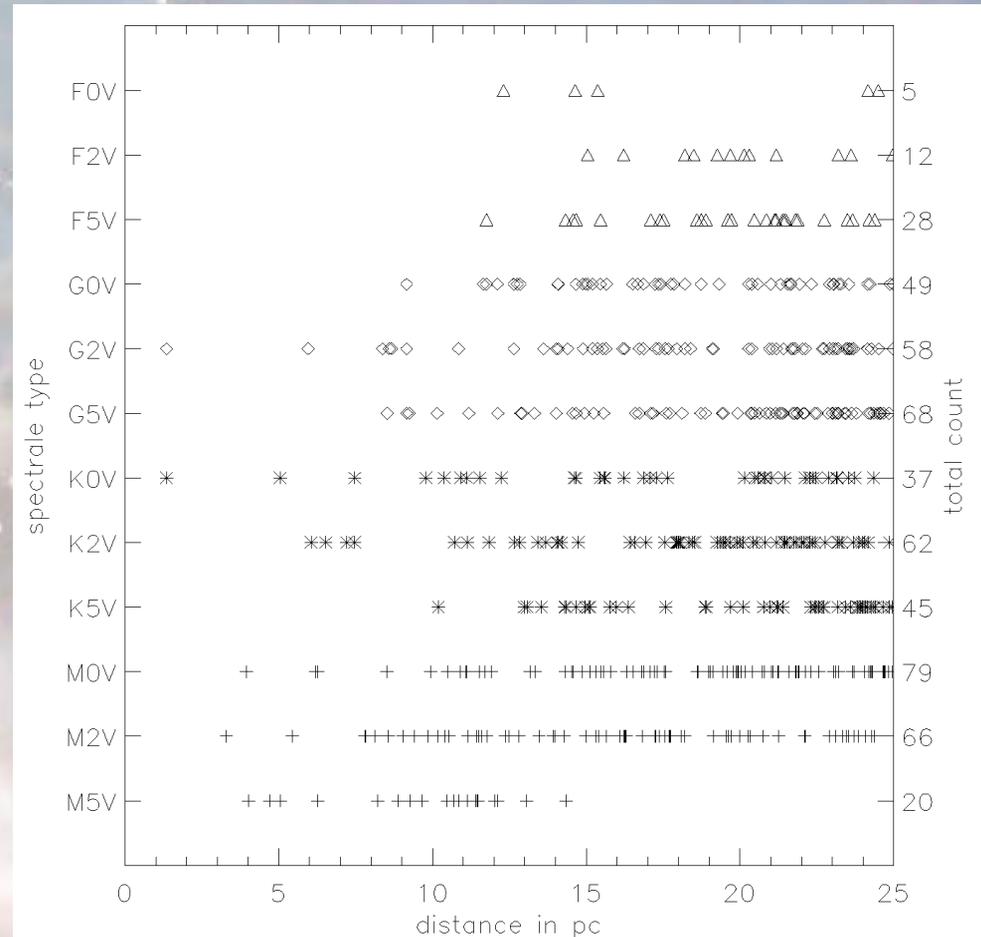
V. Utilisation du 4Q

2. Dans l'espace: étude pour le NGST

Choix de l'échantillon d'étoiles proches:
 $d < 50$ pc (Catalogue Hipparcos)

12 types stellaires:
M5V à F0V

Résultats statistiques sur:
4 distances (1-5-10-20 UA)
3 Bandes d'observations
4320 combinaisons

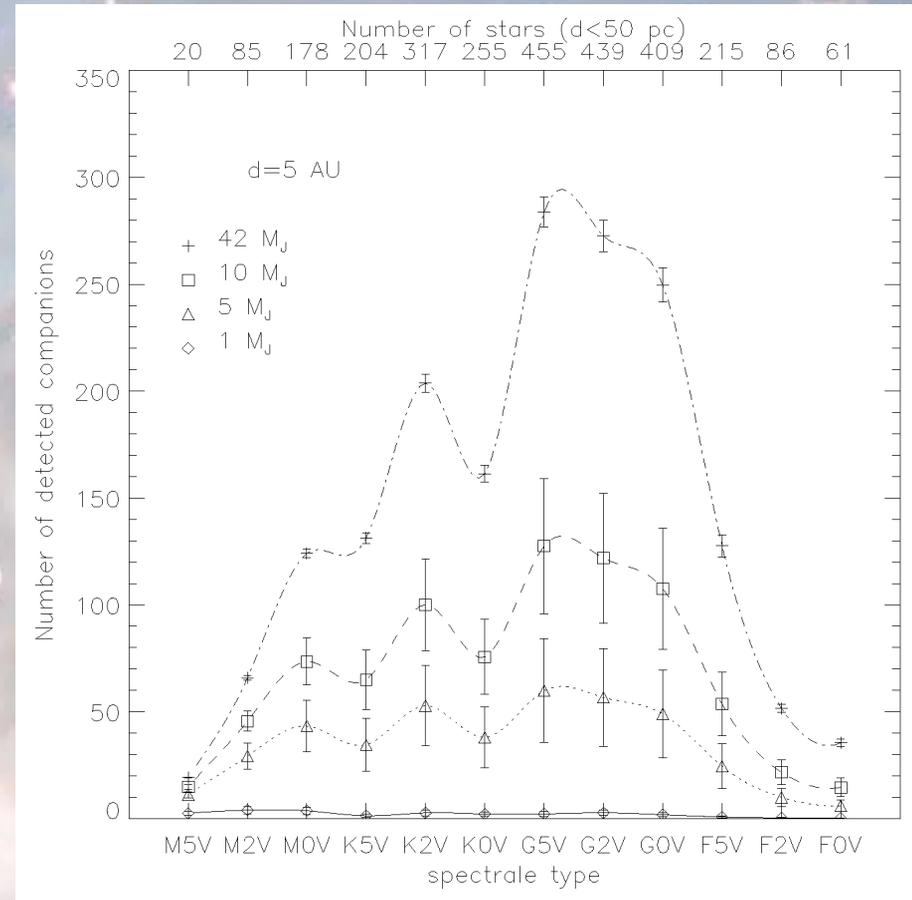
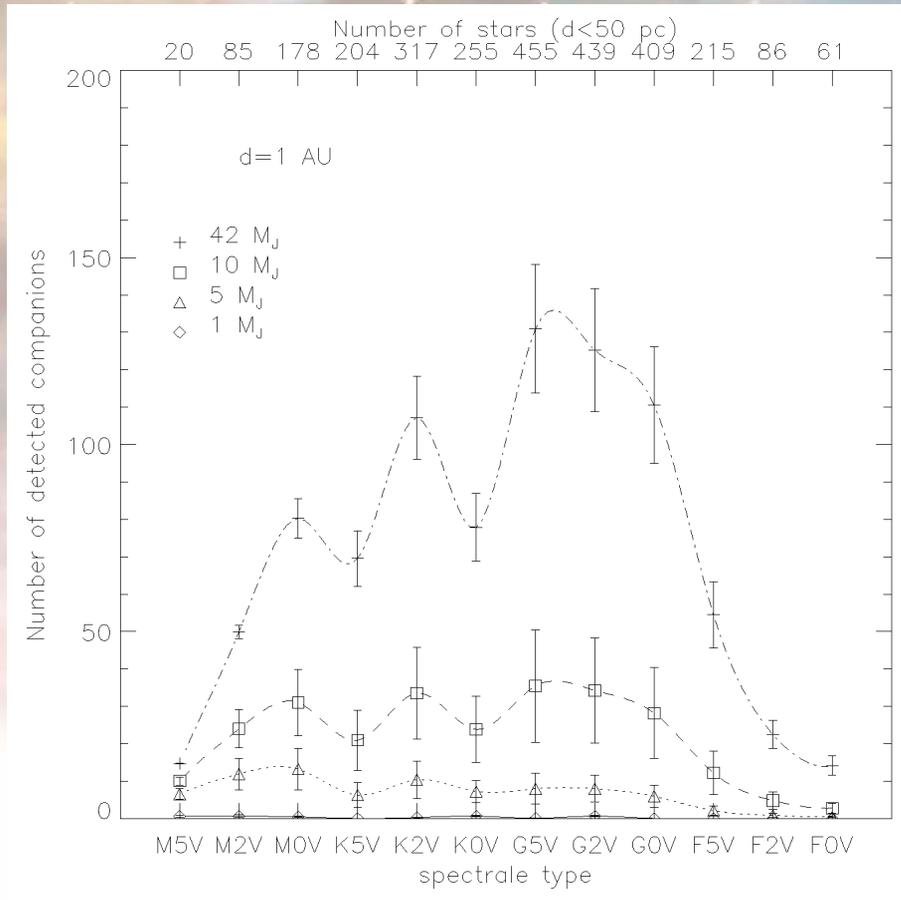


