

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Outils de traitement de données et d'analyse de performance pour le X-ray Integral Field Unit de la mission Athena



E. Cucchetti¹, M. Rivière², G. Hugonnard², A. Deloëuf¹, P. Pelle¹, S. Beaumont¹, L. Chaoul¹

¹ Centre National d'Études Spatiales, 18 Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse

² CapGemini, 109 Av. du Général Eisenhower, 31100 Toulouse

1. Le X-ray Integral Field Unit

Le X-IFU [1, 2] est le spectromètre imageur très haute résolution de l'observatoire à rayons X européen Athena (ESA L2). Son lancement est prévu en 2037 au point de Lagrange L1 pour observer l'univers chaud et énergétique. Il s'agit du premier instrument doté d'une matrice de plus de 1500 microcalorimètres X supraconducteurs (TES) [3] opérés à 50 mK et capables de compter les photons entre 0.2 et 7 keV avec une résolution spectrale < 4 eV (objectif < 3 eV).

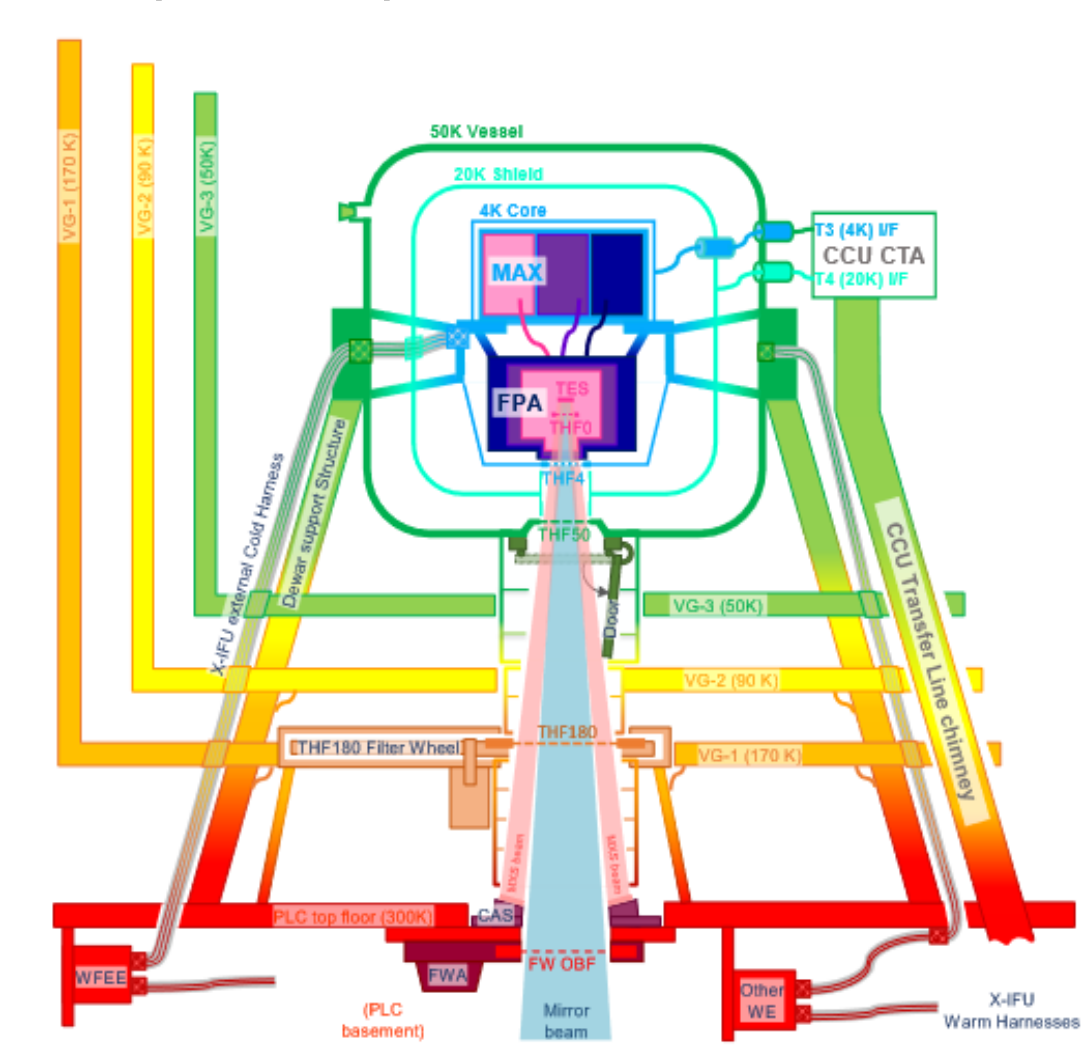


Figure 1 : Schéma du design actuel de l'instrument X-IFU et de son système de refroidissement [1].

