

Caractérisation des exoplanètes par imagerie depuis le sol et l'espace : Application à la mission SPICES et à l'instrument VLT/NaCo

Anne-Lise Maire

Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

Directeurs de thèse : Anthony Boccaletti
Vincent Coudé du Foresto

16 octobre 2012



Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique



Partenariat Haute résolution Angulaire Sol-Espace

Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

Plan de la présentation

1 Contexte

- Les exoplanètes
- Caractérisations physique et atmosphérique
- Imagerie directe

2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES

- Contexte et objectifs du travail
- Simulation du concept instrumental
- Performances en détection
- Performances en caractérisation

3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo

- L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
- Réduction des données
- Limites de sensibilité ADI
- Limites de sensibilité SDI+ADI

4 Conclusions & Perspectives

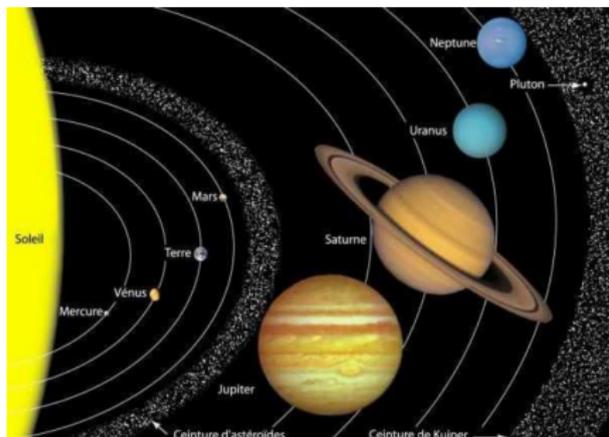
- Conclusions
- Perspectives

Plan de la présentation

- 1 **Contexte**
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 **Simulations numériques des performances de la mission SPICES**
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 **Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo**
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 **Conclusions & Perspectives**
 - Conclusions
 - Perspectives

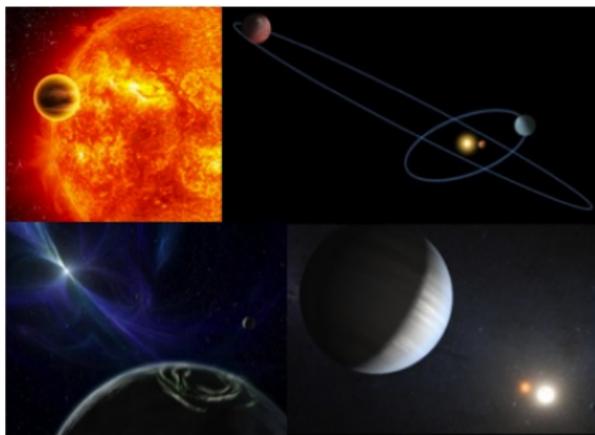
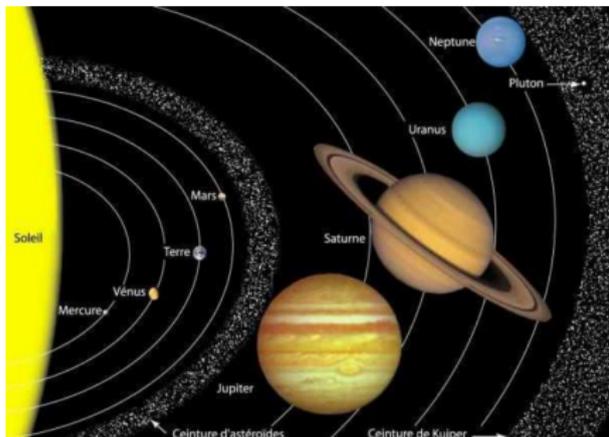
Pourquoi étudier les exoplanètes ?

- **Formation et évolution planétaires**
 - Avant les exoplanètes → système solaire
 - Depuis 1995 : Jupiters chauds, planètes en orbite excentrique, planètes autour de pulsars, planètes dans des systèmes binaires, super-Terres, etc

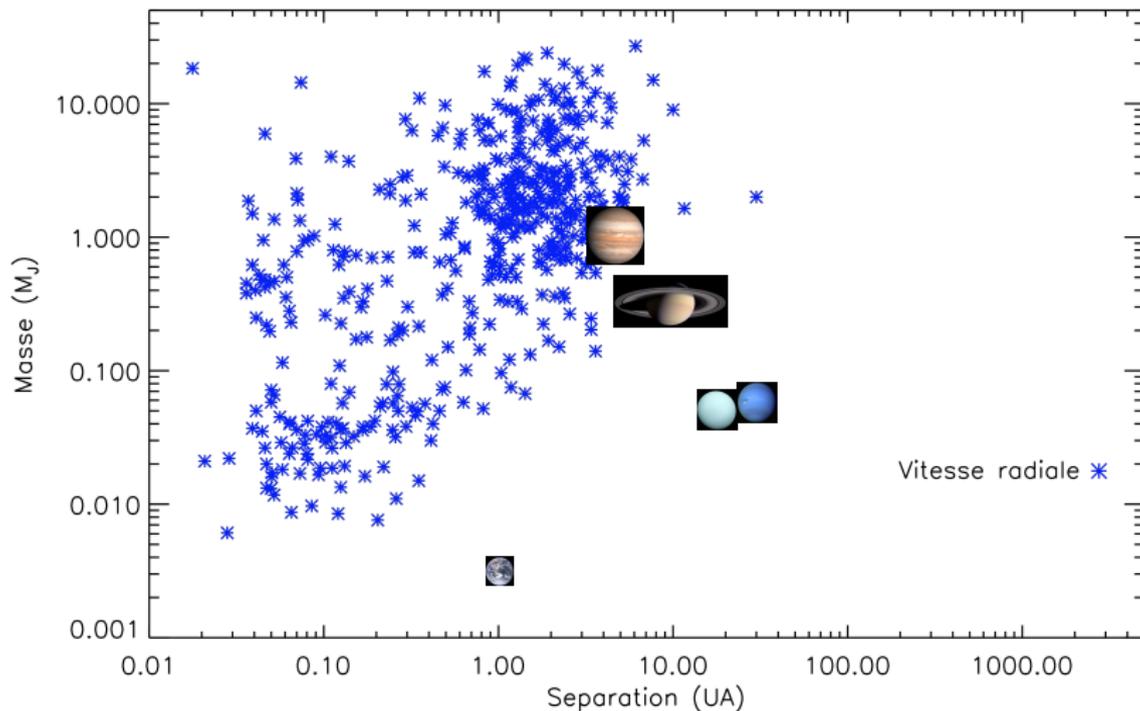


Pourquoi étudier les exoplanètes ?

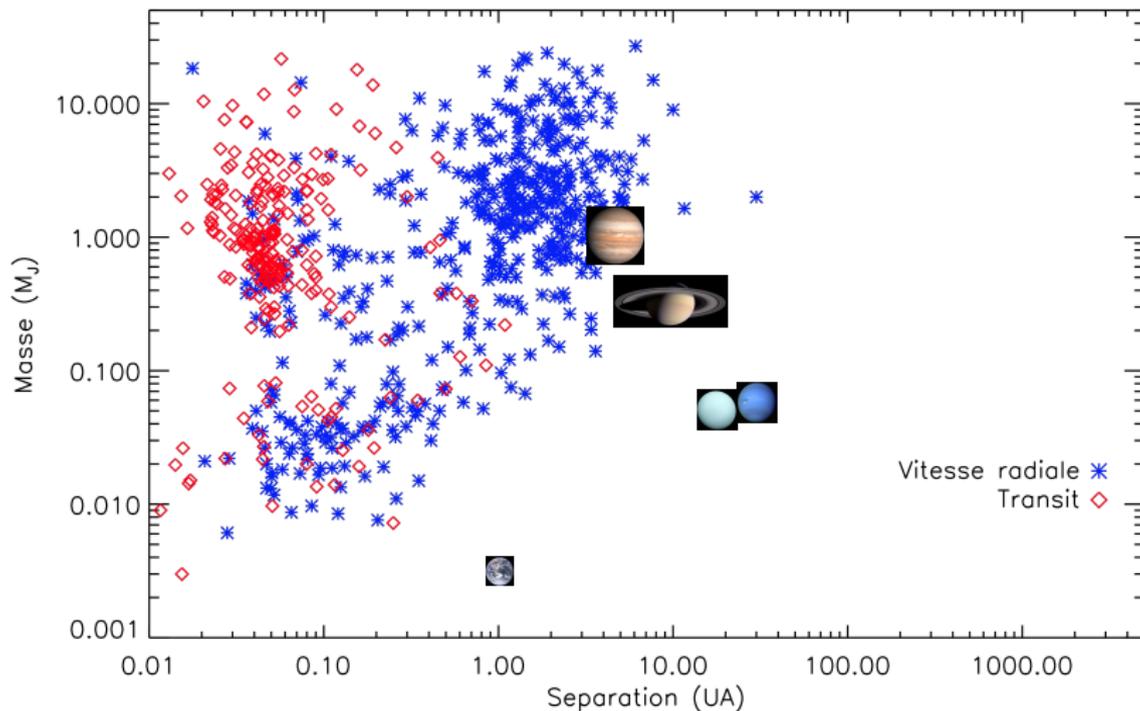
- **Formation et évolution planétaires**
 - Avant les exoplanètes → système solaire
 - Depuis 1995 : Jupiters chauds, planètes en orbite excentrique, planètes autour de pulsars, planètes dans des systèmes binaires, super-Terres, etc
- Conditions d'apparition et de développement de la **vie**
 - zone habitable, biosignatures (Kasting et al. 1993, Des Marais et al. 2002)



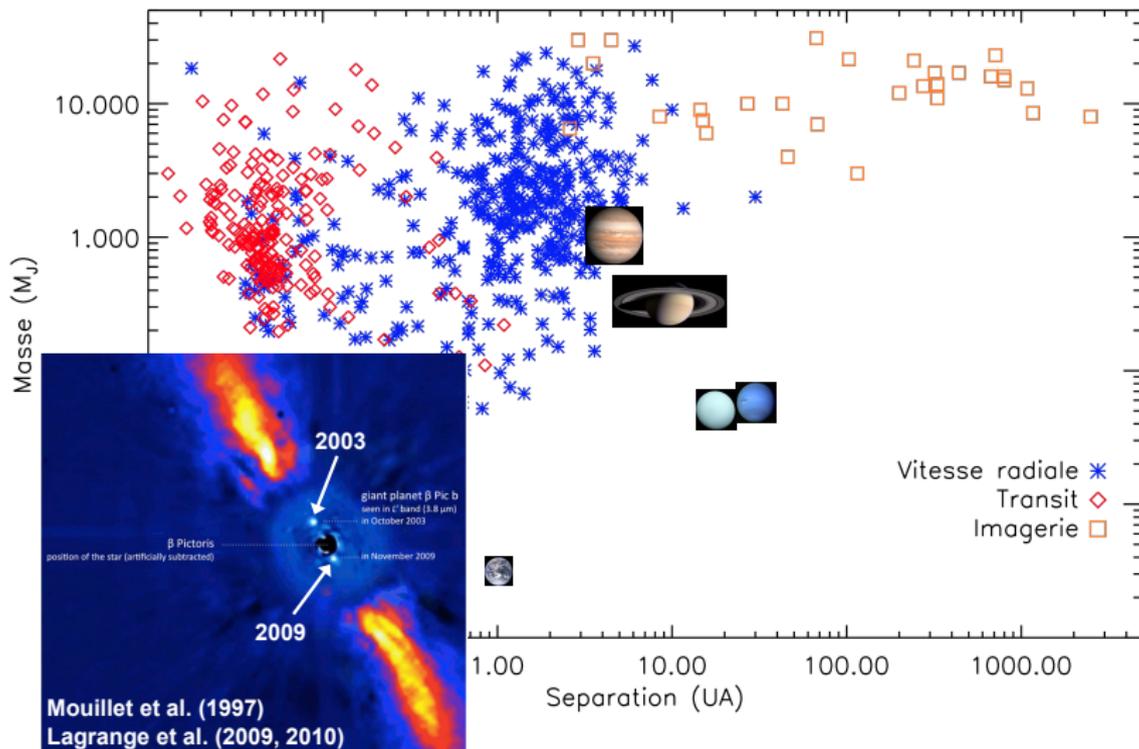
Comment détecter les exoplanètes ?



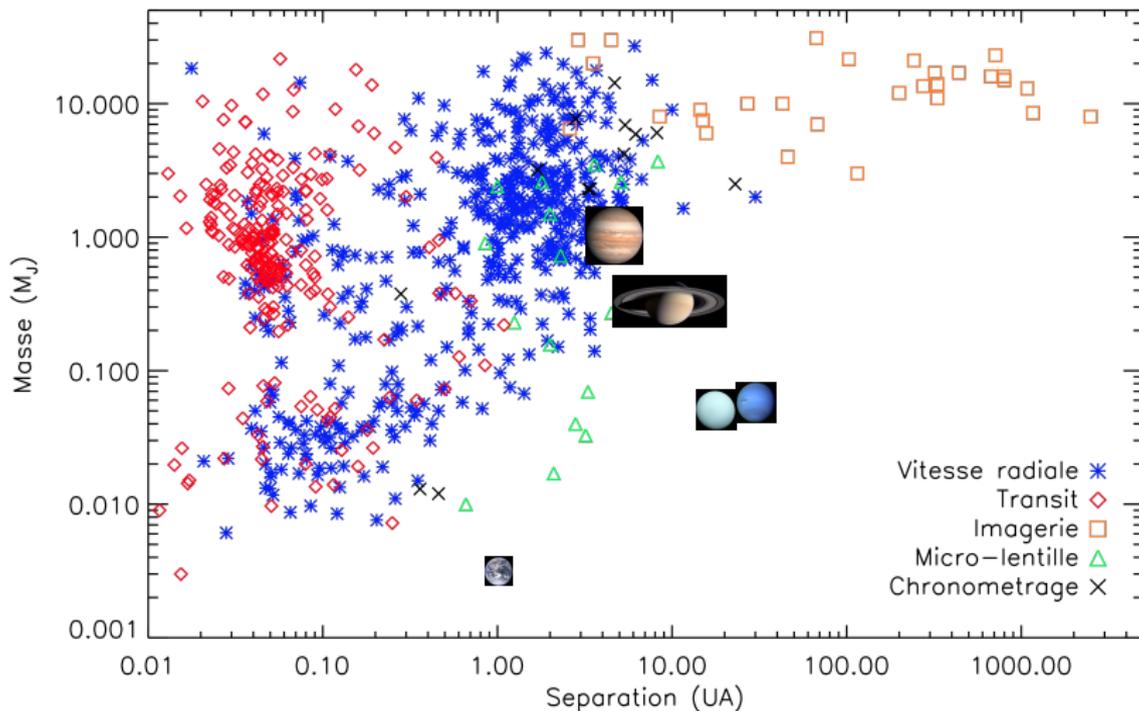
Comment détecter les exoplanètes ?



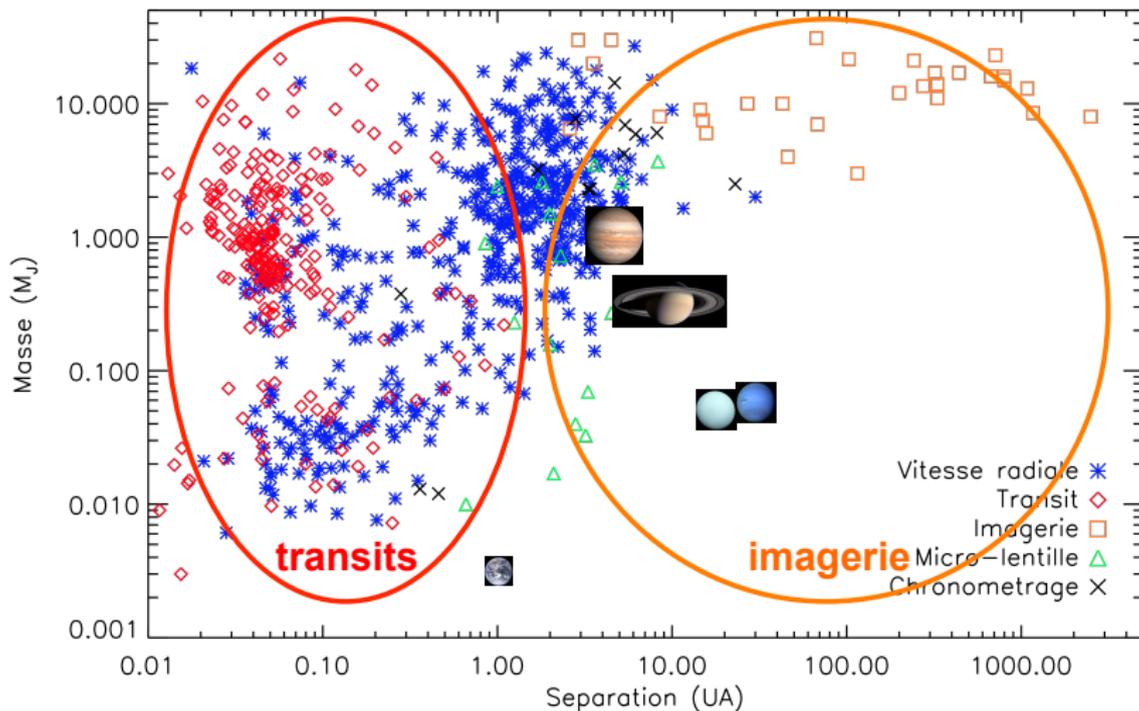
Comment détecter les exoplanètes ?



Comment détecter les exoplanètes ?



Comment détecter les exoplanètes ?

