
Récents progrès sur l'étude de l'extinction grise avec une caméra infrarouge thermique

Hardware & analyses de données collectées à Satino

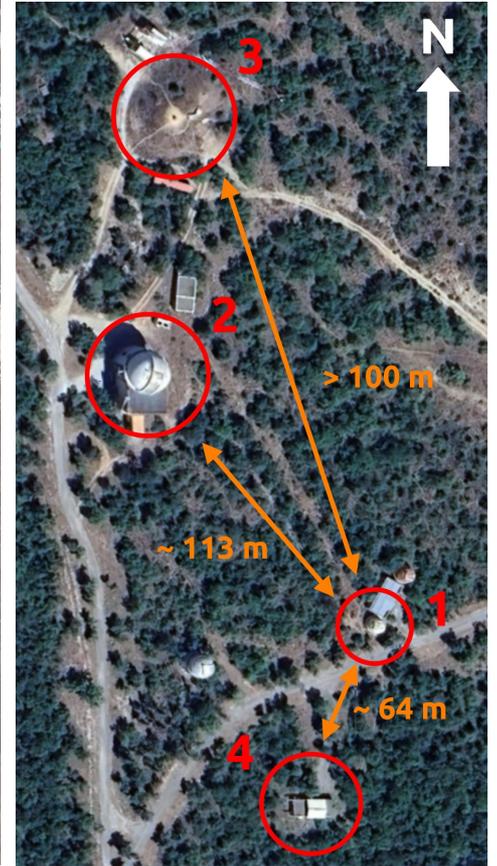
Kélian SOMMER, Bertrand PLEZ et Johann COHEN-TANUGI

