Recherche Instrumentale en haute résolution angulaire : progrès et défis

Action Spécifique Haute Résolution Angulaire
David Mouillet & Conseil Scientifique

SF2A, Paris 7 Juillet 2017

Thématiques Haute Résolution Angulaire (en optique et IR)

- Interférométrie longue base (résolution : 1-10 mas)
- Optique adaptative (résolution : 20 -60 mas)
- Imagerie à grand contraste (contraste : $10^{-5 \text{ à } 6}$ @ 0.1 – 1 ‘’)

Sciences des données

Fait Marquant 2016-2017 : Science avec Gravity

Information spatiale dans le domaine
de qq 10 µas à qq mas,
sur objets **faibles**,
Avec résolution spectrale
En un temps faible :

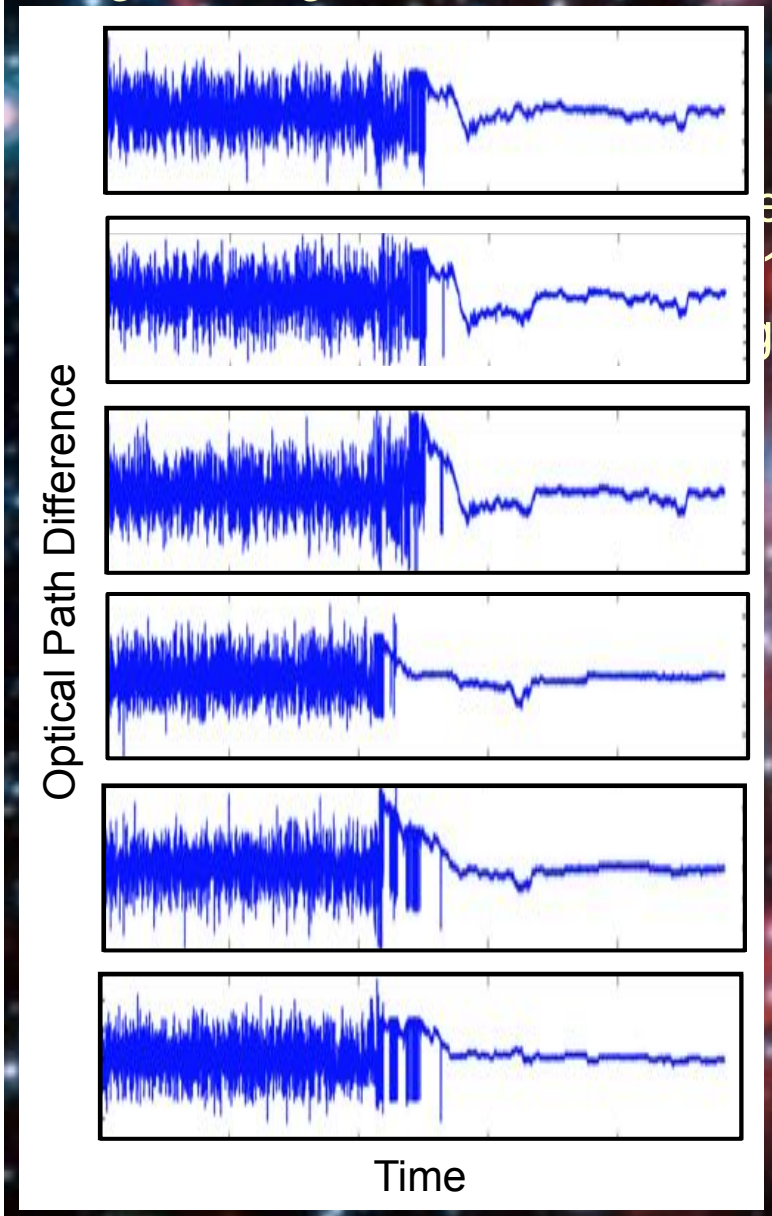
= observer l'univers en mouvement

- Consortium mené par MPE
- Avec contribution sur des savoirs-faire critiques par la France
  (analyse système, stabilisateur de franges, optique intégrée pour la combinaison, réduction des données..)
- Totalement défini par une motivation scientifique forte et ambitieuse, approchant les limites fondamentales

First observations of the Galactic Centre

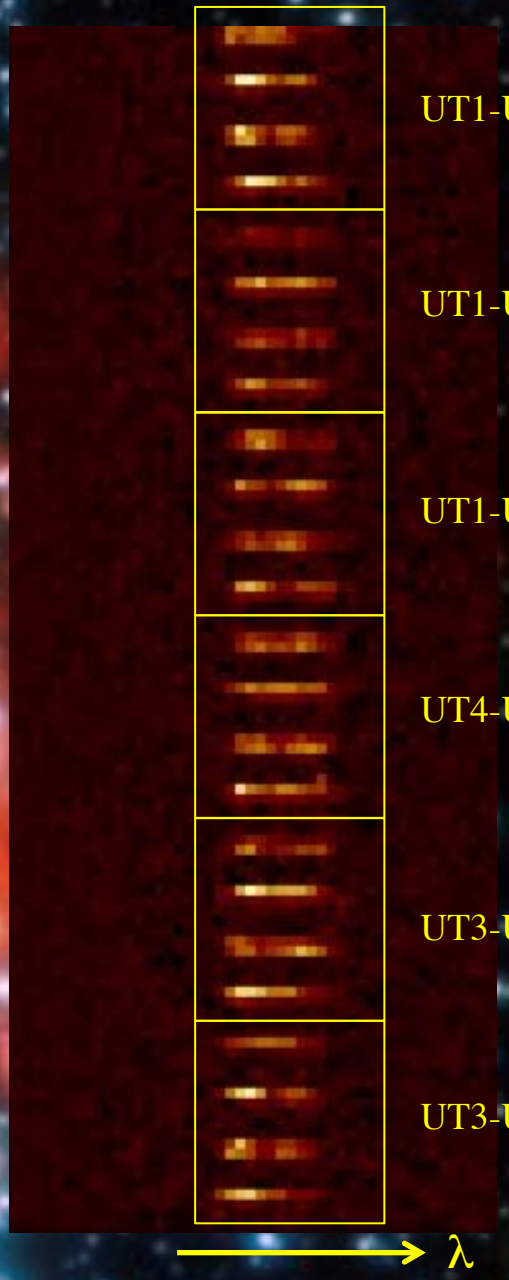
(2016, May 17th)

Fringe tracking on IRS16C (λ/10 rms)