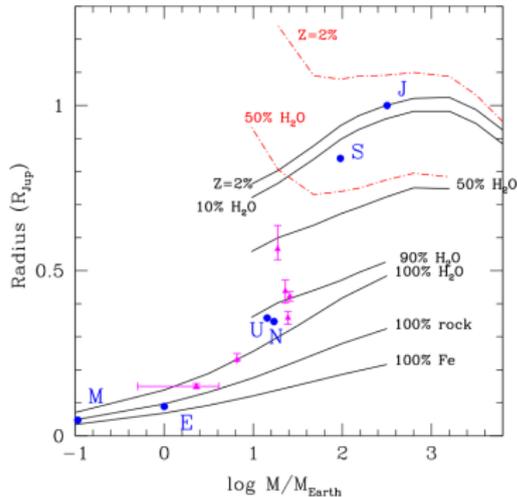


Plan de la présentation

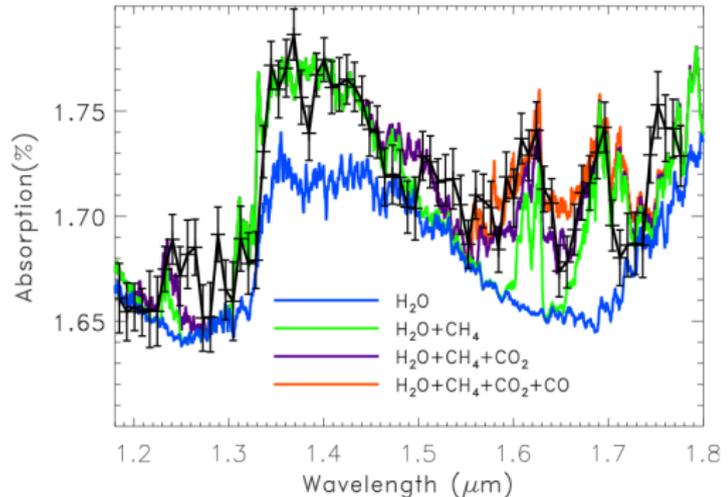
- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - **Caractérisations physique et atmosphérique**
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

Caractérisations physique et atmosphérique

- Caractérisation **physique**
 - Masse, période orbitale, excentricité, inclinaison, rayon, densité
- Caractérisation **atmosphérique**
 - Spectro-photométrie → température, molécules, structure verticale (nuages, brumes), échappement



Chabrier et al. (2010)



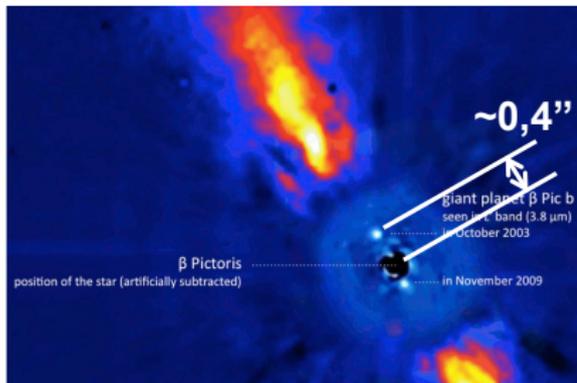
Tinetti et al. (2010)

Plan de la présentation

- 1 **Contexte**
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - **Imagerie directe**
- 2 **Simulations numériques des performances de la mission SPICES**
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 **Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo**
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 **Conclusions & Perspectives**
 - Conclusions
 - Perspectives

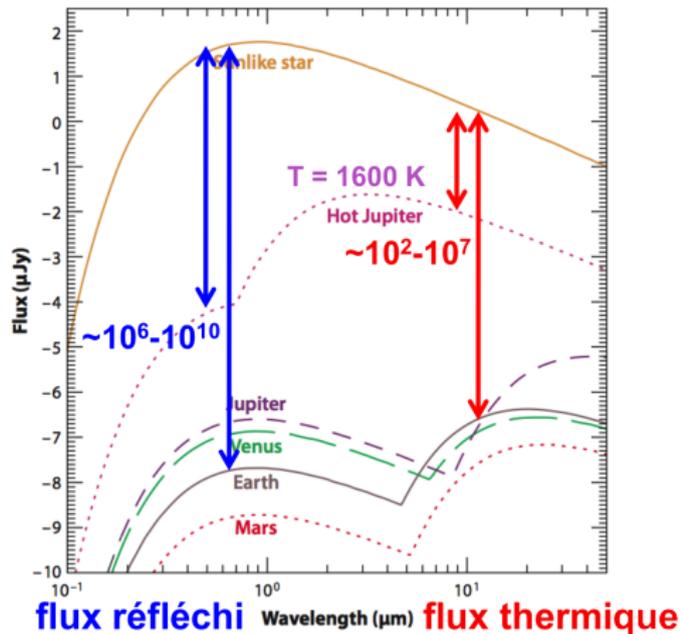
Imagerie directe

- Haut contraste à petite séparation angulaire



Résolution (théorique) d'un télescope : λ/D
 $D=8 \text{ m}$ et $\lambda=3,8 \text{ }\mu\text{m}$ \rightarrow $\sim 0,1''$

Mouillet et al. (1997), Lagrange et al. (2009, 2010)



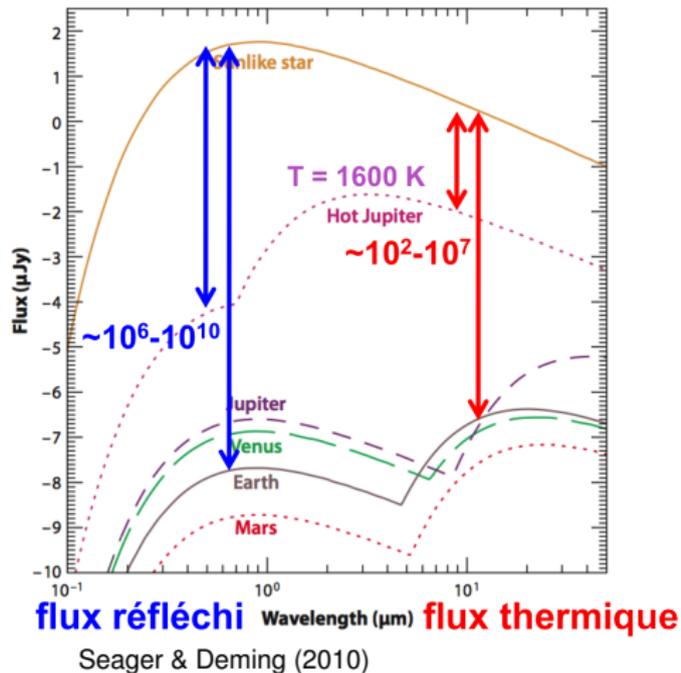
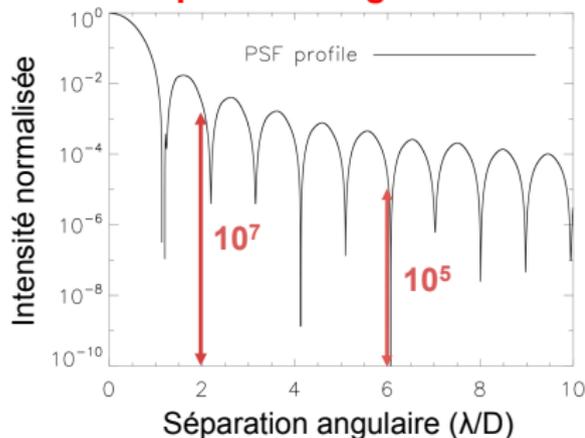
flux réfléchi flux thermique

Seager & Deming (2010)

Imagerie directe

- Haut contraste à petite séparation angulaire

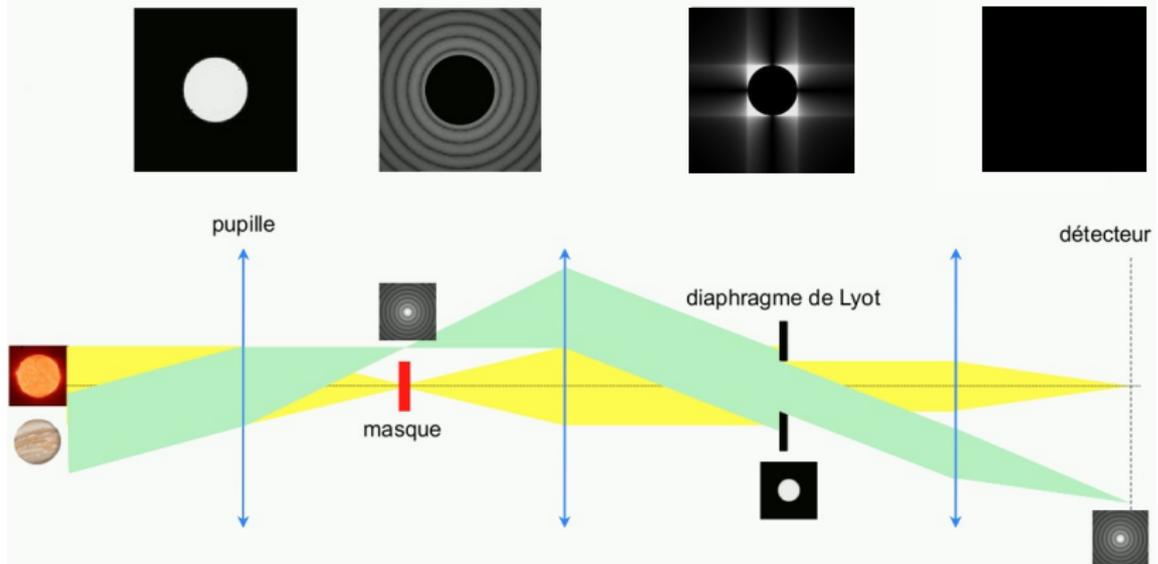
Diffraction $\rightarrow I_{\text{étoile}}/I_{\text{planète}}$ dépend de leur séparation angulaire



Bruit de photon

● Coronagraphie

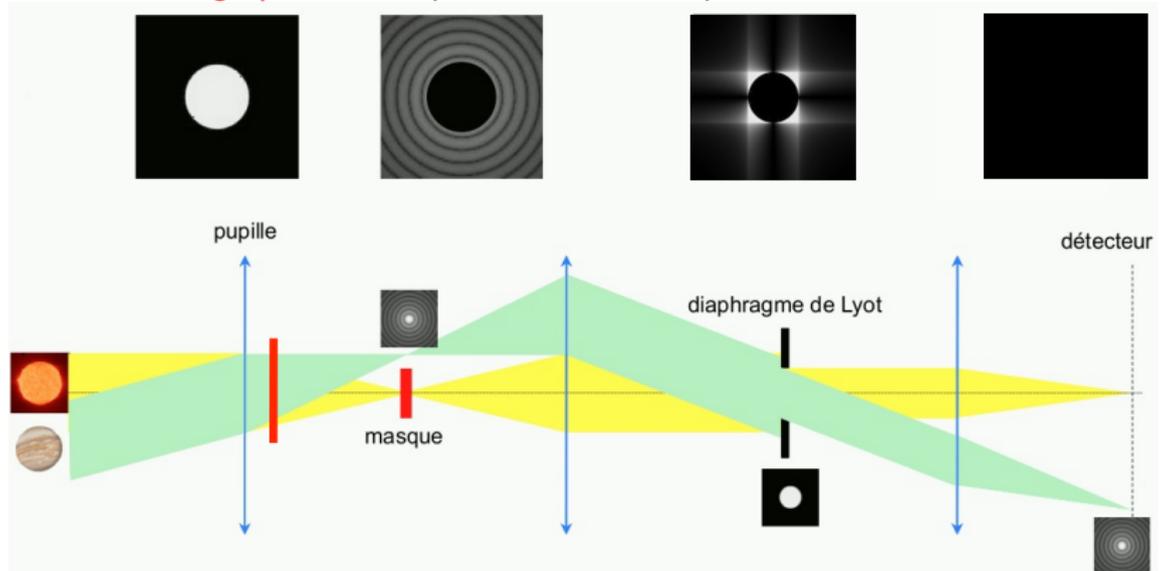
- coronagraphes d'amplitude, coronagraphes de phase, apodiseurs, occulteurs
- coronographe à quatre quadrants (Rouan et al. 2000)
- coronographe vortex (Mawet et al. 2005)



Bruit de photon

● Coronagraphie

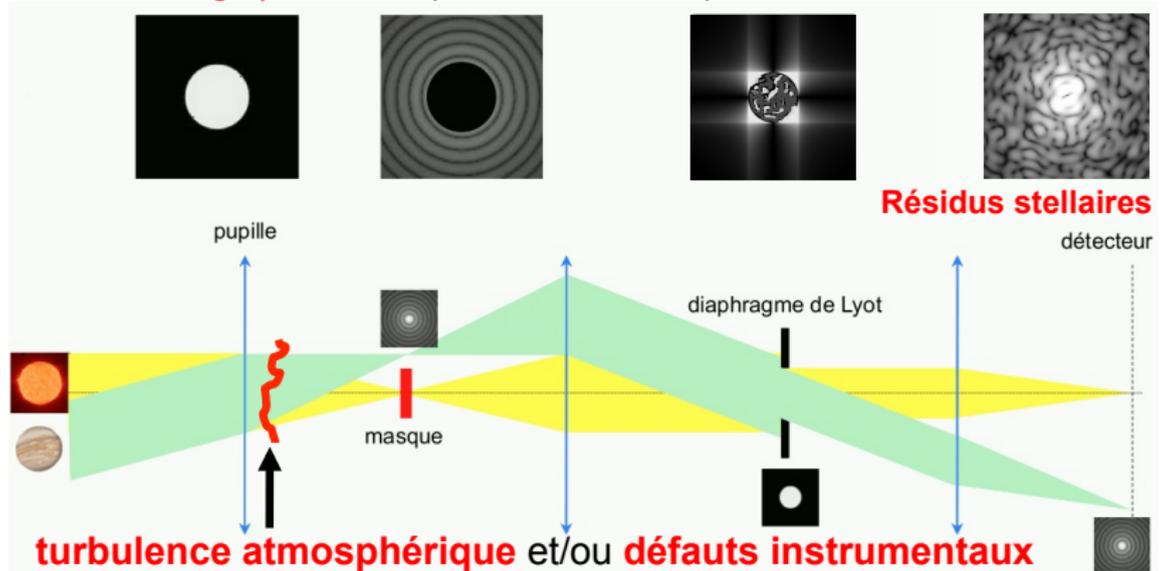
- coronagraphes d'amplitude, coronagraphes de phase, apodiseurs, occulteurs
- coronographe à quatre quadrants (Rouan et al. 2000)
- coronographe vortex (Mawet et al. 2005)



Bruit de photon

● Coronagraphie

- coronagraphes d'amplitude, coronagraphes de phase, apodiseurs, occulteurs
- coronographe à quatre quadrants (Rouan et al. 2000)
- coronographe vortex (Mawet et al. 2005)



Bruit de *speckles*

- **Aval** → **Imagerie différentielle** (Racine et al. 1999, Kuhn et al. 2001, Sparks & Ford 2002, Marois et al. 2006, Baudoz et al. 2006)
- **Amont** → **Contrôle de front d'onde** (Babcock 1953, Malbet et al. 1995)

imagerie différentielle

Image(s) de science
Étoile + planètes

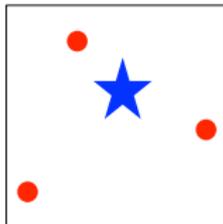
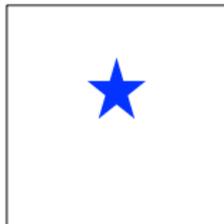
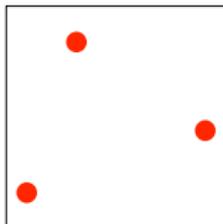


Image de référence
Étoile

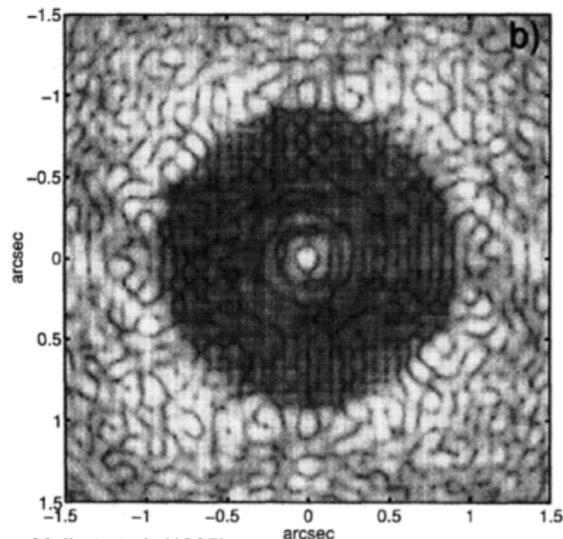


−

=



contrôle de front d'onde



Malbet et al. (1995)

Plan de la présentation

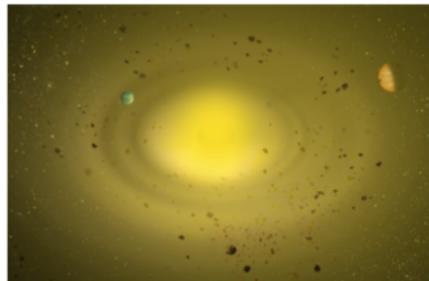
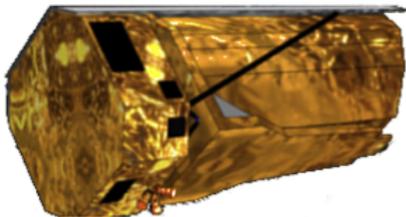
- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 **Simulations numériques des performances de la mission SPICES**
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 **Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo**
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 **Conclusions & Perspectives**
 - Conclusions
 - Perspectives

Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

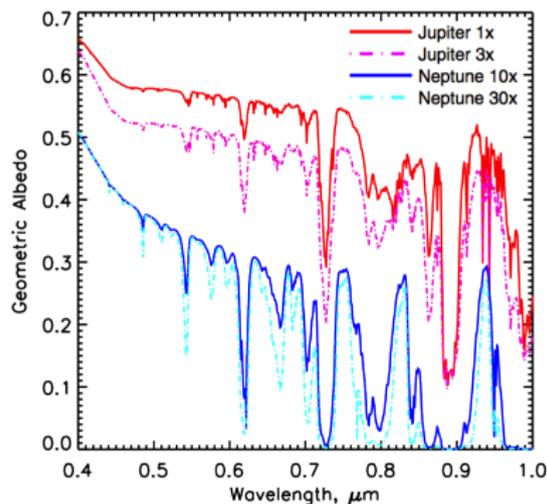
Contexte et objectifs du travail

- SPICES (Spectro-Polarimetric Imaging and Characterization of Exoplanetary Systems)
 - **Coronographe** visible 1,5 m de diamètre - P.I. : A. Boccaletti
 - **Proposition ESA Cosmic Vision M3** en 2010
 - Consortium **international** 70 membres
 - Analyse spectro-polarimétrique **exoplanètes froides** et **disques** circumstellaires $\gtrsim 1$ zodi \rightarrow contrastes 10^{-9} - 10^{-10} à $\sim 0,2''$
- Objectifs du travail
 - Spécifications hauts niveaux
 - **Performances spectrométriques**



