

---

# équipe **Harissa- CRAL**

*(High Angular Resolution, Imaging  
& Star Surroundings Astrophysics)*



# Équipe HARISSA @ CRAL

*(High Angular Resolution, Imaging & Star Surroundings  
Astrophysics)*

## Membres permanents du CRAL impliqués en ITHD

Maud Langlois

Magali Louprias

Gil Moretto

Michel Tallon

Éric Thiébaud

Ferréol Soulez

## Axes de recherche :

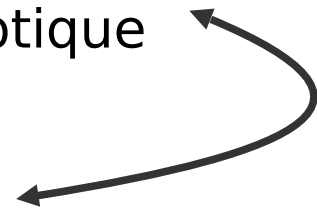
### recherche en instrumentation

Instrumentation grand contraste et optique  
adaptative

### science des données

traitement du signal  
reconstruction d'image

Co -  
développement



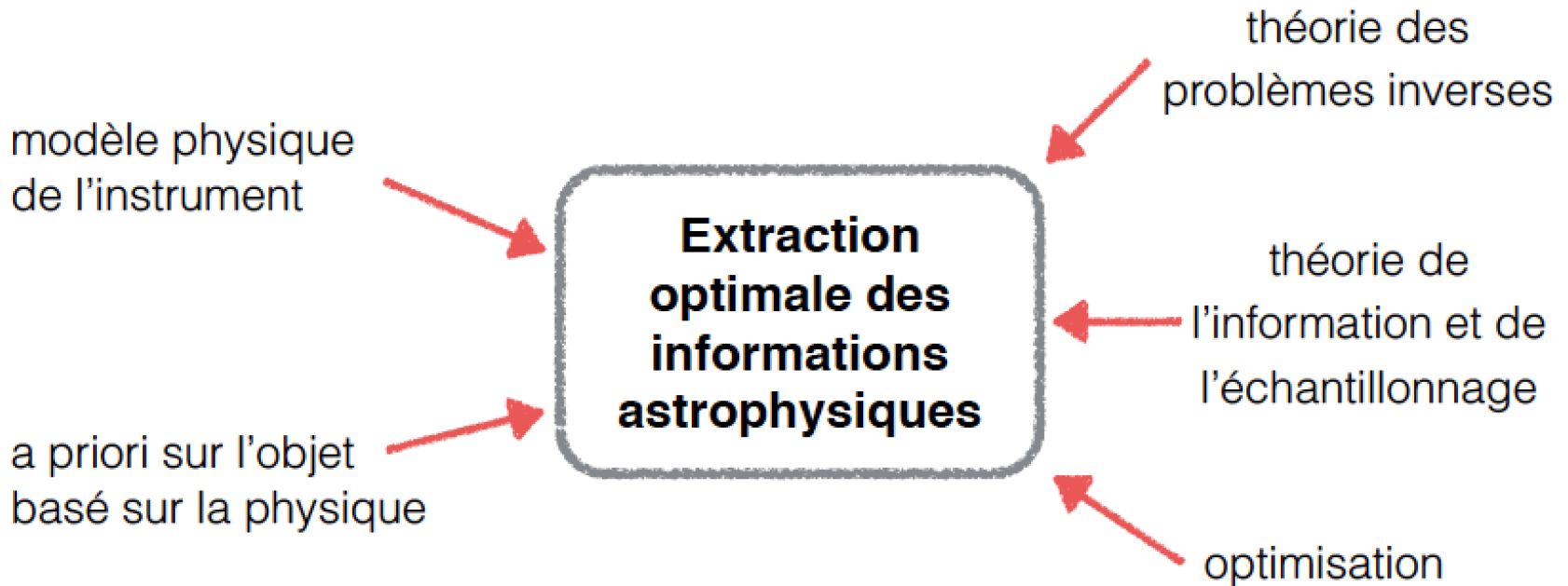
# Activités de R&D amont en ITHD

---

- ▶ Science des données (développement de nouvelles méthodes pour traitement des données multi-variées ITHD)  
*~2 FTE/an, financements multiples (ANR, OPTICON, Mission interdisciplinaire du CNRS)*
- ▶ Optique adaptative extrême optimale (simulation et contrôle commande, nouvel analyseur de front d'onde dédié ITHD)  
*~ 3 FTE/an financements multiples (Région, CNRS, LABEX LIO)*
- ▶ *Collaborations: Université de saint- Etienne (LHC), Université de Galway, ESO, SPHERE consortium*



# Problèmes inverses pour l'ITHD



## Originalité

- traitement global des données multivariées  $(x, y, \lambda, t)$
- données réelles avec leur complexité
- autocalibration (estimation simultanée des paramètres instrumentaux)



# Expertise: Problèmes inverses

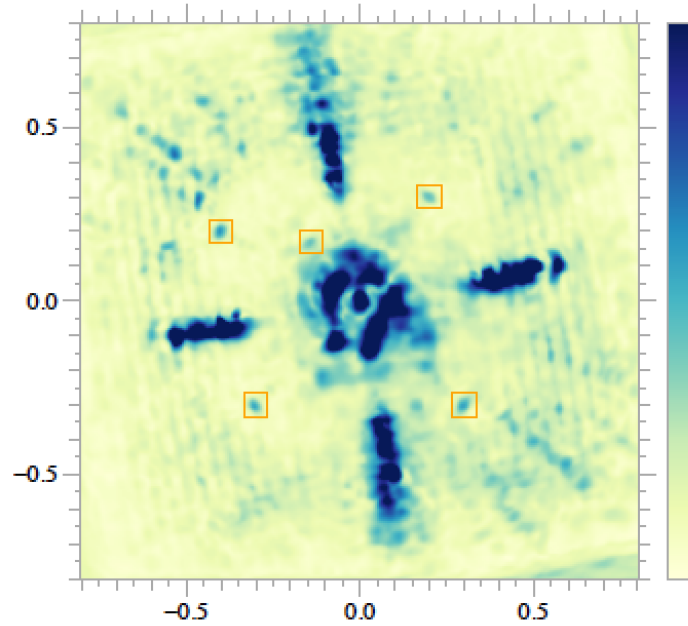
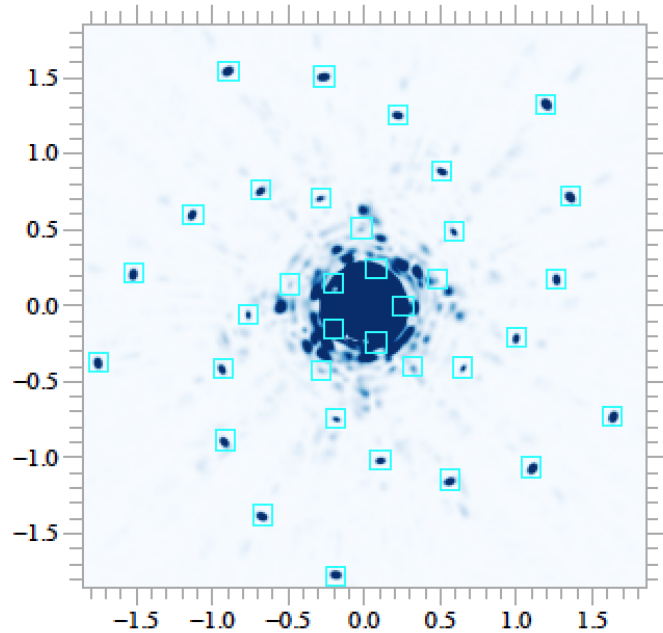
---

- **Reconstruction à partir de données *multi-variées*** :  $(x, y, z, \lambda, t)$ 
  - applications bio-médicales (MiTiV : tomographie dynamique, déconvolution aveugle en microscopie confocale et coronarographie)
  - spectroscopie intégrale de champ (SNIFS, Muse, SPHERE ...)
  - interférométrie optique (MiRA 3D)
- **Détection optimale**
  - exo-planètes : SPHERE (VLT), EPICS (ELT), projet DETECTION
- **PSF variable dans le champ**
  - traitement post-optique adaptative
- **Autocalibration**
  - Qualifier l'instrument directement d'après les mesures scientifiques: Déconvolution aveugle, matrice d'interaction AOF, PSF Euclid

