

Besoins détecteur pour l'astrométrie à haute précision pour les exoplanètes et la matière noire

Atelier détecteurs cnes 13/06/24

Manon Lizzana supervisée par Fabien Malbet

Collaborateurs

Fabien Malbet₁

Pierre Kern₁

Fabrice Pancher₁

Alain Leger₂

Thierry Lepine₃

Sébastien Soler₁

Lucas Labadie₄

Alessandro Sozzettic₅

Renaud Goullioud₆

1 IPAG Grenoble

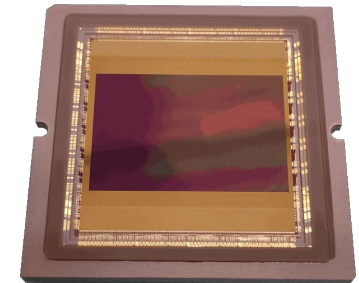
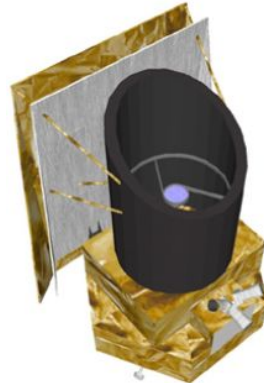
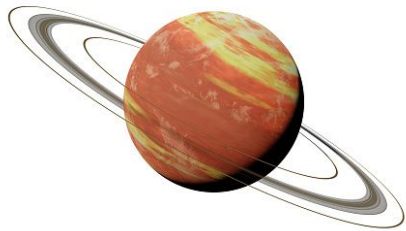
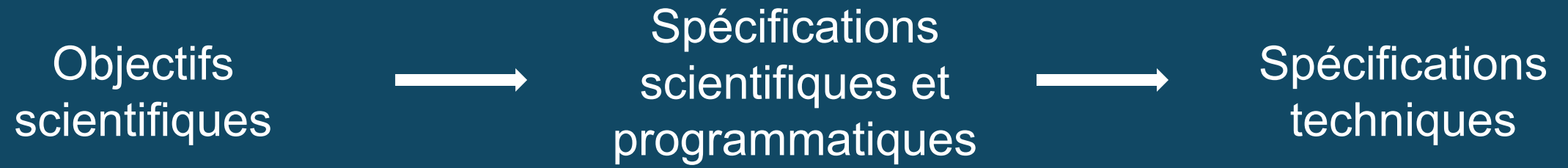
2 Univ Paris-Saclay

