

# Mesures météorologiques mises en œuvre pour les instruments EUI et SPICE de la mission Solar ORBITER



Anne Philippon - Institut d'Astrophysique Spatiale



# La mission Solar Orbiter

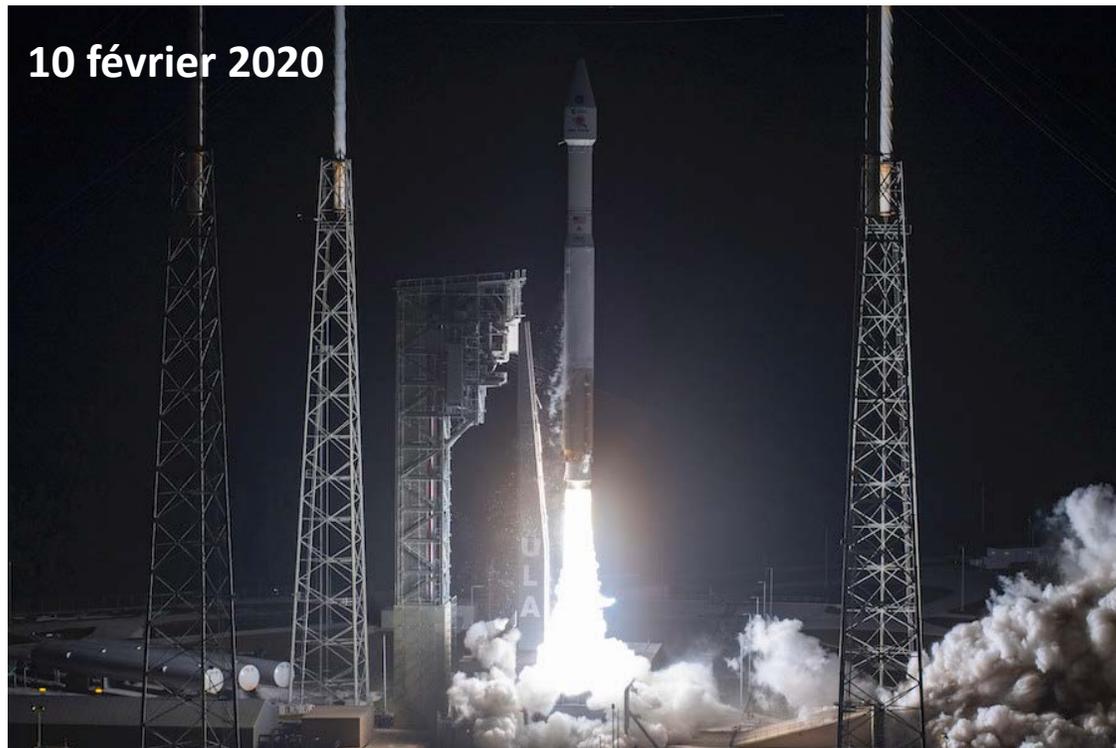


## Objectifs scientifiques

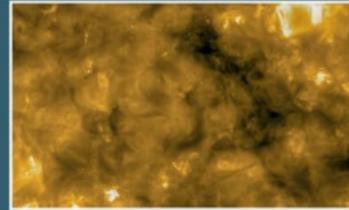
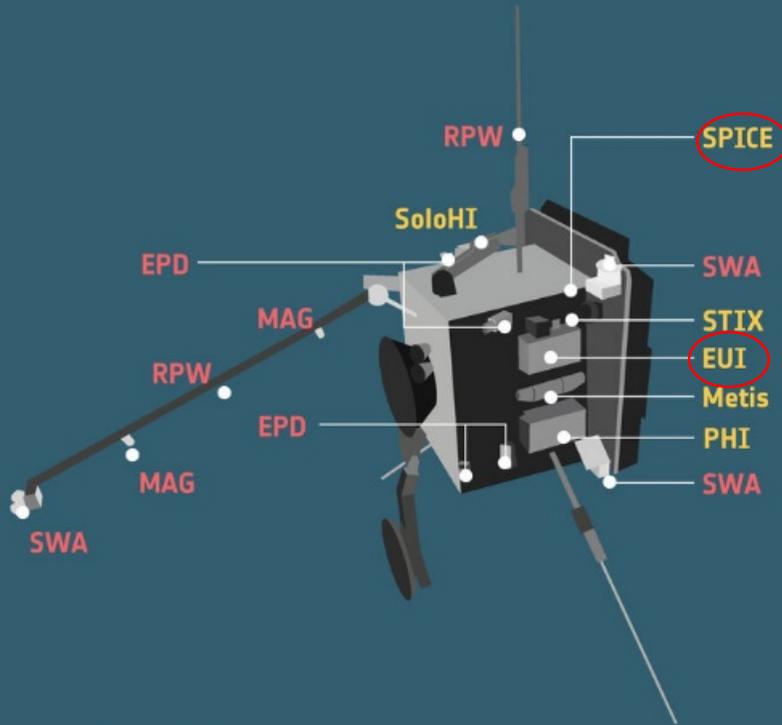
- Déterminer in-situ les propriétés et la dynamique du plasma, des champs et des particules dans l'héliosphère proche du Soleil
- Etudier les caractéristiques à faible échelle de l'atmosphère magnétisée du Soleil
- Identifier les corrélations entre l'activité à la surface du Soleil et l'évolution de la couronne et de l'héliosphère interne.
- Observer et caractériser les régions polaires et la couronne équatoriale du Soleil depuis les hautes latitudes.



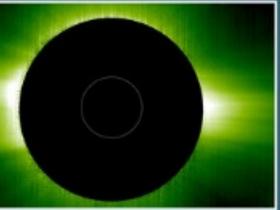
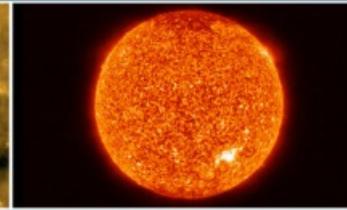
# La mission Solar Orbiter



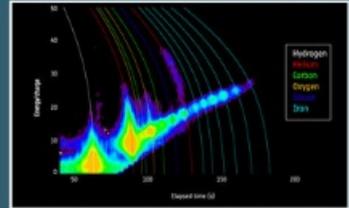
## SOLAR ORBITER FIRST IMAGES AND MEASUREMENTS



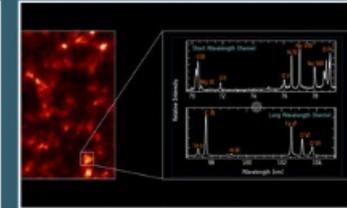
Extreme Ultraviolet Imager (EUI)



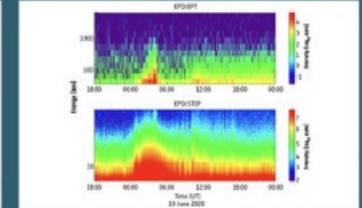
Coronagraph (Metis)



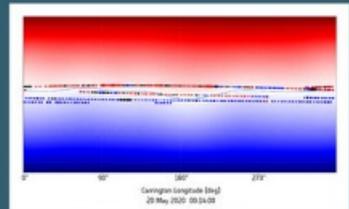
Solar Wind Analyser (SWA)



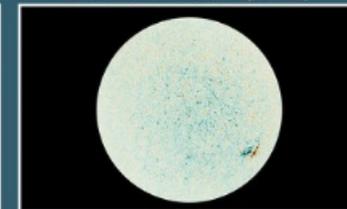
Spectral Imaging of the Coronal Environment (SPICE)



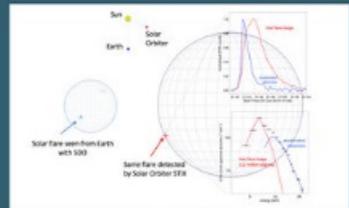
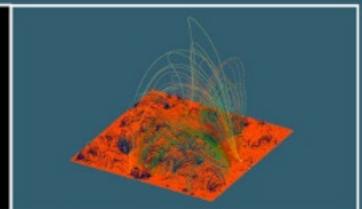
Energetic Particle Detector (EPD)



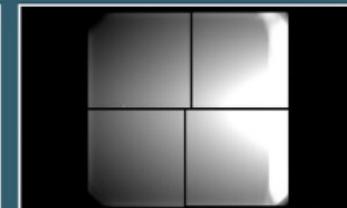
Magnetometer (MAG)



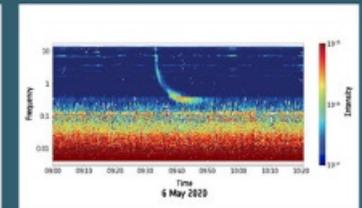
Polarimetric and Helioseismic Imager (PHI)



X-ray Spectrometer/Telescope (STIX)



Heliospheric Imager (SoloHI)

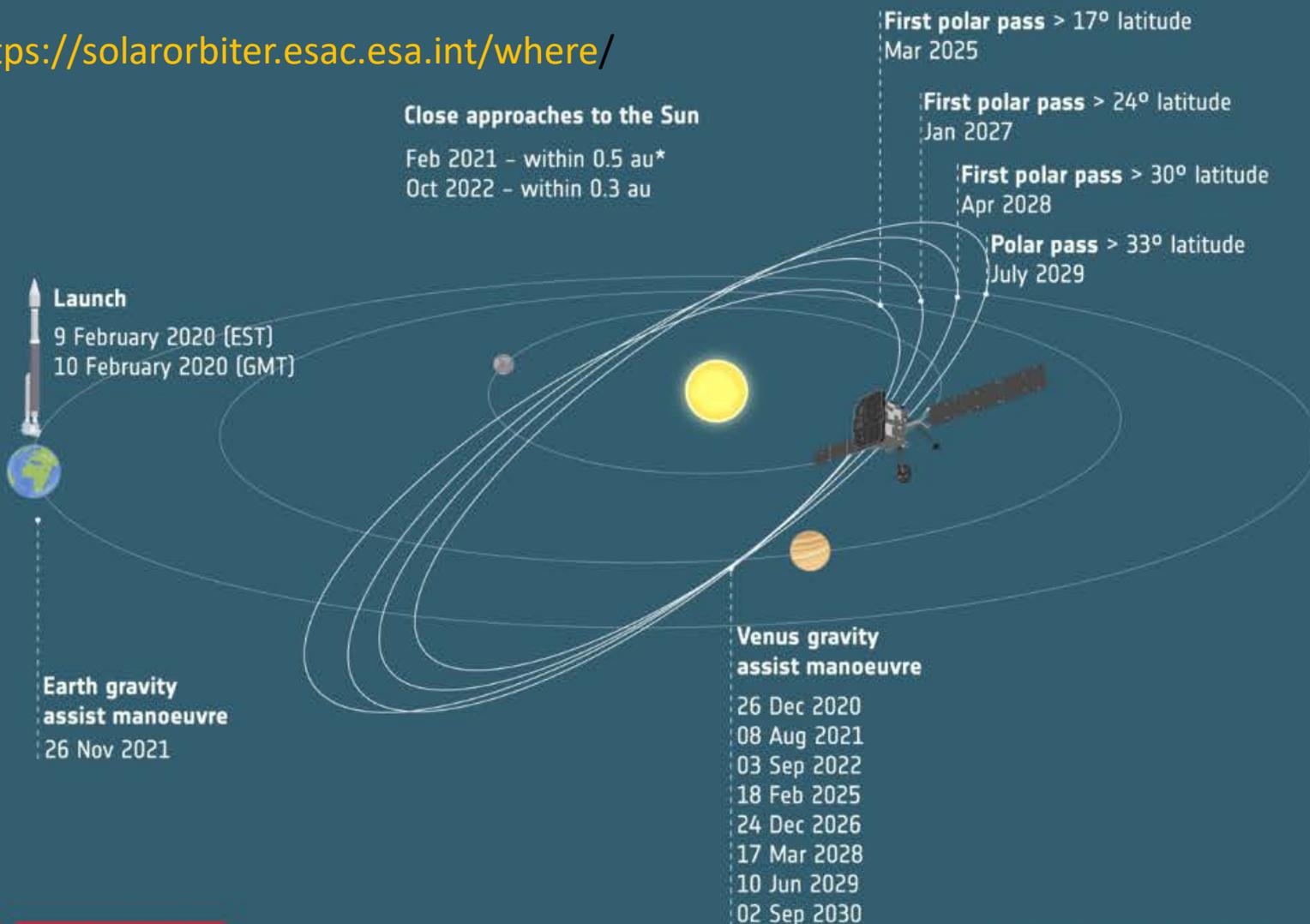


Radio and Plasma Waves (RPW)