Workshop StarDICE @ LPNHE - 11-13 December 2024

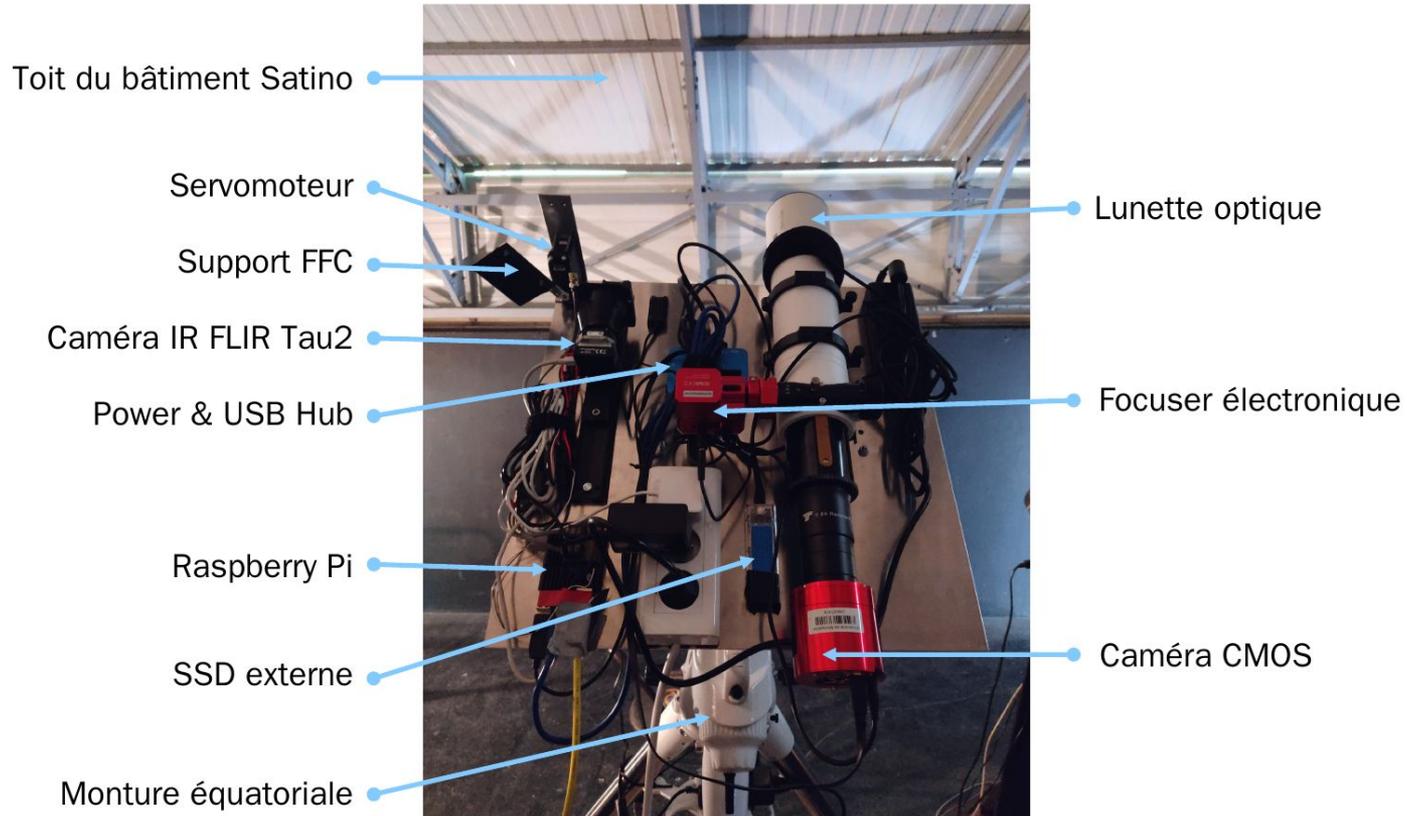


Hardware

Satino @ OHP



Setup expérimental

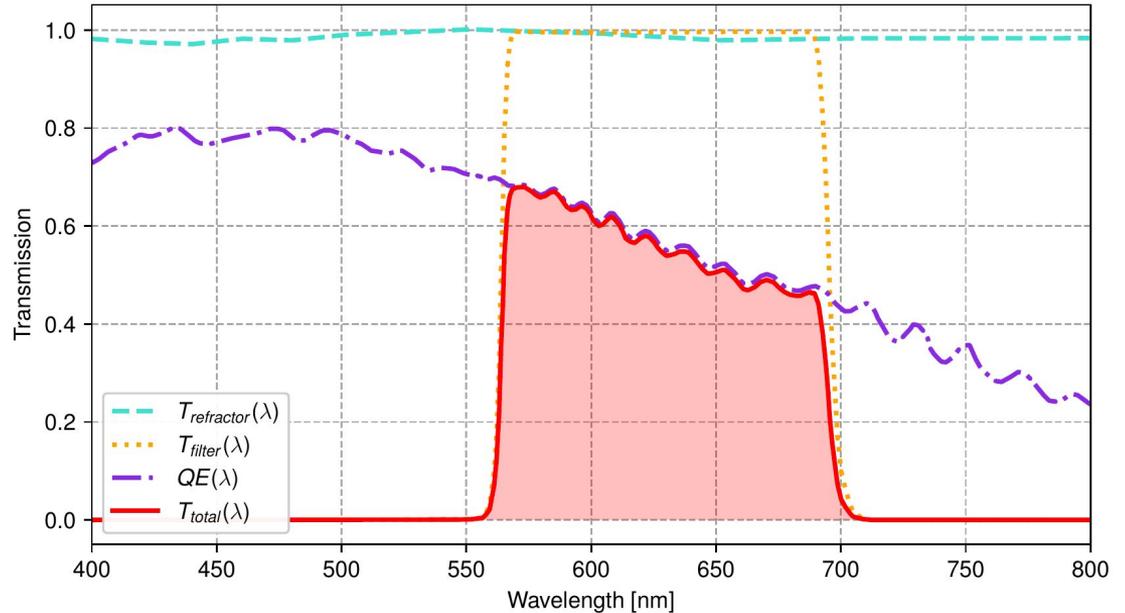


Setup expérimental



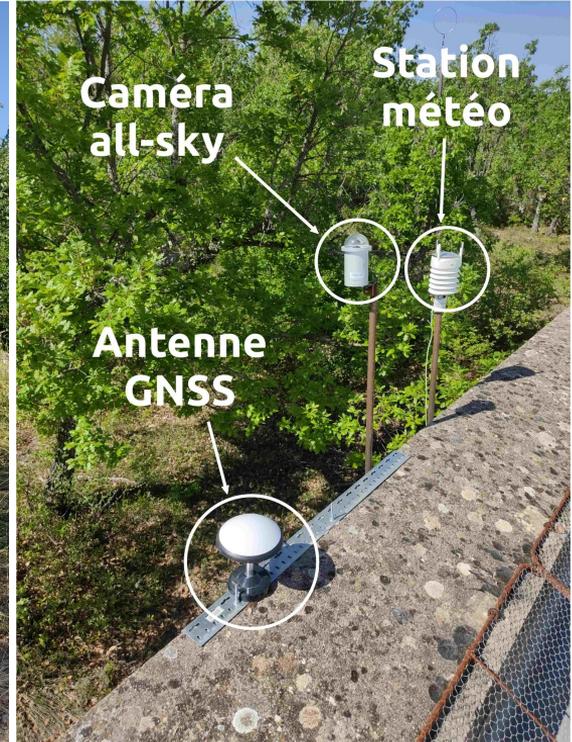
Spécifications instrumentales

- ZWO ASI183MM
- Bin 2X2
- 2.87 arcseconds/px
- Fixed gain 0.674 e-/ADU
- Fixed exp. time of 20 seconds
- Fixed $T = 0^{\circ}\text{C}$
- Apochr. refractor
- $2.18 \times 1.46 \text{ deg}^2$
- f/4.8 aperture
- SDSS r' filter
- Equatorial mount
- No darks (very low dark current noise)
- No flats (no available screen and too wide for sky flat)