Étude des performances

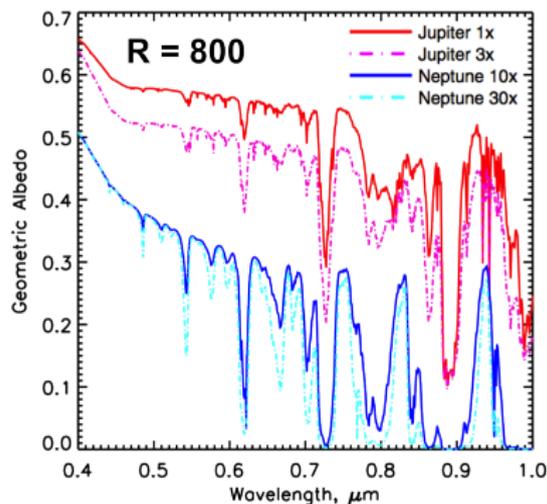
- 2 manières d'aborder le problème
Spectres théoriques



Modèles de Cahoy et al. (2010)

Étude des performances

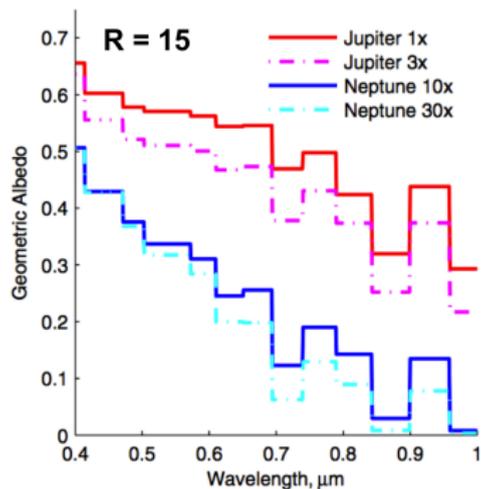
- 2 manières d'aborder le problème
Spectres théoriques



Modèles de Cahoy et al. (2010)

Étude des performances

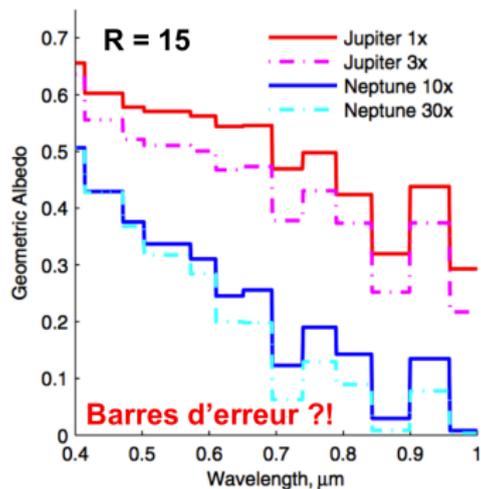
- 2 manières d'aborder le problème
Spectres théoriques



Cahoy et al. (2010)

Étude des performances

- 2 manières d'aborder le problème
 Spectres théoriques

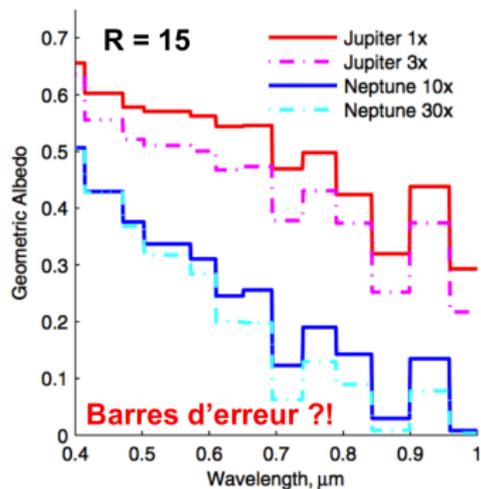


Cahoy et al. (2010)

Étude des performances

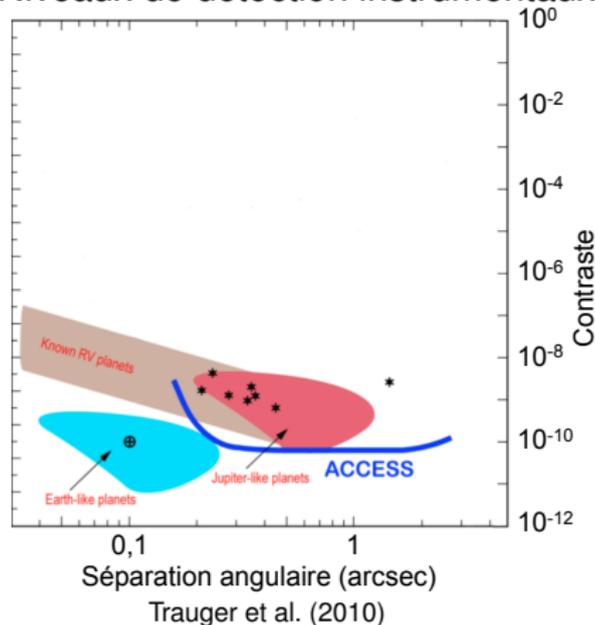
- 2 manières d'aborder le problème

Spectres théoriques



Cahoy et al. (2010)

Niveaux de détection instrumentaux



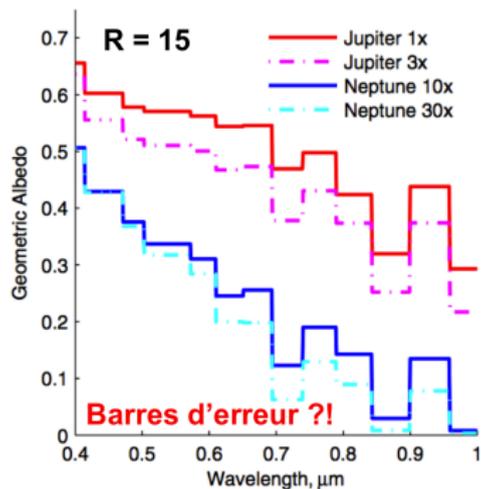
Séparation angulaire (arcsec)

Trauger et al. (2010)

Étude des performances

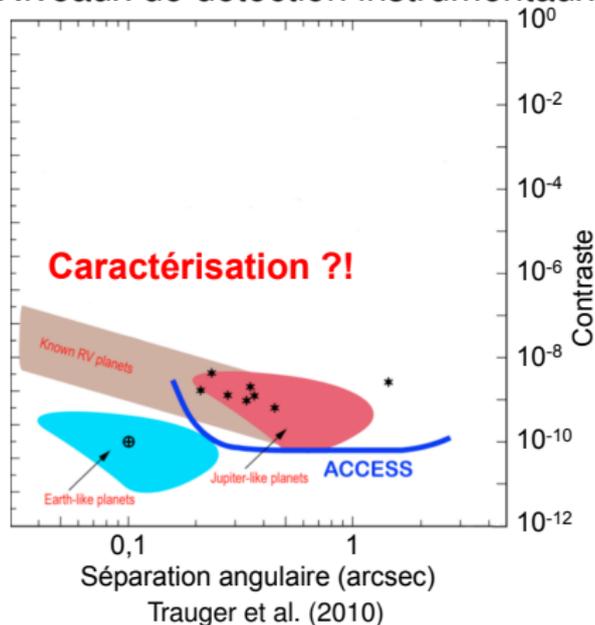
- 2 manières d'aborder le problème

Spectres théoriques



Cahoy et al. (2010)

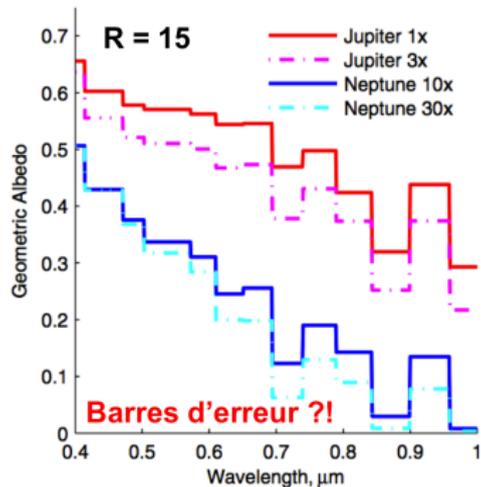
Niveaux de détection instrumentaux



Étude des performances

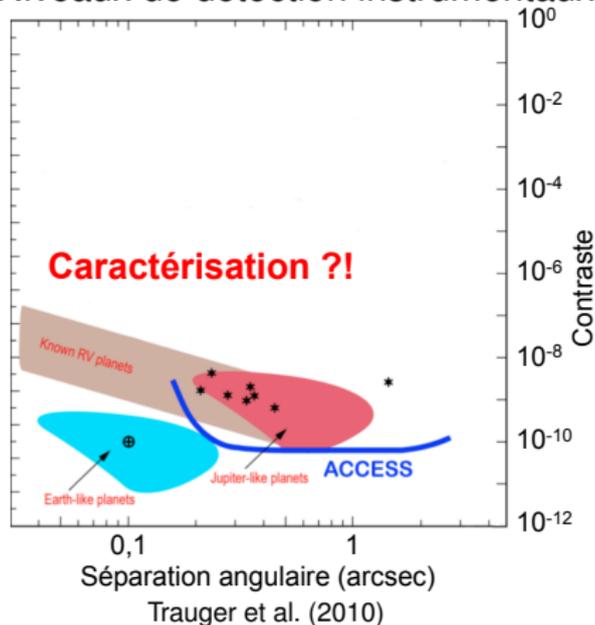
- 2 manières d'aborder le problème

Spectres théoriques



Cahoy et al. (2010)

Niveaux de détection instrumentaux



Séparation angulaire (arcsec)

Trauger et al. (2010)

Nécessaire de **dépasser** ces deux approches !

Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 **Simulations numériques des performances de la mission SPICES**
 - Contexte et objectifs du travail
 - **Simulation du concept instrumental**
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

Les débuts de SPICES...

Diamètre du
téléscope ?

Bande
spectrale ?

Qualité
optique ?

Étalonnage
des speckles ?

Téléscope
sans ou avec
obstruction ?

Spectromètre
intégral de champ ?

Coronographe ?

Miroir
déformable ?

Résolution
spectrale ?

Les débuts de SPICES...

Diamètre du
téléscope ?

1,5 m

Bande
spectrale ?

Qualité
optique ?

Étalonnage
des speckles ?

Téléscope
sans ou avec
obstruction ?

Spectromètre
intégral de champ ?

Oui

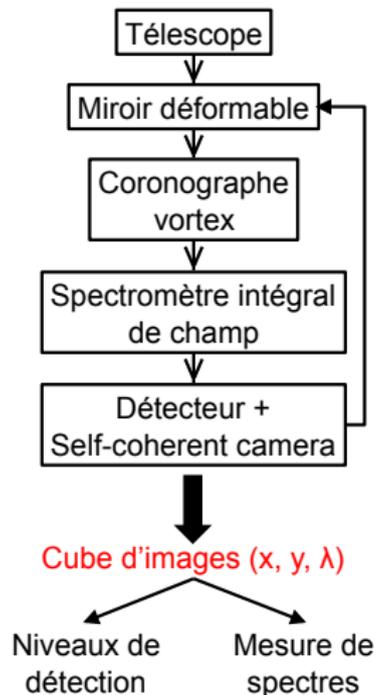
Coronographe ?

Vortex

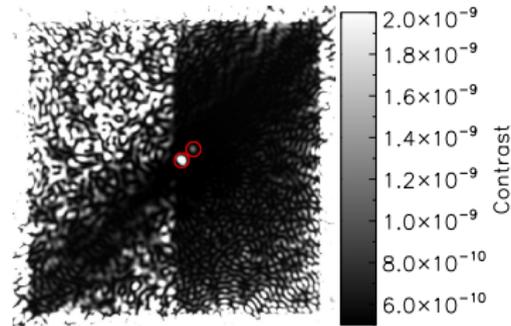
Miroir
déformable ?

Résolution
spectrale ?

Code de simulation instrumentale



- ✓ Aberrations
- ✓ Chromaticité
- ✓ Planète(s)
- ✓ Lumière zodiacale
- ✓ Nuage exozodiacal (bibliothèque ZodiPic)
- ✓ Estimation parfaite aberrations
- ✓ Projection miroir déformable
- ✓ Bruit de photon
- ✓ Bruit de lecture
- ✓ Réponse pixels détecteur



Spécifications hauts niveaux (contrastes 10^{-9} – 10^{-10} à $\sim 0,2''$)

Diamètre du
téléscope ?

1,5 m

Bande
spectrale ?

0,45 – 0,9 μm

Qualité
optique ?

Aberrations 15 nm rms

Étalonnage
des speckles ?

Oui → **Self-coherent
camera**

Téléscope
sans ou avec
obstruction ?

Télescope hors-axe

Spectromètre
intégral de champ ?

Oui

Coronographe ?

Vortex

Miroir
déformable ?

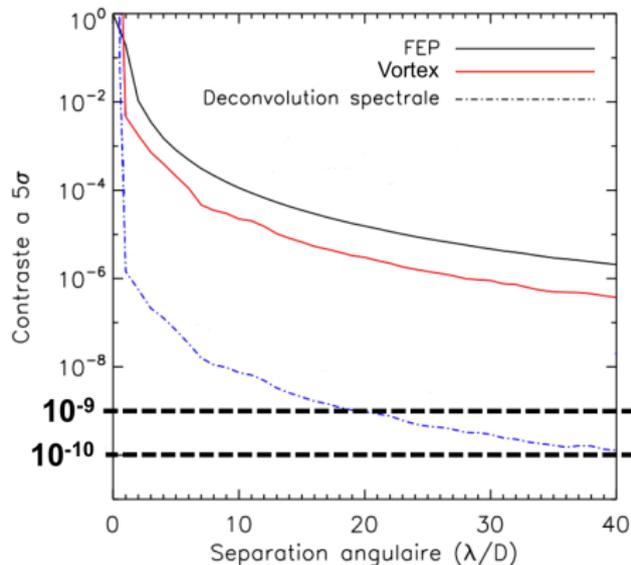
Oui → **64x64**

Résolution
spectrale ?

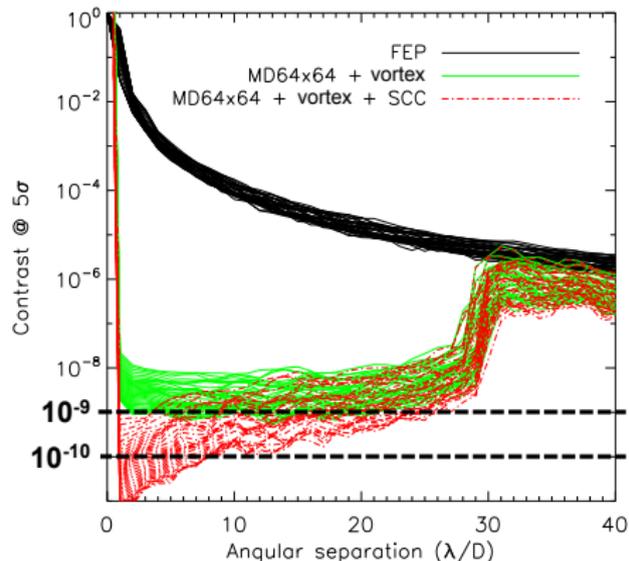
50

Système de contrôle de front d'onde ?

Déconvolution spectrale

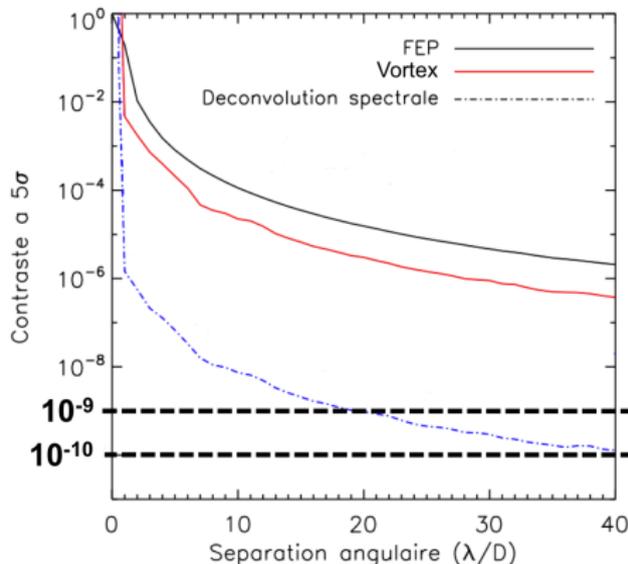


Contrôle front d'onde + imagerie différentielle

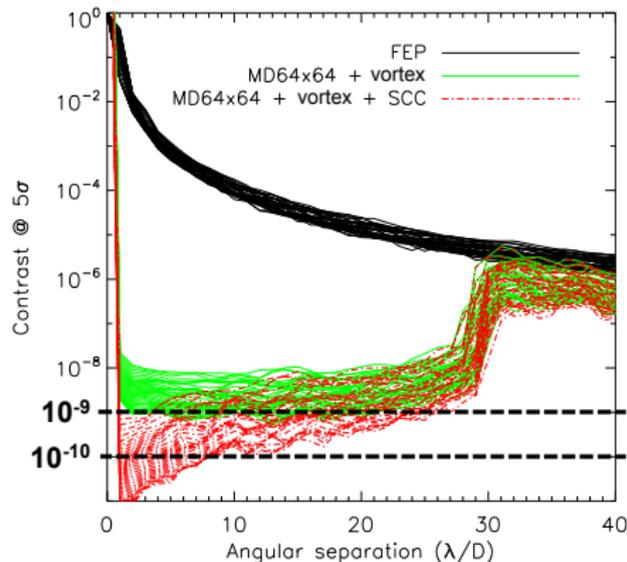


Système de contrôle de front d'onde ?

