

# Développement d'un simulateur de performances pour le spectrographe NIRSpec du futur télescope spatial JWST

Soutenance de thèse de Xavier Gnata

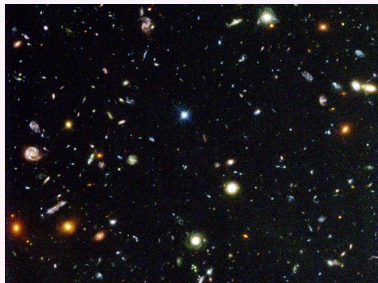
CRAL - EADS/Astrium

07/12/2007



# La mission JWST (1/3)

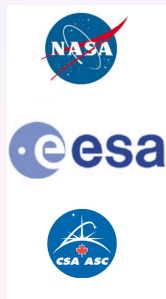
- James Webb Space Telescope
- Un des projets majeurs de l'astronomie pour les dix ans à venir
- Présenté comme le successeur du télescope spatial Hubble
  - Succès scientifique énorme



# La mission JWST (2/3)

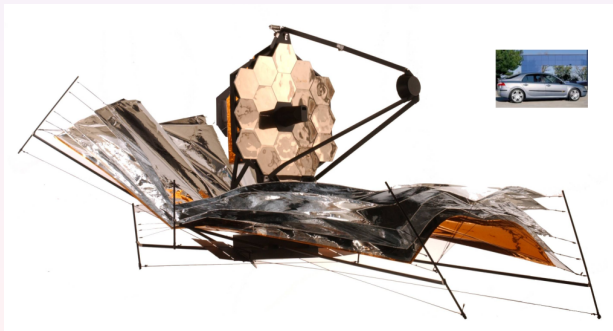
Collaboration entre trois grandes agences spatiales :

- La NASA (National Air and Space Administration)
- L'ESA (European Space Agency)
- La CSA (Canadian Space Agency)



# La mission JWST (3/3)

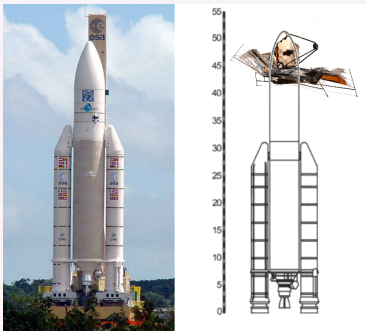
- Miroir primaire segmenté de 6.5 m
- 18 segments hexagonaux en béryllium
- Observations de 0.6 à 28  $\mu\text{m}$  → Refroidissement passif à 30 K
- Lancement en 2013





# La mission JWST (3/3)

- Miroir primaire segmenté de 6.5 m
- 18 segments hexagonaux en béryllium
- Observations de 0.6 à 28  $\mu\text{m}$  → Refroidissement passif à 30 K
- Lancement en 2013



# La mission JWST (3/3)

- Miroir primaire segmenté de 6.5 m
- 18 segments hexagonaux en béryllium
- Observations de 0.6 à 28  $\mu\text{m}$  → Refroidissement passif à 30 K
- Lancement en 2013



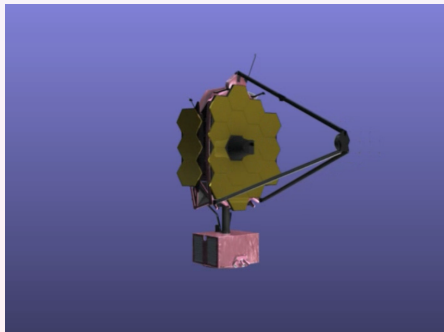
# La mission JWST (3/3)

- Miroir primaire segmenté de 6.5 m
- 18 segments hexagonaux en béryllium
- Observations de 0.6 à 28  $\mu\text{m}$  → Refroidissement passif à 30 K
- Lancement en 2013



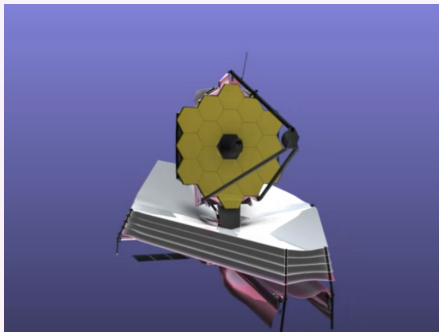
# La mission JWST (3/3)

- Miroir primaire segmenté de 6.5 m
- 18 segments hexagonaux en béryllium
- Observations de 0.6 à 28  $\mu\text{m}$  → Refroidissement passif à 30 K
- Lancement en 2013



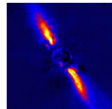
# La mission JWST (3/3)

- Miroir primaire segmenté de 6.5 m
- 18 segments hexagonaux en béryllium
- Observations de 0.6 à 28  $\mu\text{m}$  → Refroidissement passif à 30 K
- Lancement en 2013



# Les objectifs scientifiques du JWST

- **La cosmologie et la structure de l'Univers**
- **La formation et l'évolution des galaxies**
- La naissance et la formation des étoiles
- La formation et l'évolution des systèmes planétaires



# Les instruments à bord de JWST

- **NIRCam** : Caméra et coronographe proche-infrarouge. Également utilisée pour le cophasage des 18 segments
- **MIRI** : Caméra et Spectrographe infrarouge moyen (5 - 28  $\mu\text{m}$ ). Refroidissement actif à l'hélium
- **FGS** : Système imageur pour le guidage fin et Fabry-Pérot ajustable (1.5 - 5  $\mu\text{m}$ )
- **NIRSpec : Near Infrared Spectrograph**  
Spectrographe proche infrarouge (0.6 - 5.0  $\mu\text{m}$ )



# Plan

- 1 L'instrument NIRSpec
- 2 Compréhension du rôle des **aberrations** et de la **diffraction** dans JWST/NIRSpec
- 3 Définition et utilisation de **transformations de coordonnées**
- 4 Simulations de **poses** du Modèle de Démonstration
- 5 Simulations du modèle de vol

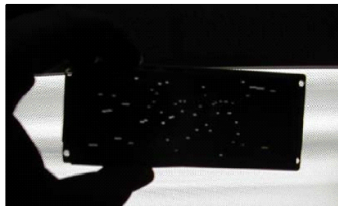
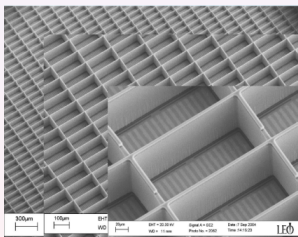


# NIRSpec

- NIRSpec est un spectrographe multi-objets (**MOS**)
- Plus de 100 spectres en une seule pose dans un champ de  $3 \times 3$  arcminutes
- R=2700 et R=1000 (réseaux). R=100 (prisme).