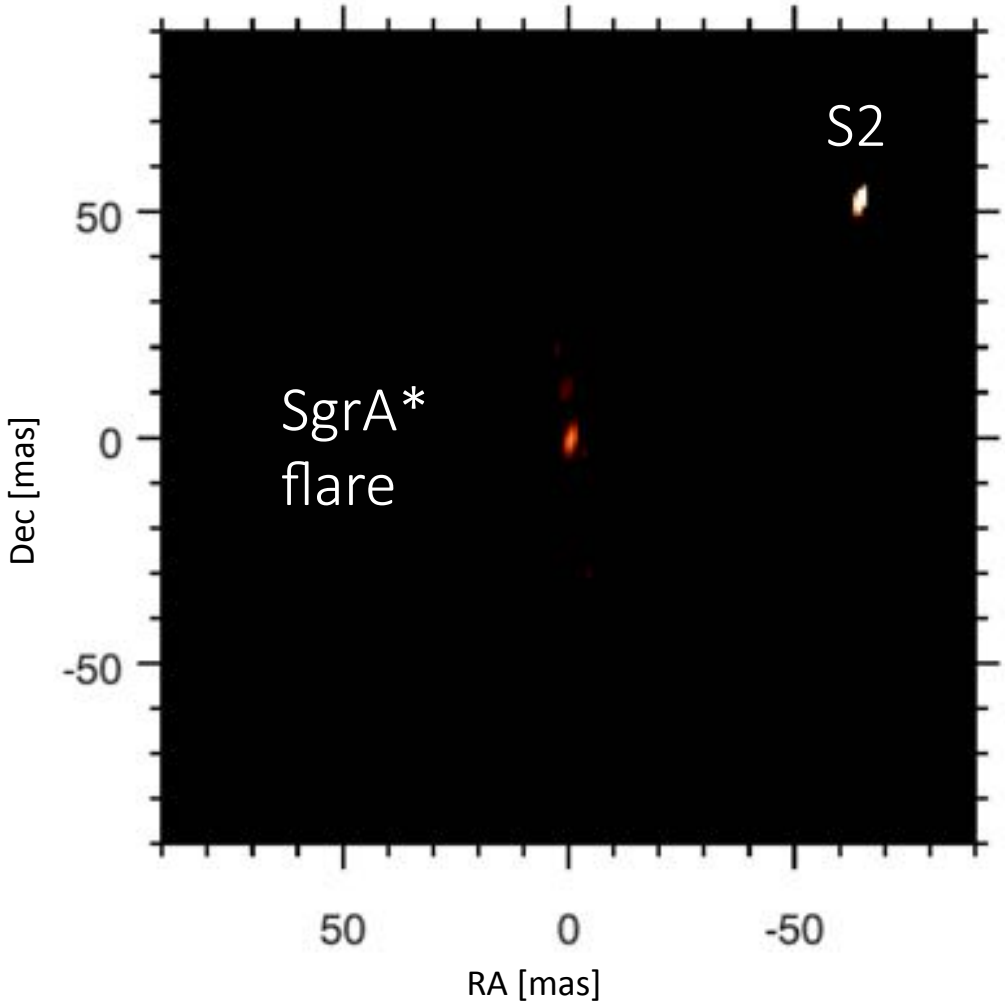


erence star
16C
gnitude K = 10

S2
magnitude K = 14

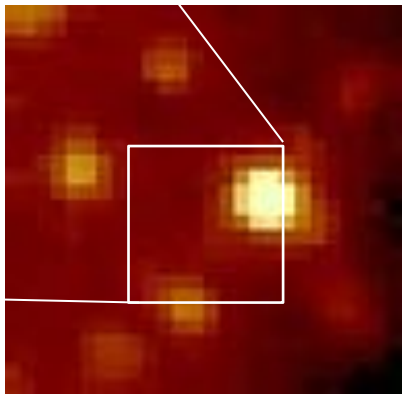


First detection of Sgr A* in infrared interferometry

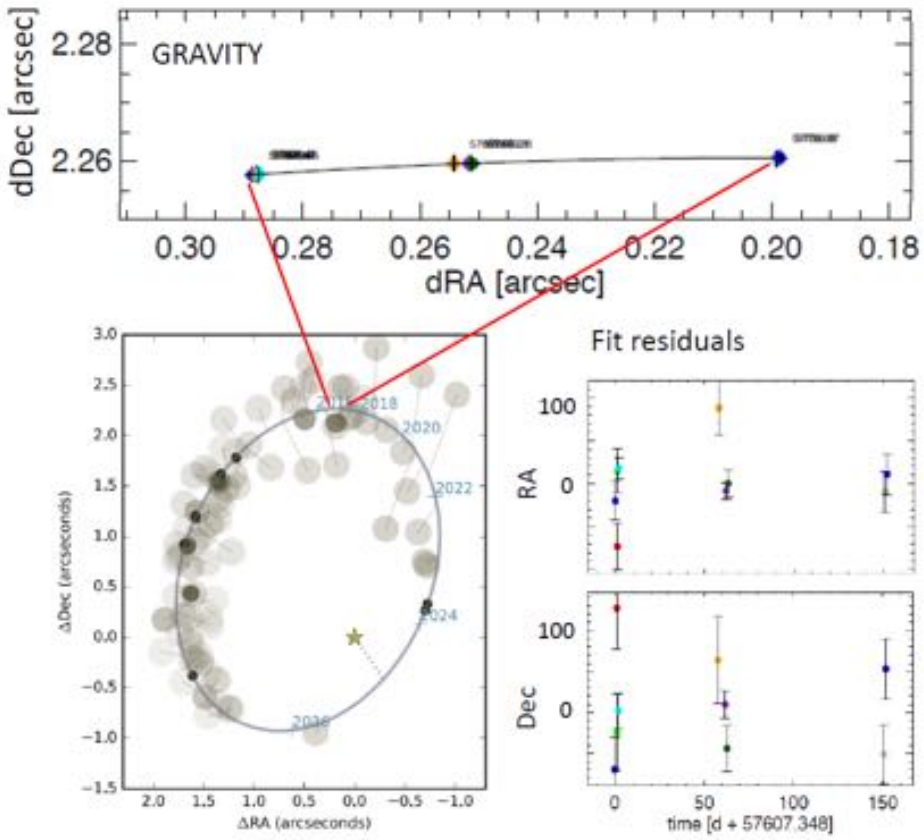


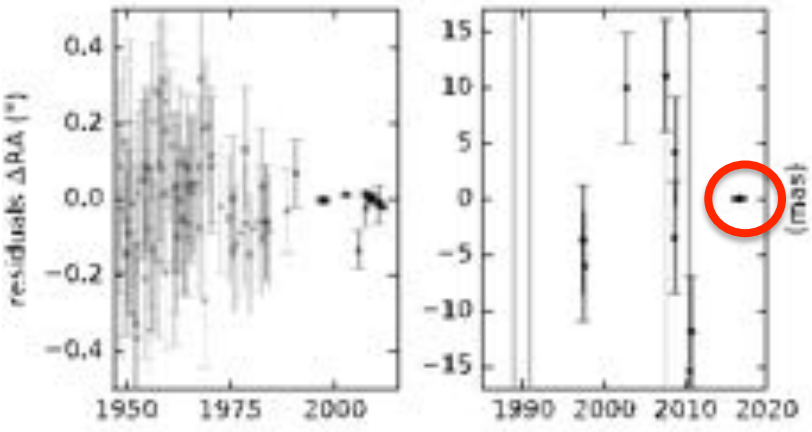
Flare mK ~ 15.5

3σ limit mK ~ 17.1



Dual-beam astrometry on Gliese 65AB

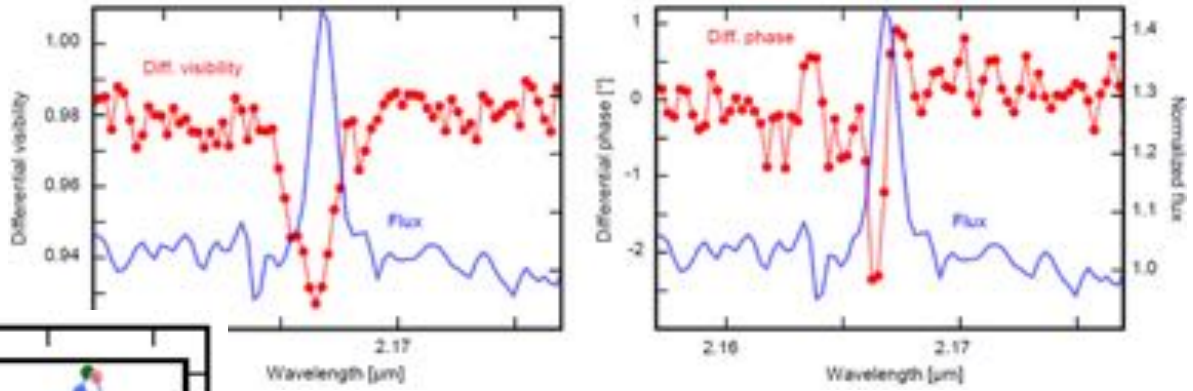


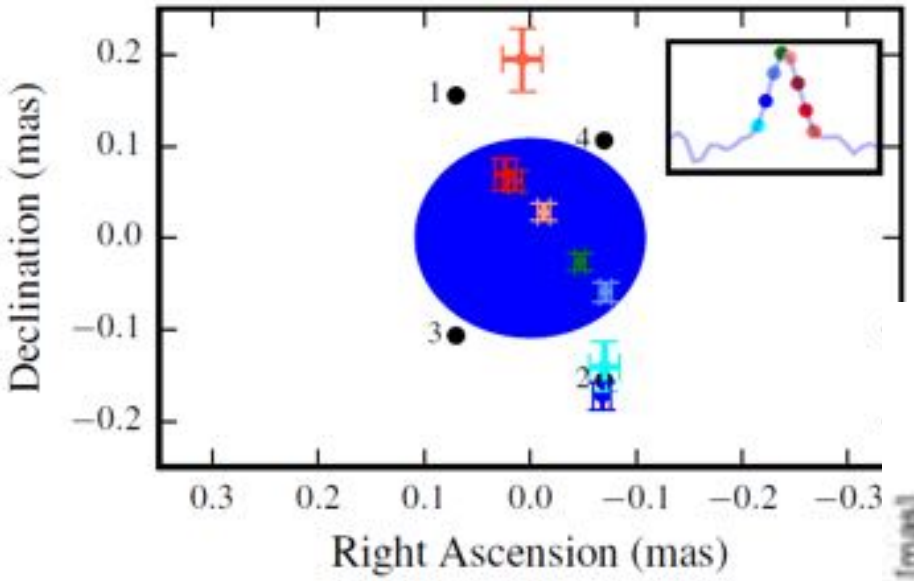


Accuracy of GRAVITY astrometry: 40-60 μas

Fig. 24. Dual-beam astrometry of the M-dwarf binary GJ65: The top panel shows the GRAVITY astrometry from three observing epochs in 2016. The lower left panel shows the orbit of the GJ 65 from Kervella et al. (2016). On the lower right we plot the fit residuals of the GRAVITY astrometry. The mean rms scatter in is 42 μas and 64 μas in right ascension and declination, respectively