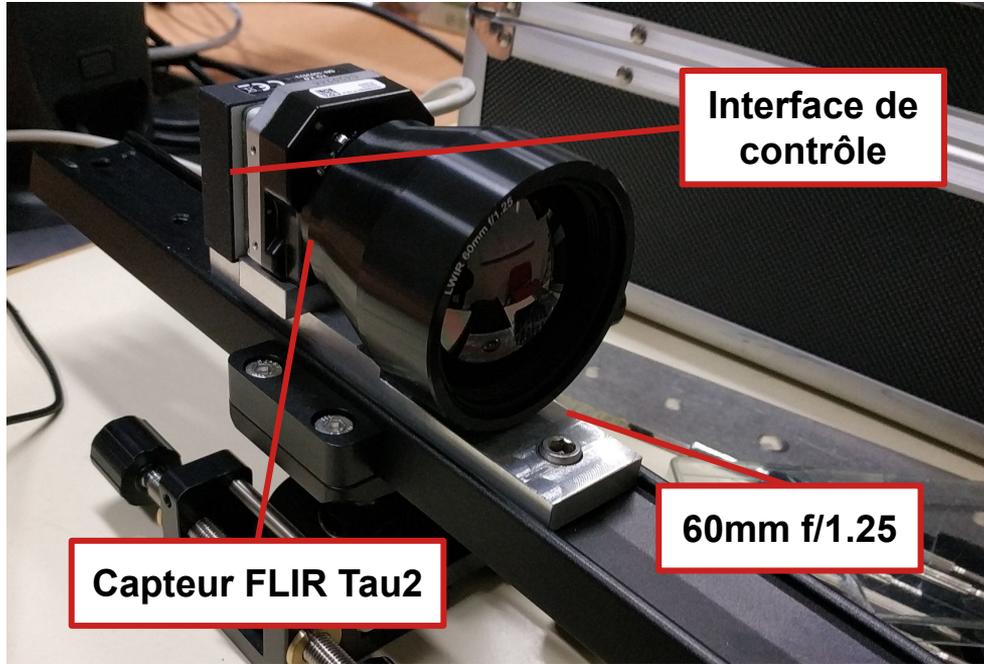


Instrumentation auxiliaire à StarDICE

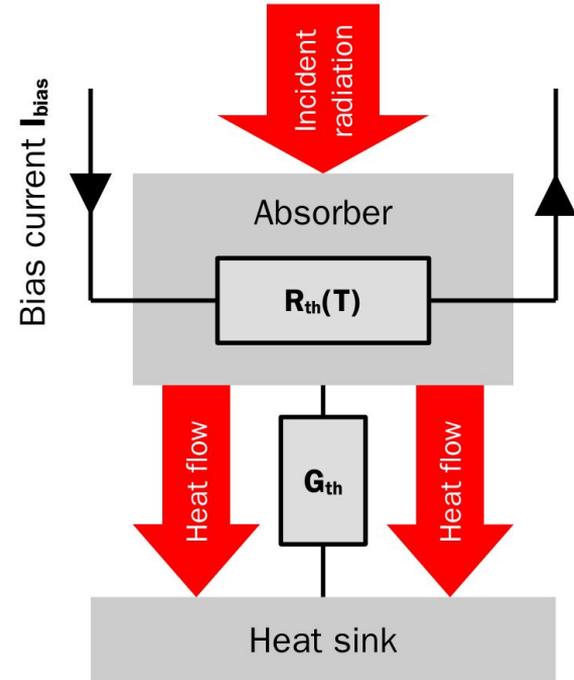
- Équipement complémentaire dédié à la modélisation de l'atmosphère :
 - Station météo
 - Antenne GNSS → vapeur d'eau atmosphérique
- ... et au monitoring environnemental :
 - Caméra all-sky
 - Moniteur de seeing