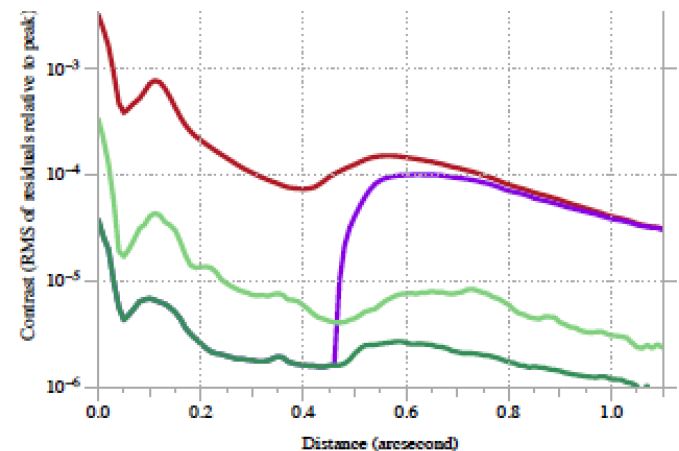
---

▶ **Expertise pluridisciplinaire**

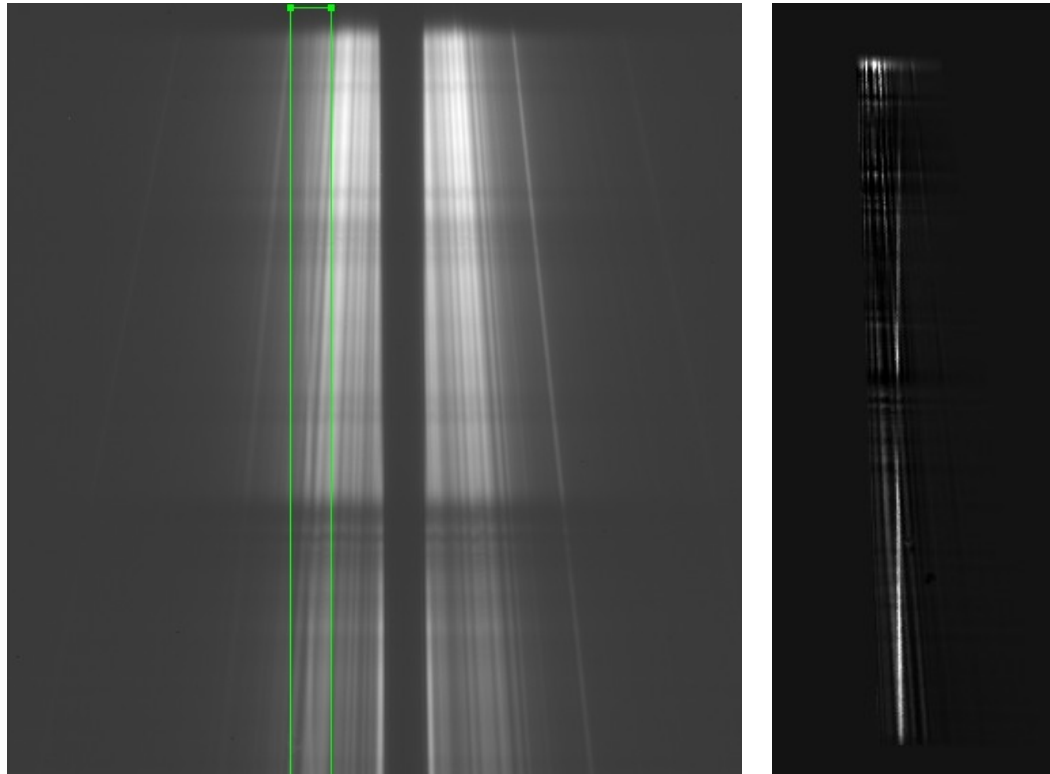
# Science des données pour l'ITHD: Suppression des speckles dans les données multi-variées



Méthode dédiée à améliorer la performance de contraste de SPHERE / IFS (méthode Pex)  
N. Devaney & E. Thiébaud



**Science des données pour l'ITHD: Suppression des speckles et approche inverse pour augmenter la dynamique des données multi-variées**



**SPHERE LSS - SVD & approche inverse**

M. Langlois, E. Thiébaud, T. Wanner

# Imagerie hyperspectrale pour IFS

Gains

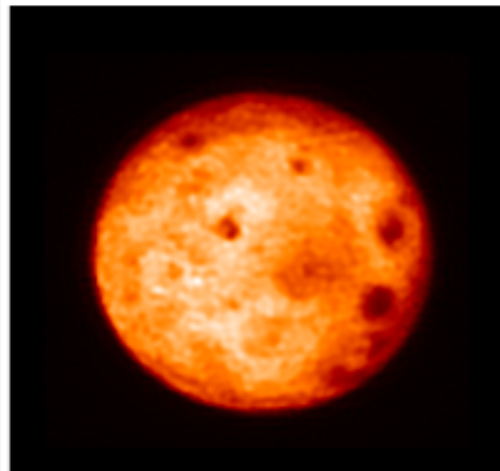
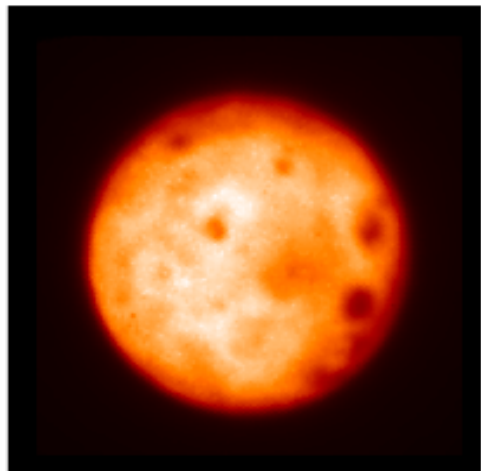
*sensibilité et résolution spatio-spectrale ultimes*

Projets ITHD

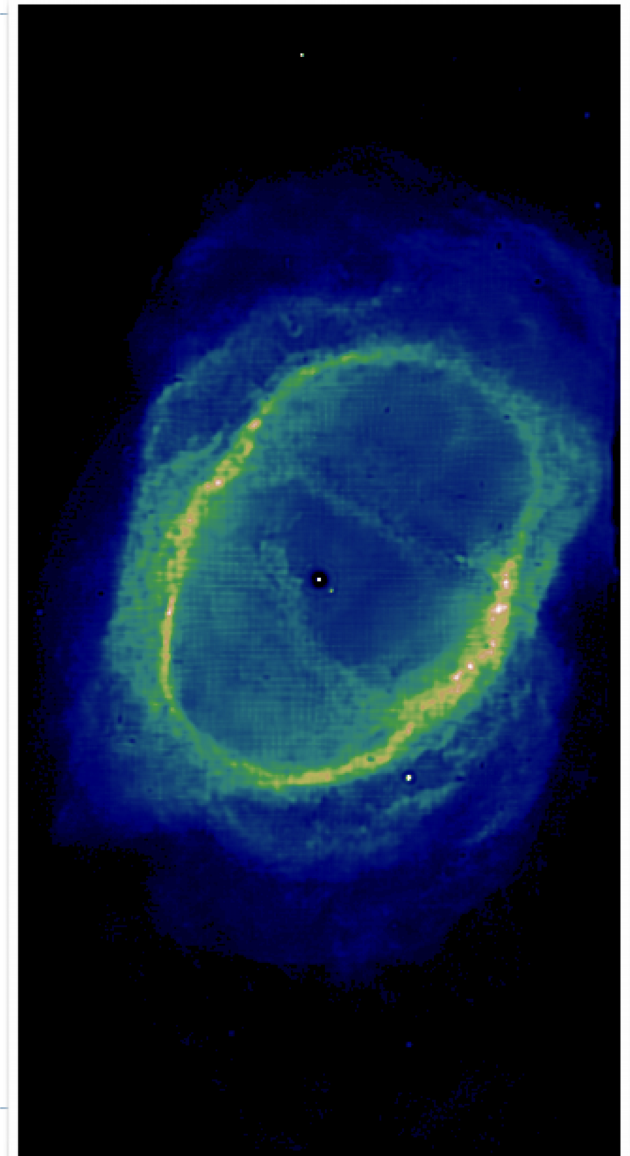
SPHERE, PCS

Défis

modélisation et **étalonnage**



Io (bande K, données SPHERE-IFS, traitement : Ferréol Soulez)



NGC 3132 en H $\alpha$  (données MUSE, traitement : Ferréol Soulez)



# Réponse impulsionnelle variable dans le champ

**Applications :**  
**imagerie grand champ**  
: MCAO, MEGACAM, ...  
**spectroscopie**  
**intégrale de champ**

**Défis :**  
**modélisation** (Denis et al., 2011, 2014)  
**calibration**

auto-calibration possible ?