# La mission Solar Orbiter

## SOLAR ORBITER JOURNEY AROUND THE SUN

<https://solarorbiter.esac.esa.int/where/>



**300 million km**  
Maximum distance between Earth and Solar Orbiter

**16.5 min**  
Maximum time for a radio signal to travel one way between Earth and Solar Orbiter

**22 orbits**  
around the Sun

**Nov 2021**  
Start of main mission

**Dec 2026**  
Expected start of extended mission





# Mesures métrologiques mises en œuvre de façon standard



## Métrologie composants mécaniques:

Mesures dimensionnelles

Mesure de rugosité



## Métrologie composants optiques :

Mesures dimensionnelles

Mesure de front d'onde

Mesure de rugosité

Mesures performances optiques : transmission , réflectivité, efficacité vs  $\lambda$  et vs AOI



## Métrologie AIT:

Mesures dimensionnelles

Alignement et positionnement : microscopie – 3D – WFE - angulaire



# L'instrument SPICE

## Spécifications optiques:

Domaine de longueur d'onde: 70.6 nm - 104.9 nm

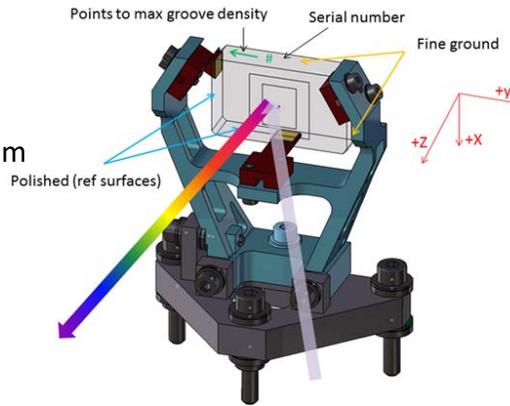
LW :  $97.3 \text{ nm} \leq \lambda \leq 104.9 \text{ nm}$

SW :  $70.6 \text{ nm} \leq \lambda \leq 78 \text{ nm}$

Ordre de diffraction : 1<sup>st</sup>

Efficacité du réseau: >28%

Efficacité absolue: > 8%



Fourniture IAS

Parameter	Value
type	TVLS
Material	Fused silica
Dimensions	30 mm x 20 mm x 8 mm
Useful area	15 mm x 15 mm
Density	2400g/mm at center
Duty cycle	0.55
Shape	trapezoidal
Coating	B4C
Coating thickness	20 nm
Roughness	0.8 nm RMS before coating

## Spécifications mécaniques

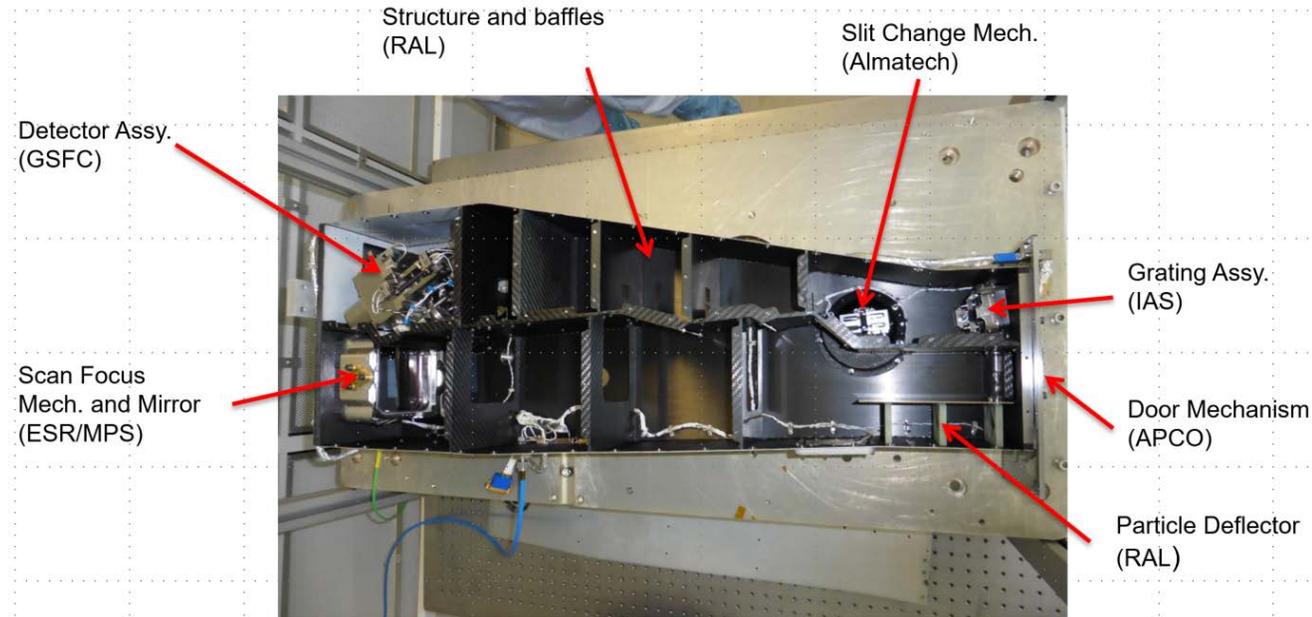
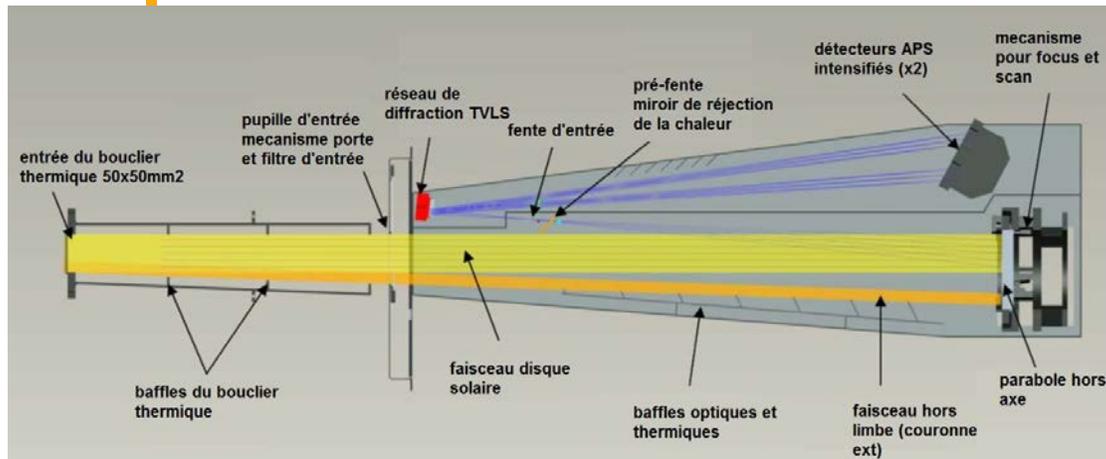
2 rotations :

autour Y: gamme : +/- 0.5°, précision: 0.03°

autour Z: gamme: +/- 0.5°, précision: 0.03°

3 translations

Axes X Y et Z : gamme : +/- 1 mm, précision 0.01 mm





# L'instrument SPICE :

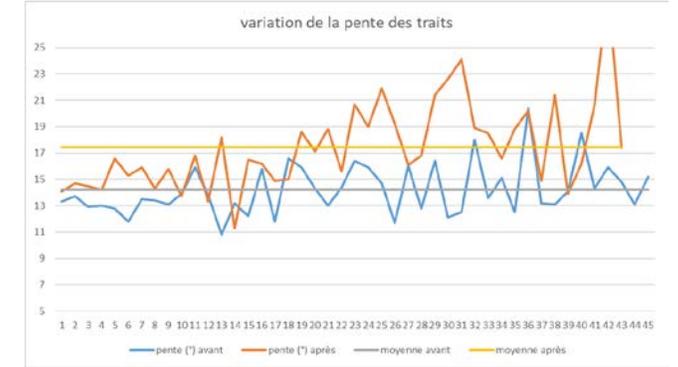
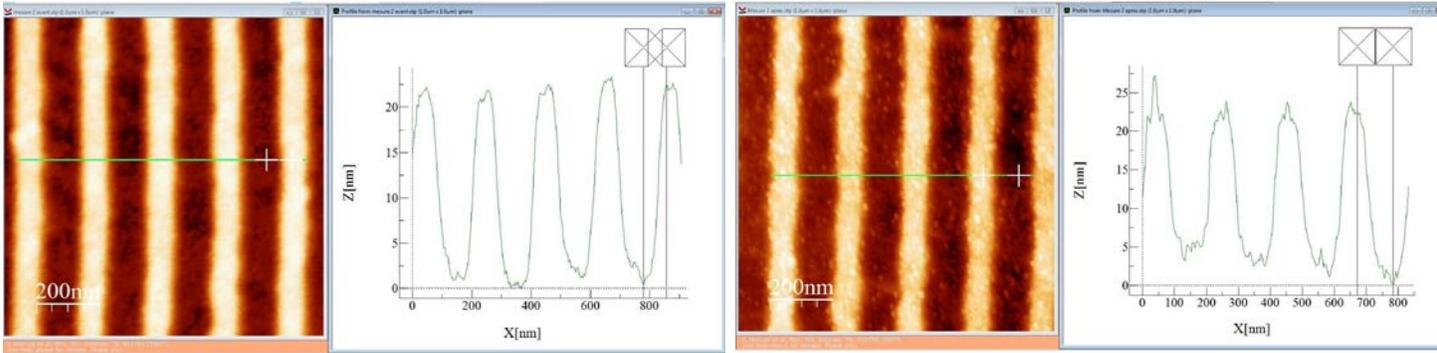
## la métrologie pour choisir le modèle de vol

