

Modélisation des performances des TMAs de l'instrument NIRSpec

François Riguet / Sagem REOSC

/ 31 mai 2012 /

Le James Webb Space Telescope (JWST)

→ Miroir primaire : \varnothing 6,5 m (Hubble : 2,4 m)

→ Principalement dédié à l'observation infrarouge : 0,6 – 28 μm

→ Participants : NASA, ESA, CSA

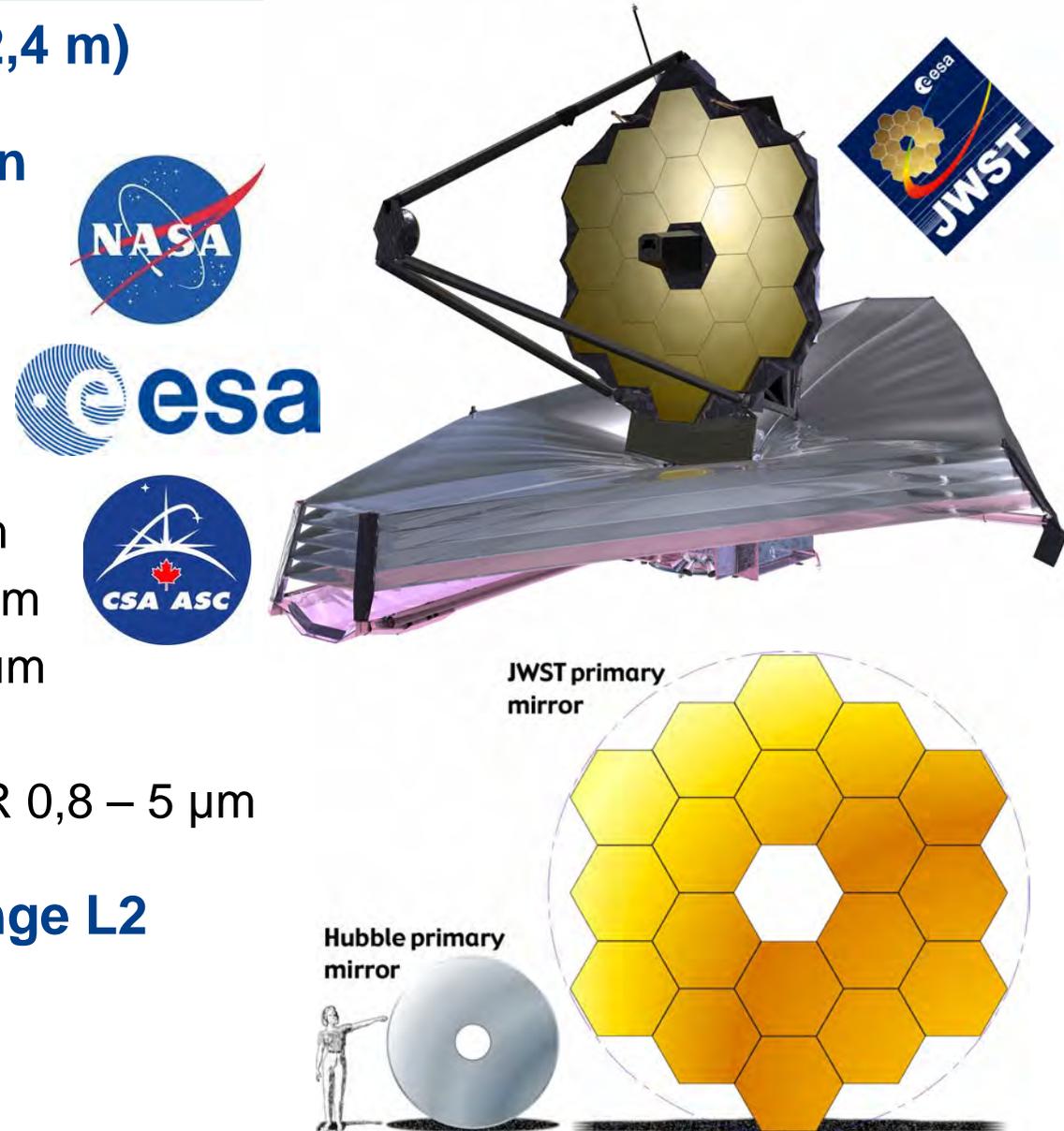
→ Instruments :

- MIRI : caméra et spectro IR 5 – 28 μm
- NIRCam : caméra proche IR 0,6 – 5 μm
- NIRSpec : spectro proche IR 0,6 – 5 μm
- FGS : senseur de guidage
- NIRISS : imageur et spectro proche IR 0,8 – 5 μm

→ En orbite autour du point de Lagrange L2

- Il y rejoindra Planck, Herschel, Gaia...

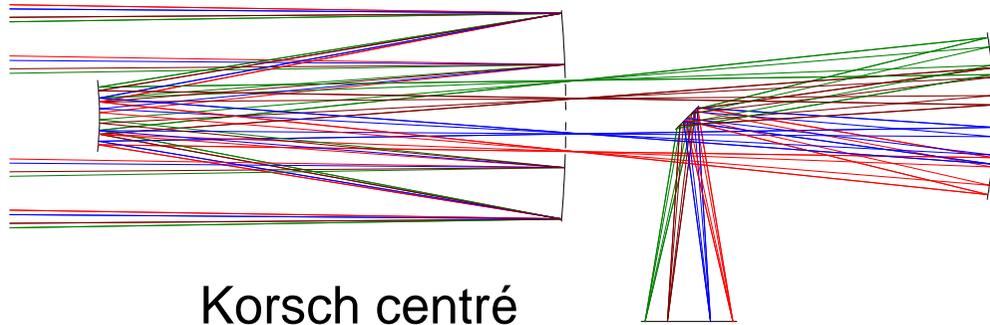
→ Lancement prévu en 2018



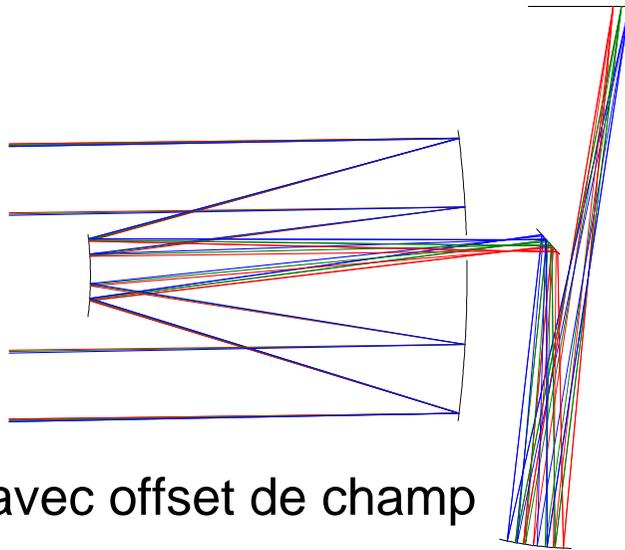
Un TMA c'est quoi ?

→ TMA = Three-Mirror Anastigmat

- Donc tous systèmes à 3 miroirs non plans, corrigés de l'astigmatisme
- Par abus de langage on désigne en général les systèmes sans obstruction, avec des miroirs hors d'axe (« Schiefspiegler »)



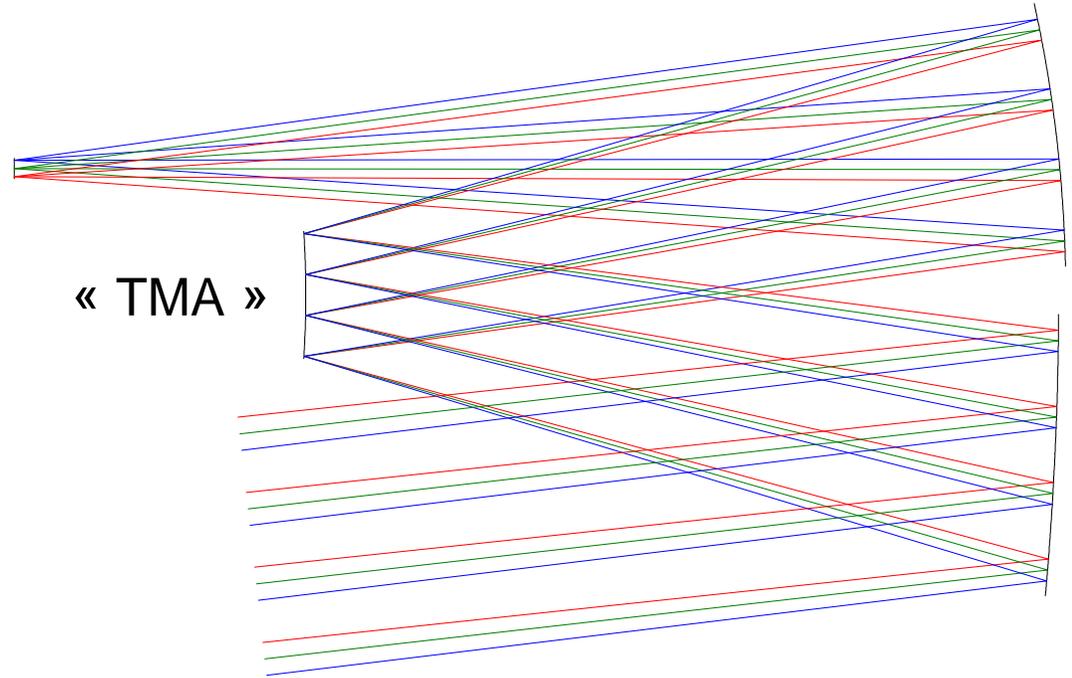
Korsch centré



Korsch avec offset de champ

Three-mirror anastigmats

« TMA »



L'instrument NIRSpec (Near InfraRed Spectrograph)