Caméra infrarouge thermique

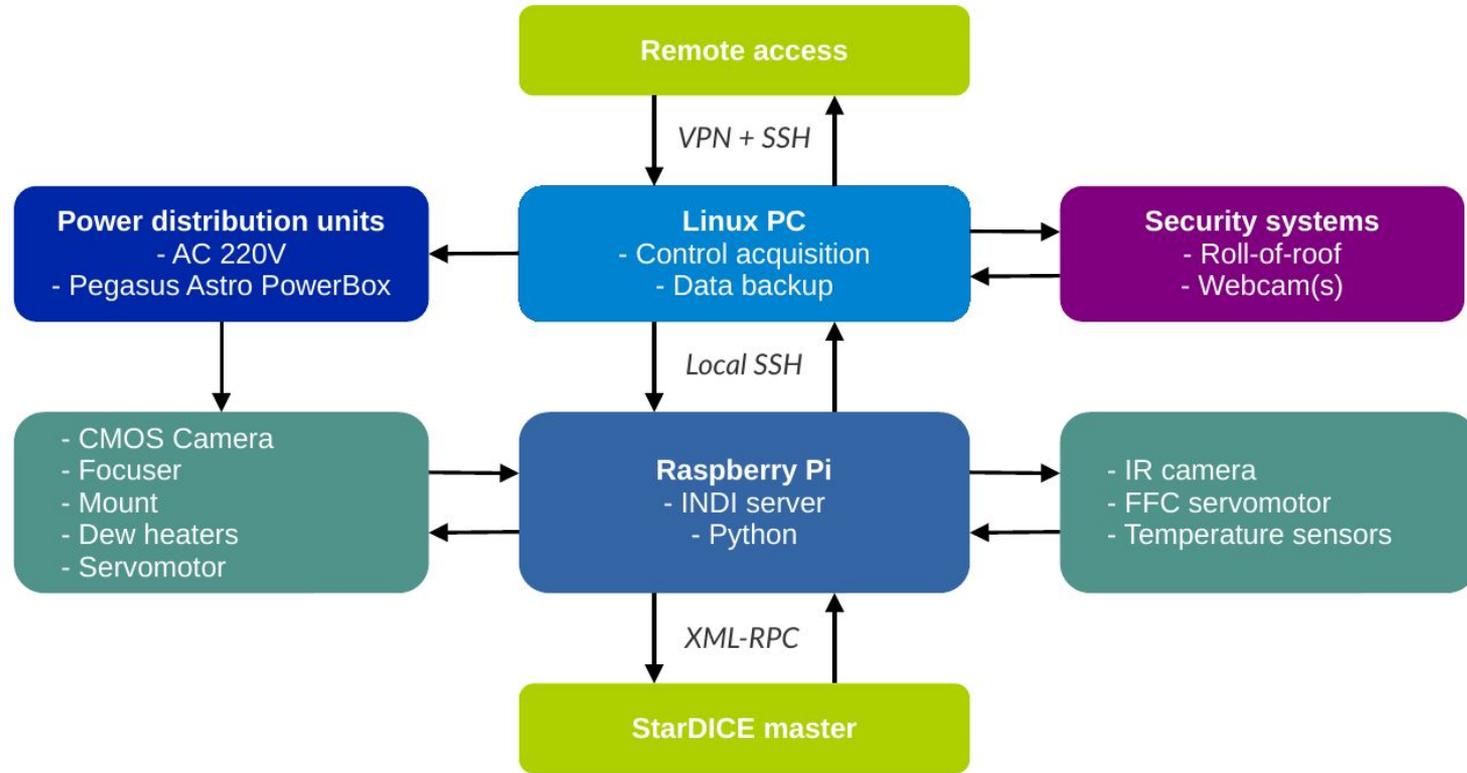


(1) Aperçu de l'instrument



(2) Schéma thermique équivalent d'un bolomètre = un pixel

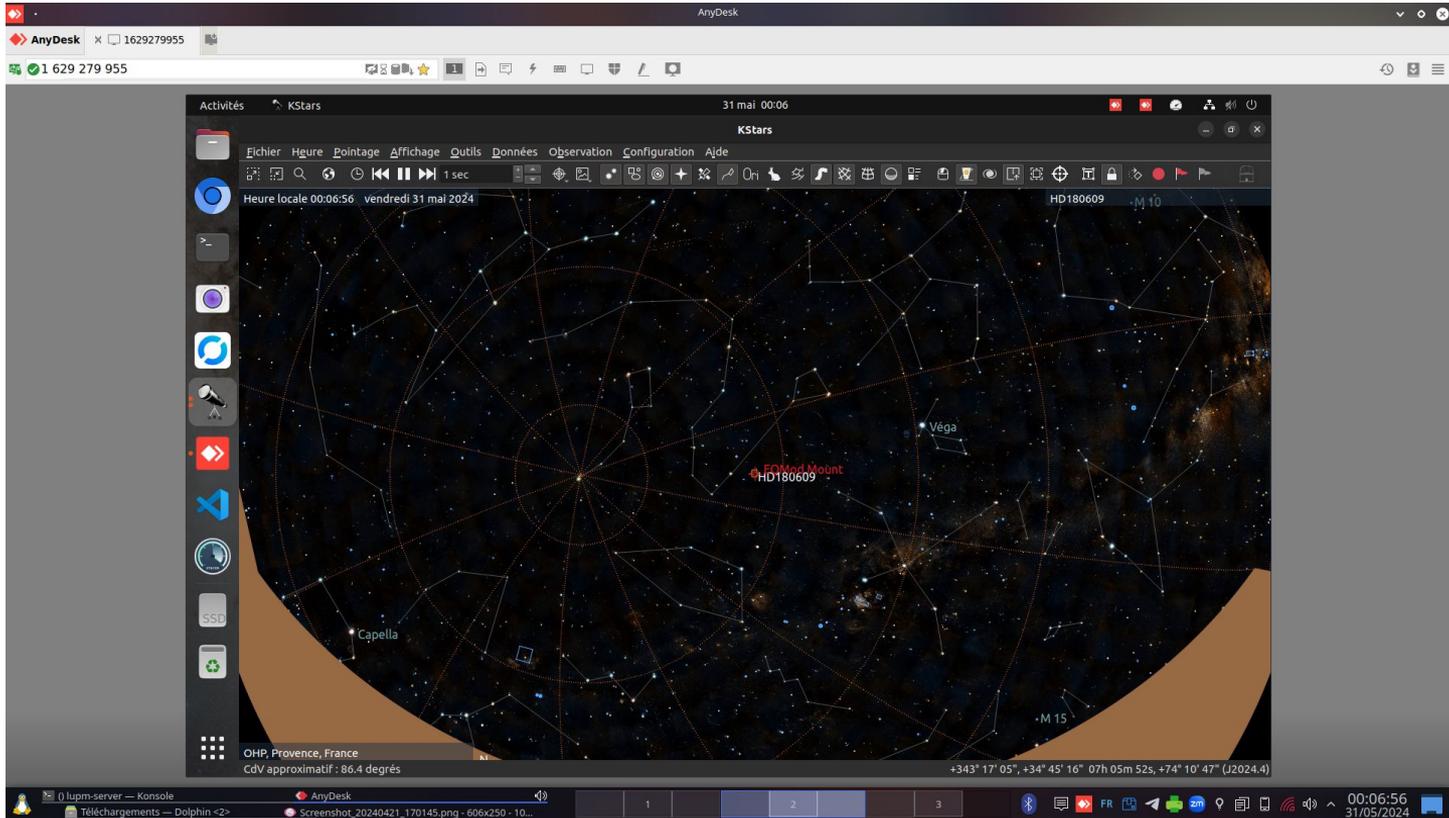
Pilotage à distance



Pilotage à distance

- 2 moyens :
 - SSH
 - Remote desktop (“bureau à distance”)
- Ouverture du toit par un tiers ou via un GUI :
⇒ groupe Signal pour communiquer avec les autres occupants du bâtiment