3 Institut d'Optique & Hubert Curien Lab,
Saint-Etienne

4 Univ of Cologne

5 Obs Torino

6 California Institute of Technology

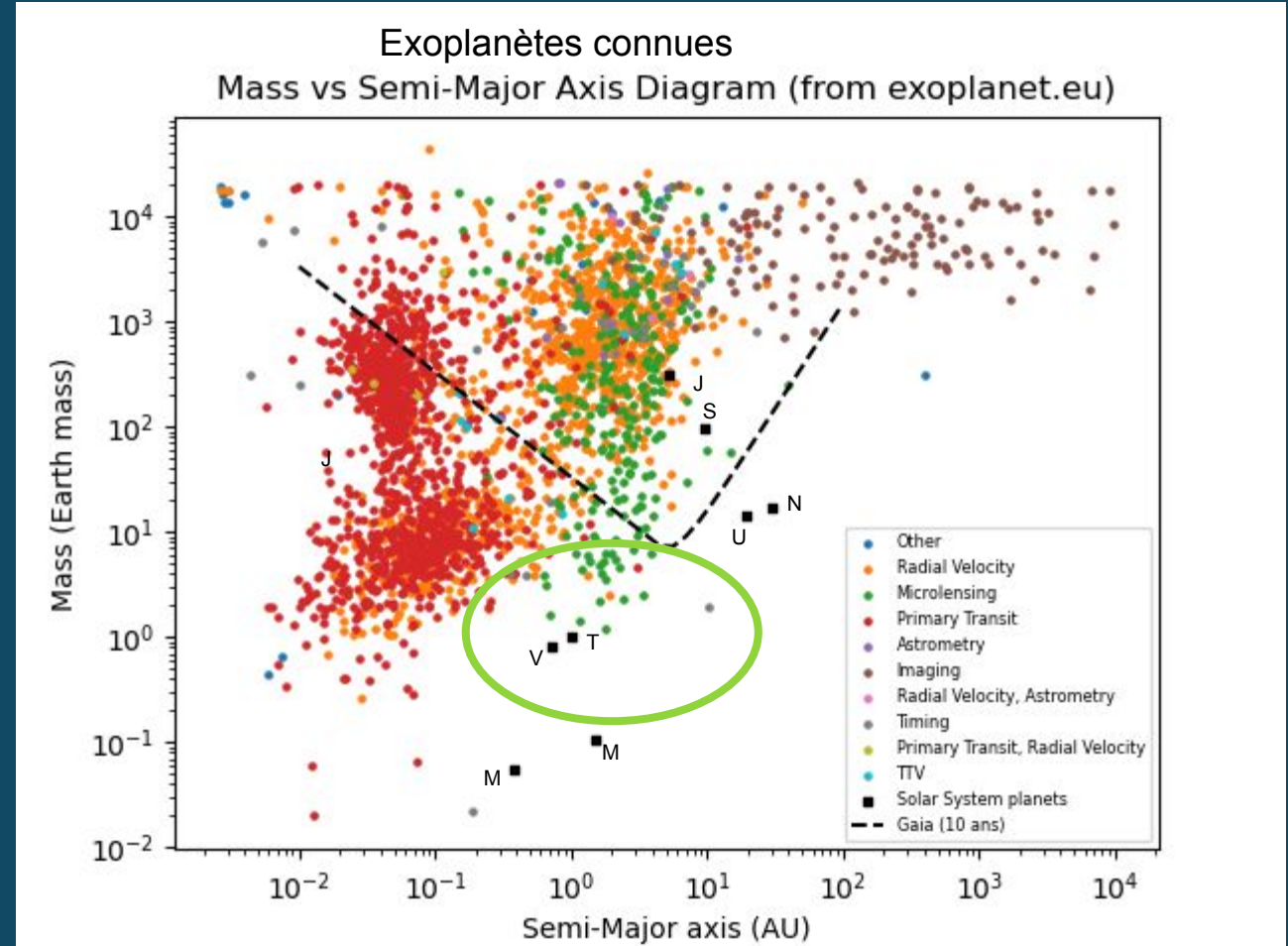


Astrométrie : objectifs scientifiques

3/19

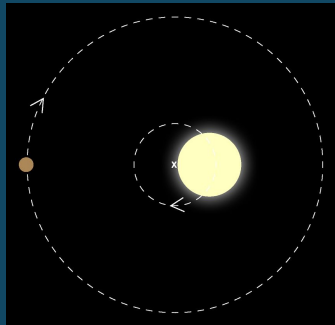
Astrométrie relative à haute précision = évaluation des positions, distances et mouvements d'un objet céleste par rapport aux étoiles présentes dans le champs de vue

- Sonder la matière noire dans notre galaxie
en étudiant la modification des trajectoires des étoiles
dans le plan galactique
(avec des poses longues sur chaque étoile)
- Étudier les objets compacts
et notamment les binaires X
- Explorer les systèmes planétaires proches (~10pc) et
établir une liste de cible potentielles pour les futures
missions spectro (LIFE, HWO)
↳ en particulier les planètes type Terre autour d'
étoiles type soleil



Découvrir des exoplanètes par astrométrie relative

4/19

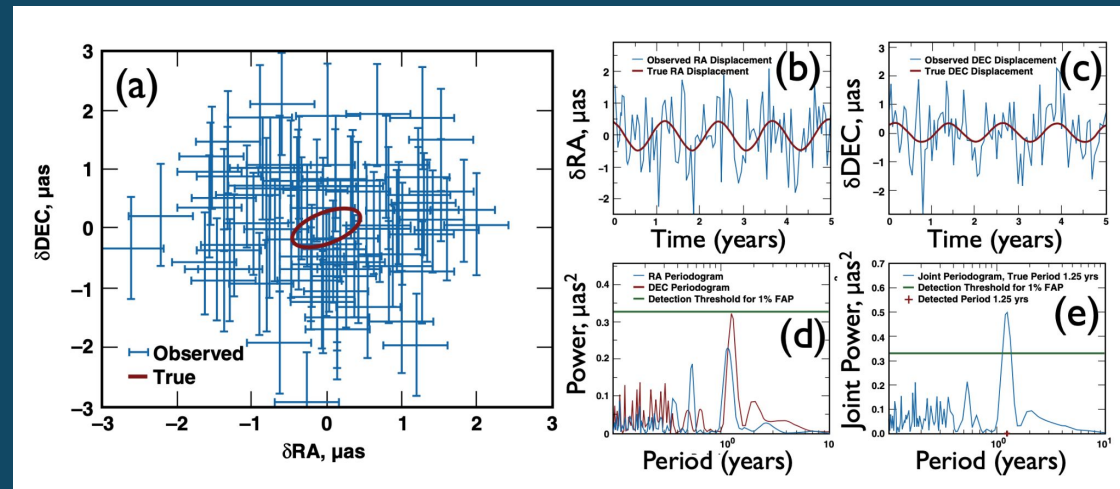


- Une étoile abritant une planète subit un mouvement réflexe autour du centre de masse du système
- Le mouvement de l'étoile cible proche est repérées par rapport aux étoiles de références lointaines
- Longues expositions sur des cibles pointées (contrairement à Gaia qui scanne l'entièreté du ciel)



Étoiles de référence

Etoile cible

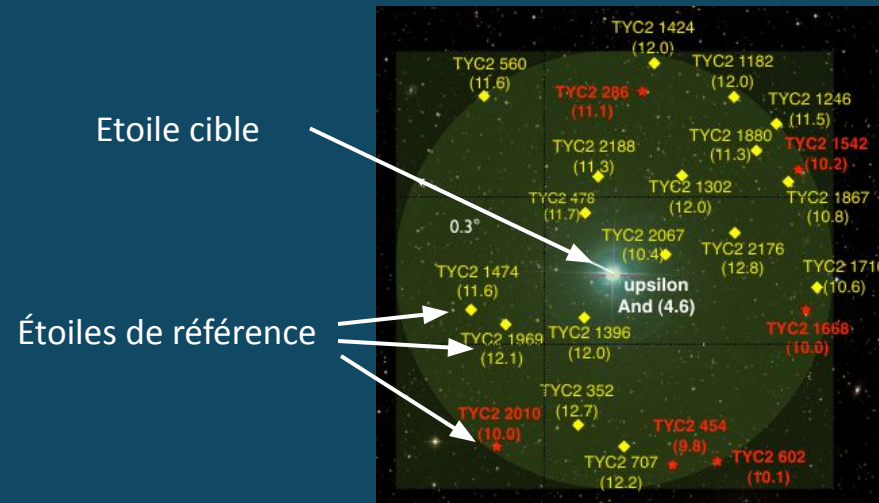


Ex : mouvement créé par une planète type Terre sur une étoile type soleil à 10 pc \rightarrow $0.3 \mu\text{as}$ soit $5\text{e-}6$ px pour la mission Theia

