

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

LAM

LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE  
DE MARSEILLE



# Activités ITHD LAM/ONERA

Atelier ITHD de l'ASHRA

Nice 11-13 mai 2016

LAM: Arthur Vigan, Emmanuel Hugot, Kjetil Dohlen, Hervé Le Coroller, Marc Ferrari, Carlos Correia, services techniques et groupe systemes planetaires

ONERA: Thierry Fusco, JF Sauvage, Laurent Mugnier, Cyril Petit, jean-Marc Conan

# Les activités de R&D amont

- Aspects système optique et télescope
  - *Cophasage*
  - *Polissage*
- Optique adaptative extrême
  - *Analyse / contrôle rapide du front d'onde*
- Contrôle de front d'onde différentiel
  - *Optimisation de l'image / contraste au foyer scientifique*
- Techniques d'imagerie haut contraste
  - *Composants et traitement de données*
- Moyens de test
  - MITHIC
  - Accés ciel : SPHERE, Keck, GeMs, LBT

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

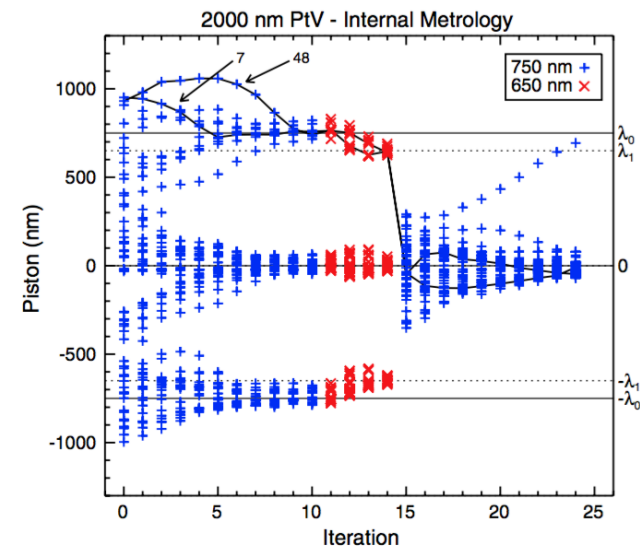
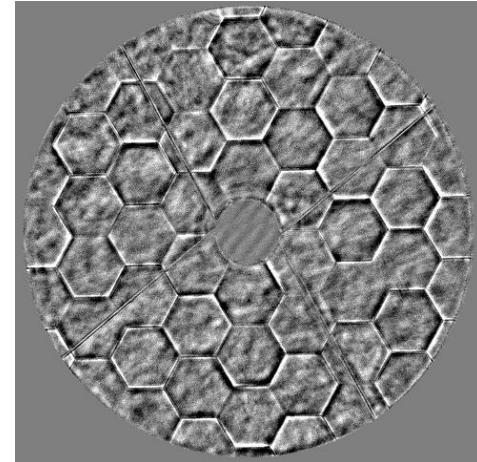
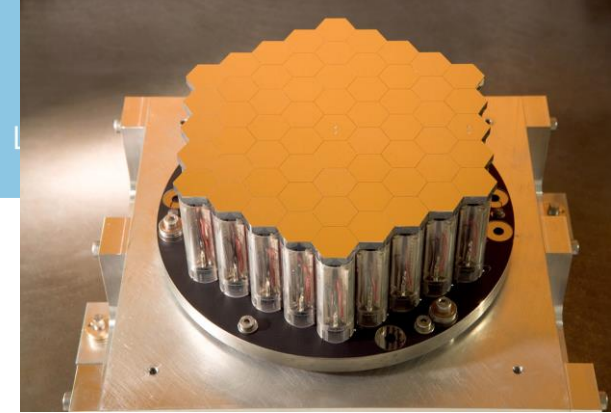
LAM

LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE  
DE MARSEILLE



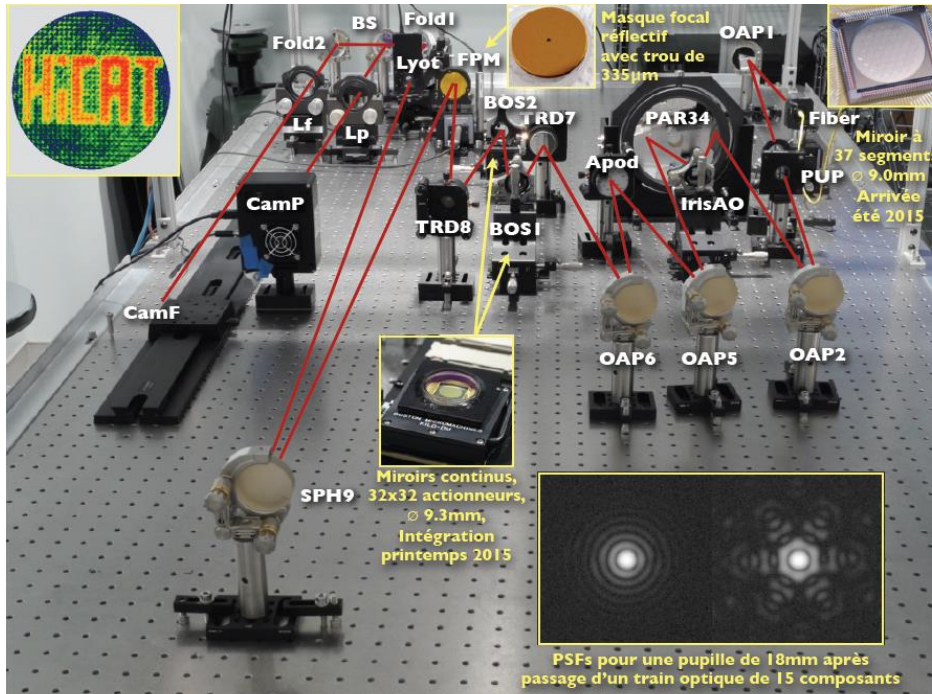
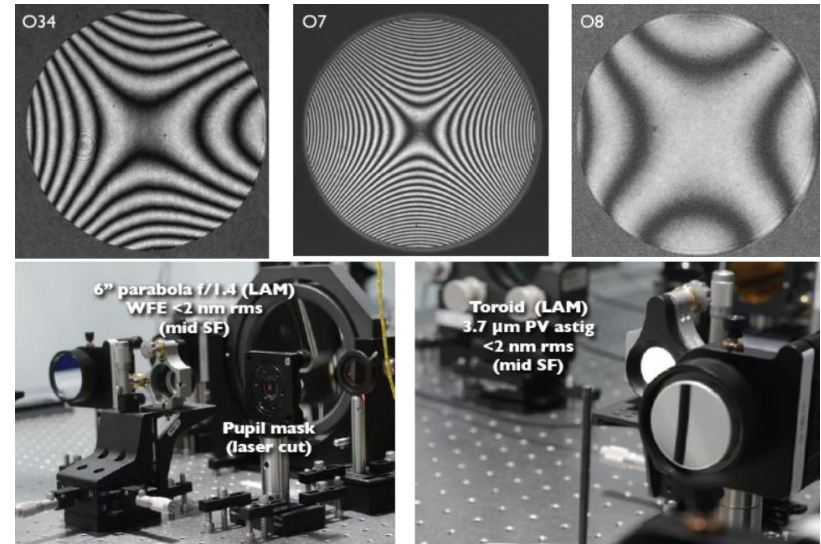
# Aspects système optique et téléscope

- Thématique cophasage: 1999 - 2009
- Expérience de cophasage des miroirs segmentés:
  - *Active Phasing Experiment*: 4 analyseurs testé en labo et sur le ciel (VLT)
  - Validation du cophasage en présence de turbulence
- ZEUS: ZErnike Unit for Segment phasing
  - Masque de Zernike d'un diamètre similaire au seeing
  - développé au LAM en collaboration avec IAC et ESO
  - Combinaison de différents masques/filtres pour s'adapter aux conditions et accroître l'intervalle de capture
- Résultats sur le ciel (2008-2009):
  - Précision de cophasage de  $\sim 15$  nm RMS, magnitude limite  $V=15.7$  (Surdej et al. 2010)
  - Intervalle de capture  $\pm 4$  micron PtV (WF) en utilisant 2 longueurs d'ondes (Vigan et al. 2011)
  - Technologie mature pour mesure de piston, mais pas d'étude détaillée pour le tip-tilt
- Ressources:
  - Personnels: KDo (20%), AVi (75%), MLa (<5%), MFe (<5%)
  - Financement: UE FP4, FP5
- Spécificité: activité masque de phase démarré au LAM depuis de nombreuses années
- Collaboration:
  - IAC: réalisation opto-méca
  - ESO: exploitation scientifique, interface APE0.13761273



## Optique active

- Thematique "classique" du LAM
- Challenges in terms of surface quality (cf SPHERE)
- HiCat = high contrast platform @ STScI
  - Delivery of 3 super-polished off axis mirrors in 2013



**Exquisite results too:  
Only 12nm WFE after 15  
optics!**

	O34	O7	O8
LoF WFE [nm]	13.0	7.0	6.4
MiF WFE [nm]	1.5	2.0	1.5
HiF WFE [nm]	1.3	2.2	1.6
Roughness [nm]	0.4	0.5	0.4