- Scripts lancés manuellement sur un terminal + visualisation via planétarium Kstars
- Fermeture automatique si :
 - Humidité > 90%
 - Pluie
 - “Nuages”
 - Jour

Pilotage à distance



Pilotage à distance

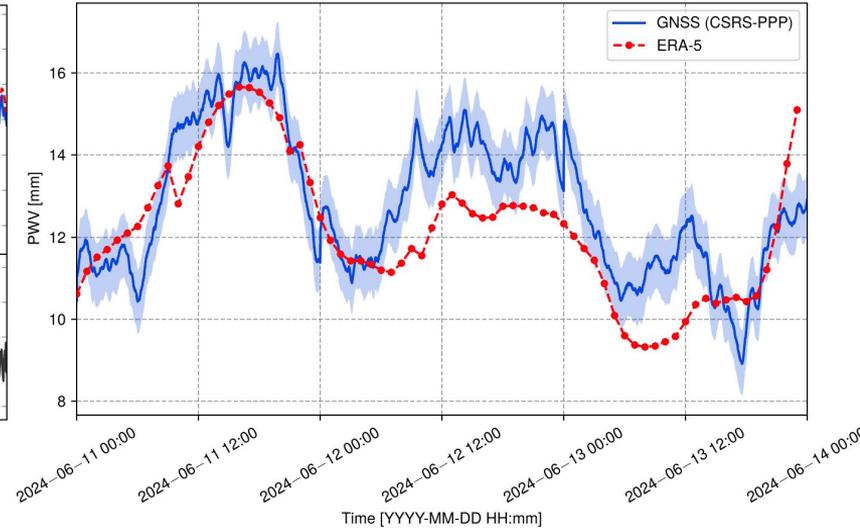
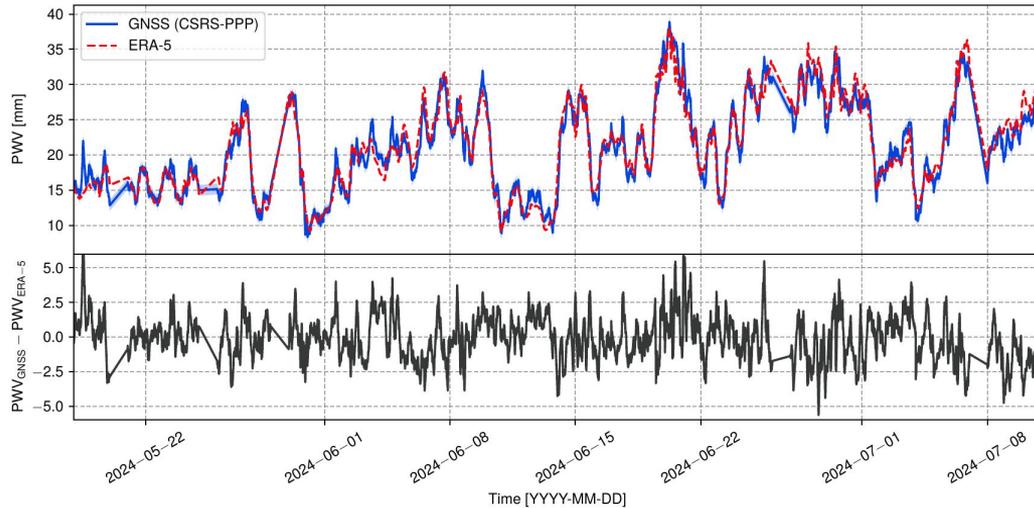
The screenshot displays a web browser window titled "Interface / Etat_General - Thorium" with the URL "http://192.168.128.60". The interface is organized into several sections:

