



Observatoire
de Paris



UNIVERSITÉ
PARIS
SCIENCES
& LETTRES

Le Roman Space Telescope : préparer la première image d'une autre Terre.



Lukas Delaye | Doctorant en 1^{ère} année au LIRA
Supervisé par Johan Mazoyer et Axel Potier.



ACADÉMIE SPATIALE
D'ÎLE-DE-FRANCE



FESTIVAL
ASTRONOMIE
FLANDBRE

Petite présentation !



- En première année de thèse à l'observatoire de Paris, sur le site de Meudon au **LIRA** (*Laboratoire d'Instrumentation et de Recherche en Astrophysique*).
- Je travaille sur l'imagerie directe d'exoplanètes, pour le prochain télescope spatial « *Roman Space Telescope* ».
- Je m'intéresse aux **algorithmes optiques** pour détecter de nouvelles planètes en améliorant nos performances.



Le plan...



1. L'imagerie directe, l'idée intuitive qui demande de relever de grands défis.
2. Premières techniques et photographies de l'histoire.
3. Comment réussir à battre les étoiles.
4. Un rêve : photographier une Terre, chercher des signes de vie.



1. L'imagerie directe, l'idée intuitive qui demande de relever de grands défis.

Comment photographier une exoplanète ?



Luciole ?

Et si on
tentait une
photo en
contre-jour,
drôle d'idée ?



Exoplanète ?

Comment photographier une exoplanète ?



Luciole



Et lorsqu'on
coupe la
lumière...

Exoplanète

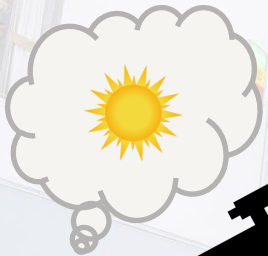
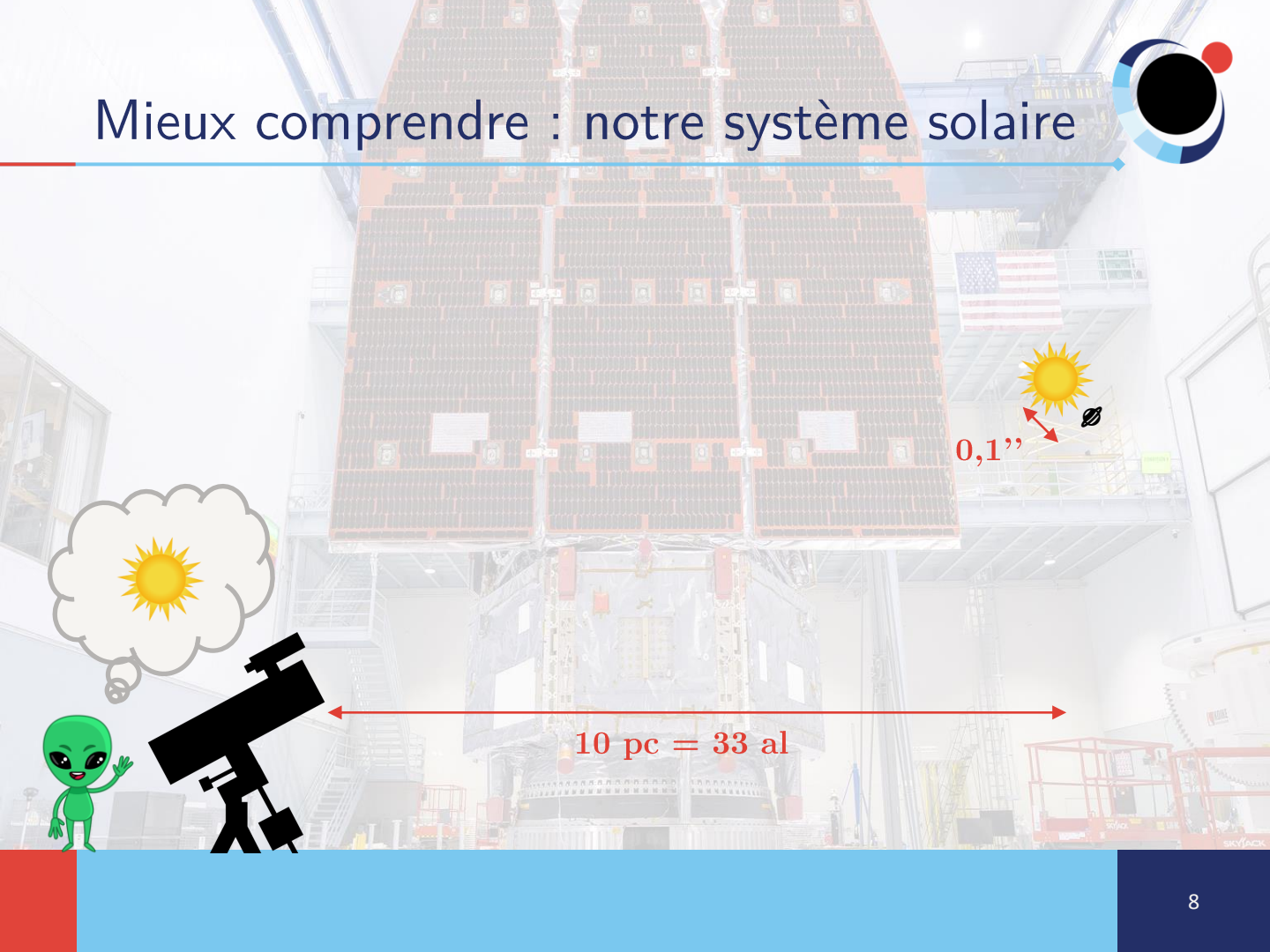


Comment photographier une exoplanète ?



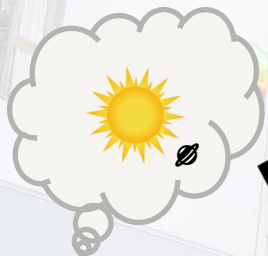
Photographier une exoplanète autour de son étoile = photographier une luciole très très proche d'un phare !
Pas simple...

Mieux comprendre : notre système solaire



10 pc = 33 al

Mieux comprendre : notre système solaire

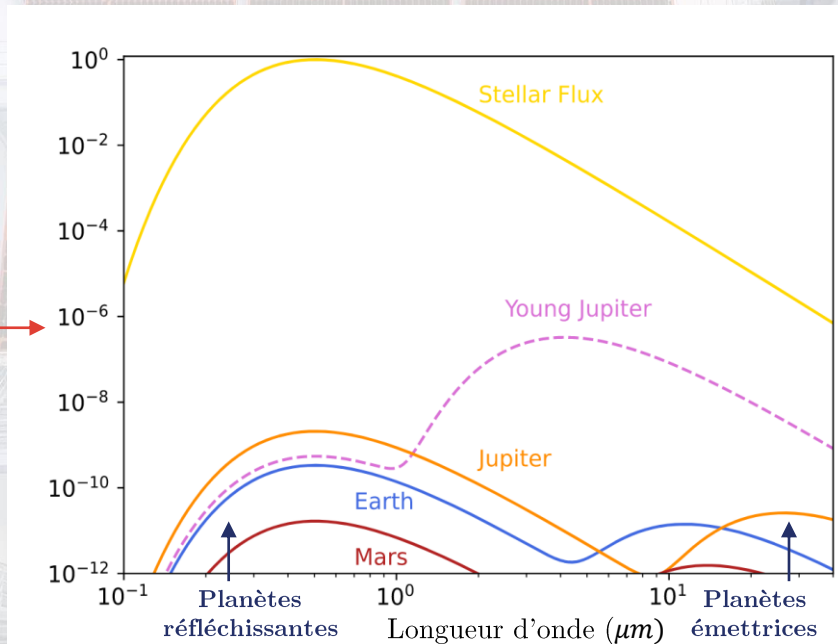


$D > 2/3\text{m}$ en visible-IR

Mieux comprendre : notre système solaire



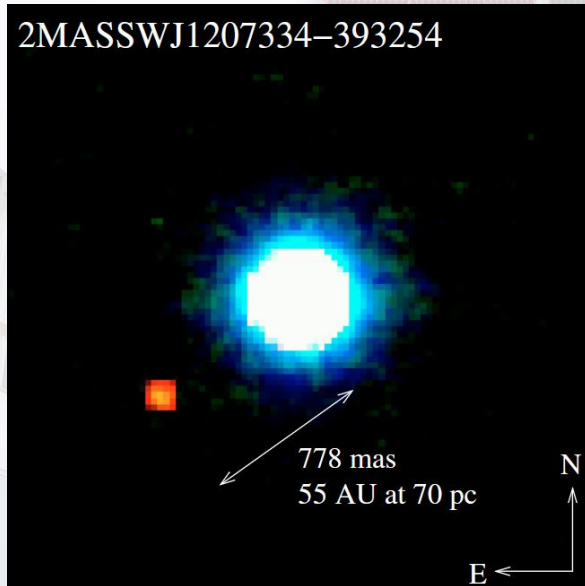
“Contraste”