Déconvolution spectrale



Contrôle front d'onde + imagerie différentielle

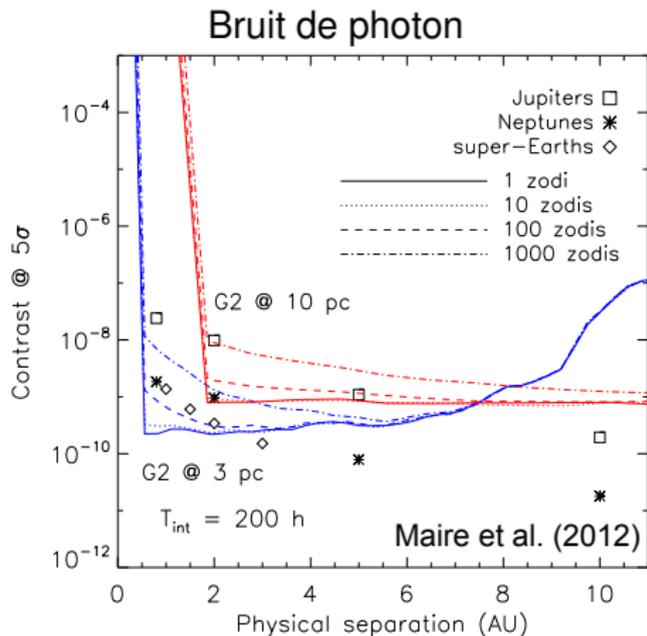
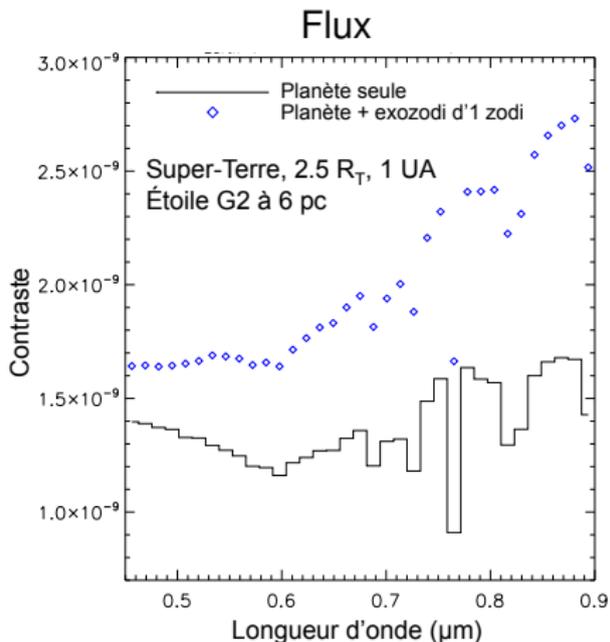


- Seul couplage **vortex + miroir déformable + imagerie différentielle** vérifie contraintes **SPICES**

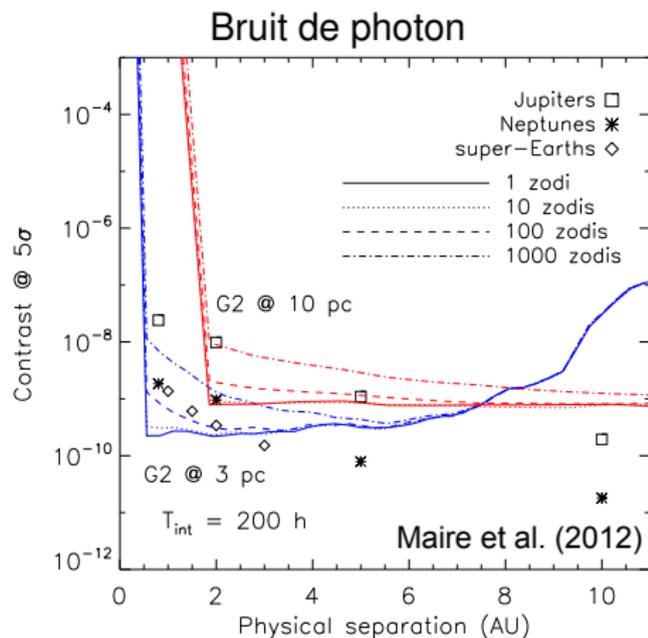
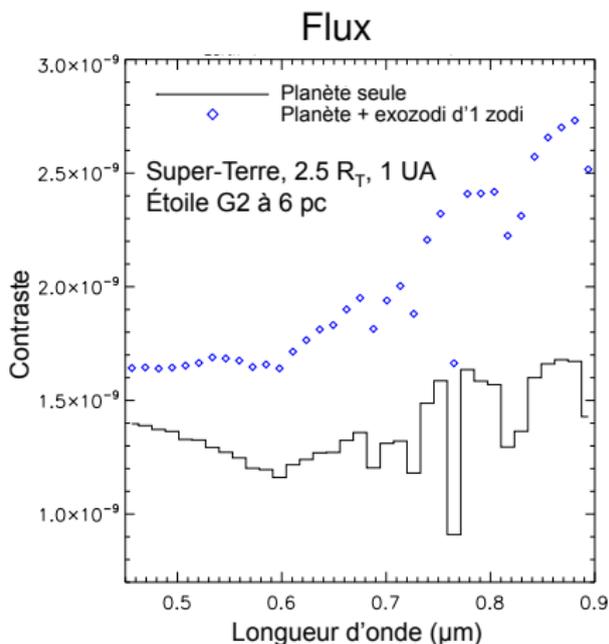
Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 **Simulations numériques des performances de la mission SPICES**
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - **Performances en détection**
 - Performances en caractérisation
- 3 **Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo**
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 **Conclusions & Perspectives**
 - Conclusions
 - Perspectives

Sensibilité à l'intensité du nuage exozodiacal



Sensibilité à l'intensité du nuage exozodiacal



- Étalonnage flux nuage exozodiacal même pour 1 zodi → hypothèse **étalonnage parfait** (au bruit de photon près)
- Cibles SPICES → nuages **quelques 10 zodis**

Flux thermique vs. flux réfléchi

- Flux **thermique** → modèle \sim indépendant séparation étoile-planète
- Flux **réfléchi** → **structure** dépend séparation étoile-planète
- **Modèles planète** pour séparations **discrètes** et **étoile type solaire**
→ conservation flux pour autres types stellaires



5 UA



1,5 UA

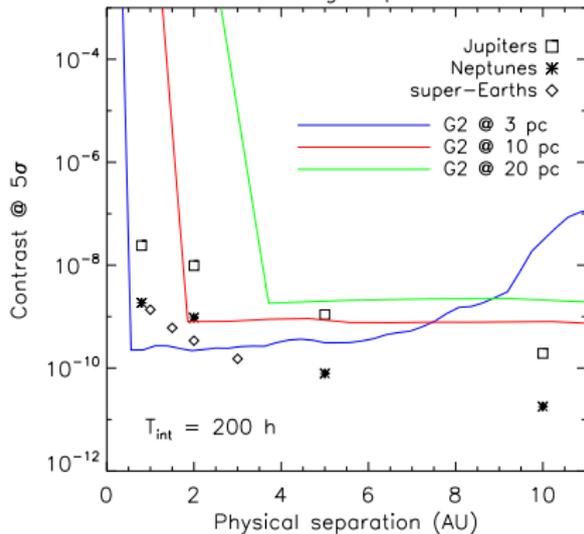


- Modèles Terre 1 UA → flux \propto albédo/séparation² entre 1–3 UA

Sensibilité au type stellaire

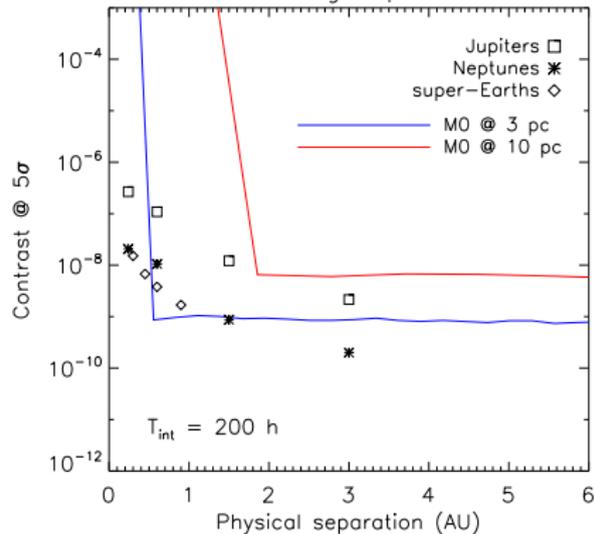
Type G2

λ -averaged profiles



Type M0

λ -averaged profiles



Maire et al. (2012)

- Étoiles G2 $\lesssim 10 \text{ pc}$ → 24 étoiles G (simbad.u-strasbg.fr)
- Étoiles M0 $\lesssim 7,5 \text{ pc}$ → ~100 étoiles M

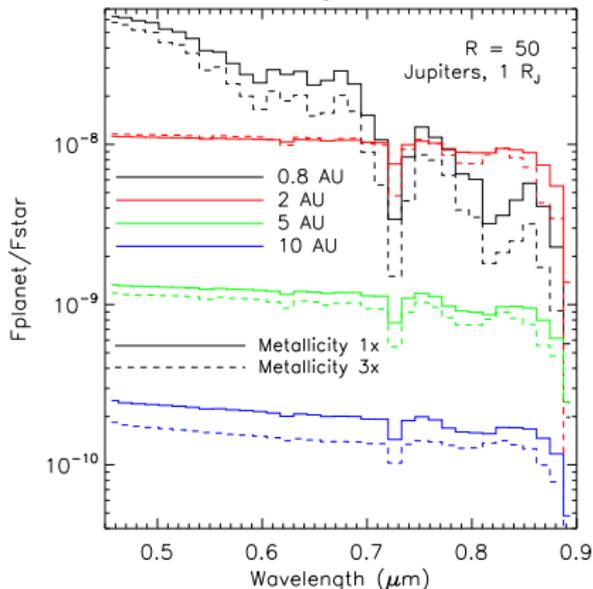
Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - **Performances en caractérisation**
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

Critère de caractérisation

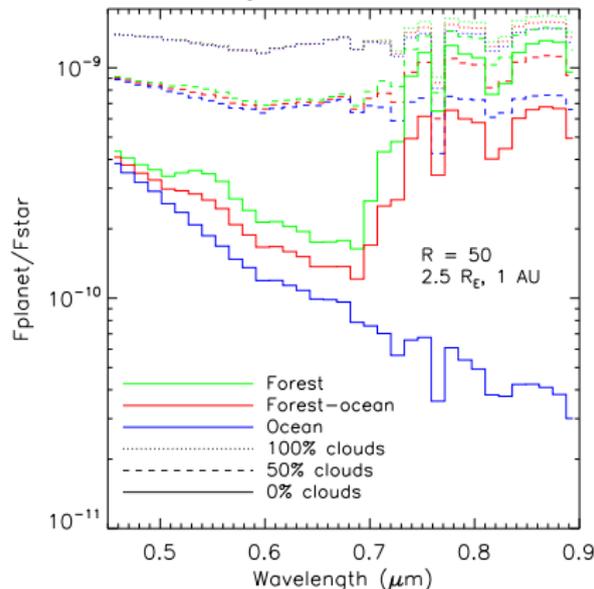
- Rapport signal à bruit tel que différences entre 2 spectres planétaires détectées à N fois bruit de mesure ?

Jupiters



Modèles de Cahoy et al. (2010)

Super-Terres



Modèles de Stam (2008)

Critère de caractérisation

- Rapport signal à bruit tel que différences entre 2 spectres planétaires détectées à N fois bruit de mesure ?

N = 10

Planète	Paramètre	RSB_r
Jupiter	0,8/2 UA	15
Jupiter 0,8 UA	métallicité 1/3×	30
Jupiter 2 UA	métallicité 1/3×	30
Jupiter 5 UA	métallicité 1/3×	30
Neptune	0,8/2 UA	15
Neptune 0,8 UA	métallicité 10/30×	30
Neptune 2 UA	métallicité 10/30×	25
Terre couverte de forêts	0/50/100% nuages	25
Terre couverte d'océans	0/50/100% nuages	25
Terre sans nuages	0/50/100% forêts	12
Terre nuageuse à 50%	0/50/100% forêts	30
Terre nuageuse à 100%	0/50/100% forêts	220

Critère de caractérisation

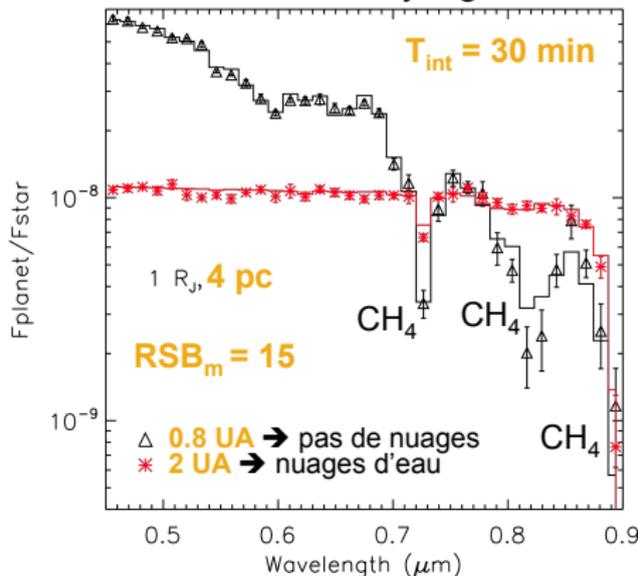
- Rapport signal à bruit tel que différences entre 2 spectres planétaires détectées à N fois bruit de mesure ?

N = 10

	Planète	Paramètre	RSB_r
✘	Jupiter	0,8/2 UA	15
	Jupiter 0,8 UA	métallicité 1/3×	30
✘	Jupiter 2 UA	métallicité 1/3×	30
	Jupiter 5 UA	métallicité 1/3×	30
✘	Neptune	0,8/2 UA	15
	Neptune 0,8 UA	métallicité 10/30×	30
✘	Neptune 2 UA	métallicité 10/30×	25
✘	Terre couverte de forêts	0/50/100% nuages	25
	Terre couverte d'océans	0/50/100% nuages	25
	Terre sans nuages	0/50/100% forêts	12
✘	Terre nuageuse à 50%	0/50/100% forêts	30
	Terre nuageuse à 100%	0/50/100% forêts	220

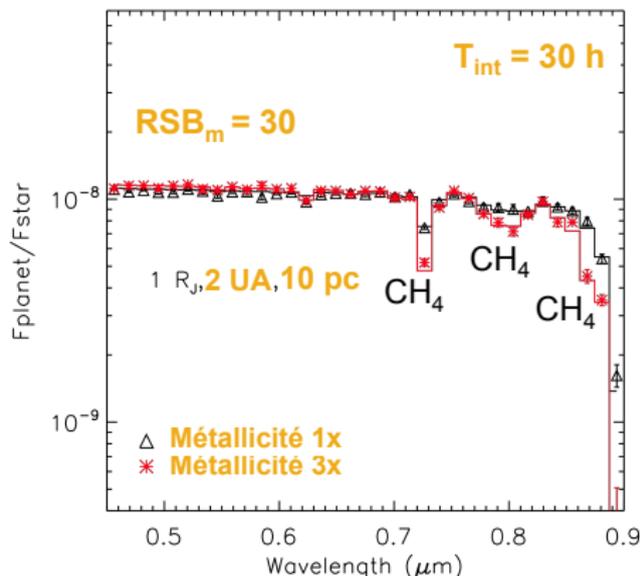
Planètes géantes gazeuses

Diffusion Rayleigh



Maire et al. (2012)

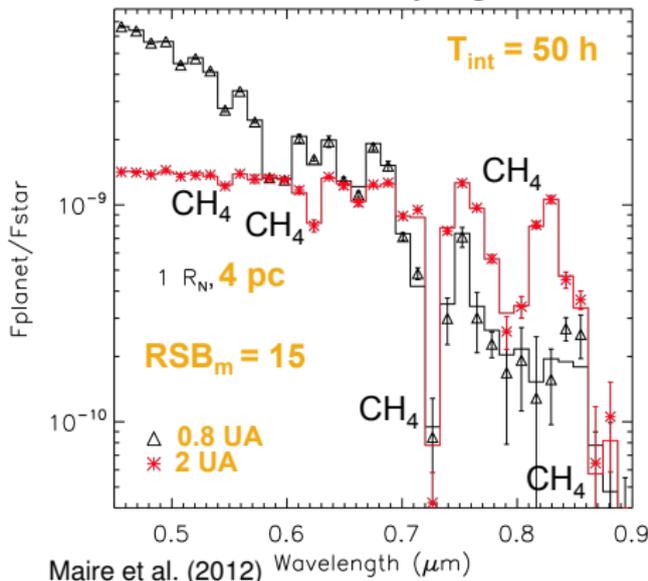
Métallicité



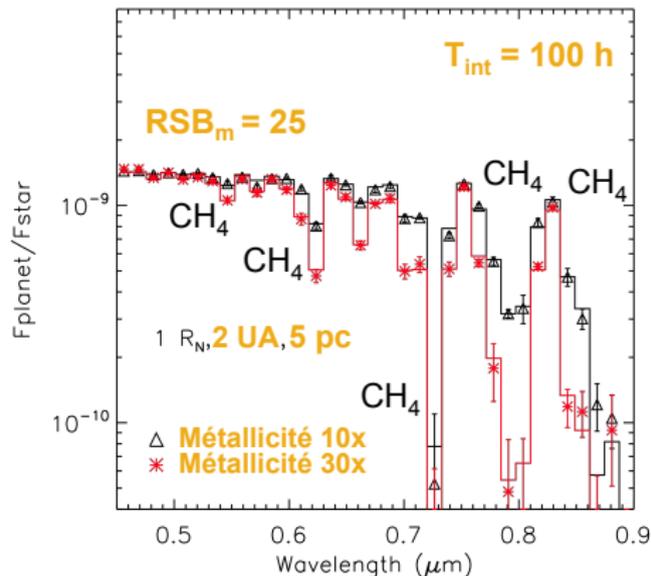
- Mesures pour tous systèmes étoiles G2 discernables angulairement