COM1 / COM2 : miroirs
d'extraction et de renvoi

COL TMA : collimateur

CAM TMA : caméra

FWA : roue à filtres
RMA : refocalisation

FOR TMA :
réducteur et
correcteur de
courbure de champ

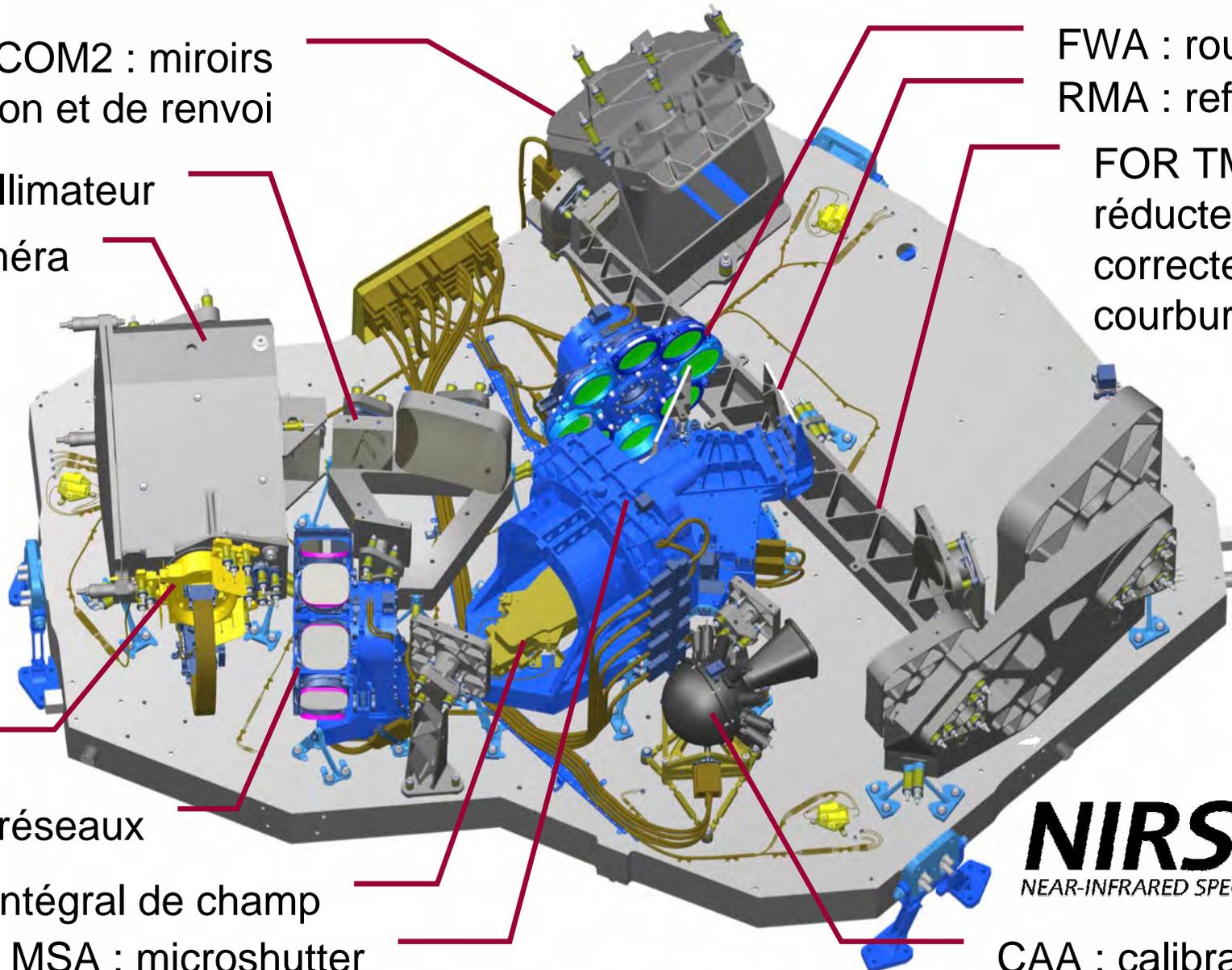
Détecteur

GWA : roue à réseaux

IFU : spectro intégral de champ

MSA : microshutter

CAA : calibration

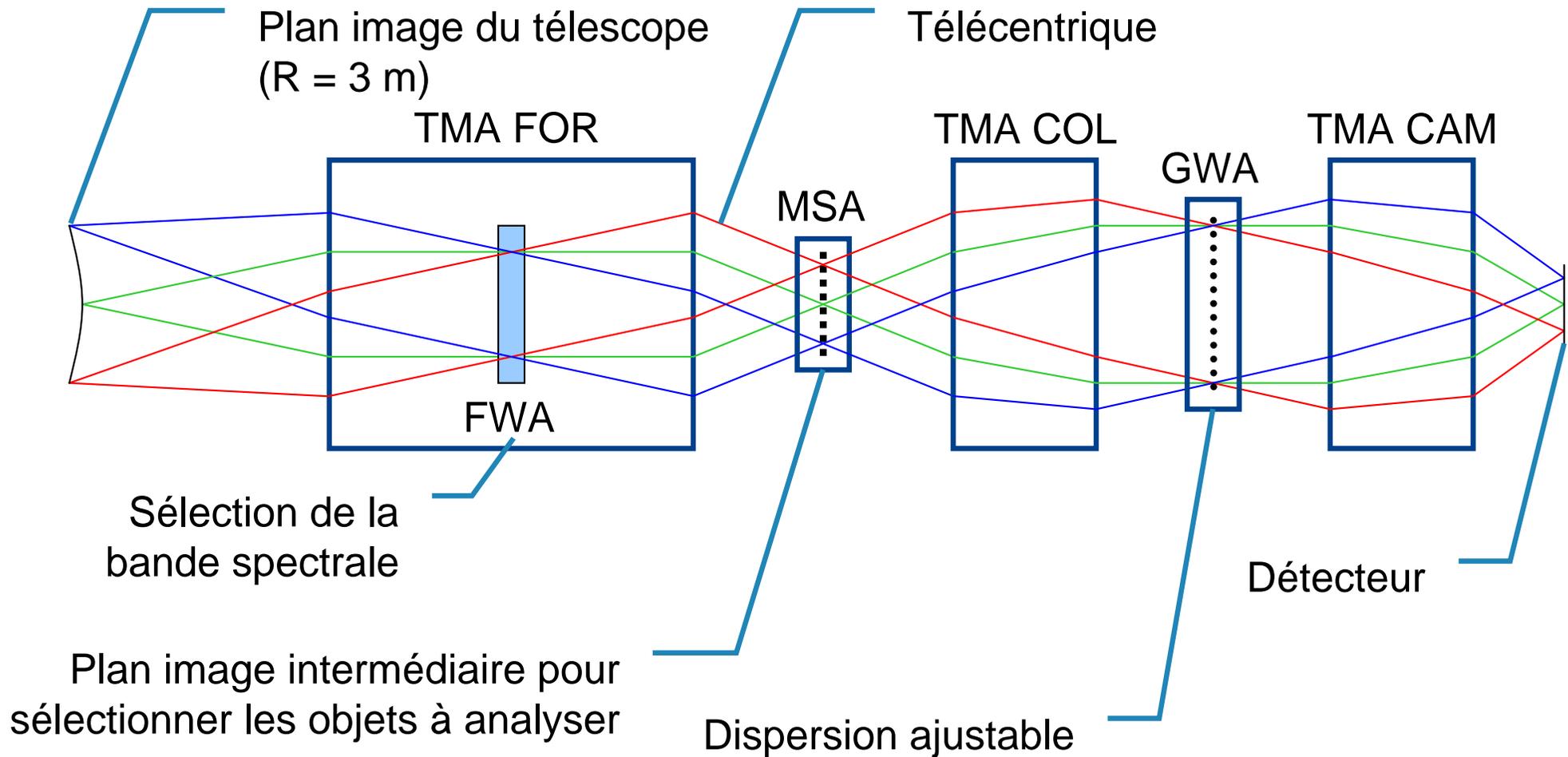


NIRSPEC
NEAR-INFRARED SPECTROGRAPH



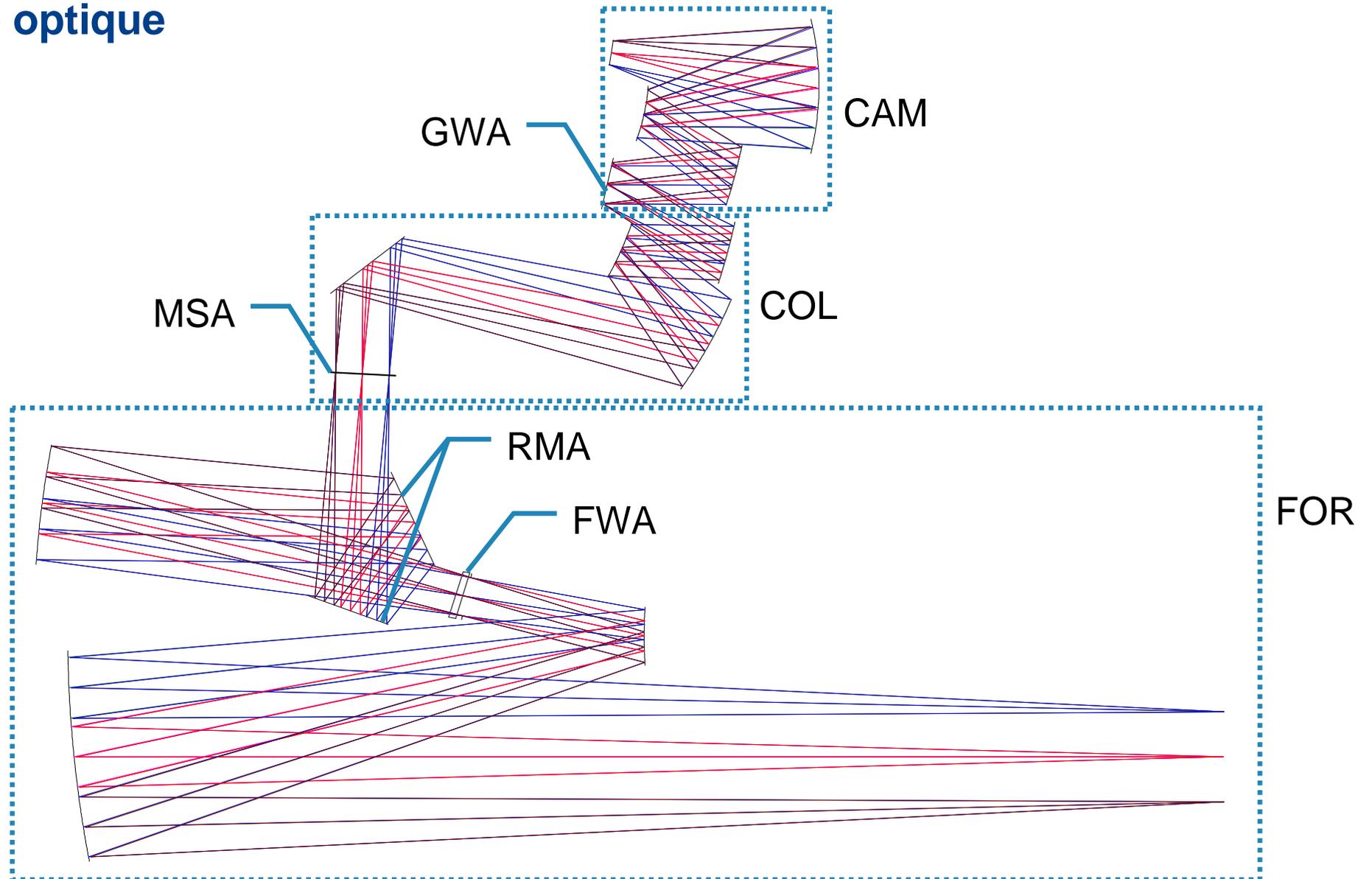
L'instrument NIRSpec

→ Principe



L'instrument NIRSpec

→ Modèle optique



L'instrument NIRSpec

→ En vrai cela donne ceci :



L'instrument NIRSpec

→ Conception « tout SiC »

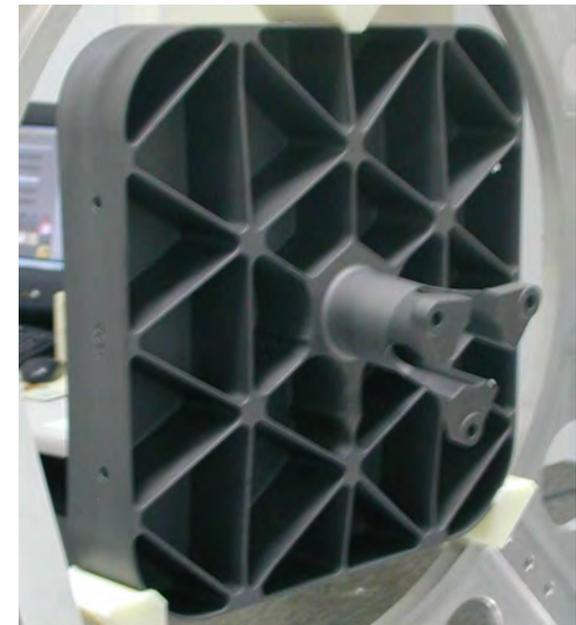
- Miroirs
- Structures des TMAs
- Plateforme

→ L'instrument fonctionne à 35 K

- Le SiC a une bonne conductivité thermique, facilitant la mise en température
- On obtient une homothétie de tout l'instrument → performances constantes

→ Polissage / intégration

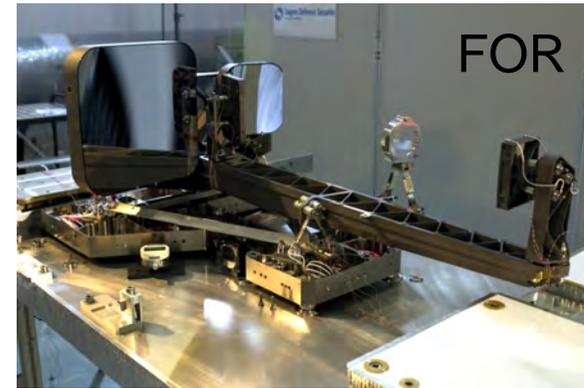
- Les miroirs arrivent préformés → gain de temps sur la mise en forme
- Le polissage du SiC brut est difficile, en particulier pour la rugosité → couche de SiC déposée par évaporation (CVD)
- Les miroirs sont naturellement allégés
- Les interfaces sont directement « implémentées » sur les miroirs → il faut aussi les polir !



