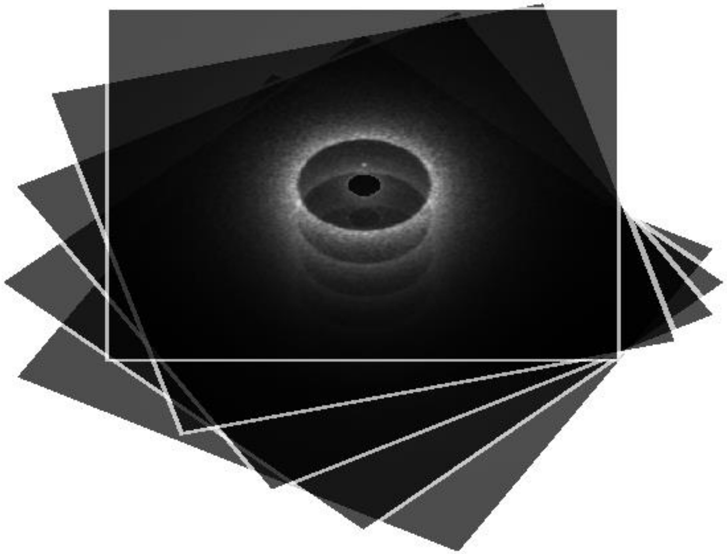
K-Stacker et l'imagerie directe de planètes dans la zone habitable

Mathias Nowak[1], H. Coroller[2], L. Arnold[3], K. Dohlen[2],
D. Estevez[4,2], T. Fusco[5], J.-F. Sauvage[5], A. Vigan[2]

[1] LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL
[2] Aix-Marseille Université, CNRS, CNES, LAM
[3] Aix Marseille Université, CNRS, OHP, Institut Pythéas
[4] Université Grenoble Alpes, Univ. Savoir Mont-Blanc, CNRS, LAPP
[5] ONERA – The French Aerospace Lab

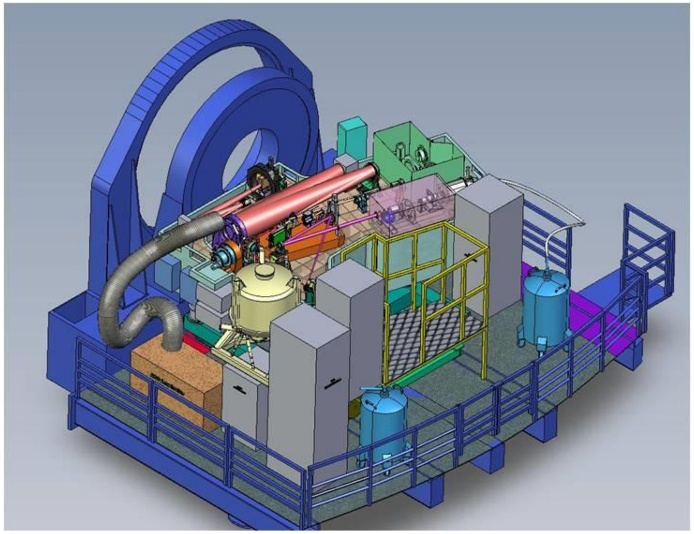


Rencontres SFE, 15 Octobre 2018
Observatoire de Haute-Provence

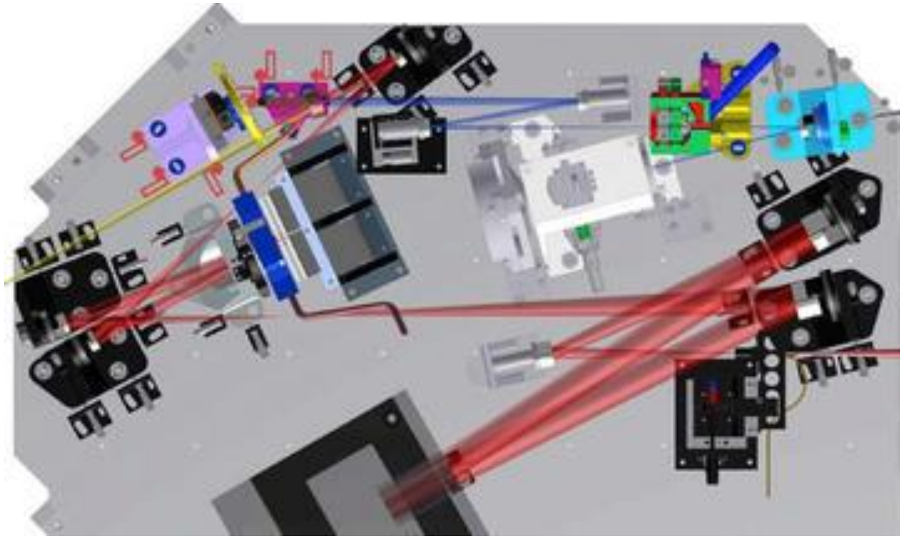
Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

Instruments de 2ème génération

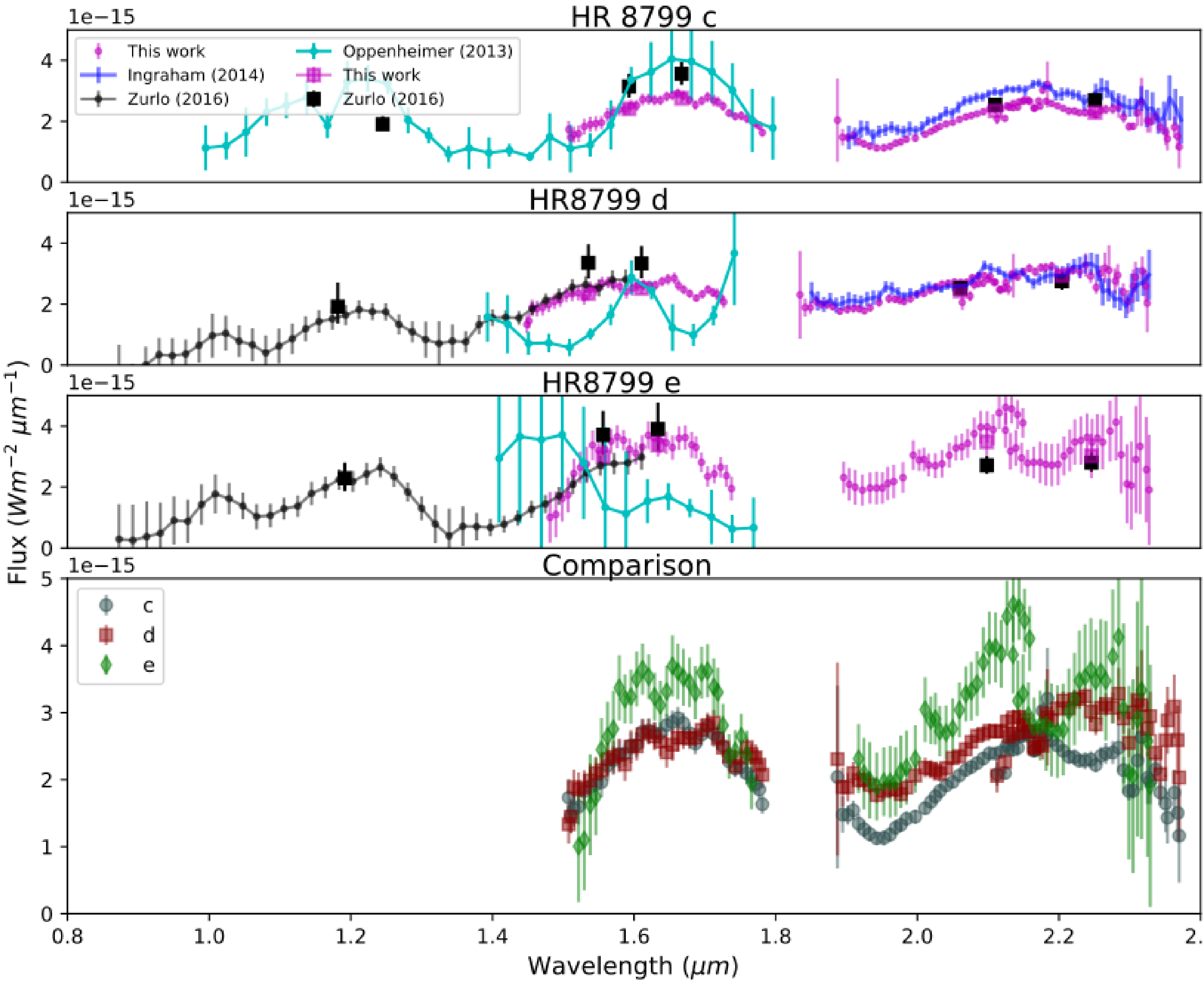
SPHERE, sur le VLT



GPI, Gemini Sud

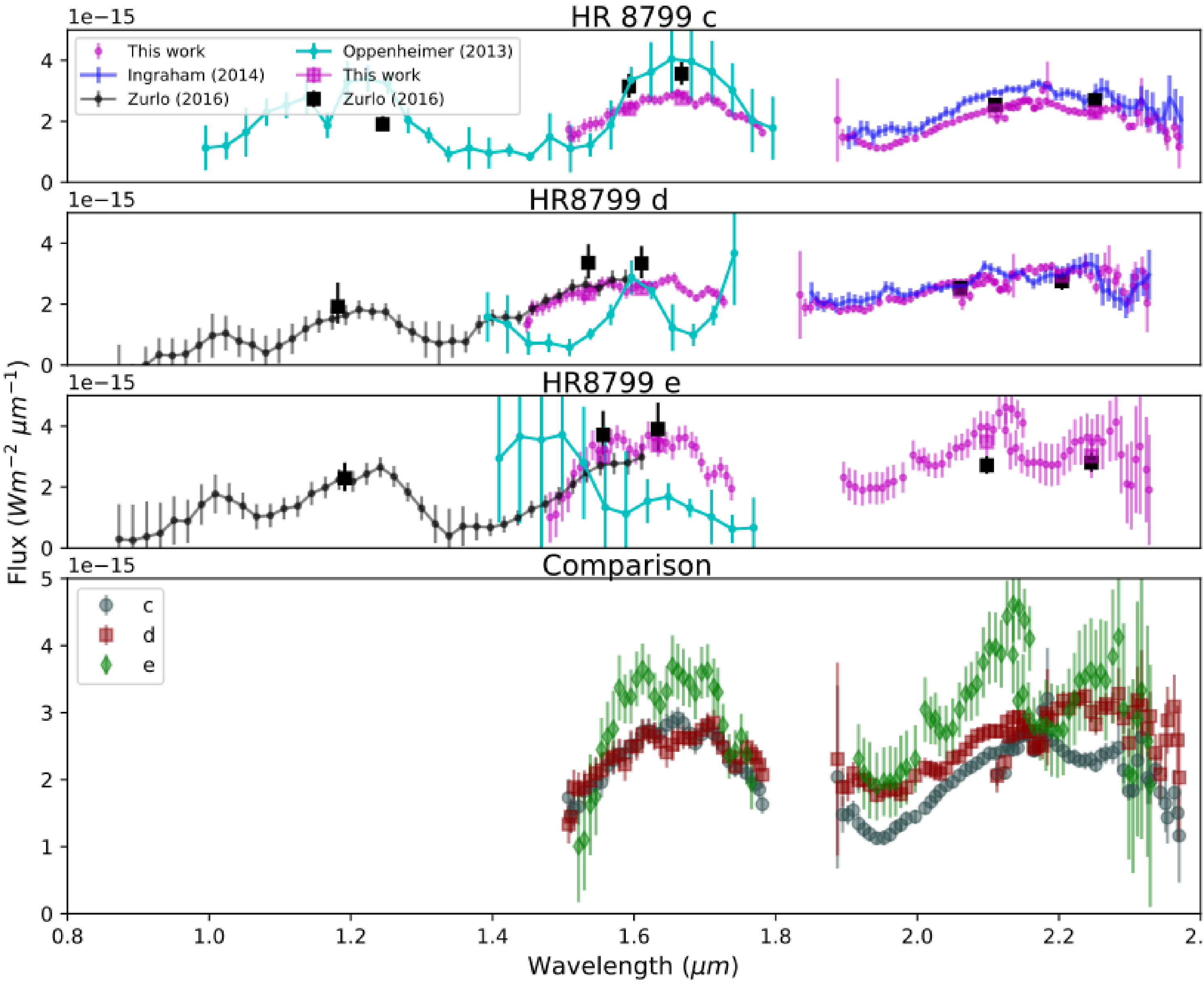


Un exemple de résultat



Spectres an bande H et K des planètes du système HR 8799 (Greenbaum et al. 2018)