Planètes géantes glacées

Diffusion Rayleigh



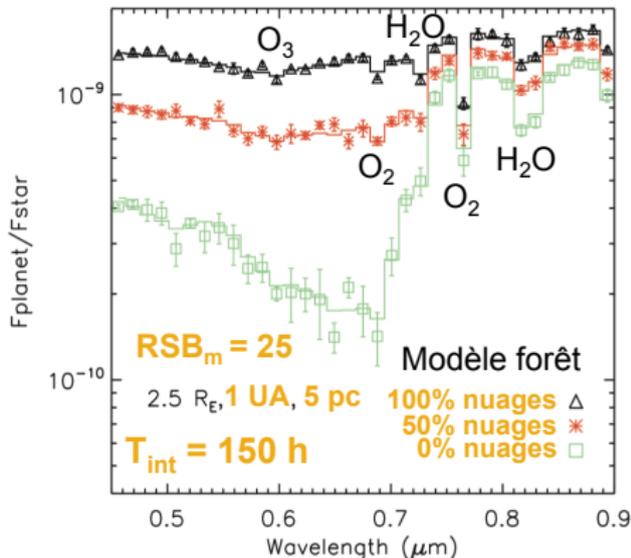
Métallicité



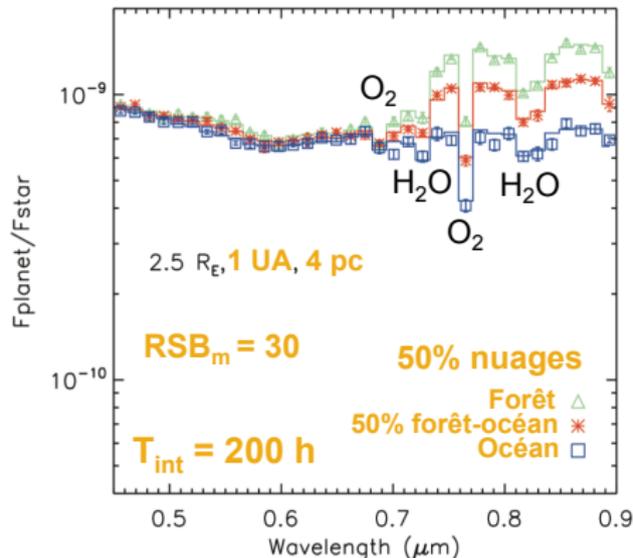
- Diffusion Rayleigh mesurable pour **toutes cibles discernables angulairement**
- Facteurs métallicité ≥ 3 analysables pour **cibles $\lesssim 6 \text{ pc}$**

Super-Terres

Couverture nuageuse



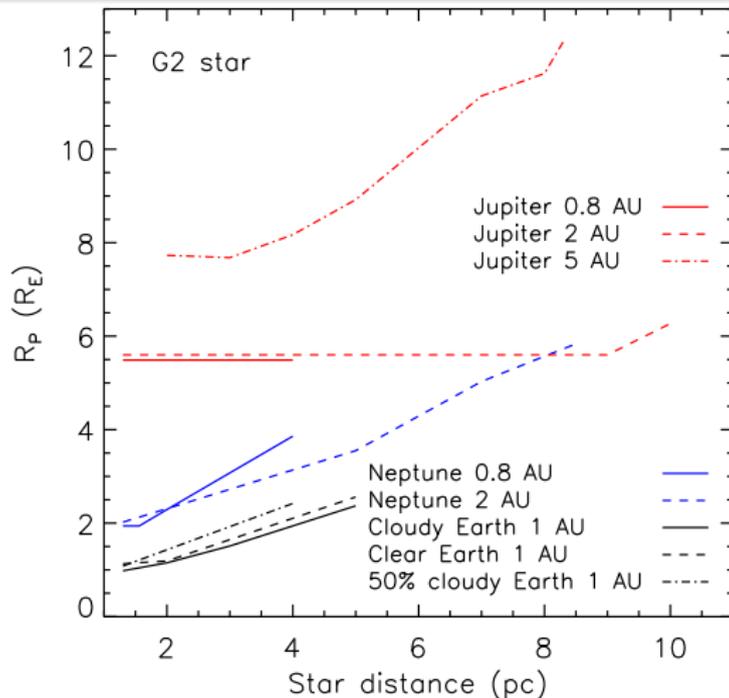
Type de surface



Maire et al. (2012)

- Nuages planètes forêts \rightarrow toutes cibles discernables angulairement
- Surface planètes 50% nuages \rightarrow distances $\leq 4 \text{ pc}$

Cibles potentielles



Maire et al. (2012)

- Étoiles G2 ≤ 10 pc \rightarrow 24 étoiles G (simbad.u-strasbg.fr)
- Tous types stellaires \rightarrow \sim 300 étoiles

Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

L'instrument VLT/NaCo

- **NaCo** → depuis 2001
 - **Optique adaptative** NAOS + **caméra IR** CONICA
 - Imagerie, spectroscopie, etc + filtres spectraux
 - **Exoplanètes** :
 - ✓ **coronographe quatre quadrants** (FQPM)
 - ✓ **imagerie différentielle angulaire & spectrale** (ADI & SDI)
 - modes combinés dans **SPHERE** (2013)



L'instrument VLT/NaCo

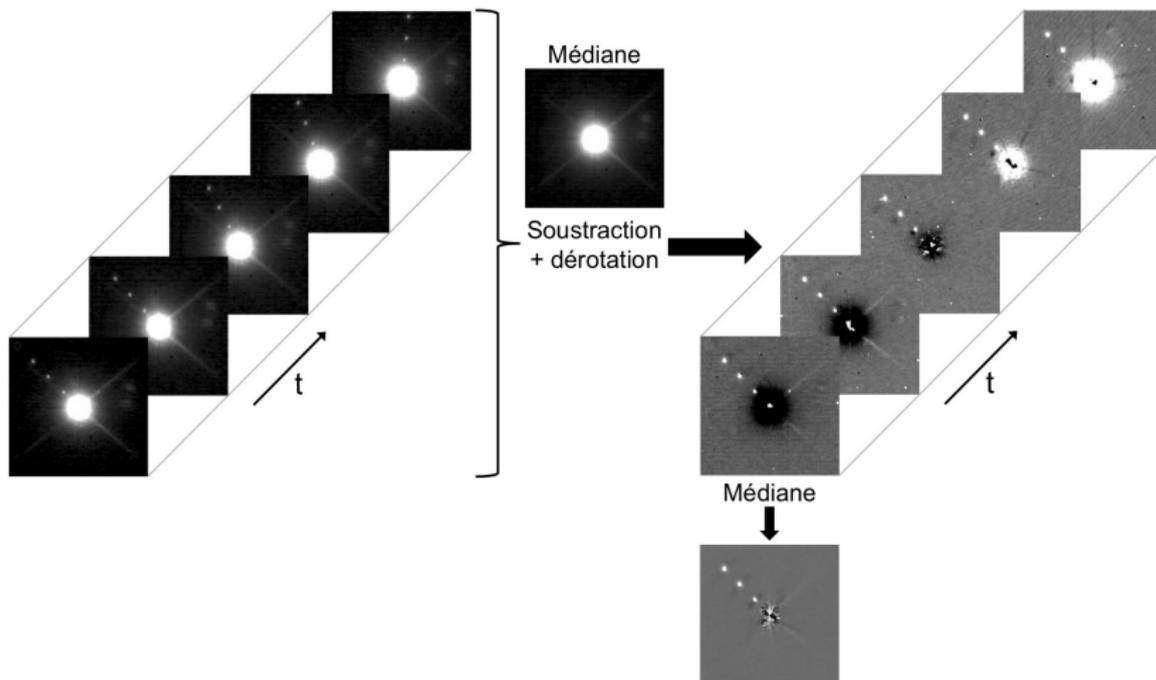
- **NaCo** → depuis 2001
 - **Optique adaptative** NAOS + **caméra IR** CONICA
 - Imagerie, spectroscopie, etc + filtres spectraux
 - **Exoplanètes** :
 - ✓ **coronographe quatre quadrants** (FQPM)
 - ✓ **imagerie différentielle angulaire & spectrale** (ADI & SDI)
- modes combinés dans **SPHERE** (2013)



- 1 - Détecter **planètes géantes jeunes** ($\lesssim 200$ Ma) étoiles **proches** ($\lesssim 25$ pc)
- 2 - Préparer **analyse** et **interprétation données SDI** SPHERE

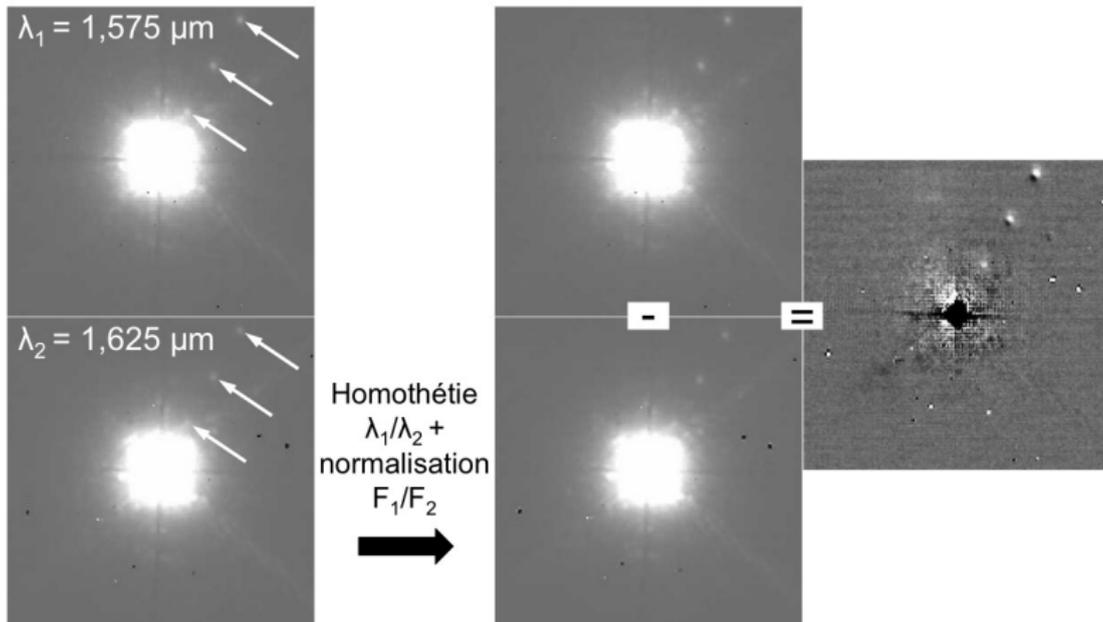
ADI (Marois et al. 2006)

- Imagerie différentielle = soustraire image étoile seule
- Angulaire = **rotation** champ de vue



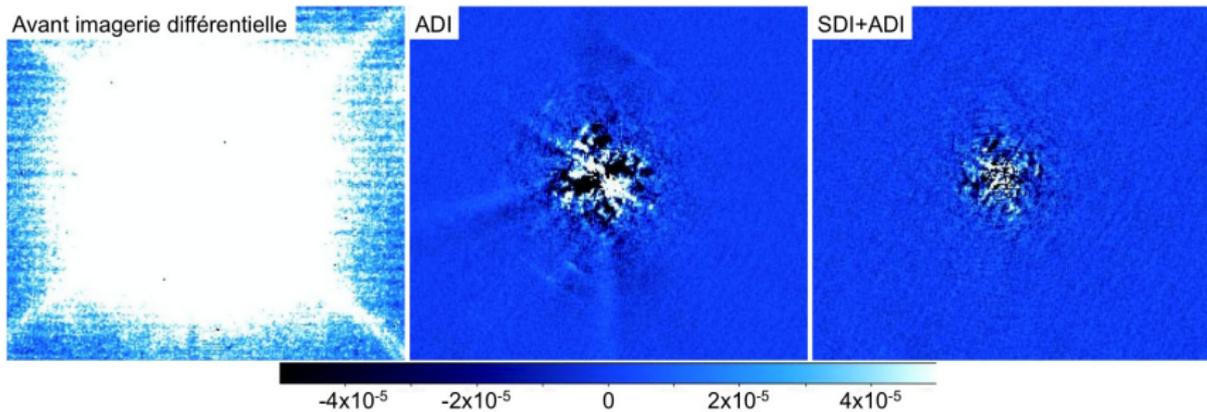
SDI (Racine et al. 1999)

- Imagerie différentielle = soustraire image étoile seule
- Spectrale = **différences** spectres étoile-planète → planète = objet froid
 → bandes CH₄ ~ 1,6 μm pour T ≲ 1300 K



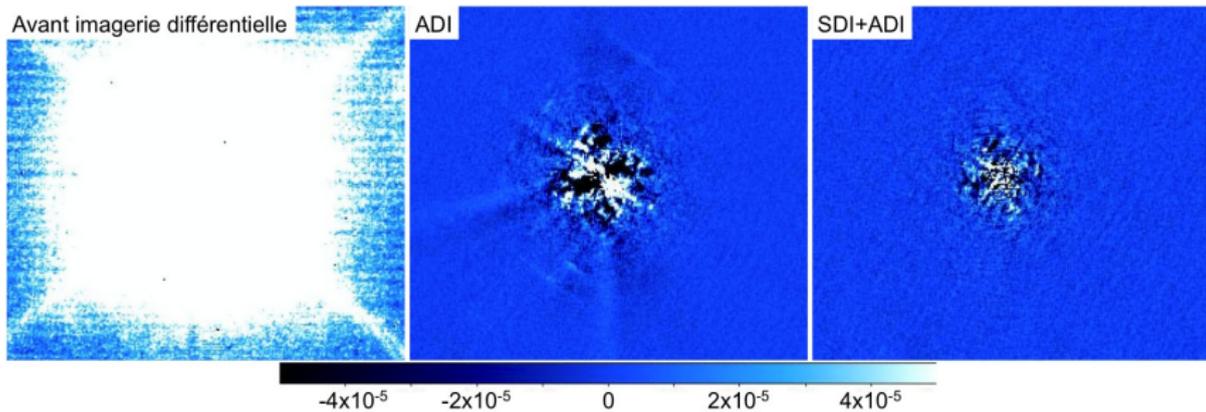
Pourquoi combiner FQPM+SDI+ADI ?

- Chercher compagnons faibles proches d'étoiles
 - Bruit de **photon** → **coronagraphie**
 - Bruit de **speckles** → **imagerie différentielle**
 - Limitation ADI : **speckles non statiques**
 - Une solution :
 - 1 **SDI** → **speckles "rapides" + "lents"**
 - 2 **ADI** → **speckles "lents"**



Pourquoi combiner FQPM+SDI+ADI ?

- Chercher compagnons faibles proches d'étoiles
 - Bruit de **photon** → **coronagraphie**
 - Bruit de **speckles** → **imagerie différentielle**
 - Limitation ADI : **speckles non statiques**
 - Une solution :
 - 1 **SDI** → **speckles "rapides" + "lents"**
 - 2 **ADI** → **speckles "lents"**

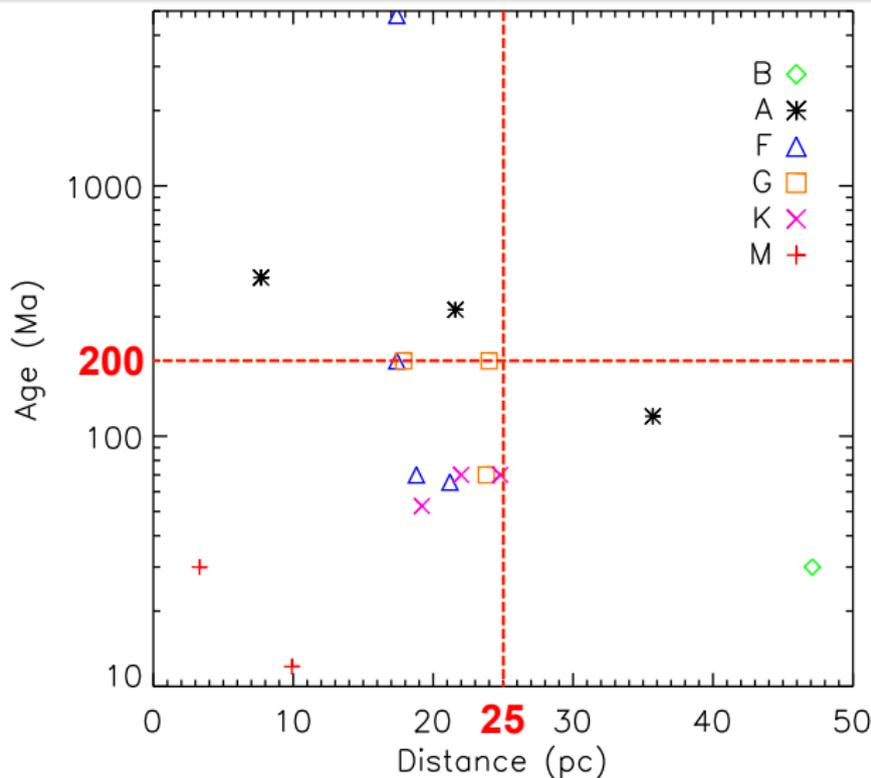


3 - Rechercher planètes **séparations proches** → $\sim 5-10$ UA

Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - **Réduction des données**
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

Propriétés des étoiles observées

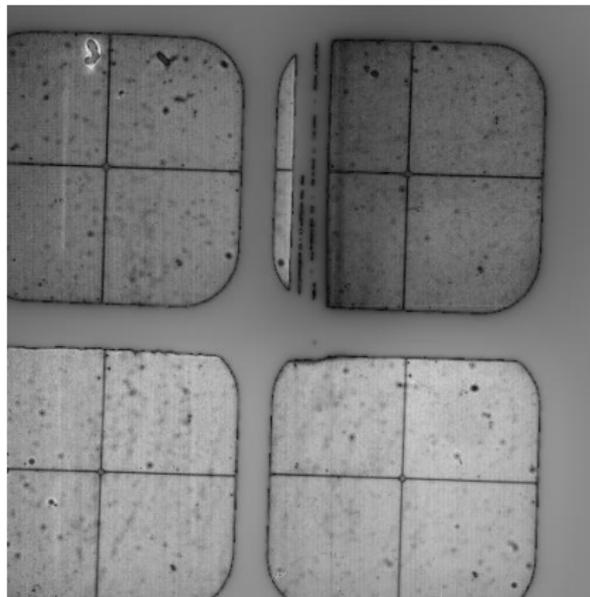


Chaîne de réduction des données

- Pré-traitement
 - Pixels morts
 - Réponse éléments optiques
 - Sélection
 - Co-addition
 - Fond de ciel
 - Sélection
 - Séparation λ
 - Recentrage
- Imagerie différentielle
 - Algorithme SDI
 - Algorithme ADI
 - Niveau de détection
 - Atténuation points sources hors-axe