L'instrument NIRSpec

→ Participants

- ESA : maîtrise d'ouvrage
- EADS Astrium GmbH : maîtrise d'œuvre
- Sagem REOSC :
 - Polissage des miroirs des TMAs et des miroirs plans
 - Traitement réfléchissant
 - Intégration et alignement des TMAs individuels
 - Tests en vibration
 - Tests cryogéniques (au CSL)
 - Modèles « as-built » pour le simulateur de performances



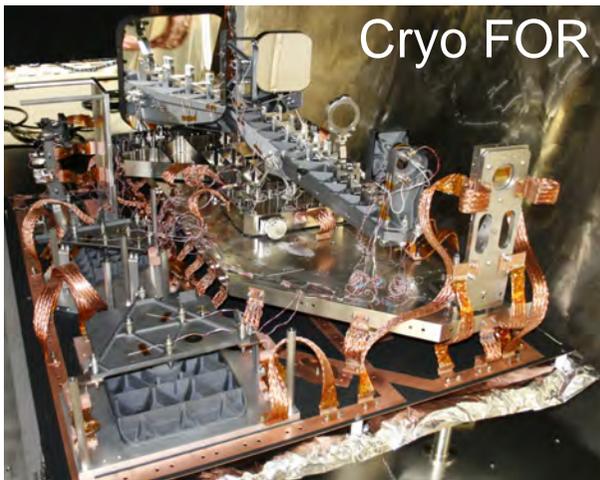
FOR



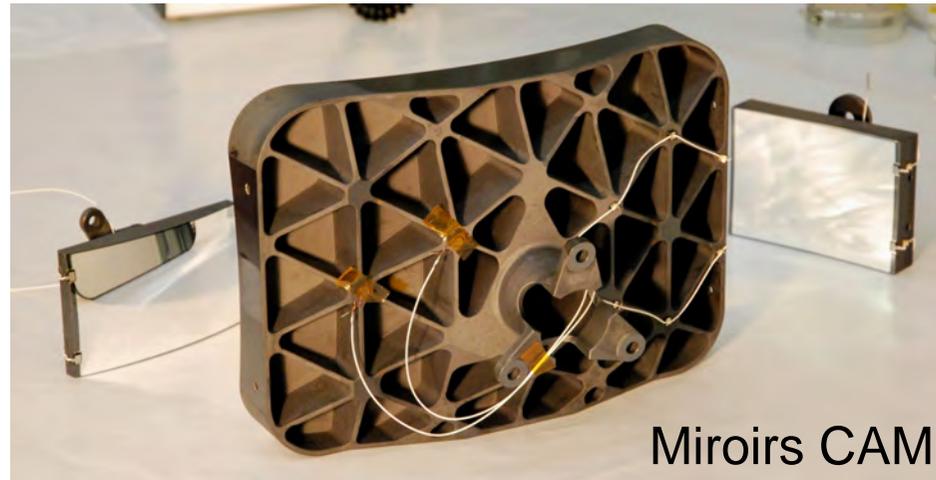
COL



CAM



Cryo FOR

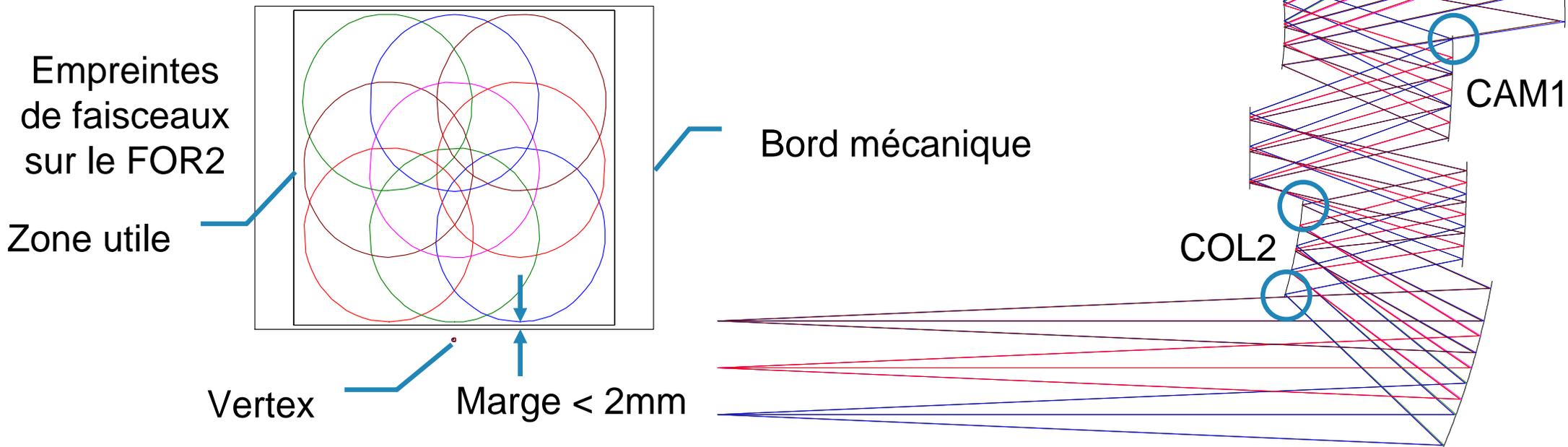


Miroirs CAM

Contraintes dues au vignettage

→ Contraintes d'encombrement très serrées

- Peu de marge entre les faisceaux et le bord mécanique des miroirs
- Déplacements limités lors de l'alignement
- Le vignettage rôde un peu partout...



→ Tous les miroirs sont des asphères hors-d'axe

- La précision de mesure et de réalisation des positions des vertex est critique
- Un vertex trop éloigné de sa position nominale peut aboutir à un déplacement important lors de l'alignement, et donc à du vignettage

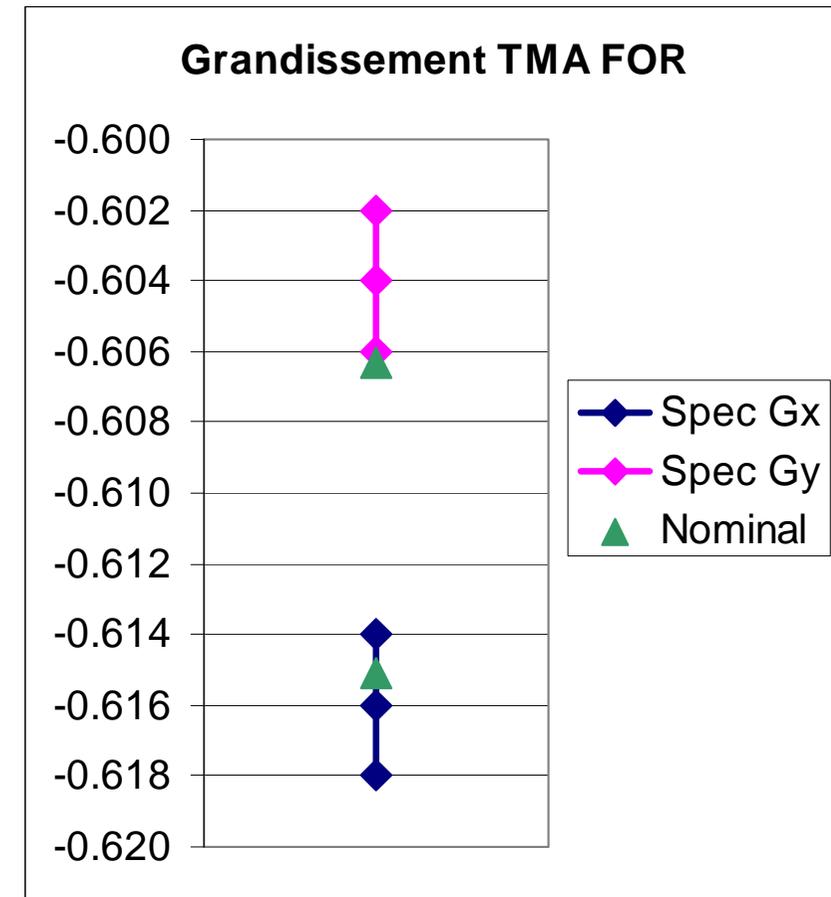
Modélisation des performances avant fabrication

→ Objectif : déterminer les tolérances de fabrication qui permettront d'atteindre les performances

- Rayons de courbure, constantes de conicité
 - Grandissement du TMA FOR
 - Focales des TMAs COL et CAM
- Positions des vertex
 - Courses d'alignement
 - Vignettage
- Défauts de forme
 - WFE
 - Energie encerclée

→ Exemple :

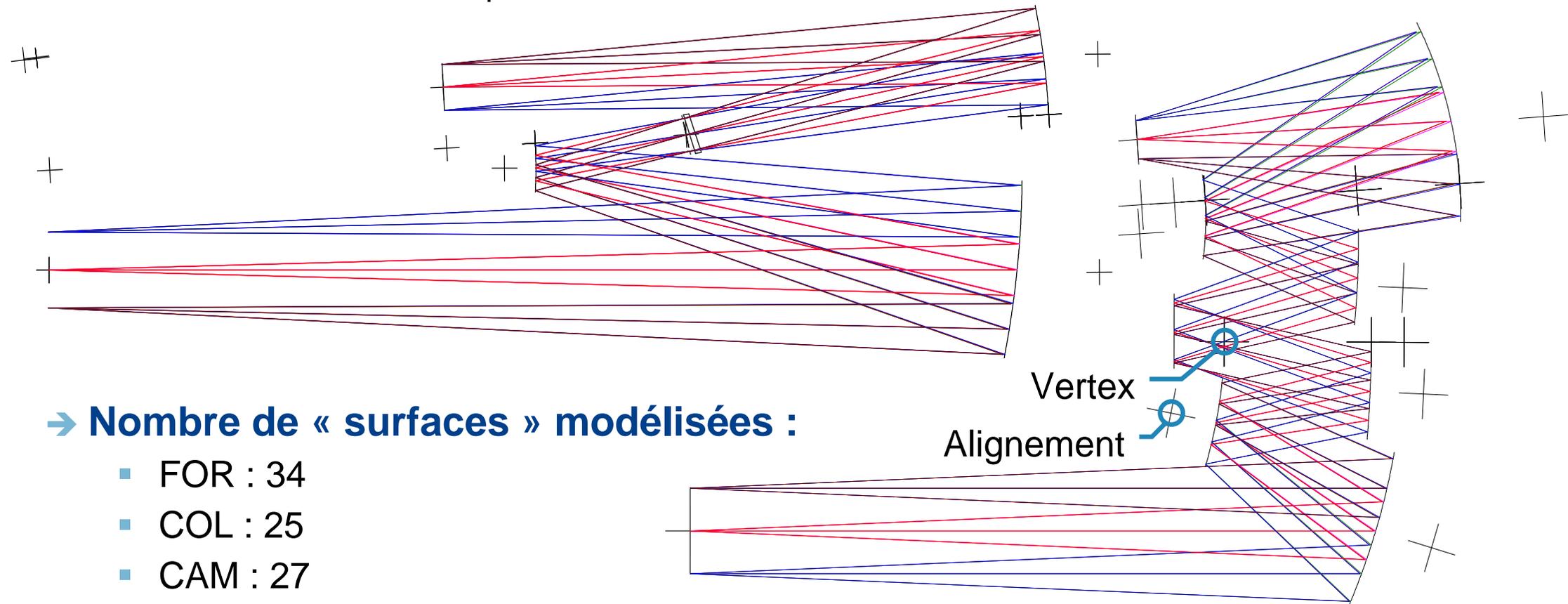
- le grandissement nominal est non-conforme (changement de spec tardif...), on veut s'assurer qu'il sera bien conforme après la fabrication des miroirs



Modélisation des performances avant fabrication

→ Les modèles tiennent compte :