	<div><p>Theia (à l'ère de Gaia)</p></div>	<div><p>HWO</p></div>
longueurs d'onde	400 < λ < 900 nm	UV, visible et IR
Avancement	Projet (Appel ESA M8 ~ 1 an)	Lancement prévu pour ~2040
Diamètre (D)	0.8m	entre 6.5 et 8m
Signal exo-Terre à 10pc \rightarrow 0.3 μ as (pixels 4 μ m)	PSF $\sim \lambda/D = 140$ mas \leftrightarrow 2 px exo-Terre : 0.3 μ as \leftrightarrow 5e-6 px	PSF $\sim \lambda/D = 14$ mas \leftrightarrow 2 px exo-Terre : 0.3 μ as \leftrightarrow 5e-5 px
Champ de vue	30'x30' (0.5°x0.5°) 30 000 x 30 000 px ~ 1 Gpx	2'x3' (wide field imager) TBC 20 000 x 30 000 px ~ 1 Gpx

Objectifs scientifiques :	Spécifications scientifiques :	Spécifications techniques :
<ul style="list-style-type: none">• Explorer les systèmes planétaires proches• Sonder la matière noire• Étudier les objets compacts	Sensibilité particulière aux étoiles semblables au soleil	$400 < \lambda < 900 \text{ nm}$
	Observation d'étoiles de différentes magnitudes	Dynamique importante : Theia $\sim 1e3$; HWO $\sim 1e5$ (ou temps d'exposition différentiels)
	Grand champ	Grand nombre de pixels $\sim 1e9 \text{ px} = 30\,000 \times 30\,000 \text{ px}$ (avec redondance)
	Détecteur finement caractérisé	Caractéristiques TBD
	Positions des centroïdes des pixels connues	Métrologie pour calibration interférométrique des centroïdes Theia $\sim 5e-6$; HWO $\sim 5e-5$
	Distorsion optique corrigée	Calibration numérique de la distorsion optique grâce aux étoiles de référence

Objectifs scientifiques :	Spécifications scientifiques :	Spécifications techniques :
<ul style="list-style-type: none">• Explorer les systèmes planétaires proches• Sonder la matière noire• Étudier les objets compacts	Sensibilité particulière aux étoiles semblables au soleil	$400 < \lambda < 900 \text{ nm}$
	Observation d'étoiles de différentes magnitudes	Dynamique importante : Theia $\sim 1e3$; HWO $\sim 1e5$ (ou temps d'exposition différentiels)
	Grand champ	Grand nombre de pixels $\sim 1e9 \text{ px} = 30\,000 \times 30\,000 \text{ px}$ (avec redondance)
	Détecteur finement caractérisé	Caractéristiques TBD
	Positions des centroïdes des pixels connues	Métrologie pour calibration interférométrique des centroïdes Theia $\sim 5e-6$; HWO $\sim 5e-5$
	Distorsion optique corrigée	Calibration numérique de la distorsion optique grâce aux étoiles de référence



- Etude des étoiles de type solaire
→ $400 < \lambda < 900 \text{ nm}$
- Nécessité d'observer de nombreuses étoiles en même temps (~100)
→ Contrainte sur la dynamique
- Champ de vue important
→ besoin de grandes matrices de px

Caractéristiques des champs d'étoiles observés

	 Theia	 HWO
Paramètres fixés	Champs de vue : 30'x30' (0.5°x0.5°) D = 0.8 m	Champs de vue : 2'x3' TBC D = 8 m
Matrice de pixels	PSF $\sim \lambda/D = 140 \text{ mas} \leftrightarrow 2 \text{ px}$ 30 000 x 30 000 px $\sim 1 \text{ Gpx}$	PSF $\sim \lambda/D = 14 \text{ mas} \leftrightarrow 2 \text{ px}$ 20 000 x 30 000 px $\sim 1 \text{ Gpx}$
Signal exo-Terre à 10pc	exo-Terre : 0.3 $\mu\text{as} \leftrightarrow$ 5e-6 px	exo-Terre : 0.3 $\mu\text{as} \leftrightarrow$ 5e-5 px
Dynamique	30 000 x 30 000 px $\sim 1 \text{ Gpx}$ $m_{\text{target}} \sim 6; m_{\text{ref}} \leq 14$ \Rightarrow dynamique $\sim 1e3$	20 000 x 30 000 px $\sim 1 \text{ Gpx}$ $m_{\text{target}} \sim 6; m_{\text{ref}} \leq 20$ \Rightarrow dynamique $\sim 1e5$