GRAVITY observations of BPCru



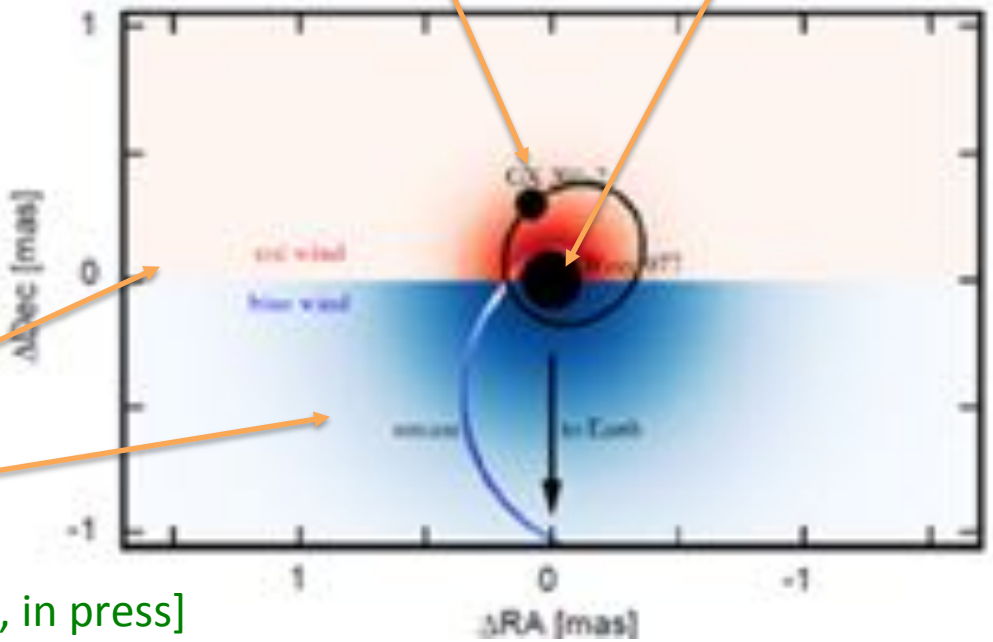


Pulsar

Donor

Extended distorted wind

Gas stream



[GRAVITY Collaboration – Waisberg et al., ApJ, in press]

Gravity comme une illustration

- expertise forte en France, reconnue et en interaction avec partenaires sur projets internationaux,
- travail dans une *filière* :
  - se construit dans la durée, alliant :
  - R&T ← → R&D ←→réalisation :

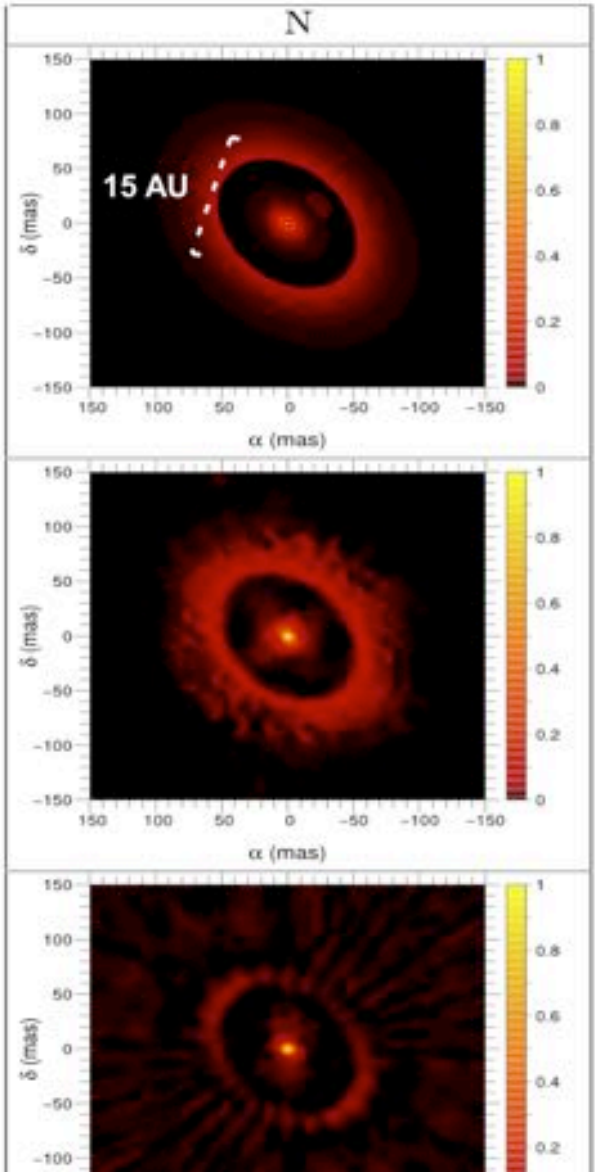
    des idées/concepts nouveaux (R&D : concept, théorie, simulations) , du savoir-faire (R&D laboratoire, réalisation) et même R&T.
- inscription dans une vision programmatique, des objectifs scientifiques, notion de générations d'instruments, des challenges qualitativement nouveaux.

Interférométrie

- 2e génération interférométrie
  - Gravity
  - **MATISSE** : en cours de tests d'acceptance à Nice !

MATISSE : 4T interferometry to image thermal emission at high angular resolution

Analytical model of HD100546
disk + gap + clump



Reconstructed N band image
(AT: 1.8m VLT telescope)

3 nights

Reconstructed N band image
(UT: 8m VLT telescope)

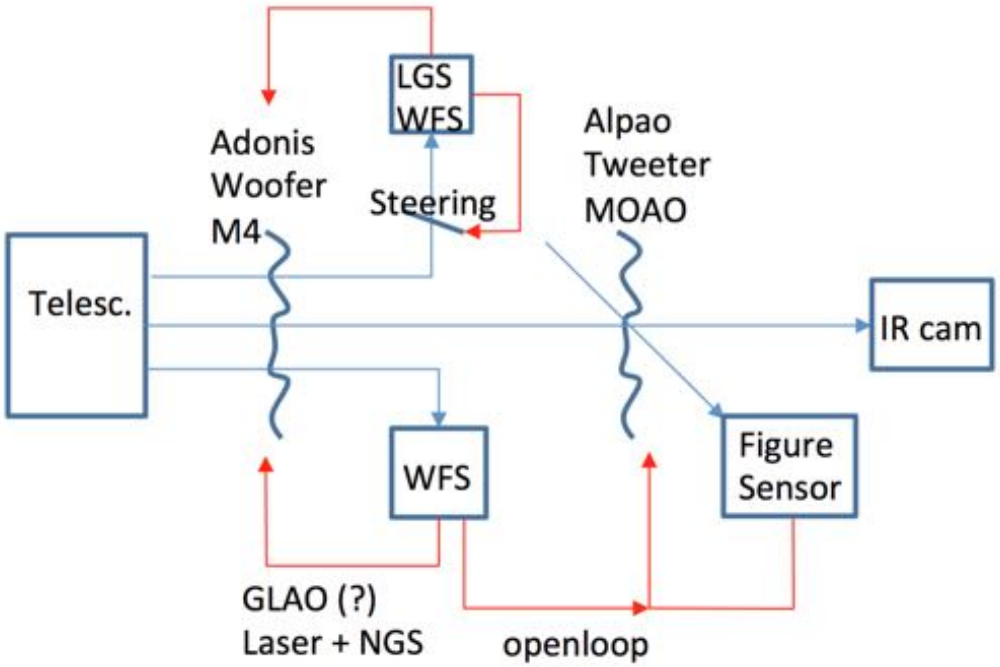
1 night

Interférométrie

- 2e génération interférométrie au VLTI
  - Gravity
  - MATISSE : en cours de tests d'acceptance à Nice !
  - GRAV4MAT
- Interféromètre CHARA : 6T avec jusque 300 m de base
  - Vers des imageurs proche IR 6T
  - **Imageur visible** : SPICA
- Futur ? À réfléchir maintenant *(eg : rapport européen OPTICON)*
  - R&D pour des concepts extrapolables à des projets plus ambitieux ? : conversion de fréquence (ALOHA), concepts de **mesure** et **contrôle** de co-phasage à grand nombre de télescopes ou grandes lignes de base, combinaison en IR thermique, …
  - Nouveaux cas scientifiques en fonction de la sensibilité et résolution
  - Infrastructures requises dans le futur ?

Optique adaptative

- Une ambition fondée sur les acquis solides avec un rôle français majeur, comme par exemple :
  - Réalisation SPHERE,
  - R&D CANARY
  - Expertise MCAO GEMS



Concept MOAO testé sur télescope avec Expérience CNARAY (Gendron+)

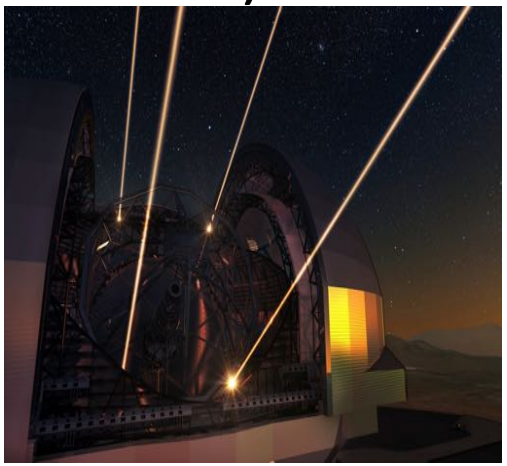
Optique adaptative

- Une ambition fondée sur les acquis solides avec un rôle français majeur
- Des **besoins programmatiques forts, surtout structurés par (E-)ELT** : **des défis nouveaux !**
  - **[SCAO]** la correction « simple » sur objet brillant représente déjà un changement majeur quantitatif et qualitatif :
    - Architecture télescope très différente, avec éléments de contrôles distribués
    - Changement quantitatif du dimensionnement α D^2 ou D^4 !
    - Différents types de senseurs et contrôle