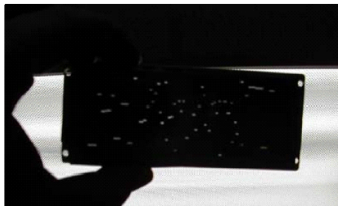
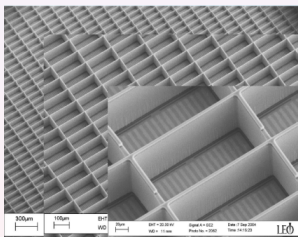
# NIRSpec

- NIRSpec est un spectrographe multi-objets (**MOS**)
- Plus de 100 spectres en une seule pose dans un champ de  $3 \times 3$  arcminutes
- $R=2700$  et  $R=1000$  (réseaux).  $R=100$  (prisme).
  - Sélection des objets : 4 matrices de  $384 \times 175$  micro-obturbateurs de 100 par 200  $\mu\text{m}$



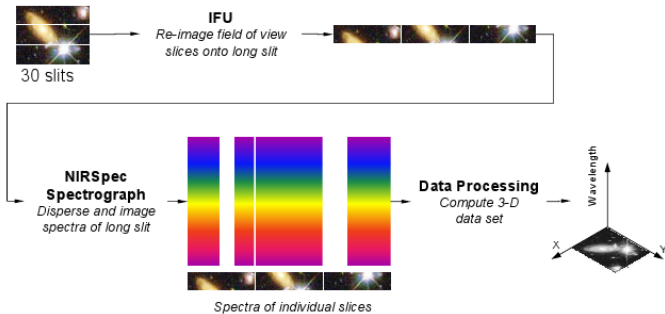
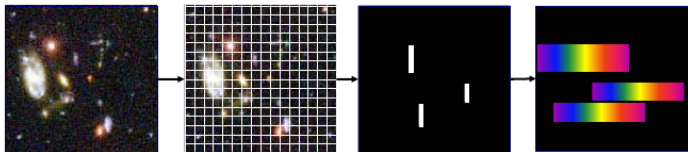
# NIRSpec

- NIRSpec est un spectrographe multi-objets (**MOS**)
- Plus de 100 spectres en une seule pose dans un champ de  $3 \times 3$  arcminutes
- $R=2700$  et  $R=1000$  (réseaux).  $R=100$  (prisme).
  - Sélection des objets : 4 matrices de  $384 \times 175$  micro-obturbateurs de 100 par 200  $\mu\text{m}$

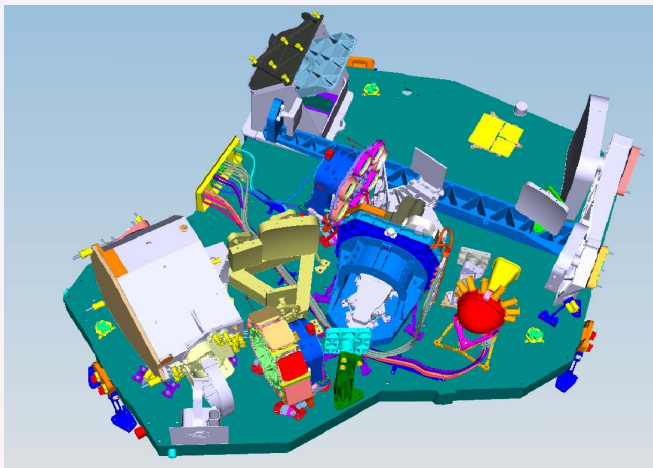


- Mode intégral de champ (**IFU**) de  $3 \times 3$  arcsecondes
- Mode fentes fixes (**slit**) de 100, 200 et 400 milli-arcsecondes (contraste élevé)

# Mode MOS / Mode IFU

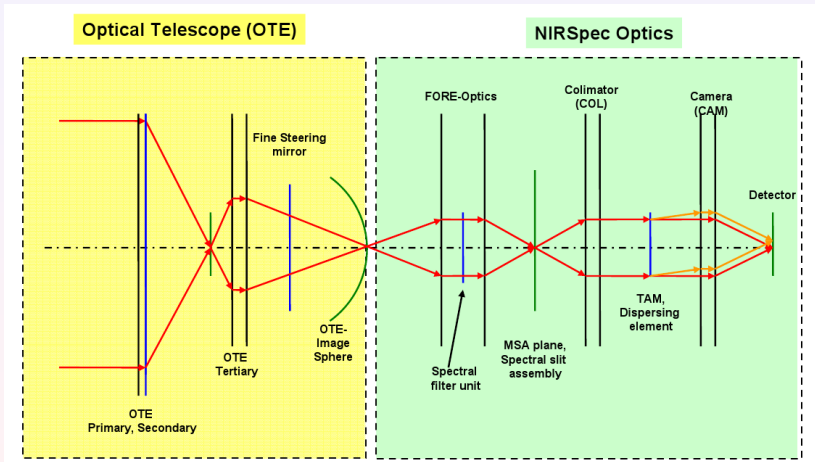


# Vue d'ensemble de NIRSpec



- Utilisation du **SiC**

# Interface optique NIRSpec/JWST



# Pourquoi simuler NIRSpec ?

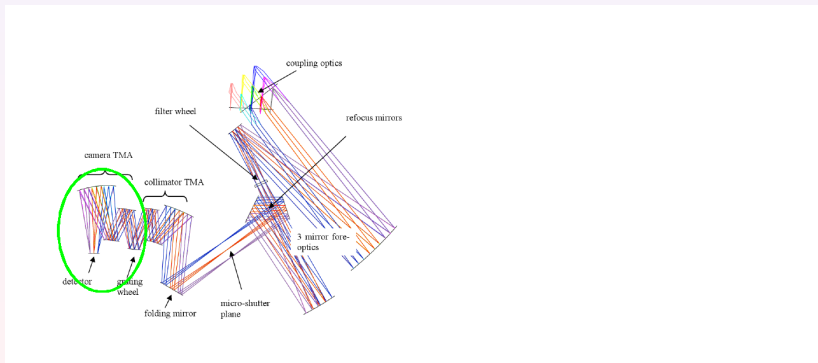
- Instrument complexe
- Bande spectrale de plus de 3 octaves (0.6 - 5.0  $\mu\text{m}$ )
  - Rôle clef des **erreurs de fabrication** (TMA) et de la **diffraction** (micro-obturbateurs) dans les **performances** de l'instrument
- Nombreuses configurations :
  - Trois résolutions  $R=2700$ ,  $R=1000$  et  $R=100$
  - Multi-objets, fentes fixes, imagerie, calibration et IFU
  - **27 configurations**
- Aider au développement des logiciels de traitement des poses de NIRSpec