Bande spectrale	0.2 – 12 keV
Résolution spectrale	< 4 eV FWHM @ 7 keV
Résolution spatiale	8 arcsec (demi-largeur de la PSF)
Surface collectrice	> 0.6 m ² @ 1 keV > 0.09 m ² @ 7 keV
Nombre de pixels	1504 (+ 32 résistifs)
AKE de l'énergie	< 0.5 eV (1σ) sur toute la bande
Champ de vue	4 arcsec (pixel) 4 arcmin (diamètre équivalent)
Bruit de fond instr.	< 8 × 10 ⁻³ cts/s/cm ² /keV
Timing	10 μs (connaissance relative)
Taux de comptage	> 80% sources ponctuelles < 1 mCrab > 50% sources ponctuelles < 1 Crab

Tableau perform

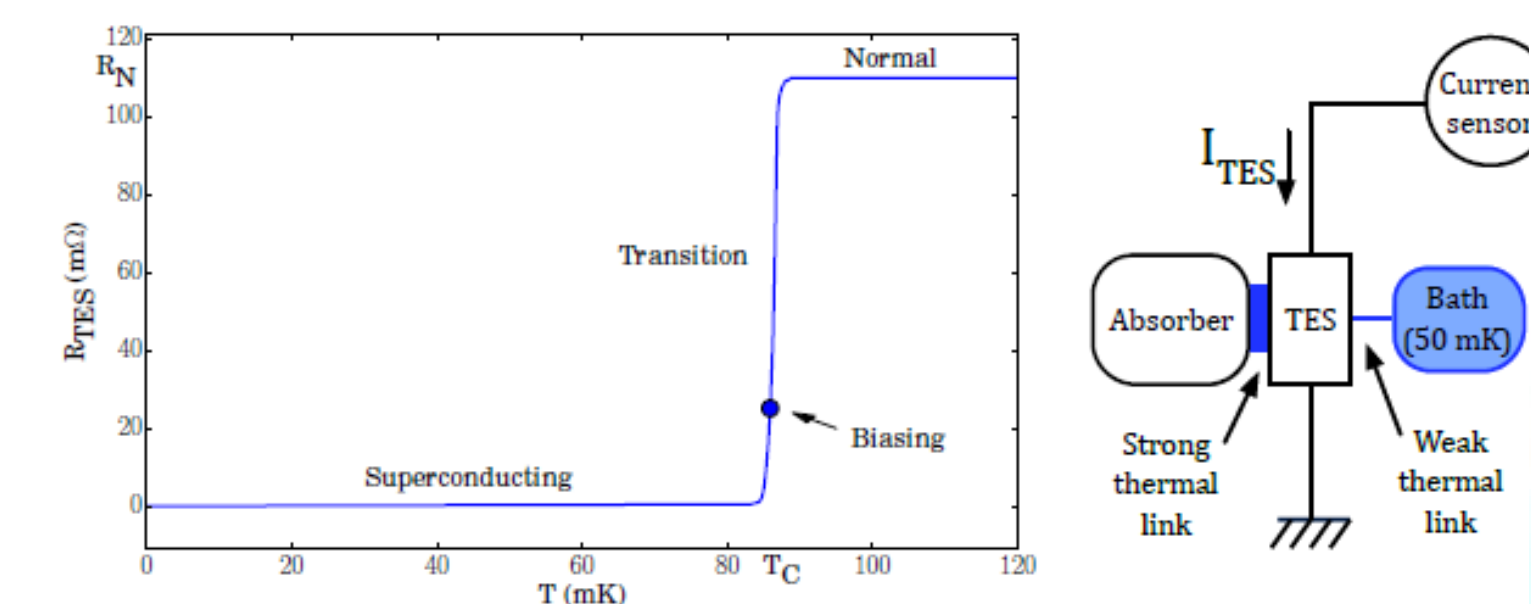


Figure 2 : Principe de détection d'un TES [4]. Le détecteur est po... L'arrivée d'un photon sur l'absorbeur provoque un échauffement, variation est détectée comme une impulsion de courant. Son amplif

2. Enjeux de la spectroscopie

Le X-IFU donnera accès à la science des sources X :