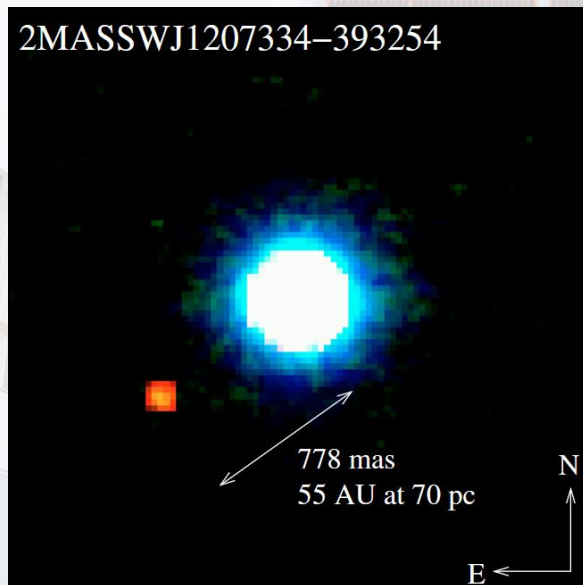


2. Premières techniques et photographies de l'histoire.

La première image, il y a plus de 20 ans !



La première image, il y a plus de 20 ans !



- Planète géante ($5 M_J$) autour d'une naine brune ($25 M_J$).
- La planète est assez loin et brille bien comparé à l'étoile (« que » 100 fois moins) pour être distinguable.

Comment éteindre cette lumière ?

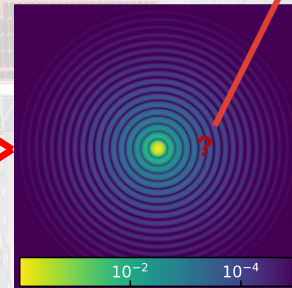
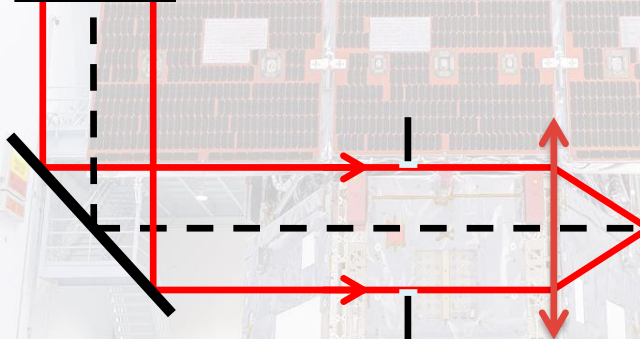


Pupille du
téléscope



Dans un monde idéal...

Planète ?



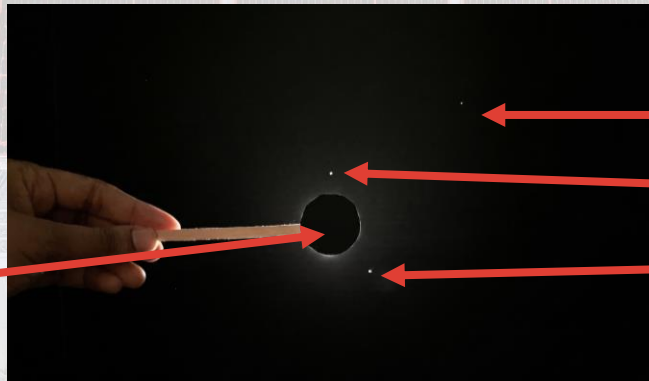
Détecteur
=
Étalement
de la
lumière
stellaire

Comment éteindre cette lumière ?



On peut s'inspirer des éclipses !

On cache l'étoile
avec un
« coronographe »
...

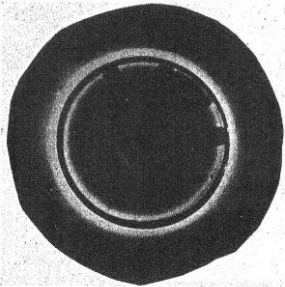


...et les planètes
apparaissent !

Comment éteindre cette lumière ?



Coronographe = inventé par Bernard Lyot en 1930.



La couronne est trop peu brillante pour être observée directement, en cachant le soleil, Lyot masque une grande partie du flux solaire. Il observe depuis le pic du Midi la couronne solaire en 1931 avec cette technique.

Comment éteindre cette lumière ?



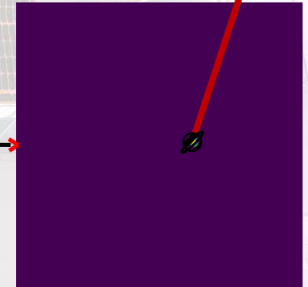
Pupille du
téléscope



Dans un monde idéal...

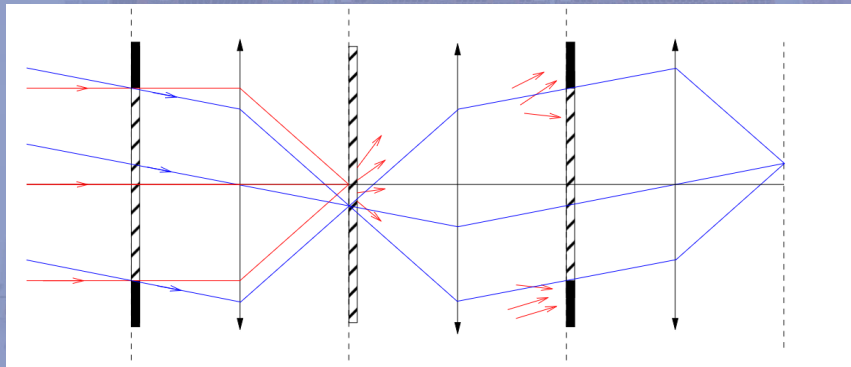
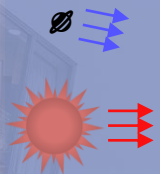
Planète !

Coronapgraphe



Détecteur =
planète seule

Comment éteindre cette lumière ?



Pupille d'entrée Masque Lyot stop Caméra

Lumière de l'étoile & Lumière d'une exoplanète

Sauf que dans la vraie vie...



Pupille
du
téléscope

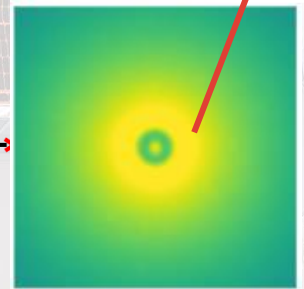


L'atmosphère de la terre dévie la lumière et introduit des aberrations optiques !

Planète ?

Miroir

Coronaphe



Détecteur entaché

Comment lutter contre l'atmosphère ?



Pupille
du
téléscope



On essaie de compenser les erreurs induites par l'atmosphère grâce à un miroir déformable > optique adaptative !

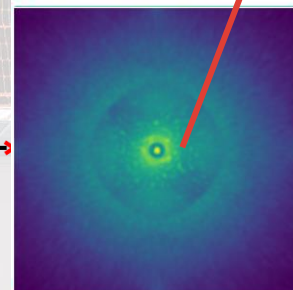
Planète ?

3. Compense
les
aberrations
avec un
miroir
déformable

2. Envoie des
commandes
pour corriger

1. Analyse
la lumière

Coronographe



Comment lutter contre l'atmosphère ?