Echantillon pour $d < 25$ pc



V. Utilisation du 4Q

2. Dans l'espace: étude pour le NGST



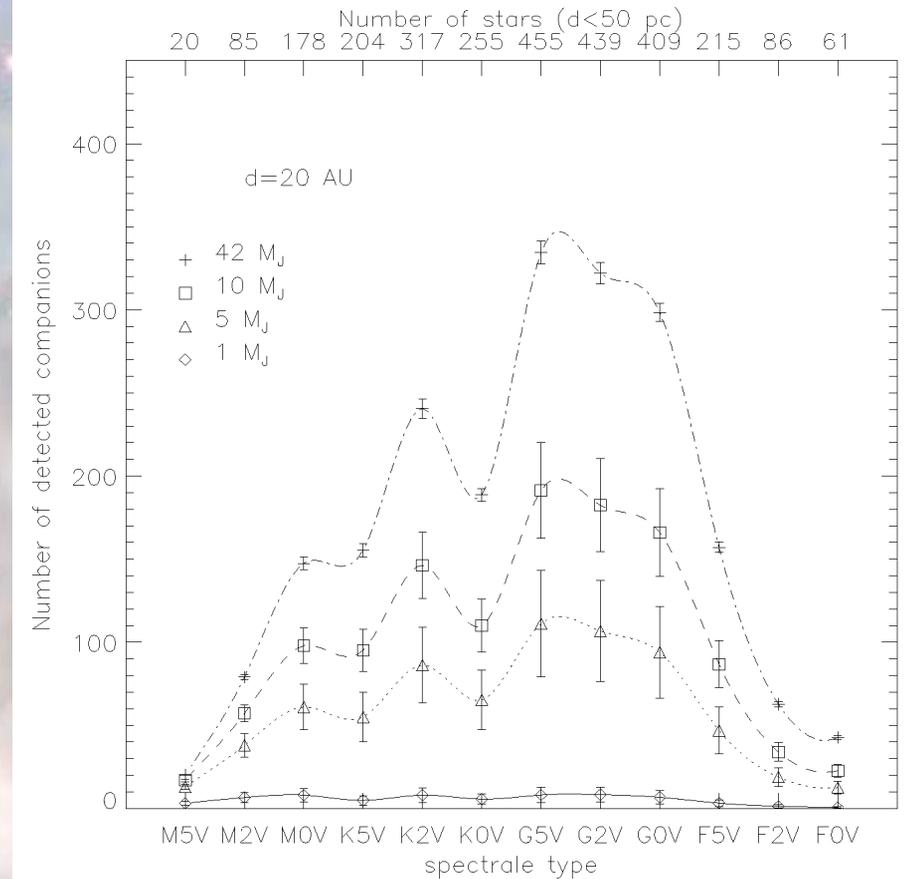
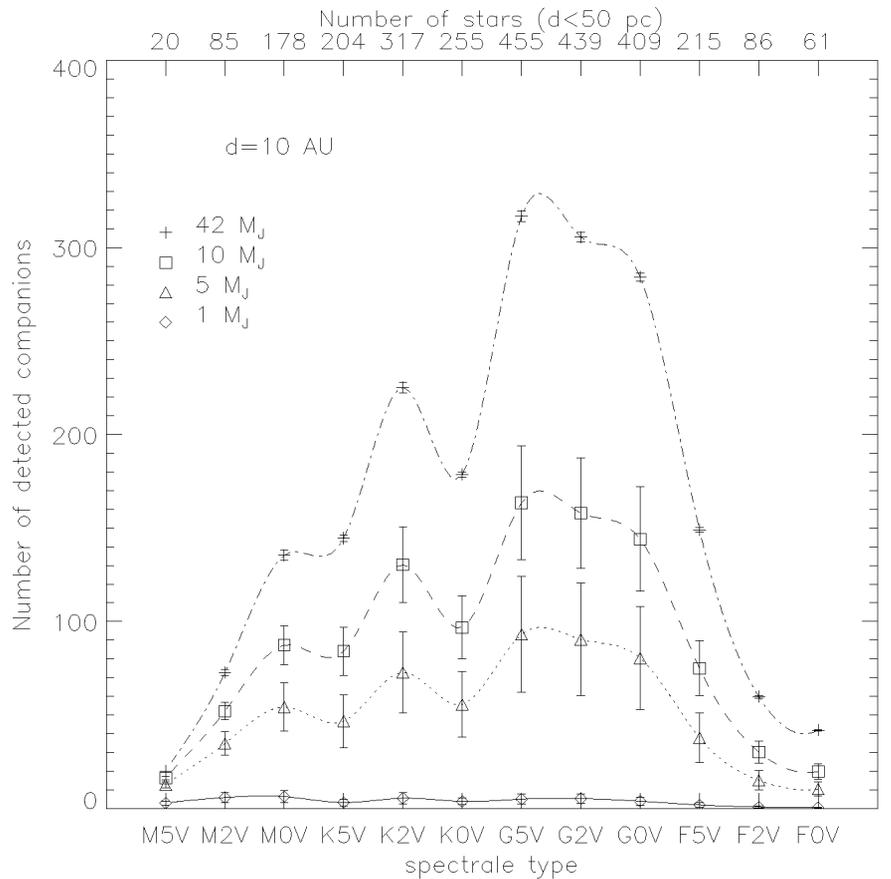
Cas 1 UA atténuation importante du compagnon

Cas 5 UA atténuation du compagnon de 5 à 20%



V. Utilisation du 4Q

2. Dans l'espace: étude pour le NGST



Cas 10 et 20 UA (Limitation de la détectabilité dû au bruit Zodiacal)