- De la position du vertex par rapport à la zone utile
- Des interfaces d'alignement (plans de pose des miroirs)
 - Les tilts et translations dans le repère d'alignement ne sont pas équivalents à ceux donnés dans le repère du vertex



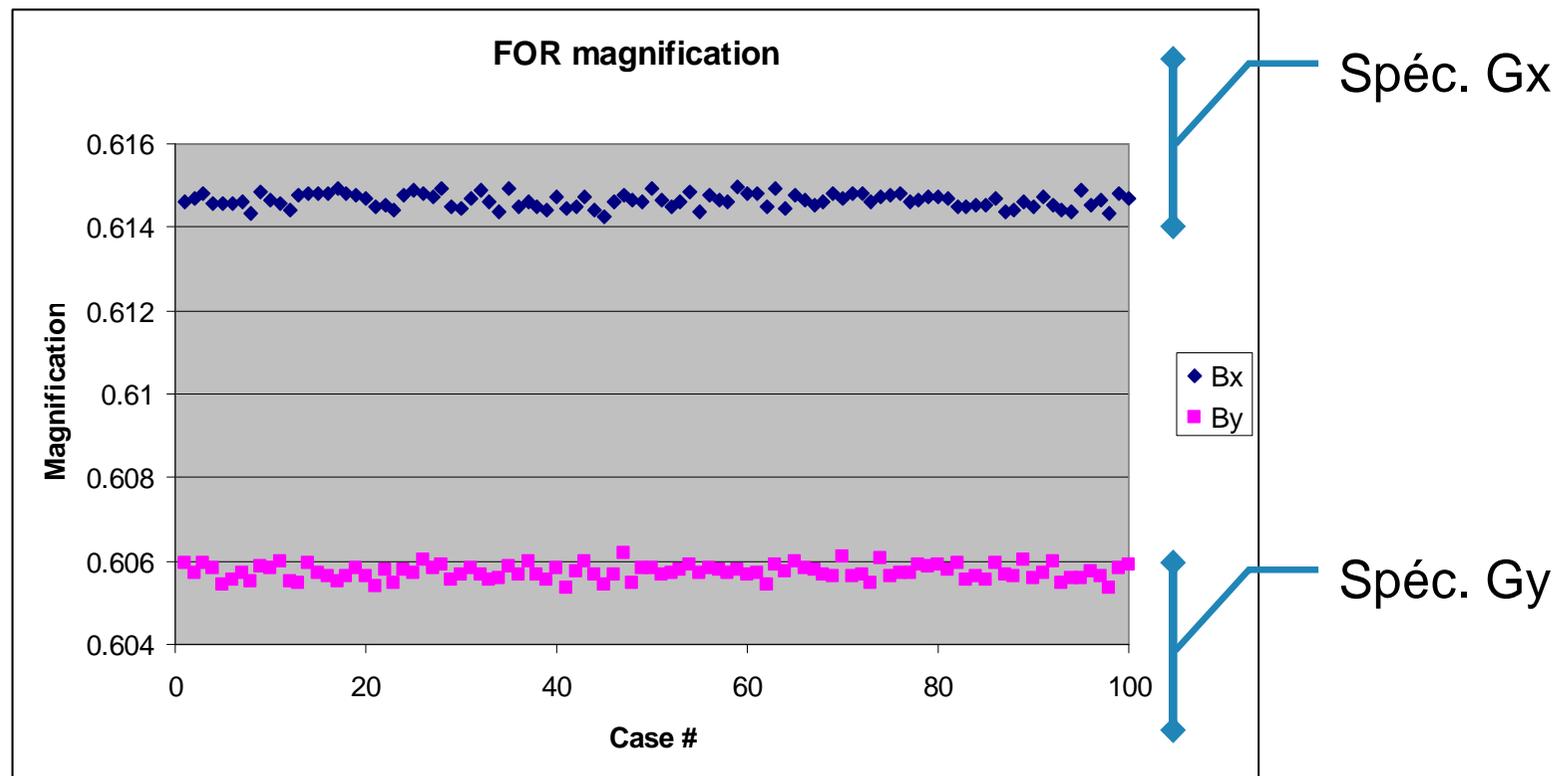
→ Nombre de « surfaces » modélisées :

- FOR : 34
- COL : 25
- CAM : 27

Modélisation des performances avant fabrication

→ Résultats

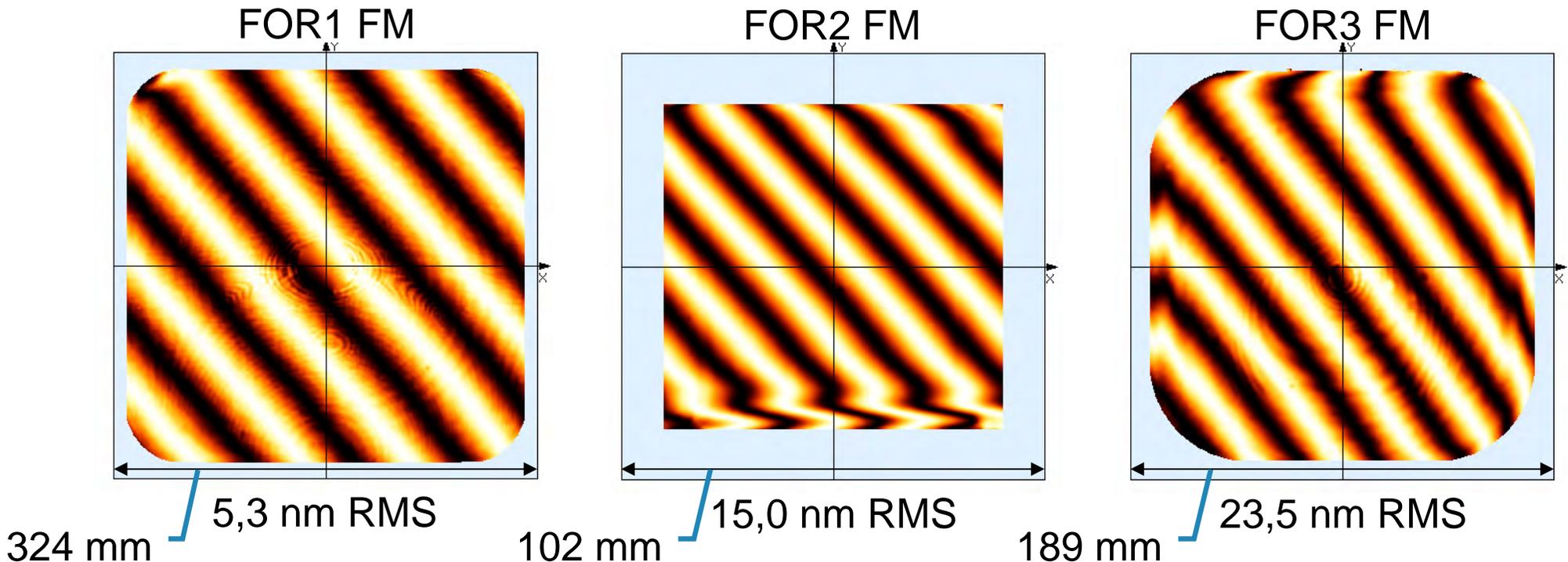
- On calcule l'impact des tolérances de fabrication sur différents paramètres : WFE, énergie encerclée, grandissement, vignettage...
- Exemple : grandissements selon X et Y du TMA FOR pour 100 cas aléatoires



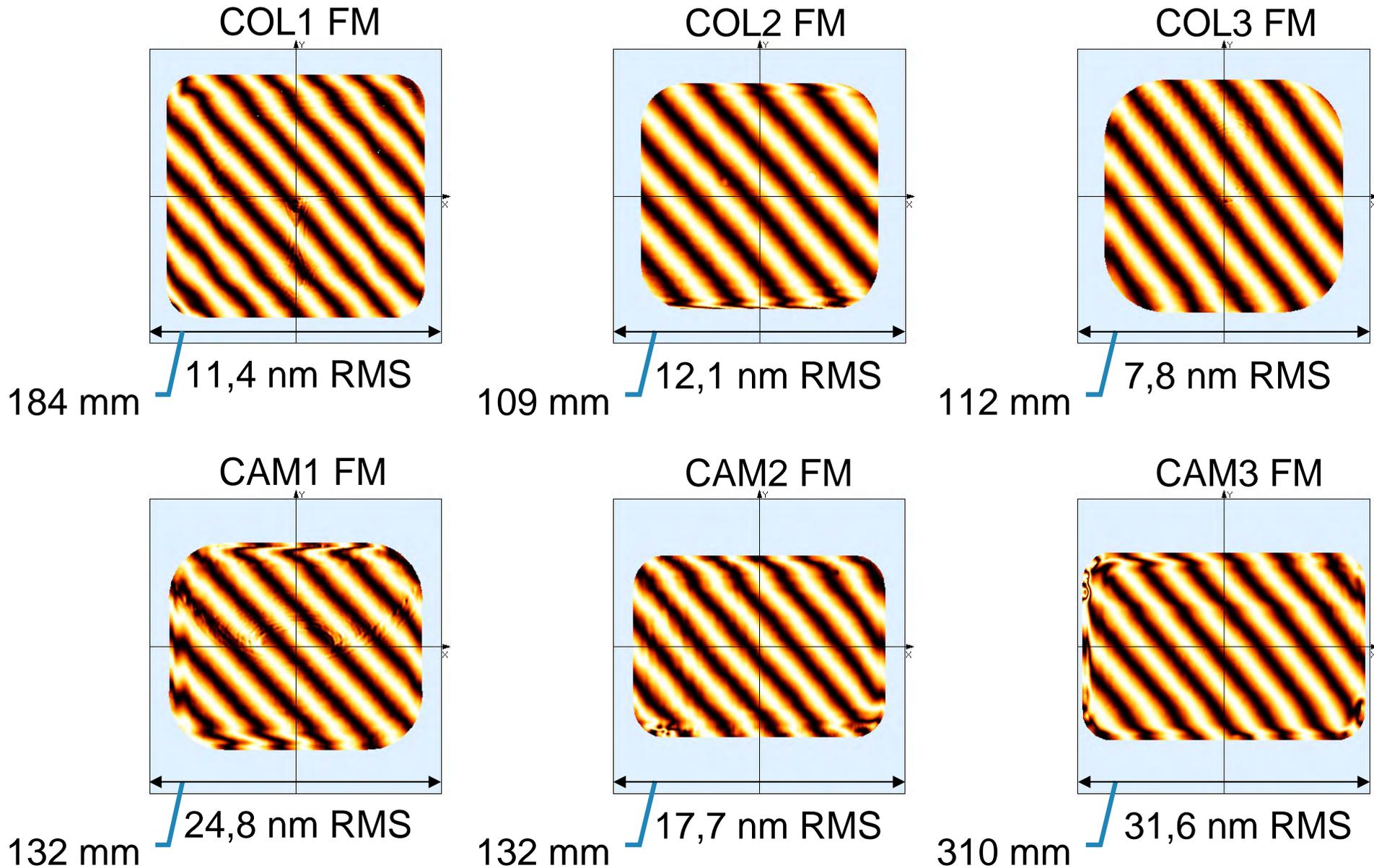
Modélisation des performances avant alignement

→ Objectif : vérifier que les miroirs fabriqués permettrons d'atteindre les performances

- On met à jour la formule nominale avec les paramètres mesurés :
 - Rayons de courbure
 - Constantes de conicité (les termes généralisés A_4 , A_6 ... restent à leurs valeurs nominales)
 - Positions et orientations des vertex par rapport aux repères des interfaces des miroirs
 - Cartes de polissage