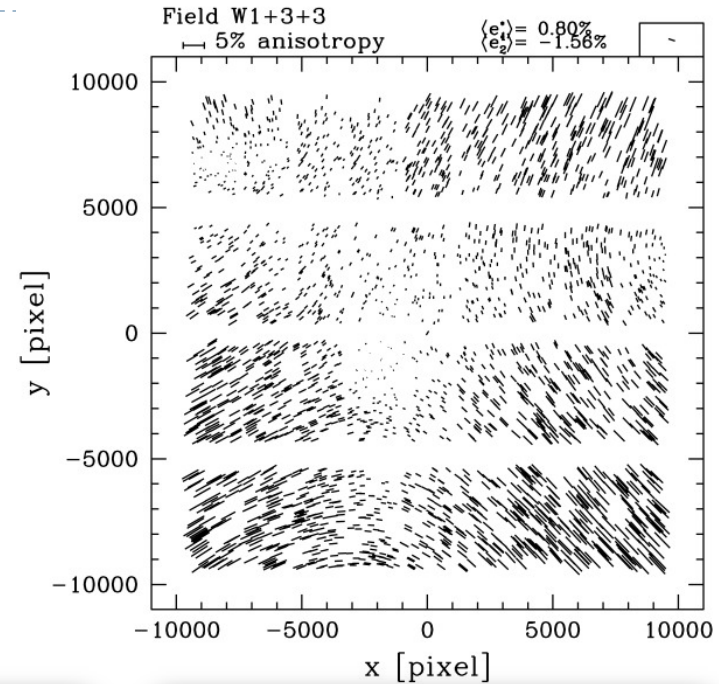


image avec flou variable

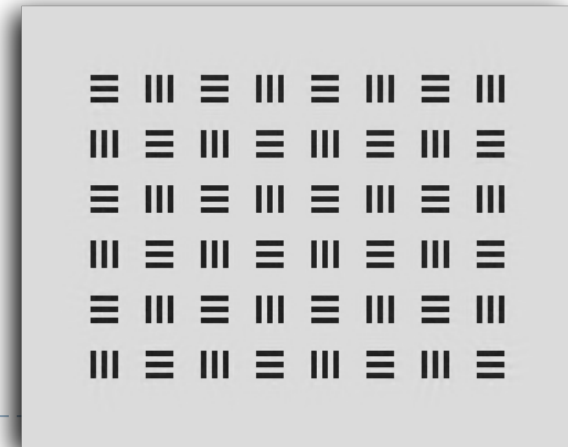
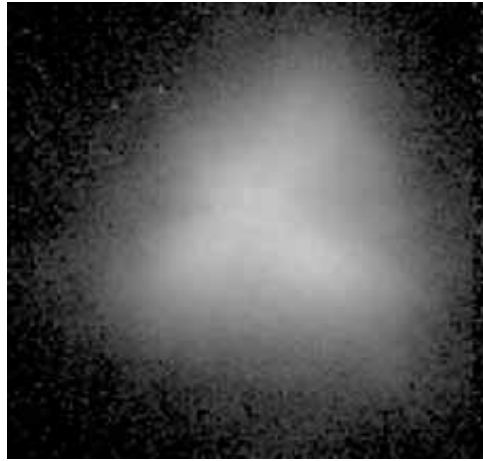


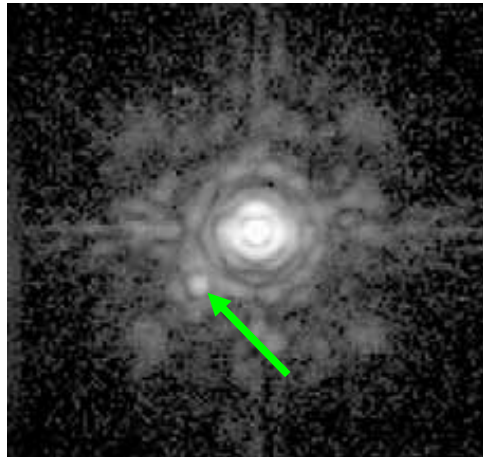
image corrigée (Denis et al., 2014)

# Instrumentation à grand Contraste pour la Caractérisation des Exoplanètes



**Boucle ouverte**  
FWHM  $\approx 0,70''$   
Strehl  $\approx 2\%$  en K

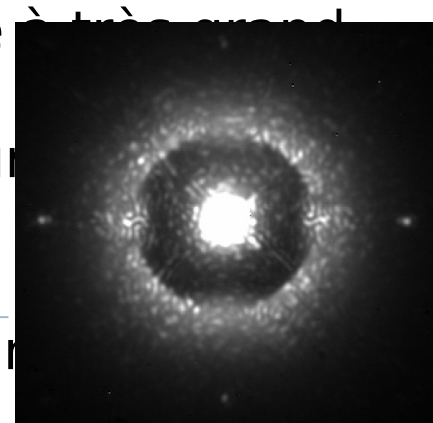
- Objectifs scientifiques : Caractérisation des exoplanètes, détection exo-terres & biomarqueurs
- Haute résolution angulaire  $\rightarrow$  optique adaptative
- Haut contraste :  $10^6$  (IR) à  $10^9$  (visible)  $\rightarrow$  rapport de Strehl  $>90\%$  et traitement de données dédié

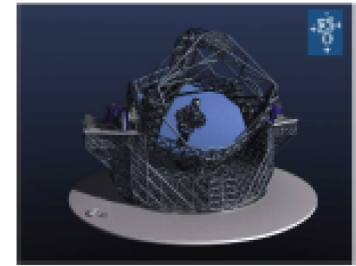


**Boucle fermée**  
FWHM  $\approx 0,09''$   
Strehl  $\approx 80\%$  en K

$\rightarrow$  OA extrême (XAO)  
Défis technologiques

- Correcteurs de front d'onde à très grand nombre d'actionneurs
- Nouveaux types d'analyseur de front d'onde pour l'ELT
- Cophasage pour l'ELT
- Contrôle temps réel (grand nombre de degrés de liberté)





## R&D OA Extrême : l'aventure du Mach-Zehnder

R&D qui vise à valider l'utilisation d'un Mach-Zehnder pour l'analyse du front d'onde en XAO.  
Il s'agit, en parallèle de simulations numériques, d'une démonstration expérimentale dédiée aux futurs très grands télescopes (ELTs).

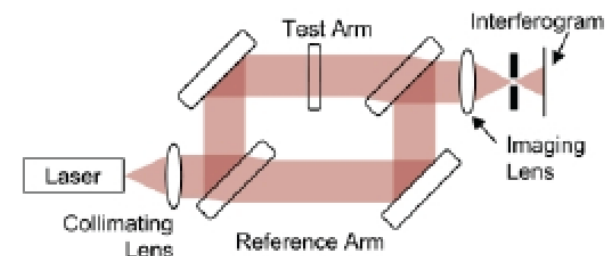
- **Challenges technologiques/ développements innovants**

L'analyseur de Mach-Zehnder permet:

- Performances inégalées en terme de contraste mais est limité par sa réponse non linéaire.
- Développement de moyens de palier ces limitations (approche inverse, Fractal Iterative Method, et concept multi-lambda) afin de valider son utilisation pour les futurs ELTs
- Maitrise des degrés de libertés compatibles avec un ELT

- **But**

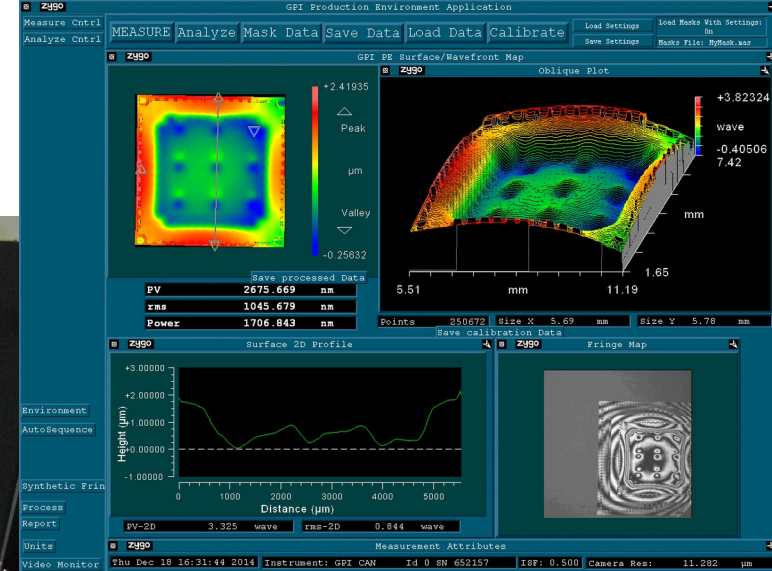
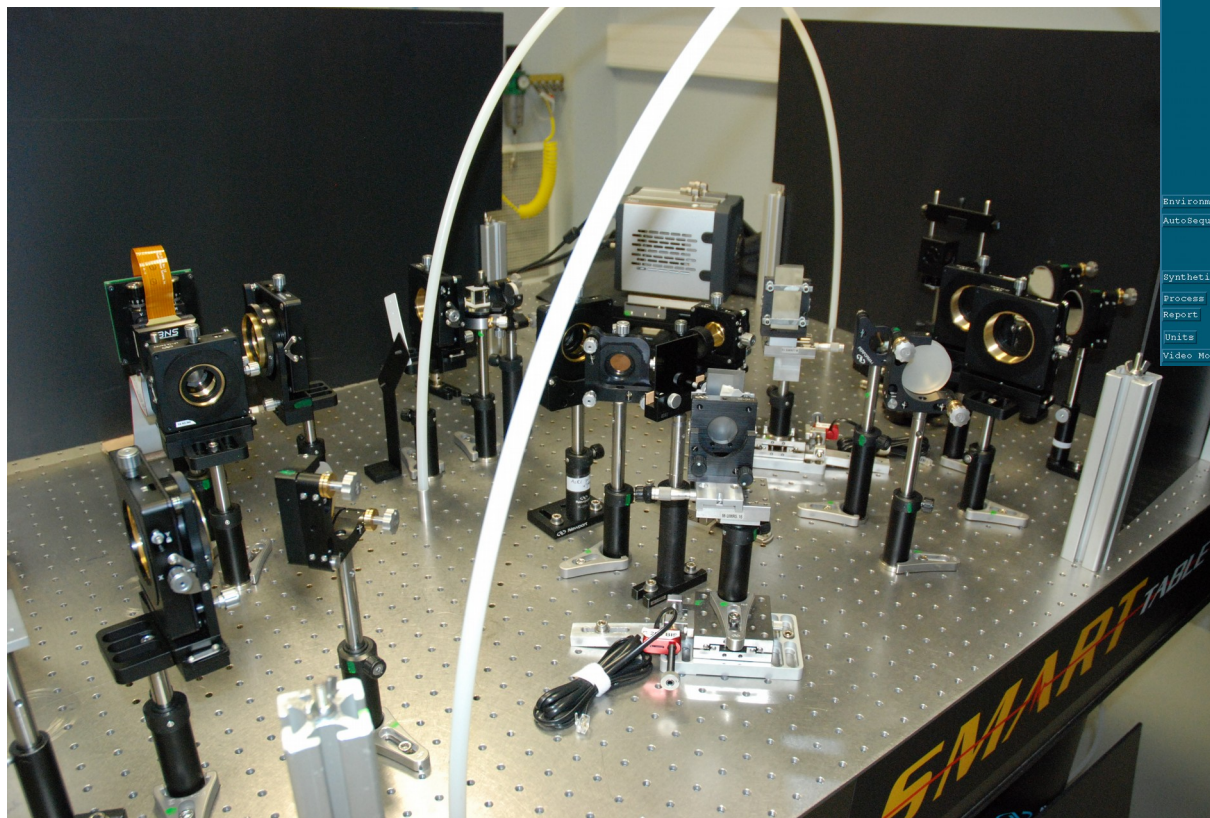
- Prouver la faisabilité de la très haute résolution (< 10 mas) et des contrastes >  $10^9$  pour permettre la détection directe de planètes extra-solaires de faible masse sur ELTs.
- Participer à ELT-PCS (Construction 2022)