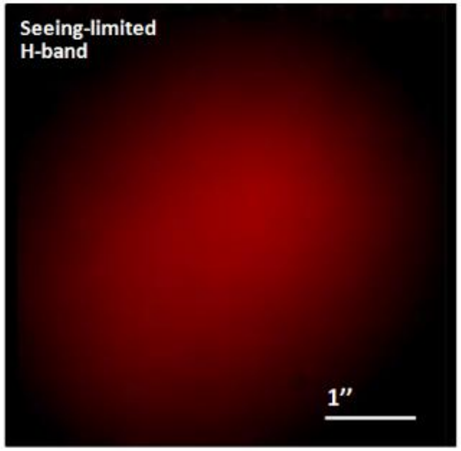
Un exemple de résultat



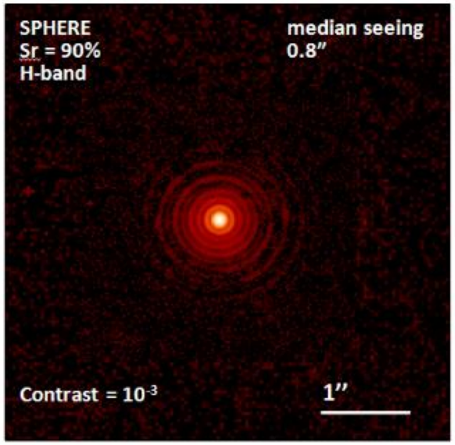
Spectres an bande H et K des planètes du système HR 8799 (Greenbaum et al. 2018)

(Un exemple similaire sur Beta Pic b : Chilcote at al. 2017)

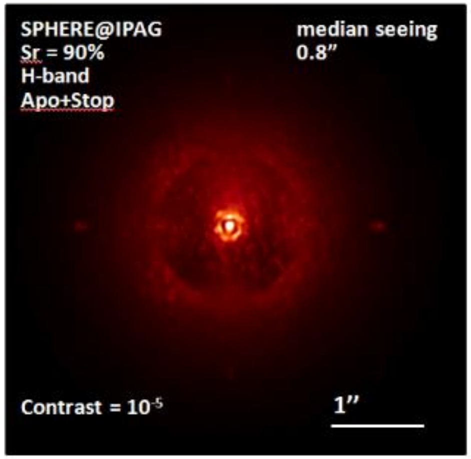
Le processus d’observation à haut-contraste



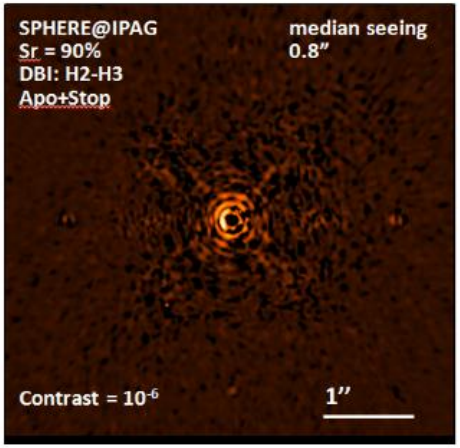
0- Uncorrected PSF



I- High Angular Resolution
. XAO with HO DMs
. Wavefront sensing (1.2kHz)
. NCPA corrections



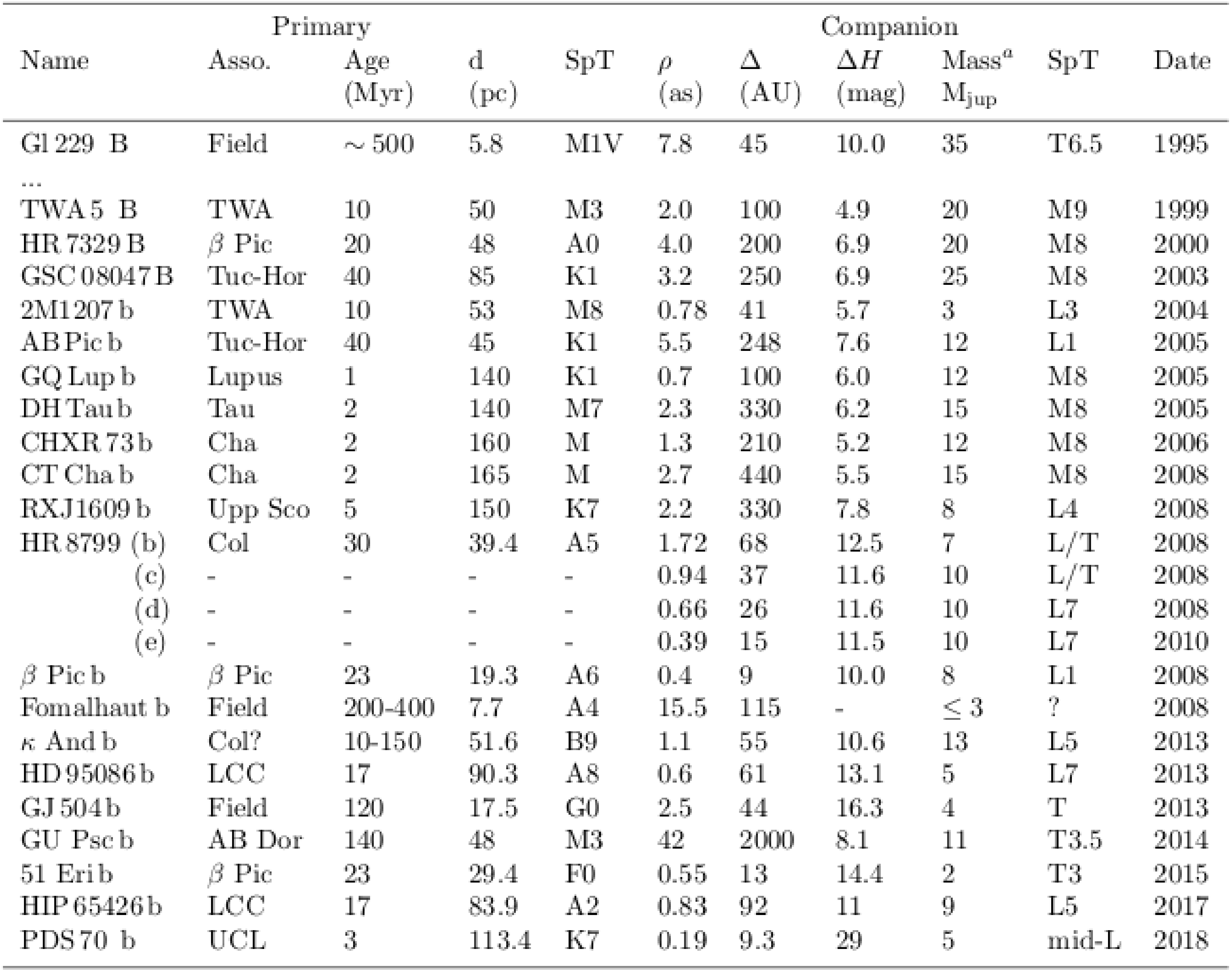
II- Stellar-Light Attenuation
. Pupil and Image Control
. Coronography



III- Differential techniques
. Reference (RDI)
. Spectral (SDI)
. Polarimetric (PDI)
. Angular (ADI)
. Coherent (CDI)

Figures tirées de « Two Decades of Exoplanetary Science with Adaptive Optics » (G. Chauvin, 2018)