3. Compense les aberrations avec un miroir déformable

2. Envoie des commandes pour corriger

1. Analyse la lumière

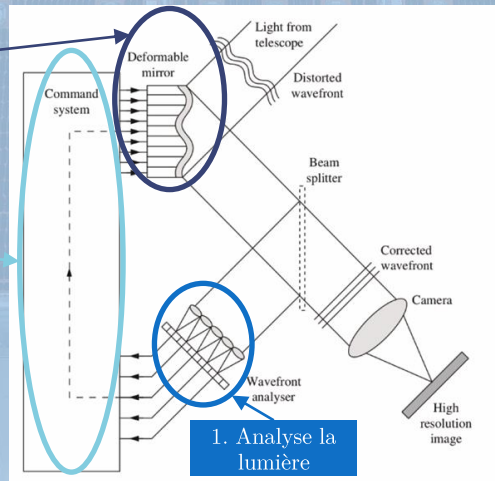


Image de 3 exoplanètes avec ces techniques

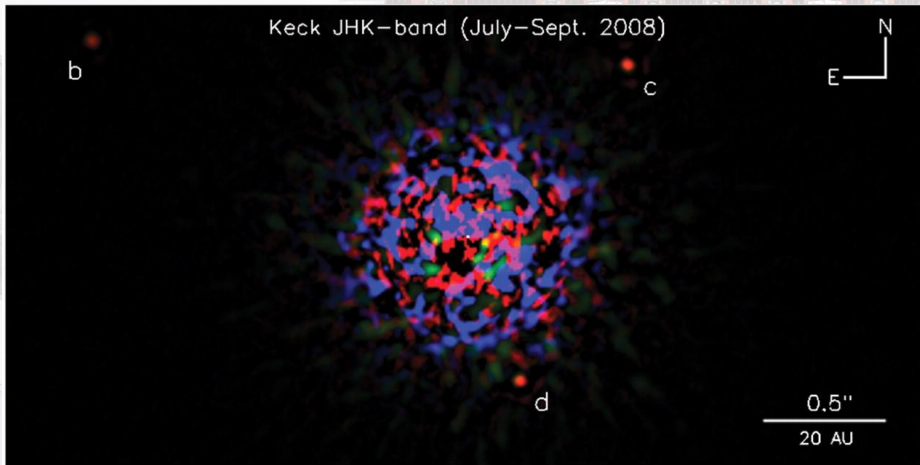
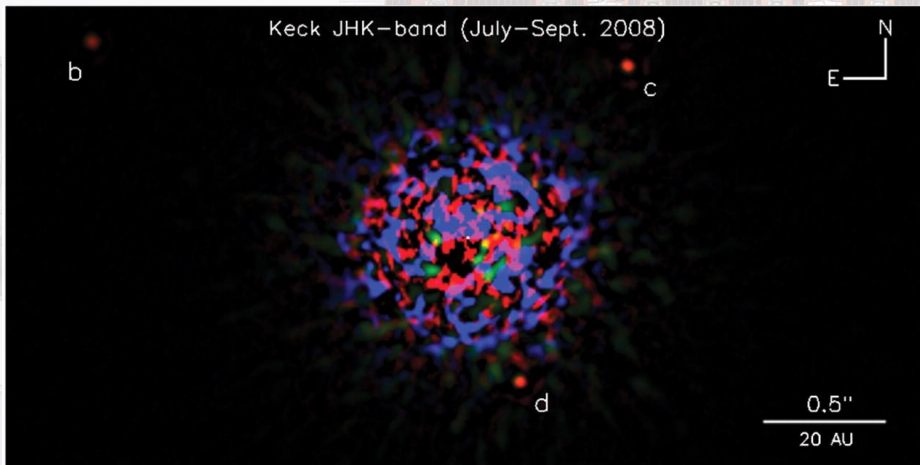
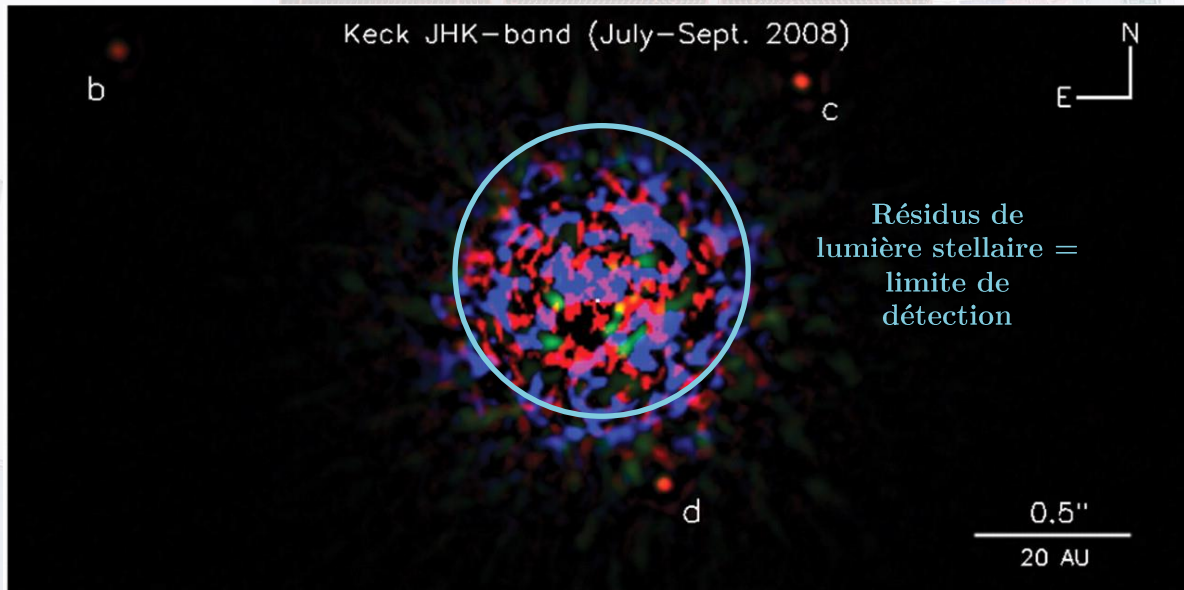


Image de 3 exoplanètes avec ces techniques

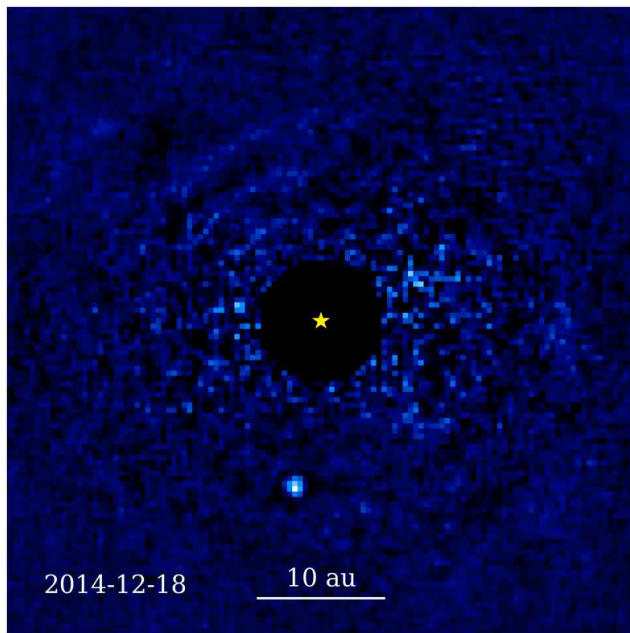


- Avec les télescopes Keck et Gemini North (Hawaï).
- Une quatrième planète sera ajoutée en 2010 après amélioration des techniques.

Image de 3 exoplanètes avec ces techniques



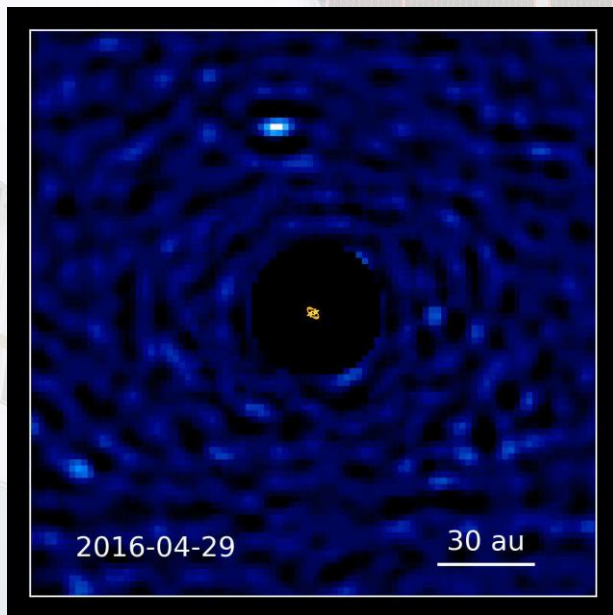
À long terme : observer leur orbite



51 Eri b :

- Découverte en 2014.
- Ressemble à Jupiter en plus gros.
- Images obtenues par Gemini.