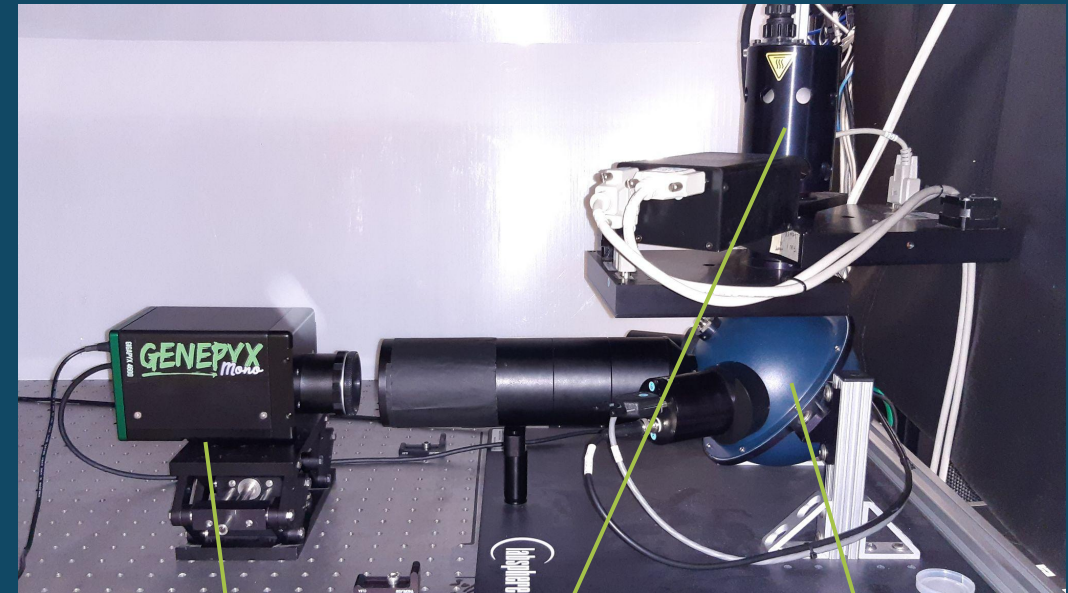
Objectifs scientifiques :	Spécifications scientifiques :	Spécifications techniques :
<ul style="list-style-type: none">• Explorer les systèmes planétaires proches• Sonder la matière noire• Étudier les objets compacts	Sensibilité particulière aux étoiles semblables au soleil	$400 < \lambda < 900 \text{ nm}$
	Observation d'étoiles de différentes magnitudes	Dynamique importante : Theia ~ $1e3$; HWO ~ $1e5$ (ou temps d'exposition différentiels)
	Grand champ	Grand nombre de pixels ~ $1e9 \text{ px} = 30\,000 \times 30\,000 \text{ px}$ (avec redondance)
	Détecteur finement caractérisé	Caractéristiques TBD
	Positions des centroïdes des pixels connues	Métrologie pour calibration interférométrique des centroïdes Theia ~ $5e-6$; HWO ~ $5e-5$
	Distorsion optique corrigée	Calibration numérique de la distorsion optique grâce aux étoiles de référence

- Besoin pour la couverture totale du champ de vue :

$$30\,000 \times 30\,000 \text{ px} = 1 \text{ Gpx}$$

- Expériences en laboratoire actuelles :

Gigapyx (Pyxalis)
 $8320 \times 5436 \text{ px} = 46 \text{ Mpx}$
taille pixel $4.4 \mu\text{m}$
taille totale $24 \times 26 \text{ mm}$