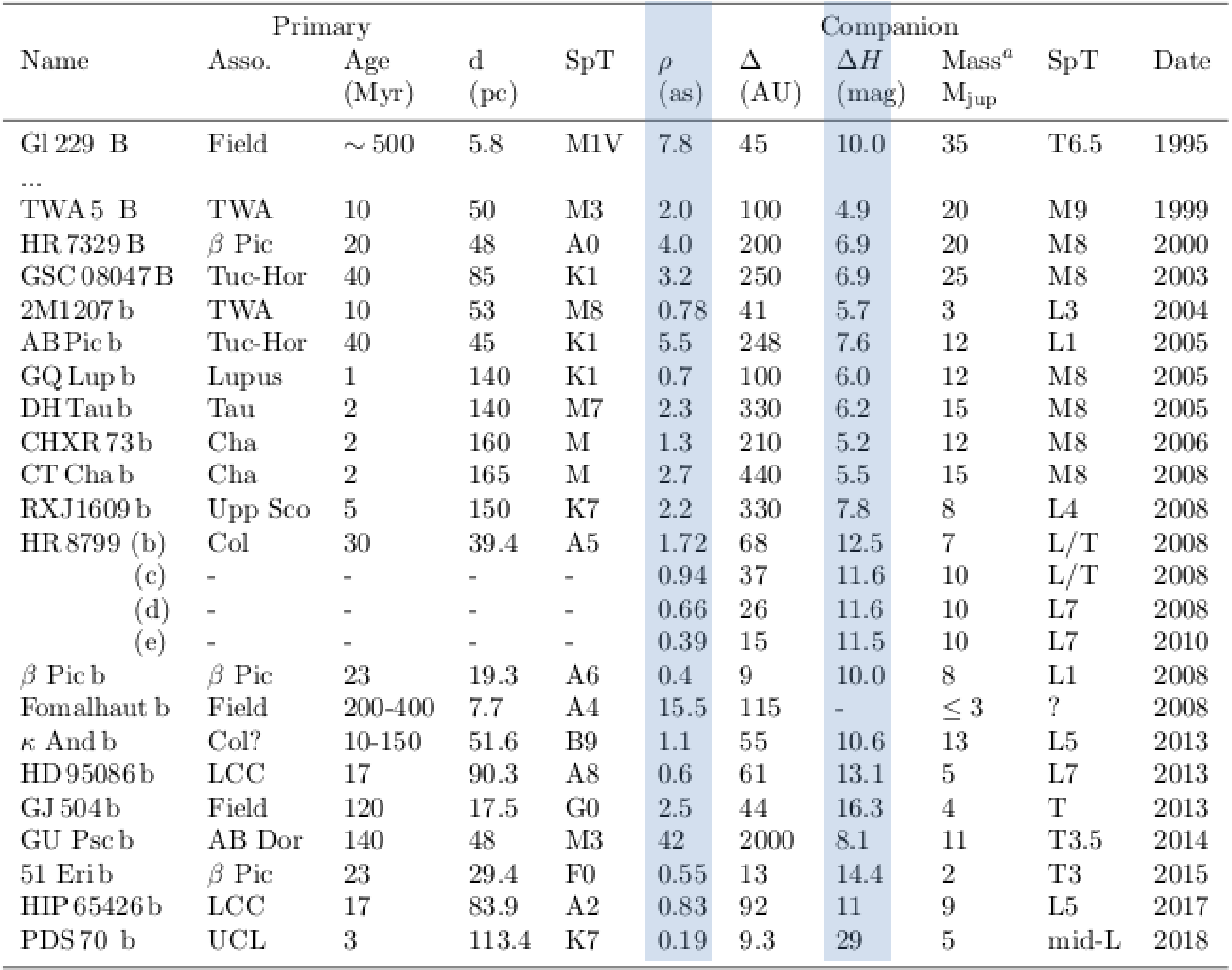
Quelques découvertes…



	Primary				Companion					
Name	Asso.	Age (Myr)	d (pc)	SpT	ρ (as)	Δ (AU)	ΔH (mag)	Mass[a] M_{jup}	SpT	Date
Gl 229 B	Field	~ 500	5.8	M1V	7.8	45	10.0	35	T6.5	1995
...										
TWA 5 B	TWA	10	50	M3	2.0	100	4.9	20	M9	1999
HR 7329 B	β Pic	20	48	A0	4.0	200	6.9	20	M8	2000
GSC 08047 B	Tuc-Hor	40	85	K1	3.2	250	6.9	25	M8	2003
2M1207 b	TWA	10	53	M8	0.78	41	5.7	3	L3	2004
AB Pic b	Tuc-Hor	40	45	K1	5.5	248	7.6	12	L1	2005
GQ Lup b	Lupus	1	140	K1	0.7	100	6.0	12	M8	2005
DH Tau b	Tau	2	140	M7	2.3	330	6.2	15	M8	2005
CHXR 73 b	Cha	2	160	M	1.3	210	5.2	12	M8	2006
CT Cha b	Cha	2	165	M	2.7	440	5.5	15	M8	2008
RXJ1609 b	Upp Sco	5	150	K7	2.2	330	7.8	8	L4	2008
HR 8799 (b)	Col	30	39.4	A5	1.72	68	12.5	7	L/T	2008
(c)	-	-	-	-	0.94	37	11.6	10	L/T	2008
(d)	-	-	-	-	0.66	26	11.6	10	L7	2008
(e)	-	-	-	-	0.39	15	11.5	10	L7	2010
β Pic b	β Pic	23	19.3	A6	0.4	9	10.0	8	L1	2008
Fomalhaut b	Field	200-400	7.7	A4	15.5	115	-	≤ 3	?	2008
κ And b	Col?	10-150	51.6	B9	1.1	55	10.6	13	L5	2013
HD 95086 b	LCC	17	90.3	A8	0.6	61	13.1	5	L7	2013
GJ 504 b	Field	120	17.5	G0	2.5	44	16.3	4	T	2013
GU Psc b	AB Dor	140	48	M3	42	2000	8.1	11	T3.5	2014
51 Eri b	β Pic	23	29.4	F0	0.55	13	14.4	2	T3	2015
HIP 65426 b	LCC	17	83.9	A2	0.83	92	11	9	L5	2017
PDS 70 b	UCL	3	113.4	K7	0.19	9.3	29	5	mid-L	2018

(G. Chauvin, 2018)

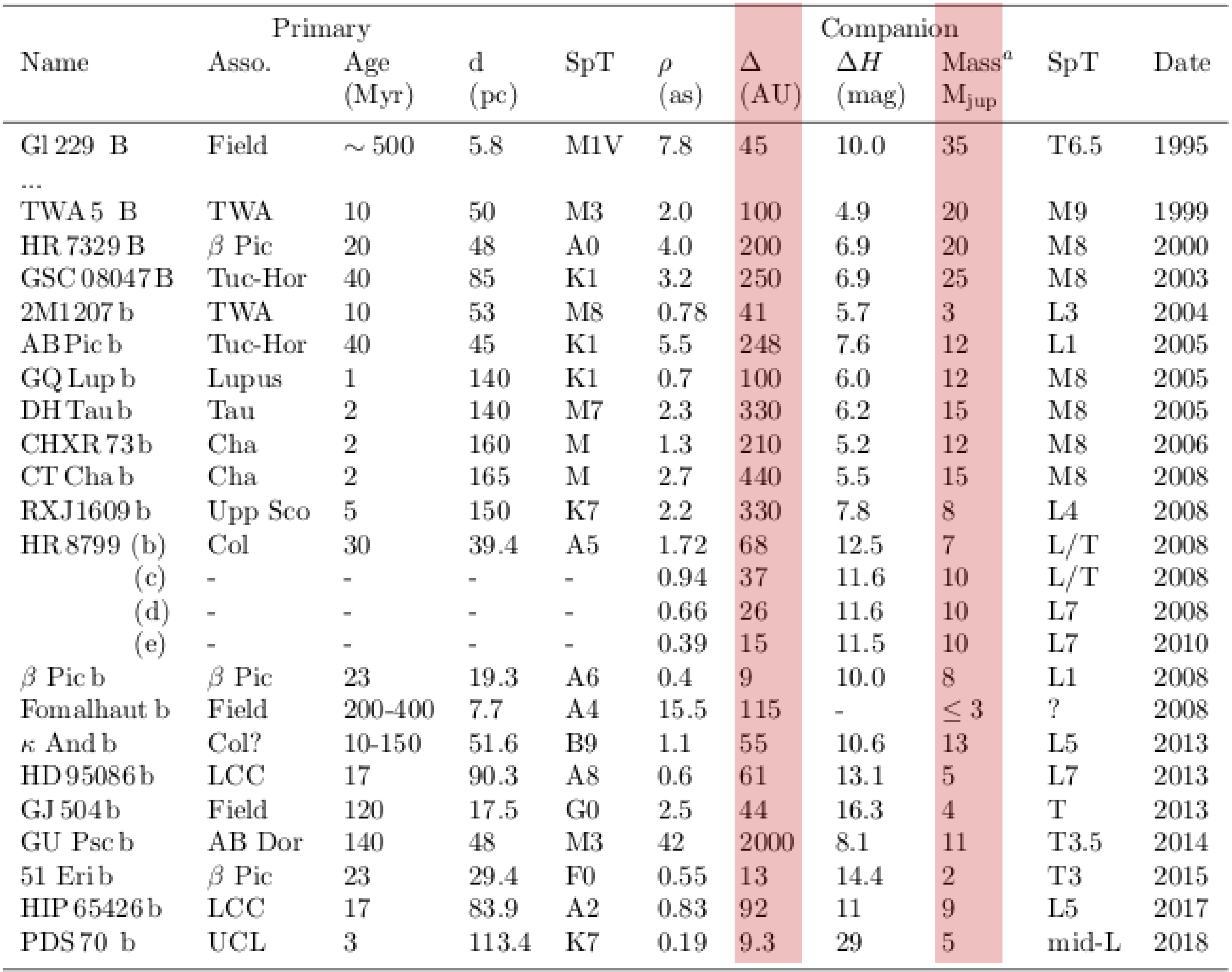
Quelques découvertes…



	Primary				Companion					
Name	Asso.	Age (Myr)	d (pc)	SpT	ρ (as)	Δ (AU)	ΔH (mag)	Mass[a] $M_{\rm jup}$	SpT	Date
Gl 229 B	Field	~ 500	5.8	M1V	7.8	45	10.0	35	T6.5	1995
...										
TWA 5 B	TWA	10	50	M3	2.0	100	4.9	20	M9	1999
HR 7329 B	β Pic	20	48	A0	4.0	200	6.9	20	M8	2000
GSC 08047 B	Tuc-Hor	40	85	K1	3.2	250	6.9	25	M8	2003
2M1207 b	TWA	10	53	M8	0.78	41	5.7	3	L3	2004
AB Pic b	Tuc-Hor	40	45	K1	5.5	248	7.6	12	L1	2005
GQ Lup b	Lupus	1	140	K1	0.7	100	6.0	12	M8	2005
DH Tau b	Tau	2	140	M7	2.3	330	6.2	15	M8	2005
CHXR 73 b	Cha	2	160	M	1.3	210	5.2	12	M8	2006
CT Cha b	Cha	2	165	M	2.7	440	5.5	15	M8	2008
RXJ1609 b	Upp Sco	5	150	K7	2.2	330	7.8	8	L4	2008
HR 8799 (b)	Col	30	39.4	A5	1.72	68	12.5	7	L/T	2008
(c)	-	-	-	-	0.94	37	11.6	10	L/T	2008
(d)	-	-	-	-	0.66	26	11.6	10	L7	2008
(e)	-	-	-	-	0.39	15	11.5	10	L7	2010
β Pic b	β Pic	23	19.3	A6	0.4	9	10.0	8	L1	2008
Fomalhaut b	Field	200-400	7.7	A4	15.5	115	-	≤ 3	?	2008
κ And b	Col?	10-150	51.6	B9	1.1	55	10.6	13	L5	2013
HD 95086 b	LCC	17	90.3	A8	0.6	61	13.1	5	L7	2013
GJ 504 b	Field	120	17.5	G0	2.5	44	16.3	4	T	2013
GU Psc b	AB Dor	140	48	M3	42	2000	8.1	11	T3.5	2014
51 Eri b	β Pic	23	29.4	F0	0.55	13	14.4	2	T3	2015
HIP 65426 b	LCC	17	83.9	A2	0.83	92	11	9	L5	2017
PDS 70 b	UCL	3	113.4	K7	0.19	9.3	29	5	mid-L	2018

(G. Chauvin, 2018)