Modélisation des performances avant alignement



Modélisation des performances avant alignement

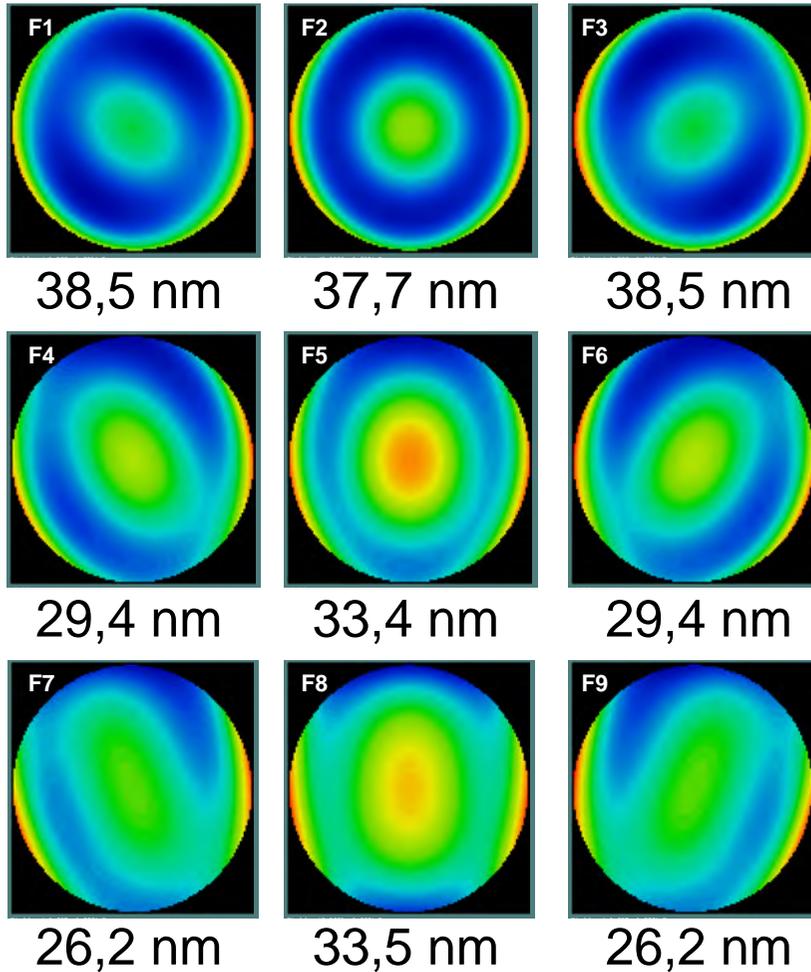
→ Méthode

- TMA FOR :
 - Simple optimisation avec contraintes sur le grandissement et la position image
- Les TMAs COL et CAM posent un peu problème :
 - Les deux TMAs ont été optimisés ensemble → les aberrations du CAM compensent celles du COL, on peut le constater sur la WFE nominale :
 - WFE max COL : 92 nm RMS
 - WFE max CAM : 85 nm RMS
 - WFE max COL-CAM : 65 nm RMS
 - Les deux TMAs présentent un terme de focus moyen dans le champ assez élevé
 - Problème : on aligne les TMAs séparément, pas de contrôle de l'ensemble COL-CAM
- Il faut conserver le terme de focus moyen pour ces deux TMAs
 - Optimisation avec Scilab
 - Convergence vers le design plutôt que vers une meilleure WFE
 - Méthode reprise pour simuler les performances après alignement (cf. planches suivantes)

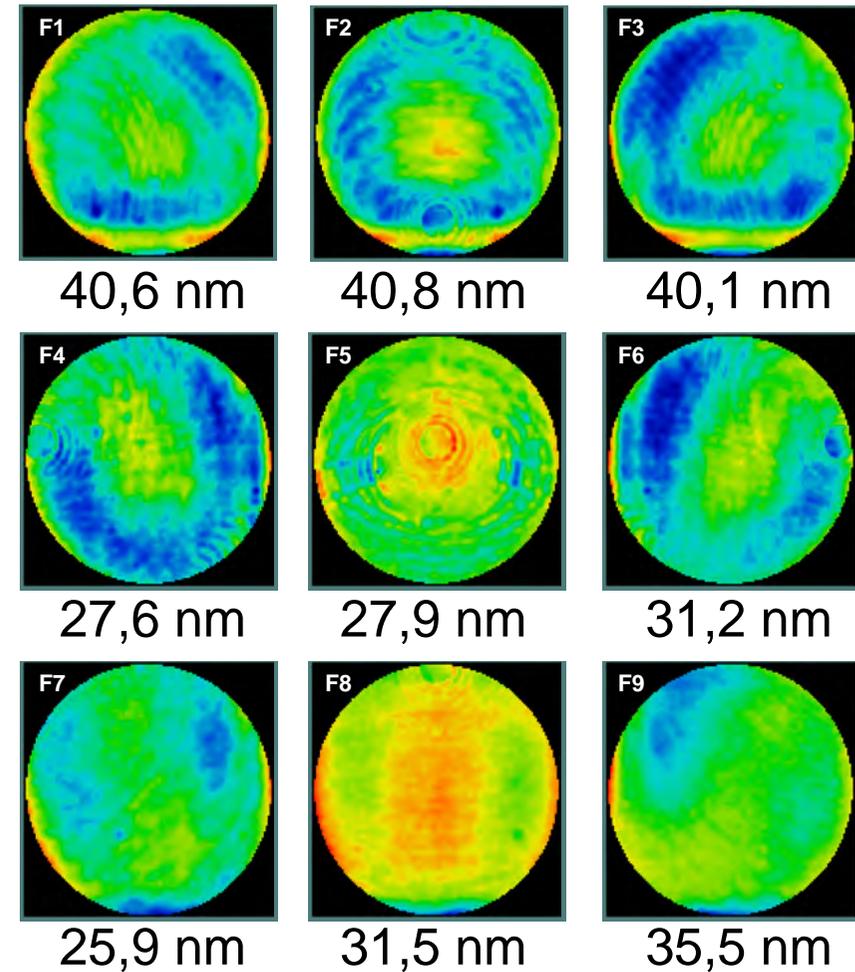
Modélisation des performances avant alignement

→ Résultats : cartes de front d'onde / WFE RMS

TMA FOR / design



TMA FOR FM / modèle de fin de fabrication



Modélisation des performances après alignement

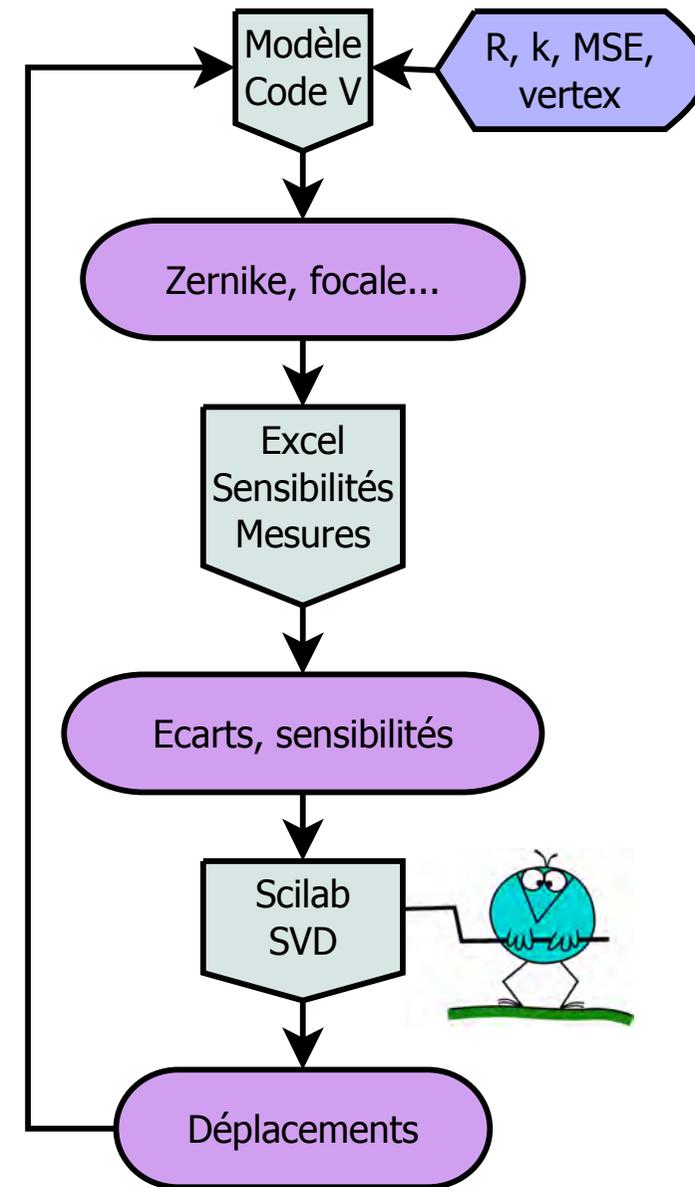
→ Une fois alignés, on cherche à modéliser les performances effectives des TMAs de manière à :

- Estimer les performances non-mesurées → énergie encerclée par exemple
- Connaître les performances en tous points du champ
 - 9 points de mesure WFE pour les TMAs FOR et COL
 - 15 points de mesures WFE pour le TMA CAM
- Simuler les performances de la combinaison des TMAs
 - Les TMAs COL et CAM sont spécifiés et mesurés séparément, le modèle COL+CAM permet de se faire une idée des performances de l'ensemble
- Servir de données d'entrée au simulateur de performances de l'instrument complet (IPS, développé par le Centre de Recherche Astronomique de Lyon)
 - Cf. thèse de Xavier Gnata, 2007, http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/32/14/33/PDF/These_XG.pdf

Modélisation des performances après alignement

→ Méthode

- On part du modèle de fin de fabrication
- On cherche à minimiser les écarts entre le modèle et les mesures
 - Coefficients de Zernike (Z3-Z8)
 - Grandissement (FOR)
 - Focale (COL et CAM)
 - Position du point central image (FOR)
 - Direction du faisceau central au niveau de la pupille (COL et CAM)
- Procédure relativement simple :
 - Calcul des performances avec Code V
 - Calcul des déplacements par SVD avec Scilab
 - Excel sert d'intermédiaire pour calculer les écarts entre le modèle et les mesures, et fournir les sensibilités à Scilab



Modélisation des performances après alignement

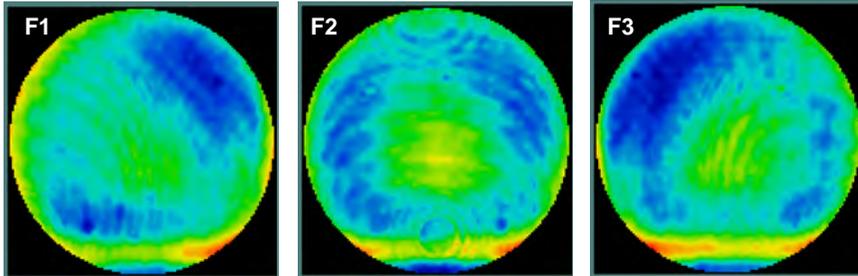
→ Résultats : FOR FM

- WFE

Modèle « as-built »