V. Utilisation du 4Q

2. Dans l'espace: étude pour le NGST

- Le télescope NGST (JWST) est prévu en 2010
- L'instrument MIRIM devra être livré en 2006 (Maître d'œuvre: le SaP)
- Les masques de phase à 4Q devront être testés en ambiance cryogénique au LESIA:
 - **Premier Test vers 55K pour le masque prototype à 4.65 μm sur les banc YACADIR et BETI (février 2003)**
 - **Tests de spatialisation (7 K, vibrations, rayonnement ...)**
 - **Test photométrique du masque vers 6-7 μm à 7K ?**
 - **Test photométrique des masques de Lyot ?**
- Simulations numériques plus poussées du télescope pour l'optimisation du diaphragme de Lyot



V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

(Riaud P. et al. 2002A&A 396, 345)

Introduction à la pupille densifiée (Labeyrie 1996)

Interféromètre de Fizeau modifié (changement de la taille des sous-pupilles)

+ **Imagerie directe dans un champ limité: Le Zero Order Field (ZOF)**

+ **Optimisation du plan (u,v):**

=> **Le ZOF contient le nombre d'élément de résolution maximal pour une architecture interférométrique donnée**

+ **Un seul pic d'interférence par point source: intensification de l'image**

=> **Gain en rapport signal sur bruit, pas de limitation par le bruit de lecture du détecteur**

+ **Les propriétés du ZOF sont proches d'un télescope monolithique**

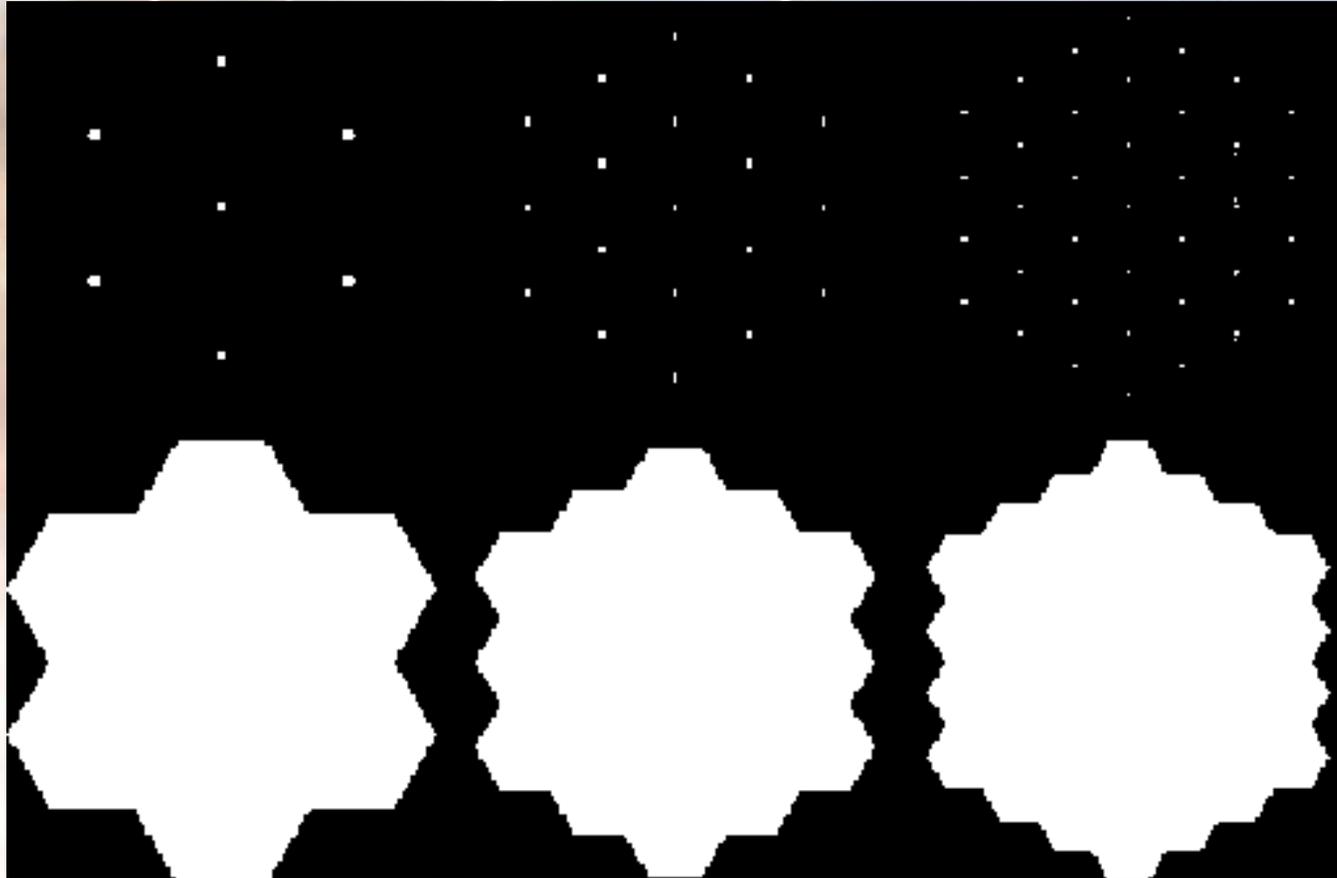
=> **Utilisation d'un coronographe**

- **Perte de la relation de convolution entre l'objet et l'image**



Principe de la densification

(Labeyrie A. 1996, A&AS 118, 517)





V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

Introduction à la pupille densifiée

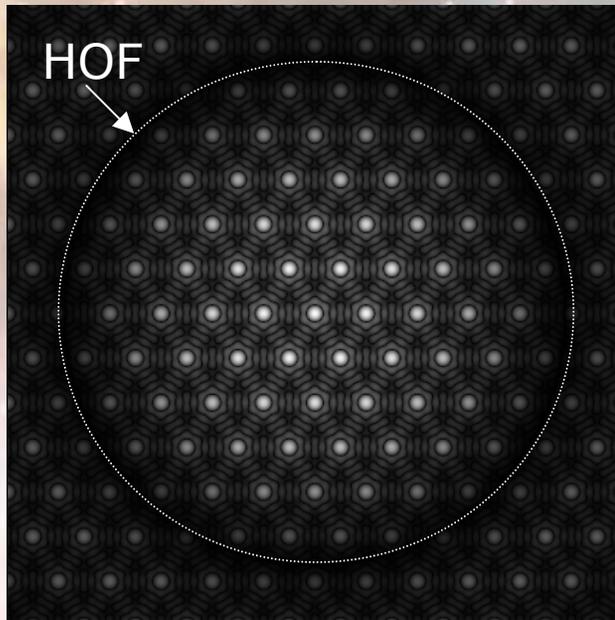


Image Fizeau d'un point source

Pupille Keck avec 37 hexagones
(pas d'obstruction centrale)