N'Diaye, Soumer+ 2014



ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

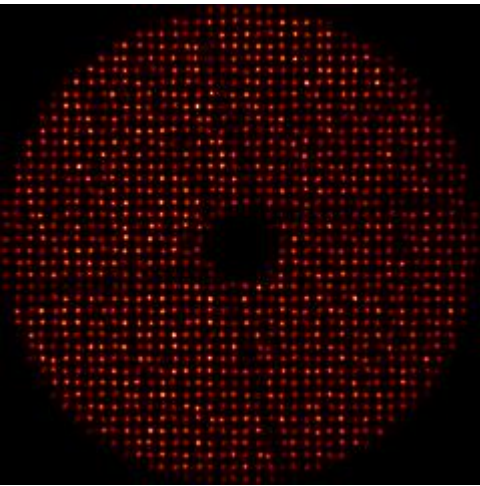
LAM

LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE  
DE MARSEILLE

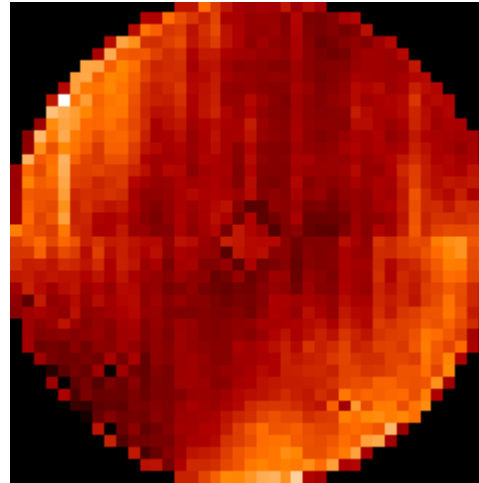


# Optique adaptative extrême

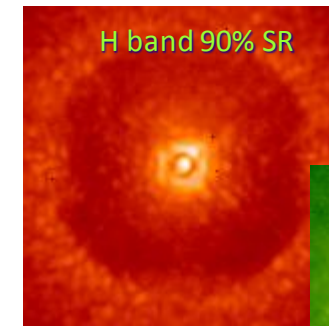
# eXtreme Adaptive Optics R&D



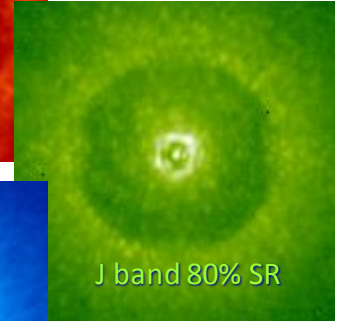
40x40 EMCCD filtered SH WFS



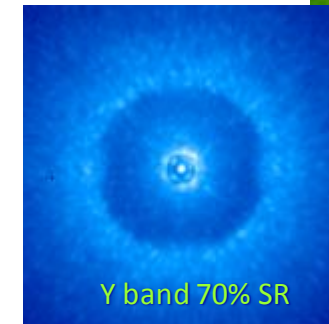
41x41 Piezzo DM



H band 90% SR



J band 80% SR



Y band 70% SR

## ● WFS aspect

- HO SH (Spatial filter, WCOG)
- Pyramid (1PhD, 1PD)
- IR WFS (1PD)
- WF reconstruction (1PD)

## ● Control aspects

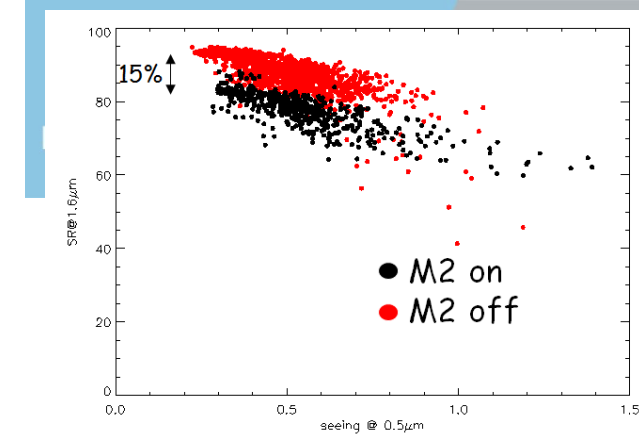
- LQG Kalman filtering (1PhD)
- Interaction matrix calibration (Hadamard)
- Online optimisation
- GNDL (1PhD)

## ● Differential WF control

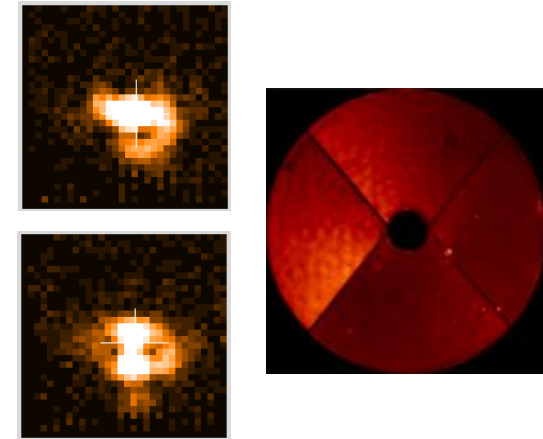
- Phase diversity / LIFT (1PD)
- Coronagraphic WFS (2PhD)
- Zeus / ZELDA
- Dark Hole (1PhD)
- Post-processing (1PhD)

# Analysis of SPHERE ultimate perf

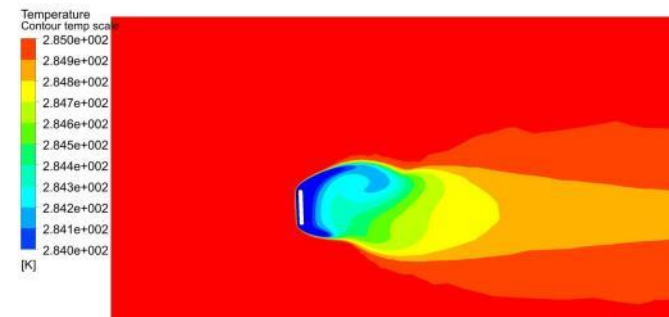
- Turbulence is not a problem.
- Vibrations of Secondary mirror M2
  - Investigation during COM1 – COM2
  - 2 month analysis / mitigation
- LWE : Main limitation of SPHERE, 20% of nights impacted
  - Investigation during COM1 – COM4, still ongoing
  - Opticon funding
  - Strong phase jumps in the pupil
  - Coordination of a multiple-face issue
    - Dome seeing particular aspect
    - Wave-front sensing
      - Impact on XAO WFS (ONERA-ESO)
      - Definition of a dedicated WFS (LAM-ONERA)
    - Dynamic flow simulation (ESO)
    - eXtreme AO operation (ONERA)
    - Instrument operation (LAM-ONERA)



Performance statistics COM1 / COM2



LWE typical PSF and aberrations

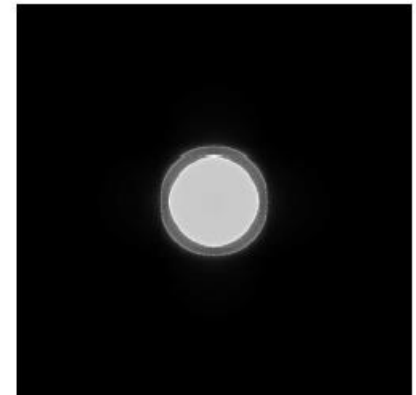
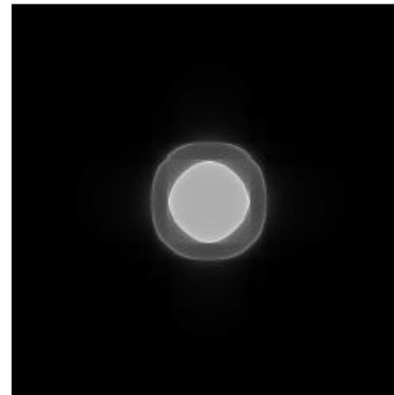
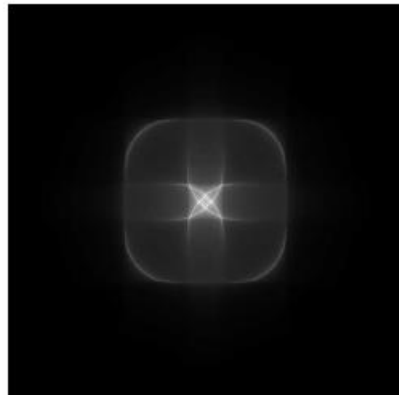
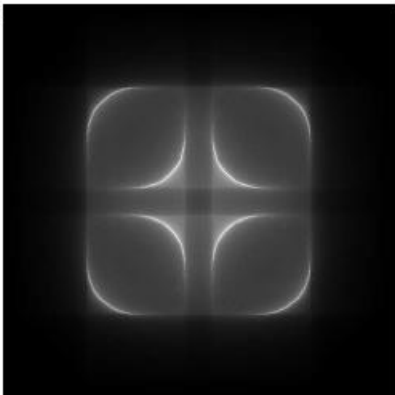


Air flow simulation, Temperature map



# Fast WFS aspects

- Pyramid wave-front sensing (PhD 2017, PD)
  - General formalism for pyramid sensor
  - Variations around 4 faces pyramid
    - Flatten pyramid
    - N faces, conic pyramid
    - Revisite of modulation impact / signal
  - Study potential for XAO

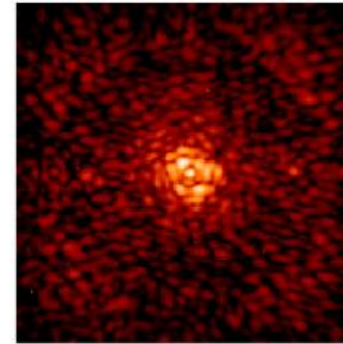




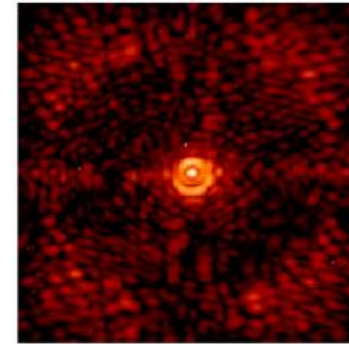
# Contrôle de front d'onde différentiel

# Post-focal calibration

- COFFEE : focal-plane WFS for coronagraphic system
  - B. Paul thesis (2014)
  - Application to SPHERE : phase conjugation (2013)
  - Development with CNES : phase and amplitude estimation
- Ongoing Thesis
  - Lucie Leboulleux (ONERA-STScI, 2018) : segmented pupil (ground and space)
  - Olivier Herscovici-Schiller (ONERA-CNES, 2018) : phase and amplitude estimation, online estimatio