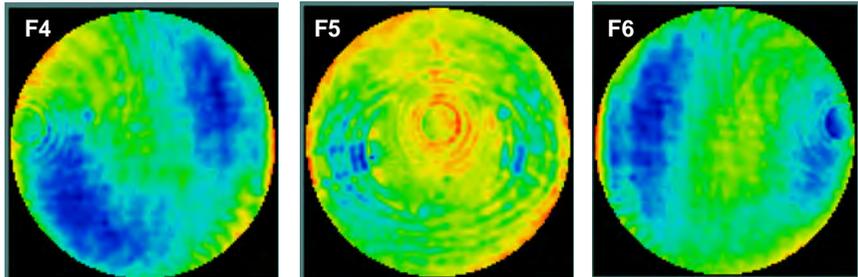
Mesure



47,8 nm

41,6 nm

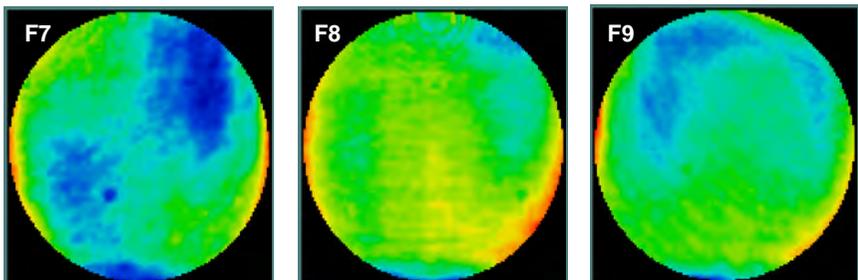
39,9 nm



35,3 nm

28,0 nm

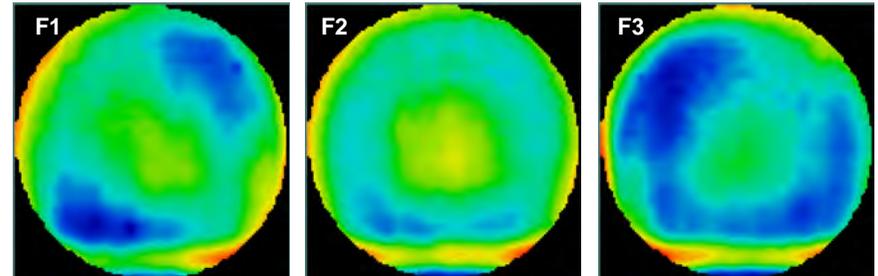
29,9 nm



37,4 nm

33,9 nm

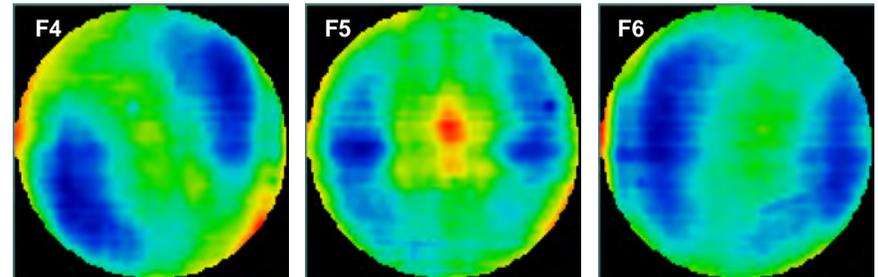
33,3 nm



45,1 nm

38,2 nm

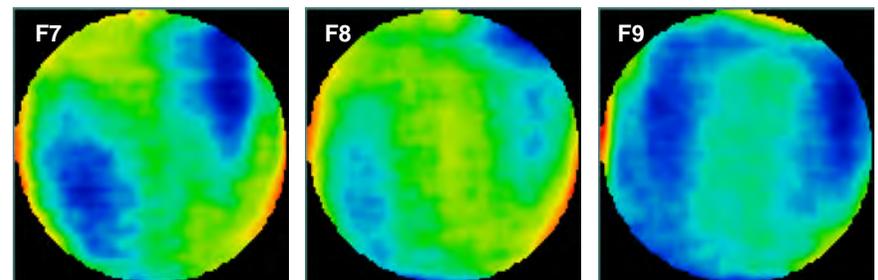
42,0 nm



31,1 nm

24,6 nm

28,5 nm



31,7 nm

28,0 nm

28,8 nm

Modélisation des performances après alignement

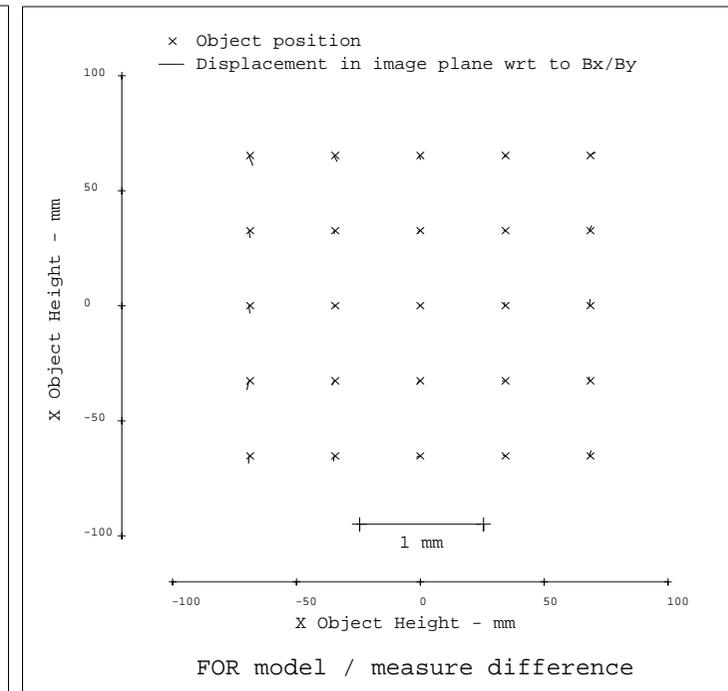
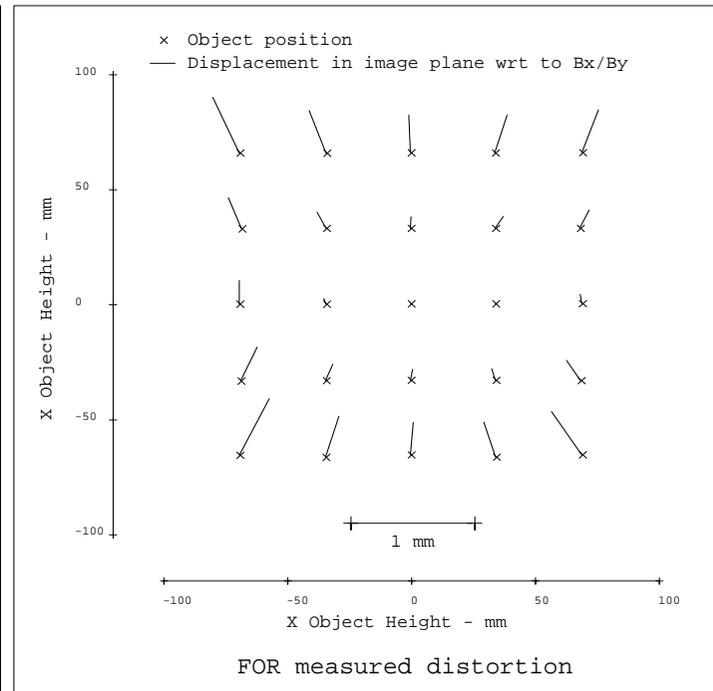
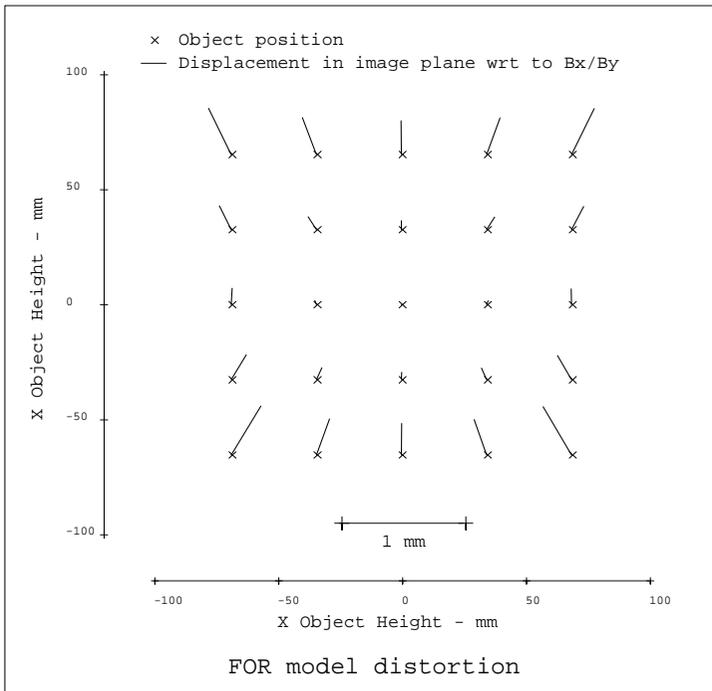
→ Résultats : FOR FM

- Distorsion

Modèle

Mesure

Différence



- Grandissement :

	Modèle	Mesure	Différence
Gx	0.6140	0.6140	0.0000
Gy	0.6049	0.6049	0.0000

- Centrage image :

	Modèle	Mesure	Différence	
Position X	0.005	0.006	-0.001	mm
Position Y	0.220	0.217	0.003	mm
Position Z	0.000	0.004	-0.004	mm

Modélisation des performances après alignement

→ Résultats : FOR FM

- PSF simulée

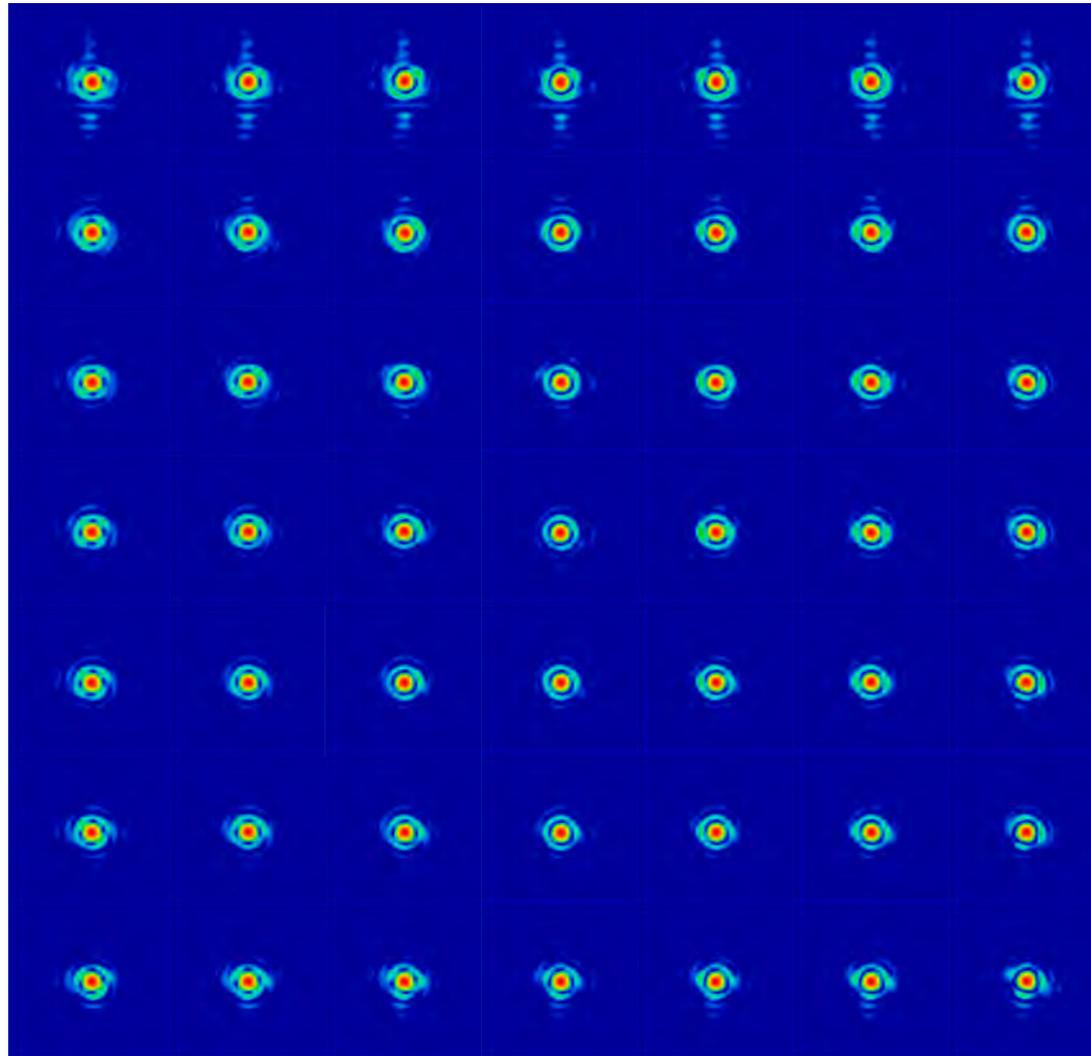
Champ image 84x80 mm²

$\lambda = 600 \text{ nm}$

Echelle d'intensité log

Echelle des PSF :