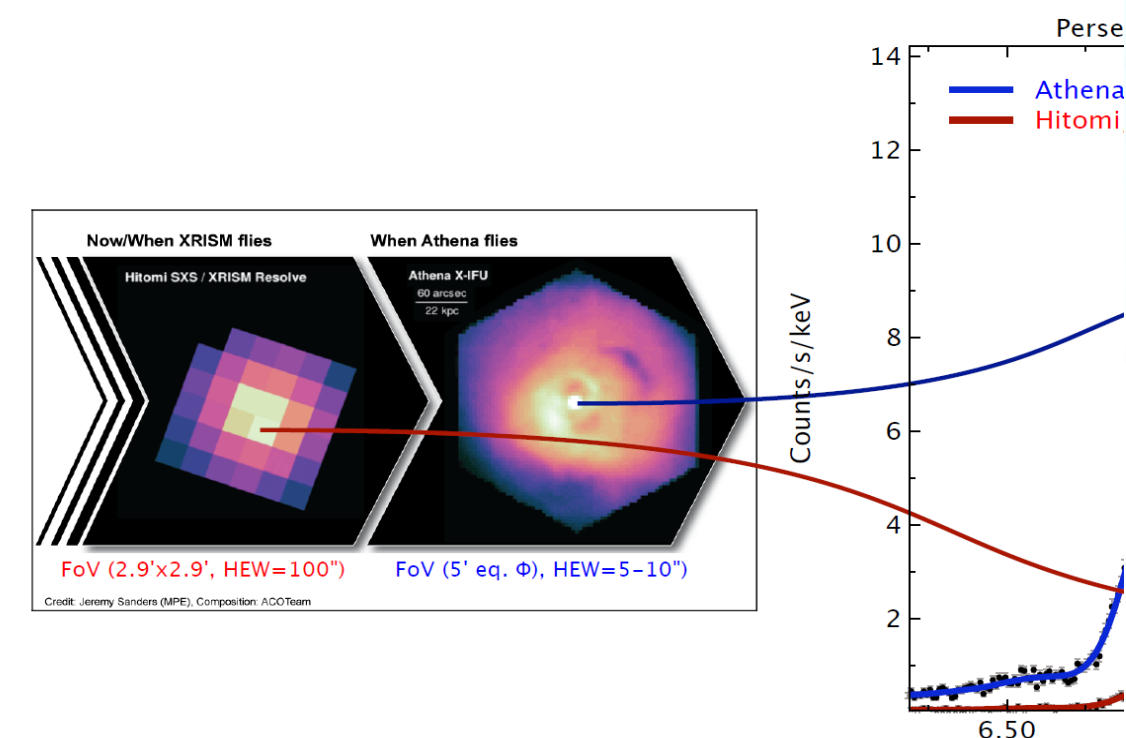


Figure 3 : Comparaison des performances spatiales (Gauche) et spectrales (Droite) de l'instrument X-IFU.

De si hautes performances s'accompagnent de nombreux défis :

- Opération de > 1000 détecteurs à des températures cryogéniques
- Besoin de stabilité de la chaîne de détection sur des années
- Sensibilité forte du détecteur à son environnement
- Non-linéarité du détecteur et besoin de calibration
- Prétraitements bord spécifiques par pixel, à ajuster en fonction du taux de comptage [6]
- Mise à jour des bases de données atomiques: la résolution en énergie finale est telle que la connaissance physique des raies atomiques n'est plus un contributeur négligeable [7]

3. Développement des outils informatiques

Le X-IFU a besoin d'outils dédiés, partagés avec les partenaires, afin d'estimer l'ampleur de ses performances. Le CNES - en partenariat avec CapGemini - développe plusieurs modules informatiques avec des objectifs distincts au sein des environnements logiciels du CNES (GitLab, Artifactory, HPC...) :

- Xifuperfo** : estime et quantifie la performance de l'instrument afin de consolider les budgets
- Xifufwk** : permet le traitement des données sol et sert à préparer le segment sol scientifique (notamment le centre d'expertise)
- Xifulinefit** : vise à uniformiser les outils d'ajustement spectral ainsi que les bases de données de calibration utilisées par les différentes entités