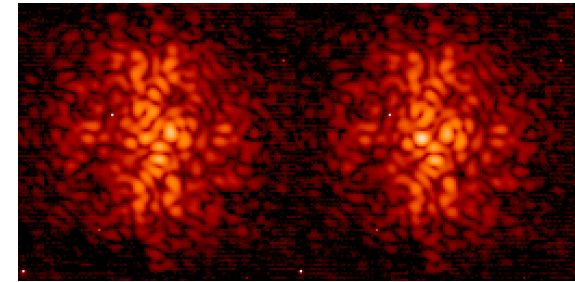
Raw SPHERE image



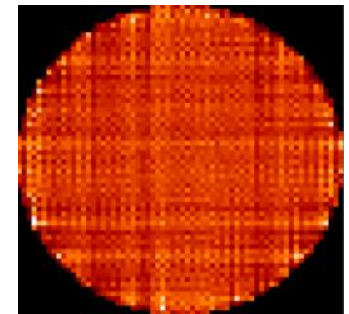
Correction after COFFEE measurement

# Post-focal calibration R&D activities

- Keck collaboration
  - Improvement NIRC2 coronagraphic mode
  - Validation at short IWA with vortex coronagraph
  - Post-doc position ?
- LESIA collaboration
  - 1PhD (2018)
  - THD bench
  - Validation in very high contrast environment
  - Estimation phase / amplitude (done)
  - Compensation phase / amplitude on multiple DMs
- STScI collaboration
  - 1PhD (2018)
  - Multiple DM
  - Segmented pupil

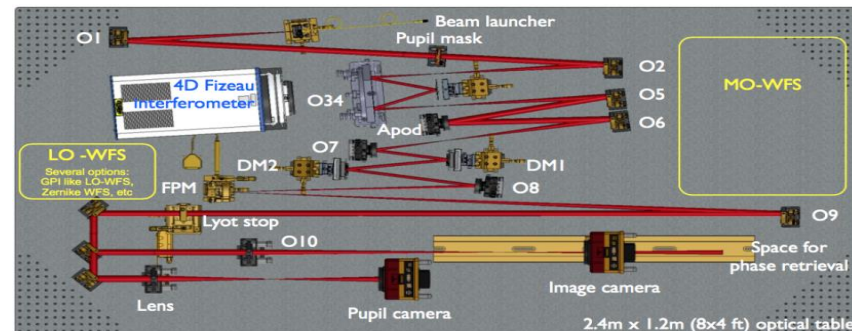


Poke coronagraphic images



THD amplitude map,  
estimated by COFFEE

HiCat (STScI) bench



- Statut de l'activité:

- VALIDE SUR SPHERE**

- Proposition du concept et première validation labo en 2012 (N'Diaye et al. 2013)
  - Prototype SPHERE en 2014, validation en 2015 (N'Diaye et al. submitted)
  - Résultats extrêmement prometteurs, y compris sur le ciel!
  - En parallèle, développements/tests sur banc MITHIC

- Ressources :

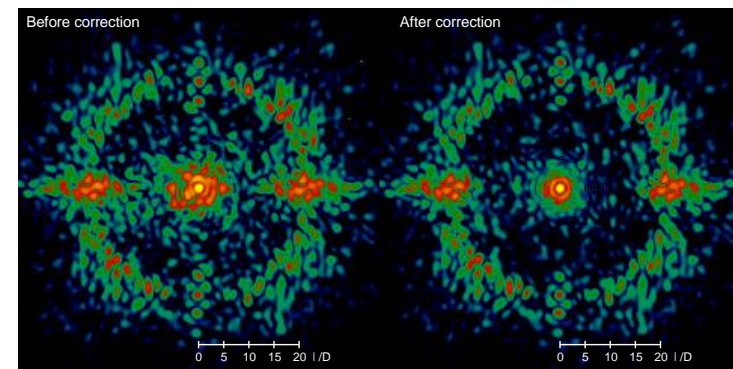
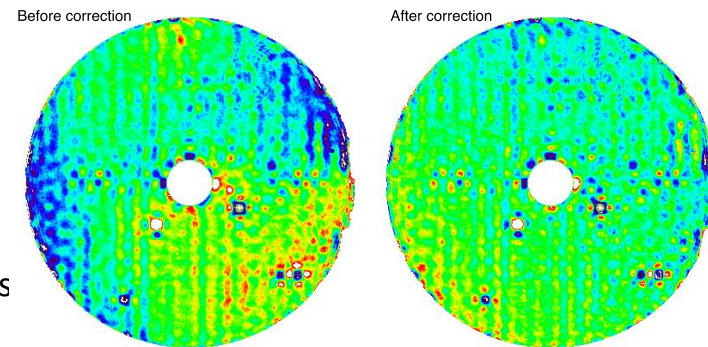
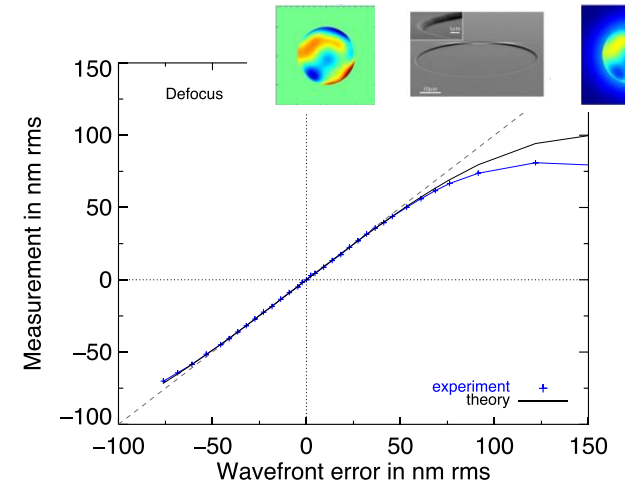
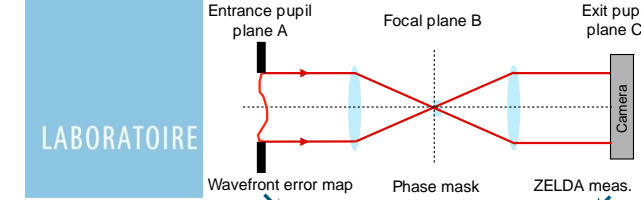
- Personnels: AVi KDo MND JFS/TFu
  - Matériel: masques de phase, simulateur d'atmosphère corrigée XOA

- Calendrier:

- 2016: validation sur le ciel + développement d'une procédure complète pour calibration des NCPA dans SPHERE
  - 2017: implémentation dans plan de calibration SPHERE**
  - + en parallèle: développements sur MITHIC, avec perspective de tests sur le ciel
  - ASOREX : dvpt commun ZELDA pour SPEED

- Collaboration:

- STScI: design masque et exploitation des données
  - ESO: interface avec SPHERE (software, template), tests en interne et sur le ciel



ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

LAM

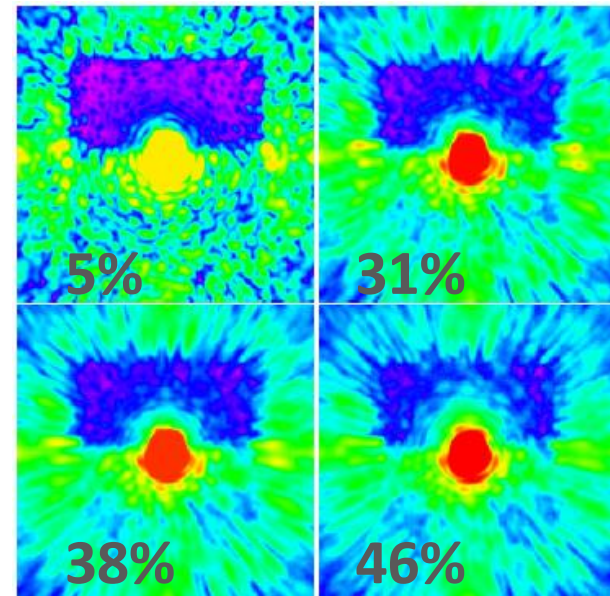
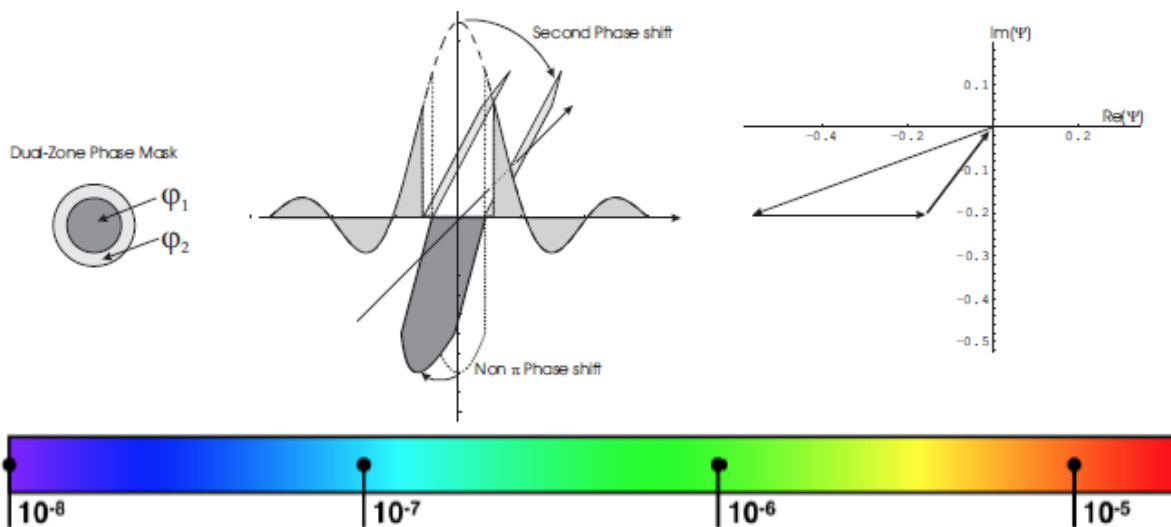
LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE  
DE MARSEILLE