- Header:** Includes the IRTS logo (Institut de Recherche en Technologies pour les Systèmes) and navigation buttons for MAIN, GENERAL, REGLAGES, and LOG.
- Status Bar:** Shows "SAIA Burgess - PCD3M5560" with timestamps "13.06.24" and "20:27:08".
- ETAT DE L'INSTALLATION:** A panel with indicators for POSITION PORTE, POSITION TOIT, MODE (set to AUTO Actif), LUMIERE TELESCOPE, LUMIERE Salle de contrôle, ECRAN DE FLAT (0.01 A), CAMERA CCD (0.00 A), and BIT DE VIE ACTIF.
- FERMETURE PRIORITAIRE:** A panel with indicators for FERMETURE PRIORITAIRE (0 min), PLUIE ANALOGIQUE - ON/OFF (2.98 V), VENT - km/h (4.33 km/h), TEMPERAUTRE DE ROSE °C (5.45 °C), TEMPERAUTRE LOCAL °C (14.67 °C), DETECTEUR DE NUAGE, COUPURE SECTEUR, and PERTE COMMUNICATION.
- DEFAUT INSTALLATION:** A panel with indicators for ARRET D'URGENCE, PILE AUTOMATE, DEFAUT PORTE, and DEFAUT TOIT.
- ETAT DE LA CARTE MEMOIRE:** A panel showing BUSY status and memory usage: MEMOIRE UTILISEE (31.776 kb) and MEMOIRE DISPONIBLE (98.181 kb).