Effet de la densification de la pupille d'entrée sur l'image Fizeau

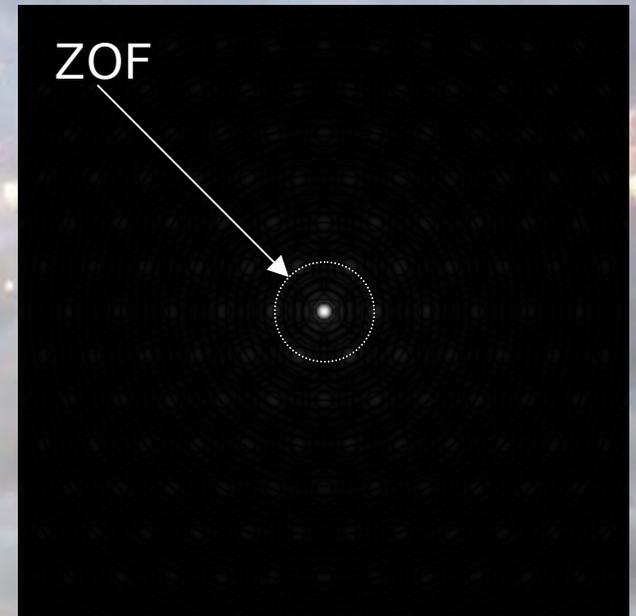
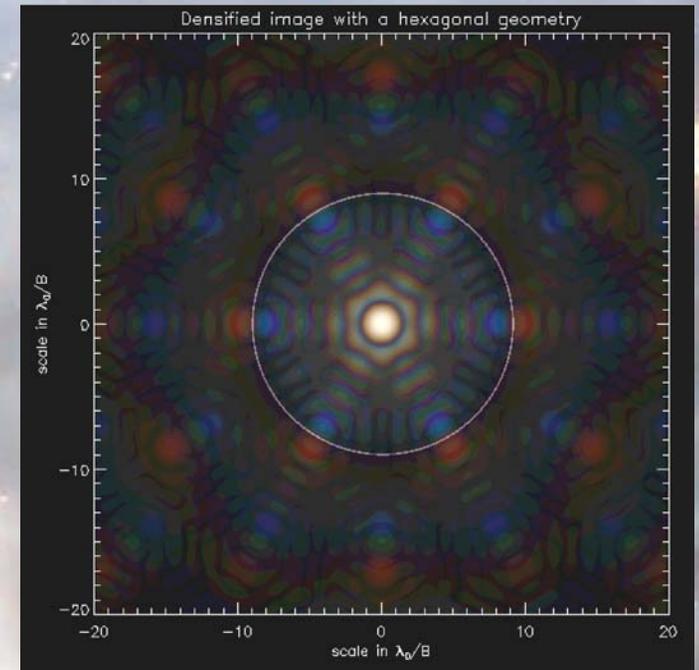
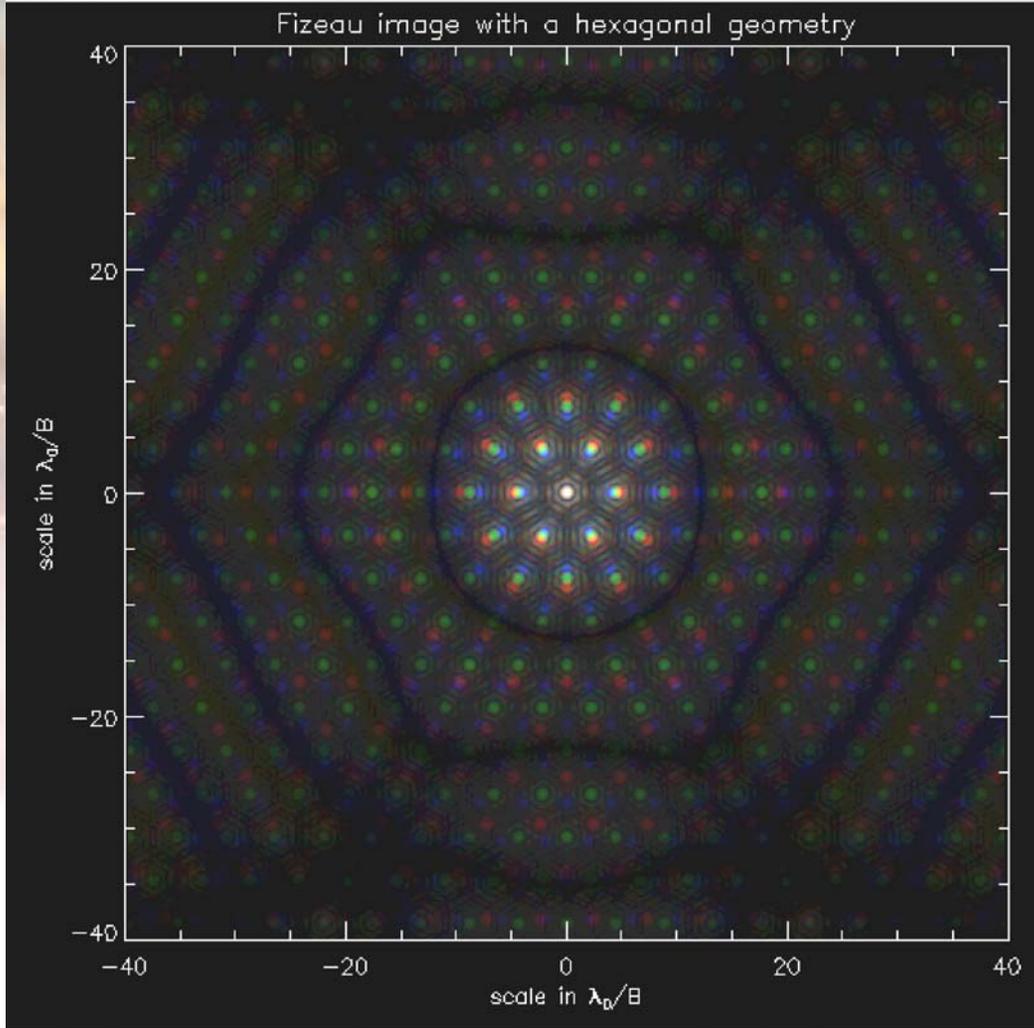


Image Densifiée (ici le l'intensité du pic est X 150)

Densification de la pupille

Action au plan focal





V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

Introduction à la pupille densifiée

Gros problème en interférométrie: **la confusion**

+ Avec une pupille composée de N hexagones:

=> Le nombre d'élément de résolution maximal est égal à $\pi.(4N-1)/4$

=> L'interféromètre ne peut donc pas imager plus de $\pi.(4N-1)/4$ sources ponctuelles !