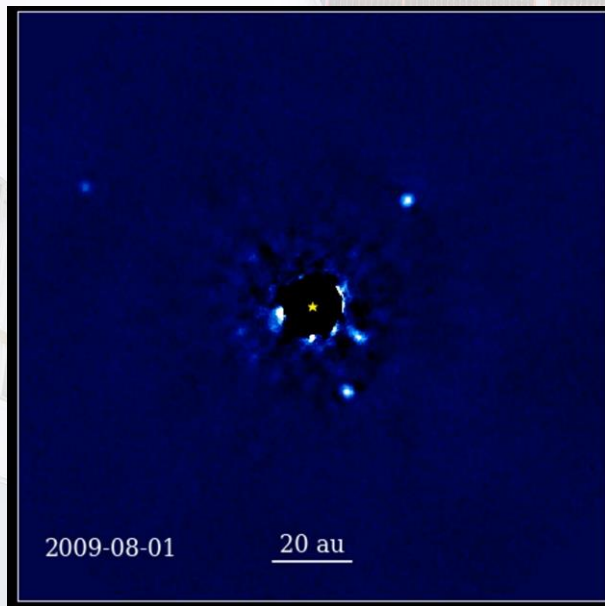
À long terme : observer leur orbite



HD 143811 AB b :

- Découverte en 2016.
- Lourde comme 6 Jupiter.
- Images obtenues par Gemini et le VLT.

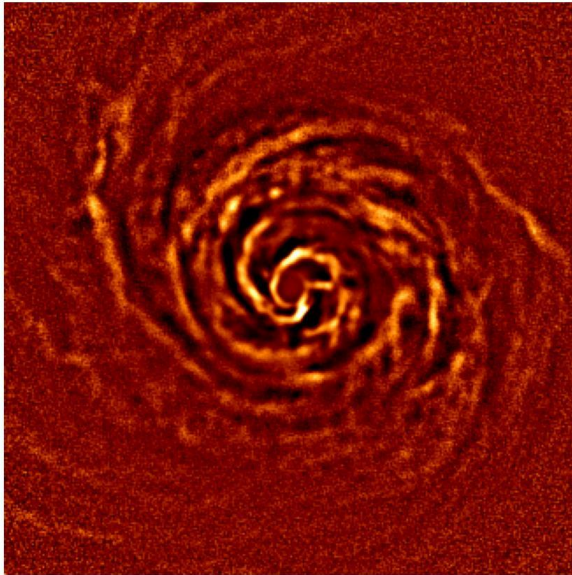
À long terme : observer leur orbite



HR 8799 :

- Découvertes en 2009.
- Plusieurs grosses Jupiter.
- Images obtenues par Keck.

On observe aussi le berceau des exoplanètes



Disque protoplanétaire d'AB Aurigae :

- Observé en 2026.
- Lieu de naissance des exoplanètes.
- Images obtenues par le VLT.



3. Comment réussir à battre les étoiles.

Optimiser les techniques que l'on maîtrise

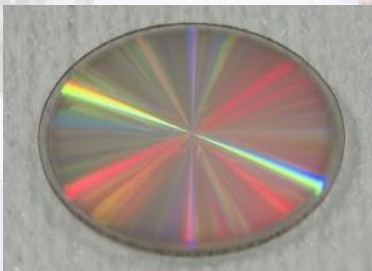


- **Coronographie** : optimiser les masques, créer la « meilleure éclipse » possible.
- **Optique adaptative** : améliorer les miroirs déformables et les algorithmes = plus rapide & plus précis.
- « **Retouche photo** » : développement de techniques de traitement d'image pour détecter ce qu'on rate dans les images brutes.

Optimiser les techniques que l'on maîtrise



- **Coronographie** : optimiser les masques, créer la « meilleure éclipse » possible.



Coronographe de type « Vortex ». On ne bloque plus l'amplitude de la lumière, mais on agit sur la phase de son champ électrique.

Optimiser les techniques que l'on maîtrise



- **Optique adaptative** : améliorer les miroirs déformables et les algorithmes = plus rapide & plus précis.

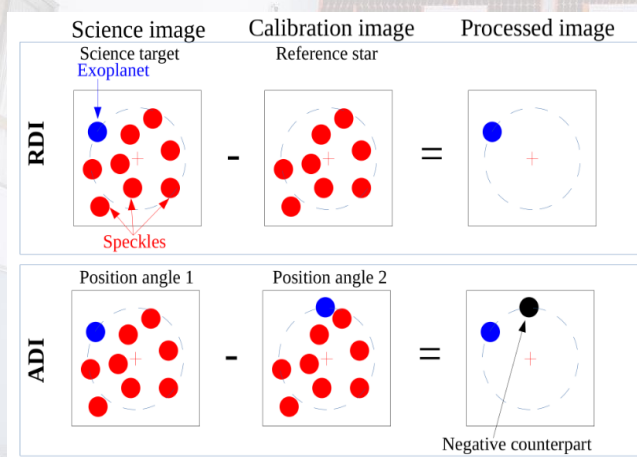


ELT – MICADO : Imageur de pointe sur le prochain télescope géant (diamètre de 39 mètres !) au Chili.

Optimiser les techniques que l'on maîtrise



- « **Retouche photo** » : développement de techniques de traitement d'image pour détecter ce qu'on rate dans les images brutes.



Idée = soustraire une image qui contient la lumière de l'étoile mais pas la planète.

Et en vrai... autant aller dans l'espace ?



Pupille
du
télescope

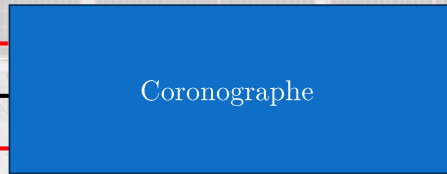


Oui, bonne idée ! MAIS, il reste des aberrations optiques, plus faibles, qui sont causées par l'instrument qu'on ne peut pas corriger avec de l'optique adaptative, elle est aveugle à cela !

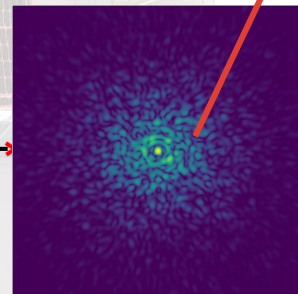
Miroir du télescope



Coronapgraphe



Planète ?