detector

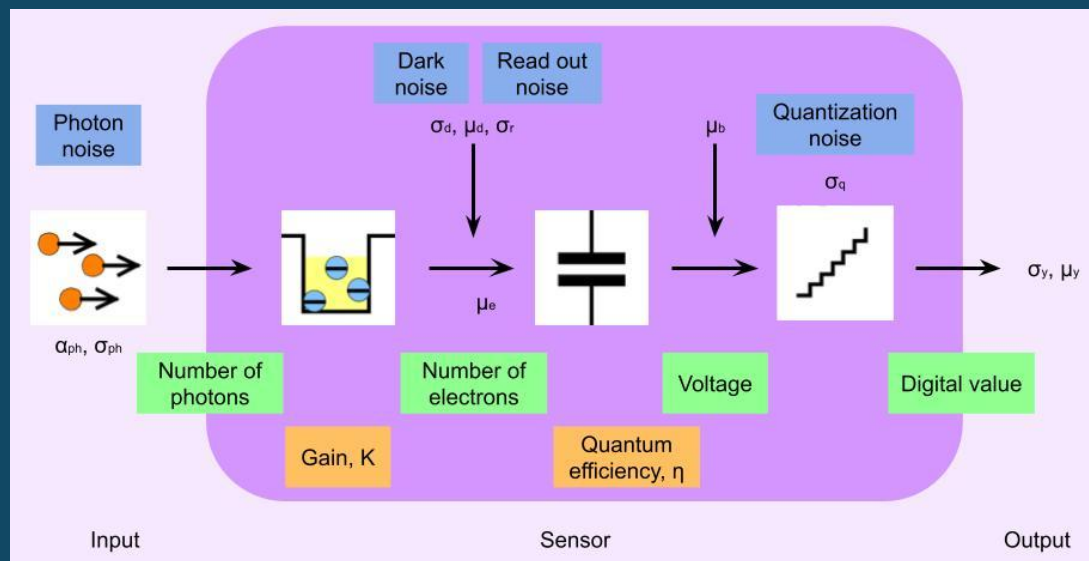
Source

integrating sphere

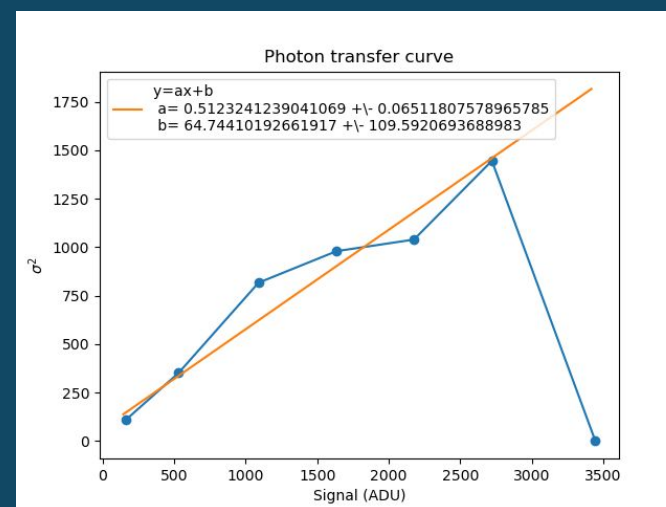
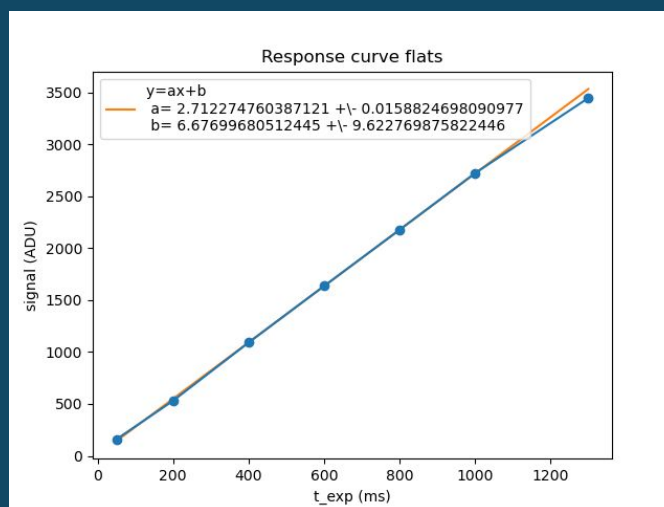


Caractérisation générale du détecteur

12/19

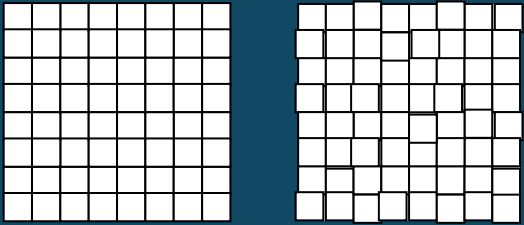


Caractérisation globale : linéarité, courant d'obscurité, bruit de lecture, gain, carte des pixels défaillants ...

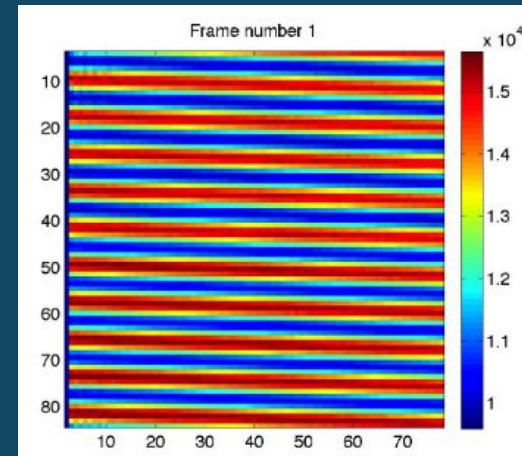
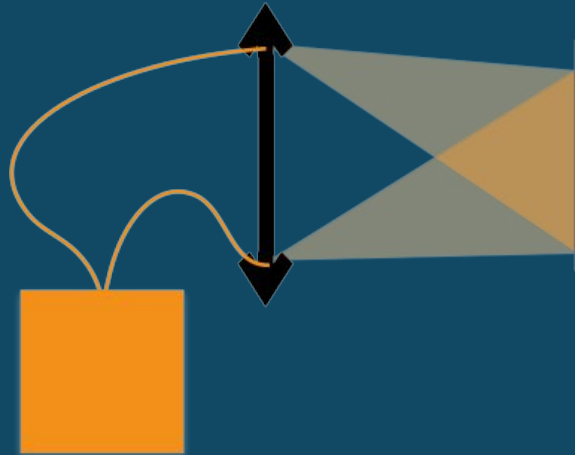