Quelques découvertes…

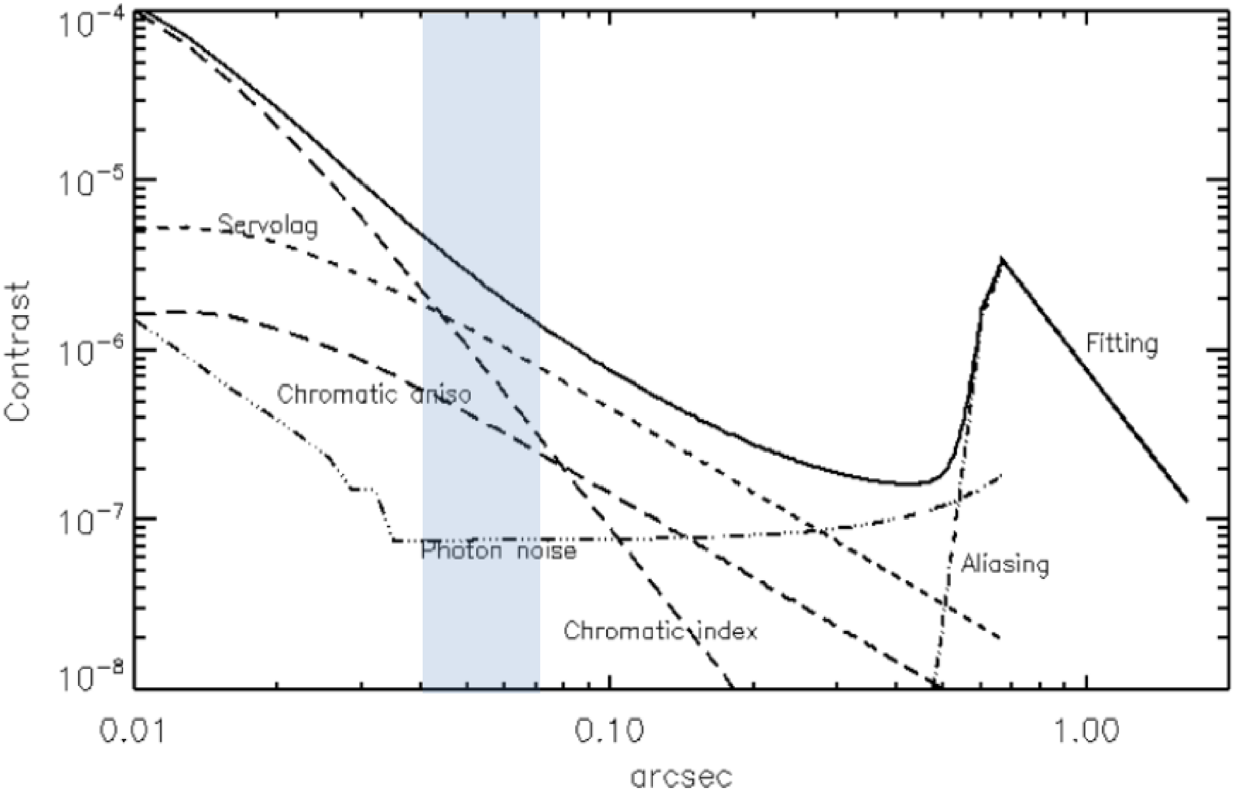


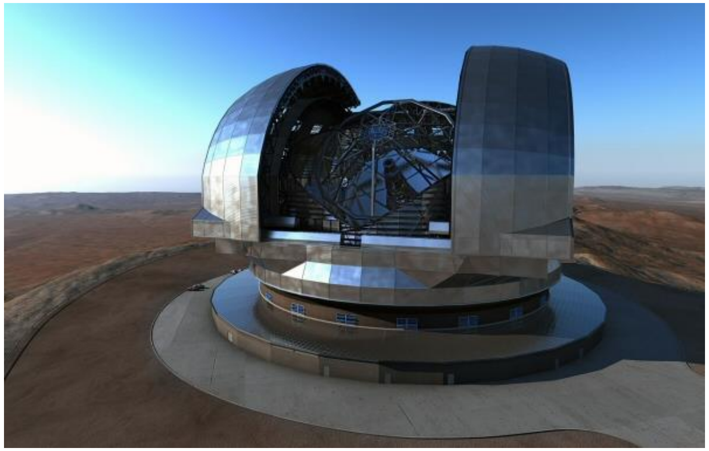
	Primary				Companion					
Name	Asso.	Age (Myr)	d (pc)	SpT	ρ (as)	Δ (AU)	ΔH (mag)	Mass[a] M_{jup}	SpT	Date
Gl 229 B	Field	~ 500	5.8	M1V	7.8	45	10.0	35	T6.5	1995
...										
TWA 5 B	TWA	10	50	M3	2.0	100	4.9	20	M9	1999
HR 7329 B	β Pic	20	48	A0	4.0	200	6.9	20	M8	2000
GSC 08047 B	Tuc-Hor	40	85	K1	3.2	250	6.9	25	M8	2003
2M1207 b	TWA	10	53	M8	0.78	41	5.7	3	L3	2004
AB Pic b	Tuc-Hor	40	45	K1	5.5	248	7.6	12	L1	2005
GQ Lup b	Lupus	1	140	K1	0.7	100	6.0	12	M8	2005
DH Tau b	Tau	2	140	M7	2.3	330	6.2	15	M8	2005
CHXR 73 b	Cha	2	160	M	1.3	210	5.2	12	M8	2006
CT Cha b	Cha	2	165	M	2.7	440	5.5	15	M8	2008
RXJ1609 b	Upp Sco	5	150	K7	2.2	330	7.8	8	L4	2008
HR 8799 (b)	Col	30	39.4	A5	1.72	68	12.5	7	L/T	2008
(c)	-	-	-	-	0.94	37	11.6	10	L/T	2008
(d)	-	-	-	-	0.66	26	11.6	10	L7	2008
(e)	-	-	-	-	0.39	15	11.5	10	L7	2010
β Pic b	β Pic	23	19.3	A6	0.4	9	10.0	8	L1	2008
Fomalhaut b	Field	200-400	7.7	A4	15.5	115	-	≤ 3	?	2008
κ And b	Col?	10-150	51.6	B9	1.1	55	10.6	13	L5	2013
HD 95086 b	LCC	17	90.3	A8	0.6	61	13.1	5	L7	2013
GJ 504 b	Field	120	17.5	G0	2.5	44	16.3	4	T	2013
GU Psc b	AB Dor	140	48	M3	42	2000	8.1	11	T3.5	2014
51 Eri b	β Pic	23	29.4	F0	0.55	13	14.4	2	T3	2015
HIP 65426 b	LCC	17	83.9	A2	0.83	92	11	9	L5	2017
PDS 70 b	UCL	3	113.4	K7	0.19	9.3	29	5	mid-L	2018

(G. Chauvin, 2018)

Vers l’ELT et les planètes de type Terre

(« EPICS: direct imaging of exoplanets with the E-ELT »)

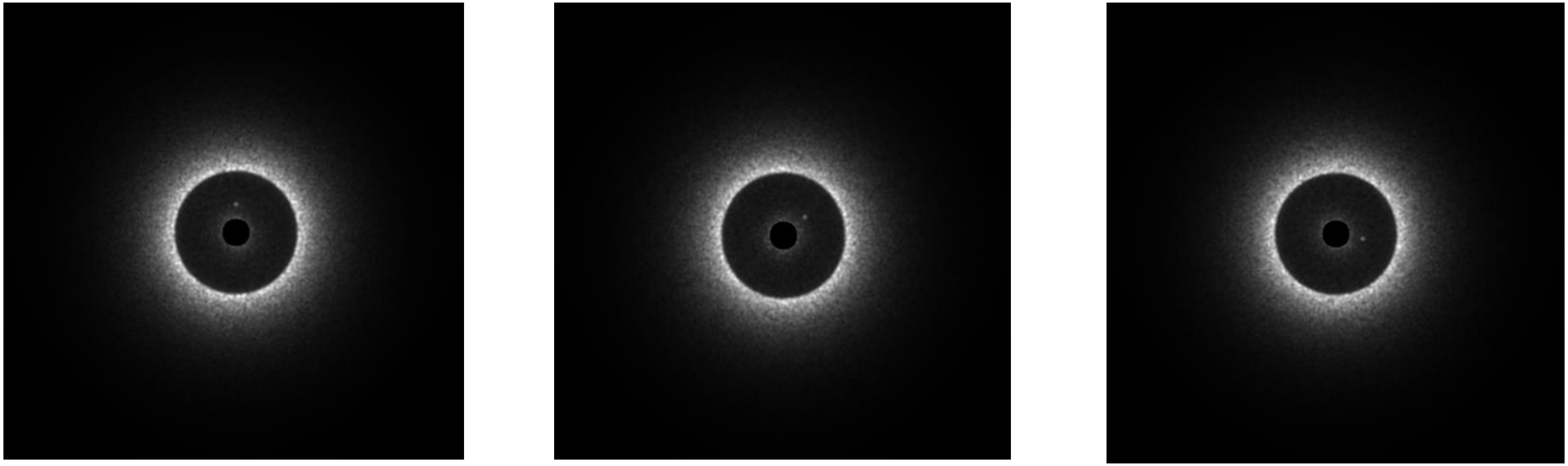




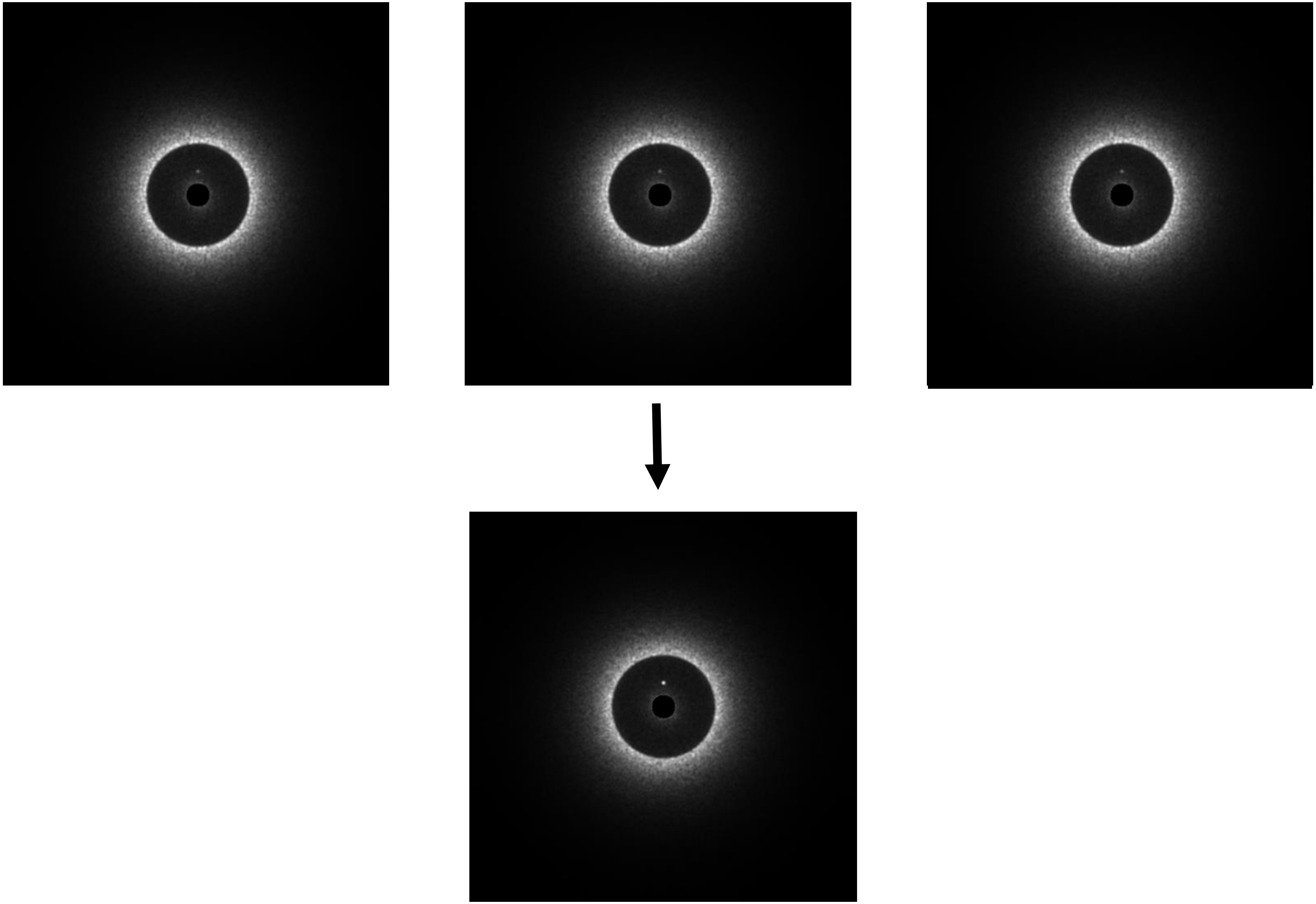
Projet d’E-ELT (39 m, 2025 ?)