100 μm

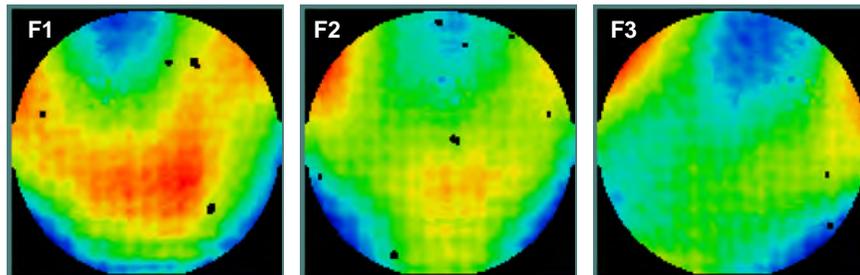


Modélisation des performances après alignement

→ Résultats : COL FM

- WFE (hors focus pour les cartes, focus compris pour les valeurs)

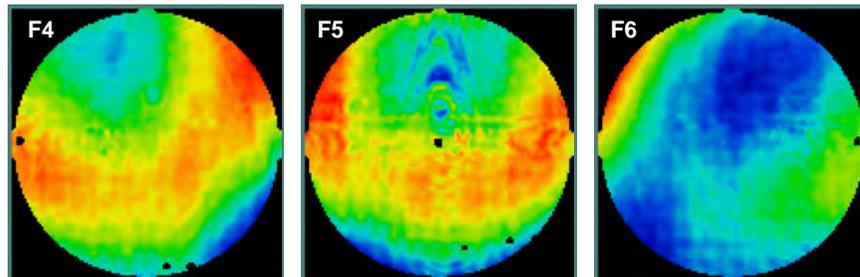
Modèle « as-built »



85,7 nm

73,5 nm

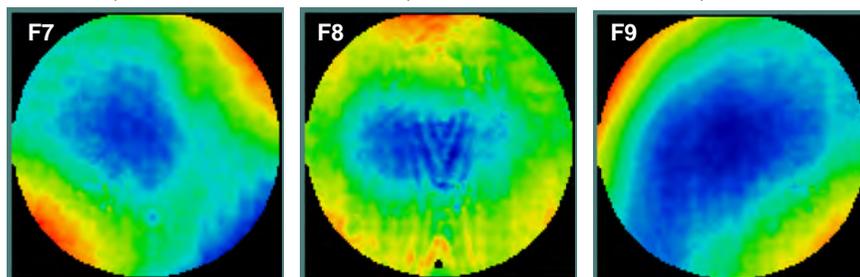
67,5 nm



71,8 nm

57,8 nm

78,7 nm

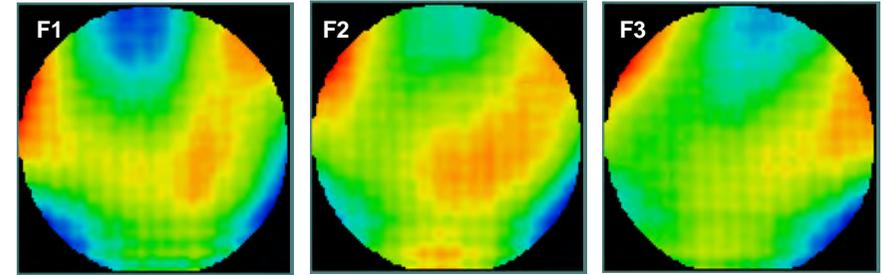


80,1 nm

58,8 nm

129,3 nm

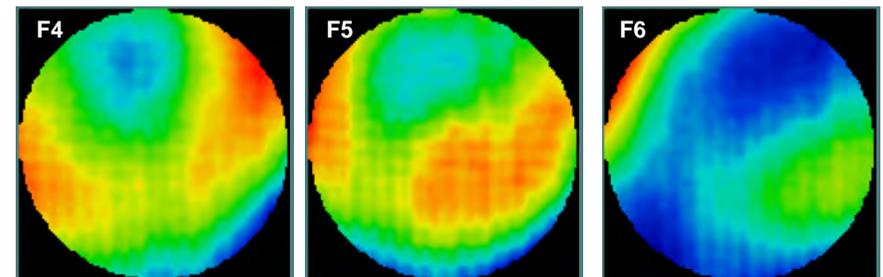
Mesure



81,4 nm

76,1 nm

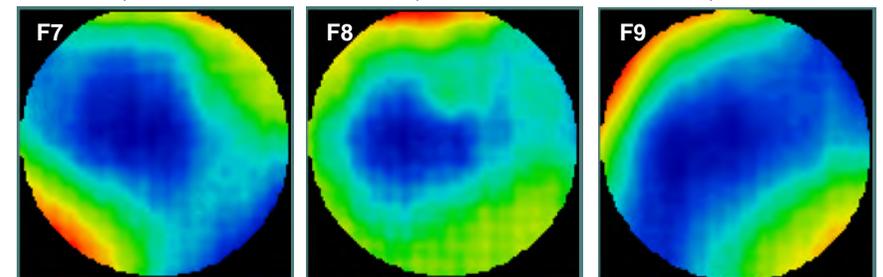
76,9 nm



73,9 nm

60,3 nm

82,6 nm



91,3 nm

68,0 nm

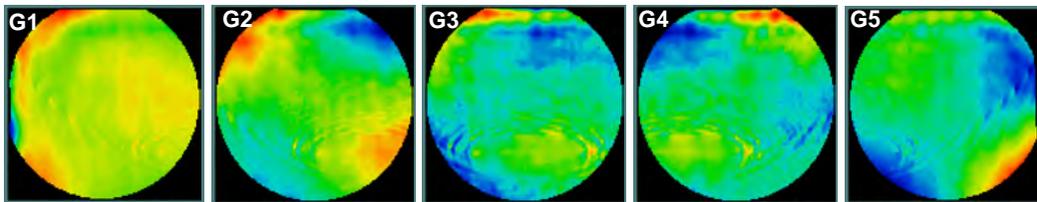
123,8 nm

Modélisation des performances après alignement

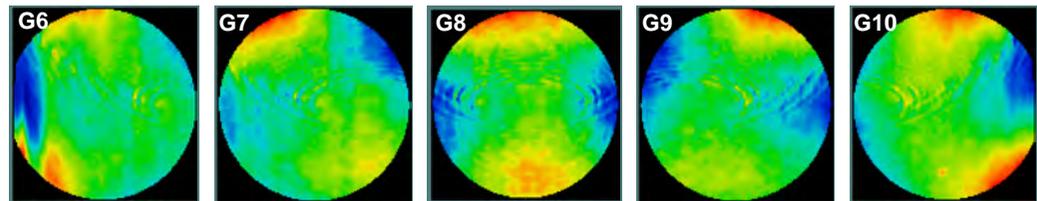
→ Résultats : CAM FM

- WFE (hors focus pour les cartes, focus compris pour les valeurs)

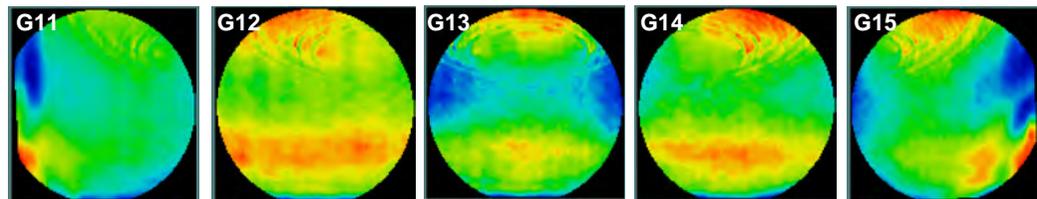
Modèle « as-built »