	requirement	1	4	5	6	7	10	11
# SESO								
# HJY holography	DC22AK			DC22Z	DC22Y	DC22W	DC22AB	DC22AC
# HJY ruling	U5093			U5092	U5088	U5081	U5083	U5090
# HJY serial n°		83573		83572	83496	83495	83348	83497
# IAS	FM B1		FTM B1	FS B2	FTM B2	FM B2		FS B1
width	20+/- 0.1	19,96	19,96	19,96	19,95	19,96	19,96	19,96
length	34+/-0.1	33,97	33,95	33,97	33,97	33,97	33,97	33,98
center th,	8 +0/- 0,1	7,971	7,968	7,954	7,967	7,97	7,948	7,998
R mean	214,2 ± 0,2 mm	214,04	214,335	214,38	214,31	214,29	214,385	214,015
Rh	213,518	213,36	213,65	213,7	213,63	213,61	213,7	213,33
roughness (mean 5 pt)	<0,5nm	0,272	0,32	0,328	0,286	0,308	0,252	0,25
astig	839 ± 52 nm	797	813	826	830	831	818	833
astig angle	± 0,5	0,03	-0,82	-0,53	-0,27	1,98	0,32	0,13
SFE nm PV (100% points)		76	35	62	46	43	37	46
SFE nm PV (99% points)		47	25	29	29	30	24	20
parallelism +X/-X		0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
parallelism +Y/-Y		0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
perpendicularity +Y/-X	<3'12"	-1"	-2"	-12"	-4"	-26"	-13"	-13"
perpendicularity -Z/+Y	<3'12"	-4"	+2"	+1"	-4"	0 -5"		0
perpendicularity -Z/-Y	<3'12"	-1'33"	+3'42"	-27"	-30"	-22"	-6"	+31"
perpendicularity -Z/-X	<1'58"	-1"	-3"	+2'06"	-5"	+17"	-1"	-17"
perpendicularity -Z/+X	<1'58"	+1'29"	+25"	-1'45"	-2'31"	-2'31"	+1'57"	-1'55"
perpendicularity -Z/+Z	+/- 1'	59"	42"	1'40"	45"	42"	38"	2'04"
grating profile c/d		0,64		0,6	0,59	0,65	0,64	0,63
grating profile h		21,3		21,3	19,1	21,4	21,6	21,7
grating profile slope (range)		16 18		13 15	12 13	13 15	15 18	15 16
efficiency 1st order 80nm	>28%	35,8		35	36,8	33,7	34,9	34,7
efficiency 2nd order 50nm	>8%	11		13	12,7	14,2	12,7	11
central groove density	2400+/-16,9	2403,2+/- 1		2403,2+/- 1	2403,2+/- 1	2403,2+/- 1	2403,2+/- 1	2403,2+/- 1
law groove density A1	-1,275 mm-1	-1,27+/-0,12		-1,27+/-0,12	-1,27+/-0,12	-1,27+/-0,12	-1,27+/-0,12	-1,27+/-0,12
law groove density A2	<10-5 mm-2	(3,2 +/- 8,4) 10-4		(3,2 +/- 8,4) 10-4	(3,2 +/- 8,4) 10-4	(3,2 +/- 8,4) 10-4	(3,2 +/- 8,4) 10-4	(3,2 +/- 8,4) 10-4
law groove density A3	<10-6 mm-3	(1,7+/- 6,7) 10-5		(1,7+/- 6,7) 10-5	(1,7+/- 6,7) 10-5	(1,7+/- 6,7) 10-5	(1,7+/- 6,7) 10-5	(1,7+/- 6,7) 10-5
groove orientation	0,5°	<0,22°		<0,22°	<0,22°	<0,22°	<0,22°	<0,22°
roughness of land	<1 nm	<0,2		<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,2
roughness of groove	<1 nm	<0,3		<0,45	<0,45	<0,45	<0,45	<0,4

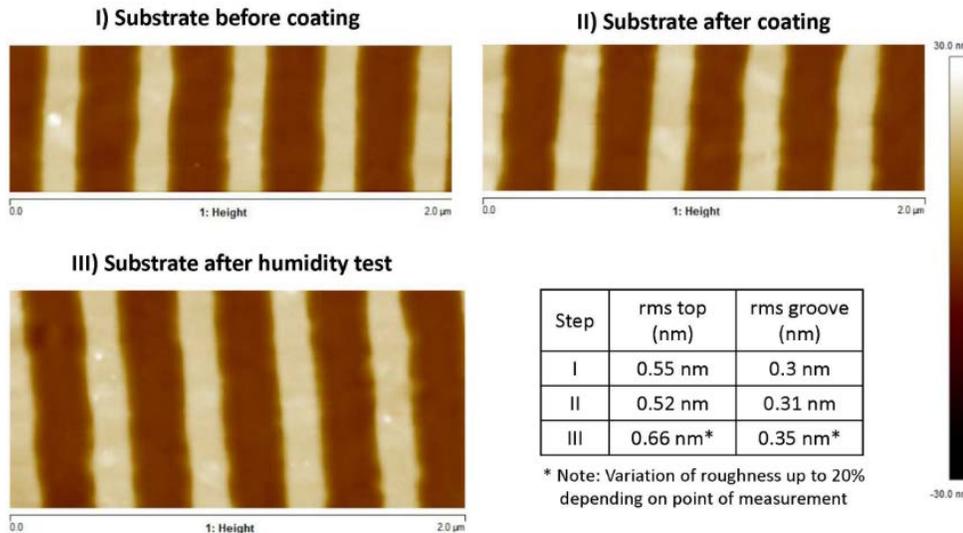


# L'instrument SPICE :

- Impact du coating sur le profil de trait et la rugosité  
Profondeur des traits 20 nm – épaisseur du coating B4C 20 nm



Mesures faites à Soleil par M. Thomasset



Mesures effectuées sur les modèle d'engineering

- Augmentation de la pente (3°)
- faible augmentation de la rugosité (0,05 nm)

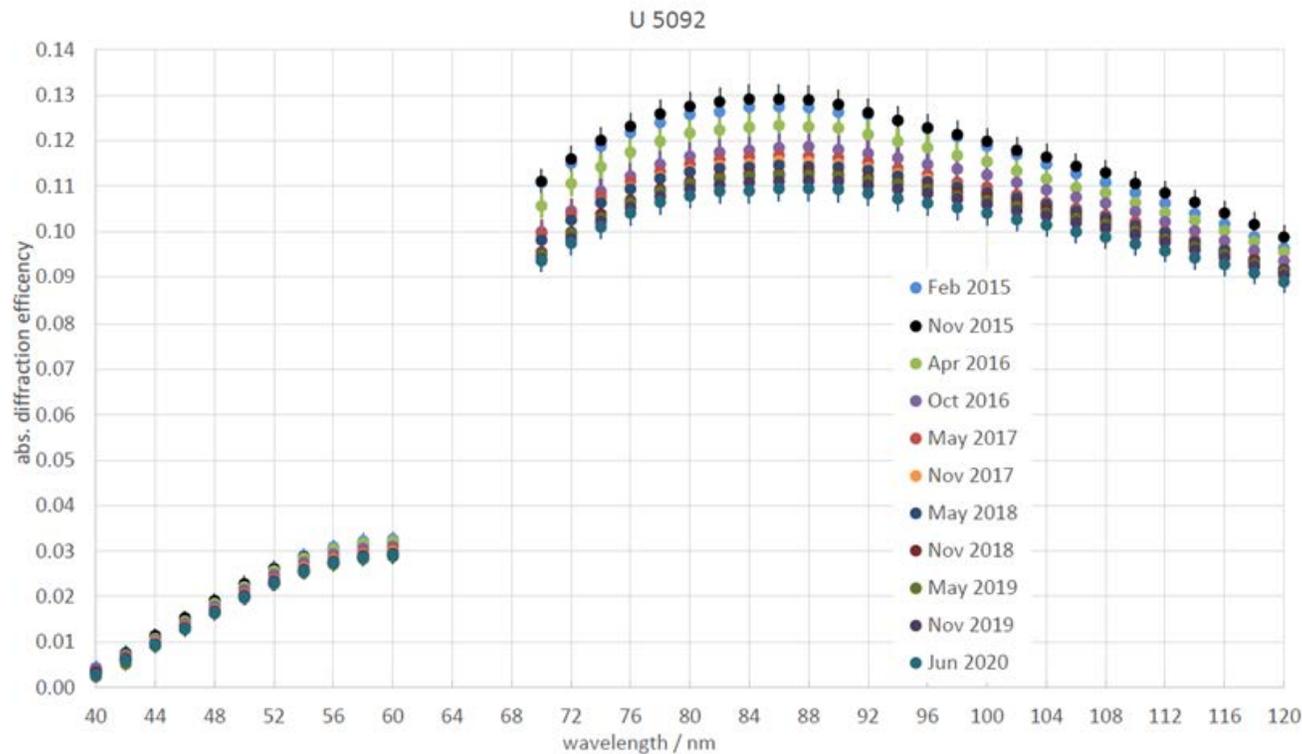
Valeurs prises en compte dans les simulations pour valider les performances attendues du modèle de vol

Mesures faites par OptiXfab (Allemagne) qui a réalisé les coatings





## Diffraction Efficiency of U5092



- Monitoring de l'efficacité

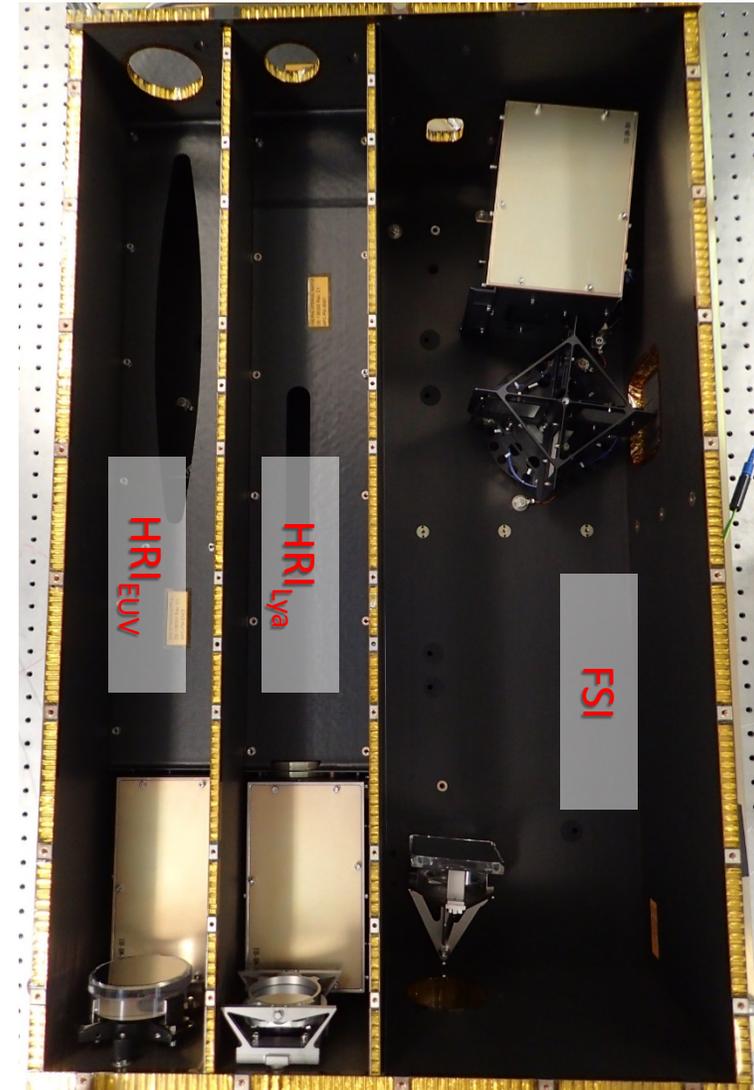
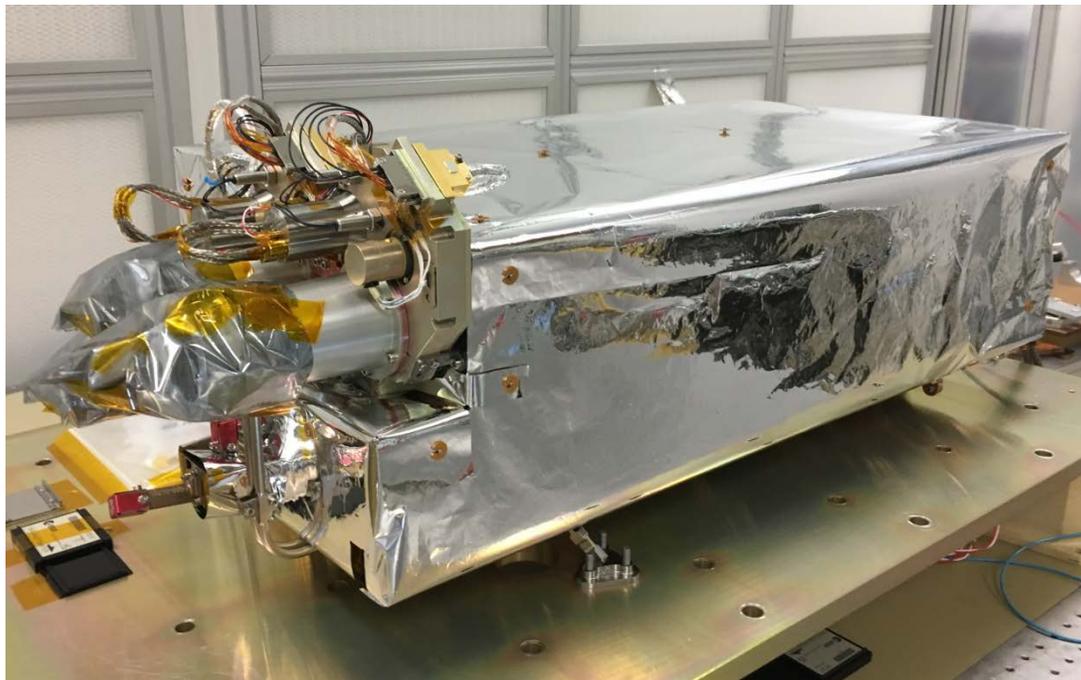
Réseau identique au FM FS  
 Exposition à l'air le temps équivalent aux essais  
 Stocké sous purge d'azote  
 Mesures sur synchrotron à PTB (Allemagne)