Optique adaptative

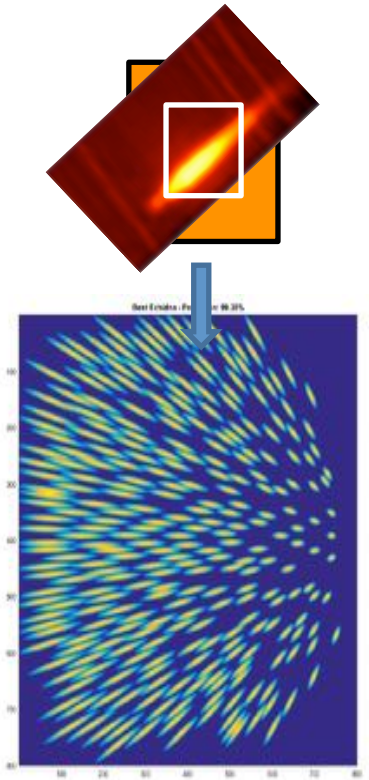
- Une ambition fondée sur les acquis solides avec un rôle français majeur
- Des besoins programmatiques forts, surtout structurés par (E-)ELT : **des défis nouveaux !**
  - [SCAO] la correction « simple » sur objet brillant représente déjà un changement majeur quantitatif et qualitatif
  - Correction sur grand champ [GLAO, LTAO, MCAO, MOAO] :
    - Mesures sur étoiles laser multiples (spots *très* allongés)
    - Reconstruction et contrôle
    - Insertion dans structure télescope ELT, avec extrapolation 8- m monolithique -> ELT très difficile

System for GSMT (Giant Segmented Mirror Tel)



- **Coupling of performance and <u>sky coverage</u>**
  - ➢ New WFS strategy for LGS
    (deal with current « fundamental » limitations)
  - ➢ New WFS strategy for NGS
    (improve limit mag : up to mag 20 in H)
  - ➢ <u>toward 100 % sky coverage for 10 mas resolution</u>

- **Achieve the ultimate performance**
  - – for highly segmented telescope
    => nm cophasing requirements
  - – Deal with telescope defects
    => known to be the main limitation on VLT class
    => will be 100x more complex on GSMT (E-ELT)



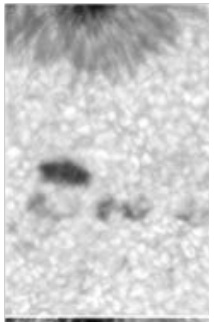
- **Calibration and AIT aspects with adaptive telescopes**
  - – On sky calibration and AIT
  - – New startegies to be considered and implemented

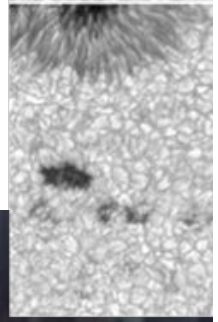
Optique adaptative

- Une ambition fondée sur les acquis solides avec un rôle français majeur
- Des besoins programmatiques forts, surtout structurés par (E-)ELT : des défis nouveaux !
- Un appui sur une **R&D** concertée indispensable :
  - eg CANARY concept-contrôle et mesure,
  - Differents types d'analyseurs
  - Lois de commande, contrôle
  - RTC (eg : recherche « GreenFlash »)
- Et **R&T** !
- Et de la **démonstration de concept**:
  - eg THEMIS , SPHERE+

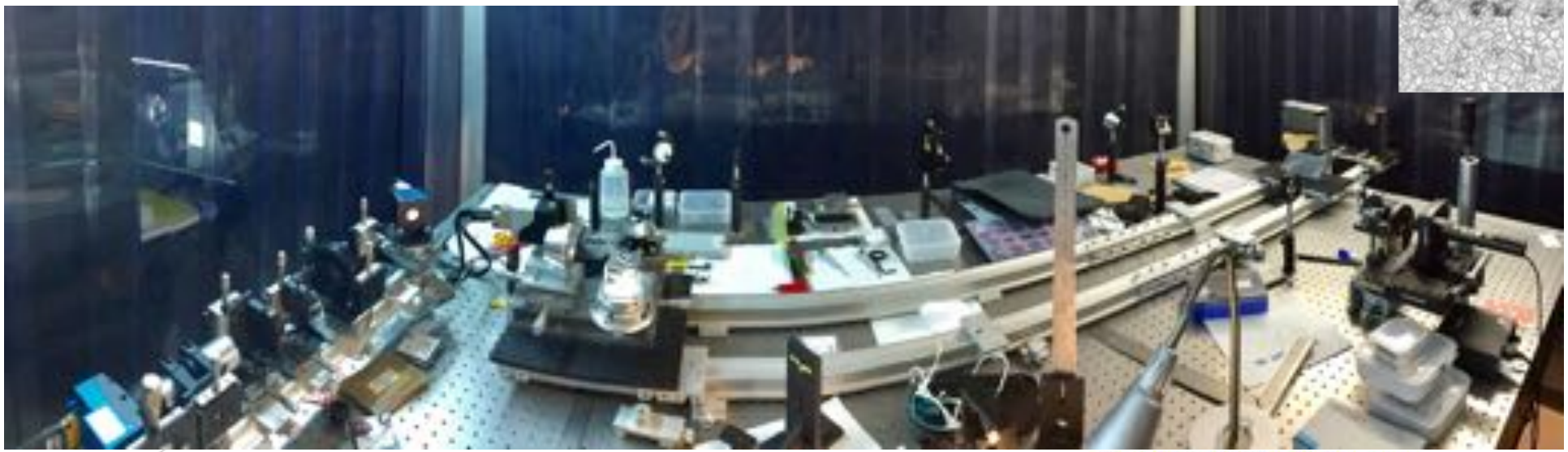
THEMIS AO @ CRAL

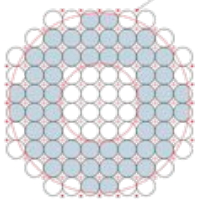
M. Langlois, G. Moretto, M. Tallon, E. Thiébaut,
J. Léger + THEMIS team (Dir. B. Gelly)





Conception, développement et intégration d'une optique adaptative visible dédiée aux observations solaires

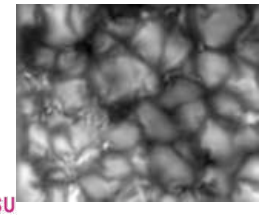




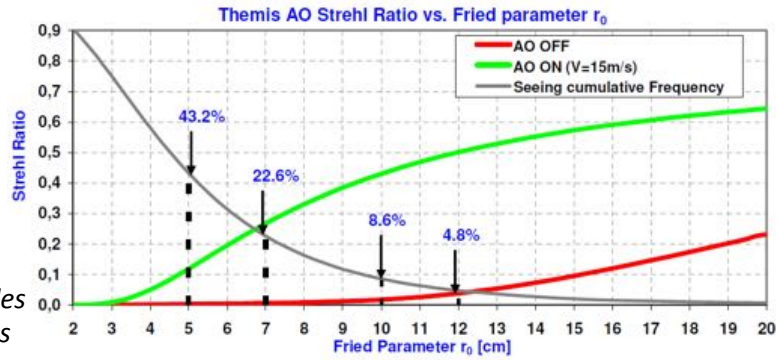
WFS – Champ étendu

DM - High speed voice coil

Calculateur temps réel Linux + Julia –
100 actionneurs @ 1.5 kHz (1ms retard)