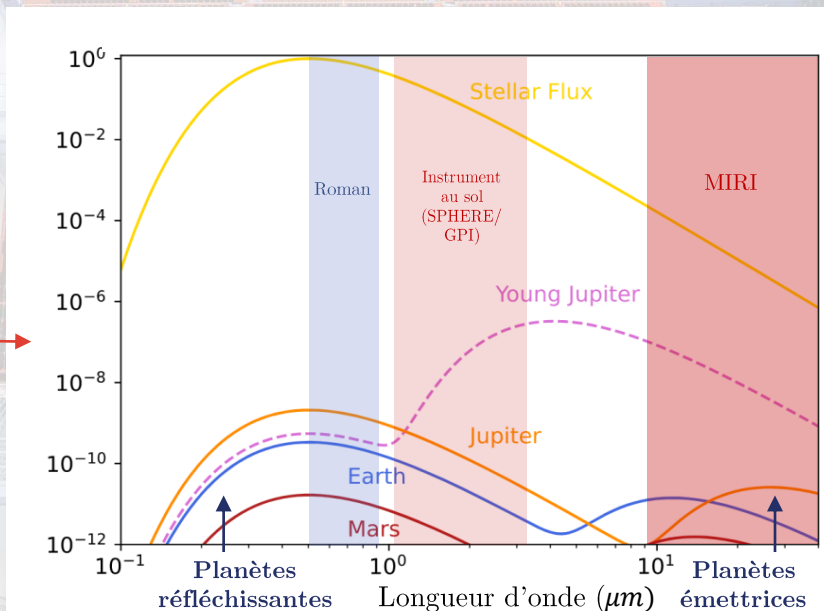


Détecteur encore entaché

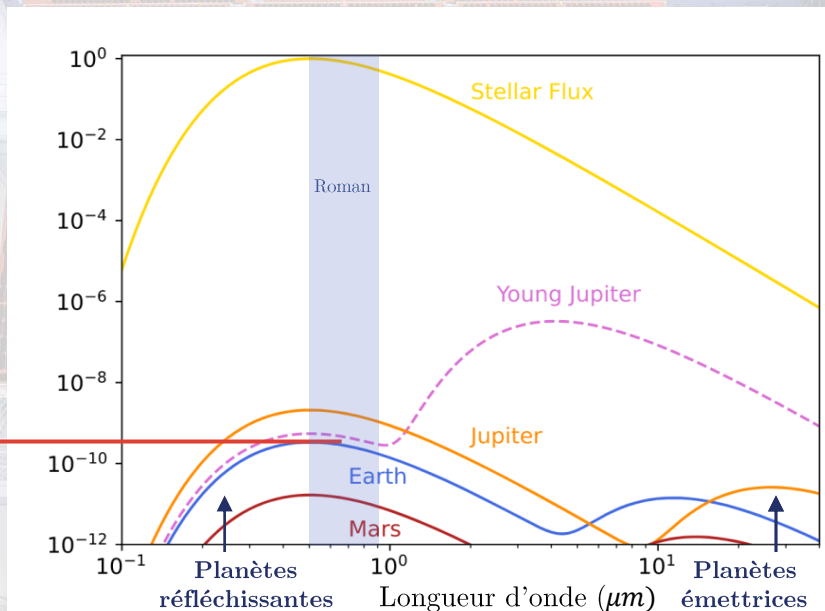


4. Un rêve : photographier une Terre, chercher des signes de vie.

Retour sur notre système solaire



Retour sur notre système solaire

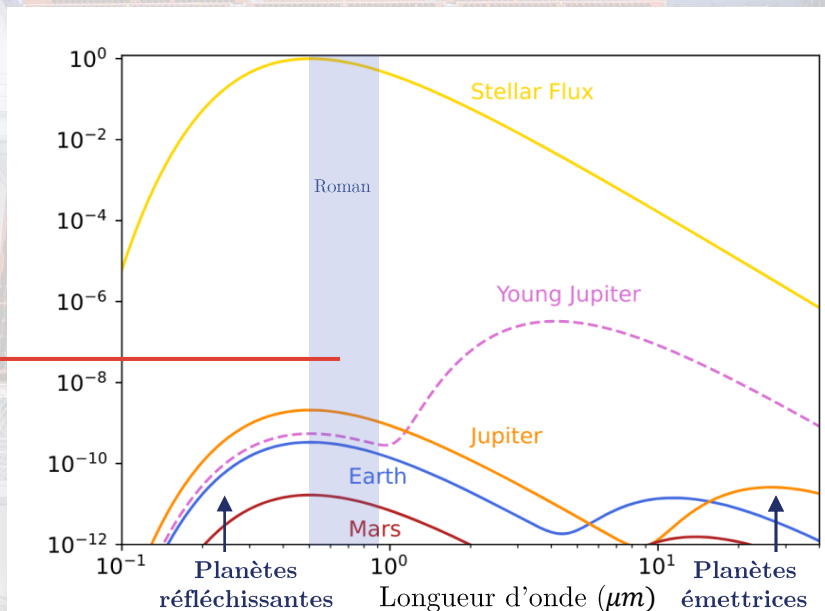


Détecter une
autre Terre

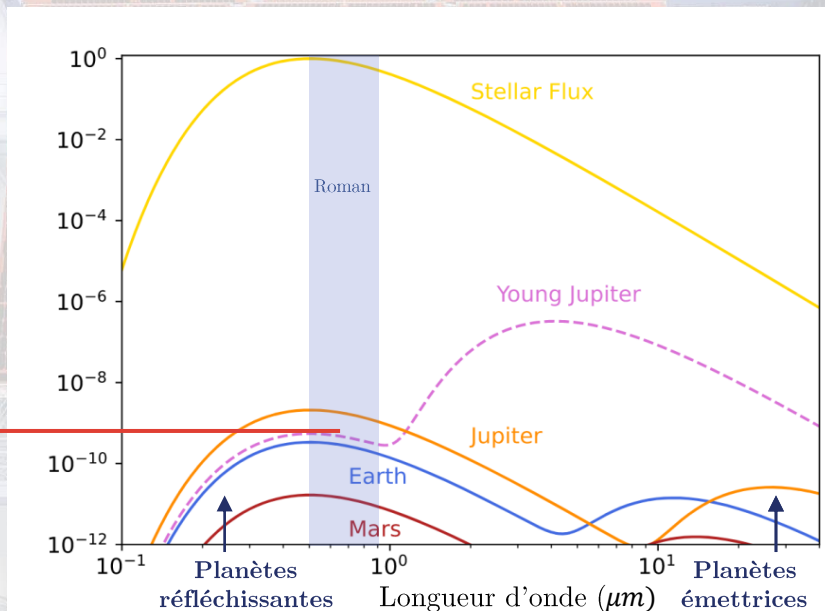
Retour sur notre système solaire



Meilleure
performance
aujourd'hui...



Retour sur notre système solaire



Ce que l'on
voit avec
Roman

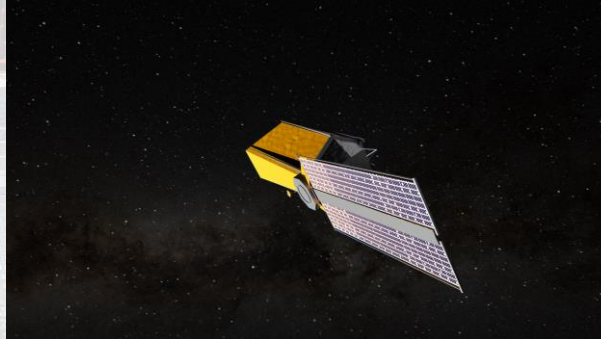


Imager une Terre : HWO (2040)

- Atténuer la lumière stellaire d'un facteur...

99,999999999 %

par rapport à l'exo-terre. Ça fait beaucoup, n'est-ce pas ?

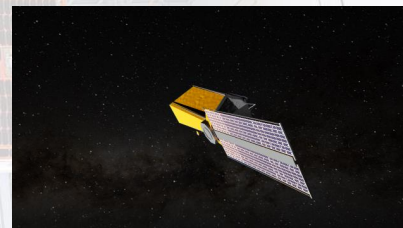


Imager une Terre : HWO (2040)



- Objectifs :

- Chercher **biosignatures** (eau, oxygène, ozone, méthane, ...) sur au moins 25 systèmes stellaires avec une exo-terre.
- Utiliser une **optique active** dans l'espace pour atténuer la lumière stellaire.
- Potentiellement utiliser un coronographe qui « flotte » dans l'espace détaché du télescope = **starshade**.



Imager une Terre : HWO (2040)

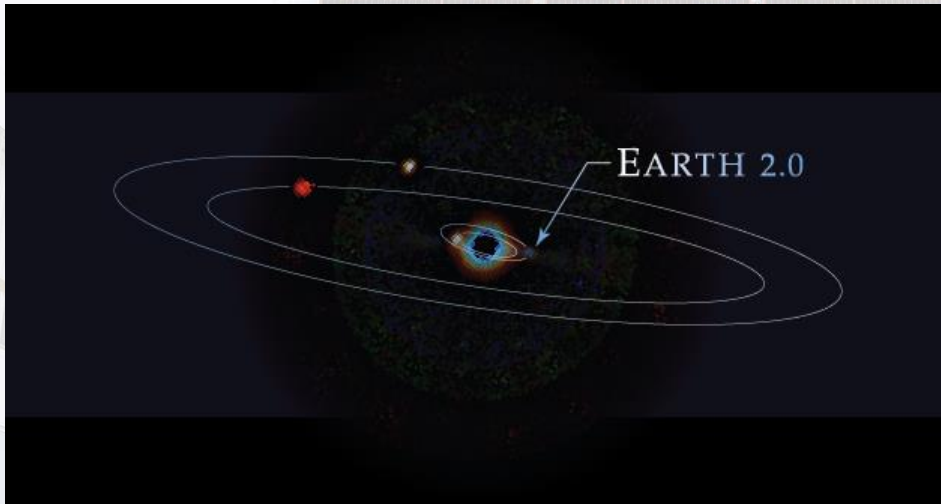
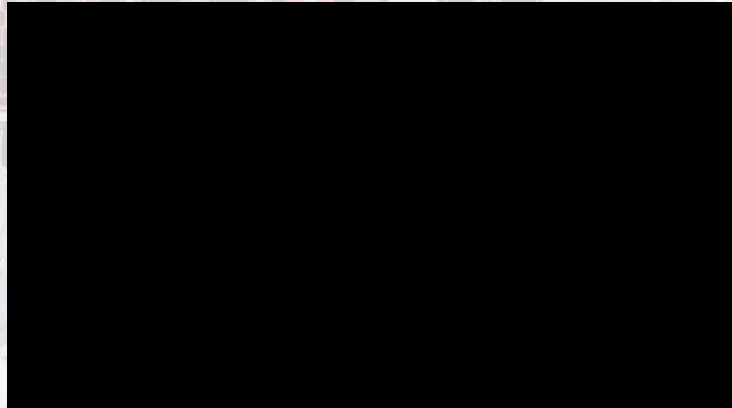
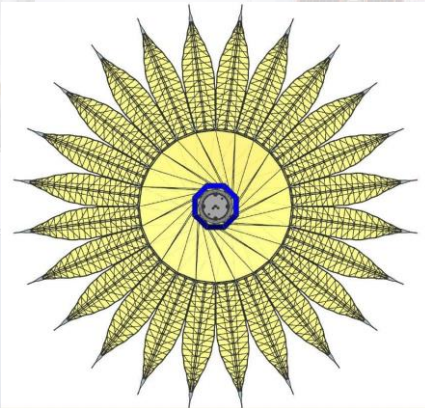


Image simulée
d'un système
solaire à 30
années-
lumière, telle
que captée par
HWO.