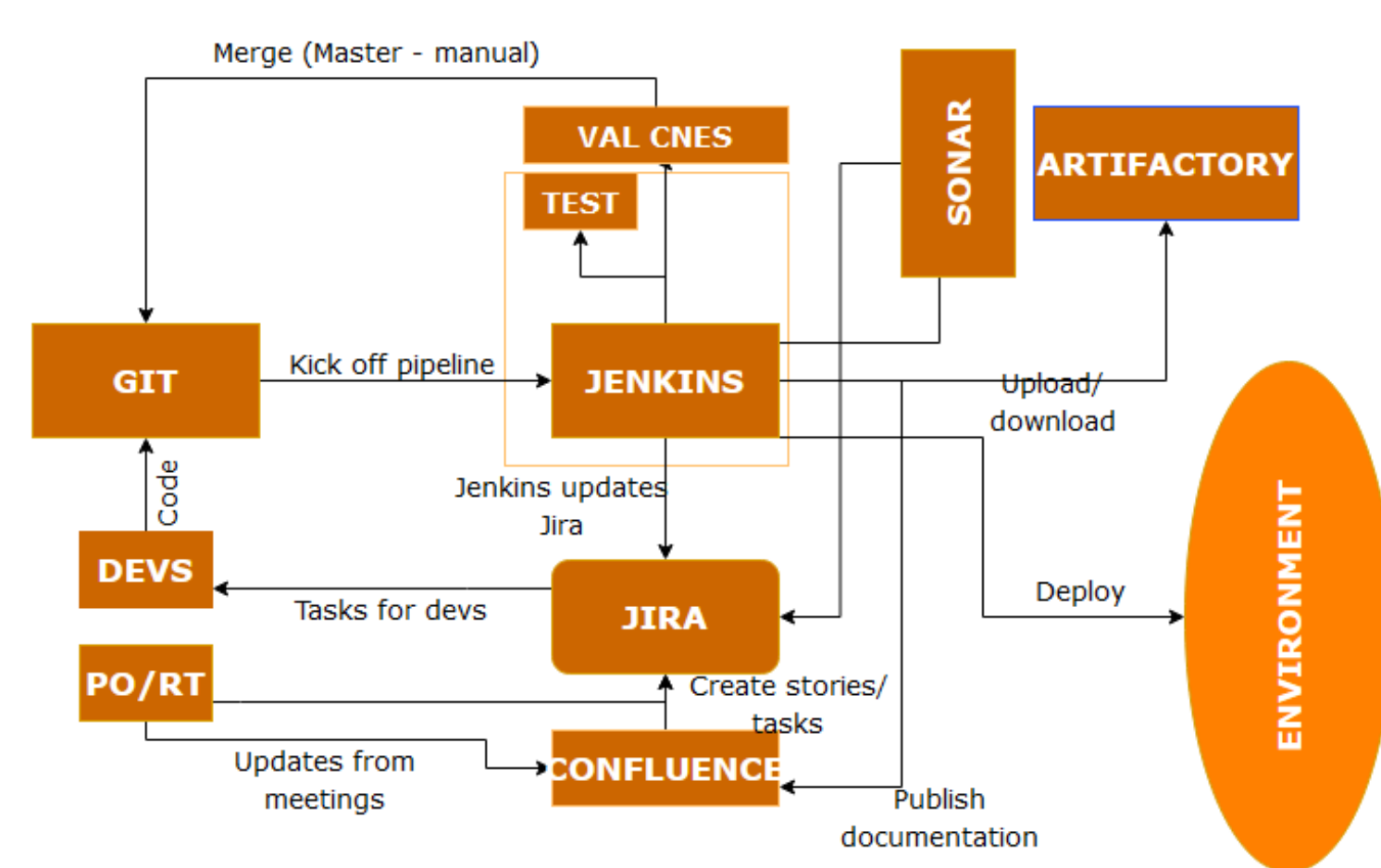