# XAO CRAL

## Validations expérimentales

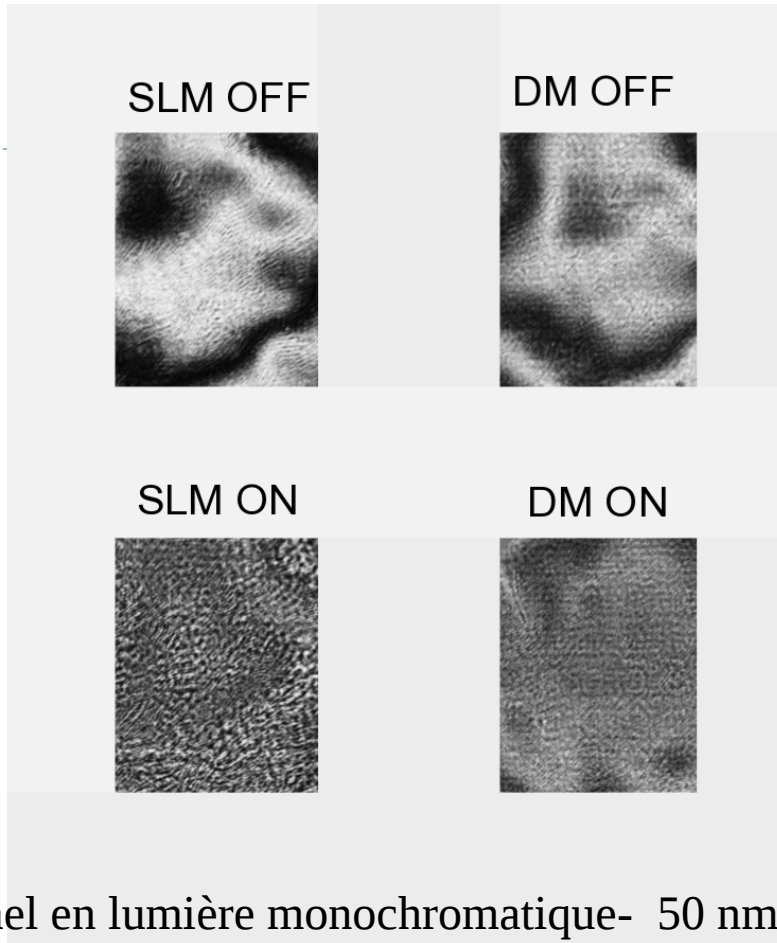


## Composants

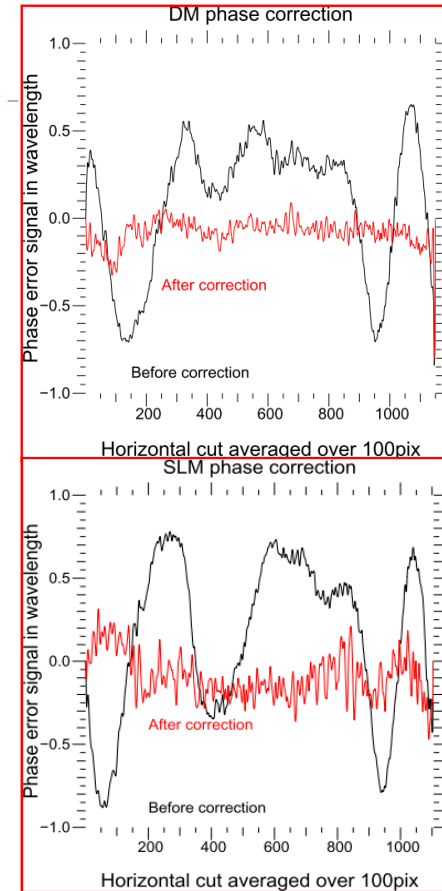
- analyseur de front d'onde Mach-Zehnder
- dispositifs de correction à grand nombre de degrés de liberté
- woofer tweeter
- générateur de turbulence + simulateur de télescope
- calculateur temps réel avec commande itérative



# Correction des aberrations en boucle fermée



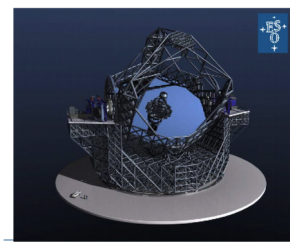
Opérationnel en lumière monochromatique- 50 nm RMS WF error - Strehl 90%



**Verrous à lever pour l'utilisation sur le ciel:**

**Améliorer la dynamique (phase unwrapping), la robustesse (approche inverse pour l'analyse en temps réel), le contrôle temps réel (FRIM), et élargir la bande passante**

# R&D XAO: perspectives



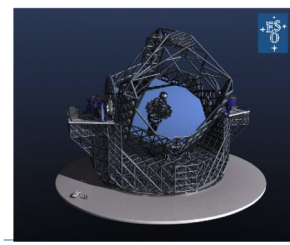
**Modélisation numérique insuffisante pour valider les nouveaux concepts en XAO pour ELT**  
⇒ **banc expérimental dédié au haut contraste sur ELT (*unique en France*)** pour :

- Valider l'utilisation d'un nouvel analyseur de front d'onde Mach-Zehnder dédié XAO
- Tester de nouvelles méthodes de contrôle-commande boucle fermée en XAO
- Evaluer les performances de la XAO
- Valider de nouvelles méthodes de cophasage et de traitement du signal

⇒ **lever les verrous sur des points critiques**

▶ **pour le très haut contraste**

# FrIM-3D : modélisation et commande



d'une optique adaptative  
approche inverse pour la meilleure  
commande OA sur l'E-ELT

**tomographie atmosphérique** (HARMONI,  
MICADO)

**reconstruction optimale** (minimum de  
variance)

approche originale : *opérateur fractal*

FrIM = méthode itérative (mais qqs itérations  
seulement !) ⇒ **rapide** (Thiébaut & Tallon  
2010, thèse C. Béchet)

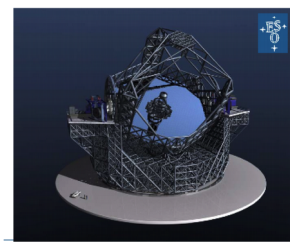
## FrIM sur le simulateur E-ELT de l'ESO