+ Toutes les sources présentes dans le HOF (High Order Field) donneront un spectre dans le ZOF (conservation de l'énergie)

=> diminution du rapport signal sur bruit,

Mais possibilité de détecter des sources en dehors du ZOF

+ Etude en cours pour la déconvolution des images interférométriques

=> Utilisation de l'information dans trois bandes spectrales différentes pour reconstituer le champ observé



V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

Introduction à la pupille densifiée

Exemple de bruit de confusion dans le cas de 37 télescopes:

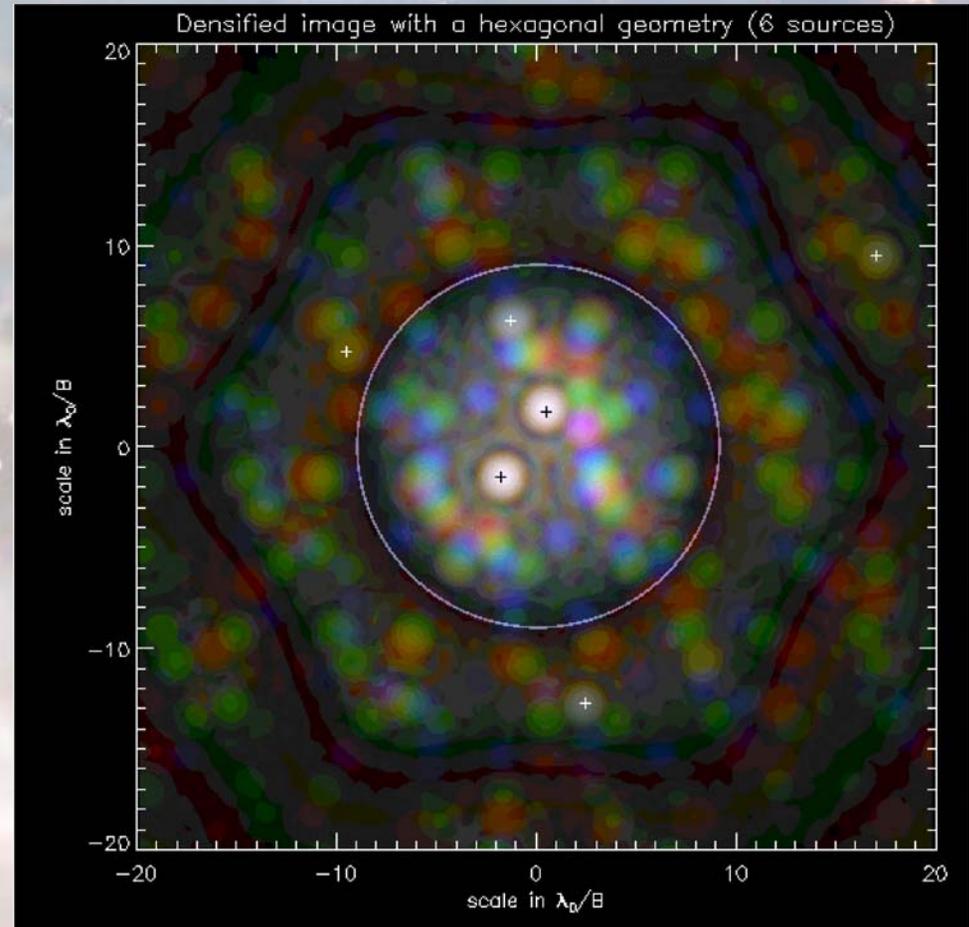
Nous avons **115**
éléments de résolution

6 sources (voir les croix)
(3 dans le ZOF et 3 dans le HOF)

Maximum de 3 images
fantômes par source

Optimisation du nombre et de
la taille des télescopes:

N et faible diamètre



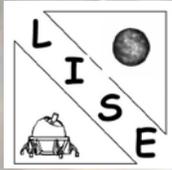


V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

- Choix de l'échantillon d'étoiles proches (cf NGST):
 $d < 25$ pc (Catalogue Hipparcos)
- 12 types stellaires: **M5V à F0V**
- Résultats de détectivité sur la bande N (**$10,2 \pm 2 \mu\text{m FWHM}$**)
La distance planète - étoile varie avec le type stellaire ($T=298$ K)
- Prise en compte du spectre de la planète (**$\text{O}_3, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$**)
- Le flux zodiacal est pris à **$13 \text{ mag}/''^2$**

**le disque exo-Zodiacal s'étend sur 6 UA
avec une intensité de 10 fois le flux zodiacal**



V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

↳ Propriétés du dispositif coronographique à 4 quadrants sur un interféromètre

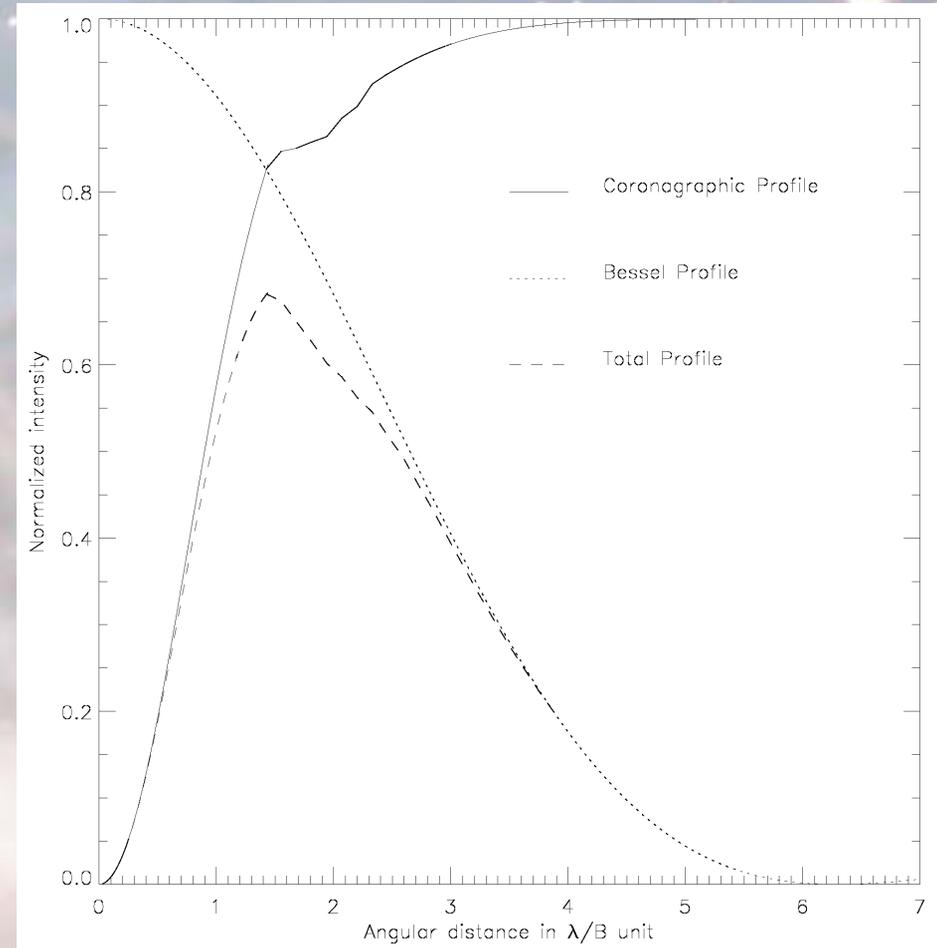
↳ Deux effets apparaissent:

- **Atténuation par le coronographe**
- **Atténuation par la fonction de Bessel de la sous-ouverture**
- **La plage de détection optimale se situe:**

$$\lambda/B < \theta < 3 \lambda/B$$

B est la base de l'interféromètre

θ est la séparation angulaire





V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

Le champ du ZOF est trop faible pour pouvoir faire des détections de planètes pour tous les type spectraux.