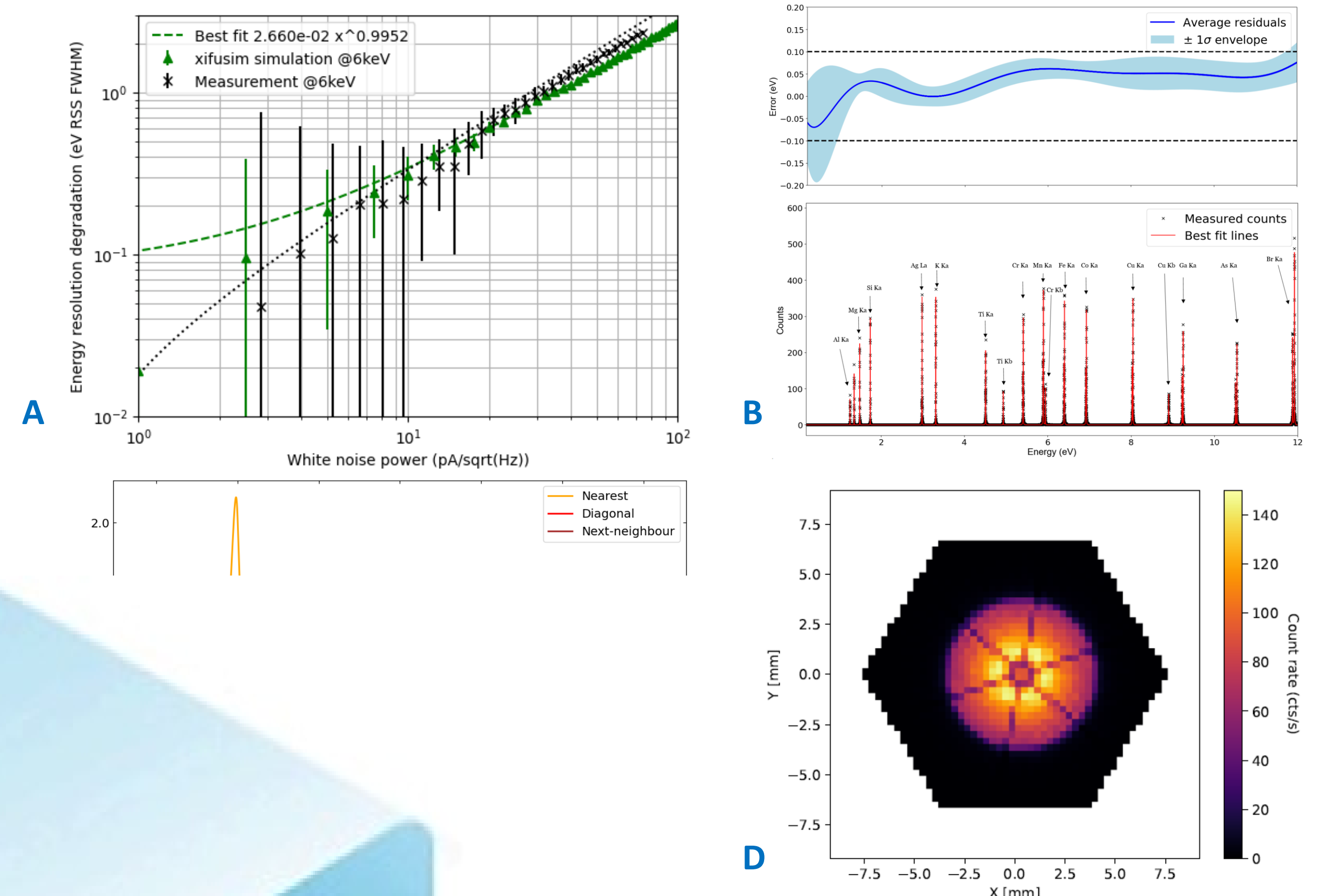