cluster Octopus

utilisé par l'ESO pour simulations

comparaison : **meilleures performances  
atteintes avec FrIM**

# FrIM-3D : les meilleures performances pour l'E-ELT

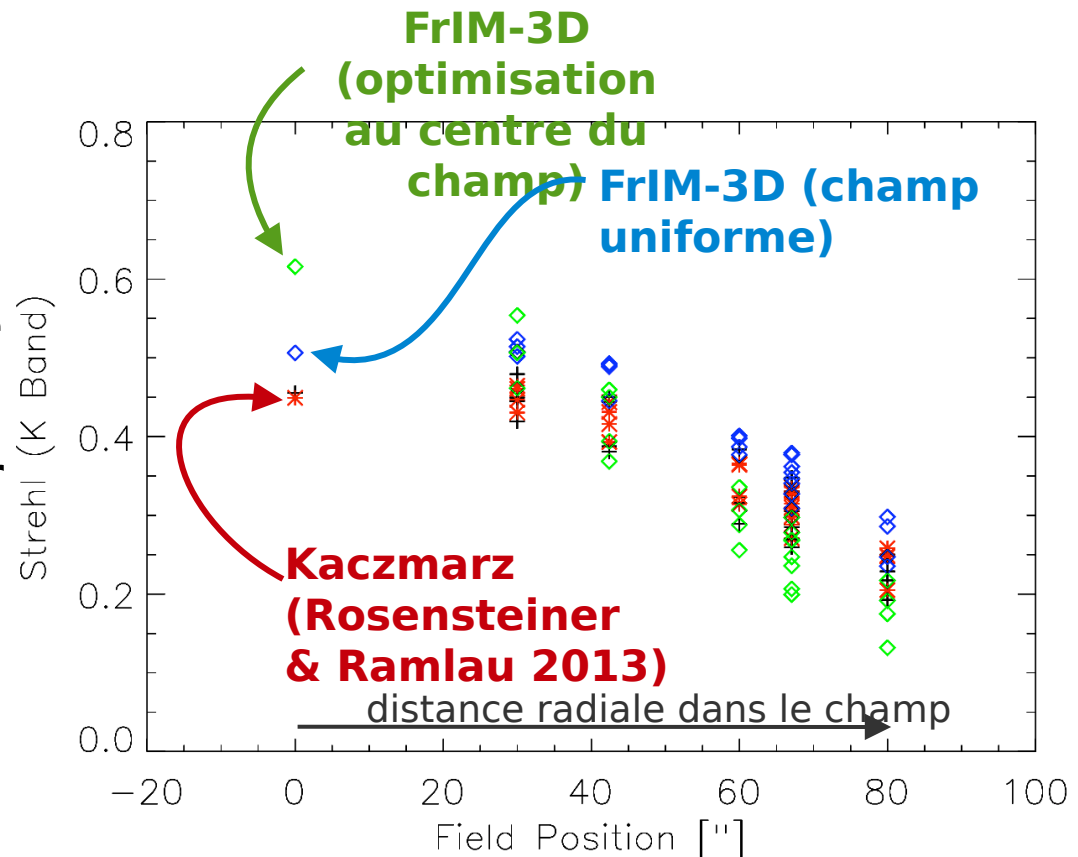


**FrIM-3D = outil unique**, seul capable de : gérer les « *trous* » (araignée et segments manquants) modéliser de façon réaliste de très grands systèmes (E-ELT + XAO/MCAO)

## **résultats :**

optimisation de la configuration étoiles laser pour ELT →

**meilleur Strehl**



Simulations Octopus pour  
MCAO E-ELT (MAORY)

# FrIM-3D : prochain défi → sur le ciel

## Exploiter une approche unique

Performances ultimes → max. Strehl

Prise en compte les « trous » sur un ELT  
(segments manquants, araignée)

Approche très rapide

## PCS

Démonstrateur XOA au CRAL

Validation de la commande pour le Mach-Zehnder

Modélisation des performances

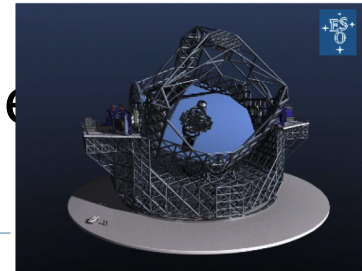
Optimiser la zone de correction (augmenter le  
nombre d'actionneurs)

## étapes :

incorporation de la prédiction temporelle

Woofers / Tweeters

▶ futur : *préparer la XAO sur ELTs*



# Projet en cours en ITHD

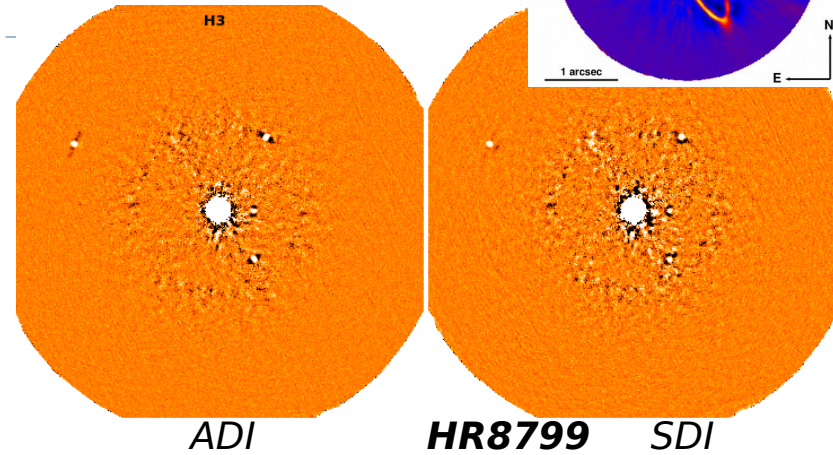
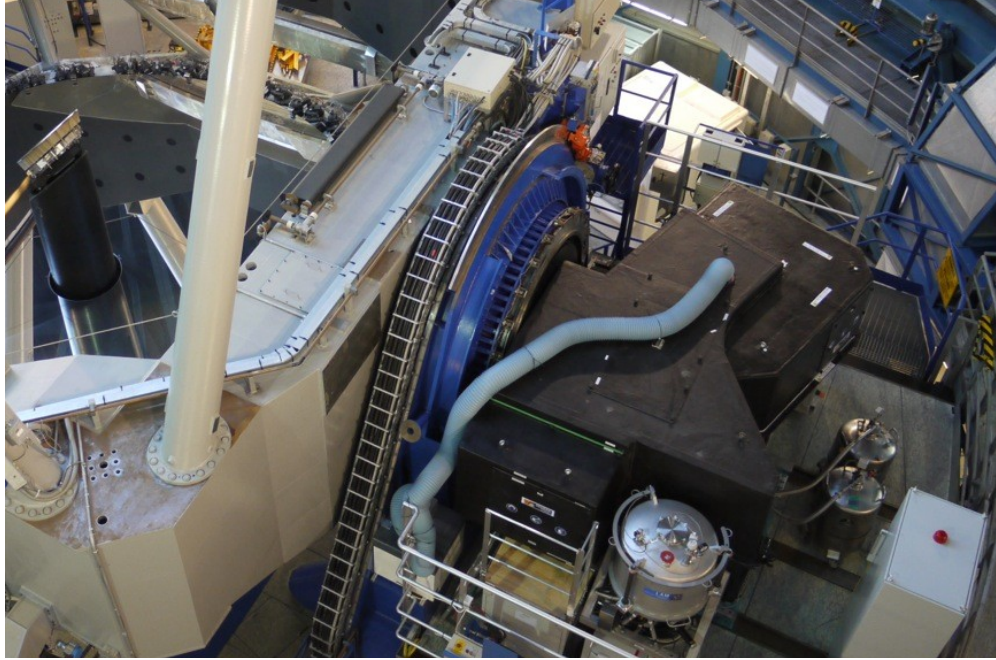
---

- SPHERE activités instrumentales et exploitation scientifique (M. Langlois- *Instrument scientist* IRDIS)- 0.7 FTE/an
- X3PLANET: eXtreme high contrast imaging of eXoPLANETs with off-axis telescopes: technology incubation for the next decade -1-5 FTE sous réserve de financement ERC
- Colossus: un extreme ELT dédié ITHD - 3 FTE/an
  - ▶ *Collaborations: SPHERE: IPAG, LESIA, LAM, Lagrange, INAF, ETH, MPIA. X3PLANET & Colossus: Univ of Hawaii, KIS, ITO, SONL, LESIA, IPAG*



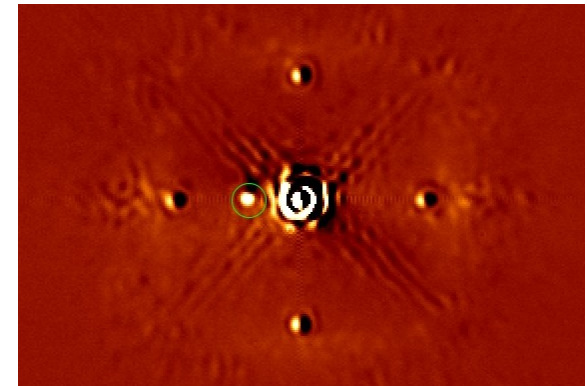


# L'exploitation de SPHER



## Nos atouts:

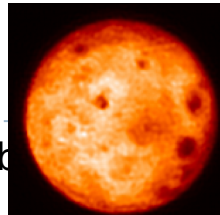
- GTO - Organisation / Stratégie d'observation NIRSUR (A.-M. Lagrange, M. Langlois, R. Gratton)
- Membre des groupes scientifiques du GTO & Co-I temps ouvert
- Maitrise de l'instrument (instrument scientist IRDIS)