# Compréhension du rôle des **aberrations** et de la **diffraction** dans JWST/NIRSpec



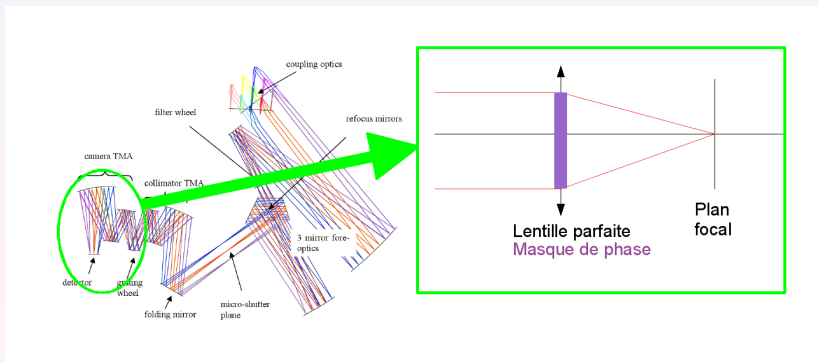
# Optique de Fourier

- Modélisation en **Optique de Fourier**
- Propagation du front d'onde entre plans pupilles et plans images (et vice versa) par **Transformée de Fourier**



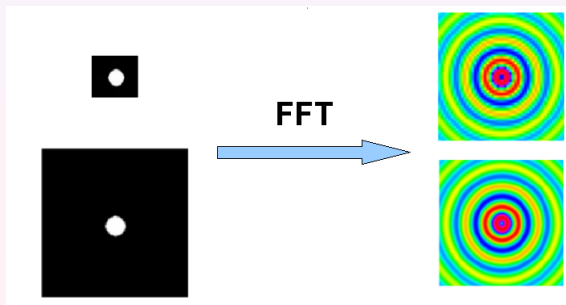
# Optique de Fourier

- Modélisation en **Optique de Fourier**
- Propagation du front d'onde entre plans pupilles et plans images (et vice versa) par **Transformée de Fourier**



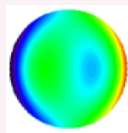
# Module d'Optique de Fourier

- Discrétisation : Transformée de Fourier  $\rightarrow$  Fast Fourier Transform
- Échantillonnage, zéro-padding et calcul numérique intensif

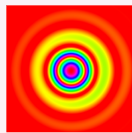


# Module d'Optique de Fourier

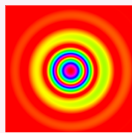
- Discrétisation : Transformée de Fourier  $\rightarrow$  Fast Fourier Transform
- Échantillonnage, zéro-padding et calcul numérique intensif
- Tests sur des cas simples analytiques :
  - Théorie de Nijboer-Zernike. Description analytique d'une PSF de coma



Front  
d'onde



Analytique



FFT

Erreur relative  $< 10^{-3}$

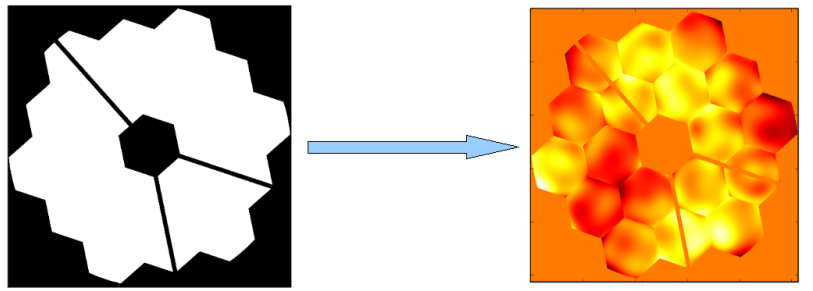
**Validation**

# Modélisation du télescope (1/4)

- Objectif : Obtenir une description réaliste des erreurs de front d'onde induites par le télescope.
- Données :
  - Pas de mesures
  - Budget d'erreurs de front d'onde de **145 nm RMS** sur 235 nm totaux
  - Répartition entre les basses, moyennes et hautes fréquences

# Modélisation du télescope (1/4)

- Objectif : Obtenir une description réaliste des erreurs de front d'onde induites par le télescope.
- Données :
  - Pas de mesures
  - Budget d'erreurs de front d'onde de **145 nm RMS** sur 235 nm totaux
  - Répartition entre les basses, moyennes et hautes fréquences

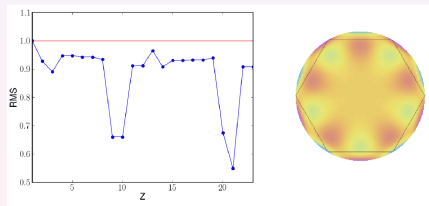


# Modélisation du télescope (2/4)

- Pas d'échantillonnage du primaire de 1 cm
  - Échantillonnage insuffisant pour décrire les hautes fréquences (Rugosité)
  - Un modèle ad hoc de lumière diffusée pourra être ajouté
- Sommes équipondérées de **polynômes de Zernike** pour basses (pleine ouverture) et moyennes fréquences (échelle d'un segment)

# Modélisation du télescope (2/4)

- Pas d'échantillonnage du primaire de 1 cm
  - Échantillonnage insuffisant pour décrire les hautes fréquences (Rugosité)
  - Un modèle ad hoc de lumière diffusée pourra être ajouté
- Sommes équipondérées de **polynômes de Zernike** pour basses (pleine ouverture) et moyennes fréquences (échelle d'un segment)



- Base de polynômes orthonormés sur un hexagone régulier
  - Procédé itératif de **Gram-Schmidt**



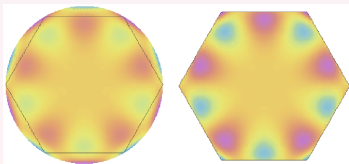
## Modélisation du télescope (3/4)

- Orthonormalisation des polynômes de Zernike sur un hexagone

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1^H = Z_1 \\ Z_k^H = Z_k - \sum_{j=1}^{k-1} \frac{\langle Z_j, Z_k^H \rangle}{\langle Z_j, Z_j \rangle} Z_j \\ \langle Z_i, Z_j \rangle = \iint_H Z_i(x, y), Z_j(x, y) dx dy \end{array} \right. \quad \hat{Z}_1^H = \frac{Z_1^H}{\sqrt{\langle Z_1^H, Z_1^H \rangle}}$$

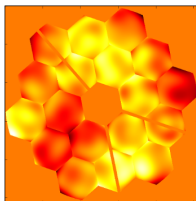
$$\hat{Z}_k^H = \frac{Z_k^H}{\sqrt{\langle Z_k^H, Z_k^H \rangle}}$$

$$H = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{\sqrt{3}}{2} \leq y \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\sqrt{3} \leq \sqrt{3}x + y \leq \sqrt{3} \\ -\sqrt{3} \leq \sqrt{3}x - y \leq \sqrt{3} \end{array} \right.$$