- Planète type Terre : contraste de 10^{-9} voire 10^{-10}
- Zone habitable à 30 pc : 0.3 arcesec – 0.6 arcsec
- E-ELT XAO : 10^{-6}. Avec coronographe : 10^{-8} ? Post – ADI : 10^{-9} ?

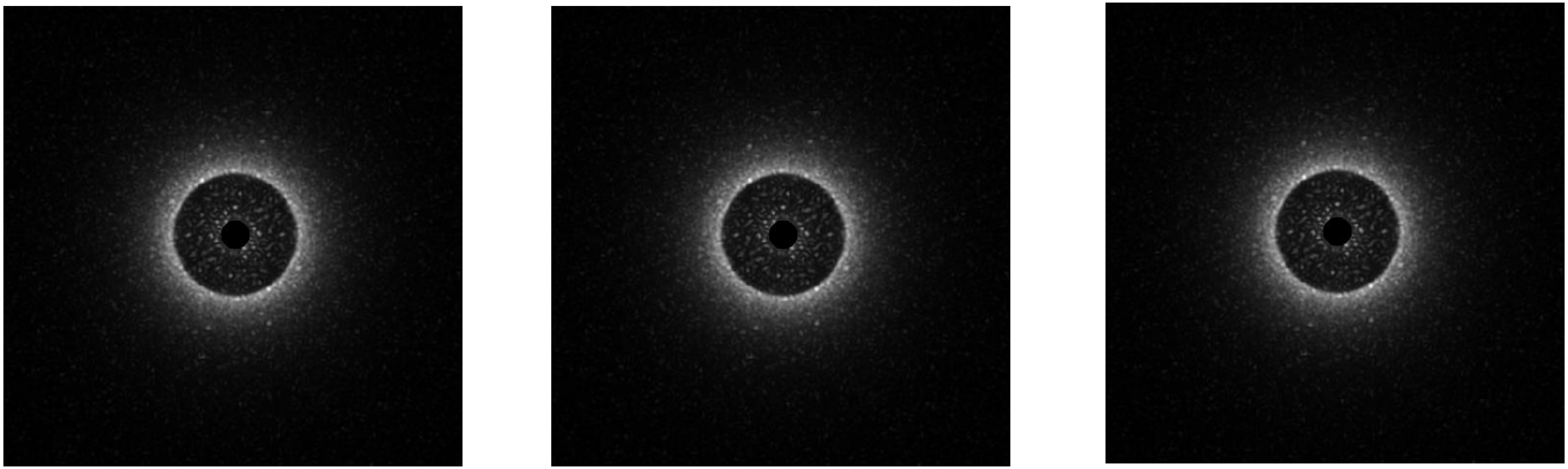
Vers l’ELT et les planètes de type Terre



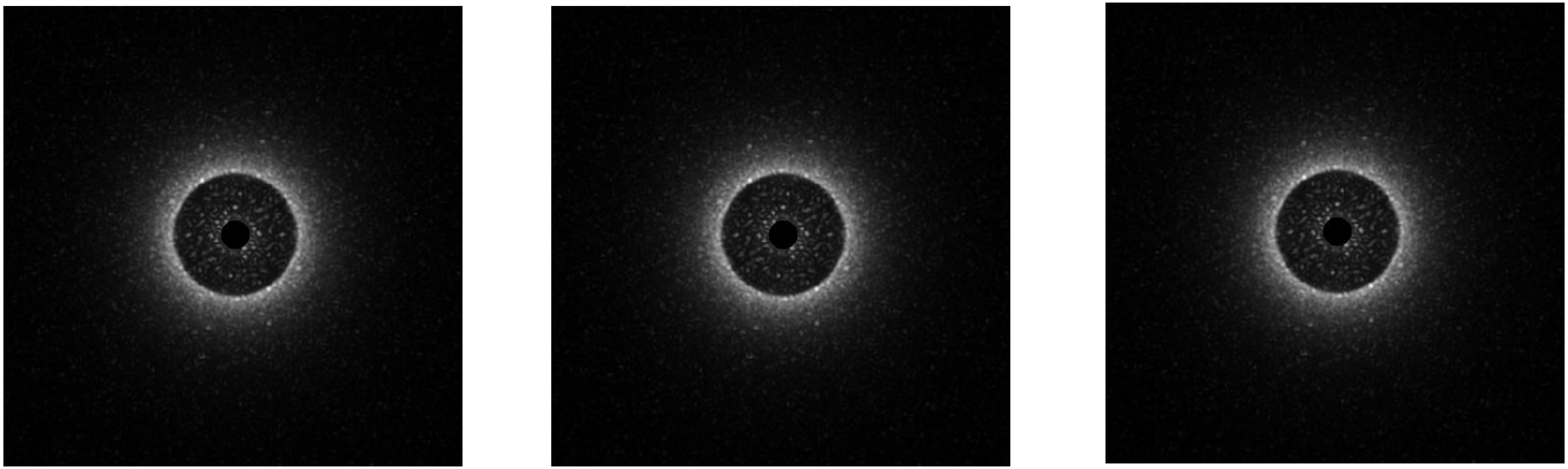
Vers l’ELT et les planètes de type Terre



Vers l’ELT et les planètes de type Terre



Vers l’ELT et les planètes de type Terre

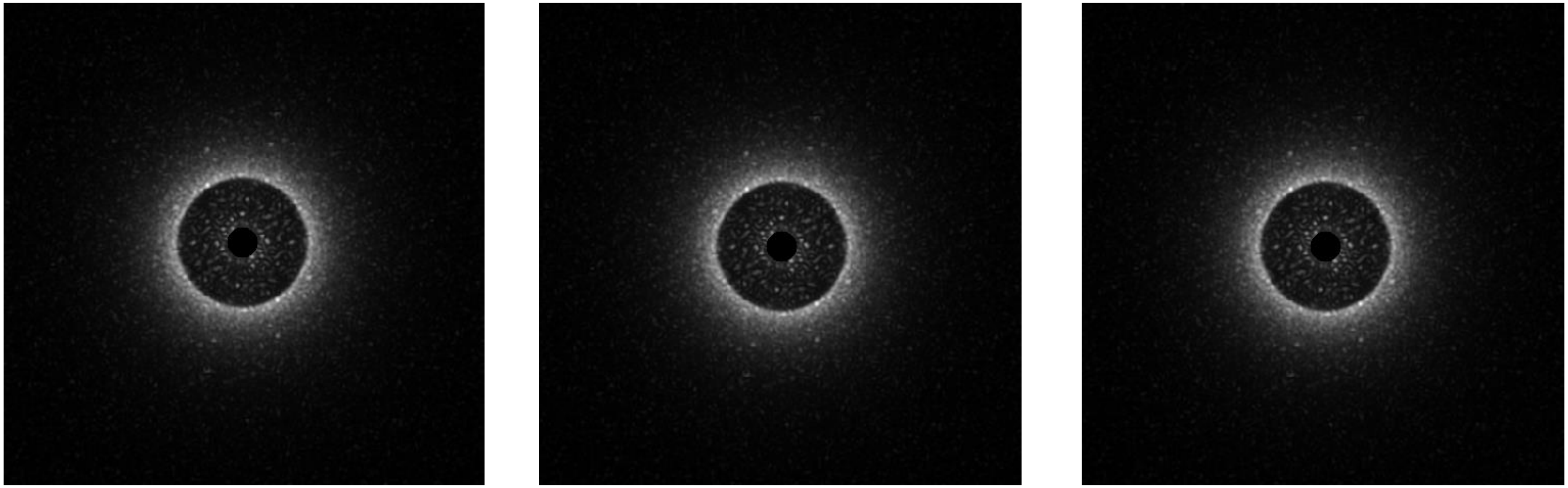


↓

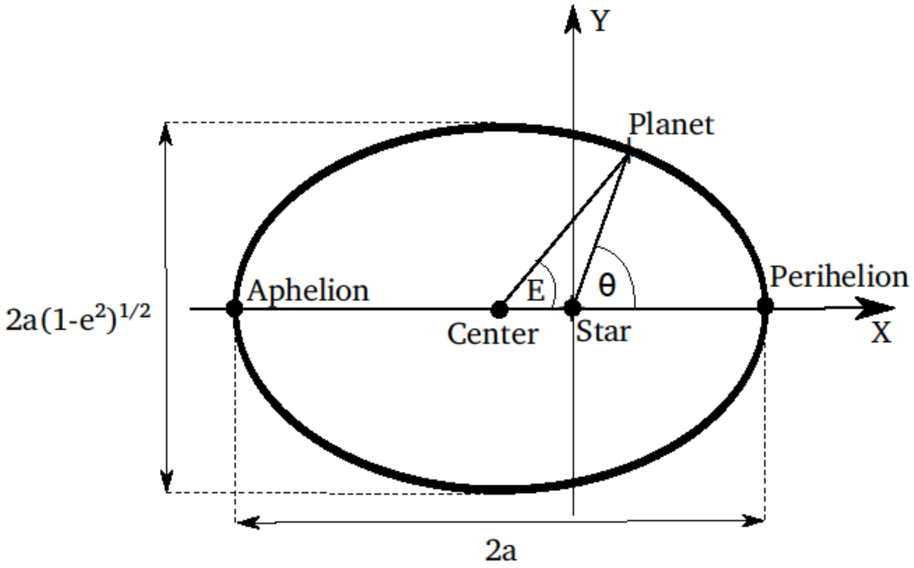
?