Estimation analytique des performances



SEVENTH FRAMEWORK PROGRAMME

observatoire de Lyon

cnrs INSU Division Technique

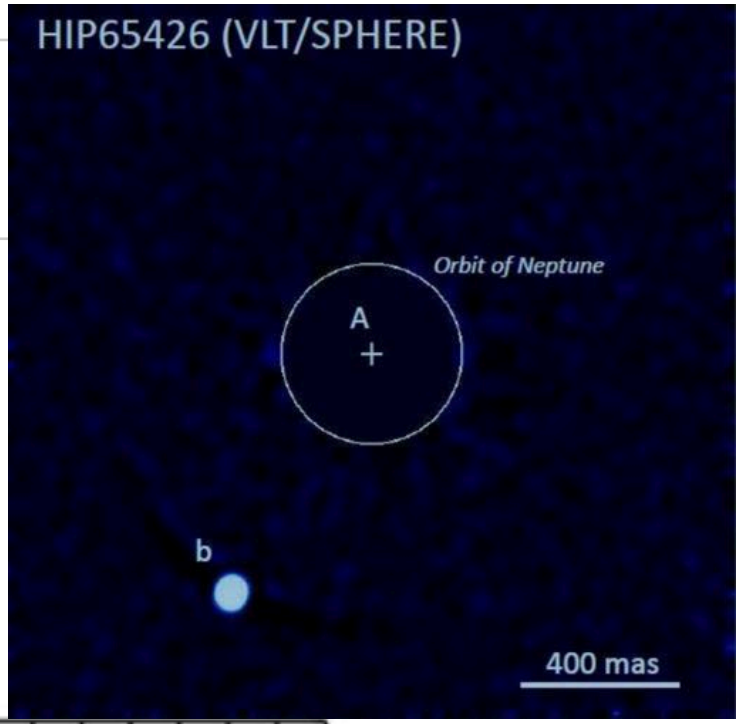
Imagerie à grand contraste

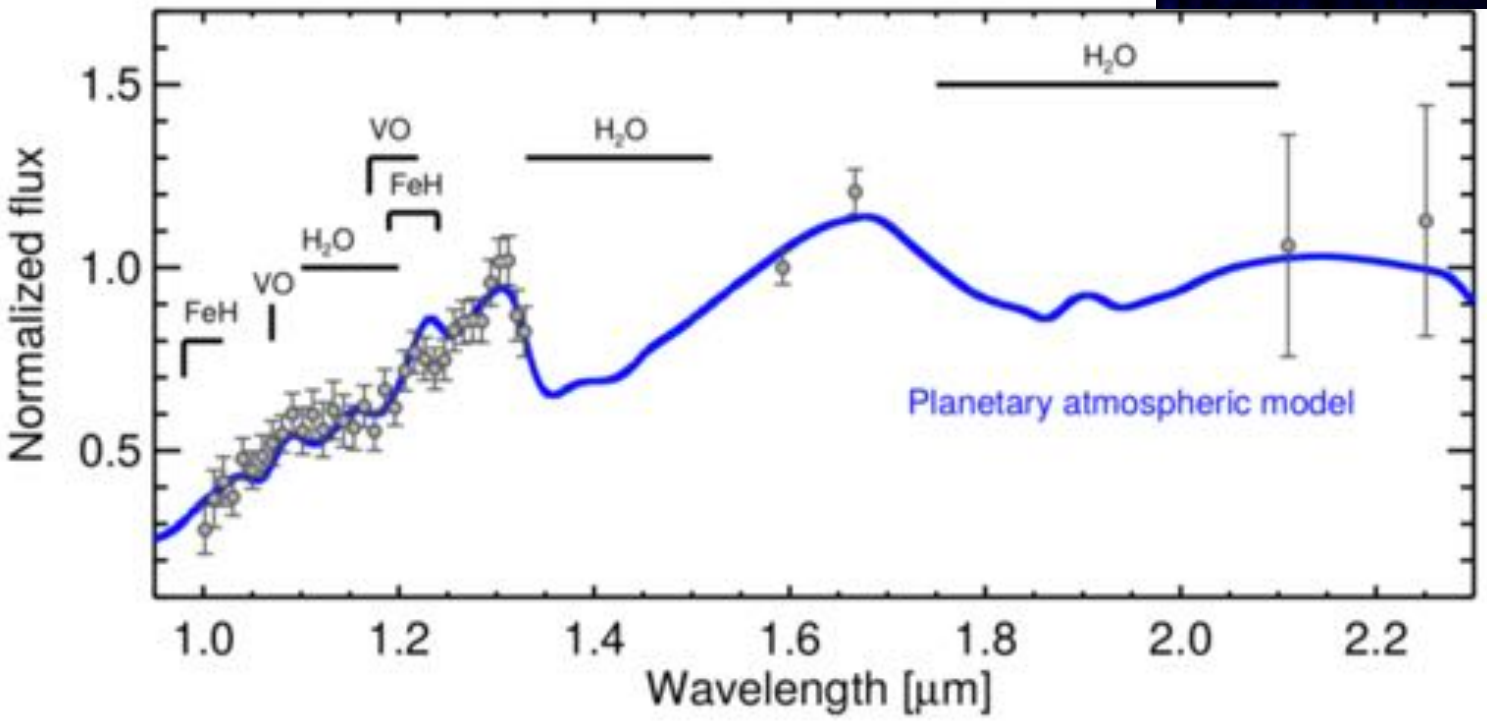
Exploitation de génération SPHERE :

Astrophysique, instrumentale

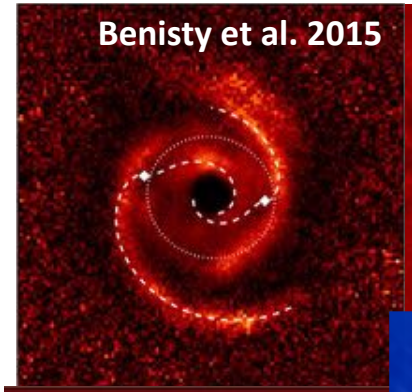
SPHERE: exoplanet around HIP65426

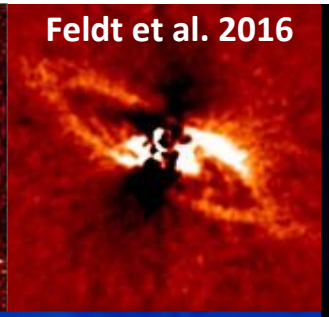
Chauvin et al 2017

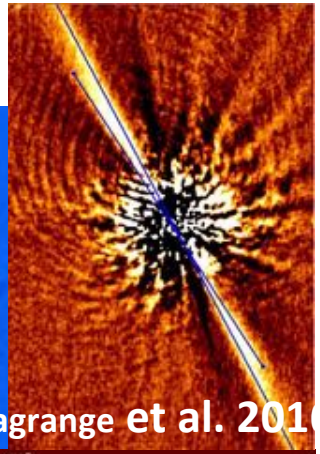


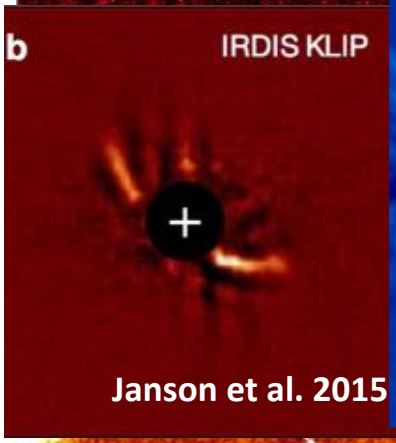


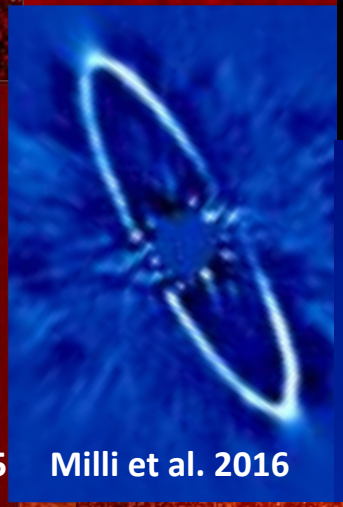
SPHERE: Harvest of disks !