105,0 nm 101,9 nm 123,5 nm 147,4 nm 173,2 nm

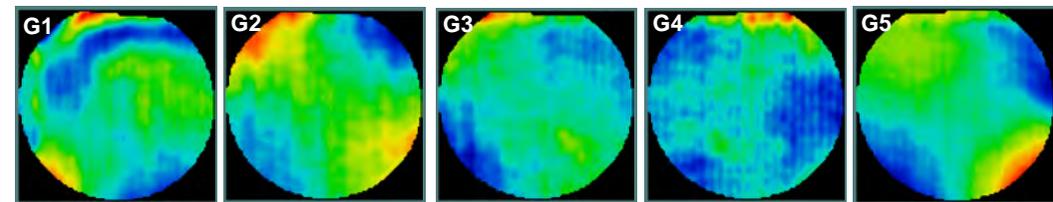


73,5 nm 91,7 nm 138,9 nm 166,7 nm 198,9 nm

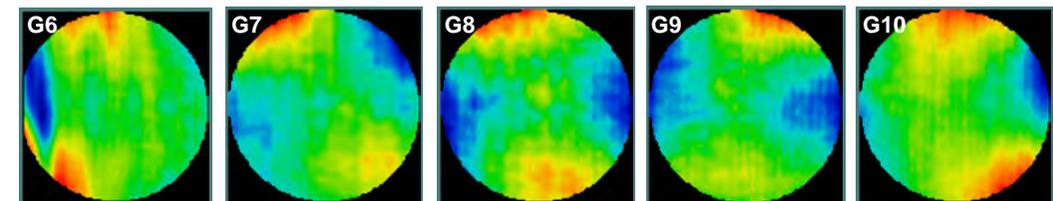


105,7 nm 79,6 nm 150,4 nm 160,2 nm 221,6 nm

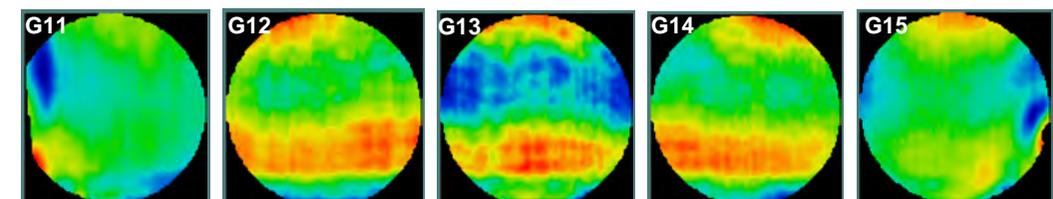
Mesure



95,5 nm 94,8 nm 135,8 nm 171,5 nm 173,2 nm



81,8 nm 95,0 nm 157,7 nm 180,1 nm 166,2 nm

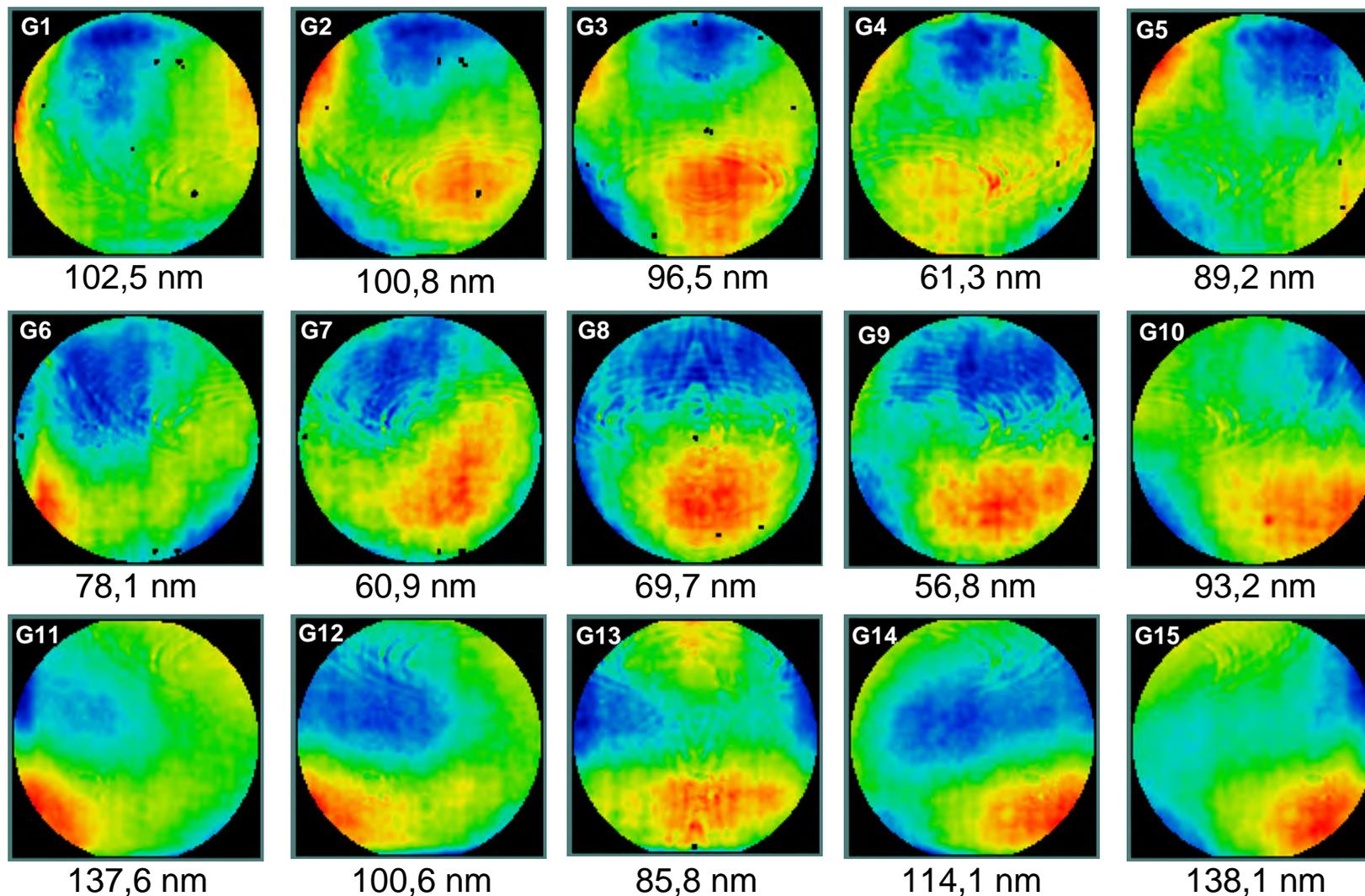


94,3 nm 93,0 nm 167,1 nm 167,5 nm 196,3 nm

Prédiction des performances

→ Modèle COL-CAM

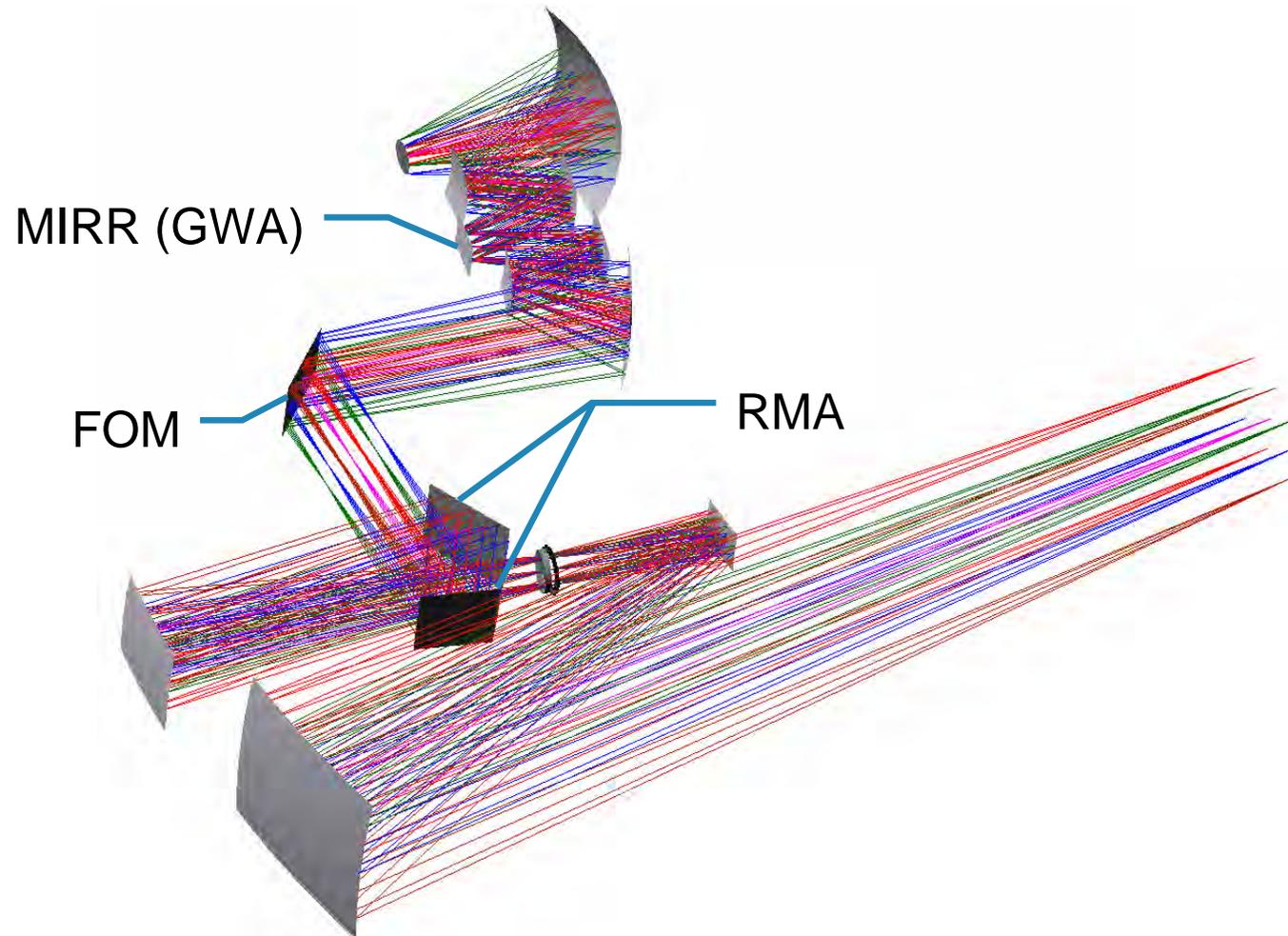
- Prédiction des performances de l'ensemble COL-CAM (spec < 140 nm RMS)



Prédiction des performances

→ Modèle FOR-COL-CAM

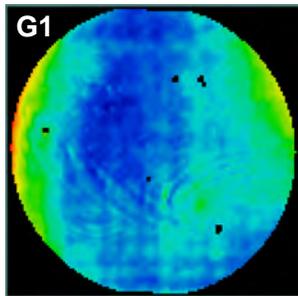
- Les miroirs plans (RMA, FOM) et le MIRR (= réseaux du GWA) sont ici considérés comme parfaitement plans



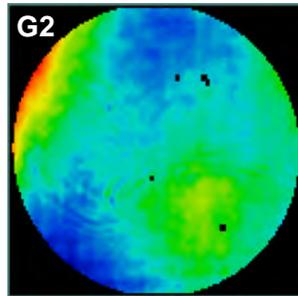
Prédiction des performances

→ Modèle FOR-COL-CAM

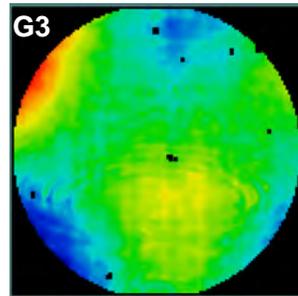
- Prédiction des performances de l'ensemble FOR-COL-CAM (hors miroirs plans)



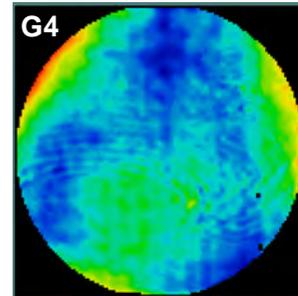
96,3 nm



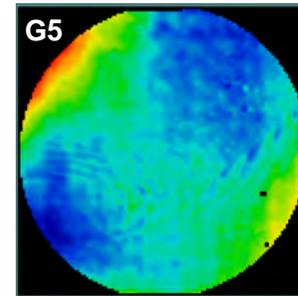
105,3 nm



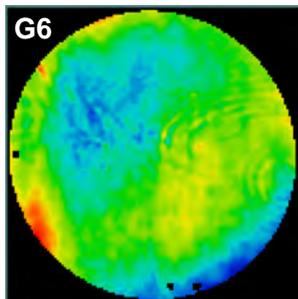
106,4 nm



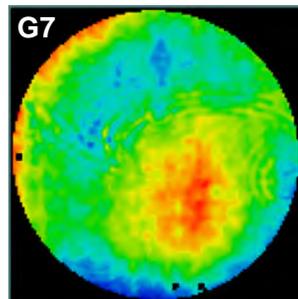
73,0 nm



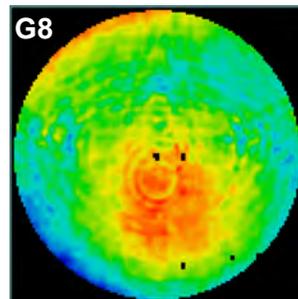
102,5 nm



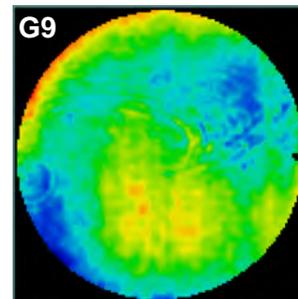
74,4 nm



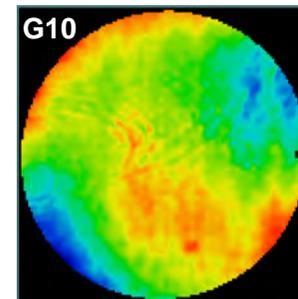
71,3 nm



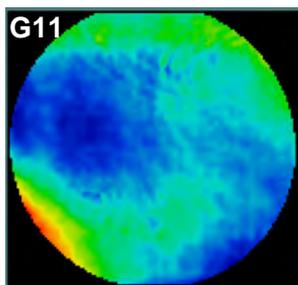
84,4 nm



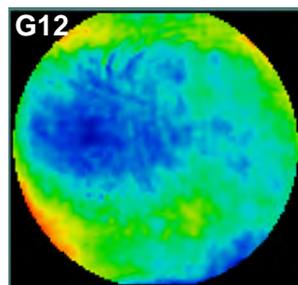
71,7 nm



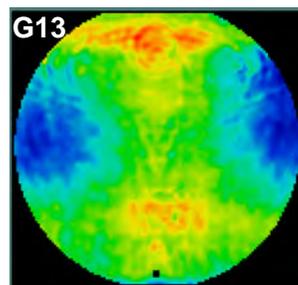
105,0 nm



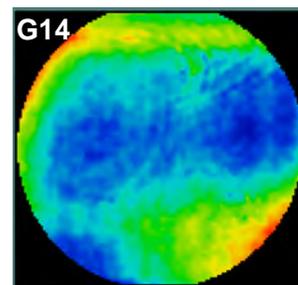
108,2 nm



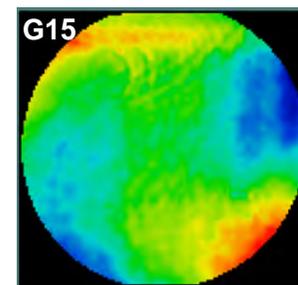
81,5 nm



96,6 nm



103,9 nm



132,0 nm

Conclusion

→ La méthode développée pour la modélisation des TMAs après alignement donne d'excellents résultats

- Front d'onde très similaire pour tous les points du champ
- Ecart de 10 % en moyenne entre les RMS mesurés et ceux des modèles
- Simulation fidèle des effets de bord des miroirs et du vignettage
- Grandissement du FOR à 0.015 % près
- Focales des COL et CAM à 0.05 % près

→ Ces modèles ont permis d'estimer les performances avant intégration des miroirs dans leur structure, puis des TMAs dans l'instrument

- Les performances mesurées sur les TMAs sont similaires à celles obtenues par modélisation avant alignement
- Les mesures faites sur le COL-CAM ont confirmé la validité du modèle

→ Ce type de modélisation a depuis été appliqué avec succès pour d'autres projets

- Geyl *et al.*, TMA Optics for HISUI HSS and MSS Imagers, Proc. SPIE 8169-4, 2011