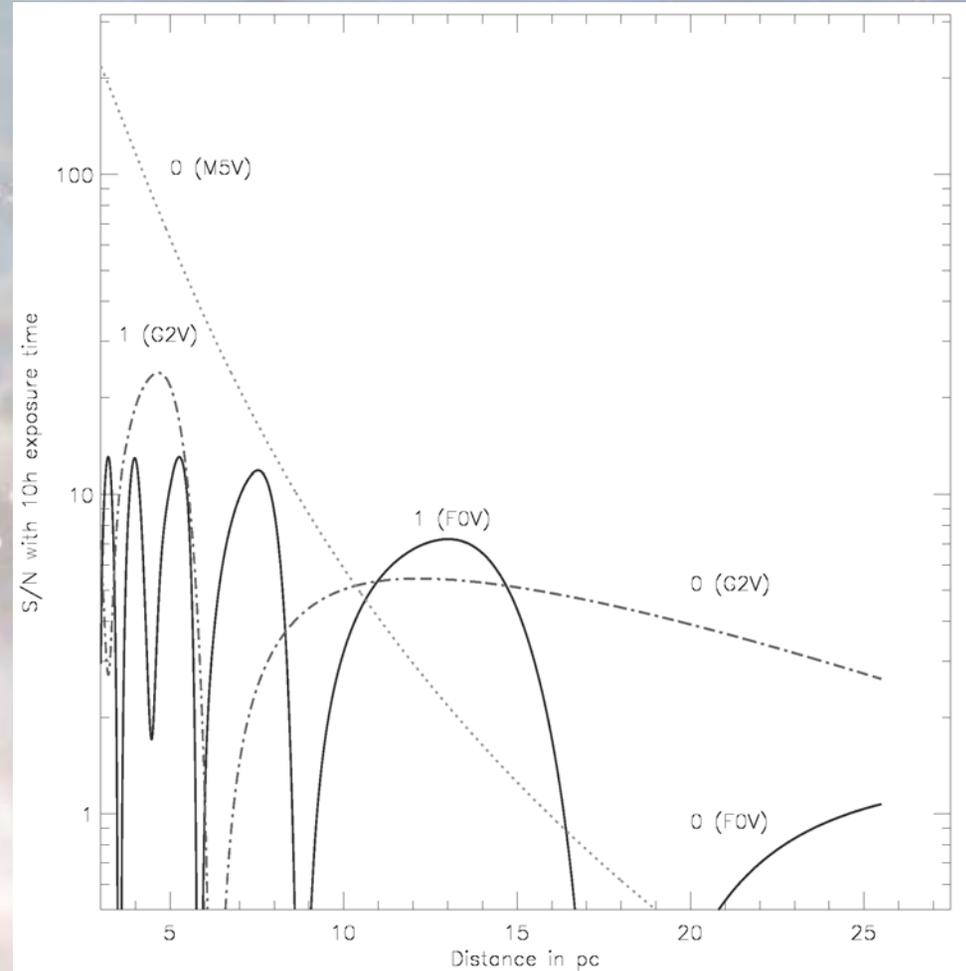
Les distances de la zone à $T=298\text{ K}$ s'étend:

Pour une **M2V** vers **0,13 ua**

Pour une **F0V** vers **2,79 ua**

Détection possible des pics dispersés dans le ZOF

=> **Diminution de la bande spectrale**



Exemple de détection de planètes autour de trois types stellaires (M5V, G2V, et F0V) à différents ordre.



V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

Optimisation de la base de l'interféromètre:

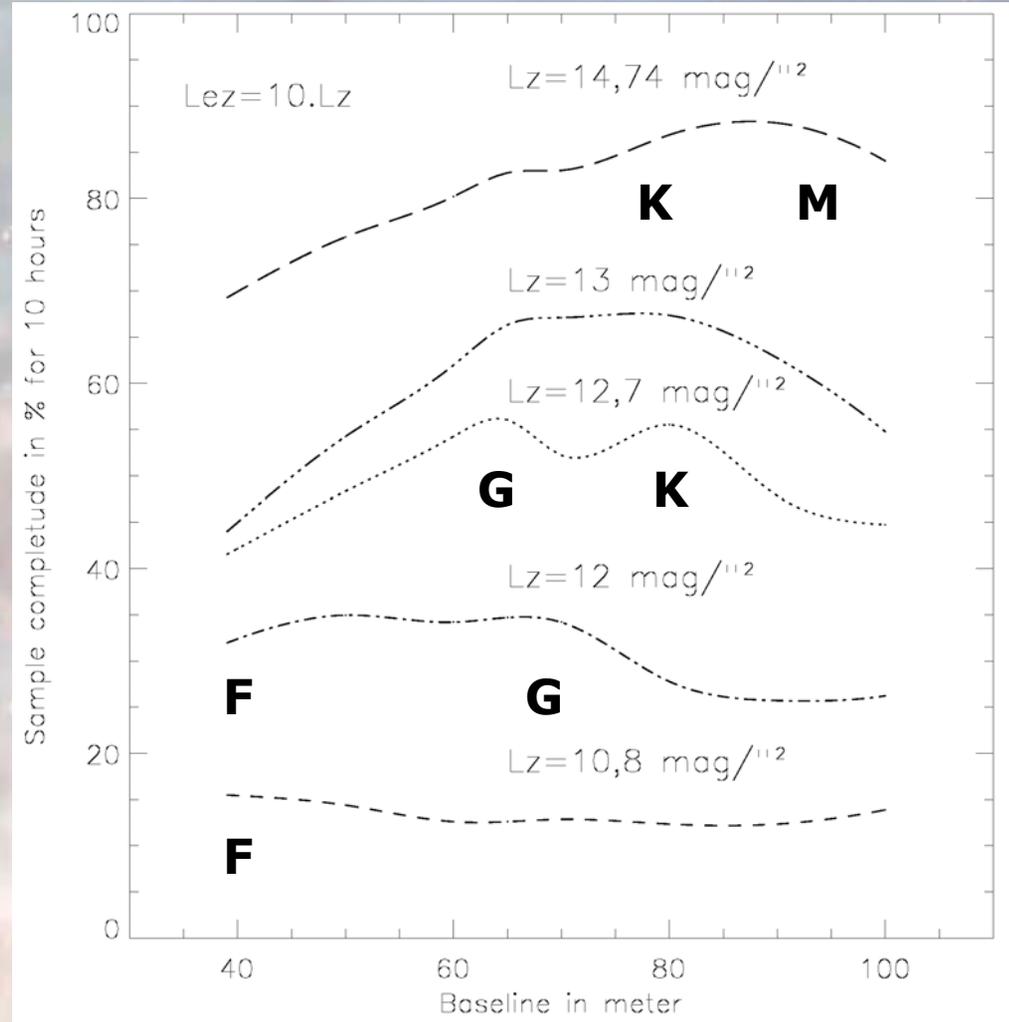
Variation importante de la détection des planètes avec l'intensité du fond zodiacal.