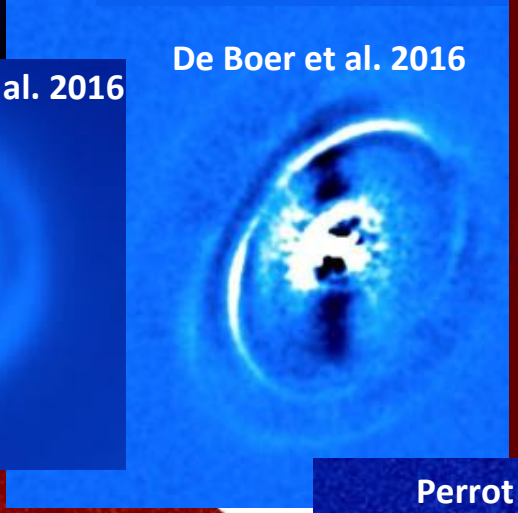


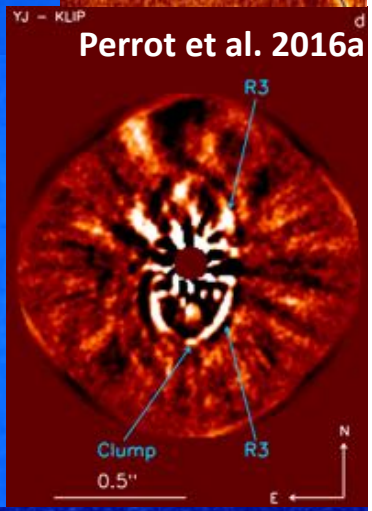


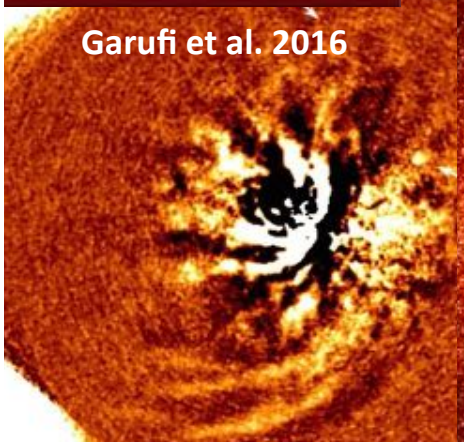


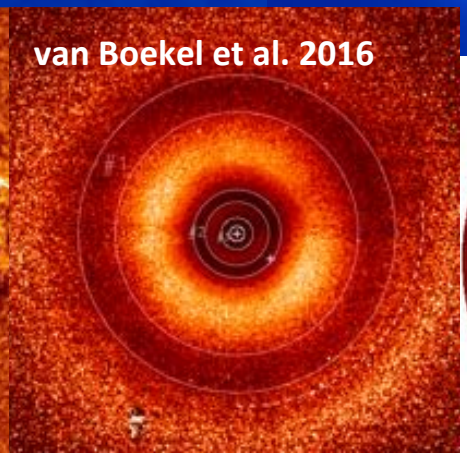




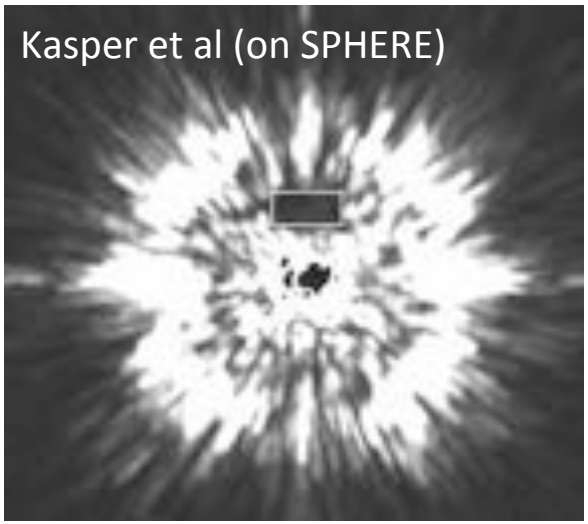




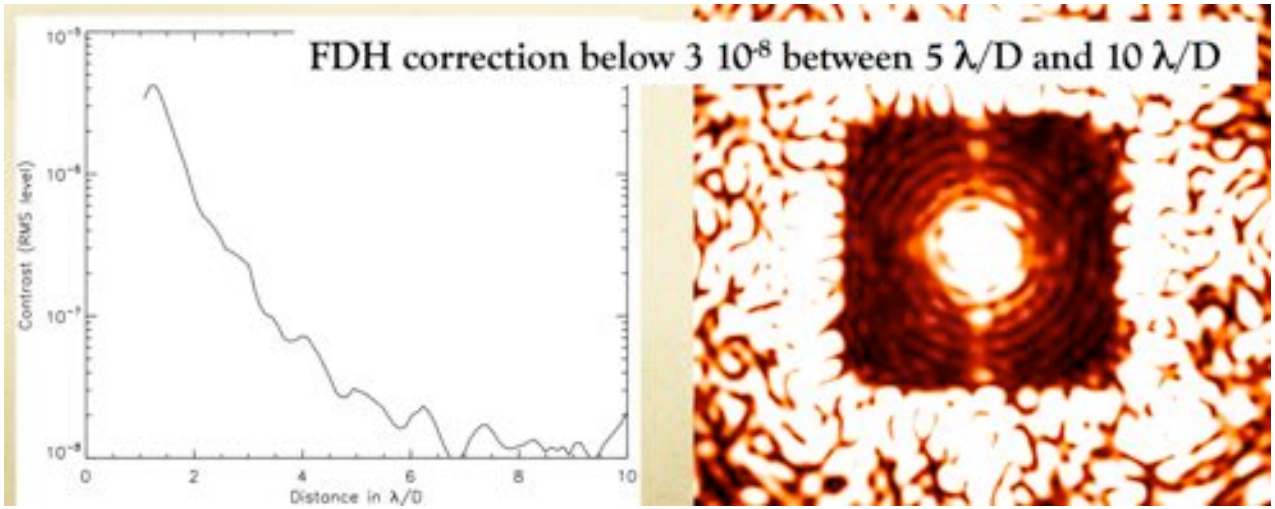


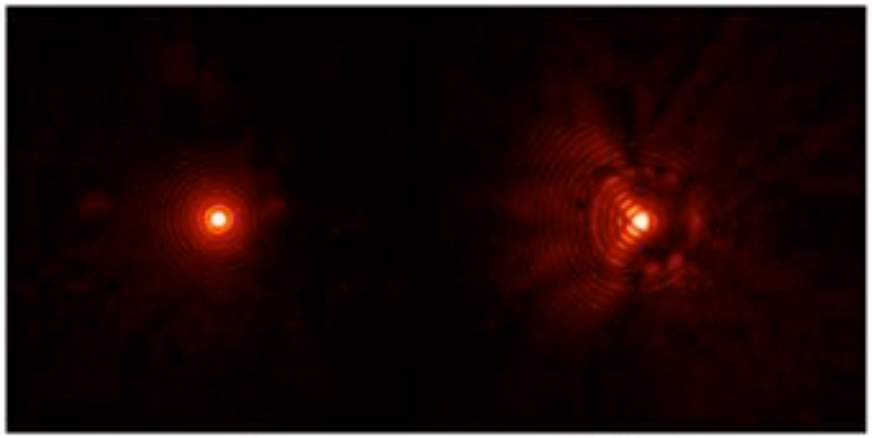


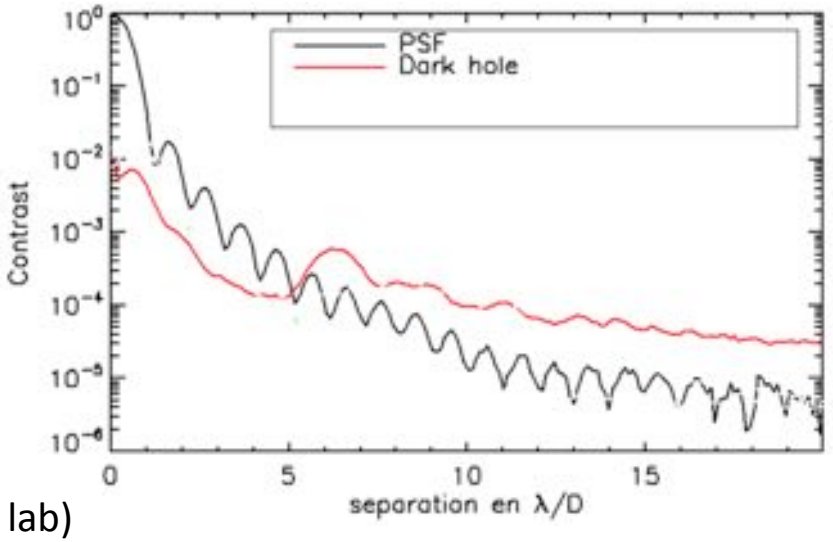
Kasper et al (on SPHERE)



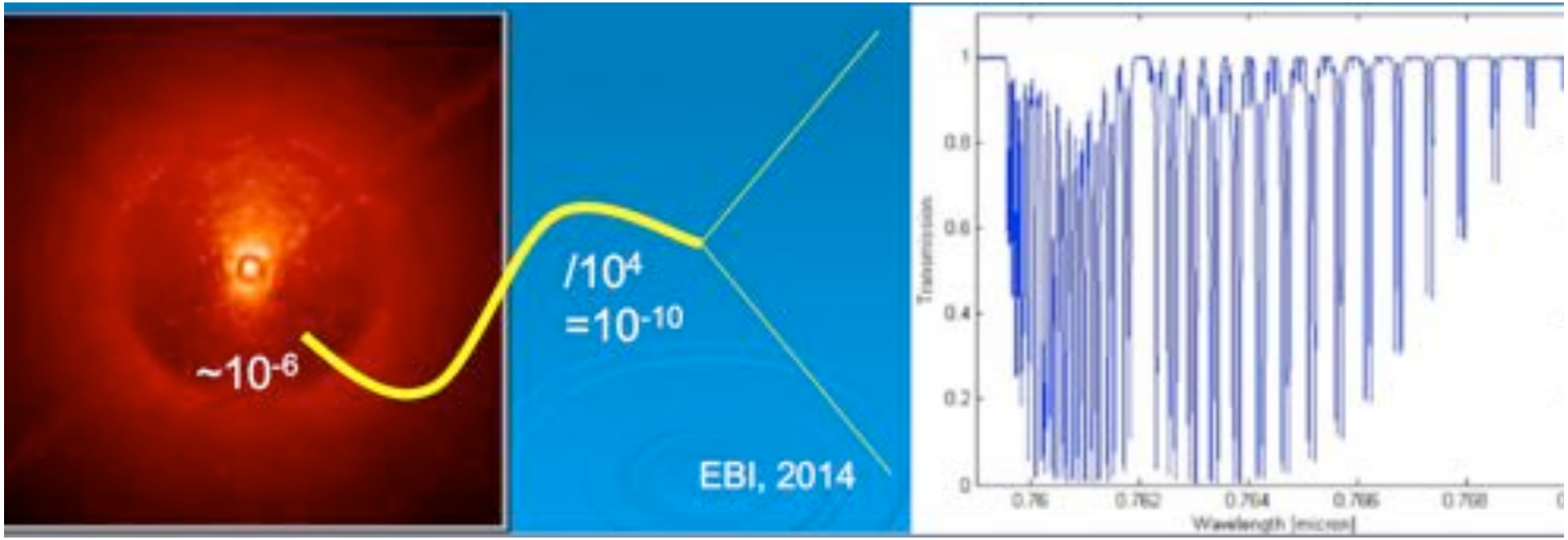
Baudoz et al (in lab)







Herscovici et al (in lab)



Coupler imagerie à grand contraste et spectrométrie à haute résolution spectrale !