Imager une Terre : HWO (2040)



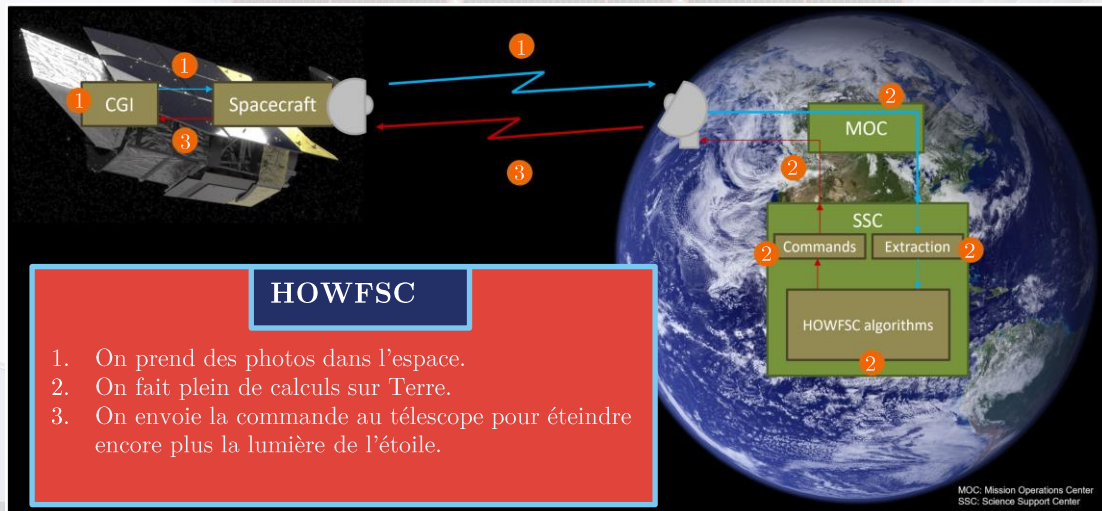
- **Starshade** = immense occulteur en forme de fleur (~100m) à ~50 000 km du télescope.



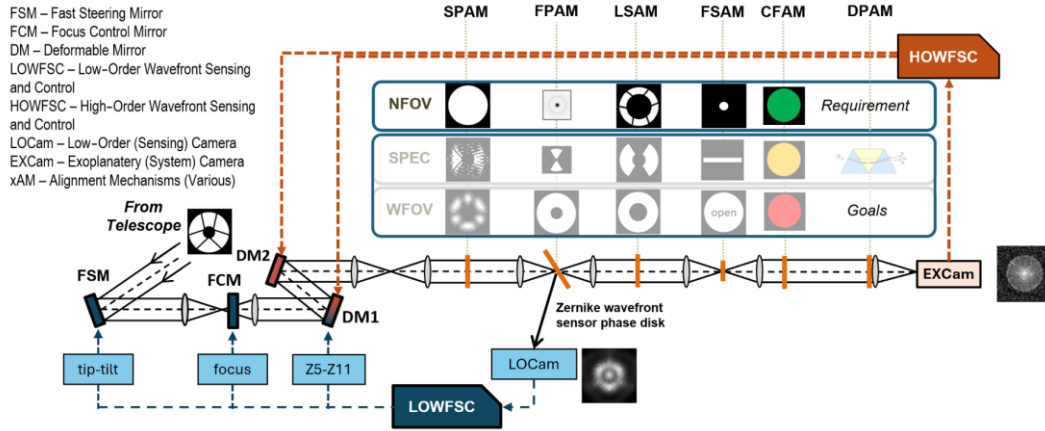
Le rôle du Roman Space Telescope



Possède un instrument coronagraphique à bord pour tester les méthodes qu'on veut implémenter sur HWO.



Le rôle du Roman Space Telescope



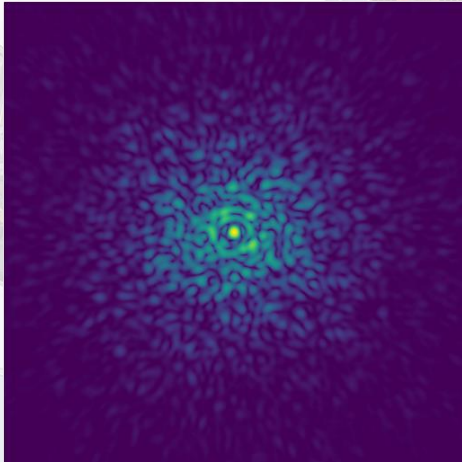
- Le système complet est très complexe, c'est un vrai défi d'ingénierie optique !
- Observation dans le visible (= lumière réfléchie), plusieurs coronagraphes disponibles à tester.

Mon rôle avant et pendant la mission



- **Développement** de l'algorithme d'analyse de la lumière stellaire.
- **Élaboration** d'une stratégie alternative pour améliorer les performances de l'instrument.
- **Accès à l'instrument** pendant la première phase pour essayer de démontrer des premiers résultats.

Résumé de l'algorithme



Il faut estimer les résidus stellaires
(leur champ électrique) pour s'en
débarrasser.

Résumé de l'algorithme



1. Il faut estimer les résidus stellaires (leur champ électrique).



On bouge volontairement les miroirs déformables = les résidus bougent mais pas l'exoplanète.



Avec des maths, on isole le champ électrique des résidus !

Résumé de l'algorithme



2. Et puis il faut les retirer !

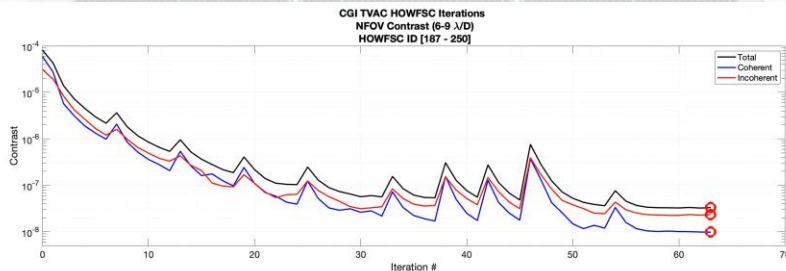
Soit on donne
l'information à la boucle
de contrôle **qui corrige
en temps réel** depuis
l'espace.

Résumé de l'algorithme



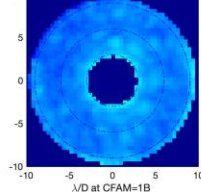
Soit on donne l'information à la boucle de contrôle **qui corrige en temps réel** depuis l'espace.

On atténue
de plus en
plus la
lumière de
l'étoile !



Total: Iteration 63 (HOWFSC ID 250)

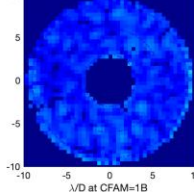
(6-9) $3.32e-08$ / (3-9) $4.03e-08$



Caméra

Coherent

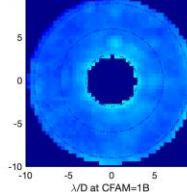
(6-9) $9.83e-09$ / (3-9) $1.00e-08$



Estimation

Incoherent

(6-9) $2.35e-08$ / (3-9) $3.04e-08$



Différence

Résumé de l'algorithme



2. Et puis il faut les retirer !

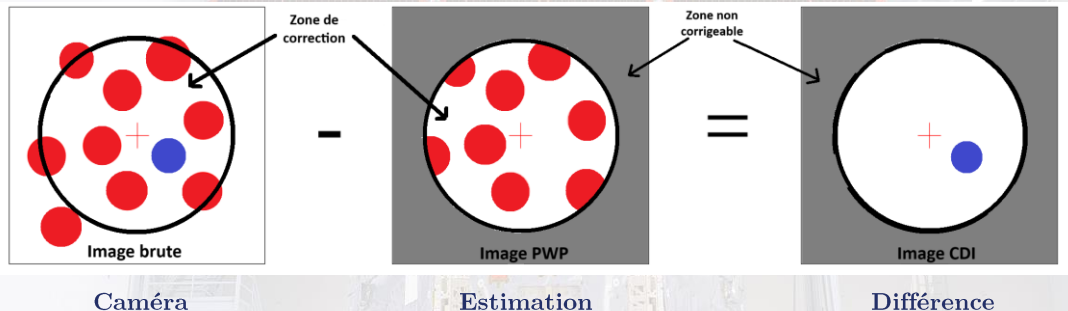
Soit on donne
l'information à la boucle
de contrôle **qui corrige
en temps réel** depuis
l'espace.