TBC

Objectifs scientifiques :	Spécifications scientifiques :	Spécifications techniques :
<ul style="list-style-type: none">• Explorer les systèmes planétaires proches• Sonder la matière noire• Étudier les objets compacts	Sensibilité particulière aux étoiles semblables au soleil	$400 < \lambda < 900 \text{ nm}$
	Observation d'étoiles de différentes magnitudes	Dynamique importante : Theia $\sim 1e3$; HWO $\sim 1e5$ (ou temps d'exposition différentiels)
	Grand champ	Grand nombre de pixels $\sim 1e9 \text{ px} = 30\,000 \times 30\,000 \text{ px}$ (avec redondance)
	Détecteur finement caractérisé	Caractéristiques TBD
	Positions des centroïdes des pixels connues	Métrologie pour calibration interférométrique des centroïdes Theia $\sim 5e-6$; HWO $\sim 5e-5$
	Distorsion optique corrigée	Calibration numérique de la distorsion optique grâce aux étoiles de référence



- Des fibres créent des franges d'Young sur le détecteur
- Des modulateurs de phase font défiler les franges
- La modulation observée par chaque pixel permet de connaître la position des centroïdes
- Précision recherchée $\leq 5e-6$ px ($0.3 \mu\text{as}$)



- Preuve de concept sur des petite matrices (Crouzier et al. 2016, A&A 595, A108) : $6e-5$ px
- il reste à valider les performance sur de grandes matrices

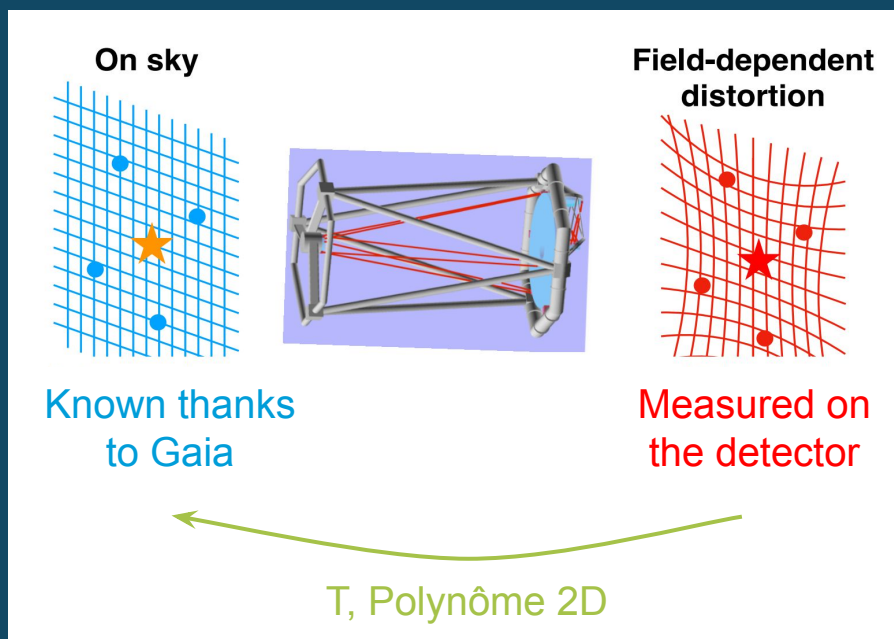
Objectifs scientifiques :	Spécifications scientifiques :	Spécifications techniques :
<ul style="list-style-type: none"> • Explorer les systèmes planétaires proches • Sonder la matière noire • Étudier les objets compacts 	Sensibilité particulière aux étoiles semblables au soleil	$400 < \lambda < 900 \text{ nm}$
	Observation d'étoiles de différentes magnitudes	Dynamique importante : Theia ~ 1e3; HWO ~ 1e5 (ou temps d'exposition différentiels)
	Grand champ	Grand nombre de pixels ~ 1e9 px = 30 000 x 30 000 px (avec redondance)
	Détecteur finement caractérisé	Caractéristiques TBD
	Positions des centroïdes des pixels connues	Métrologie pour calibration interférométrique des centroïdes Theia ~ 5e-6; HWO ~ 5e-5
	Distorsion optique corrigée	Calibration numérique de la distorsion optique grâce aux étoiles de référence

Idée :

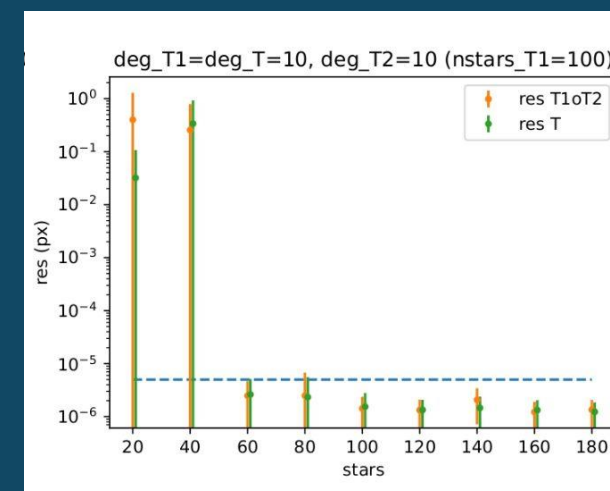
- modéliser la fonction de distorsion de champs par un polynôme 2D (T)
- Ajusté T grâce aux étoiles de référence du champ de vue connues par Gaia
- Appliquer T à l'étoile cible pour retrouver sa position non distordue

Conclusion simulation :

Calibration avec une précision de $5e-6$ px possible avec 100 étoiles de référence et un polynôme d'ordre 8