- **Forte motivation pour résultats astrophysiques à court terme**
- **et pour ouvrir les très grand contraste sur le très long terme**
  - Detection : s'affranchir de la limite actuelle du bruit de tavelures !
  - Caractérisation des atmosphères planétaires pour une variété de composants moléculaires

Snellen+, Lovis+; Mawet+, Kasper+, Vigan+ …

Imagerie à grand contraste

Exploitation de génération SPHERE :

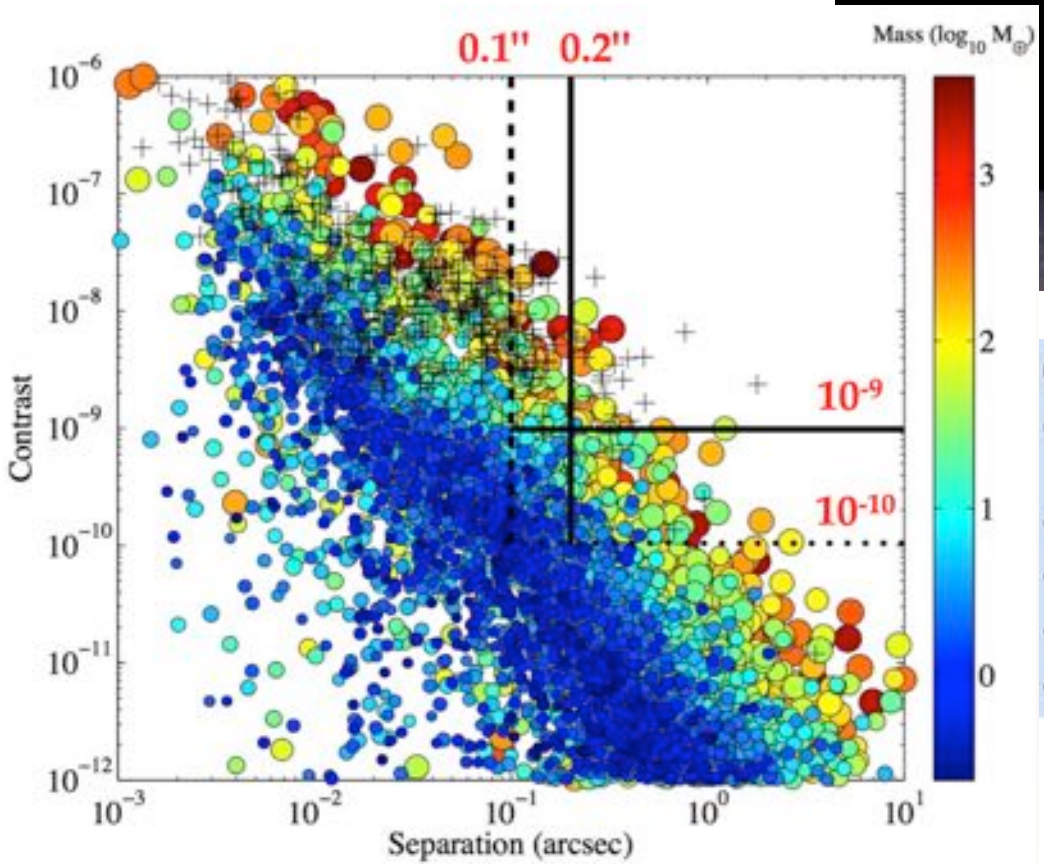
Astrophysique, instrumentale

Perspectives ambitieuses long terme

Sol / Espace

(inscrite dans une vision programmatique, avec des objectifs quantifiés, des cibles, des idées permettant une progression importante)

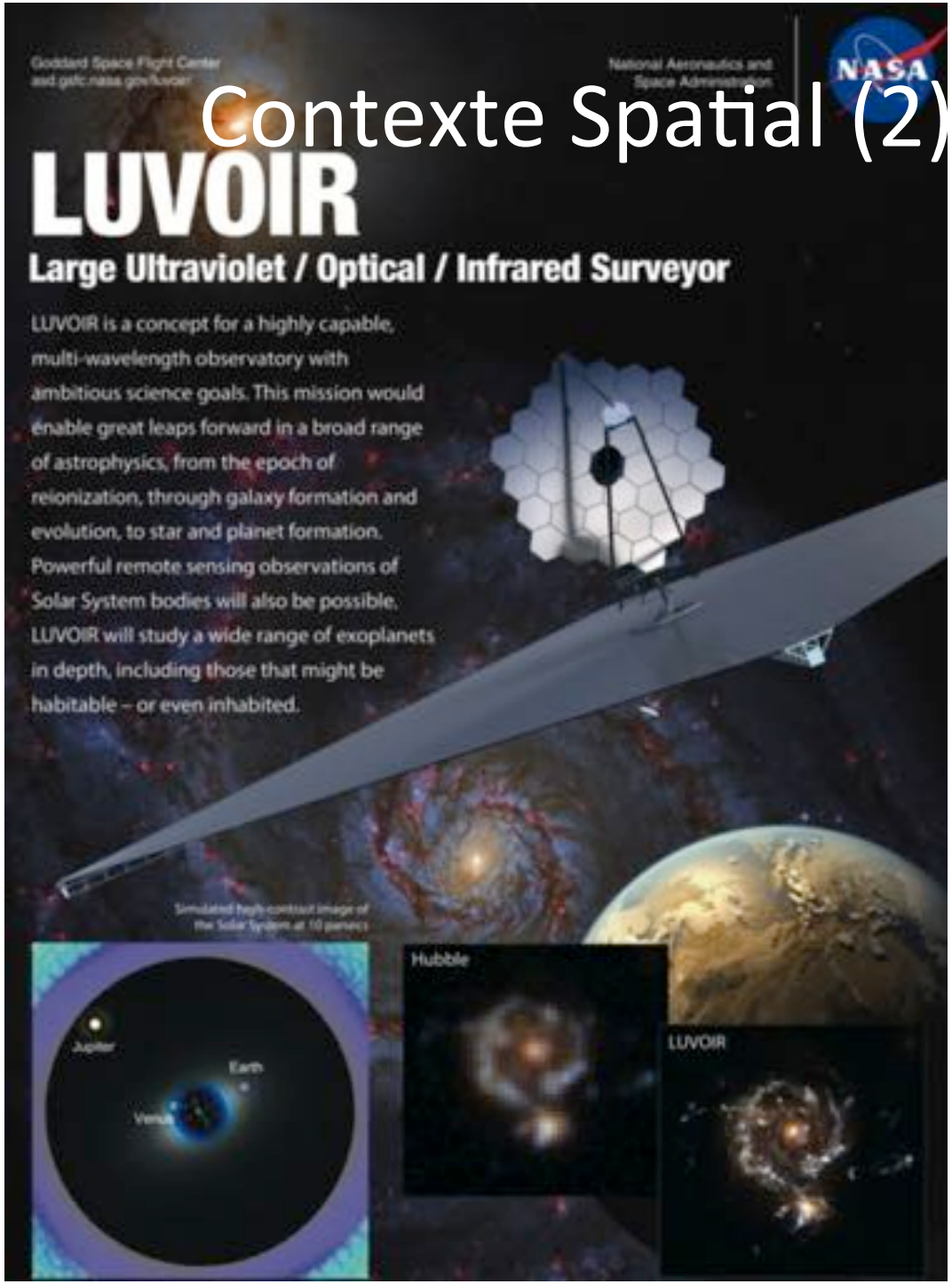
Contexte Spatial (1) WFIRST



Coronagraph CGI

- *Image and spectra of exoplanets from super-Earths to giants*
- *Images of debris disks*
- 430 – 970 nm (imaging) & 600 – 970 nm (spec.)
- Final contrast of 10^{-9} or better
- Exoplanet images from 0.1 to 1.0 arcsec

Contexte Spatial (2) HabEx / LUVOIR



https://asd.gsfc.nasa.gov/luvoir/

Vue commune globale

Exploitation de génération SPHERE :

Astrophysique, instrumentale

Améliorer / optimiser l'exploitation de SPHERE

R&D complémentaire :

- Sur des aspects non couverts sur SPHERE,
- Sur des perspectives plus long terme (sol ou spatiale)

Une étape intermédiaire *majeure* à objectif scientifique ET instrumental

→ basée sur SPHERE

Maîtrise/Compréhension des contextes opérationnels futurs :

- ELT 1^{e} génération
- Contexte spatial (retour d'expérience WFIRST / JWST)

Perspectives ambitieuses long terme

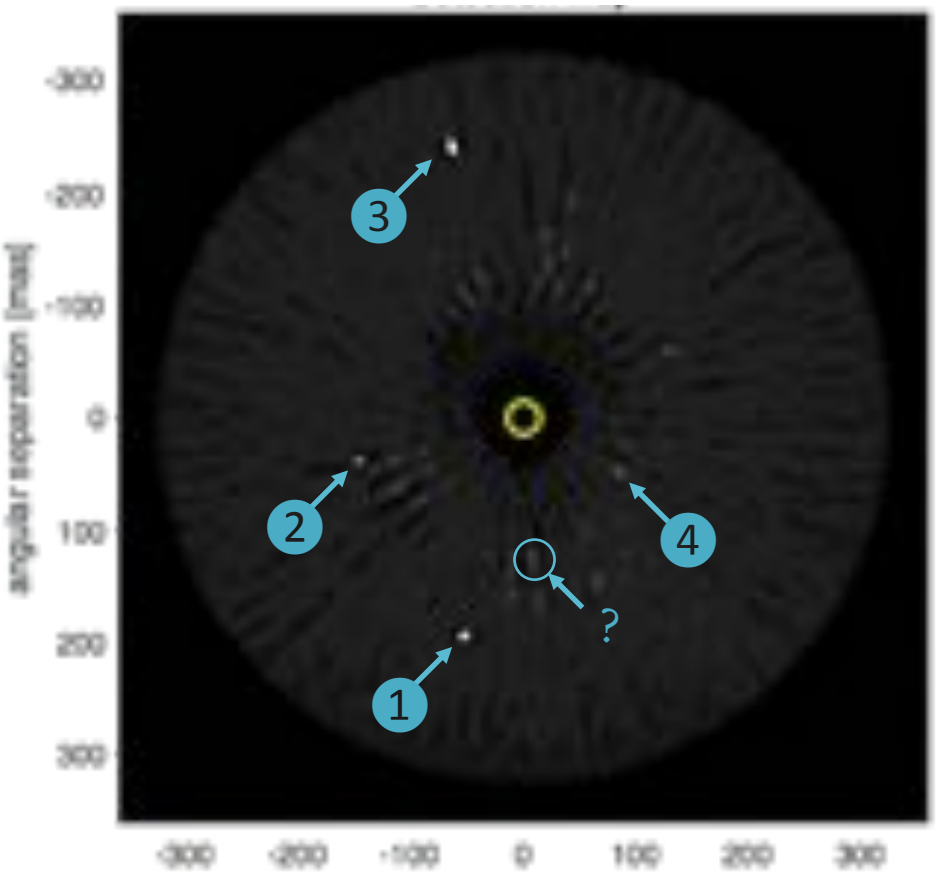
Sol / Espace

(inscrite dans une vision programmatique, avec des objectifs quantifiés, des cibles, des idées permettant une progression importante)