Soit on **retire
l'estimation
directement** sur les
images brutes.

Résumé de l'algorithme



Soit on retire l'estimation directement sur les images brutes.



Cette technique permet de **trouver des exoplanètes après traitement des images.**

Planning de la mission

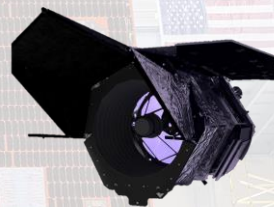


Test d'observation, préparation
de la mission et simulations
numériques

Décollage !

Commissioning

Observations depuis l'espace



Nous 30 août

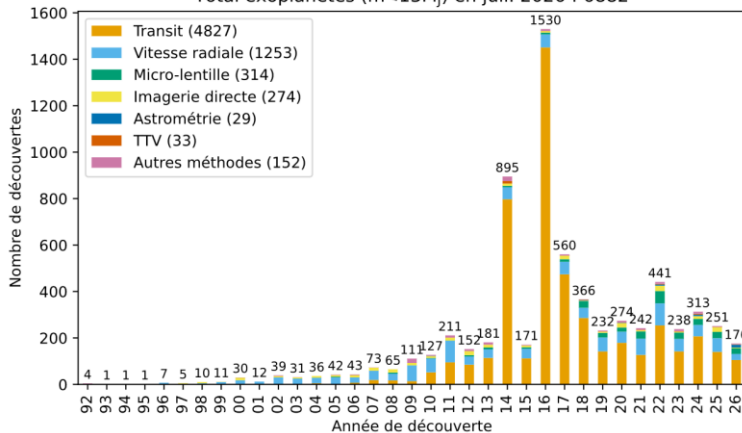
Décollage + 3 mois

Décollage + 21 mois

Bilan des découvertes

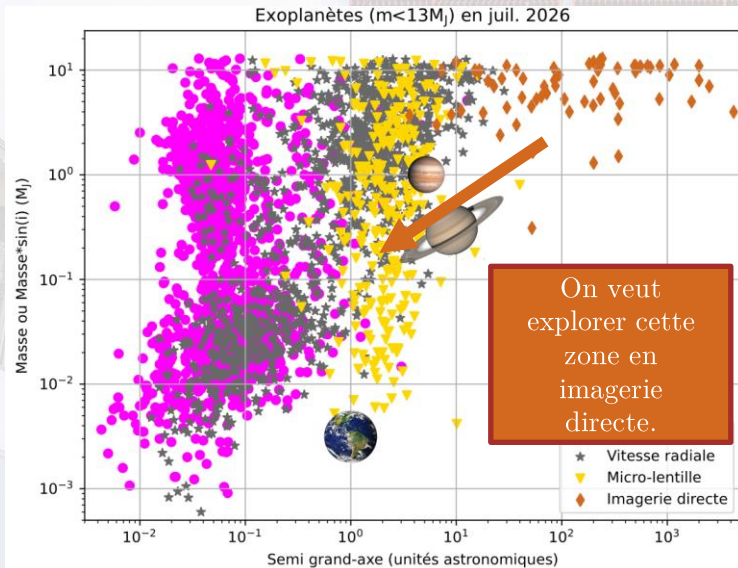


Total exoplanètes ($m < 13M_J$) en juil. 2026 : 6882



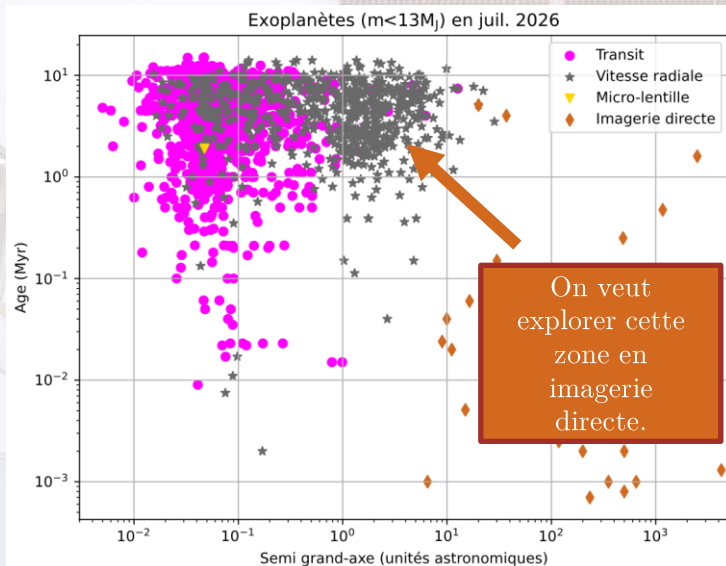
- Méthode : **imagerie directe**.
- Détection d'autres systèmes solaires :
 - Planètes géantes gazeuses, jeunes et chaudes.
 - Disque de débris.
- Mettre en place une **correction active des aberrations dans l'espace avec Roman** :
 - Validation d'une technologie pour une future mission spatiale : **HWO**.

Bilan des découvertes



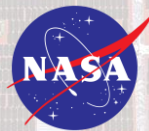
- Méthode : **imagerie directe**.
- Détection d'autres systèmes solaires :
 - Planètes géantes gazeuses, jeunes et chaudes.
 - Disque de débris.
- Mettre en place une **correction active des aberrations** dans l'espace avec **Roman** :
 - Validation d'une technologie pour une future mission spatiale : **HWO**.

Bilan des découvertes



- Méthode : **imagerie directe**.
- Détection d'autres systèmes solaires :
 - Planètes géantes gazeuses, jeunes et chaudes.
 - Disque de débris.
- Mettre en place une **correction active des aberrations** dans l'espace avec **Roman** :
 - Validation d'une technologie pour une future mission spatiale : **HWO**.

Conclusion



- On travaille avec d'autres chercheurs qui coopèrent pour préparer au mieux la mission. **Maintenant, il n'y a qu'à attendre que la fusée décolle !**

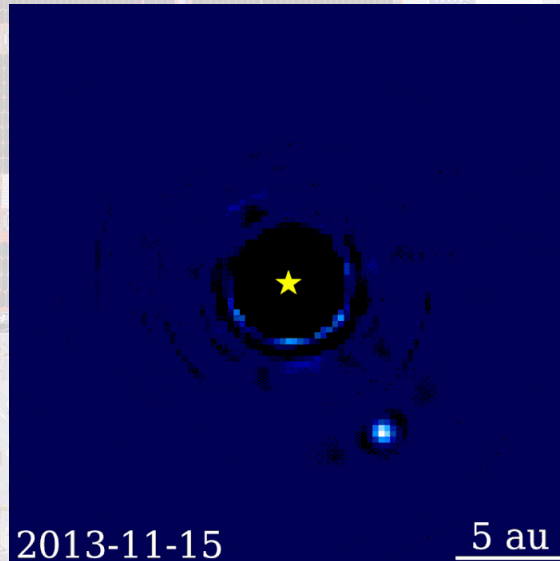


CPP meeting, Pasadena, USA (2026)



Roman School, Fréjus, France (2026)

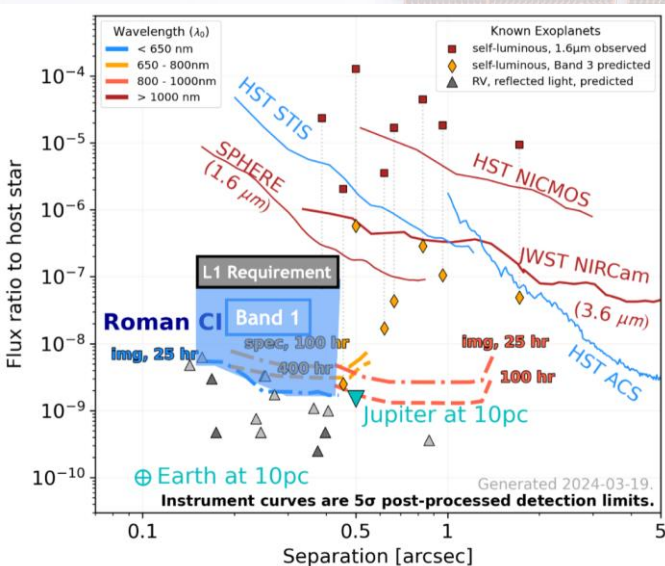
QUESTIONS ?