# Technique d'imagerie haut contrastes

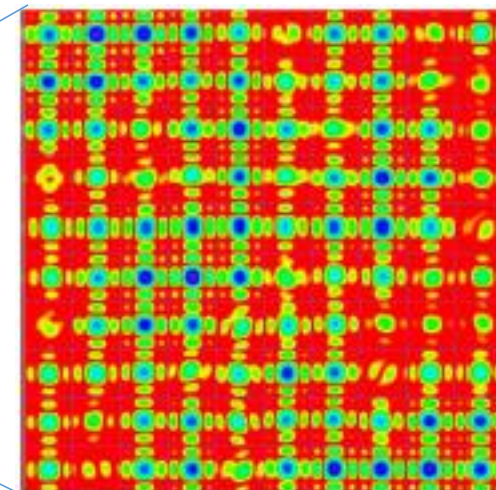
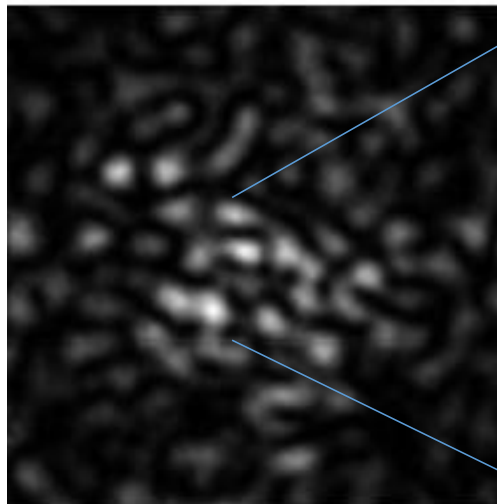
# Coronagraphie: le DZPM

- Concept propose avec Remi Soummer en 2001
  - Etayé dans le cadre de sa thèse
  - Soummer, Dohlen, Aime, A&A 2003
- Achromatisation du coronographe de Roddier
  - Minimiser le vecteur du champ électrique dans la pupille
- Optimisation par Mamadou N'Diaye
  - Durant son PostDoc au LAM 2010-2012
  - eg. N'Diaye et al, A&A 2012
- Implémenté et démontré avec SCC sur THD (Meudon)
  - Delorme et al, A&A 2016

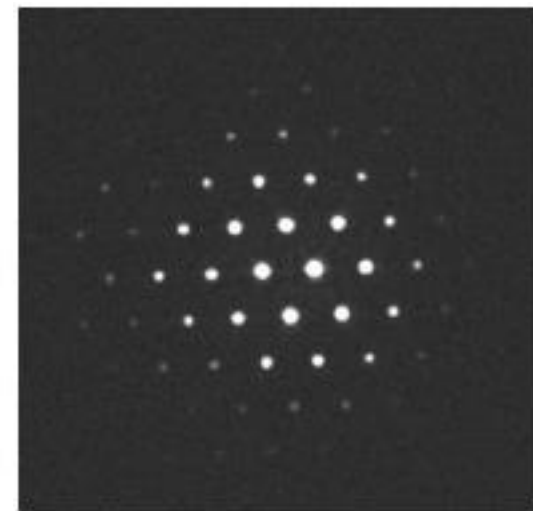
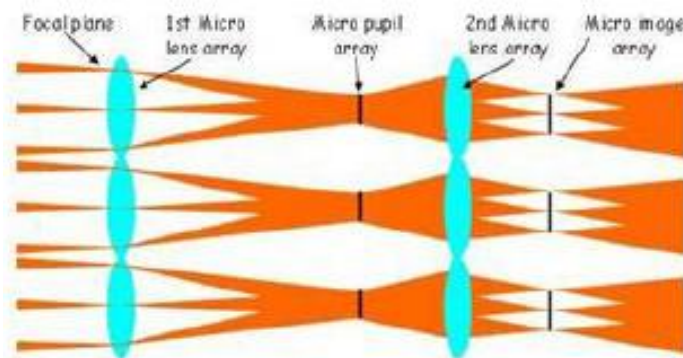




- Different options considered for SPHERE
  - Slicers: Propagation des aberrations différentiels d'une slice à l'autre considéré gros risque
  - TIGRE classique: Couplage important entre sous-pupilles en mode limité par diffraction
- BIGRE: double microlentilles
  - Réduit fortement le couplage
  - These de Jacopo Antichi
  - Antichi et al, ApJ 2009



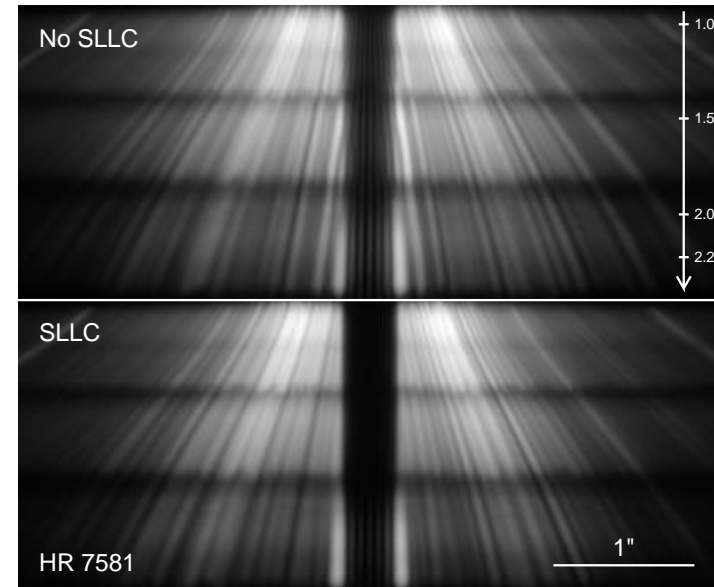
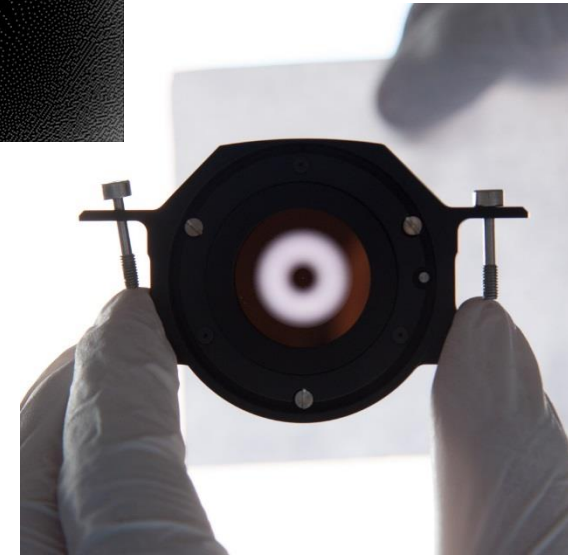
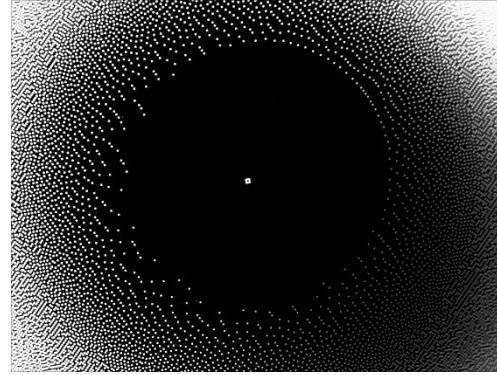
TIGRE (simu)



BIGRE (SPHERE)

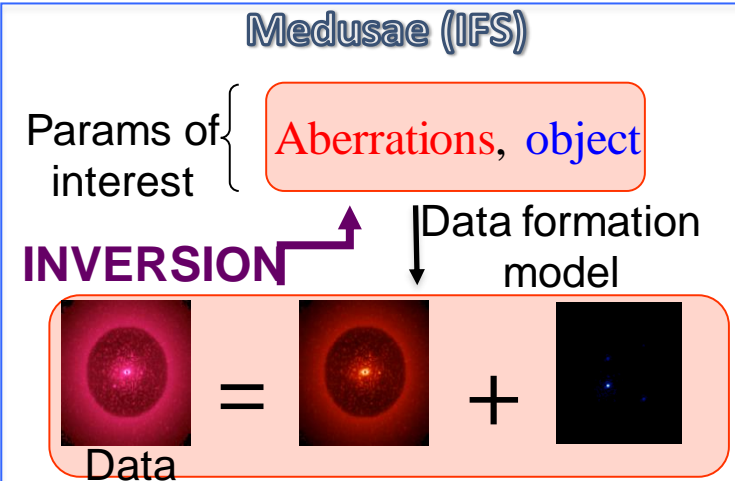
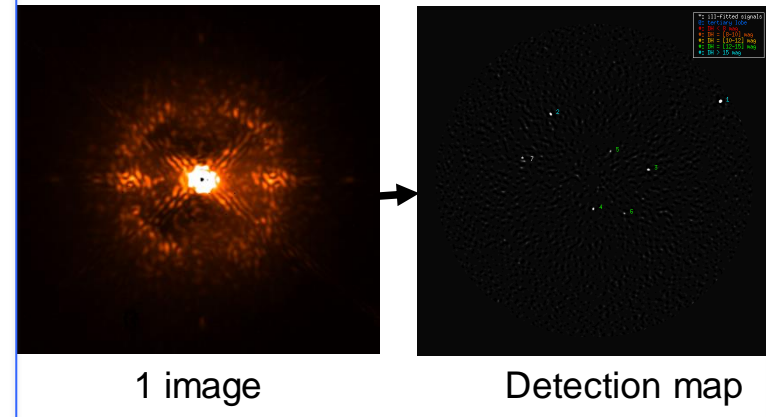
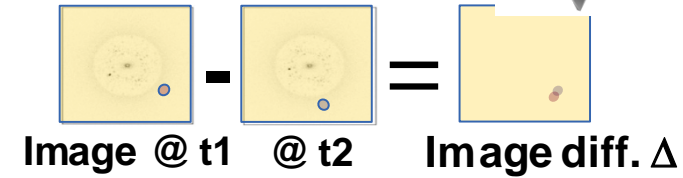