Pour **13 mag/''²** on a 73 % de détection pour B=80 m

Pour **10.8 mag/''²** on a 15 % de détection pour B=40-100 m

Optimisation à **B=80 m** correspondant à la détection de planètes autour des types:

=> **K et G préférentiellement**





V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

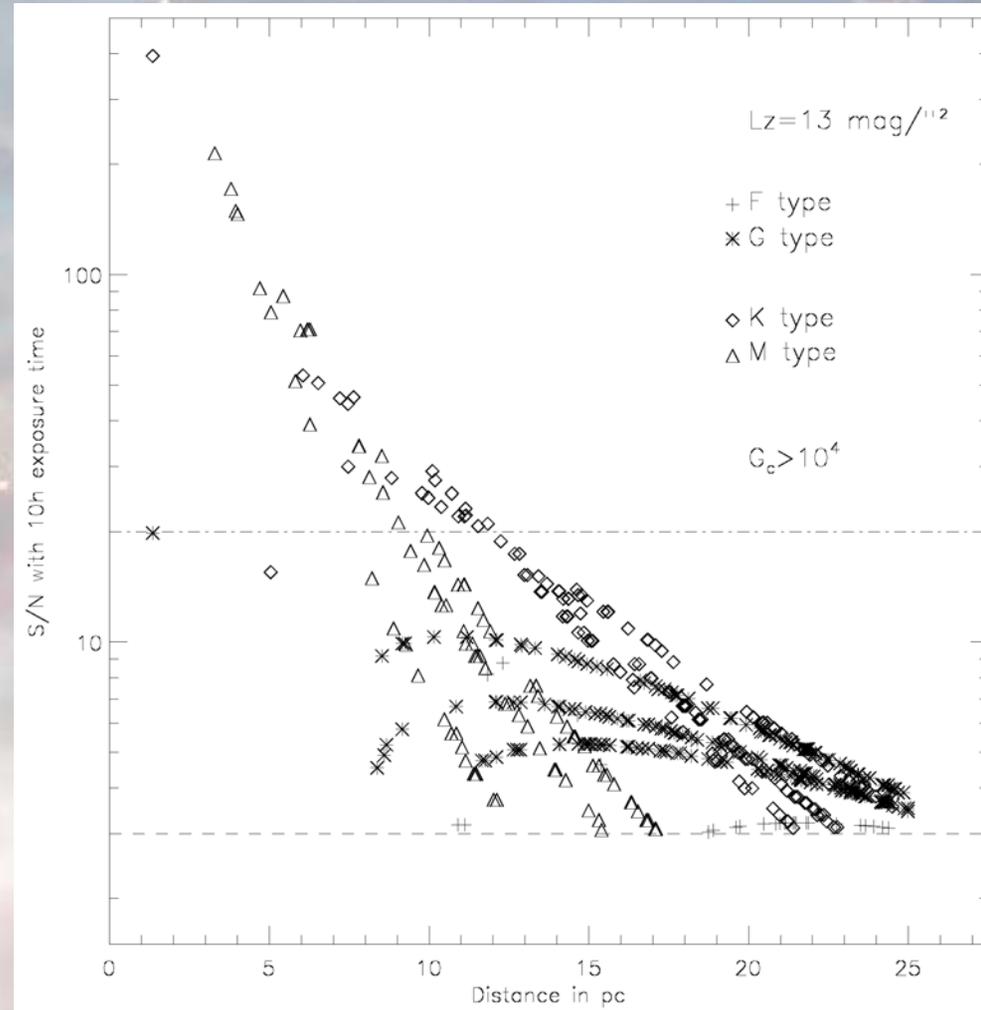
↳ Rapport Signal sur bruit pour les 667 étoiles proches

↳ Les paramètres d'observation sont les suivants:

- 37 télescopes de 0.66 m de diamètre
- La base interférométrique est de 80 m
- Qualité des surfaces de $\lambda/170$ rms
- Piston et tip-tilt de $\lambda/110$ rms
- Temps d'exposition de 10 h en bande N
- Bruit de lecture de 10 e⁻/pixel

↳ Le taux de réjection est supérieur à 10^4 après la soustraction des quadrants opposés

○ On détecte **487 planètes** soit **73%** de l'échantillon d'étoiles





V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

Simulation numérique d'une image d'un système planétaire autour d'une étoile G2V à 20 pc

Après la soustraction des quadrants

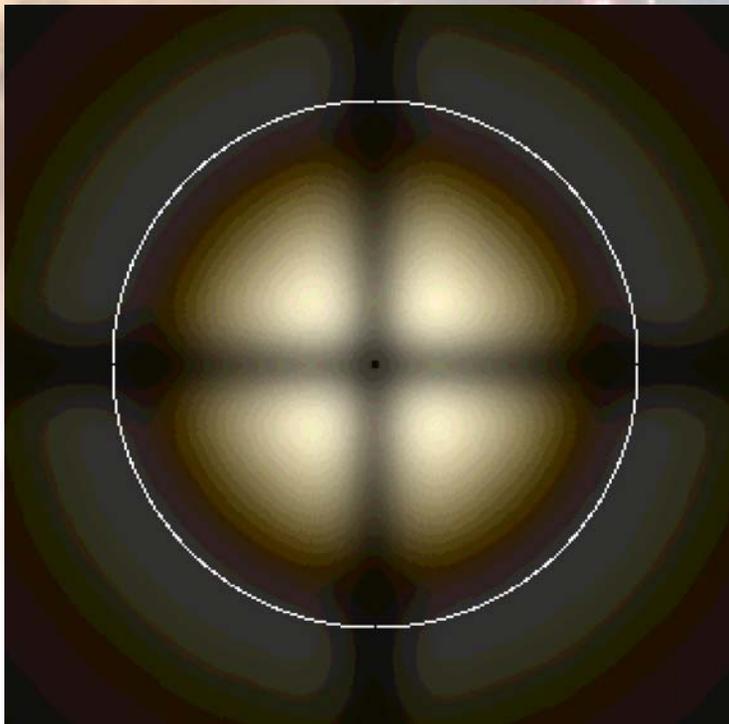
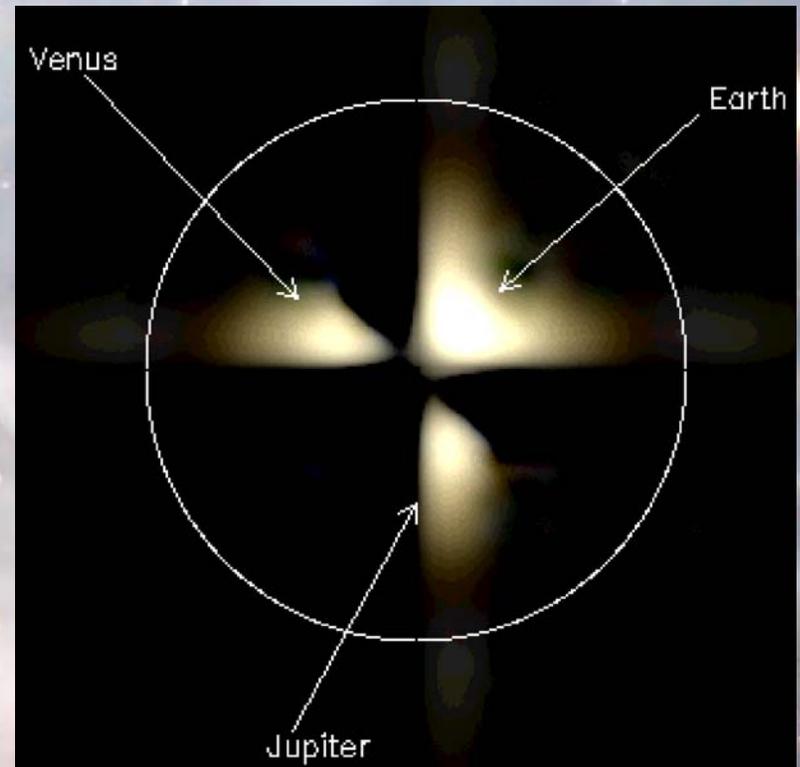


Image brute



$L_z = 13 \text{ mag}/''^2$
 $L_{ez} = 10 L_z$

Venus: $\Delta m = 18,5$ Mars: $\Delta m = 19,5$
Terre: $\Delta m = 17,1$ Jupiter: $\Delta m = 16,5$



V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

Possibilité de spectroscopie dans le visible ?