Figure 4 : Schéma de l'environnement de développement mis en place pour le X-IFU.

4. Simulation de la performance du X-IFU

Le module *xifuperfo* peut être utilisé pour déterminer les impacts de traitements et/ou de l'environnement sur la performance de l'instrument (effets de la chaîne de détection, diaphonie), ou encore pour simuler la calibration de ce dernier.



Le module *xifuperfo* permet d'estimer le bruit (pA/sqrt(Hz)) sur la résolution en énergie (eV) finale d'un spectre de calibration de l'échelle d'énergie et de la diaphonie thermique entre pixels sur la résolution spatiale pour estimer le taux de comptage obtenu. Ces simulations sont réalisées avec des outils scriptables, flexibles et parallélisables. Ce module permet de mieux préparer la mission et d'optimiser les performances de l'instrument avec les outils du projet, notamment les outils de simulation de l'environnement (XTE [9]).

Données du X-IFU

Le traitement des données brutes à des fichiers de simulation des résolutions en énergie ou encore pour optimiser le réglage optimal de l'instrument.

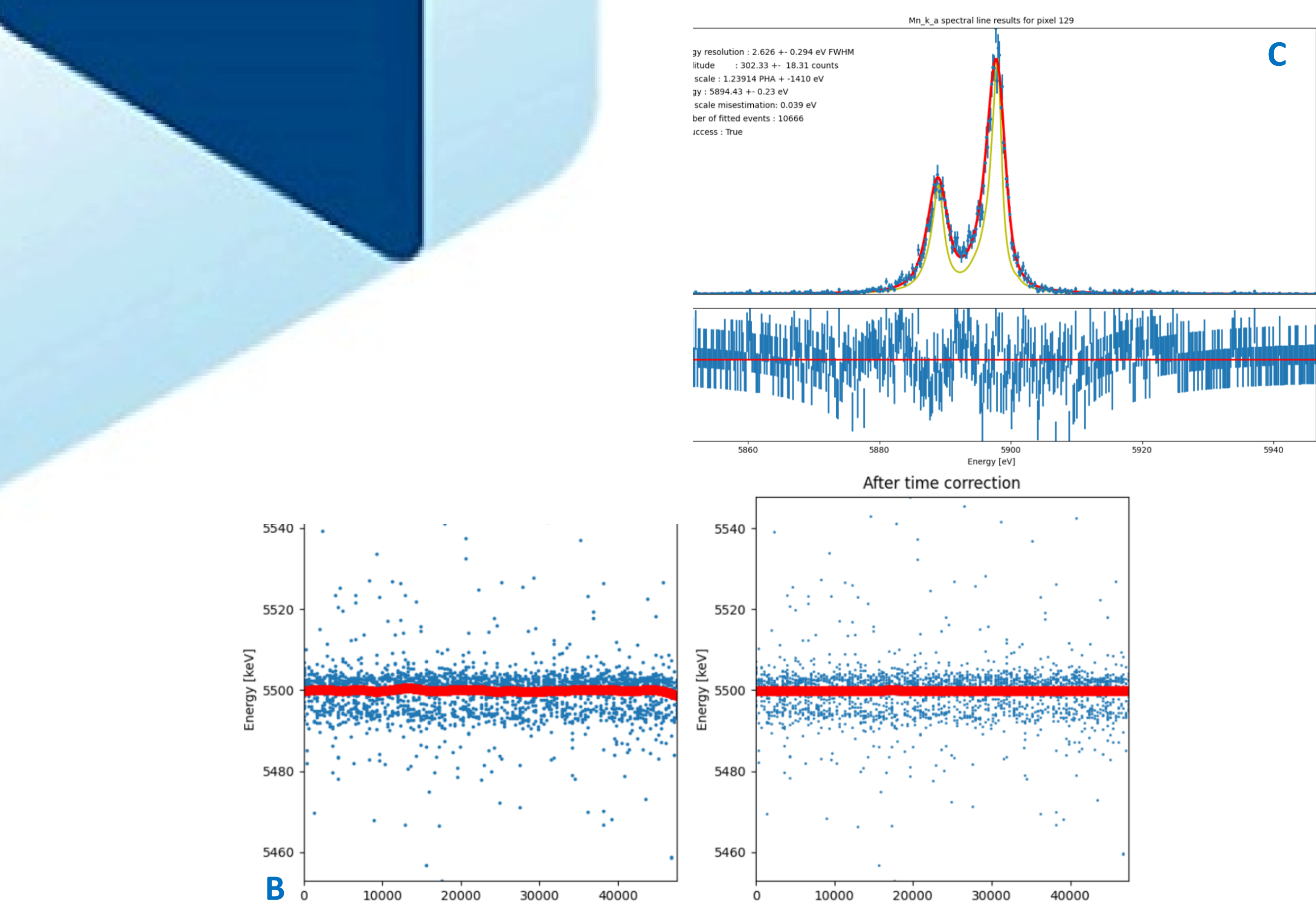


Figure 6 : Exemples de traitements de données NASA avec *xifufwk*. (A) Génération d'un filtre optimal pour obtenir l'énergie d'un photon (B) Correction des dérives temporelles de l'énergie liées à l'environnement (C) Spectre de la raie Mn Ka et meilleur ajustement obtenu sur les données atomiques, indiquant une résolution de 2.6 eV FWHM du pixel.

L'architecture logicielle du package *xifufwk* est basée sur des services, lui permettant d'être industrialisable, modulaire et hautement parallélisable afin de traiter de grandes quantités de données (> Gb / pixel, 1000 pixels à traiter) en peu de temps.

Références

- [1] Pelle et al. 2024, Exp. Astr.
- [2] Barret et al. 2023, Exp. Astr.
- [3] Smith et al. 2024, IEEE Proceedings
- [4] Ravera et al. 2014, SPIE Proceedings
- [5] Cucchetti et al. 2023, JLT
- [6] Ceballos et al., 2023, Exp. Astr.
- [7] Molin et al. 2024, SPIE Proceedings
- [8] Kirsch et al., 2021, JLT
- [9] Dauser et al., 2019, A&A