- Apodisation pour améliorer les performances du mode IRDIS/LSS
  - Suppression des résidus de diffraction proche du masque
  - Intérêt fort pour la spectro à  $R > 300$
- Spécificité:
  - Unicité du mode LSS + corono développé dans IRDIS
- Statut de l'activité:
  - **Validé sur le ciel**
    - Proposition du concept en 2013 (Vigan et al. 2013)
    - Prototypage SPHERE en 2014, validation en 2015 (Vigan et al. 2016a)
    - Résultats sur le ciel au niveau des simulations
- Ressources :
  - Personnels: AVi, MND, KDo
  - Matériel: apodiseur SLLC
  - Financière: 10 k€ (action incitative LAM)
- Calendrier:
  - 2016: incorporation dans SPHERE en temps que mode officiel
  - 2017+:
    - Exploration de concept pour gagner en IWA et en transmission
    - développements nécessaires pour une meilleure exploitation des données LSS en général (pas uniquement couplé avec SLLC)
- Collaboration ESO: interface avec SPHERE (software, template), tests en interne et sur le ciel



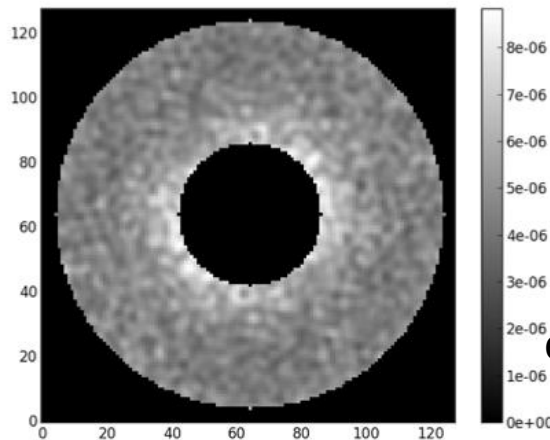
# Image processing for High Contrast Imaging

- Origine : MISTRAL (1998, ONERA)
- Nature & specificity: inverse problem approach with instrument expertise
  - Explicit, fine instrument modeling
  - Use available prior information on sought object and on noise
  - Co-design w/ instrument: optimize globally
- Status:
  - 2 past PhDs (A. Cornia, M. Ygouf) + 1 current PhD (F. Cantalloube, end 2016)
  - ADI (+SDI): [\[Cantalloube et al., A&A 2015\]](#)  
Andromeda operational & effective on on-sky data (NaCo, SPHERE)
  - IFS:
    - proof of principle on simulated data [Ygouf et al. A&A 2013]
    - diffs model/real data being analyzed
  - Collaborations: IPAG (PhD), CRAL (Défi Detection), ...



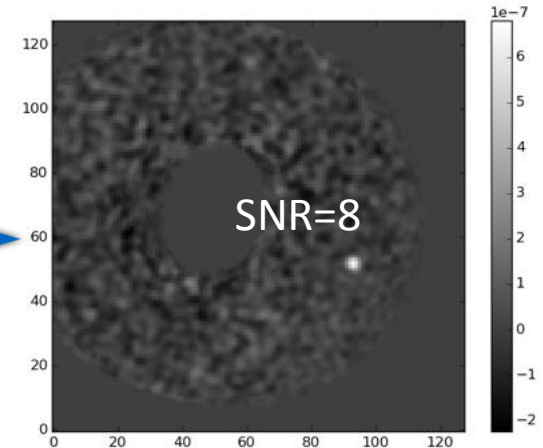
- **Description:** Détecter des planètes cachées (SNR<1) qui se déplacent dans des images coronographiques prises sur plusieurs mois-années.
- **Ressources:**
  - Humaines: 30% 1 - ETP chercheur (H. Le Coroller), 15 % 1- ETP Thésard (M. Nowak) + collègues du LAM/OHP (5% de 5-ETP)
  - Matériel: Cluster de calcul du LAM
  - Financières: 3 Keuros du PNP et ASHRA pour 2016
- **Statut:** Démonstration réussie avec un algorithmes de minimisation en introduisant de fausses planètes à SNR<1 dans un groupe d'images simulées (SPHERE-IRDIS)
 

[Le Coroller et al. 2015, OHP2015; Nowak, et al. 2016, A&A, En préparation](#)
- **Calendrier attendu:**
  - 2016: Introduire de fausses planètes (SNR<1) dans des images d'archive (NaCo...) et les retrouver avec K-Stacker (adaptation de l'algorithme aux vrais données)
  - 2017: Recherche de planètes dans des images d'archives NaCo, Keck, SPHERE, etc.
  - 2018 . Demande de temps (SPHERE) pour rechercher de nouvelles planètes autour d'étoiles « prometteuses » (Jeunes, brillantes, planètes déjà trouvées ou suspicion...)



K-Stacker  
Brute-Force  
+ Gradient

100 images  
espacées sur 3 ans  
à SNR=0.8

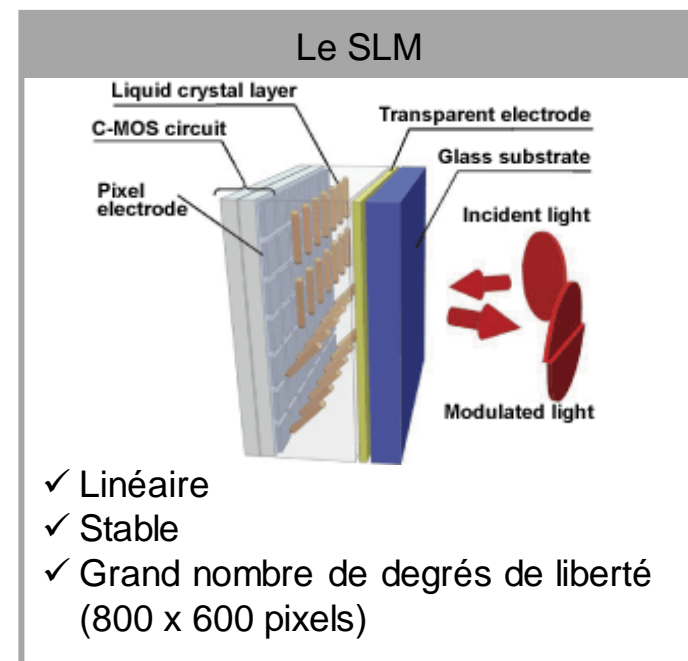
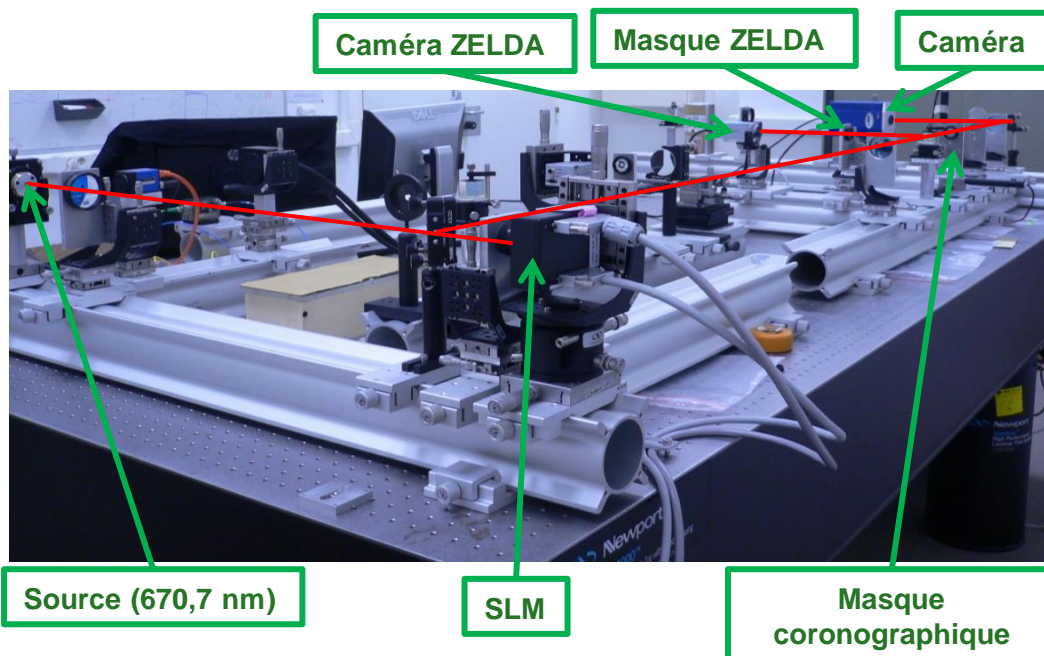


# Short exposure image study

- Visible images data cube (ZIMPOL)
- Validation of image formation models
- Study speckle statistics, comparison to S. Gladysz
- Internship 2016, 3 month
- Collaboration ETH Zurich

**MITHIC : Marseille Imaging Testbed for High Contrast**

- Banc dédié à l'imagerie à haut contraste
- Développement et validation expérimentales de nouvelles méthodes de contrôle de front d'onde dédiées à l'imagerie à haut contraste (COFFEE, ZELDA)