1) Spectroscopie basse résolution en visible proche infrarouge:

$$\lambda = 0,7 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$$

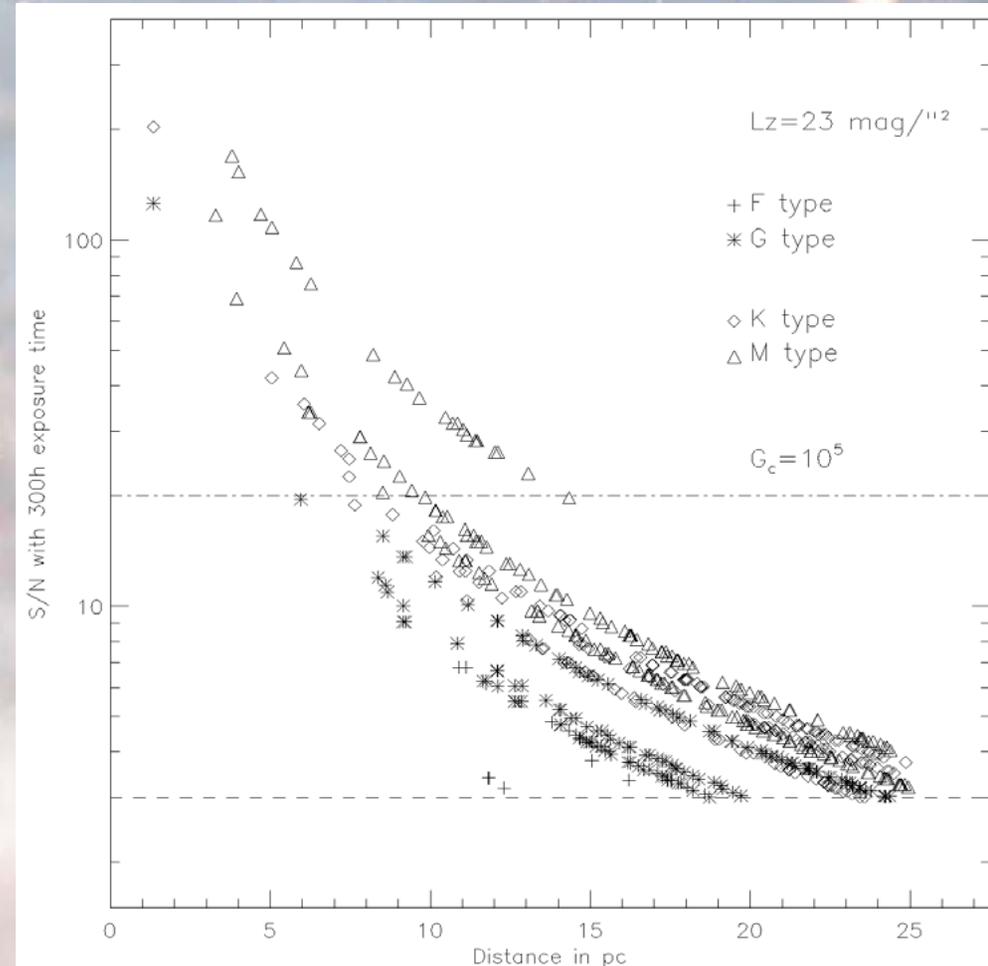
$$t=300 \text{ h et } R=100$$

2) Détection pour **542 planètes**

si: $\tau > 10^5$ en flux total !

3) Pour les 44 étoiles les plus proches $S/N > 20$

=> détection de la chlorophylle?





V. Utilisation du 4Q

3. Dans l'espace: étude pour TPF

Conclusion sur l'étude DARWIN/TPF

- ⋮ La Technique du nulling de Bracewell est très efficace pour un faible nombre de télescopes (2 ou 4 typiquement)
- ⋮ La complexité de la technique devient très importante avec 6 ouvertures ou plus. L'efficacité de détection décroît avec le nombre d'ouverture.
- ξ L'imagerie apporte de réelles perspectives intéressantes:
 - + **Un meilleur contraste planète / lumière zodiacale et exo-zodiacale**
 - + **Diminution du bruit de confusion**
 - + **Utilisation d'un seul dispositif coronographique**
 - + **Simplification du système optique => meilleur rendement**
 - + **Possibilités d'imagerie d'objets autre que les exo-planètes**
 - **Problème de métrologie du fait du grand nombre de sous-ouvertures**
 - **Coût ???**



VI. Conclusion et perspectives

⋮ Ce travail de thèse a permis d'étudier en détail avec les simulations numériques les propriétés du coronographe de phase à 4 Quadrants.

⋮ Les résultats en laboratoires ont été très satisfaisants malgré quelques incertitudes concernant la longueur d'onde d'utilisation du masque.

Nous avons pu obtenir un taux de réjection de près **44000** sur le pic

ξ Une voie d'achromatisation avec des lames $\lambda/2$ est actuellement à l'étude avec Dimitri Mawet de l'Université de Liège avec un essai sur le banc prévu en 2003

o D'autres voies d'achromatisation plus poussées ont été étudiées:

+ **Empilement de lames épaisses de dispersions différentes**

(Méthode Hollandaise)

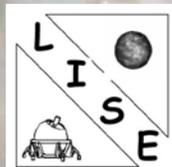
+ **Empilement de couches minces (miroirs déphasants)**

(Méthode Marseillaise)



VI. Conclusion et perspectives

- Les domaines d'utilisation du coronographe sont assez larges
 - + **Télescopes au sol avec optiques adaptatives: VLT-NAOS , VLT-PF**
 - + **Télescopes spatiaux: NGST, DARWIN/TPF**
- Une étude avec VLT-PF montre les limites de détectabilité des exo-planètes avec un instrument au sol:
un traitement poussé de l'information devient alors indispensable
- L'étude du coronographe sur NGST en infrarouge thermique montre un taux de détection élevé des planètes géantes gazeuses et des naines brunes
- Enfin une utilisation avec un interféromètre imageur pourrait permettre la détection de planètes telluriques en une dizaine d'heures pour des étoiles proches jusqu'à 25 pc.



VII. Une idée pour DARWIN/TPF

Bonus Track