Chaîne de réduction des données

- Pré-traitement
 - Pixels morts
 - Réponse éléments optiques
 - Sélection
 - Co-addition
 - Fond de ciel
 - Sélection
 - Séparation λ
 - Recentrage
- Imagerie différentielle
 - Algorithme SDI
 - Algorithme ADI
 - Niveau de détection
 - Atténuation points sources hors-axe



Chaîne de réduction des données

- Pré-traitement

- Pixels morts
- Réponse éléments optiques
- Sélection
- Co-addition
- Fond de ciel
- Sélection
- Séparation λ
- Recentrage

- Imagerie différentielle

- Algorithme SDI
- Algorithme ADI
- Niveau de détection
- Atténuation points sources hors-axe

Sélection 2 étapes

- 1 - Optique adaptative (semi-)ouverte
- 2 - Statistique flux

Chaîne de réduction des données

● Pré-traitement

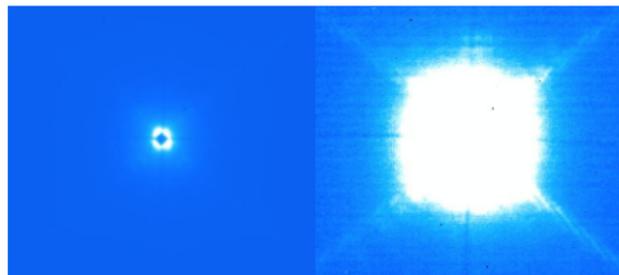
- Pixels morts
- Réponse éléments optiques
- Sélection
- Co-addition
- Fond de ciel
- Sélection
- Séparation λ
- **Recentrage**

● Imagerie différentielle

- Algorithme SDI
- Algorithme ADI
- Niveau de détection
- Atténuation points sources hors-axe

Critères de recentrage

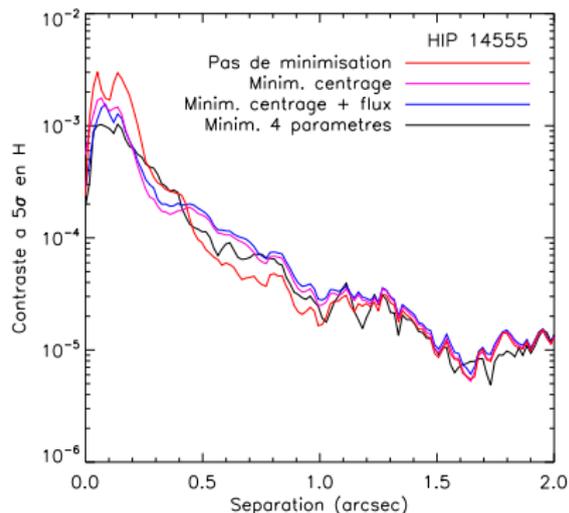
- Seuillage
- Forme zone de calcul
- Araignées télescope



Chaîne de réduction des données

- Pré-traitement
 - Pixels morts
 - Réponse éléments optiques
 - Sélection
 - Co-addition
 - Fond de ciel
 - Sélection
 - Séparation λ
 - Recentrage
- Imagerie différentielle
 - **Algorithme SDI**
 - Algorithme ADI
 - Niveau de détection
 - Atténuation points sources hors-axe

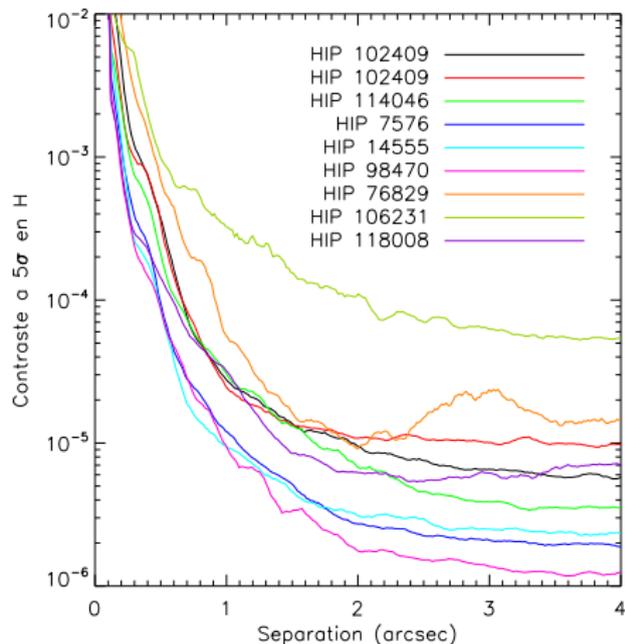
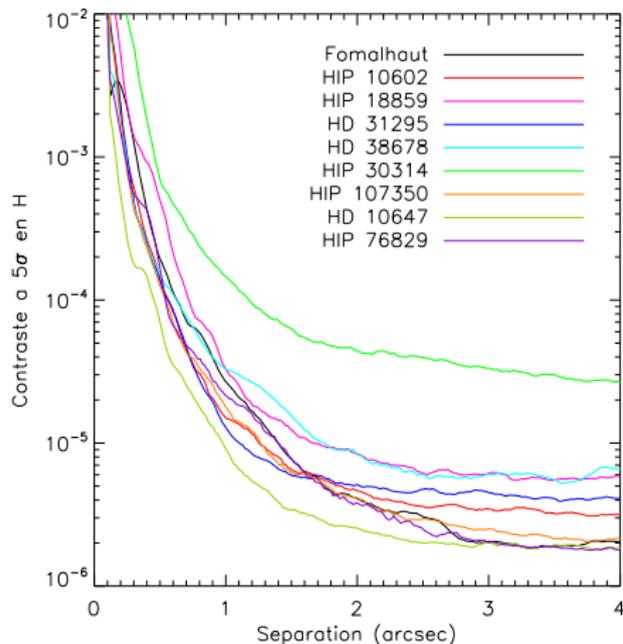
Algorithmes SDI



Plan de la présentation

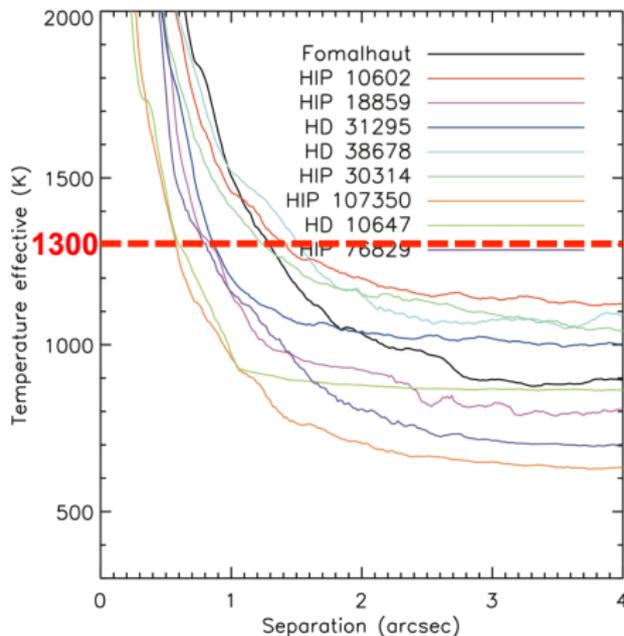
- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - **Limites de sensibilité ADI**
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

Niveaux de détection à 5σ

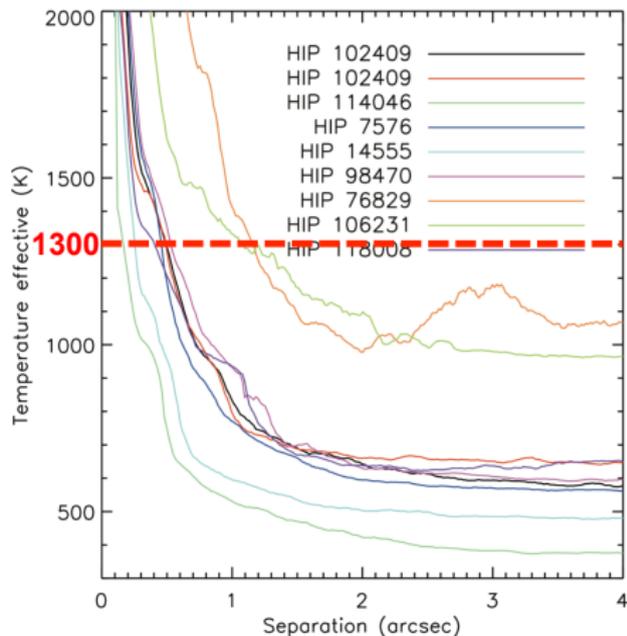


Correction atténuation ADI

Température effective de compagnons détectables

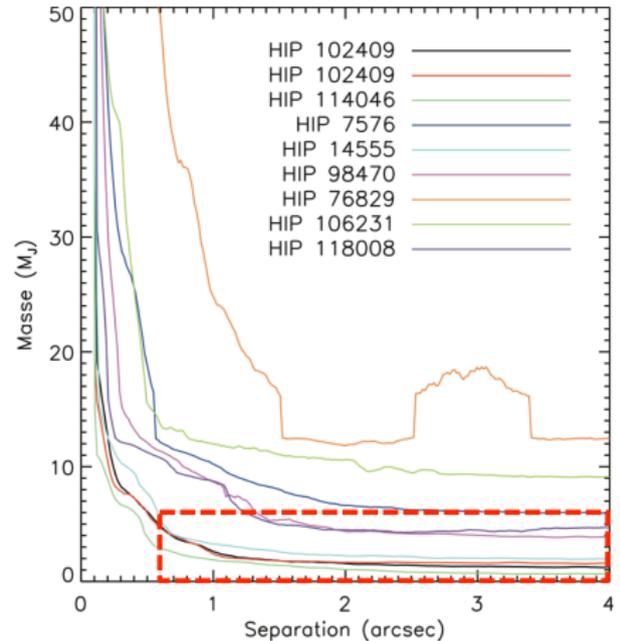
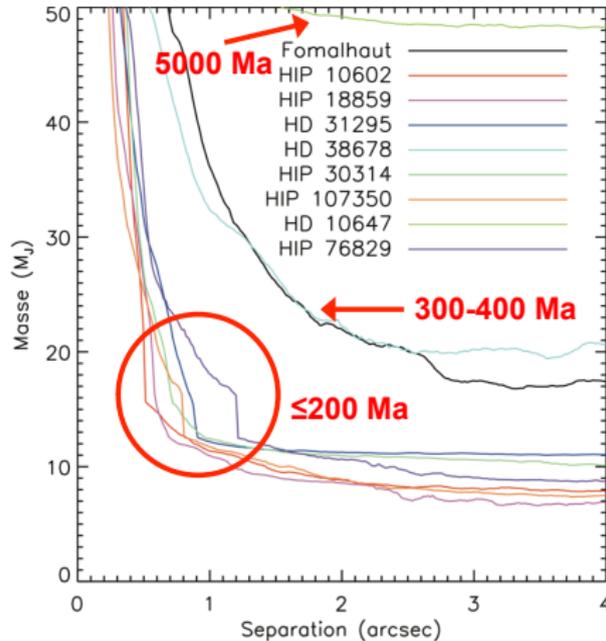


Modèles BT-SETTL (Allard et al. 2010)



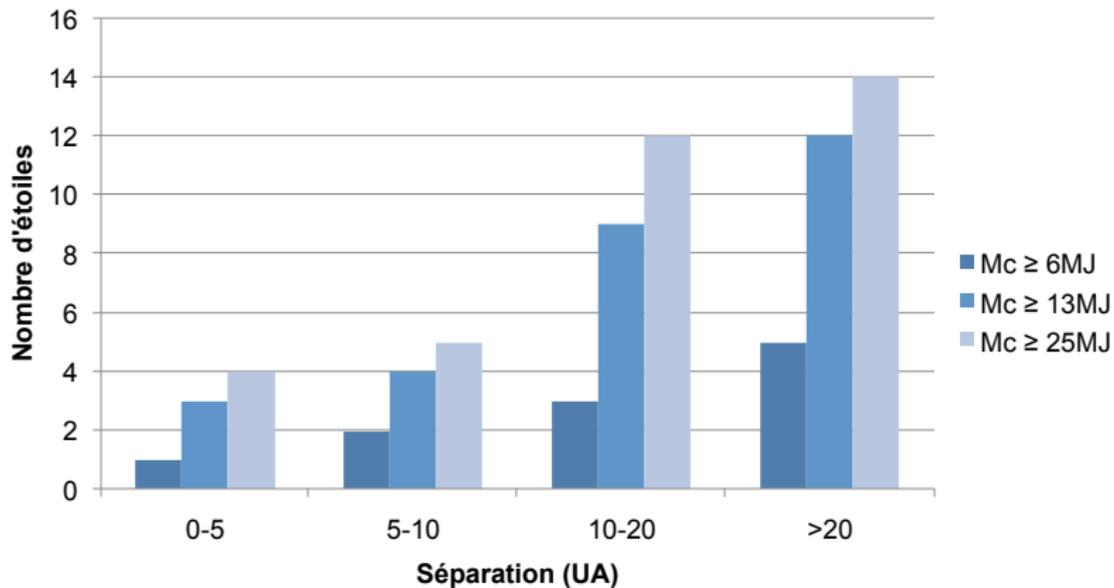
$T < 1300$ K pour toutes les étoiles (0,3–1,5'') → intérêt SDI

Masse de compagnons détectables



Modèles BT-SETTL (Allard et al. 2010)

Masse de compagnons vs. séparation



Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - **Limites de sensibilité SDI+ADI**
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

Difficultés de l'interprétation des flux SDI

$$F_{\text{SDI}} = F_1 - F_2 \times \alpha \times \phi \quad (\text{J. Rameau, rapport de stage de Master 2})$$

F_1 : flux résidus image filtre 1

F_2 : flux résidus image filtre 2

α : Mise à l'échelle intensité

ϕ : Atténuation mise à l'échelle spatiale

- Dépendance propriétés spectrales planète → **planètes synthétiques**
pour **limites de sensibilité**

Difficultés de l'interprétation des flux SDI

$$F_{\text{SDI}} = F_1 - F_2 \times \alpha \times \phi \quad (\text{J. Rameau, rapport de stage de Master 2})$$

F_1 : flux résidus image filtre 1

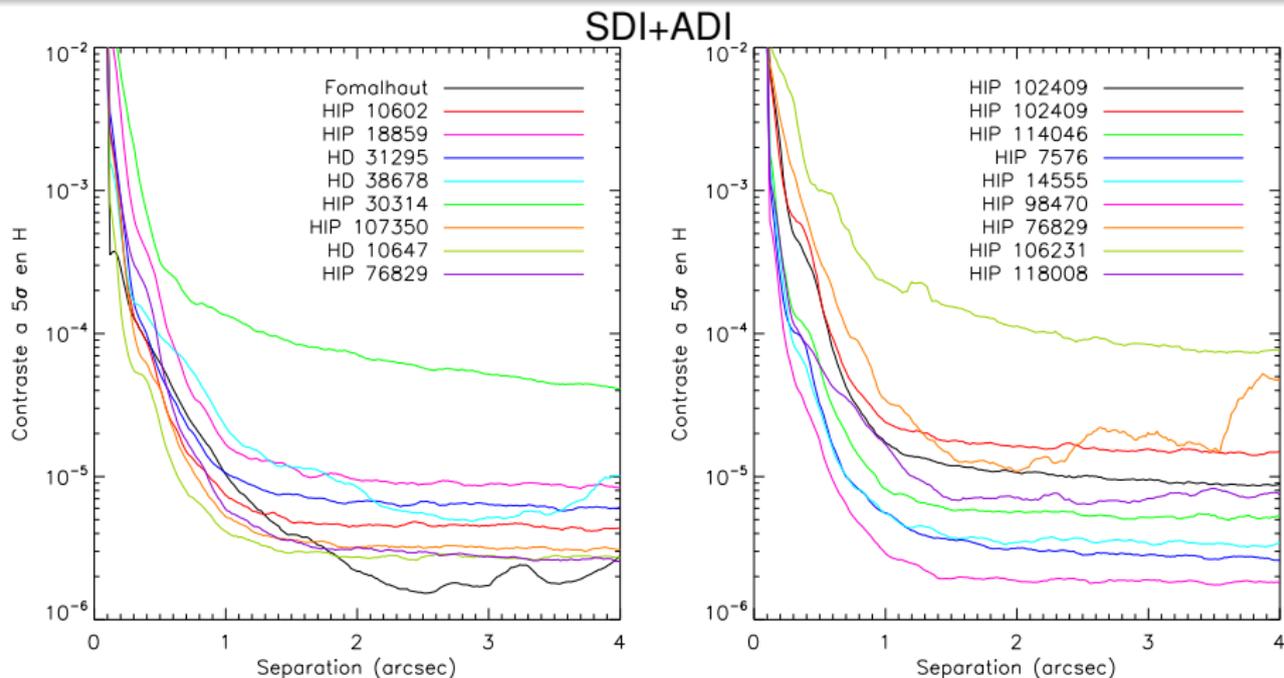
F_2 : flux résidus image filtre 2

α : Mise à l'échelle intensité

ϕ : Atténuation mise à l'échelle spatiale

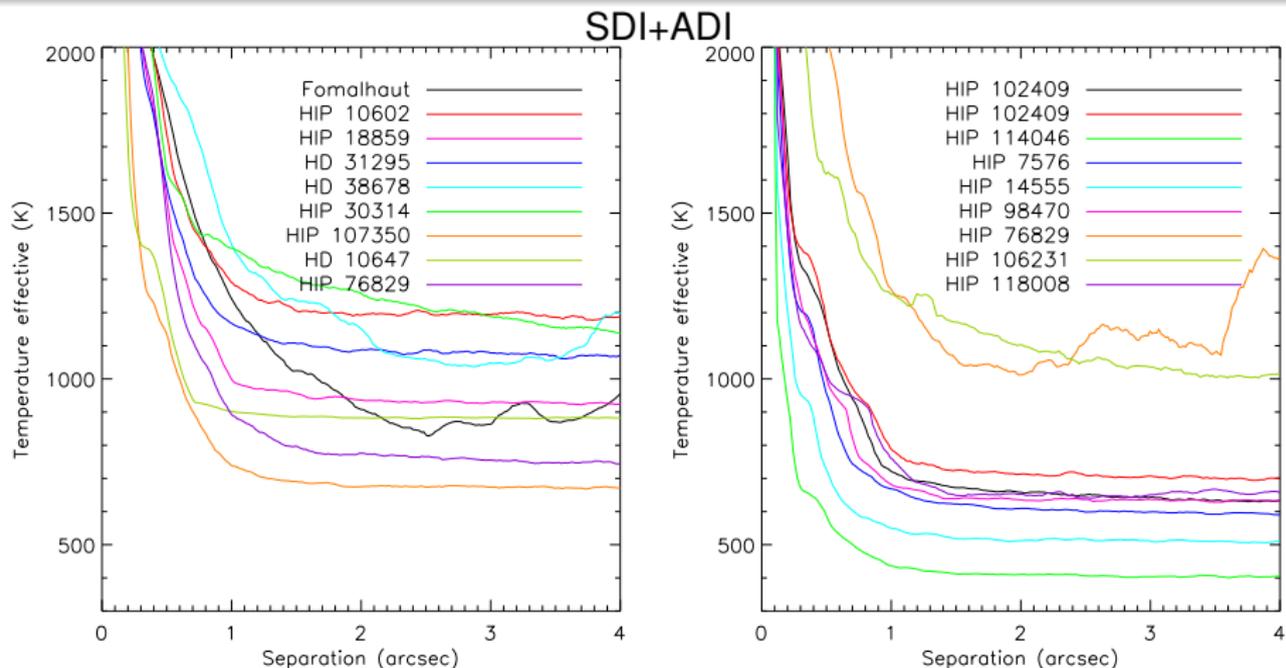
- Dépendance propriétés spectrales planète → **planètes synthétiques** pour **limites de sensibilité**
- Modèles photométrie SDI pour $M \gtrsim 10 M_J$ → **non applicable à toutes les étoiles**
- Hypothèse optimiste $F_2 \ll F_1$ → **performances optimales**