**Acces ciel: SPHERE, Keck, LBT, GeMs**

# Les projets instrumentaux

- SPHERE
- SPHERE upgrade
- HARMONI
- Collaborations US Sol / espace

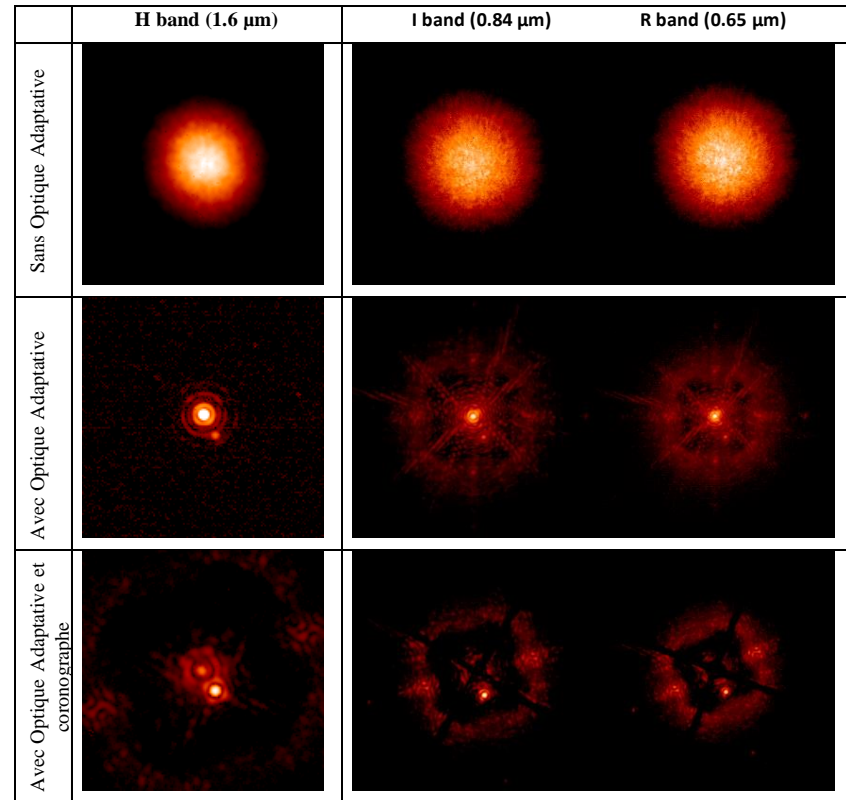
# SPHERE

- Grand consortium européen, 12 labos
- PI: Jean-Luc Beuzit
- Labos français: IPAG, LAM, ONERA, LESIA, Lagrange



# SPHERE : From design to scientific operation

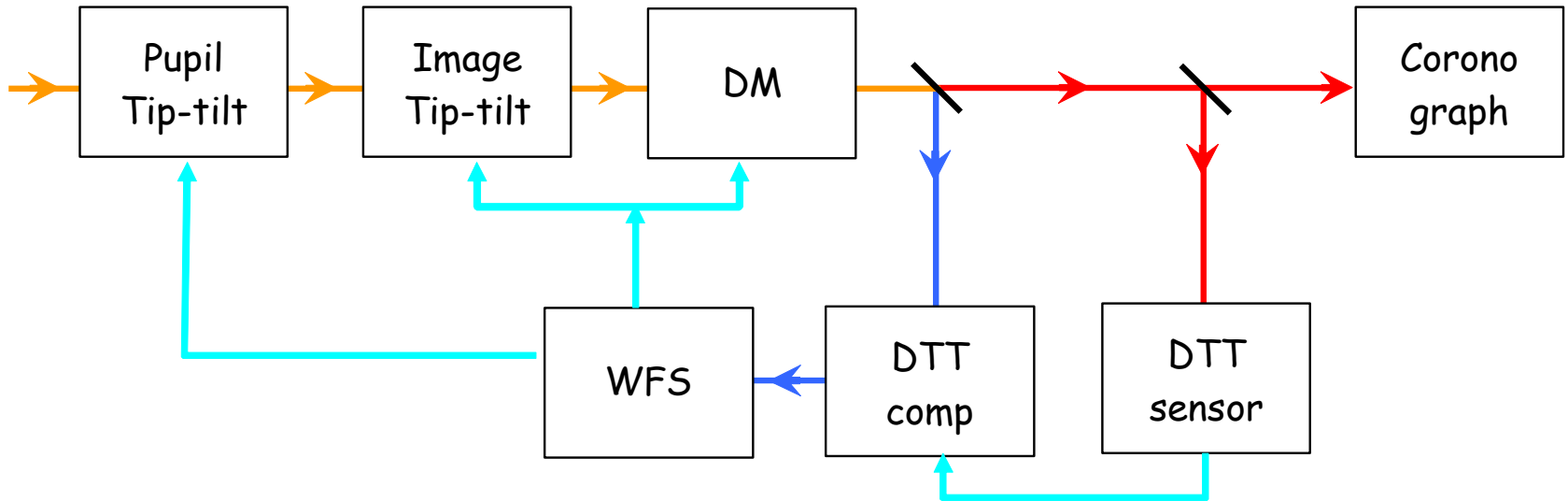
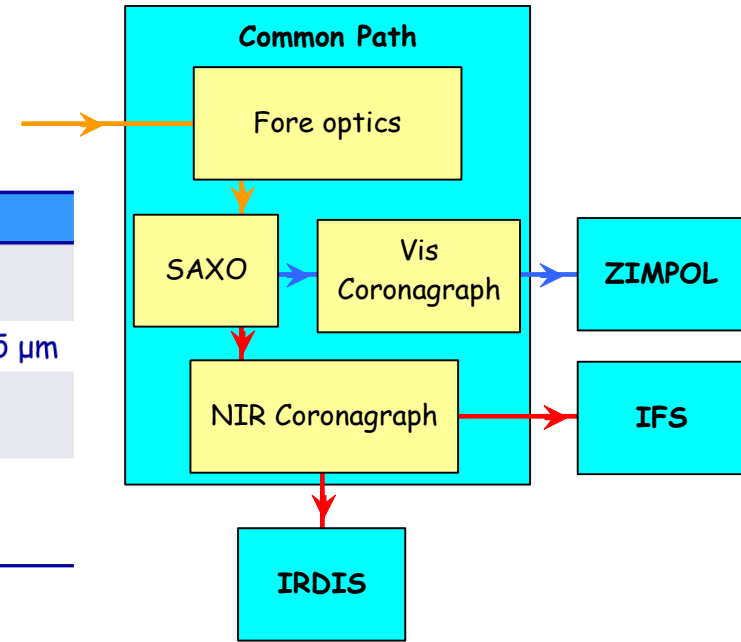
- SPHERE : Strong investment
- XOA:
  - 1.4M ESO/INSU
  - 1.4M ONERA
  - 15 FTE on 8y
  - 6PhD
- IRDIS/système globale:
  - 1M HW au LAM
  - 3 ans CDD
  - ~ 80 FTE LAM
  - 2 PhD, 2 PostDoc
  - Forte implication scientifique
- From early design ... to integrated operational system
- Ensure operation with whole instrument
  - AIT/COM : 4 mois de presence sur site pour 5 personnes
  - A Vigan 1an complet sur site : excellent retour ESO
  - Definition of automated calibration sequence
  - Define and validate acquisition sequence, from lab to sky
  - Participation in routine science operations





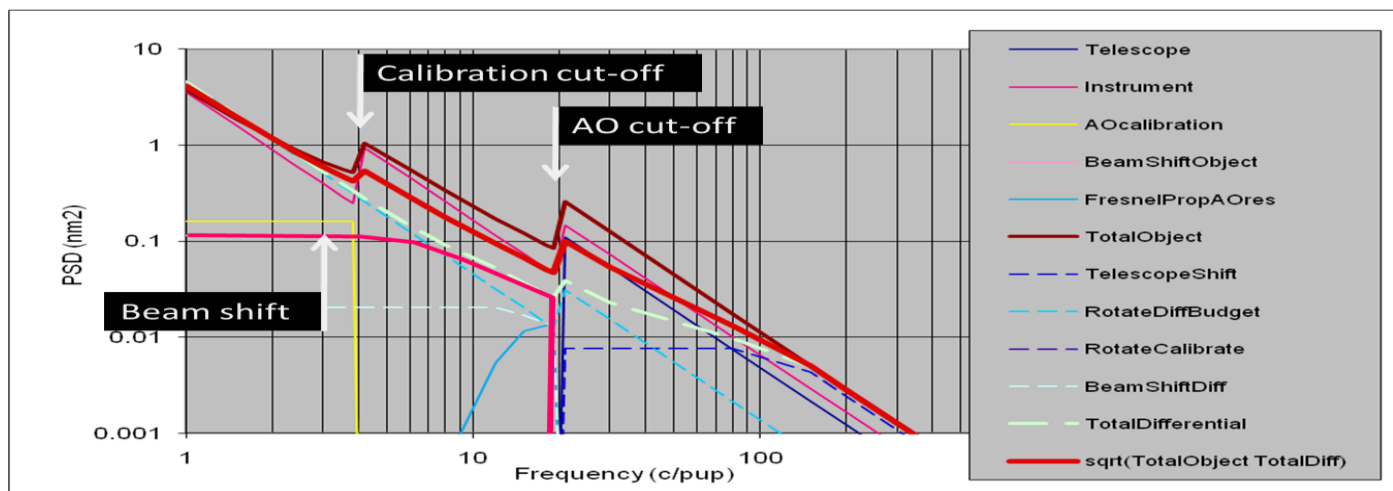
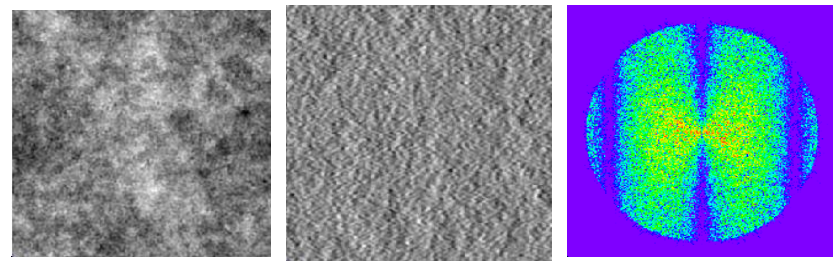
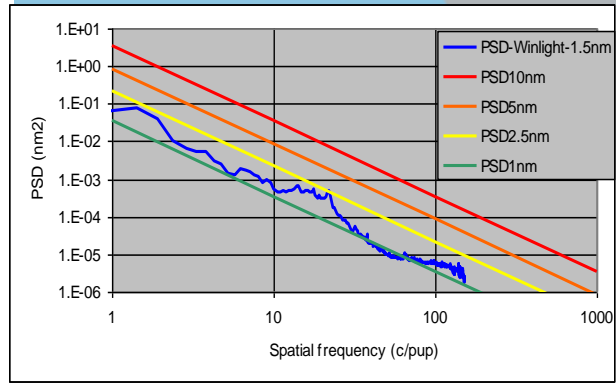
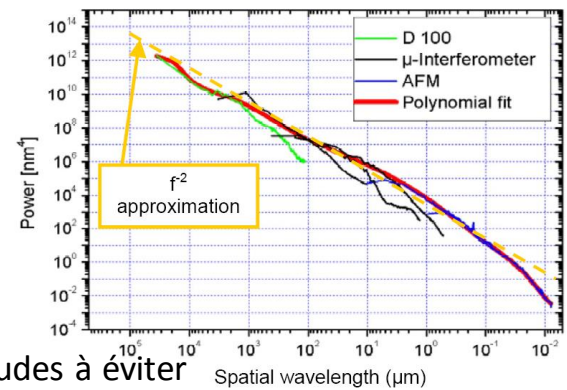
## SPHERE: System design