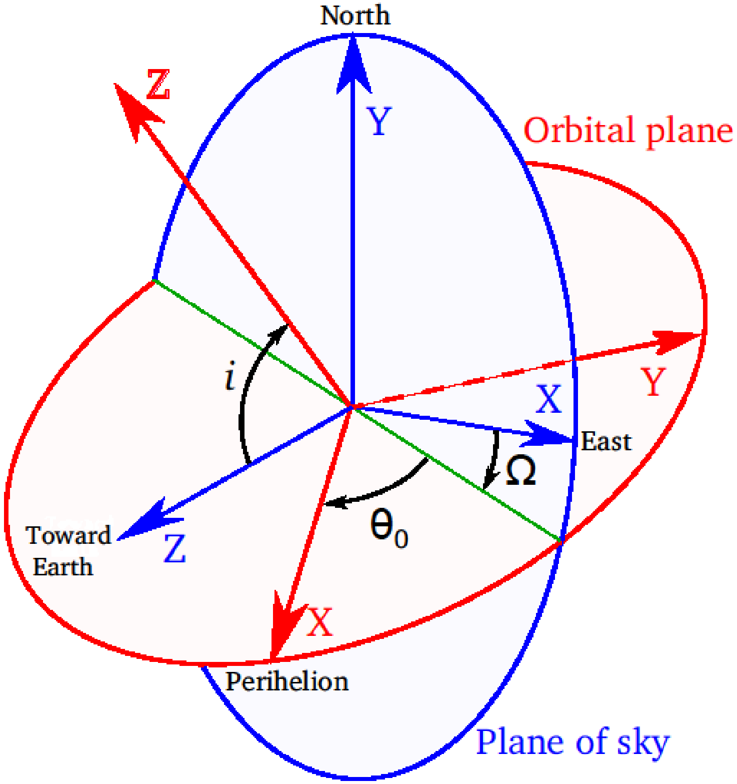
Le principe de K-Stacker

- Sans contrainte, il est toujours possible de recombiner ne série d’images pour faire apparaître un signal important
- Il faut donc utiliser la contrainte du mouvement orbital (Képlerien)



Le principe de K-Stacker


Y
Planet
Aphelion
E
θ
Perihelion
Center
Star
X
2a(1-e²)^1/2
2a


North
Z
Y
Orbital plane
i
X
Y
East
Ω
θ0
Toward Earth
Z
X
Perihelion
Plane of sky

- Dans le plan orbital : 2 paramètres (a, et e)
- 3 angles d'Euler pour positionner le plan orbital par rapport au plan du ciel (référence) : i, Ω, θ_0
- 1 paramètre pour la position initiale : t_0
- 2 paramètres supposés connus : masse et distance de l'étoile

Le principe de K-Stacker

- A partir de $(a, e, t_0, i, \Omega, \theta_0)$, on determine la position de la planète à chaque date

Image prise à t1

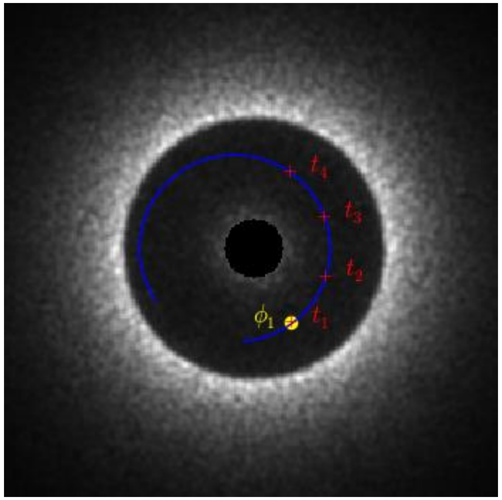


Image prise à t2

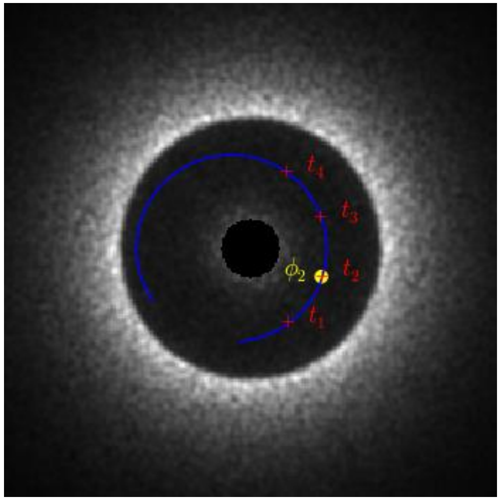


Image prise à t3

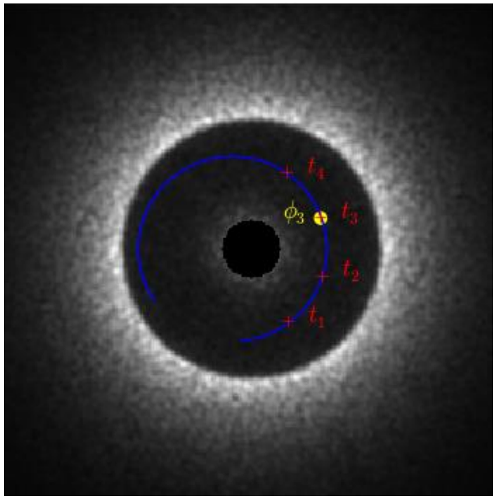
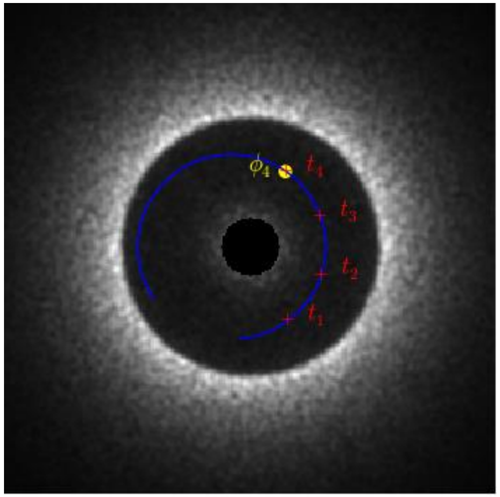


Image prise à t4



On définit : $S(a, e, t_0, i, \Omega, \theta_0) = \sum S_i$

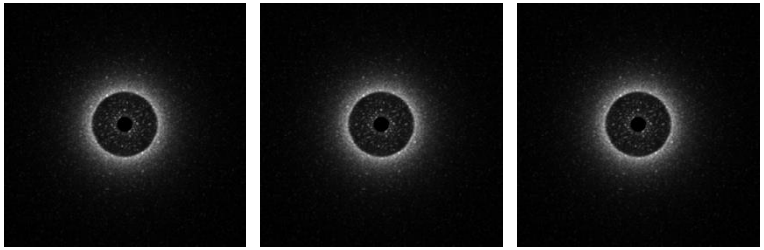
$\longrightarrow$ $S/N(a, e, t_0, i, \Omega, \theta_0)$

et : $N(a, e, t_0, i, \Omega, \theta_0) = \sqrt{\sum {N_i}^2}$

Test en double-aveugle de l'algorithme

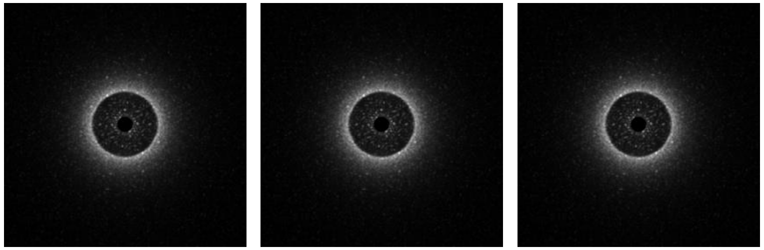
Génération de séries d'images SPHERE/IRDIS simulées

50 séries de 10 images



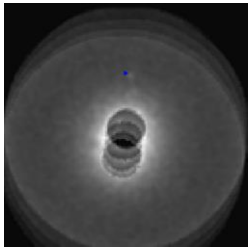
Injection en aveugle de planètes sur orbites aléatoires, à S/N aléatoire

15 séries sans planète
12 séries avec S/N = 1.5
10 séries S/N = 2
13 séries S/N = 3