# Modélisation du télescope (4/4)

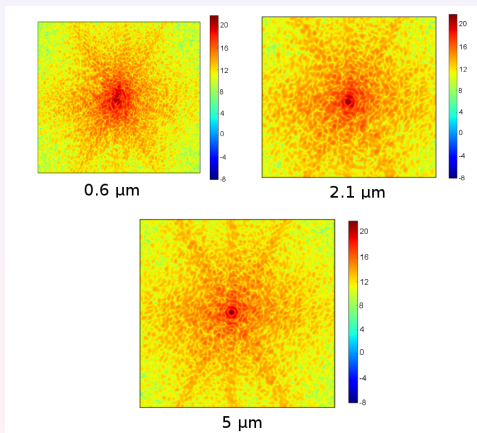
- Expressions analytiques des  $Z_k^H$ ,  $k \leq 50$
- Transposable à d'autres formes simples de pupilles
- Produit scalaire analytique ou numérique
- **Carte simulée représentative du télescope**
- **Référence pour le projet et les simulations**



- Maurice te Plate (European Space Agency), Pierangelo Marenaci (ESA - EADS/Astrium), Jose Lorenzo Alvarez (ESA)

# PSF du télescope et de l'optique de relais

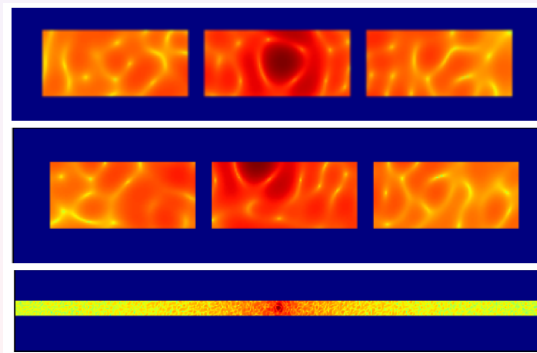
- Aberrations de l'optique de relais : 11 polynômes de Zernike



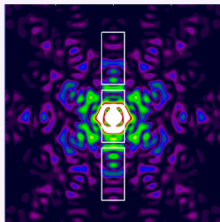
- 0.6 - 2.0  $\mu\text{m}$  : Limité par les aberrations
- 2.0 - 5.0  $\mu\text{m}$  : Limité par la diffraction

# Pertes de fentes (1/3)

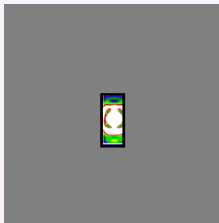
- **Pertes de fente** : Pertes fonction du centrage de la PSF dans la (pseudo)-fente.
- PSF à 2  $\mu\text{m}$ . Exemple de centrages :



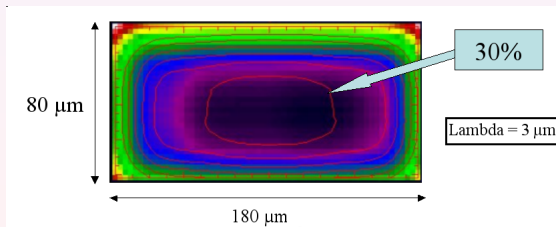
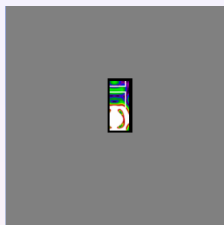
# Pertes de fentes (2/3)



# Pertes de fentes (2/3)

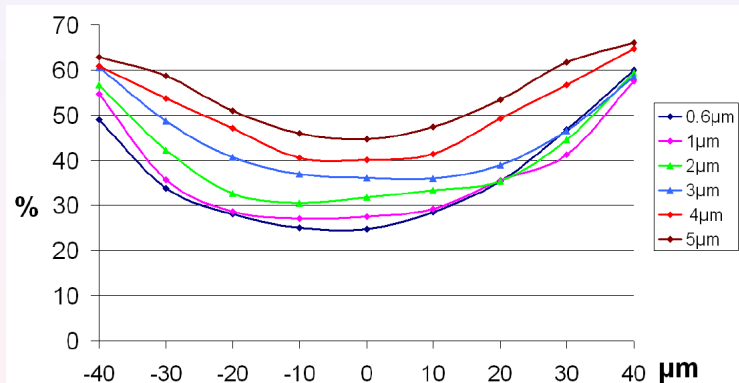


# Pertes de fentes (2/3)



# Pertes de fentes (3/3)

- Pertes de fente en fonction de la longueur d'onde. Une pseudo-fente ouverte :

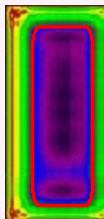
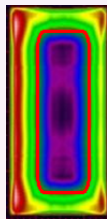
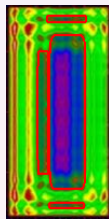
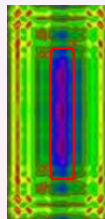


- **Importance des pertes de fentes**
- Légère asymétrie due aux aberrations



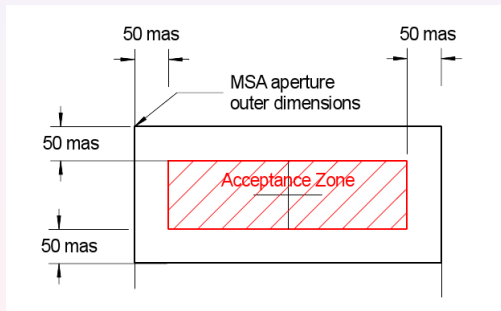
# Stabilité photométrique

- Précision de pointage de  $5 \mu\text{m } 1\sigma$  dans le plan des micro-obturbateurs
- Contour rouge : Stabilité photométrique à  $\pm 5\%$

 $\lambda = 2 \mu\text{m}$  $\lambda = 3 \mu\text{m}$  $\lambda = 4 \mu\text{m}$  $\lambda = 5 \mu\text{m}$

# Conclusion sur les pertes de fente

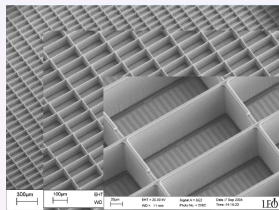
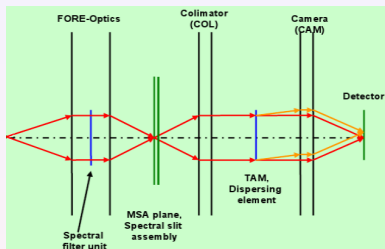
- Pertes de fente importantes
- **Importance de la diffraction dans un MOS comme NIRSpec**
- **Définition d'une zone d'acceptance**



ADASS XIII ASP Conference Series, Vol. 314, 2004. "End to end Simulation of the JWST/NIRSpec instrument" X. Gnata, P. Ferruit, A. Pécontal Rousset

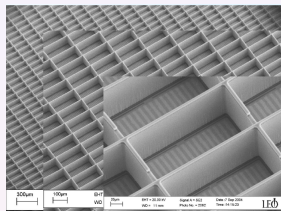
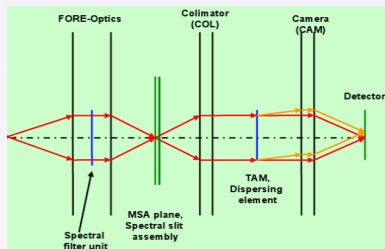
# Modélisation des micro-obturbateurs (1/2)

- Micro-obturbateurs modélisés par un masque 2D binaire mais...