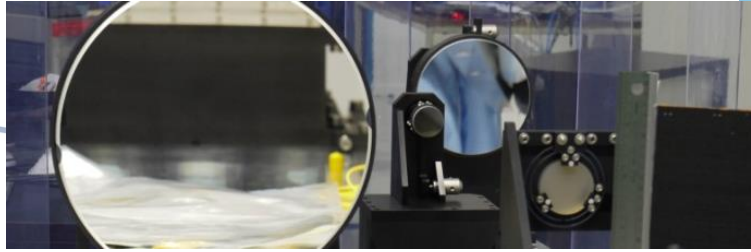
	ZIMPOL	IRDIS	IFS
FoV	Sq 3.5" (instantaneous) Up to 4" radius (mosaic)	Sq 11"	Sq 1.77"
Spectral Range	0.5 - 0.9 $\mu\text{m}$	0.95 - 2.32 $\mu\text{m}$	0.95 - 1.35/1.65 $\mu\text{m}$
Spectral information	BB, NB	BB, NB Slit spectro: 50/400	50 / 30
Linear Polarisation	Simultaneous on same detector, x 2 arms, exchangeable	Simultaneous dual beam, exchangeable	x



# Les challenges de l'ITHD

- Residual speckles ~ PSD de l'onde
  - XOA
  - Optiques excellents
- Points critiques
  - Chemin optique differential
  - Surfaces projetées à de grandes altitudes à éviter
    - Chromatic beam shift effect
    - Propagation de Fresnel
- Budget front d'onde: PSD
  - Hypothese simplificatrice: la loi de  $1/f^2$
  - Apparaît valide pour des optiques très bien polis

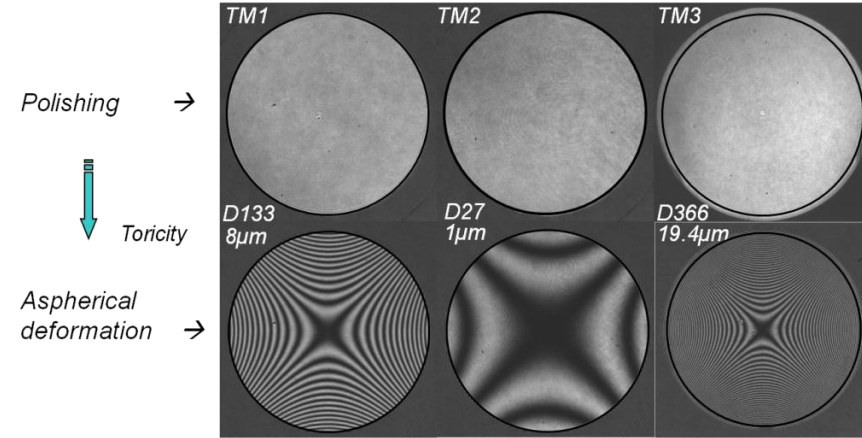




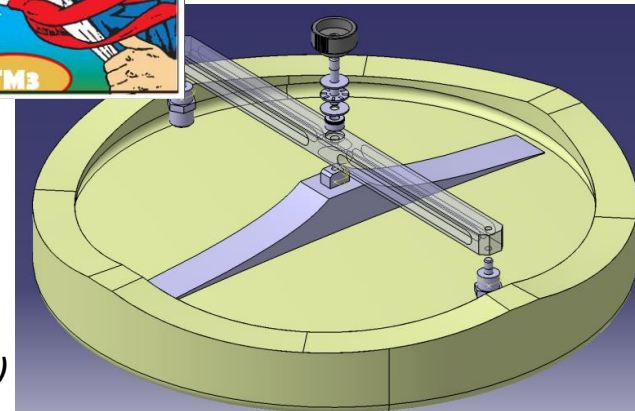
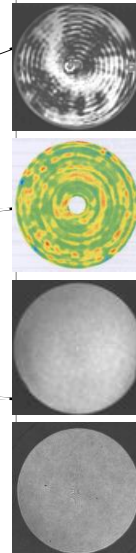
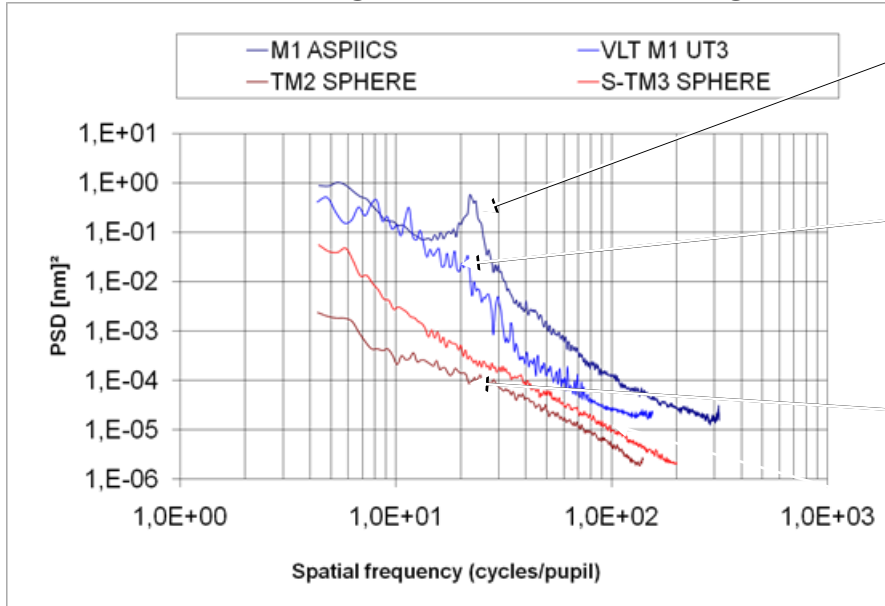
# Les toriques: Super-polishing results

## Exquisite results

- Form errors RMS ~10-20nm
- Ultra-low HF level ~1-2nm RMS
- Sub-nm roughness ~5 Angströms

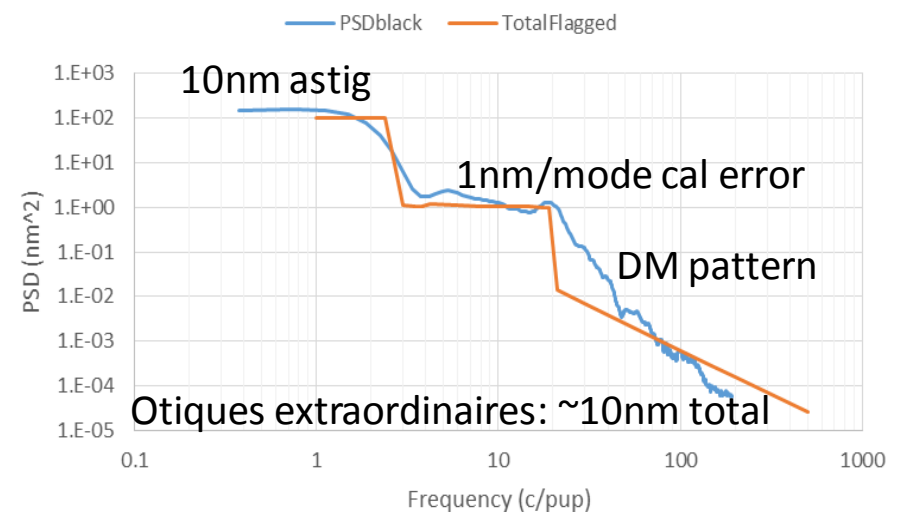
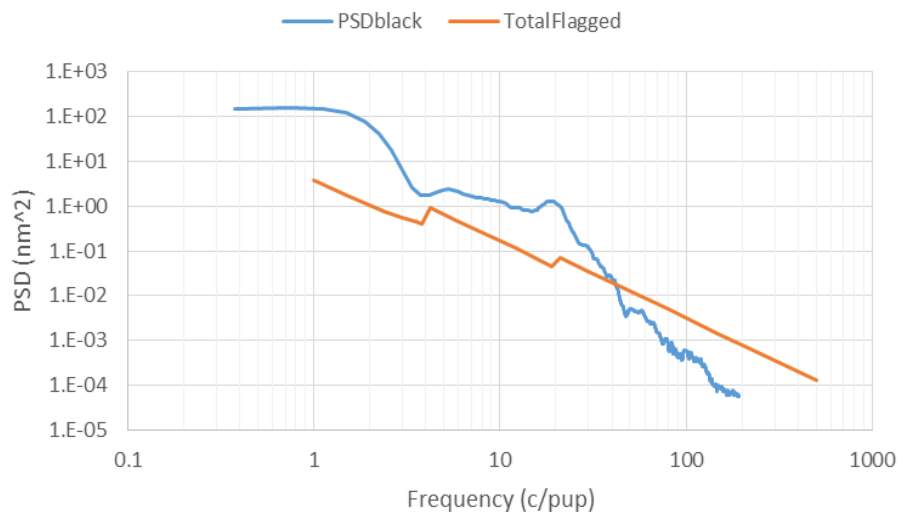
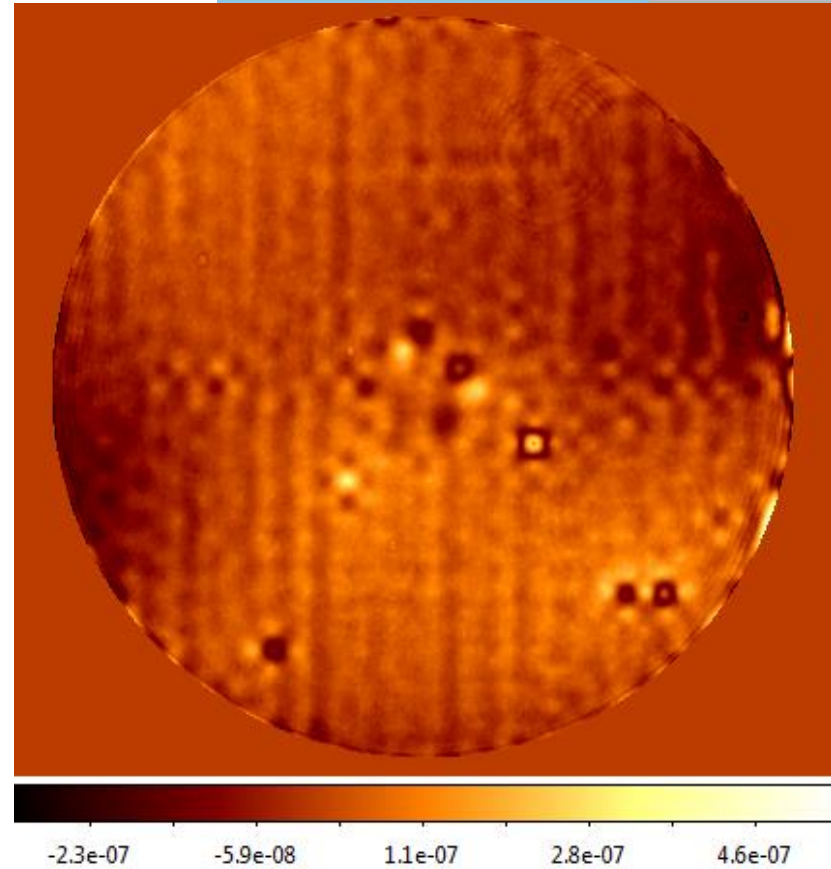