Niveaux de détection à 5σ



- $\leq 0,4''$: contrastes / 5–10 \rightarrow gain magnitude 1,8–2,5
- $\sim 1''$: contrastes / 3–4 \rightarrow gain magnitude 1,2–1,5

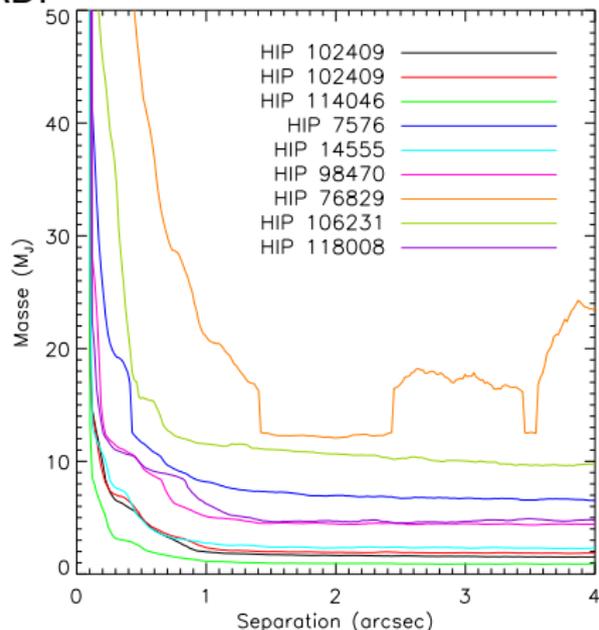
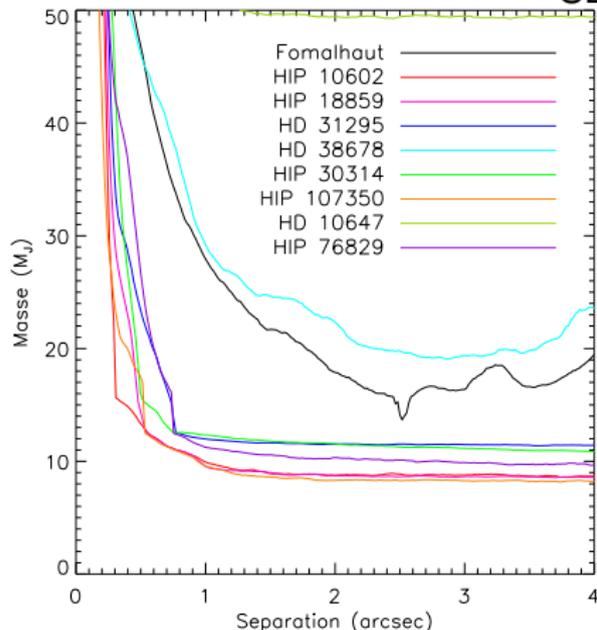
Température effective de compagnons détectables



- $\sim 0,45''$: $T \leq 1300$ K pour **50%** cibles vs. **22%** en ADI
- $\sim 1''$: $T \leq 1300$ K pour **85%** cibles vs. **66%** en ADI

Masse de compagnons détectables

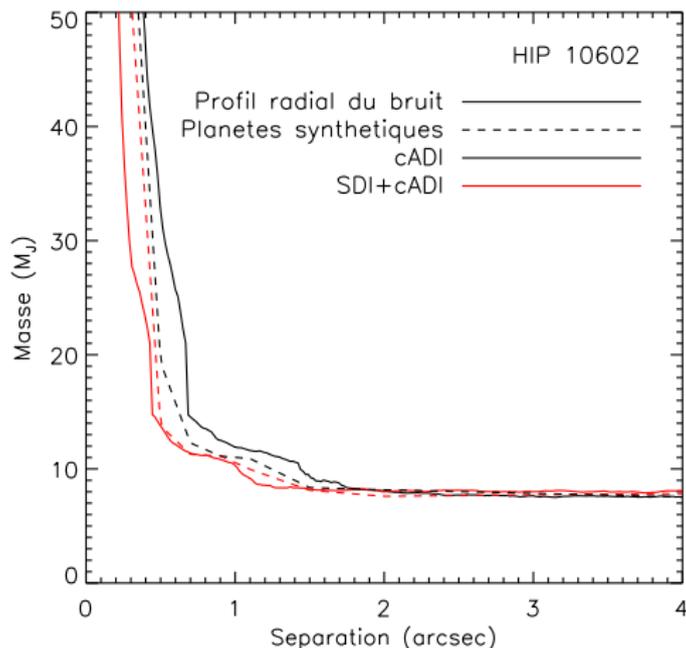
SDI+ADI



Modèles BT-SETTL (Allard et al. 2010)

- $\sim 0,45''$: gain résolution angulaire $0,3-0,35''$
- $M = 13 M_J \lesssim 0,8''$ vs. $\lesssim 1,25''$ pour étoiles ≤ 200 Ma

Performances réelles du traitement SDI+ADI



Modèles DUSTY (Chabrier et al. 2000)

- Gain SDI+ADI **plus faible** qu'avec hypothèse optimiste

Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

Conclusions

- Performance scientifique mission SPICES Maire et al. (2012), A&A
 - **Spécifications** sous-systèmes critiques instrument
 - Performances **caractérisation** : **RSB = 25–30** pour $R = 50$
 - Exoplanétologie possible sur ~ 300 systèmes planétaires
 - Caractérisation **Jupiters** $\sim 0,25\text{--}7$ UA
 - **Molécule** CH₄, **diffusion Rayleigh**, facteurs **métallicité** ≥ 3
 - Caractérisation **super-Terres** $\sim 0,25\text{--}2$ UA
 - **Molécules** H₂O, O₂, O₃ + **végétation** ($\lesssim 50\%$ nuages) + **océan**
- Analyse données imagerie FQPM+SDI+ADI VLT/NaCo
 - Pas de planètes détectées
 - **Contribution** sur code de réduction
 - Limites de détection **ADI** $\rightarrow 10^{-4}\text{--}10^{-5}$ à $0,5\text{--}1''$ $\rightarrow 30\text{--}20 M_J$ à $5\text{--}10$ UA
 - Limites de détection **SDI+ADI** \rightarrow besoin **analyse différente**

Plan de la présentation

- 1 Contexte
 - Les exoplanètes
 - Caractérisations physique et atmosphérique
 - Imagerie directe
- 2 Simulations numériques des performances de la mission SPICES
 - Contexte et objectifs du travail
 - Simulation du concept instrumental
 - Performances en détection
 - Performances en caractérisation
- 3 Analyse de données d'imagerie VLT/NaCo
 - L'instrument VLT/NaCo et le programme d'observation
 - Réduction des données
 - Limites de sensibilité ADI
 - Limites de sensibilité SDI+ADI
- 4 Conclusions & Perspectives
 - Conclusions
 - Perspectives

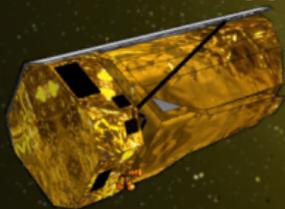
Perspectives

- **Télescope coronographique spatial**
 - Préparation **prochain appel d'offres** ESA (2013/2014 ?)
 - Amélioration **code de simulation**
 - **Autres objectifs scientifiques** (polarimétrie planètes, disques circumstellaires)
 - **Autres projets** (TPF-C, 50 cm Canada)
- **Instruments imagerie sol**
 - **Niveaux détection SDI+ADI** de **toutes les étoiles**
 - **Différents algorithmes ADI** (LOCI, KLIP)
 - Analyse **statistique** → contraintes **propriétés** planètes longue période
 - **Étoiles catalogue SPHERE**

Merci

Thank you

Obrigada



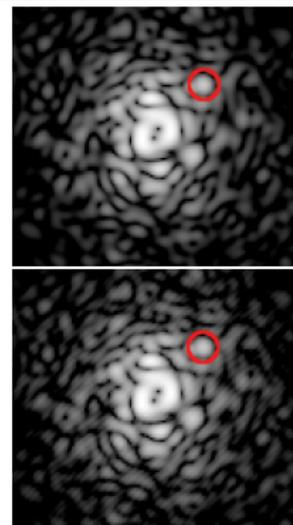
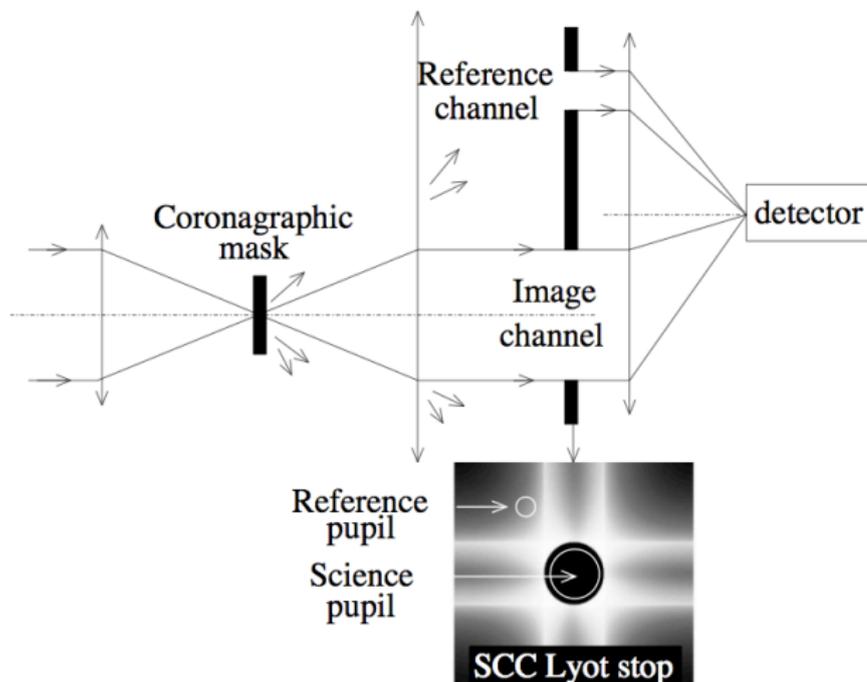
Gracias

Dank u

谢谢

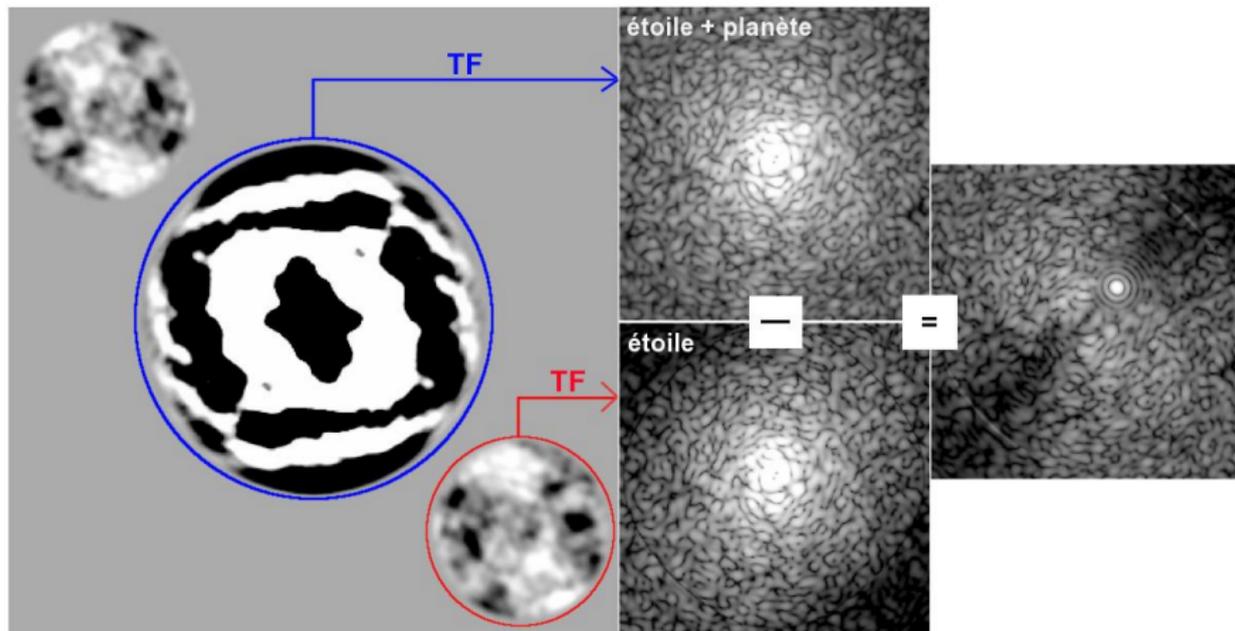


Principe de la self-coherent camera (SCC)



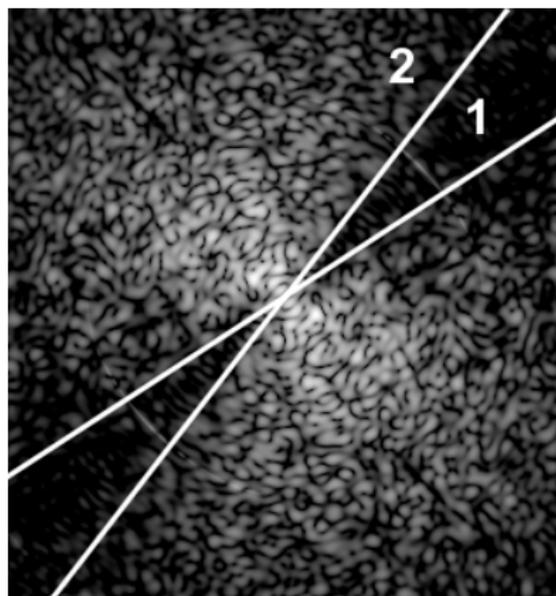
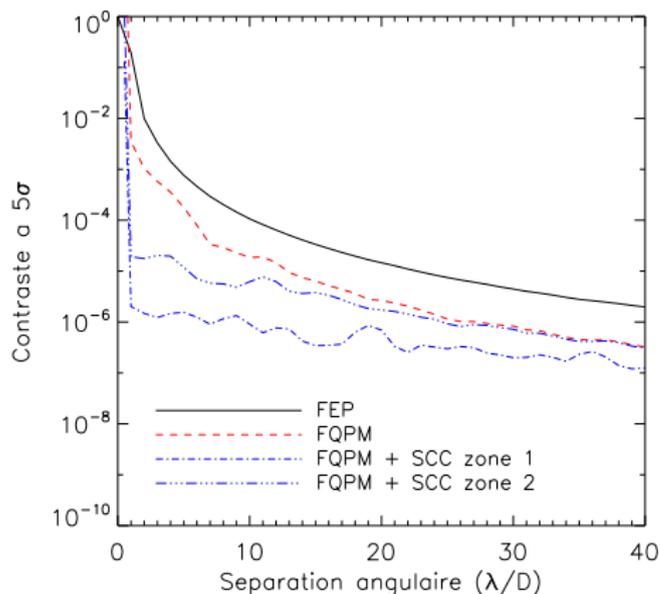
Baudoz et al. (2006), Galicher et al. (2008, 2010)

Estimation SCC aberrations et compagnons

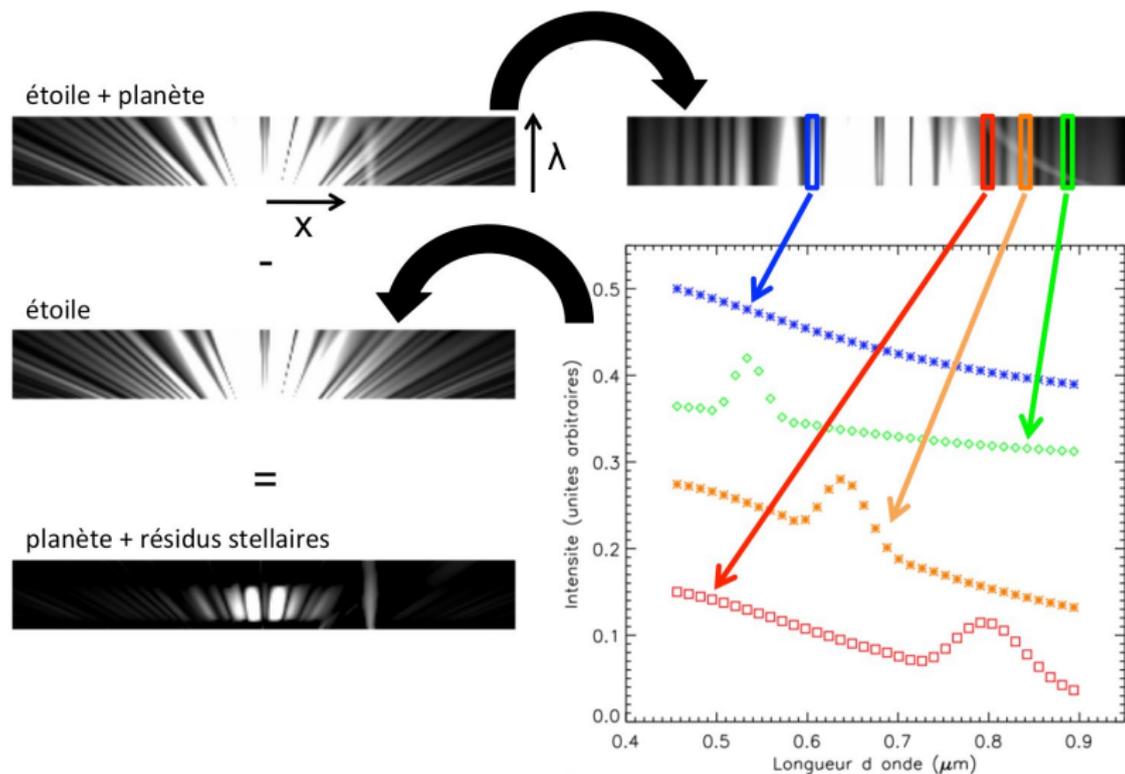


Baudoz et al. (2006), Galicher et al. (2008, 2010)