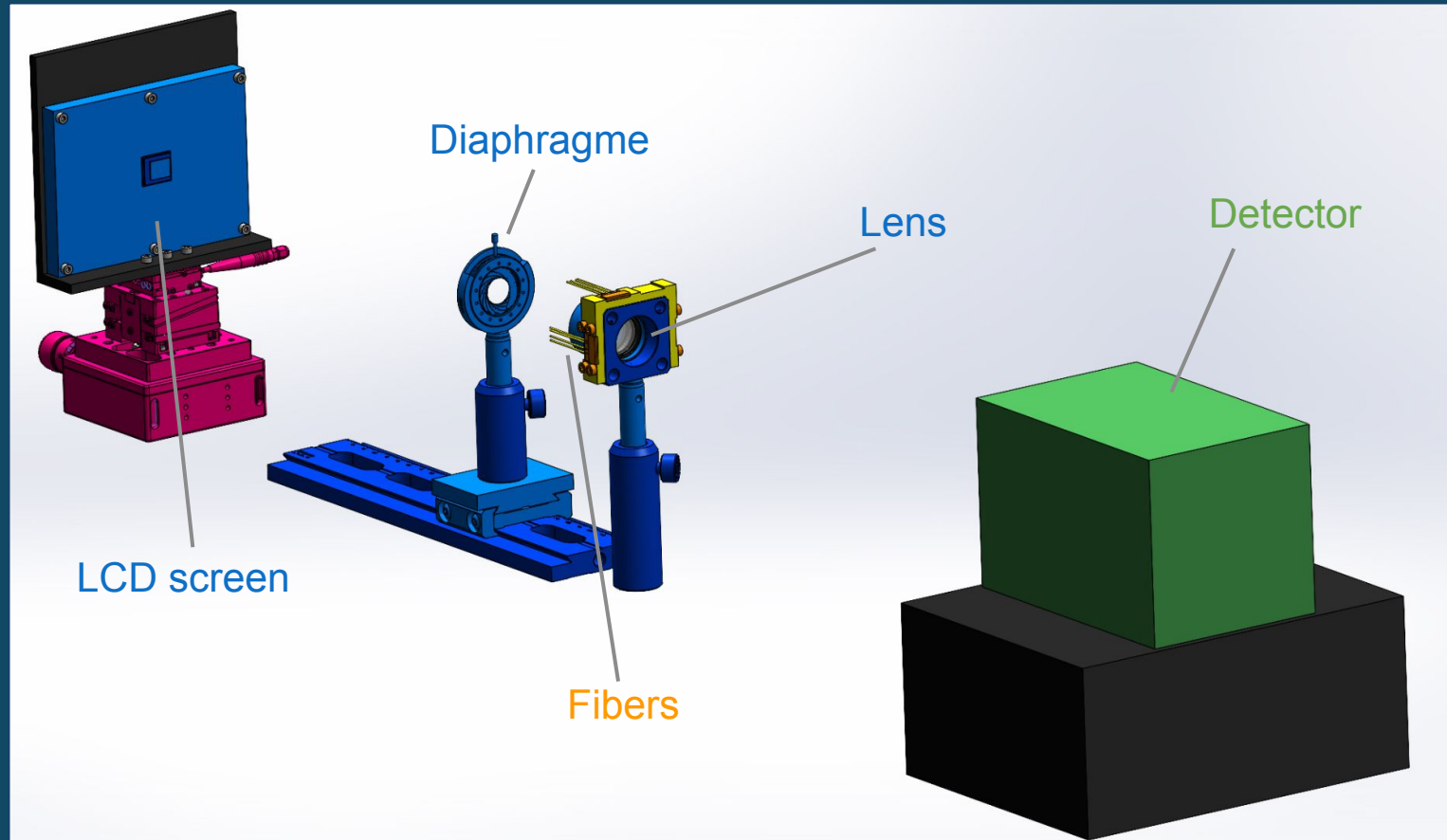
Papier
in prep



Calibration distortion optique

17/19

- Illuminer des pseudo-étoiles sur l'écran LCD
- Induire une distorsion grâce à la lentille et au diaphragme
- Enregistrer l'image des étoiles distordues avec le détecteur
- Appliquer la procédure précédente pour retrouver l'image non distordue