Données auxiliaires

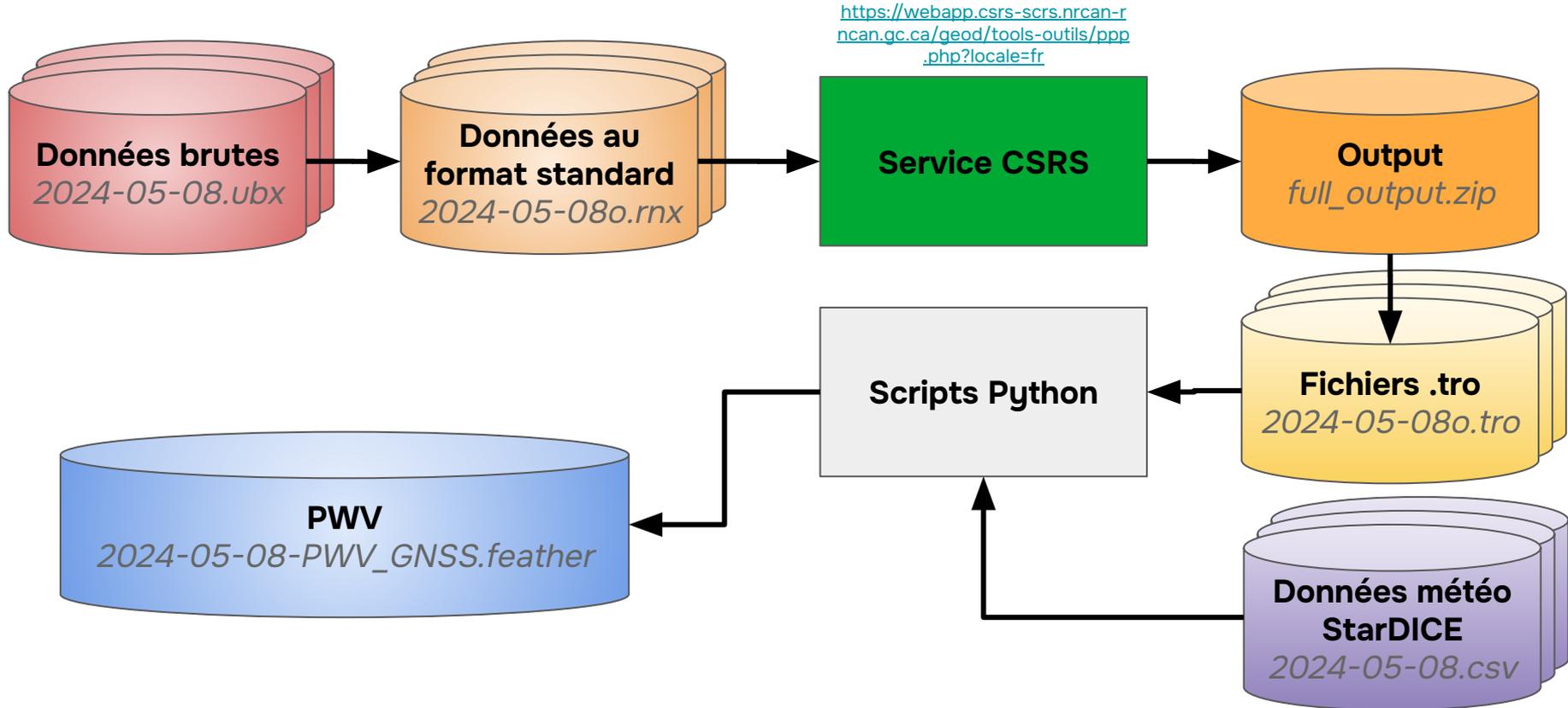
Vapeur d'eau précipitable

- Récepteur + antenne GNSS sur le bâtiment StarDICE installée en mars 2024
- CSRS-PPP : <https://webapp.csrscscs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>



Mesure locale capture plus finement les variations rapides
=> Indispensable pour les mesures radiométriques

Vapeur d'eau précipitable



Données externes

- **ERA-5 :**

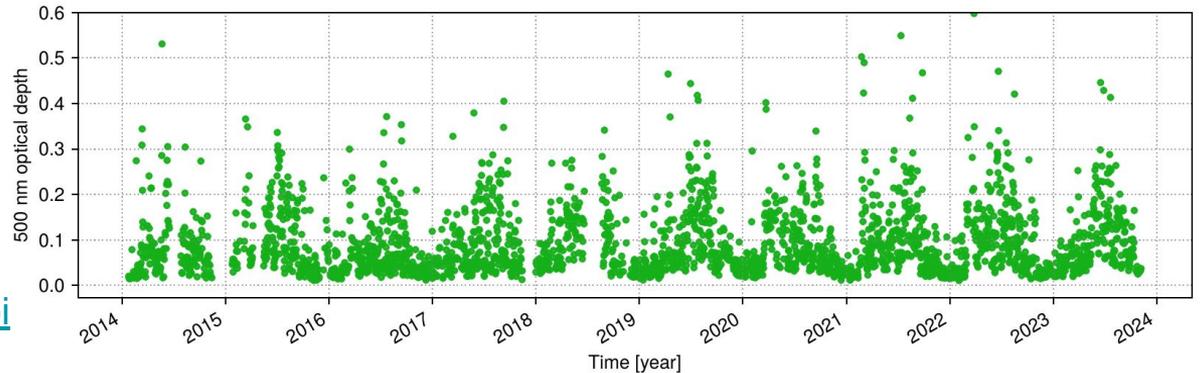
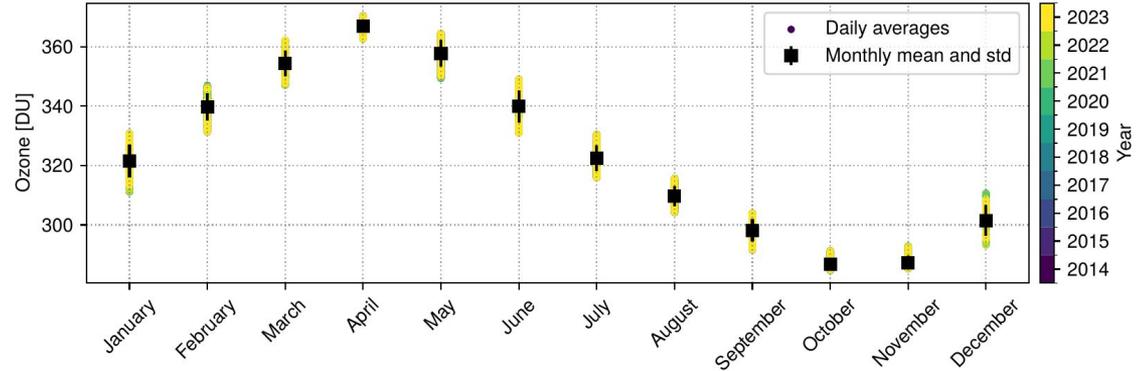
- Colonne totale d'ozone
- Albedo du sol
- Résolution temporelle de 1h
- Maille spatiale de 31 km
- package python : cdsapi