Les valeurs servent à recalibrer le modèle de performance de l'instrument en vol



# L'instrument EUI

FSI dual EUV	Passband centre	17,4 nm and 30,4 nm alternatively
	Field of View	3.8 arcdeg × 3.8 arcdeg
	Resolution (2 px)	9 arcsec
	Typical cadence	600 s
HRI EUV	Passband centre	17,4 nm
	Field of View	1000 arc sec square
	Angular resolution (2 px)	1 arcsec
HRI Lyman- $\alpha$	Typical high cadence	2 s
	Passband centre	121,6 nm
	Field of View	1000 arcsec square
	Resolution (2 px)	1 arcsec
	Typical high cadence	Sub-second

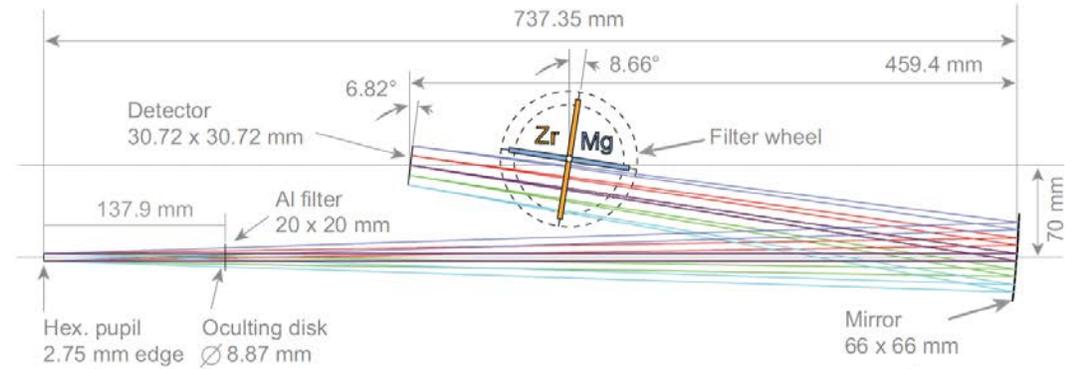


# L'instrument EUI



Optical element	Parameters
Entrance pupil	Hexagonal, 2.75 mm edge
Occluding disc (OD)	Circular, $\varnothing$ 8.87 mm
Length Pupil-OD	135.9 mm
Mirror (M1)	
Figure	Concave ellipsoid ( $K = -0.732$ )
Dimensions	66 mm $\times$ 66 mm substrate 53 mm $\times$ 53 mm useful area
Off-axis	70 mm
Radius of curvature	925 mm
pass-bands	17.4 nm and 30.4 nm
Pupil - M1 centre	737.35 mm
M1 - Focus	459.4 mm along optical axis
Filter wheel	Redundant Al/Zr/Al and Al/Mg/Al
Detector	Flat, 3072 $\times$ 3072 10 $\mu$ m pixels
Tilt to optical axis	6.82°

## Canal FSI

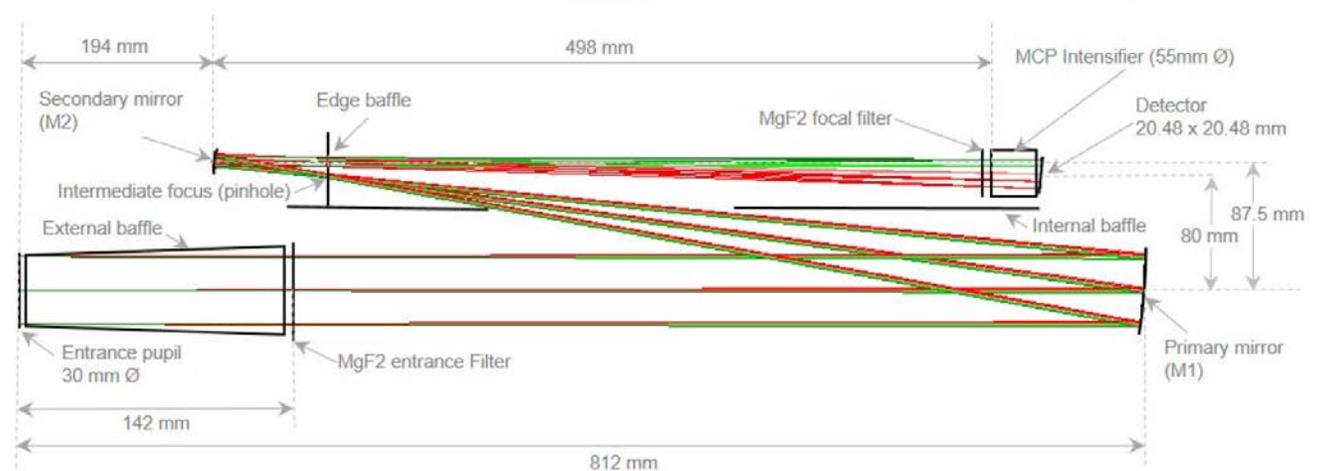


## Canal HRI<sub>EUV</sub> Cassegrain hors axe



	HRI <sub>EUV</sub>	HRI <sub>Ly<math>\alpha</math></sub>
Focal length	4187 mm	5804 mm
Entrance pupil	47.4 mm	30 mm
Field of view	1000 arcsec <sup>2</sup>	1000 arcsec <sup>2</sup>
Plate scale	50 arcsec mm <sup>-1</sup>	31.5 arcsec mm <sup>-1</sup>
Detector	2048 $\times$ 2048, 10 $\mu$ m pixels	2048 $\times$ 2048, 14.1 $\mu$ m virtual pixel size
Primary mirror (M1)	66 mm $\varnothing$ (54 mm useful) 80 mm off-axis RC = 1518.067 mm CC = -1	42 mm $\varnothing$ (38 mm useful), 80 mm off-axis RC = 1143 mm CC = -1
Secondary mirror (M2)	25 mm $\varnothing$ (12 mm useful), 11.44 mm off-axis RC = 256.774 mm CC = -2.04	20 mm $\varnothing$ (18 mm useful), 7 mm off-axis RC = 91 mm CC = -0.65

## Canal HRI<sub>Ly $\alpha$</sub> Gregory hors axe

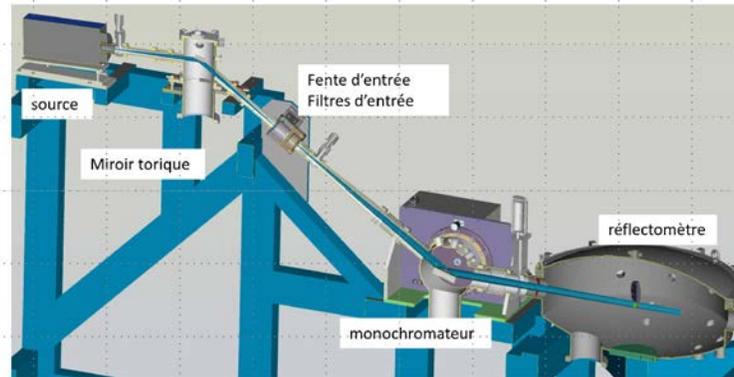
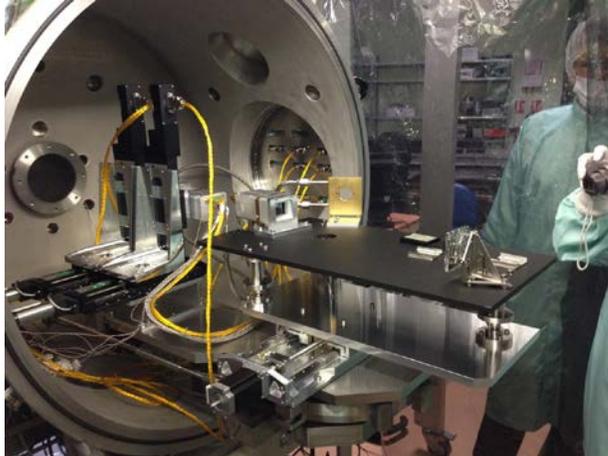


# L'instrument EUI : mesure des filtres

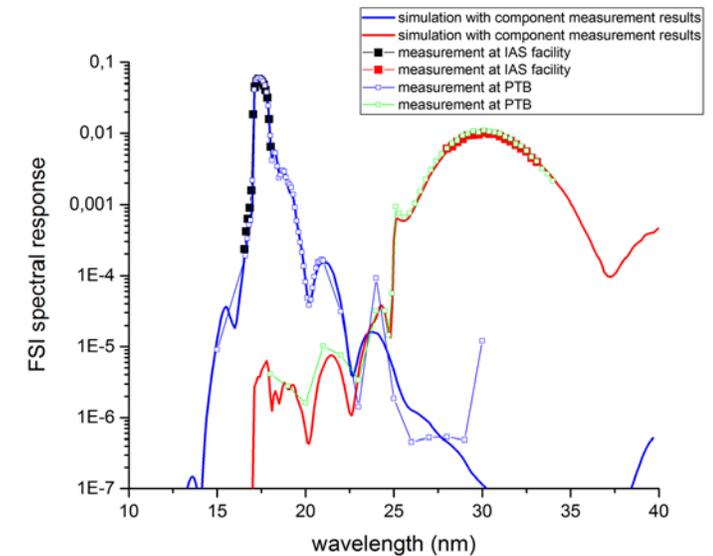
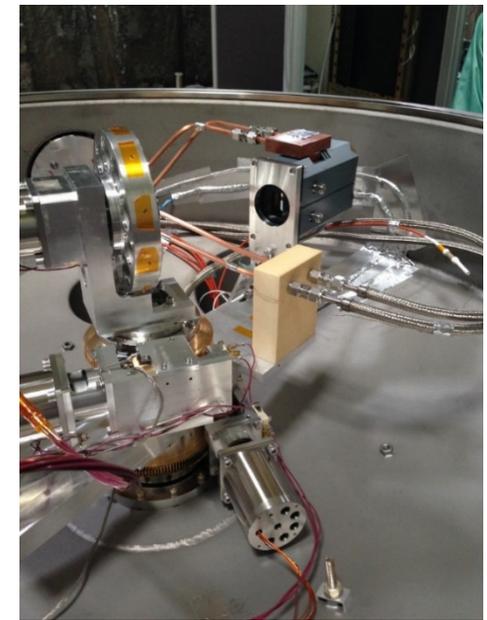
Sur la ligne UV développée à l'IAS pour ces caractérisations