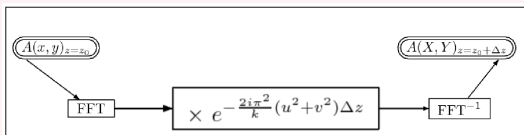


# Modélisation des micro-obturbateurs (1/2)

- Micro-obturbateurs modélisés par un masque 2D binaire mais...

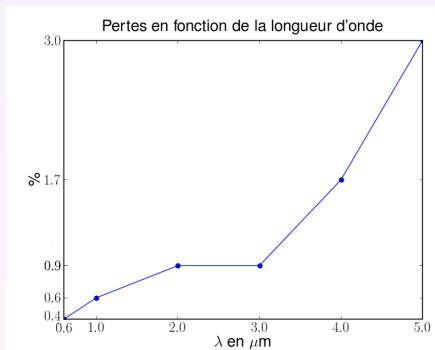


- Pertes de lumière** entre les deux faces des MSA
- Propagation de **Fresnel** entre les deux faces



# Modélisation des micro-obturbateurs (2/2)

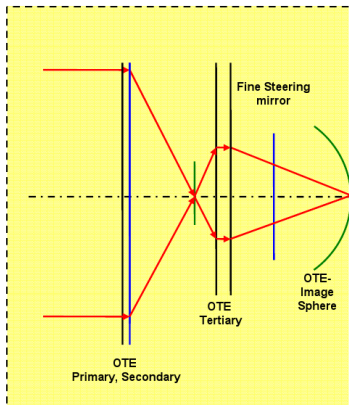
- PSF centrée dans un micro-obturbateur



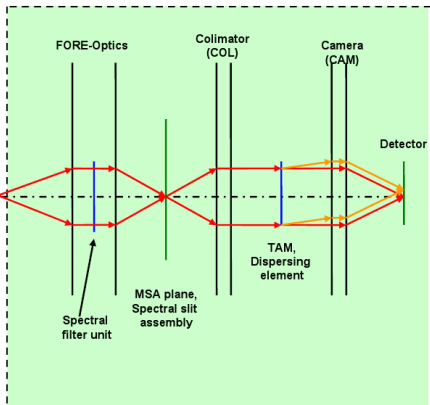
- Système complexe (réflexion, guide d'ondes)
- Hypothèse de «murs absorbants»
- Possibilité de modélisation «Maxwell 3D»
- **Fresnel : Bon compromis complexité du modèle / importance système**

# Pertes par diffraction (1/3)

## Optical Telescope (OTE)

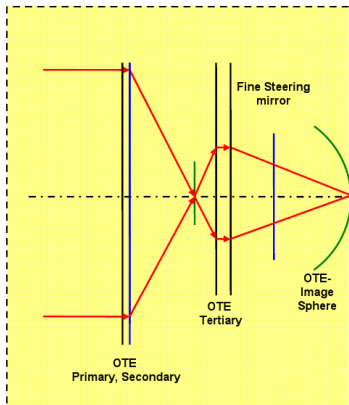


## NIRSpec Optics

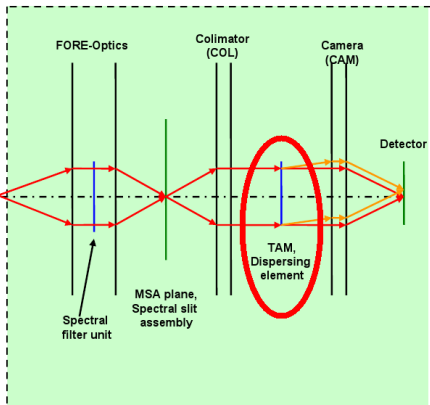


# Pertes par diffraction (1/3)

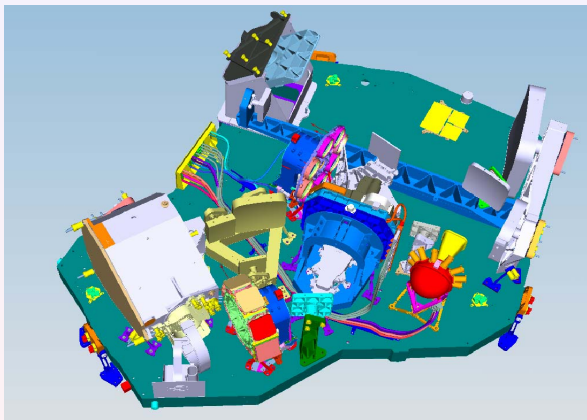
## Optical Telescope (OTE)



## NIRSpec Optics



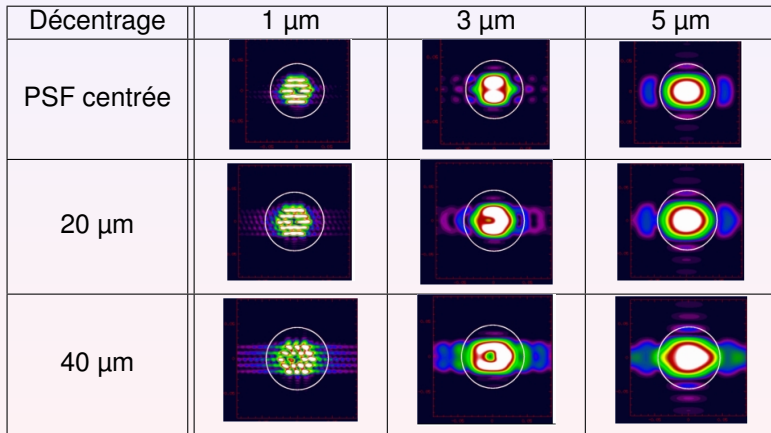
# Pertes par diffraction (1/3)





# Pertes par diffraction (2/3)

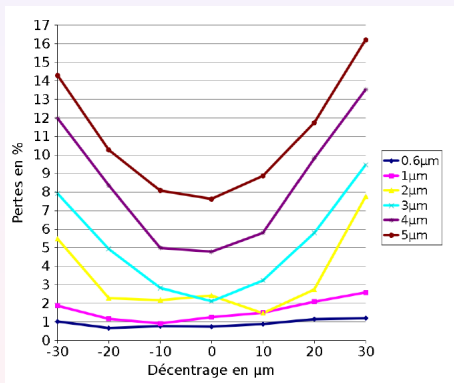
- Calcul de l'illumination du plan des disperseurs