	TM1	TM2	TM3
Optical quality	LF 9.0nm MF 1.3nm HF 1.1nm	7.5nm 1.1nm --	22.0 nm 2.5nm 1.6nm
Roughness	5 Å	2 Å	9 Å



# Resultat des courses

- Mesure de front d'onde avec ZELDA
  - Les actuateurs morts...
  - 10nm rms astigmatism
  - Grille regulier liée aux actuateurs
  - Pas mal de gras
- Estimation de PSD assez loin du budget
- Prenant en compte les parametres "as built" la correspondance est bonne
- Calibration avec ZELDA en cours d'implementation





- **Remplacement du HODM:**

- risk mitigation, maintien de performance

- **Deux limitations dans les observations SPHERE aujourd'hui:**

- NCPA: pas d'info quantitatives sur le sujet, mais aberrations clairement visibles dans les images ZELDA après calib. du système
- Low Wind Effect: ~15% du temps sur SPHERE. Impact significatif, scientifique ET opérationnel

- **Solutions possibles :**

- Calibration off-line des NCPA (avec ZELDA ou diversité de phase): intéressant, mais limité par la stabilité des NCPA (Vigan et al. in prep.)
  - Solution baseline pendant le développement de SPHERE, mais pas implémentée à Paranal
- Remplacer le DTTS par ZELDA
  - Impact important sur l'ensemble du système, fréquence de correction, SNR, etc

- **Collaboration:** LAM/IPAG/ESO, +autres si nécessaires

- **Avancement / calendrier**

- Priorités 2016:
  - Planification de remplacement HODM
  - validation ZELDA sur le ciel pour implémentation en mode off-line
- 2017: ZELDA, étape intermédiaire avec mesure et correction sur le ciel en utilisant IRDIS. Sans doute utile pour voir l'interaction avec SAXO et le reste du système

- **Plus long terme**

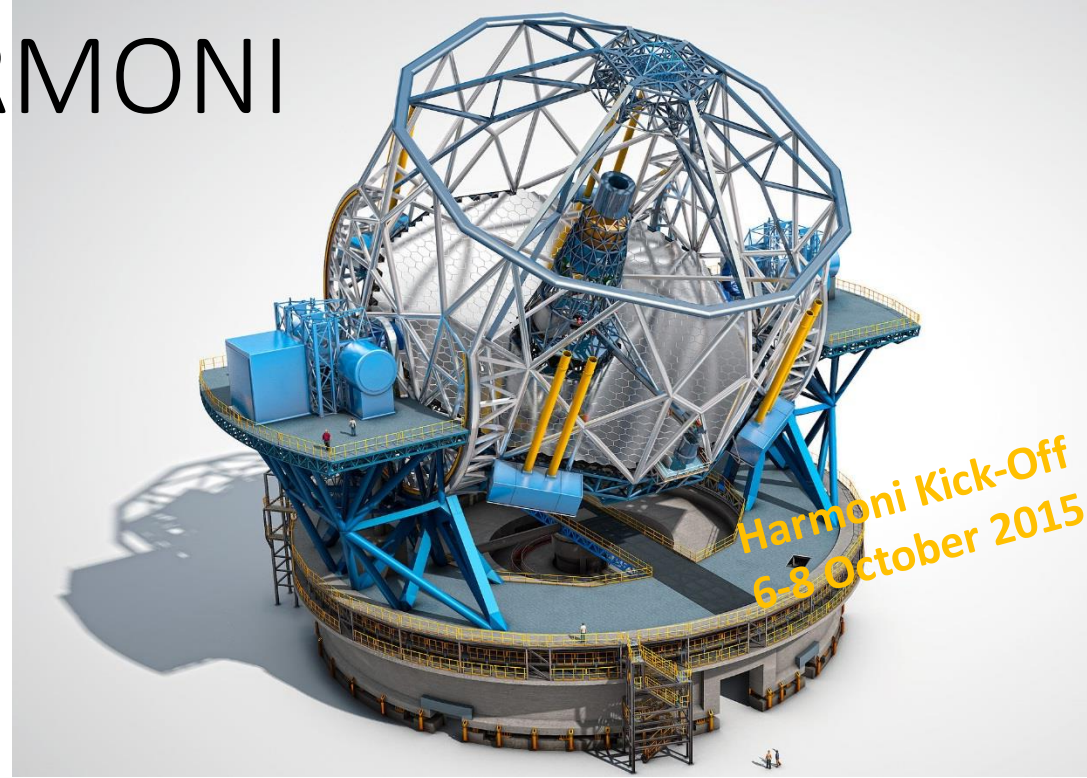
- Spectroscopie très haute résolution

# ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

# HARMONI

- Work-horse IFU
- capacite ITHD a l'etude
- Concept simple
  - Pas de ADC
  - Shaped pupil apodizer
  - Collaboration IPAG



Harmoni Kick-Off  
6-8 October 2015



# Synthèse prospective moyen et long terme

- Maitrise de toute la chaine de conception instrumentale
  - Concept: Etudes système
  - Methodes: XAO, NCPA
  - Composants: corono, IFS, WFS, ...
  - Traitement de donnees en co-conception
- Validations de concept, implémentation instrumentale
  - Labo, puis conditions « réelles »
  - AIT/V, mise sur ciel: notamment prise en compte des aspects opérationnels
- Maitriser l'interface instrument-science
  - Exploitation scientifique
  - Identifier les voies d'amélioration
  - Développer de nouveaux concepts pour répondre a l'évolution des besoins des astronomes

# Perspectives instrumentales

- Sol
  - Implication SPHERE upgrades
    - Performance status et améliorations (NCPA, LWE, ...)
    - Démonstration de nouveaux concepts: spectro haute-resolution, ...
  - Implication dans PCS
    - XAO design, simulation, integration, validation and operation
    - Interaction with high contrast component (masks, apodizers, imagers)
    - Definition of acquisition / observation strategies
    - Data processing : co-design with instrument & development of dedicated technics
- Space
  - Follow-up activity
  - Collaboration NASA-STScI / CNES / ESA
  - Understanding space environment constraint
  - Propose innovative concepts for ITHD in space



# Perspectives traitement de données

Exploiter la dimension spectrale (données spectrales sous-exploitées)

- Combinaison des données ADI / SDI / IFS
- Données IFS SPHERE
  - Comprendre les données SPHERE, comparaison aux modèles
  - Développer des outils dédiés au multispectral
  - Suites de la thèse de F. Cantalloube
- Spectro longue fente (LSS)
  - Exploitation de données SPHERE
  - Extraction optimale du signal de la planète
  - Développement d'outils spécifiques
- Activités à débuter rapidement (thèse / Post Doc 2017), avec des compétences système, XAO, TDI, astronomie

Imagerie courte pose

- Modèles de formation d'image
- Évaluer le potentiel de détection

Collaboration ONERA LAM IPAG CRAL



- Prospective scientifique du LAM (2015)
  - L'ITHD est à l'interface de 2 des 3 thématiques de recherche du LAM
    - Systèmes Planétaires (GSP) et R&D Instrumentation (GRD)
    - 40% du potentiel recherche + R&D ciblées dans les services techniques
  - Spectro haute résolution (>1000 , K) pour spectro-imagerie haut contraste
  - Systèmes optiques innovants et compacts, plans focaux, ..
  - Optique adaptative et active spatiale
- Enjeux stratégiques pour LAM et ONERA à horizon 2025
  - Equipe commune LAM-ONERA
    - Développement de la filière OA/XOA → Optique active spatiale
    - Soutien CNES et ESA sur ces développements
  - Développements techno pour les futurs instruments sol/espace
  - Appuis à la participation Sci. dans les grands projets internationaux
    - ELT-PCS, Mission M/L de l'ESA, LUVUOIR/HabEx ? (NASA Decadal)
- Renforcement des liens industriels et mise en place partenariats étroits
  - Mise en place d'un LIA avec le STScl en cours (signature automne 2016)
  - Mise en place d'un LabCom avec le groupe Thales (TAS/TESOS/TOSA) en 2016
  - Fourniture de sous-systèmes ou instruments issus de R&D - Etudes missions