## Caractéristiques ligne UV

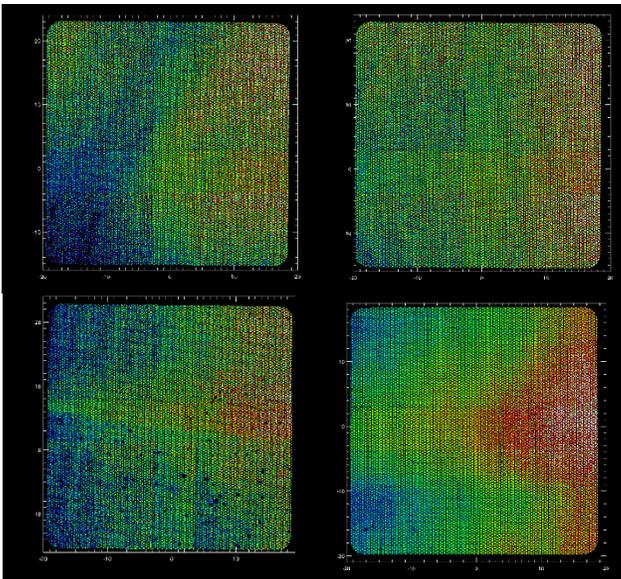
- source : lampe à décharge dans un gaz sous haute pression, alimentée par des gaz rares (Xenon, Krypton, Argon, Hélium). Spectre de raies
- Domaine spectral : 12 – 150 nm
- 2 réseaux toriques 950 tr/mm coating Au (12-50 nm) et 250 tr/mm coating Pt (50 – 150 nm)
- Résolution : sur 12 – 50 nm :  $\delta\lambda < 3 \text{ \AA}$ , sur 50 – 150 nm :  $\delta\lambda < 11 \text{ \AA}$
- Réflectomètre pour mesure d'échantillons en transmission et réflexion
- Relié à la cuve Neptune pour calibrer des sous-systèmes



- Filtres FSI
  - Mesure de transmission (réflectomètre)
  - Mesure d'homogénéité
- cameras de vol EUI
  - Étalonnage
  - flatfield

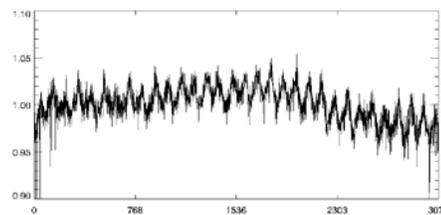
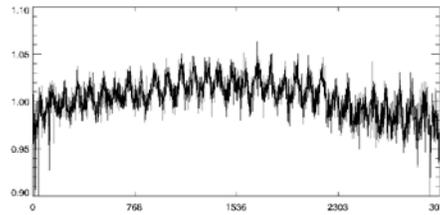
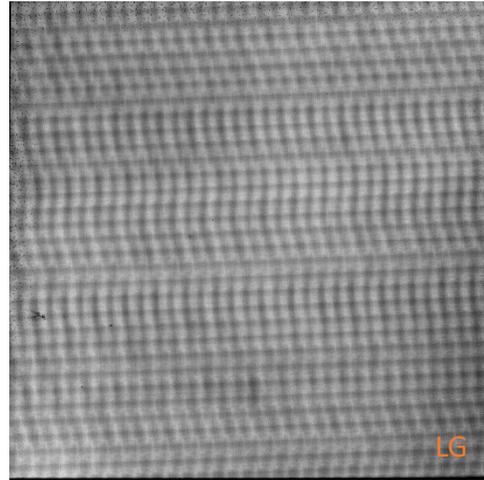
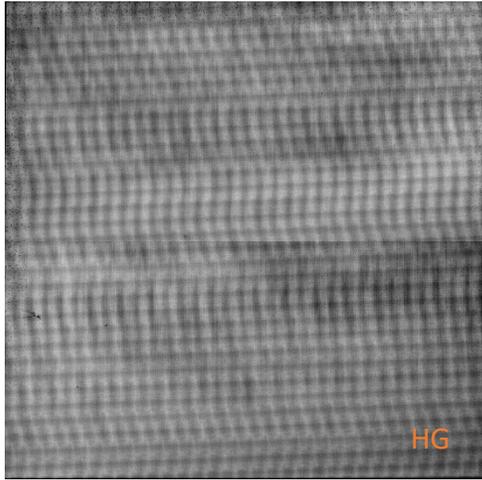


Comparaison mesures PTB, IAS et simulations



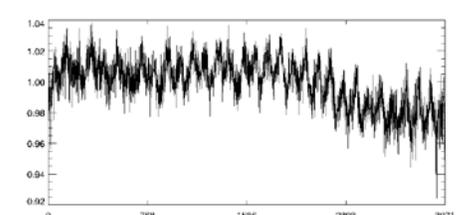
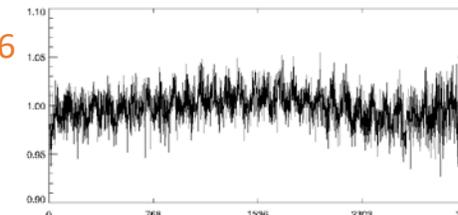
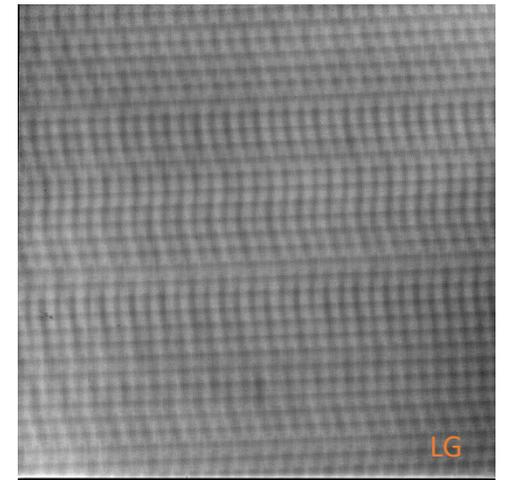
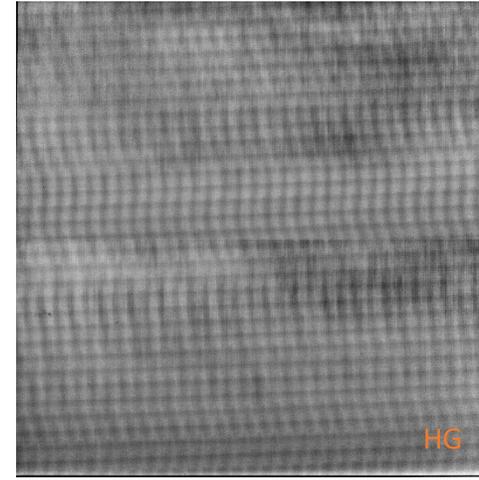
# L'instrument EUI : étalonnage des caméras de vol

FSI 304



Profils ligne 1536

FSI 174



Étalonnage effectué dans la cuve Neptune de la ligne UV, en utilisant la source en monochromateur

Flatfields réalisés en utilisant l'algorithme de Kuhn  
Utilisés dans le post traitement des images en vol