Traitement K-Stacker et recombinaison selon les meilleurs orbites

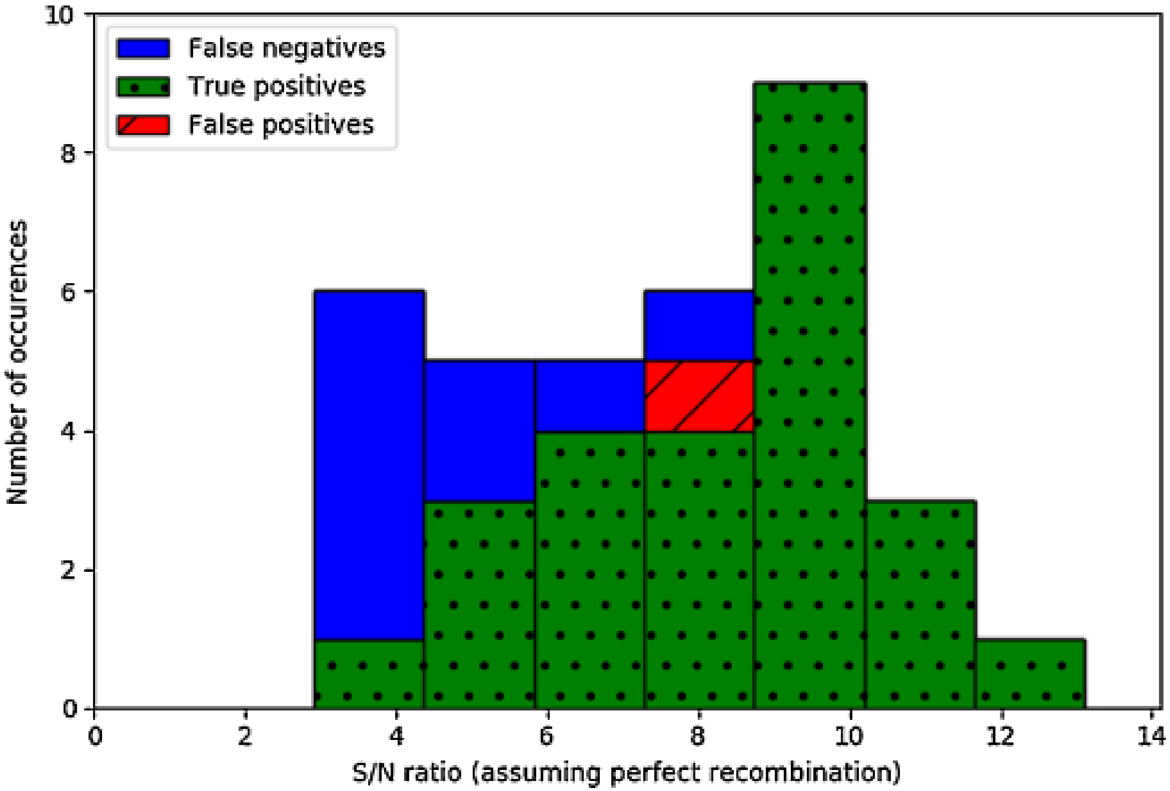
100 recombinaisons pour chaque série

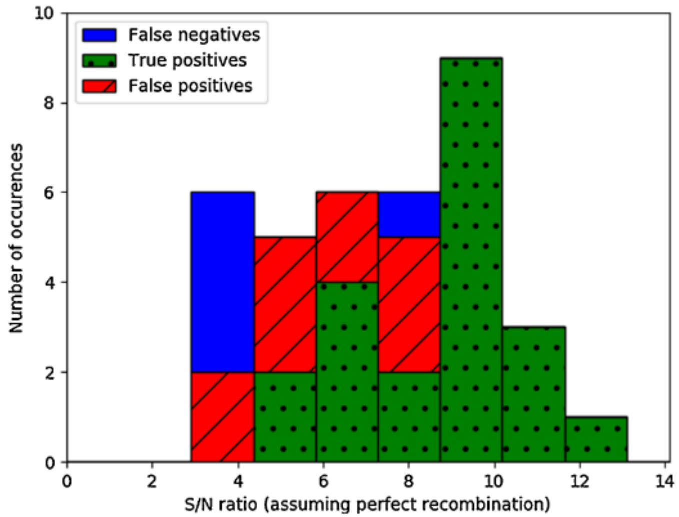


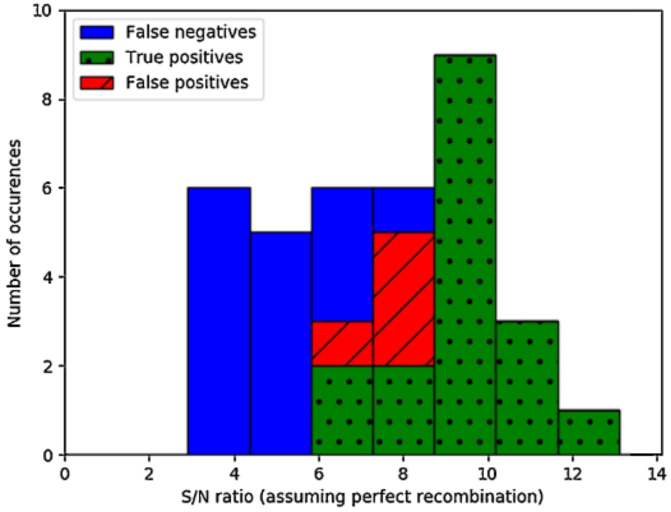
Vérification à l'œil des images recombinées, en aveugle

Comparaison aux paramètres d'injection

Premiers résultats

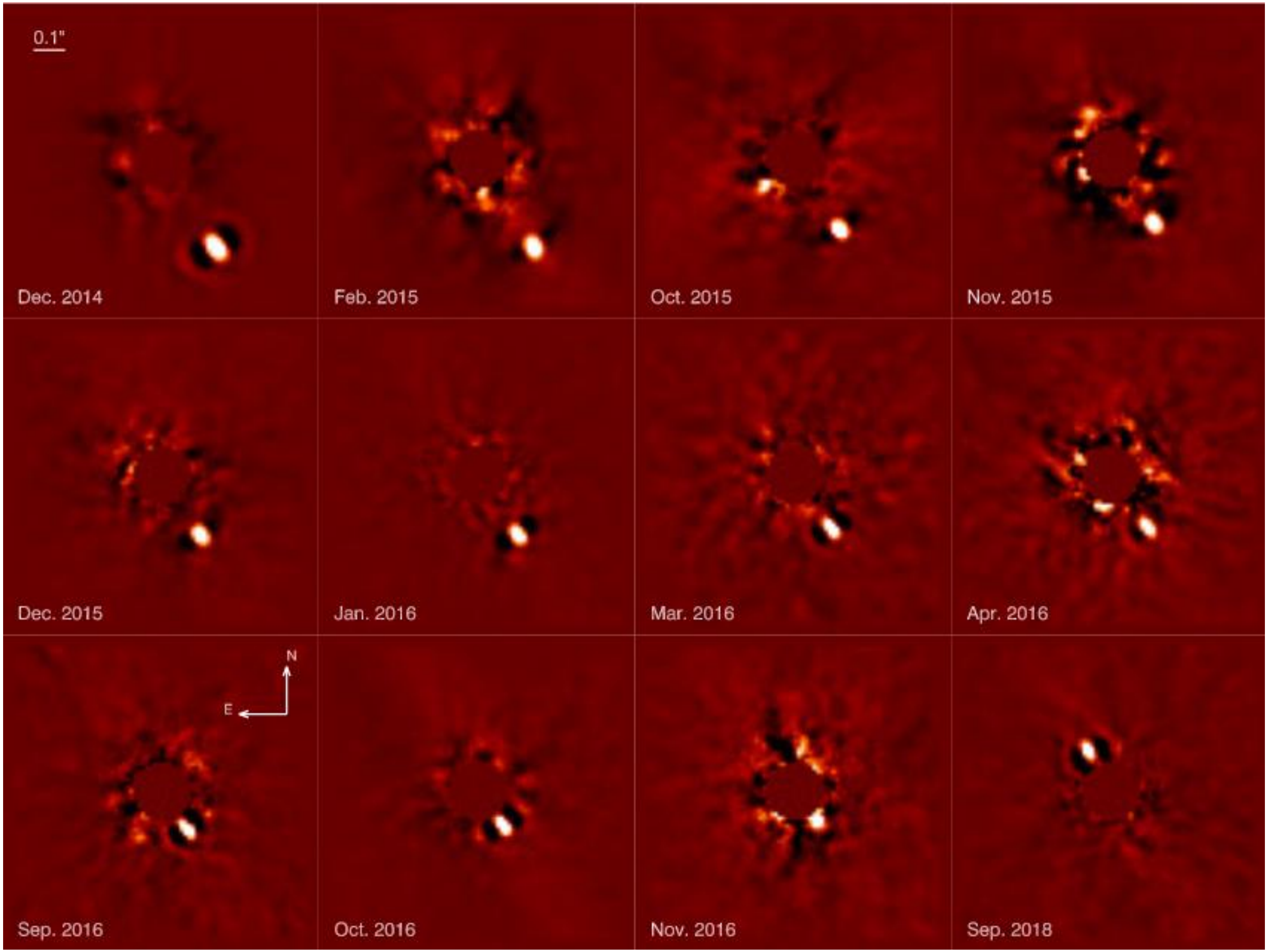






- Seulement 1 faux positif obtenu sur les 50 séries
- Gain typique comme attendu en $\sqrt{N_{images}}$
- Taux de détection comparable au haut-contraste classique

Vers un test « grandeur réelle » ?


0.1"
Dec. 2014
Feb. 2015
Oct. 2015
Nov. 2015
Dec. 2015
Jan. 2016
Mar. 2016
Apr. 2016
N
E
Sep. 2016
Oct. 2016
Nov. 2016
Sep. 2018

Observations de Beta Pictoris b sur 4 ans (Lagrange et al, 2018)

Références

K-Stacker

- « K-Stacker : Keplerian image recombination for the direct detection of exoplanets », M. Nowak et al. 2018
- « K-Stacker, a new way of detecting and characterizing exoplanets with high contrast imaging exoplanets », H. Le Coroller et al. 2015

Haut-Contraste et ADI

- « Two decades of Exoplanetary Science with Adaptive Optics », G. Chauvin, 2018
- « Angular Differential Imaging: a Powerful High-Contrast Imaging Technique », C. Marois et al. 2005

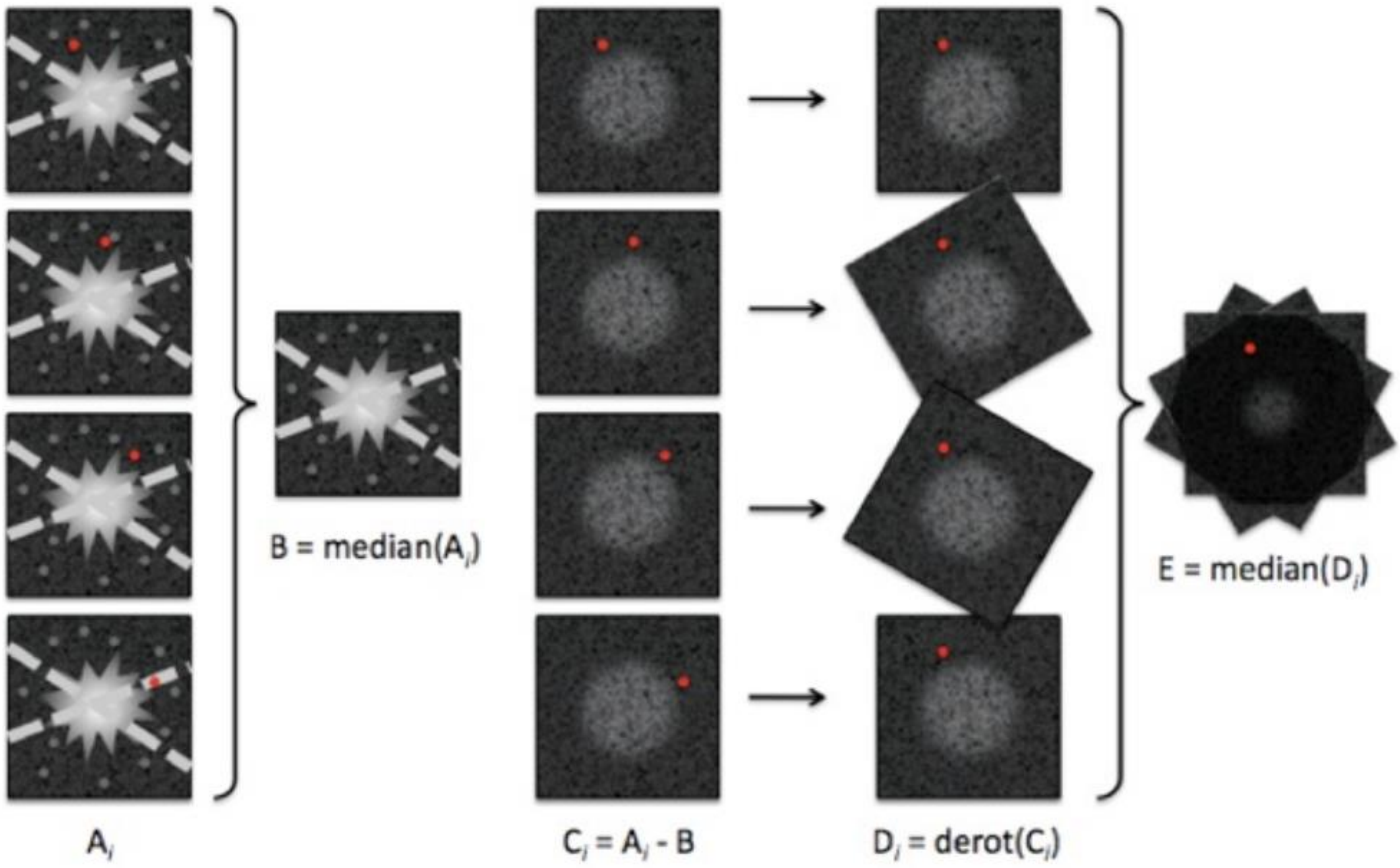
Spectroscopie GPI

- « GPI spectra of HR 8799 c, d, and e from 1.5 um to 2.4 um with KLIP Forward Modeling », A. Z. Greenbaum et al. 2018
- « 1 – 2.4 um Near-IR Spectrum of the Giant Planet beta Pictoris b Obtained with the Gemini Planet Imager », J. Chilcote et al. 2017