(échelle log)

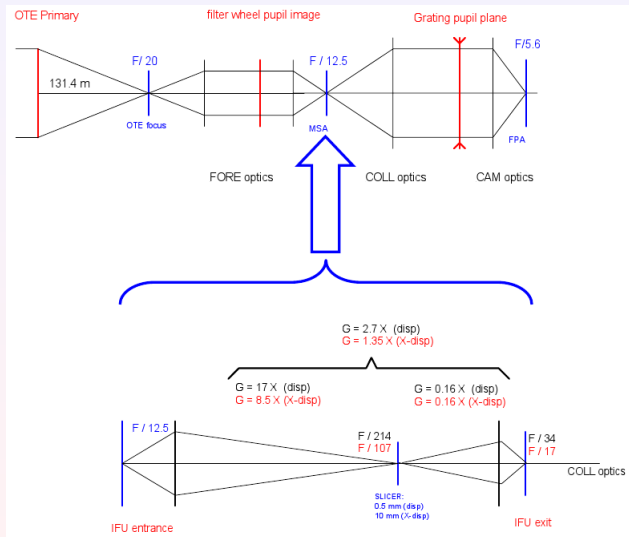
# Pertes par diffraction (3/3)

- Pertes dans le plan des réseaux en fonction du centrage de la PSF



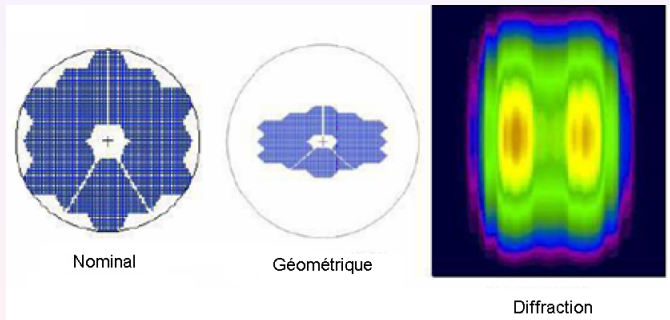
- Pertes **non négligeables** mais **dans les spécifications**
- Contraintes d'enveloppe mécanique

# Cas du mode IFU (1/3)



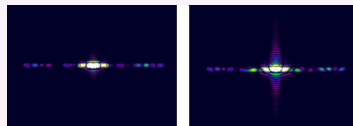
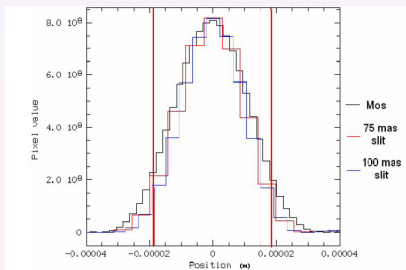
# Cas du mode IFU (2/3)

- Illumination dans le plan de réseaux dans le mode IFU



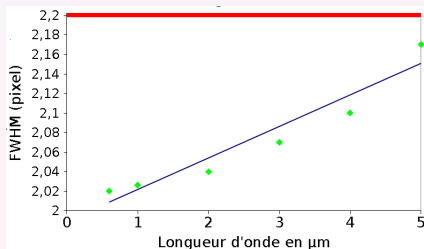
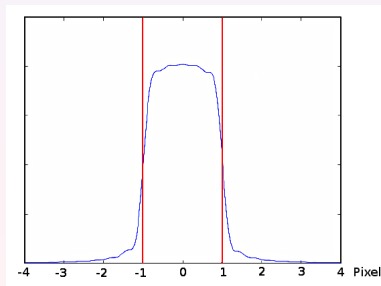
# Cas du mode IFU (3/3)

- PSF sur le détecteur (2 FFT pour modéliser collimateur/caméra)



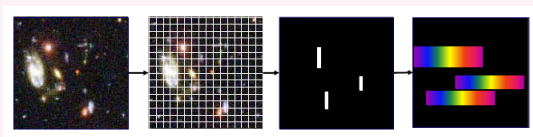
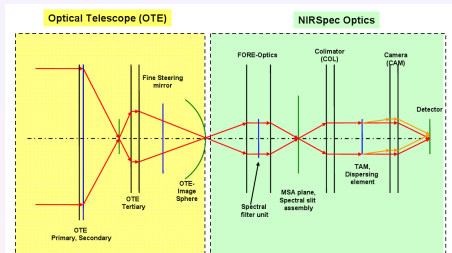
# Fonction de fente

- Élément de résolution spectrale
- Convolution de l'image de la fente par la PSF spectrale
- Fonction de fente **spécifiée** de 2.2 pixels
- Fonction de fente moyenne **calculée** de 2.1 pixels



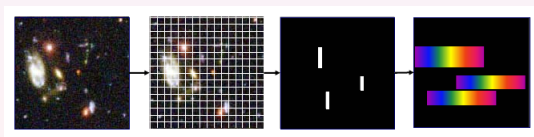
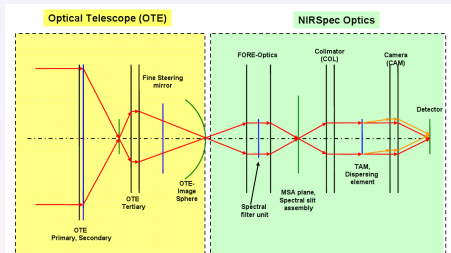
# Définition et utilisation de **transformations de coordonnées**

# Les transformations de coordonnées dans un MOS



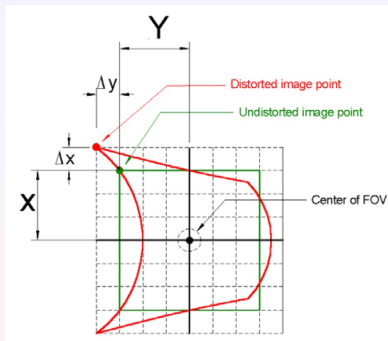


# Les transformations de coordonnées dans un MOS



- **Importance des transformations de coordonnées**

# Définition de la distorsion



$$D(X, Y) = \sqrt{\frac{\Delta X^2 + \Delta Y^2}{(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2}}$$

$$\begin{cases} X_c \\ Y_c \end{cases} \triangleq \text{Coordonnées de l'image du centre du champ}$$

# Du ciel aux micro-obturbateurs

- Module de tracé de rayons de Zemax
- Importance de la connaissance de la distorsion en mode MOS
- 1.3% de distorsion dans le plan MSA  $\sim$  6 micro-obturbateurs
- **Spécification** : Modélisation polynomiale de degré au plus 5 (RMS < 2  $\mu$ m)