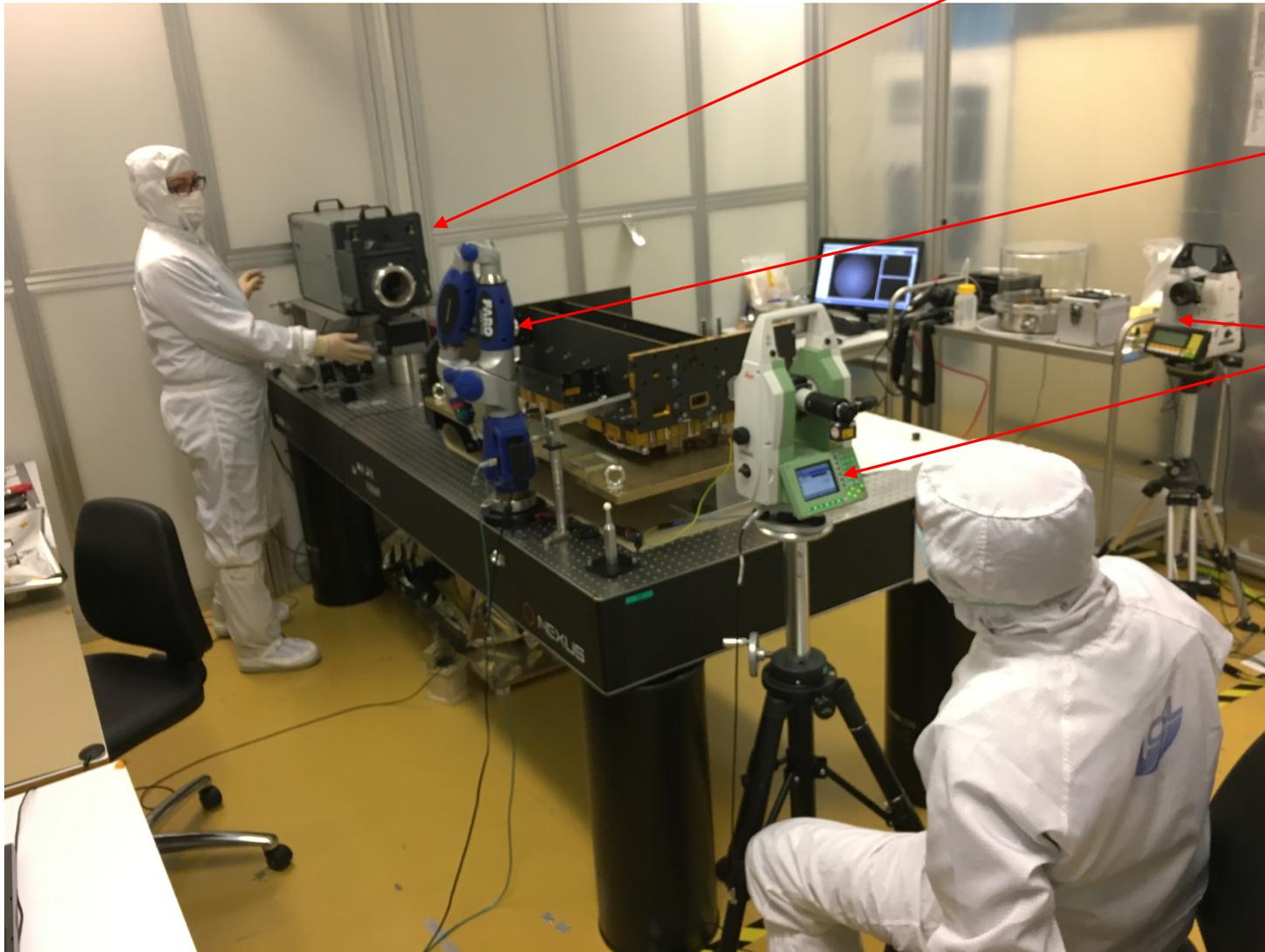
# Alignement du canal FSI



Interferomètre Zygo, mesures de front d'onde

Bras FARO, mesures 3D

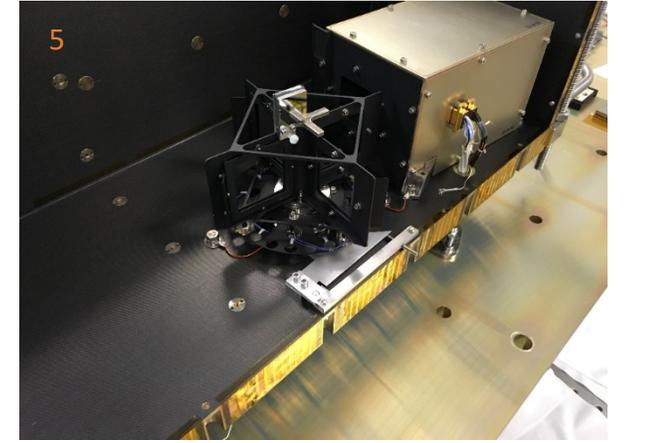
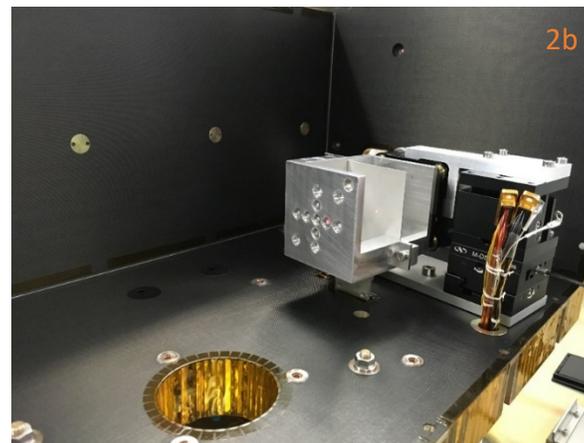
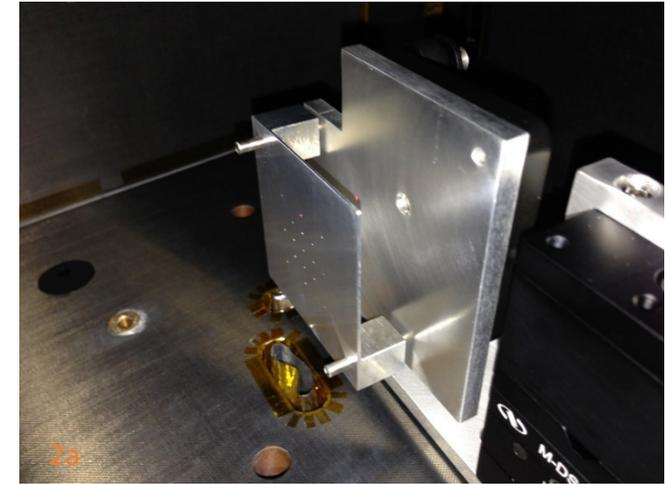
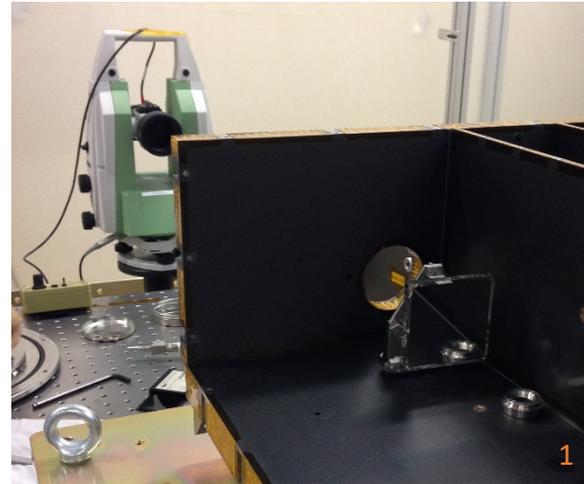
Théodolite, mesures d'angles



# Alignement du canal FSI

## Principales étapes de l'alignement

1. Alignement du miroir par rapport à l'axe mécanique (via le cube de référence) en vissant la face arriere dont l'orientation a été préalablement mesurée par rapport à la face optique, en utilisant un theodolite et un miroir de reference secondaire orienté comme le cube
2. Alignement du faux FPA sur l'axe et pour différents champs de vue
  - 2A vérification des champs avec la grille de pinholes
  - 2B vérification de la focalisation avec le réseau de microlentilles
3. Intégration du FPA
4. Intégration de la roue à filtres
5. Alignement de la roue à filtres par rapport à l'axe optique en utilisant un miroir sur la roue, un miroir de référence annexe reportant l'orientation du miroir primaire et le théodolite
6. Intégration des filtres sur la roue. Verification de l'alignement après les serrages

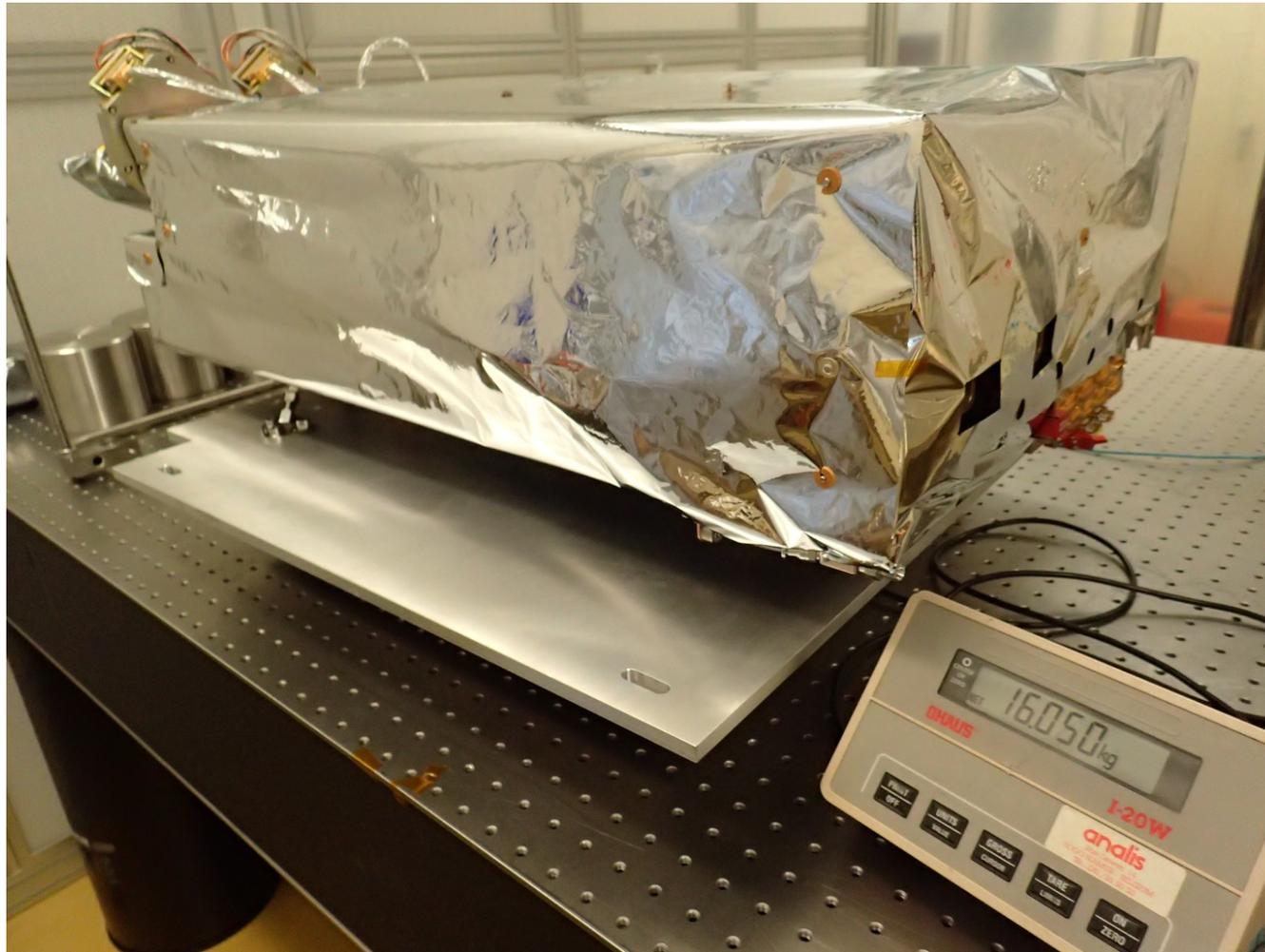


À la fin de l'alignement l'écart résiduel entre l'axe optique et l'axe mécanique est consigné

parameter	value
$\Delta\theta Y$ (horizontal)	+33"
$\Delta\theta X$ (vertical)	-1'02"
$\Delta\theta Z$ (roll)	+1"



# Pesée finale !

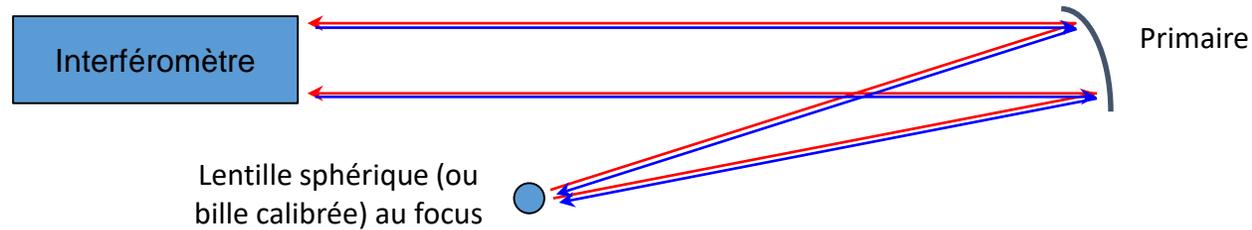


Non négligeable , cette valeur  
rentre dans les simulations  
mécaniques au niveau satellite

# Problème rencontré lors de l'alignement du canal HRI

12/2015

- première tentative d'alignement de HRI EUV QM (M1 + M2)
- Présence d'astigmatisme non expliqué dans les interférogrammes
- Foyer du primaire et foyer du télescope non situés aux positions théoriques prévues (position vs M1)



## Causes possibles identifiées

- Erreur d'alignement (positions & orientations of M1 & M2) → plusieurs tentatives d'alignement repartant de 0 avec plusieurs opérateurs
- Erreur de forme pour M1 et/ou M2 → rapidement écarté : substrat fabriqués par l'institut d'optique (R. Mercier) d'excellente qualité avec une métrologie importante
- Problèmes sur le système de mesure → réalignement de l'interferometre, mesure de référence connues
- Contraintes sur M1 et /ou M2 introduites par leurs montures

→ cause principale identifiée : contrainte importante dans le miroir primaire et dans une moindre mesure le secondaire