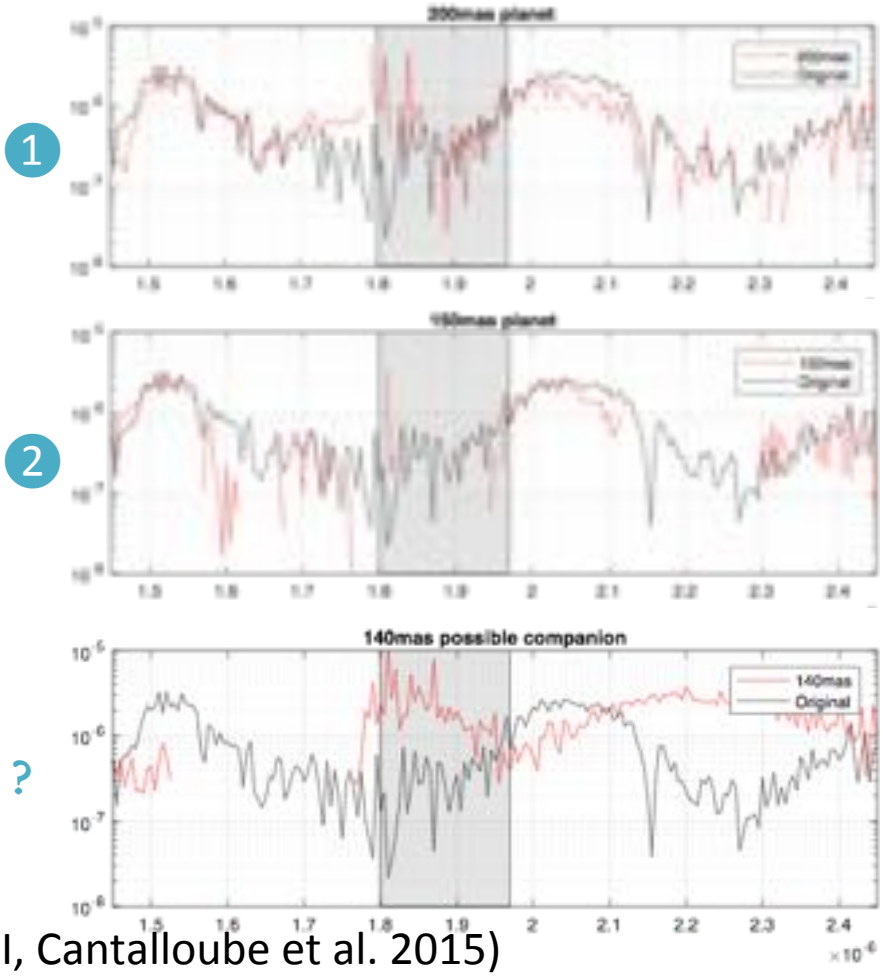
HARMONI's high-contrast mode: **performance**

Simulated data of 4 planets w/ 10^{-6} planets contrast & 51 Eri b-like synthetic spectrum (2h exp. with H=6 star) between 0.1 and 0.25''

The 4 planets appear in the detection map



Extracted spectra



Encouraging results using Andromeda (optimal ADI, Cantalloube et al. 2015)

SPHERE upgrade: implications instrumentales

Plus profond, plus proche :

- Corono dédiés
- Quasi-statiques (algo, senseurs, analyse système…)
- Masques non-redondant

Couplage SPHERE – CRIRES+

= baseline de caractérisation IR compagnons connus

- Module d'injection
- Optimisation couplage/réjection
- signal

Recherche & caractérisation

- Visible : couplage ESPRESSO Injection fixe (proche de l'axe)
- IR
  - pavage du champ ?
  - Vers d'autres solutions spectro : extrapolables à d'autres choix (réso, multiplex, domaine spectral), bénéficiant de la faible étendue de faisceau

Amélioration OA

- Plus rapide (x3)
- Sensibilité : similaire ou meilleure (surtout pour objets rouges) : PWFS IR
- Lois de contrôle optimisées

-> caméra (IR rapide, bas bruit)
-> senseur Pyramide
-> Calculateur temps-réel

Traitement Signal transverse

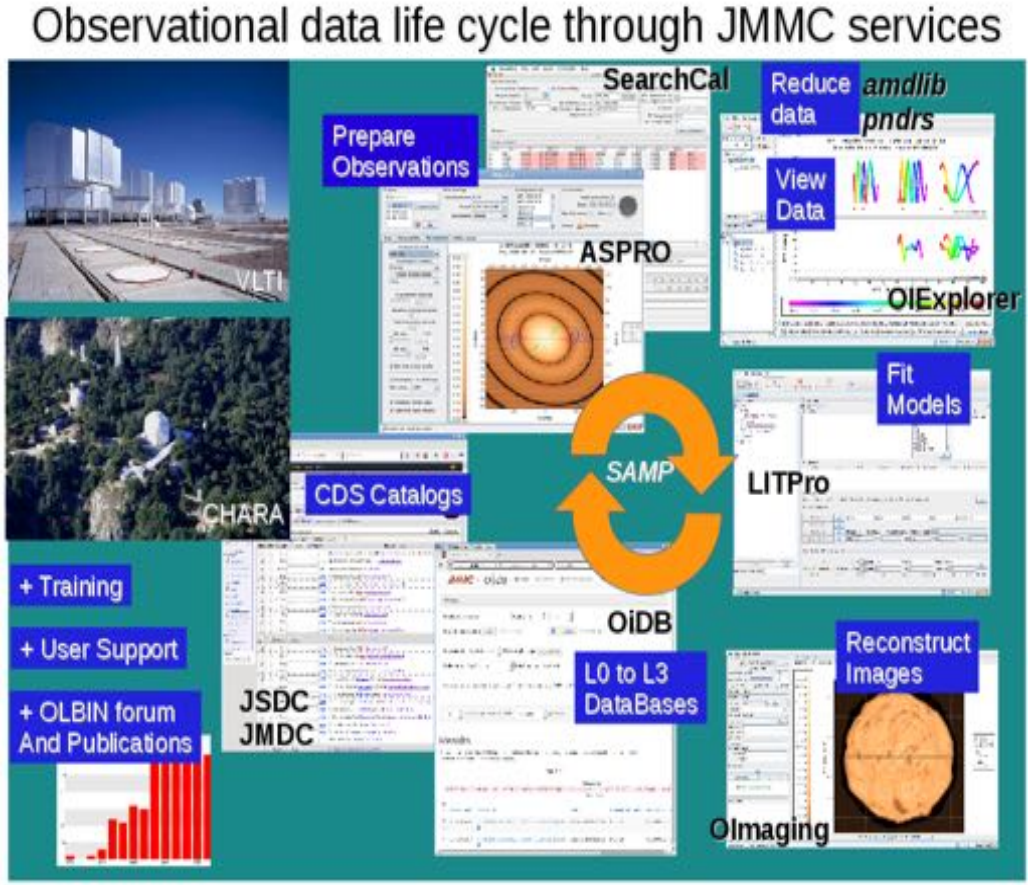
Sciences des données

- Transverse.
- Critique dès les étapes de conception : les specs de sphere et gravity n'ont pas de sens sans la prise en compte de manière de réduire les données.
- Outils avec forte expertise pour préparer et interpreter les données : JMMC, exoplanetes, AO.
- Intègre aussi la notion de complémentarité **R&D** ← → réalisation de produits pour la communauté
- L'aspect trans-disciplinaire **riche**, **demande des efforts spécifiques** ET représente une **forte opportunité** sur concepts nouveaux (detection, courbes ROC, correlations, deep learning, auto-calibraiton, ..)

Centre JMMC pour l'interférométrie

- Départ d'une activité / SNO3 dédié au support exploitation VLTI2 : **« VLTI center »**

- Palette d'outil rendant accessibles au grand nombre des compétences et outils d'experts,
- Dont récemment: imagerie interférométrique (Oimaging)



– expertise forte en France, reconnue et en interaction avec partenaires sur projets internationaux,

– travail dans une *filière* :

- se construit dans la durée, alliant :
- R&T ← → R&D ←→réalisation

  des idées/concepts nouveaux (R&D : concept, théorie, simulations) , du savoir-faire (R&D laboratoire, réalisation) et même R&T.

– inscription dans une vision programmatique, des objectifs scientifiques, notion de générations d'instruments, des challenges qualitativement nouveaux.