*Beta Pictoris b*

## Nos objectifs:

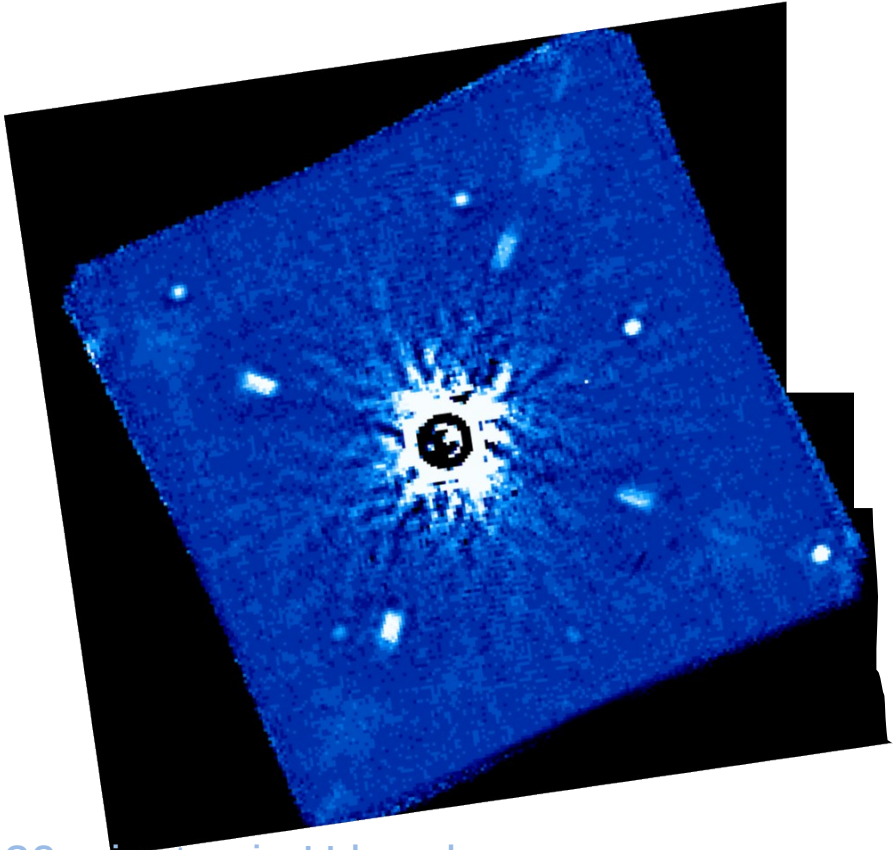
- Exploitation astrophysique (exoplanètes, environnement circumstellaires, petits corps du système solaire)
- Suivre et améliorer « encore » les performances de l'instrument
- Valoriser un savoir faire en analyse des données (E. Thiébaud, M. Langlois, F. Soulez)
- Profiter des synergies avec l'interférométrie (MWC 158 : Soulez, Kluska, Langlois, Thiébaud)





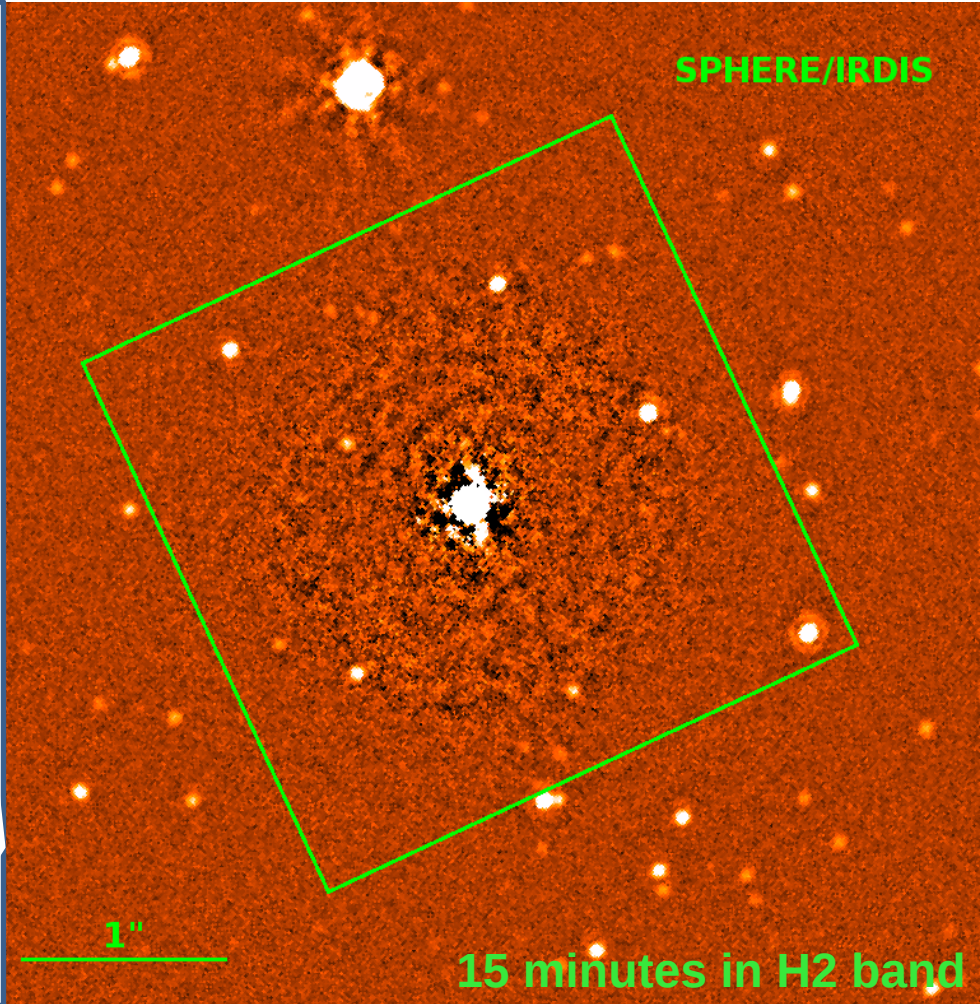
# SPHERE : un niveau de contraste inégalé

GPI



20 minutes in H band

SPHERE/IRDIS

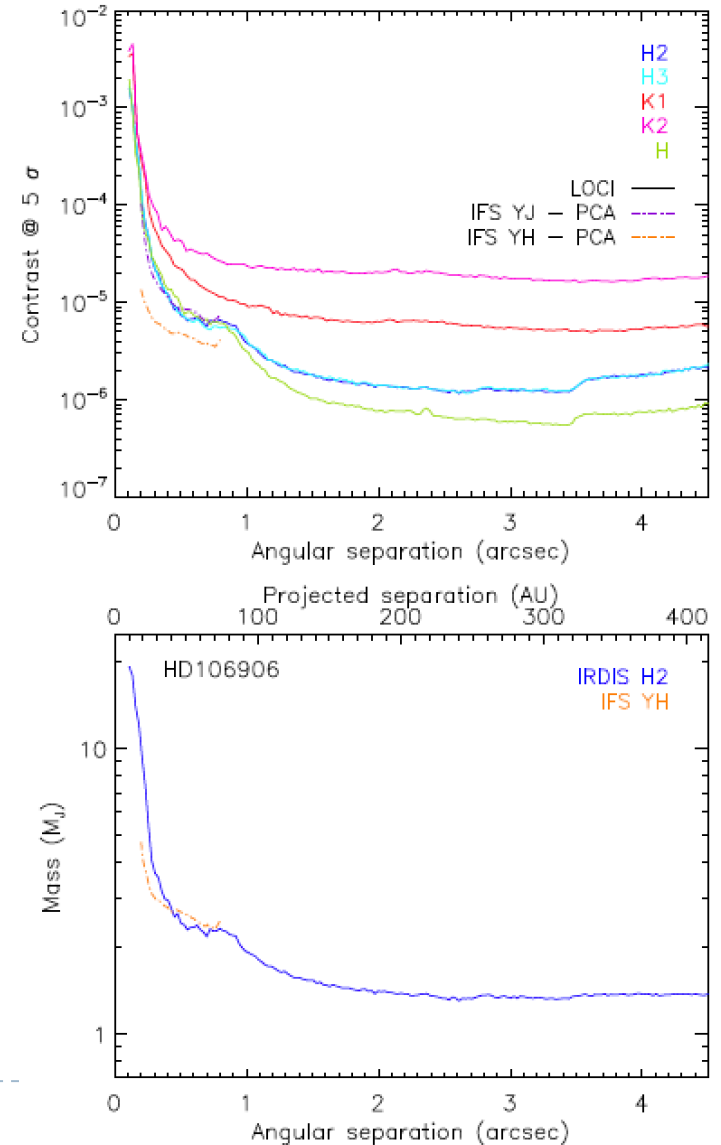
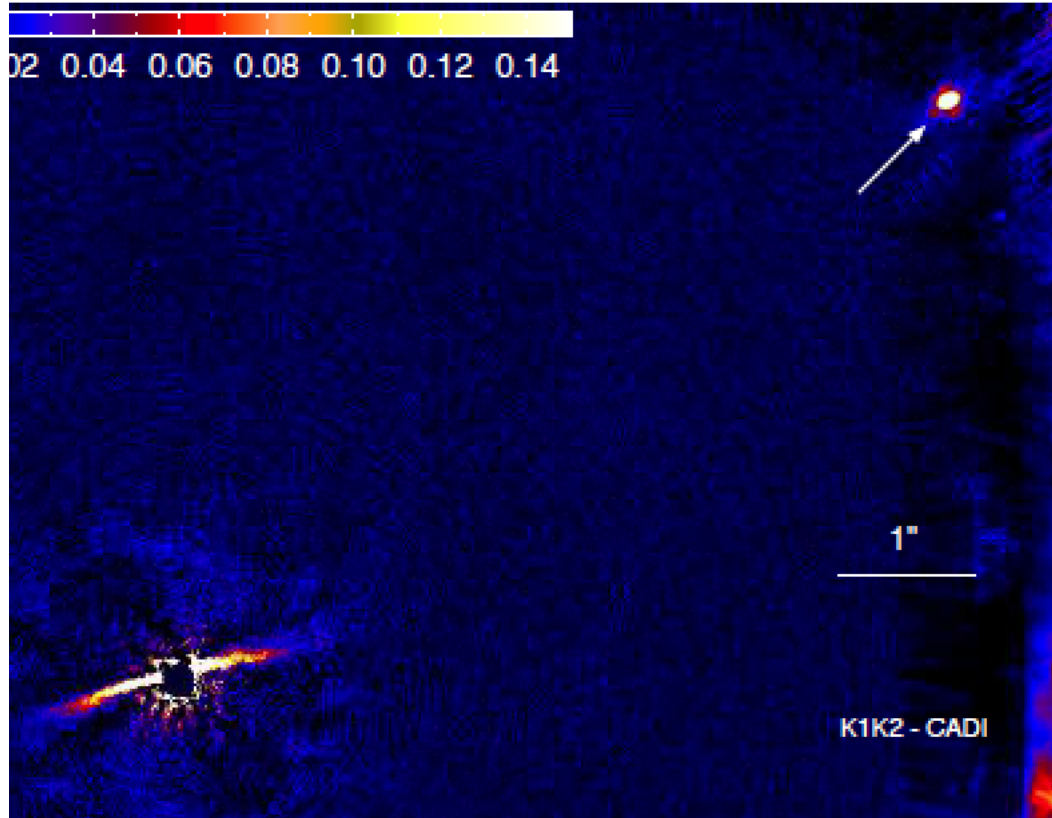