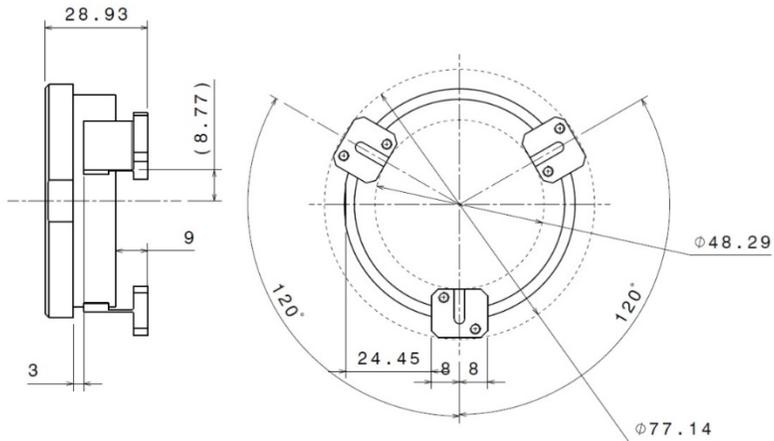
Origine :

- mauvais collage des lames flexibles qui servent d'intermediaire entre le miroir et la monture
- Composants hors spec non détectés

**Verifications métrologiques et à terme décision de décoller et recoller les miroirs en modifiant la procédure**



# Problème rencontré lors de l'alignement du canal HRI

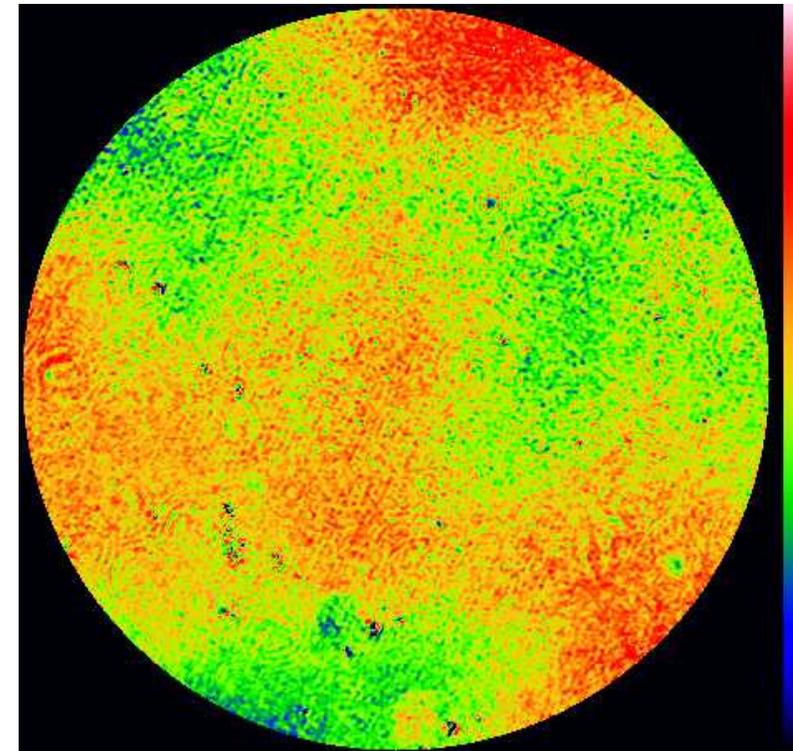


## Mesures effectuées sur le STM (plan)

Différence vis serrées vs desserrées

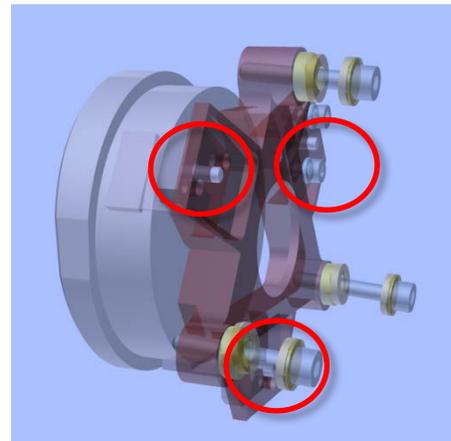
→ miroir monté en contrainte dans la montage

Dégradation de la qualité optique + modification de la valeur de l'hors axe



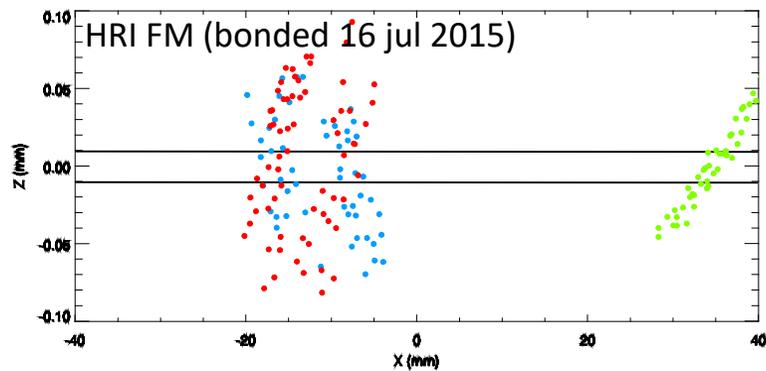
P-V 40 nm

Loosen these screws

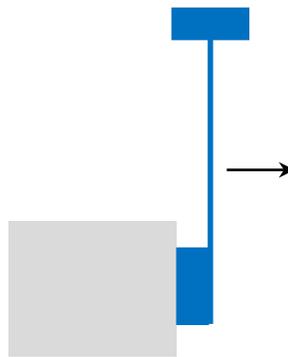
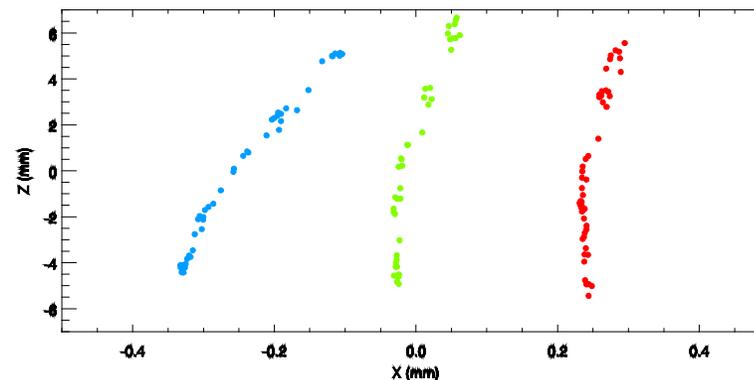
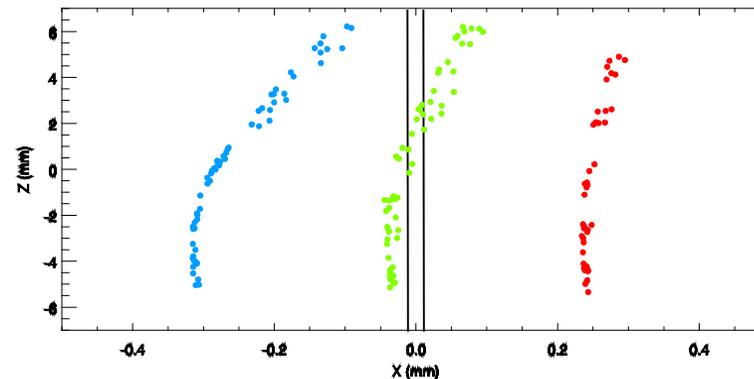
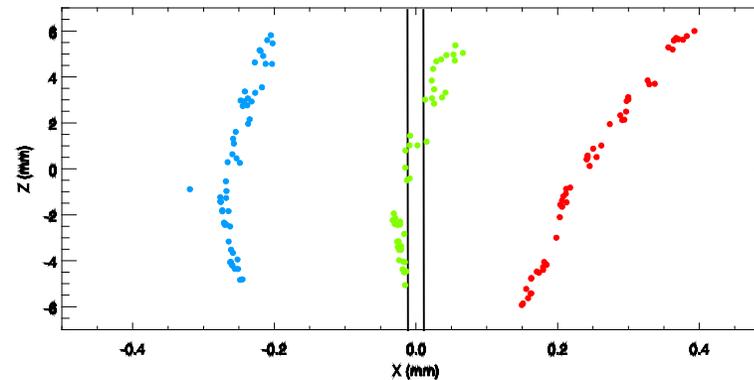
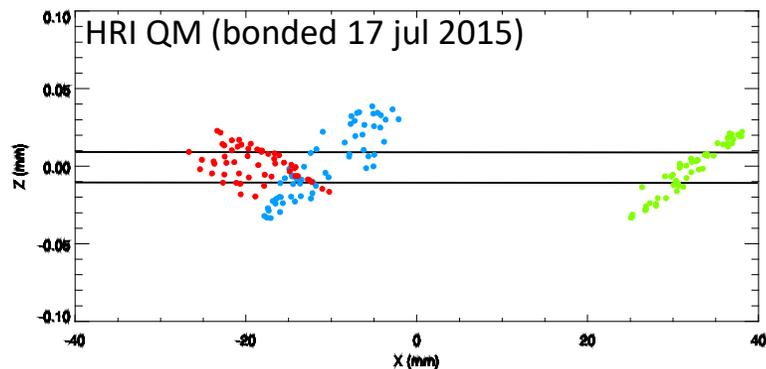
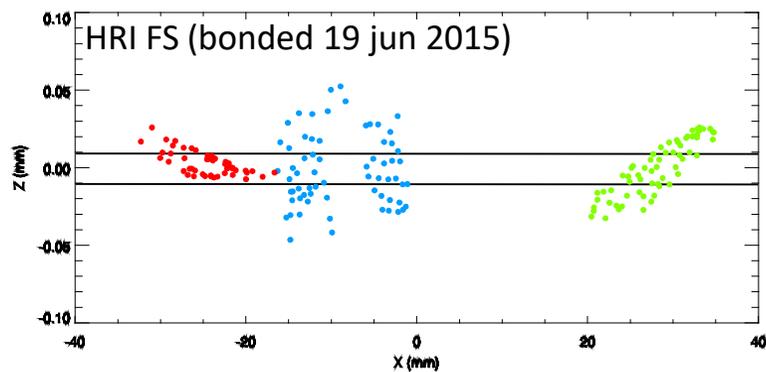


# Problème rencontré lors de l'alignement du canal HRI

Lames rendues hors spécifications et courbes par le microbillage précédent le collage



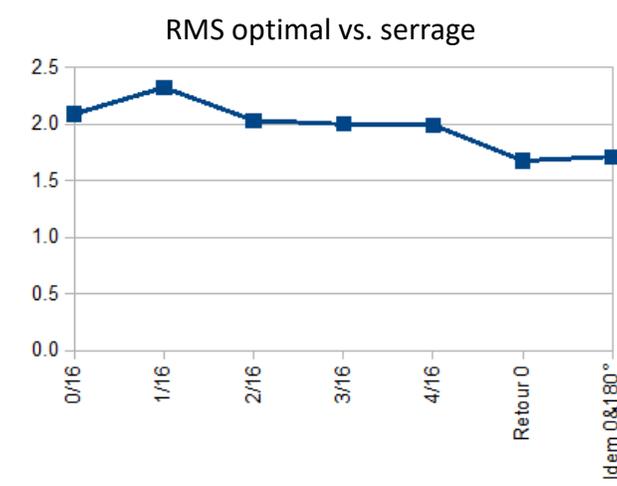
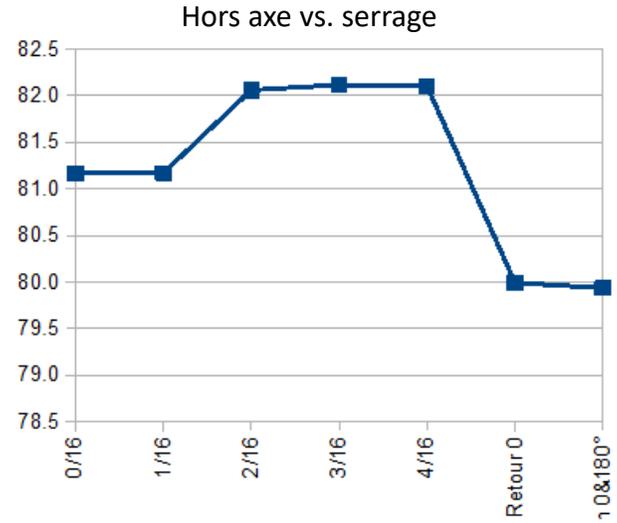
Tolerance  $\pm 0.01$  mm