Backup slides

Annexe



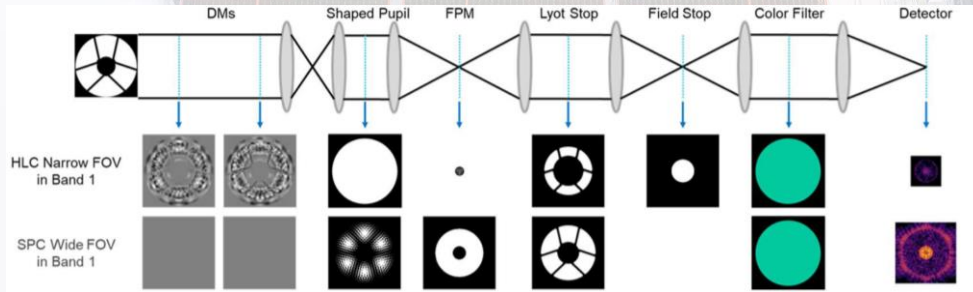
• For V~5 stars:

• Level 1 requirement (band 1):

$$SNR \geq 5, \frac{\lambda}{D} \in (6, 9), C = 10^{-7}$$

Band	Mode	λ (nm)	BW	Corona.	λ/D
1	NFOV	575	10%	HLC	3-9 (360°)
2	Spectro	660	15%	SPC	3-9 (2x65°)
3	Spectro	730	15%	SPC	3-9 (2x65°)
4	WFOV	825	10%	SPC	3-9 (360°)

Annexe

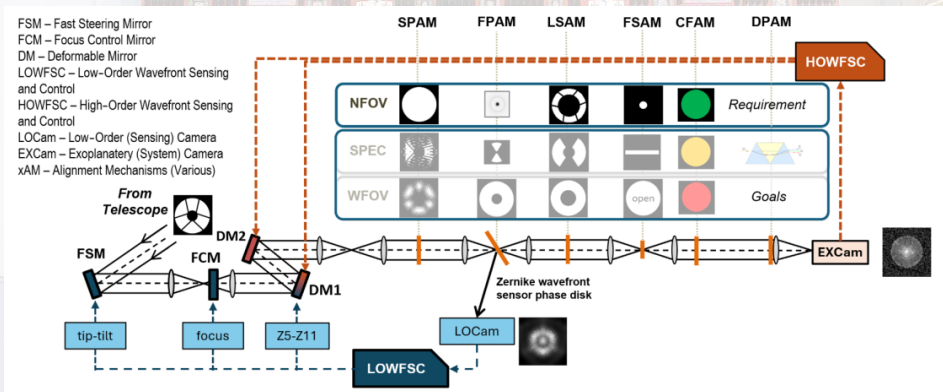


Band	Mode	λ (nm)	BW	Corona.	λ/D
1	NFOV	575	10%	HLC	3-9 (360°)
2	Spectro	660	15%	SPC	3-9 (2x65°)
3	Spectro	730	15%	SPC	3-9 (2x65°)
4	WFOV	825	10%	SPC	3-9 (360°)

Annexe



- **HOWFSC** is part of a complex coronagraph instrument with a lot of sub-systems:
 - **Coronagraphs**, 2 **DMs**, **LOWFSC** (internal loop) and **HOWFSC** (Earth-instrument loop), **EMCCDs** for ultra-low noise photon detections, ...





- How can we estimate speckles intensity on earth? $|E_s|^2$

- We make temporal modulations on the DM (Pair-Wise-Probing).

= Apply pairs of known phase probes $\pm\psi_m$

- Linearize the intensity measurement for +/- probes

$$\Delta I_m = I^+ - I^-$$

- Then, solve inverse problem:

$$\underbrace{\Delta I_m}_{\text{Measurement}} = \underbrace{\mathcal{M}_{\text{model}}}_{\text{Modulation}} \cdot \underbrace{E_s}_{\text{Speckles}}$$



- How can we kill the speckles in space?

- Linearize the problem around a DM position $\vec{a}$:

$$E_s(S, \vec{a}) \approx E_s(S, \vec{a}_0) + \frac{\partial E_s(S, \vec{a})}{\partial \vec{a}} \Big|_{\vec{a}=\vec{a}_0} (\vec{a} - \vec{a}_0)$$

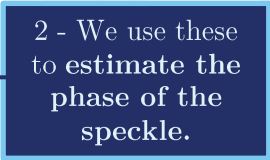
- Solve:

$$\min_{\Delta \vec{a}} \left(\|\vec{E}_s + J \Delta \vec{a}\|^2 \right)$$

- Solution = apply on the DM:

$$\Delta \vec{a} = -(J^T J)^{-1} J^T \vec{E}_s$$

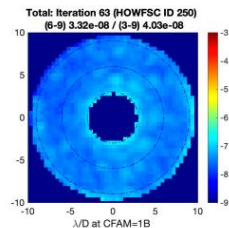
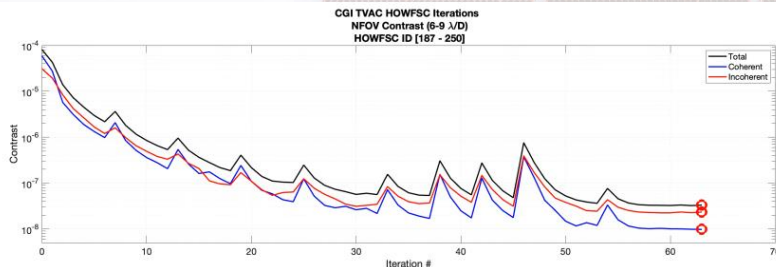
- (After: regularization, ...)



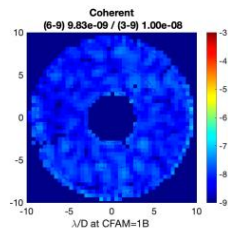
1 - We deliberately modulate the images in focal plane.

3 - We attenuate **them** using the DMs of Roman (creation of the **opposite electric field**).

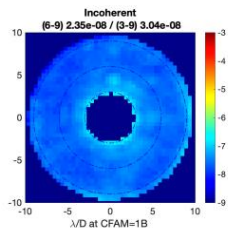
Annexe



Scientific
camera



Speckles estimations



Residual
s

- The **contrast decreases** at each iterations!
- The **speckles** being corrected are **static/quasi-static**.

The expected contrast is:
 $< 10^{-7}$ (L1 requirement)
 $\sim 10^{-8} - 10^{-9}$
(predicted/goal)



Enhanced wavefront sensing for the Roman Coronagraph Instrument: Gaussian probes and compact model validation

Lukas Delaye^a, Iva Luginja^b, Pierre Baudoz^a, Axel Potier^a, Johan Mazoyer^a, Raphaël Galicher^a, Susan F. Redmond^c, Alexis Lan^d, A. J. Riggs^c, Dan Sirbu^e, Emiel H. Por^f, Rémi Soummer^g, and Laurent Pueyo^g

^aLIRA, Observatoire de Paris, Université PSL, Sorbonne Université, Université Paris Cité, CY Cergy Paris Université, CNRS, 92195 Meudon, France

^bUniversité Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire Lagrange, Bd de l'Observatoire, CS 34229, 06304 Nice cedex 4, France

^cJet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Dr, Pasadena, CA 91011, USA

^dAix Marseille Univ, CNRS, CNES, LAM, Marseille, France

^eNASA Ames Research Center, Moffett field, CA 94035, USA

^fDepartment of Astronomy & Astrophysics, University of California, Santa Cruz, CA 95064, USA

^gSpace Telescope Science Institute, 3700 San Martin Dr., Baltimore, MD 21218, USA

Alternate modulations:

- Can extend **linearity** of the algorithm.
- Can achieve better **contrast**.
- Enhance HOWFSC strategies.