15 minutes in H2 band

HD 165054, G4V, V=8.5



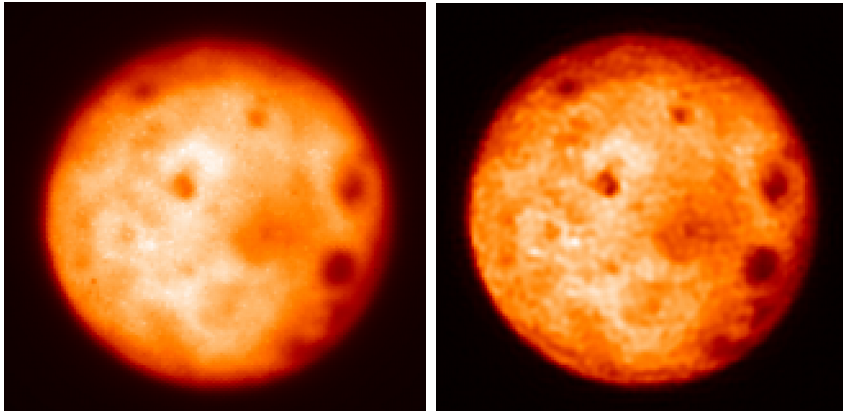
# SPHERE : étude des environnements circumstellaires et des disques



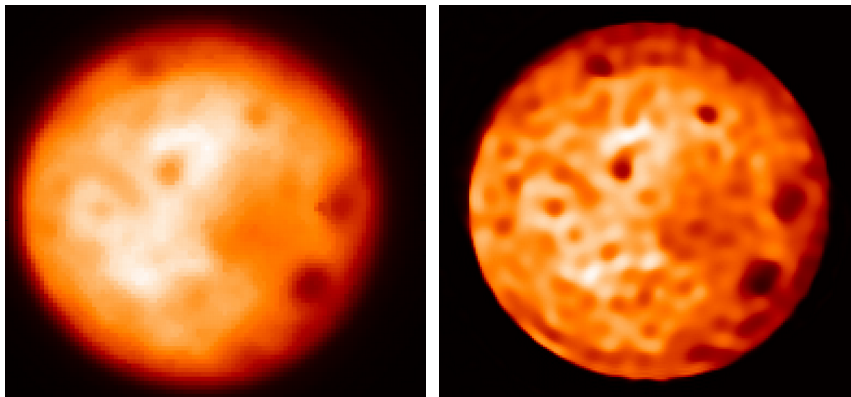
006 (Découverte d'un disque de débris)

# SPHERE : étude des petits corps du système solaire ...

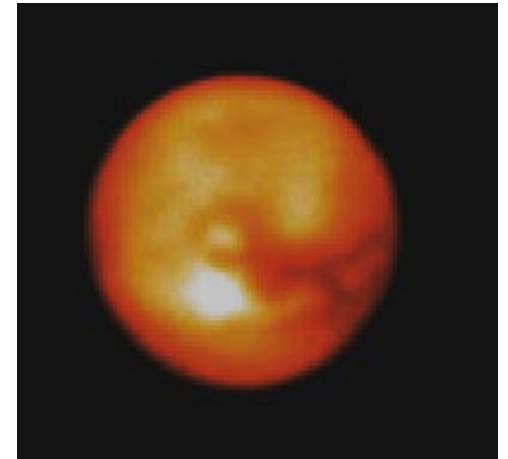
**Io IFS (YJH)**



**Io IRDIS K1**



**Titan IRDIS K1**

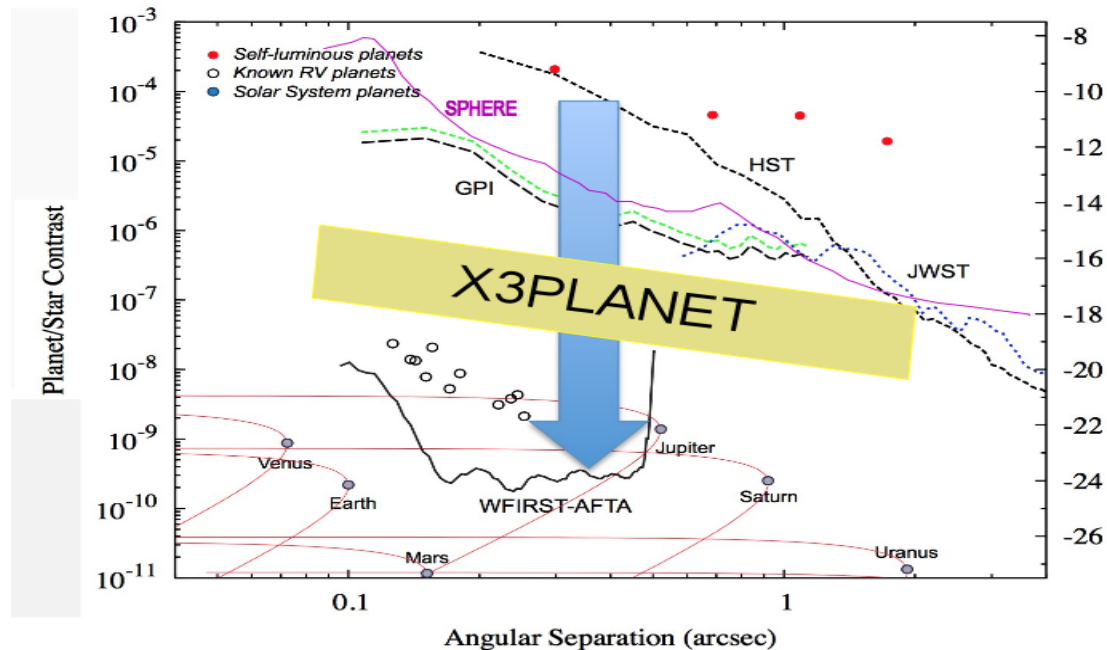


sortie du pipeline

déconvolution  
(multi-spectrale et multi-  
trames,  
Ferréol Soulez)

Collaboration SPHERE & LESIA  
(Sicardy, Lellouch, Bockelé-  
Morvan, Boccaletti)

# ERC consolidator soumise: X3PLANET: extreme high contrast imaging of eXoPLANETs with off-axis telescopes: technology incubation for the next decade



- ▶ Typical SPHERE on-sky performances (in pink) compared to 2.4 m WFIRST-AFTA together with (yellow box) the contrast/parameter range of the proposed X3PLANET facility

- ▶ Collaboration: Univ of Hawaii (Solar C, Planet 2-m, Dkist 4-m), KIS, LESIA, IPAG



# TELESCOPE DEDICATED TO X-HIGH CONTRAST THE COLOSSUS PROJECT

NEW AO/COPHASING STRATEGIES FOR AN EXTREMELY LARGE

**Gil Moretto<sup>(a)</sup>, Jeff R. Kuhn<sup>(b)</sup>, Maud Langlois<sup>(a)</sup>, Eric Thiébaud<sup>(a)</sup>, Michel Tallon<sup>(a)</sup>, Svetlana V. Berdyugina<sup>(c,d)</sup>, David Halliday<sup>(e)</sup>**

(a) Centre de Recherche Astrophysique de Lyon (CRAL/CNRS), Ecole Normale Supérieure de Lyon- France;  
 (b) Institute for Astronomy, University of Hawaii, 34 Ohia Ku, Pukalani, Maui, Hawaii, USA;  
 (c) Kiepenheuer Institute für Sonnenphysik, Freiburg, Germany; (d) NASA Astrobiology Institute, University of Hawaii, Hawaii, USA  
 (e) Dynamic Structures, Port Coquitlam, BC, Canada

**RATIONALE:** Detecting exoplanets and planetary life signal is extremely challenging with current technology because it requires a sensitive telescope optimized for an instrument that can measure the planet's reflected optical and infrared light, while distinguishing this from the star's scattered light and the terrestrial thermal noise background. Here we propose, three new strategies for building such a sensitive telescope: (1) PUPIL CONFIGURATION, (2) A VERY FAST AND HIGHLY ACCURATE ADAPTIVE OPTICS AND (3) HIGHLY ACCURATE COPHASING.