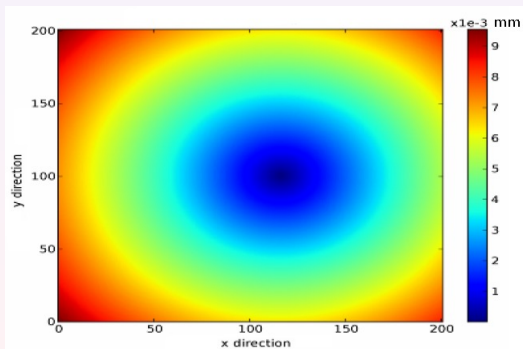
# Du ciel aux micro-obturateurs

- Module de tracé de rayons de Zemax
- Importance de la connaissance de la distorsion en mode MOS
- 1.3% de distorsion dans le plan MSA  $\sim$  6 micro-obturateurs
- **Spécification** : Modélisation polynomiale de degré au plus 5 (RMS < 2  $\mu$ m)

$$\left\{ \begin{array}{l} X = P_x(X_{model}, Y_{model}) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=i}^{N-i} a_{i,j} X_{model}^i Y_{model}^j \\ Y = P_y(X_{model}, Y_{model}) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=i}^{N-i} b_{i,j} X_{model}^i Y_{model}^j \end{array} \right.$$

# Influence de chromatisme (1/2)

- Filtre tilté dans l'optique de relais
- 10  $\mu\text{m}$  de chromatisme latéral



# Influence de chromatisme (2/2)

- Coefficients de l'ajustement fonction de la longueur d'onde

$$\left\{ \begin{array}{l} X = P_x(X_{model}, Y_{model}) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=i}^{N-i} a_{i,j}(\lambda) X_{model}^i Y_{model}^j \\ Y = P_y(X_{model}, Y_{model}) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=i}^{N-i} b_{i,j}(\lambda) X_{model}^i Y_{model}^j \\ a_{i,j}(\lambda) = \alpha_{i,j}\lambda + \beta_{i,j} \\ b_{i,j}(\lambda) = \gamma_{i,j}\lambda + \delta_{i,j} \end{array} \right.$$

# Influence de chromatisme (2/2)

- Résultats :

- Entre le ciel et le plan MSA :

$$\begin{cases} P_x(X_{model}, Y_{model}) \sim Id_{X_{model}} \\ P_y(X_{model}, Y_{model}) \sim Id_{Y_{model}} \end{cases}$$

- Erreur résiduelle inférieure à 0.2  $\mu\text{m}$
- Modélisation polynomiale du collimateur et de la caméra
- **Collimateur** :  $(X_{MSA}, Y_{MSA}) \rightarrow (C_{X_i}, C_{Y_i})$
- **Caméra** :  $(C_{X_r}, C_{Y_r}) \rightarrow (X_{FPA}, Y_{FPA})$

# Influence de chromatisme (2/2)

- Résultats :

- Entre le ciel et le plan MSA :

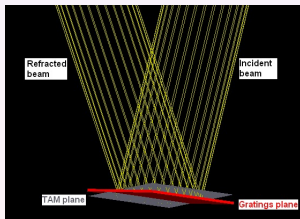
$$\begin{cases} P_x(X_{model}, Y_{model}) \sim Id_{X_{model}} \\ P_y(X_{model}, Y_{model}) \sim Id_{Y_{model}} \end{cases}$$

- Erreur résiduelle inférieure à 0.2  $\mu\text{m}$
- Modélisation polynomiale du collimateur et de la caméra
- **Collimateur** :  $(X_{MSA}, Y_{MSA}) \rightarrow (C_{X_i}, C_{Y_i})$
- **Caméra** :  $(C_{X_r}, C_{Y_r}) \rightarrow (X_{FPA}, Y_{FPA})$
- Ajoutons un modèle des disperseurs (Target acquisition mirror, réseaux, prisme)
  - **Transformations de coordonnées ciel  $\leftrightarrow$  détecteurs**



# Modèle des réseaux

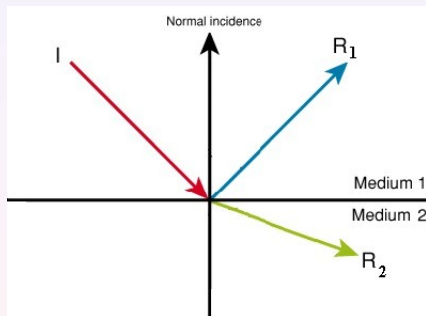
- Le Target Acquisition Mirror sert de référence



$$\begin{cases} C'_{X_r} = C'_{X_i} \\ C'_{Y_r} = -(C'_{X_i} - N * D * \lambda) \\ C'_{Z_r} \text{ tel que } \sqrt{(C'_{X_r})^2 + (C'_{Y_r})^2 + (C'_{Z_r})^2} = 1 \\ N \triangleq \text{Ordre de diffraction} \\ D \triangleq \text{Densité de traits (traits/mm)} \end{cases}$$

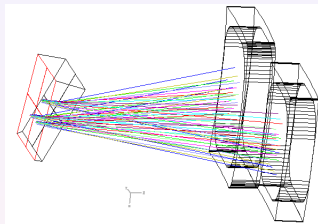
# Modèle du prisme

- Lois de Descartes



$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 = \mathbf{I} - (2\mathbf{I} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N} \\ \mathbf{R}_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1(\lambda)}{n_2(\lambda)}\right)^2 (1 - (\mathbf{I} \cdot \mathbf{N})^2)}\mathbf{N} - \frac{n_1(\lambda)}{n_2(\lambda)}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{I})\mathbf{N} - \mathbf{I} \end{cases}$$

# Modèle du prisme



$$\begin{cases} C_{X_r} = f(C_{X_i}, C_{Y_i}, \theta_1, \theta_2, n(\lambda)) \\ C_{Y_r} = -C_{Y_i} \\ C_{Z_r} \text{ tel que : } C_{X_r}^2 + C_{Y_r}^2 + C_{Z_r}^2 = 1 \end{cases}$$

- Modèle polynômial de  $n_{CaF_2}(\lambda, T)$

# Conclusion sur les transformations de coordonnées

- Importance des transformations de coordonnées dans un spectrographe multi-objets
- Précision du modèle «ciel-détecteurs» **dans les spécifications** dans tous les modes de NIRSpec

# Conclusion sur les transformations de coordonnées

- Importance des transformations de coordonnées dans un spectrographe multi-objets
- Précision du modèle «ciel-détecteurs» **dans les spécifications** dans tous les modes de NIRSpec
- Calcul des paramètres des disperseurs
- Calcul de la résolution spectrale
- Tester le design de NIRSpec (8 spécifications système testées)
- Module Python autogénéré et distribué dans le consortium