E-ELT

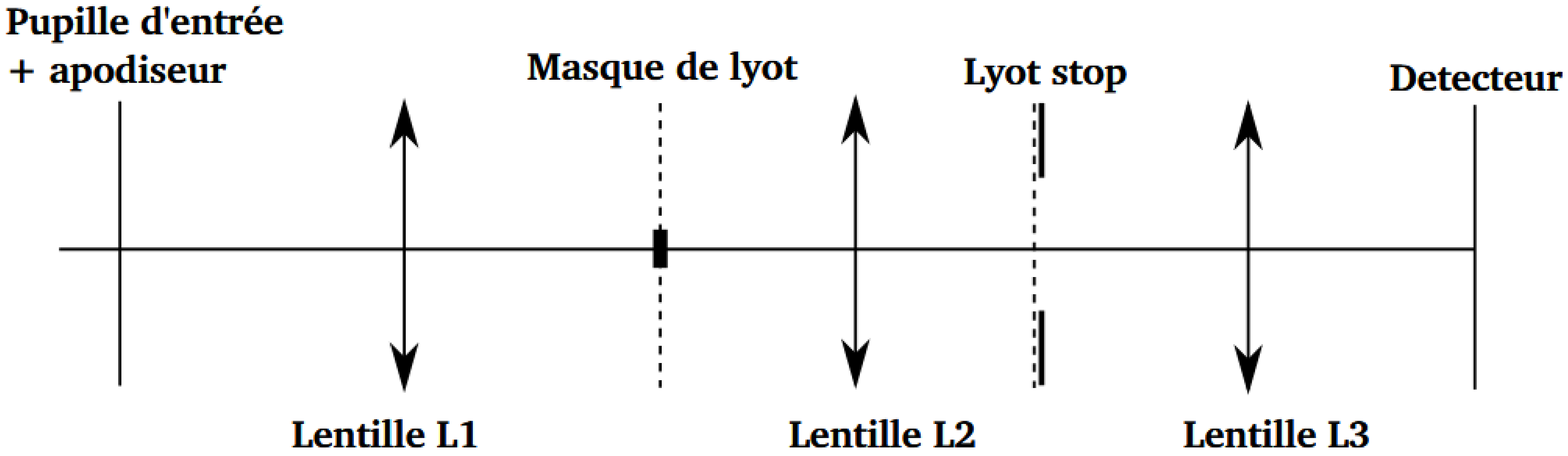
- « EPICS: direct imaging of exoplanets with the E-ELT », M. Kasper et al. 2010

ADI : Angular Differential Imaging

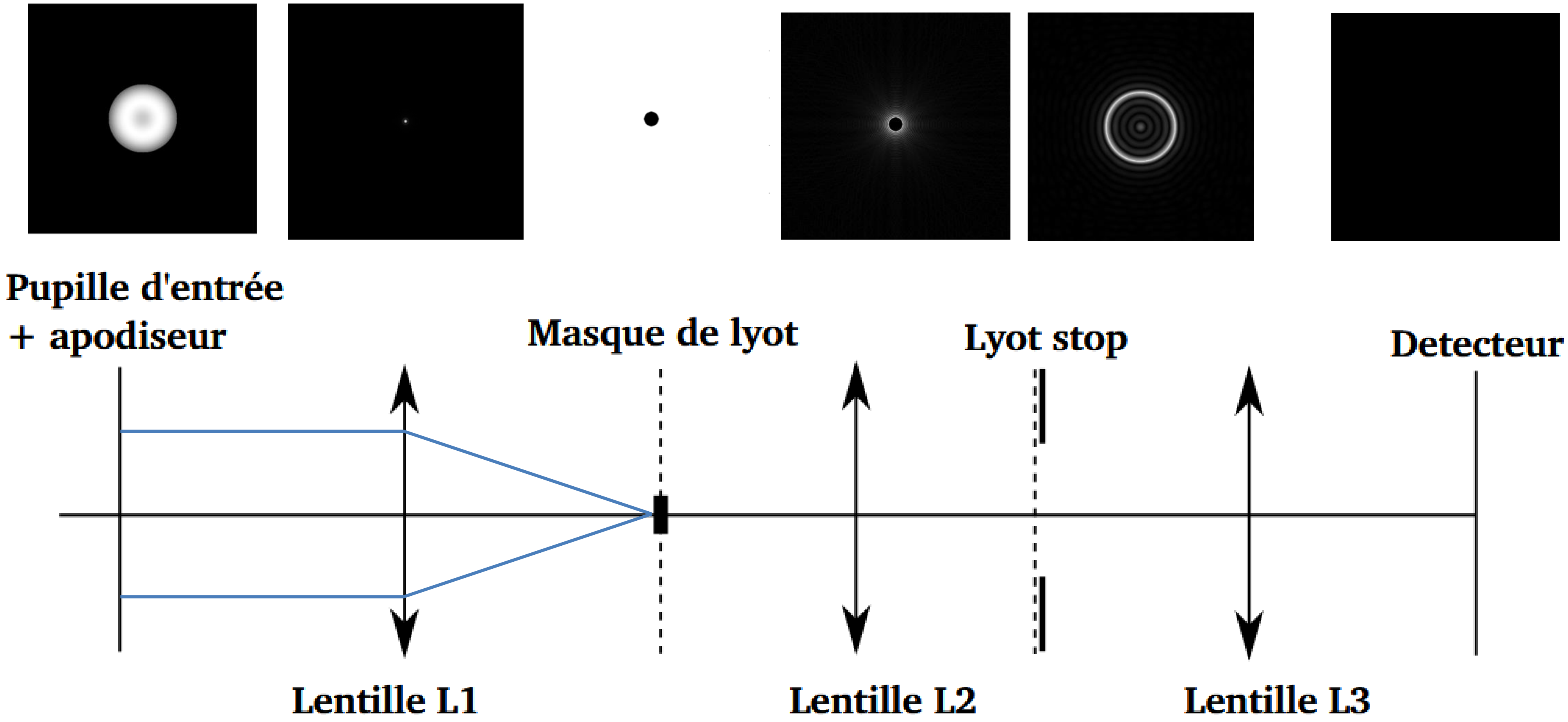

$B = \mathrm{median}(A_i)$
$E = \mathrm{median}(D_i)$
A_i
$C_i = A_i - B$
$D_i = \mathrm{derot}(C_i)$

- On profite de la rotation de champ, maximum à forte élévation
- Limitation du temps de pose total utilisable par nuit (1 à 2 heures)

Principe de la coronographie


Pupille d'entrée
+ apodiseur
Masque de lyot
Lyot stop
Detecteur
Lentille L1
Lentille L2
Lentille L3

Principe de la coronographie



Pupille d'entrée
+ apodiseur

Masque de lyot

Lyot stop

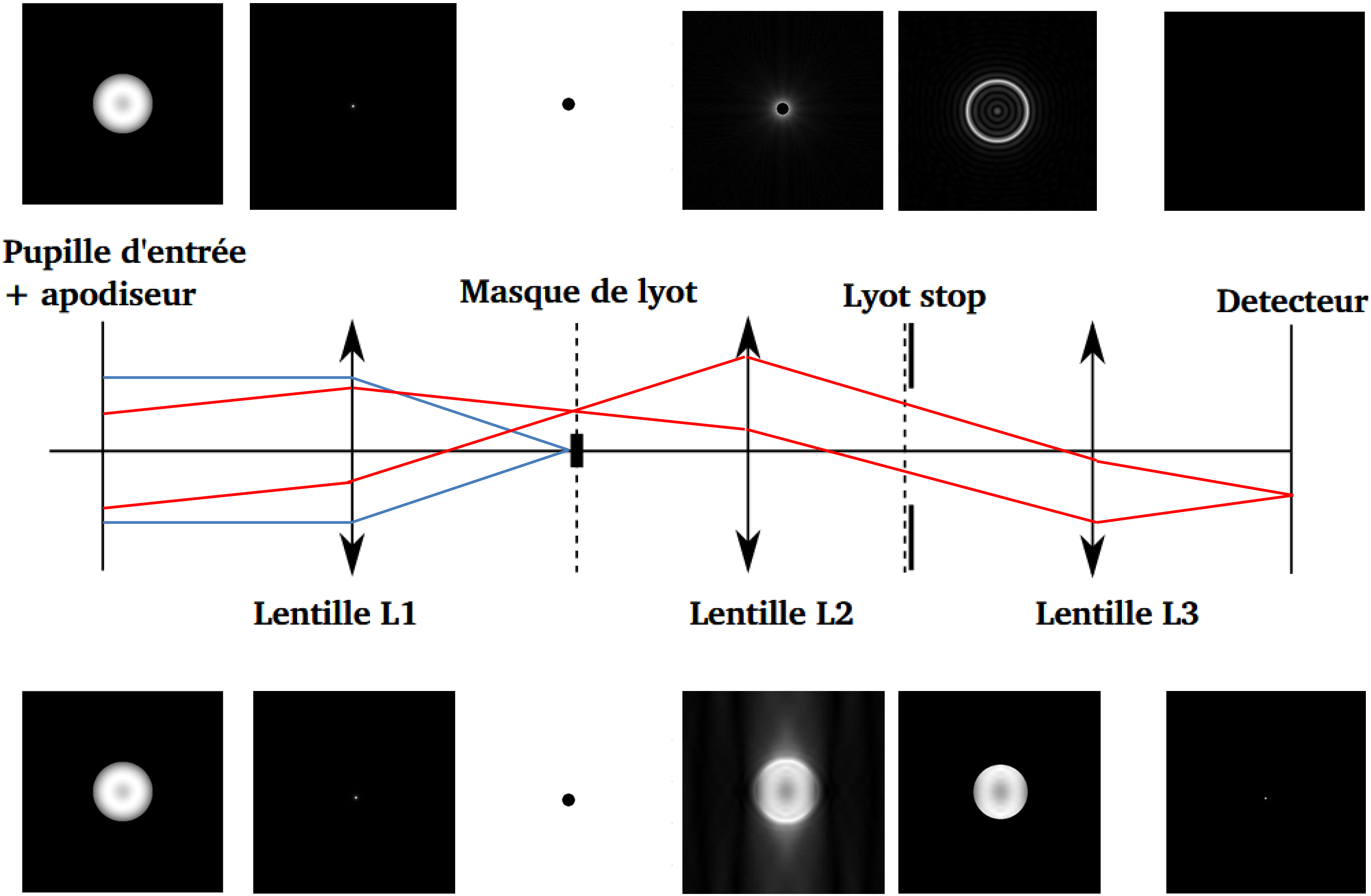
Detecteur

Lentille L1

Lentille L2

Lentille L3

Principe de la coronographie



Pupille d'entrée
+ apodiseur

Masque de lyot

Lyot stop

Detecteur

Lentille L1

Lentille L2

Lentille L3