- 1. PUPIL CONFIGURATION DEPENDS ON CORONAGRAPHIC DESIGN + COPHASING OPTIMIZATION ALGORITHM (CO-DESIGN STRATEGY) + OPTO-MECHANICAL ISSUES (MATCHING ENCLOSURE OPENING WITH MIRROR FOOTPRINT)**
- 2. VERY FAST AND HIGHLY ACCURATE ADAPTIVE OPTICS: 60 INDEPENDENT X-AO SYSTEMS RUNNING IN PARALLEL:**

  - Each M1 sub-aperture delivers a high-Strehl wavefront;
  - Unobstructed sub-apertures = no wavefront discontinuities;
  - Distinct AO systems (WFS, DM) working on each M1 sub-aperture;
  - Greg Design places an exit pupil on the M2;
  - 60 independent Deformable M2 = 180mm for a 19ArcSec<sup>2</sup> fov;
  - 36 Actuators per  $\varnothing$  for a 5mm pitch = 1060 Acts;
  - Prior to cophasing  $\sum M1_i (i=1, 60) \dots$
- 3. COPHASING COLOSSUS: WE PROPOSE TO EXPLOIT PHASE DIVERSITY APPROACH TO ESTIMATE THE RESIDUAL PHASE ABERRATIONS WHICH ARE DUE TO PISTON AND TILT ERRORS FOR EACH M1 SEGMENTS.**

**FOCAL PLANE TECHNIQUE:** RESOLVING AMBIGUITIES IN THE ESTIMATIONS OF THE PHASE ABERRATIONS GENERATED BY A CENTER-SYMMETRIC (REDUNDANT) PUPIL GEOMETRY:

  - Needs 2 images (in/out focus);
  - Approach is based on object brightness distribution (non linear and iterative algorithm) solved for real time estimations;
  - Require object estimation: the object (star) remains steady making possible to derive a good approximation of the object brightness distribution from a sequence of images.

# The Colossus Project

Jeff Kuhn, Svetlana Berdyugina  
 Institute for Astronomy, The  
 University of Hawaii, USA  
 Kiepenheuer-Institut fuer  
 Sonnenphysik, GERMANY

Gil Moretto, Maud Langlois,  
 Michel Tallon, Eric Thiébaud  
 CRAL/CNRS, FRANCE

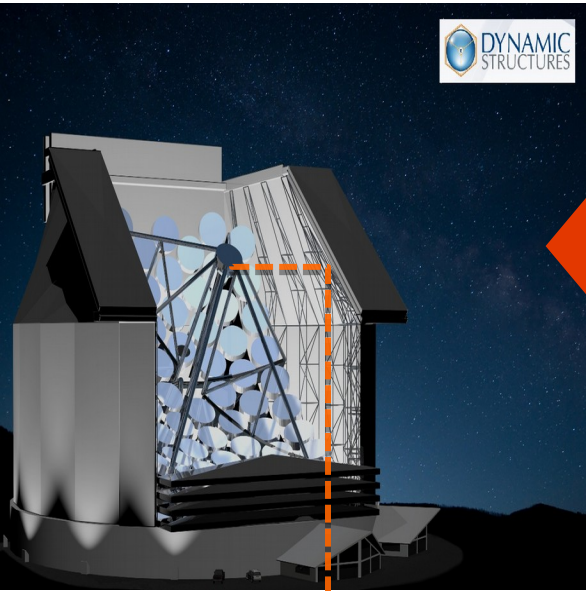
Caisey Harlinton, David  
 Haliday  
 Dynamic Structures, CANADA

ANR\_Blanc (2016 CRAL & INSA/LYON  
 en preparation



# Proof of a low-mass scalable surface manufacturing technology (IP patent pending)

# 1



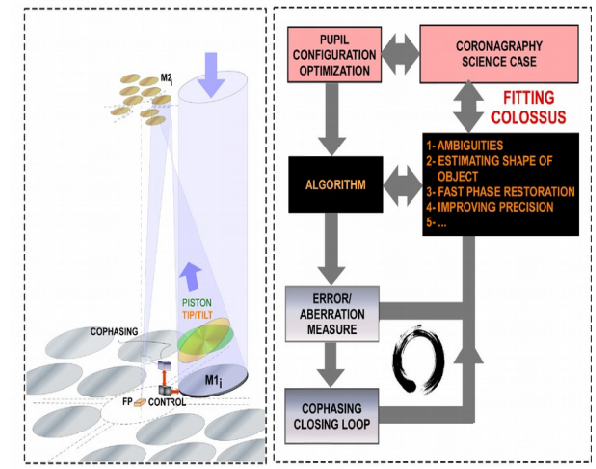
1st DEDICATED EXO-LIFE DETECTION TELESCOPE



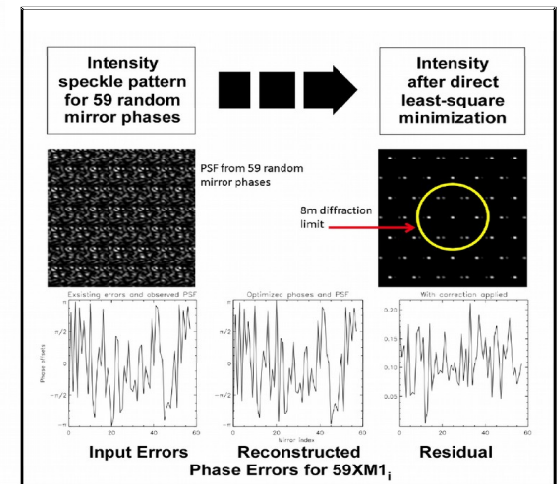
# Phase Diversity Cophasage

# 3

## CO-DESIGN STRATEGY

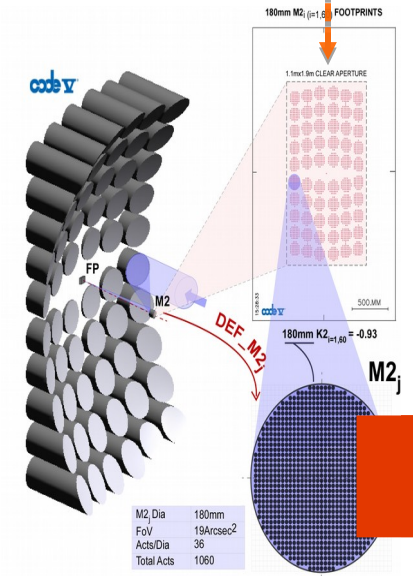


## MIRROR PHASE RECOVERY



How the telescope initially "boots-up" with a non iterative phase algorithm that works to bring the mirror phases into a linear iterative solution regime for the mirror phases and tip/tilts.

# 2 Very fast and highly accurate: 60 independent XAO SYSTEMS RUNNING IN PARALLEL



DM2<sub>j</sub> = 180mm for a FOV 19"

36-35 Actuators per Diameter

# Défis pour la prochaine période

## Astrophysique

----- exploitation de SPHERE: exoplanètes, disques, petits corps du système solaire,...

## Recherche instrumentale

approches innovantes en optique adaptative

FRIM3D  $\Rightarrow$  préparation E-ELT

Haut contraste (Mach Zehnder, co-phasage)  $\Rightarrow$  PCS  
co-design

## Science des données

données multi-variées pour ITHD: IFS et IRDIS LSS SPHERE  
(LaHC et Univ. Galway)  $\Rightarrow$  SPHERE et PCS

autocalibration (PSF variable)  $\Rightarrow$  grands champs et IFS

## Moyens

financements : Labex, ANR, FUI, Opticon, MIS CNRS,...

soutien du laboratoire et des services techniques

$\rightarrow$  équipe inter-laboratoire : CRAL-LaHC

$\rightarrow$  Recrutement récent de Ferréol Soulez

$\rightarrow$  collaborations nationales et internationales

# Synthèse prospective en ITHD

---

**Objectifs astrophysiques :** caractérisation des exoplanètes, détection exo-terres & biomarqueurs

**Lever les verrous sur des points critiques pour le très haut contraste**

optique adaptative innovante (Mach Zehnder)

cophasage des ELTs

traitement du signal & co-design

⇒ **atteindre des performances inégalées en terme de contraste**

**Atouts :**

expertise reconnue

banc dédié R&D unique en France

expérience acquise sur SPHERE

synergies propices (traitement, instrument, optique adaptative)

**objectifs :**

Valider les innovations ITHD au labo et sur le ciel

Utiliser ces développements pour réaliser un instrument dédié sur un télescope « optimal » hors axe

jouer un rôle important sur ELT-PCS

*contribuer à la haute dynamique sur Micado et Harmoni*

*(exploitation et science des données)*