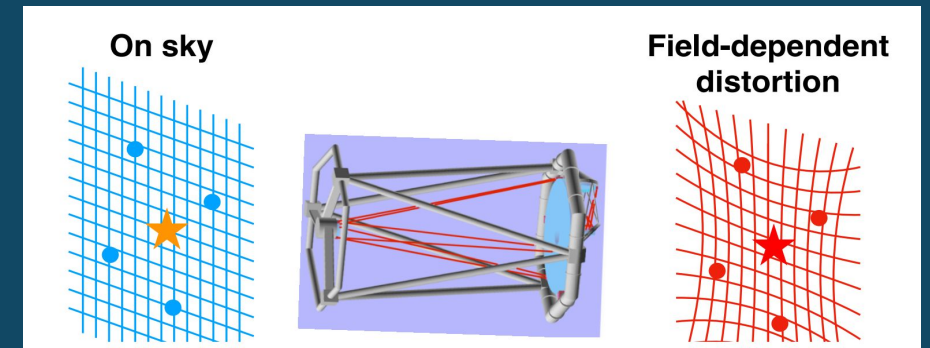
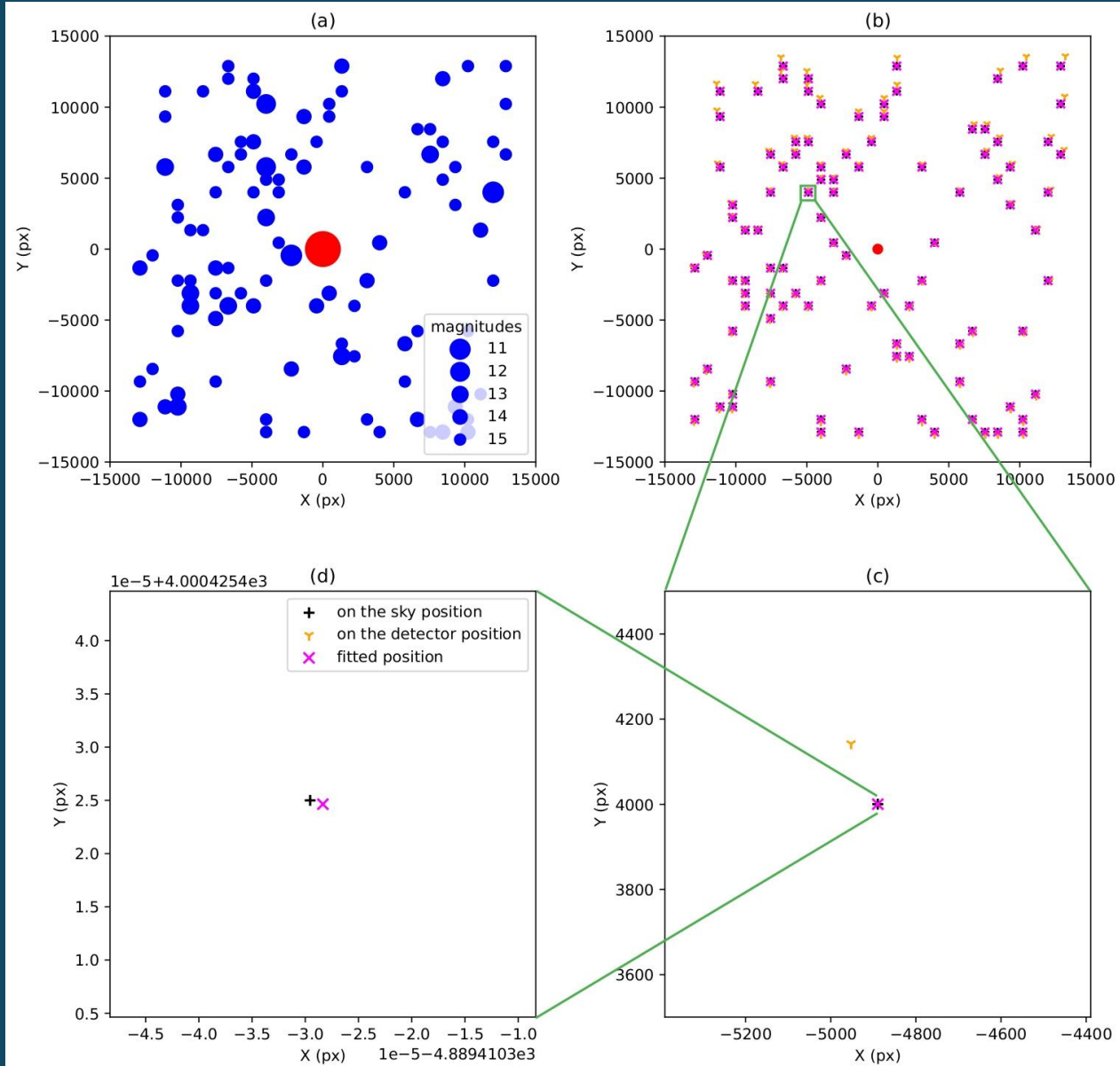
Objectifs scientifiques :	Spécifications scientifiques :	Spécifications techniques :
<ul style="list-style-type: none">• Explorer les systèmes planétaires proches• Sonder la matière noire• Étudier les objets compacts	Sensibilité particulière aux étoiles semblables au soleil	$400 < \lambda < 900 \text{ nm}$
	Observation d'étoiles de différentes magnitudes	Dynamique importante : Theia $\sim 1e3$; HWO $\sim 1e5$ (ou temps d'exposition différentiels)
	Grand champ	Grand nombre de pixels $\sim 1e9 \text{ px} = 30\,000 \times 30\,000 \text{ px}$ (avec redondance)
	Détecteur finement caractérisé	Caractéristiques TBD
	Positions des centroïdes des pixels connues	Métrologie pour calibration interférométrique des centroïdes Theia $\sim 5e-6$; HWO $\sim 5e-5$
	Distorsion optique corrigée	Calibration numérique de la distorsion optique grâce aux étoiles de référence

En cours
Pour bientôt
Fait
Pour bientôt
Pour le futur

- Caractérisation détecteur (Gigapyx, Pyxalis)
- Calibration interférométrique de la position des pixels en labo
- Procédure simulée de calibration de la distorsion de champ
- Calibration de la distorsion de champ en labo
- Matrice détecteur 1Gpx (30 000 x 30 000) pour couvrir le champ de vue (via 220 Mpx)



Calibration distortion optique



Polynôme