# Mesure de M1 avant recollage



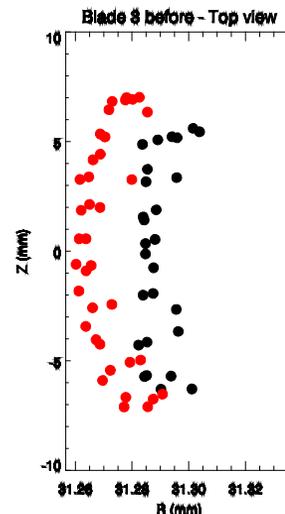
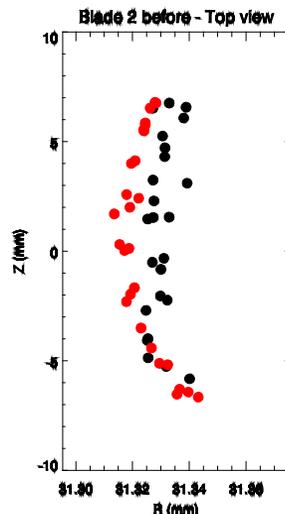
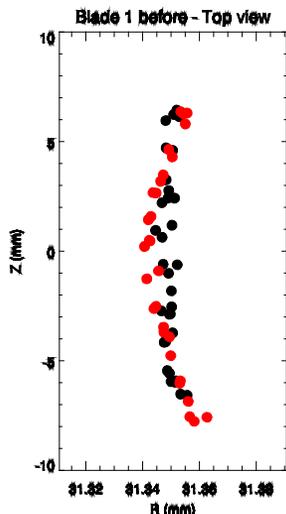
21/11/2016	6 vis des pattes resserrées de 1/16 de tour				Miroir SiC R~3500 mm à 10°. 2 orientations.
21/11/2016	6 vis des pattes resserrées de 2/16 de tour				Miroir SiC R~3500 mm à 10°. 2 orientations.
21/11/2016	6 vis des pattes resserrées de 3/16 de tour. Erreur possible : 4 pattes sur 6 ?				Miroir SiC R~3500 mm à 10°. 2 orientations.
21/11/2016	6 vis des pattes resserrées de 4/16 de tour.				Miroir SiC R~3500 mm à 10°. 2 orientations.
21/11/2016	Vis enlevées sauf une bloquée (vis extérieure de la patte du bas, en haut en position 180 degrés, à droite dans les images).				Miroir SiC R~3500 mm à 10°. 4 orientations.



# Après modification de la procédure de microbillage (pression moins forte) et de collage

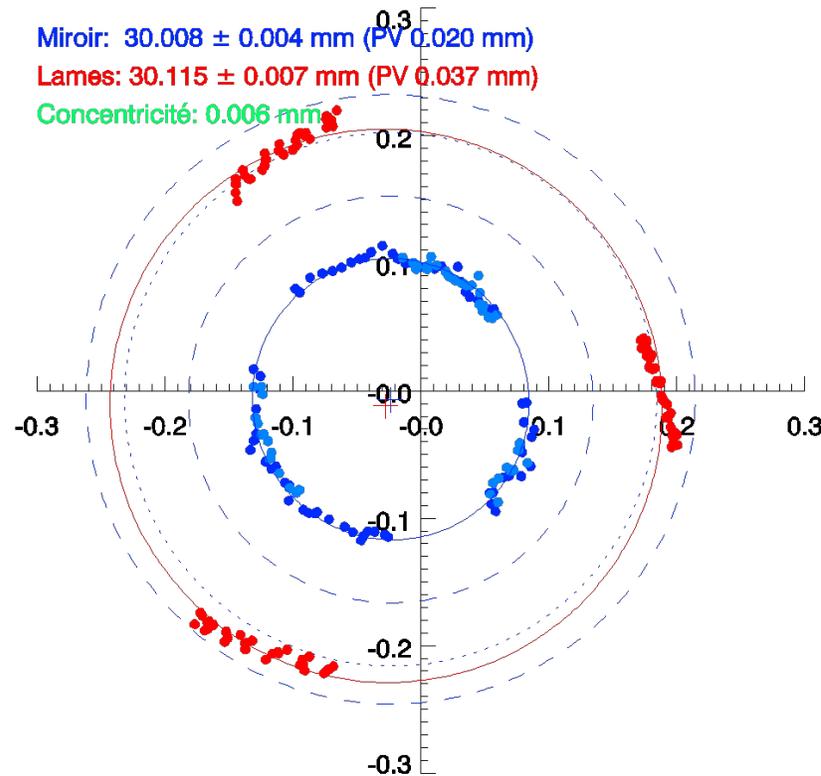
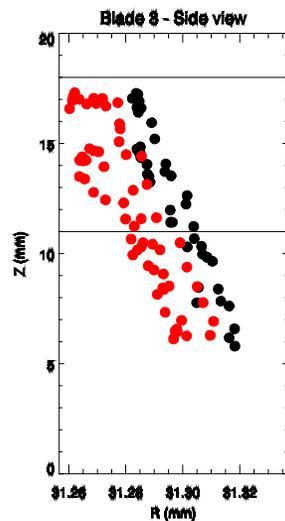
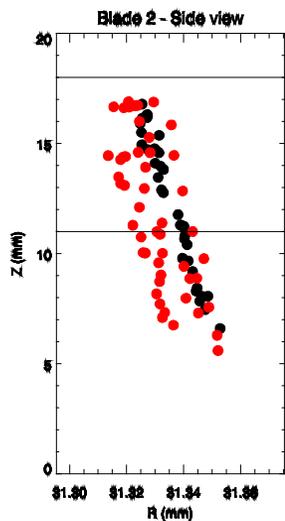
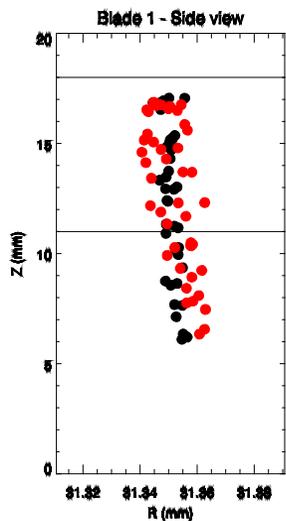


Vue de dessus  
(Points de patins uniquement)



Noir = Référence avant microbillage  
Rouge = Après collage

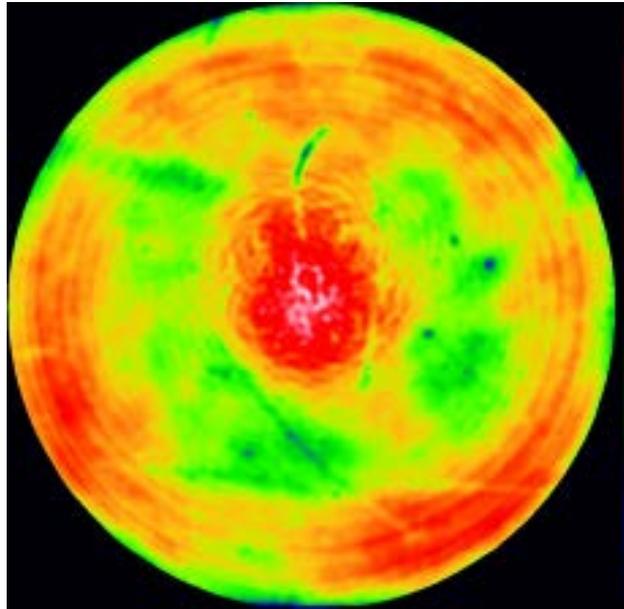
Vue de côté



# Secondaire après recollage



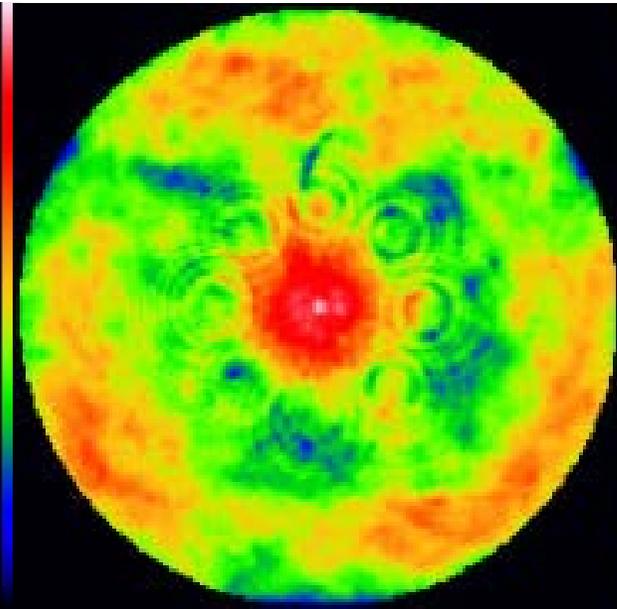
P-V 12 nm, 1.8 nm RMS



Hors axe 80.26 mm

Mesure IAS post intégration

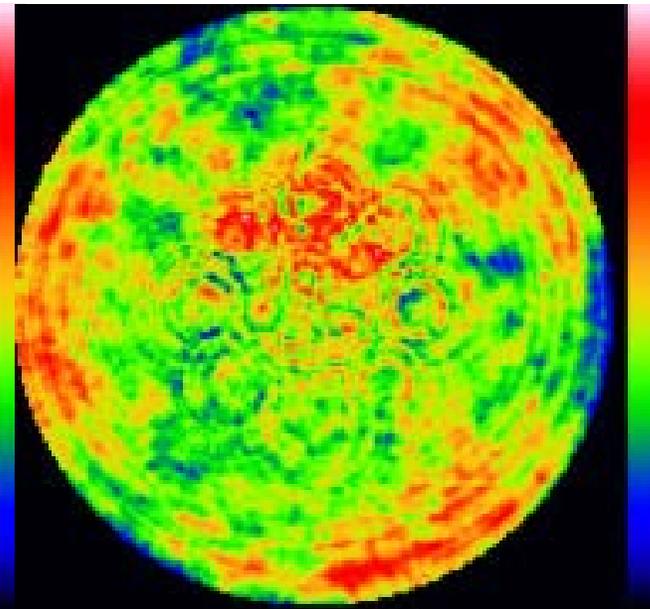
P-V 12 nm, 1.6 nm RMS



Hors axe 80.27 mm

Mesure IOGS substrat nu

P-V 7 nm, 0.9 nm RMS



Ecart entre les deux :  
acceptable pour la  
performance attendue



# Conclusions

- La métrologie est présente sous différentes formes dans toutes les étapes du développement instrumental
- Encore trop faiblement prise en compte, le développement et la disponibilité des outils métrologiques et la formation des opérateurs doivent être renforcée dès le début du développement instrumental
- L'impasse faite sur certaines vérifications métrologiques peut avoir un impact dramatique
- La pression planning est souvent à l'origine du manque d'exhaustivité dans la métrologie

Mais pour gagner quelques jours on peut finir par perdre plusieurs mois et réduire la performance instrumentale (pas dans le cas de Solar Orbiter)