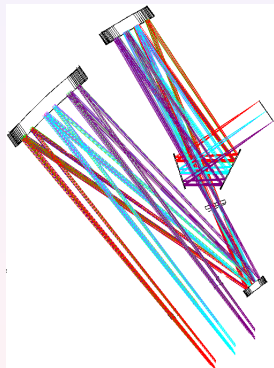
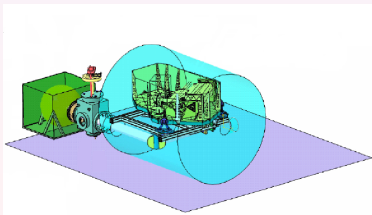
# Simulations de **poses** du Modèle de Démonstration

# Contexte du projet

- Logiciel de simulations **livrable** : Instrument Performance Simulator
  - Contraintes de plannings
- Besoin de poses simulées pour le développement de Instrument Quick Look Analysis and Calibration
- Campagne de tests **cryogéniques**
  - Tests et validation de l'IQLAC
- Briques élémentaires assemblées en un prototype
- Poses **livrables**

# Prototype simulant le Modèle de Démonstration (DM)

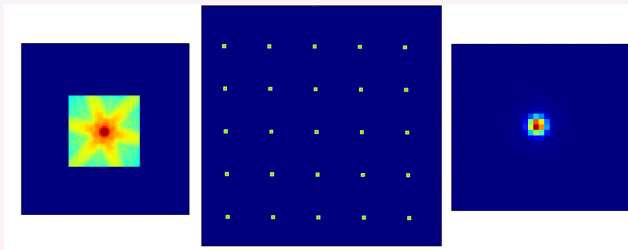
- Imageur
  - Optique de relais
  - Mécanisme de refocalisation
  - Roue à filtres
- Illumination par sphère intégrante
  - Champ plat
  - Masques de trous sources (pinholes)





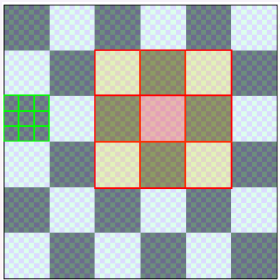
# Exemple de poses simulées

- Codes prototypes produisant des poses **livrables**
- Masque de pinholes éclairé par une sphère intégrante
  - Formalisme de Fourier non cohérent
  - Module de distorsion Python/C++
  - “Convolution” de l’image géométrique par “la” PSF de l’optique de relais
  - Interpolation des PSF dans le champ et en longueur d’onde



# Simulation du détecteur

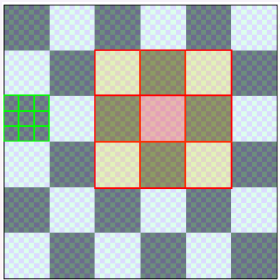
- Cross-talk
- Réponse intra-pixel
- Bruits (grenaille et lecture)



- Non-linéarité

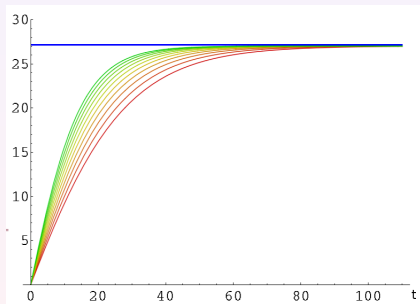
# Simulation du détecteur

- Cross-talk
- Réponse intra-pixel
- Bruits (grenaille et lecture)



- Non-linéarité

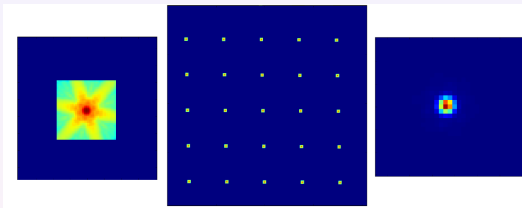
$$\frac{\partial \Xi(t)}{\partial t} = \Lambda(1 - a\Xi(t) - b\Xi(t)^2)$$



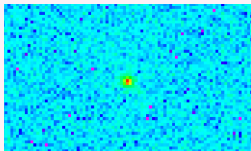
$$a = 0.01, b = 0.001, \Lambda \in [1, 2]$$

# Exemple de poses simulées

- Poses **livrées**

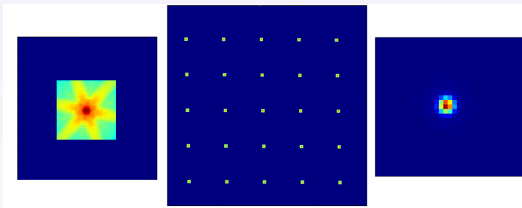


- Faible rapport signal/bruit

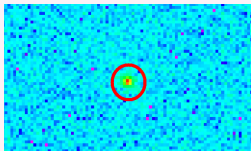


# Exemple de poses simulées

- Poses **livrées**



- Faible rapport signal/bruit

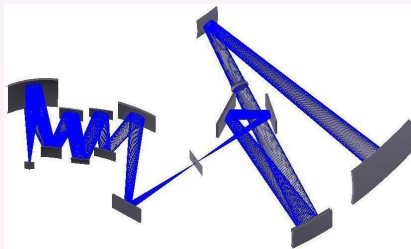


ADASS XVII ASP Conference Series, 2007 “Algorithms to model the multi-object spectrograph JWST/NIRSpec Instrument” X. Gnata, P. Ferruit

# Simulations du modèle de vol

# Simulations du modèle de vol (1/2)

- Le cas multi-objets :
  - Formalisme de Fourier **incohérent**
  - “Convolution” l’image en entrée par “la” PSF jusqu’aux MSA
  - Sélectionner les micro-obturbateurs ouverts
  - Calculer les spectres correspondants



# Simulations du modèle de vol (2/2)

- Comment simuler 100 spectres en un temps raisonnable ?
- **“Convolver uniquement ce qui doit l’être...”**
- 4096 pixels spectraux

	Fond	Objets ponctuels	Objets étendus
Continuum	Green	Green	Yellow
Raies non résolues	Yellow	Yellow	Orange
Raies résolues	Yellow	Orange	Red

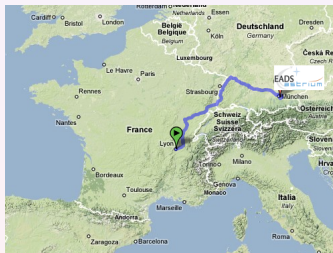


# Conclusion

- Briques élémentaires de simulation
- Utile pour le développement de l'IPS
- Analyses de performances
- Impact sur le design
- Prototype : poses livrées en accord avec le planning de NIRSpec
- Publications et notes techniques
- Codes Python/C++ réutilisables. . .

# Perspectives

- Tests du Modèle de Démonstration fin 2008
- Codes finaux de simulation du modèle de vol
- Autres projets ; autres simulations.



Keep It Stupid & Simple

## Merci de votre attention