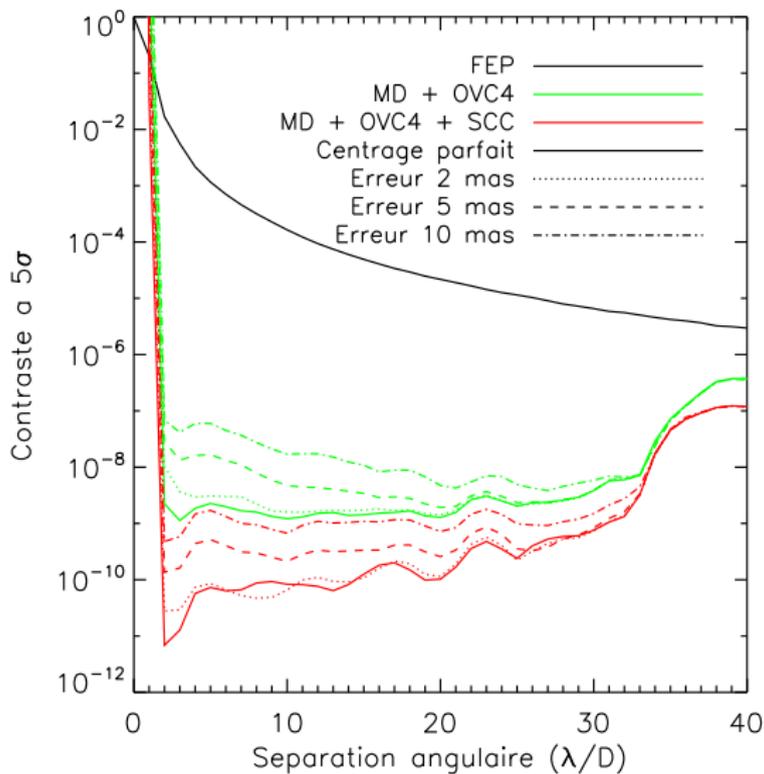
Performances imagerie différentielle SCC



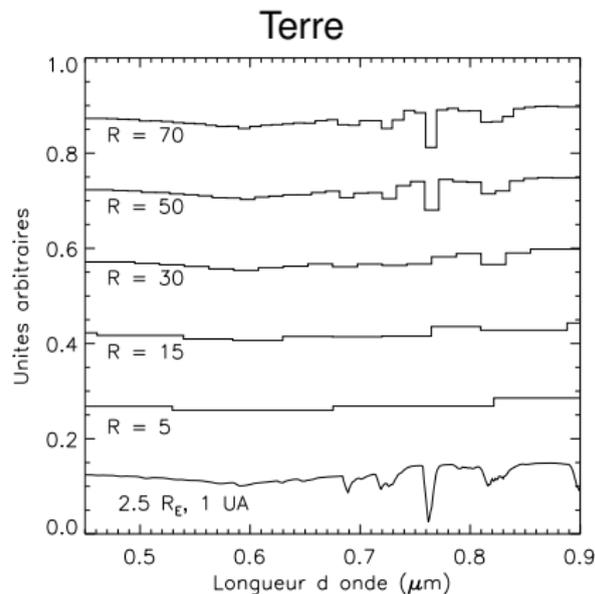
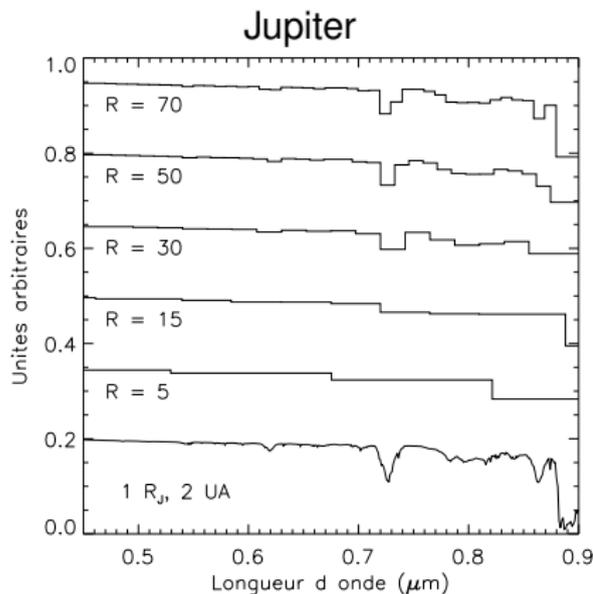
Déconvolution spectrale (Sparks & Ford 2002)



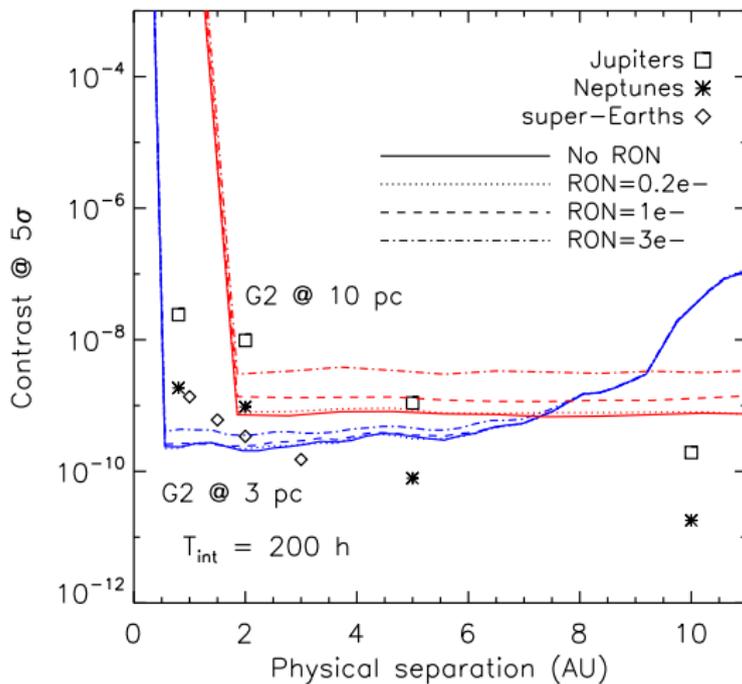
Erreur de pointage du télescope



Bande et résolution spectrales



Impact du bruit de lecture



Critère de caractérisation

- Rapport signal à bruit tel que les différences entre deux spectres planétaires soient détectées à $N \sigma$?

$$crit_i = \text{mediane}_\lambda \left(\frac{|S(\lambda) - M_i(\lambda)|}{B(\lambda)} \right)$$

$crit_i$: critère S : spectre mesuré

M_i : modèle d'indice i , $i = 1, 2, \dots, N$

B : bruit de mesure, $B = S/RSB$

$$RSB_r = crit_i \times \frac{1}{\text{mediane}_\lambda \left(\frac{|M_1(\lambda) - M_2(\lambda)|}{M_1(\lambda)} \right)}$$

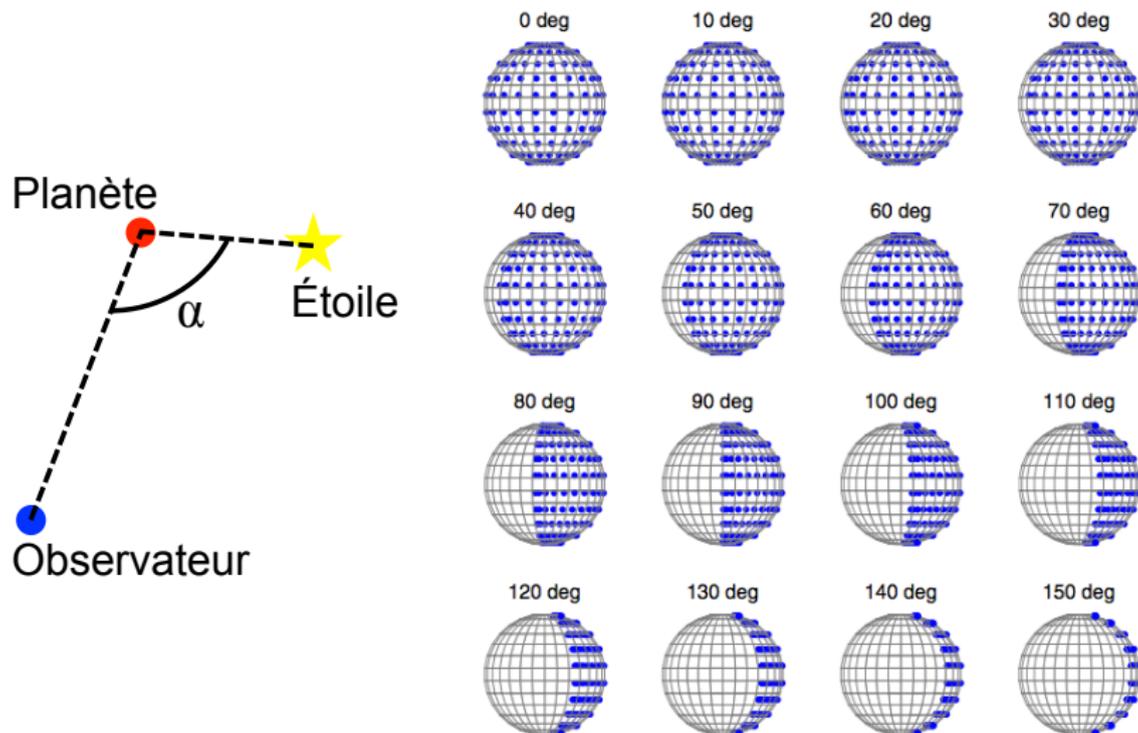
Critère de caractérisation

- Rapport signal à bruit tel que les différences entre deux spectres planétaires soient détectées à $N \sigma$?

N = 10

Planète	Paramètre	RSB_r	Région spectrale
Jupiter	0,8/2 UA	15	
Jupiter 0,8 UA	métallicité 1/3×	30	
Jupiter 2 UA	métallicité 1/3×	30	bandes du CH ₄
Jupiter 5 UA	métallicité 1/3×	30	bandes du CH ₄
Neptune	0,8/2 UA	15	
Neptune 0,8 UA	métallicité 10/30×	30	
Neptune 2 UA	métallicité 10/30×	25	bandes du CH ₄
Terre couverte de forêts	0/50/100% nuages	25	bande bleu
Terre couverte d'océans	0/50/100% nuages	25	
Terre sans nuages	0/50/100% forêts	12	bande rouge
Terre nuageuse à 50%	0/50/100% forêts	30	bande rouge
Terre nuageuse à 100%	0/50/100% forêts	220	bande rouge

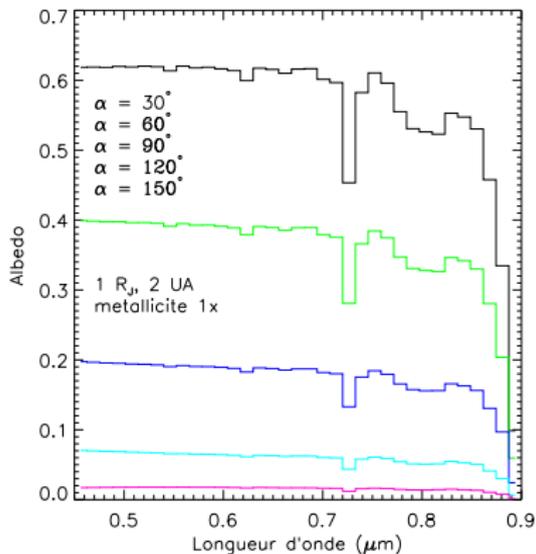
Angle de phase



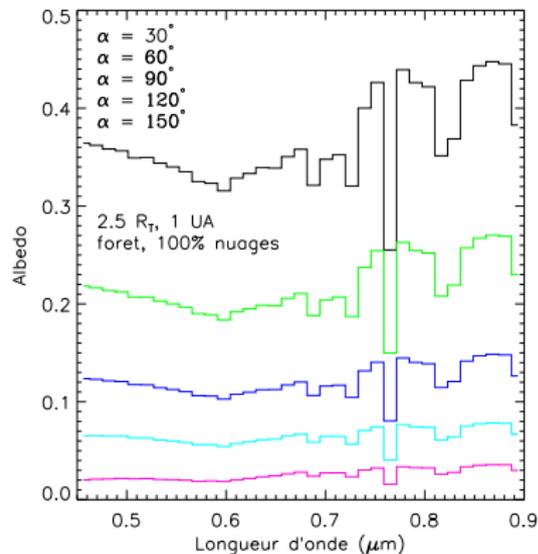
Cahoy et al. (2010)

Spectre vs. angle de phase

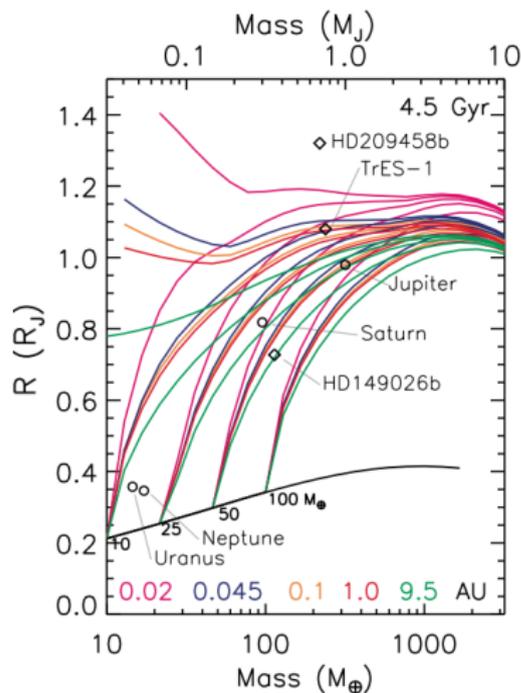
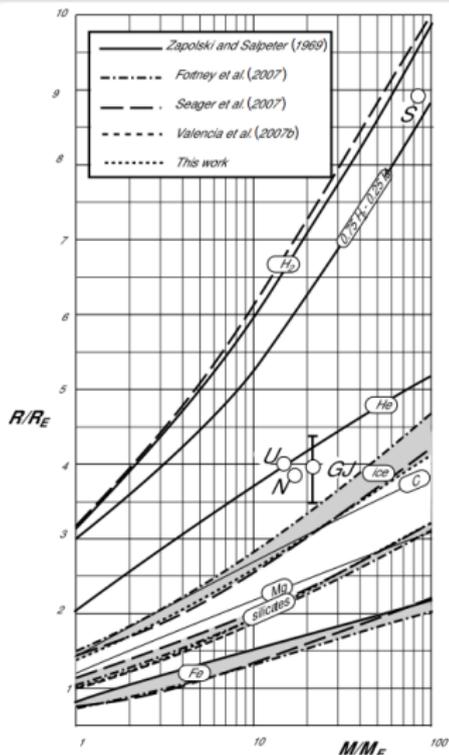
Jupiter



super-Terre



Relations masse-rayon théoriques



Grasset et al. (2009), Fortney et al. (2007)

Présentation des données

Nom	SpT	d (pc)	Âge (Ma)	m_H	Date d'observation	Mode	$\Delta\theta$ ($^\circ$)	Seeing ($''$)
HIP 76829	F5	17,4	200^{+100}_{-50}	3,73	20-08-2010	ASDI-4 [†]	8	0,86
HIP 98470	F7	21,2	65,5	4,64	20-08-2010	ASDI-4	102	1,03
HIP 107350	G0	17,9	200^{+100}_{-50}	4,60	20-08-2010	ASDI-4	35	0,70
HIP 118008	K2	22,0	70^{+50}_{-20}	6,00	20-08-2010	ASDI	72	1,05
HD 10647	F9	17,4	4800^{+2200}_{-2200}	4,40	20-08-2010	ASDI-4	48	0,92
HIP 76829	F5	17,4	200^{+100}_{-50}	3,73	21-08-2010	ASDI-4	15	0,83
HIP 102409	M1	9,9	12^{+3}_{-2}	4,83	21-08-2010	ASDI-4	$26+18^{\ddagger}$	1,30
HIP 106231	K5-7	24,8	70^{+50}_{-20}	6,52	21-08-2010	ASDI-4	10	1,83
HIP 114046	M2	3,3	$30^{+29,9}_{-15}$	3,61	21-08-2010	ASDI-4	94	1,26
HIP 7576	G5	24,0	200^{+100}_{-50}	5,90	21-08-2010	ASDI-4	31	1,02
HIP 14555	K8	19,2	$52,6^{+52,7}_{-26,3}$	6,58	21-08-2010	ASDI-4	66	1,16
HIP 10602	B8	47,1	30^{+10}_{-5}	3,95	18-12-2010	ASDI-4	41	0,92
HIP 18859	F6	18,8	70^{+50}_{-20}	4,34	18-12-2010	ASDI-4	41	0,85
HD 31295	A0	35,7	120	4,52	19-12-2010	ASDI-4	32	1,40
HD 38678	A2	21,6	320^{+180}_{-120}	3,31	19-12-2010	ASDI	62	1,39
HIP 30314	G1	23,8	70^{+50}_{-20}	5,16	19-12-2010	ASDI-4	15	1,70
Fomalhaut	A4	7,7	430^{+50}_{-50}	0,94	09-10-2011	ASDI	155	0,85

† : Mode champ de vue fixe par rapport au détecteur.

‡ : Étoile observée en deux séquences.