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>

- **AERONET :**

- Exposants d'angström
- Diurne uniquement

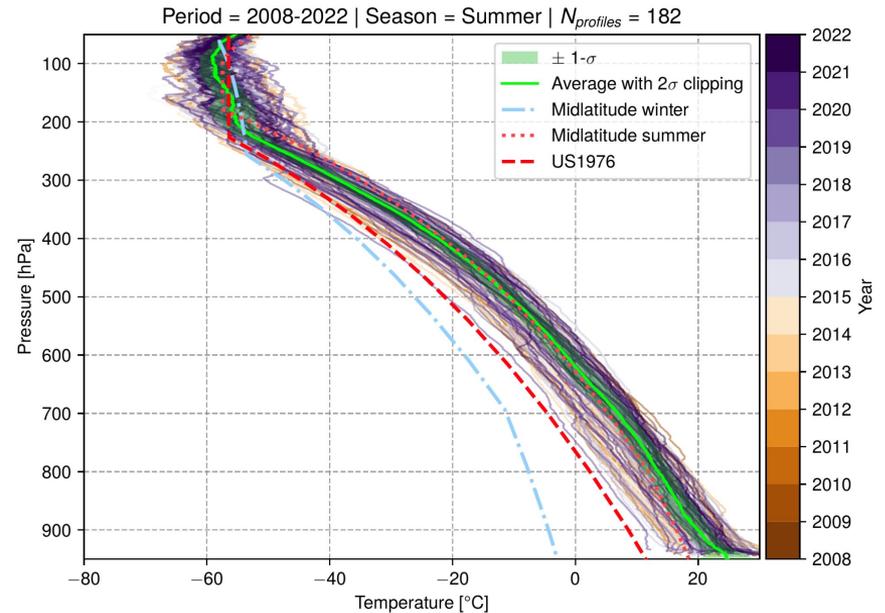
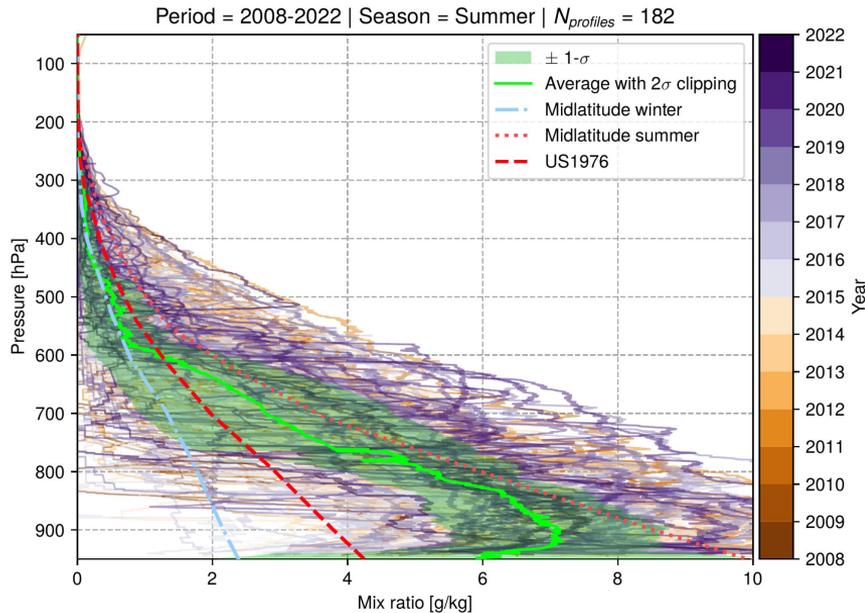
https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3



Profils atmosphériques

<https://ndacc-aeris.ipsl.fr/#/stations/OHP>

- Z = 650 m à Z = 35,000 m
- Période 2008-2022 :
 - 172 + 182 + 181 + 156 pour printemps, été, automne et hiver
 - 2.5- σ clipping



Analyse

Exigences pour la détermination de l'extinction grise

Un instrument sensible à la gamme infrarouge thermique (8 - 14 μm) pour mesurer simultanément le rayonnement du ciel clair + rayonnement de corps noir des nuages.



Caméra infrarouge thermique

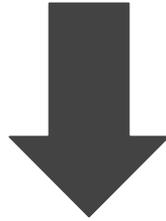
Méthode pour soustraire la contribution du rayonnement du ciel clair des mesures : $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_3 + \text{CO}_2$



Forward model robuste pour simuler l'atmosphère

Correction d'extinction grise

Utiliser les mesures radiométriques pour corriger individuellement les mesures photométriques des étoiles



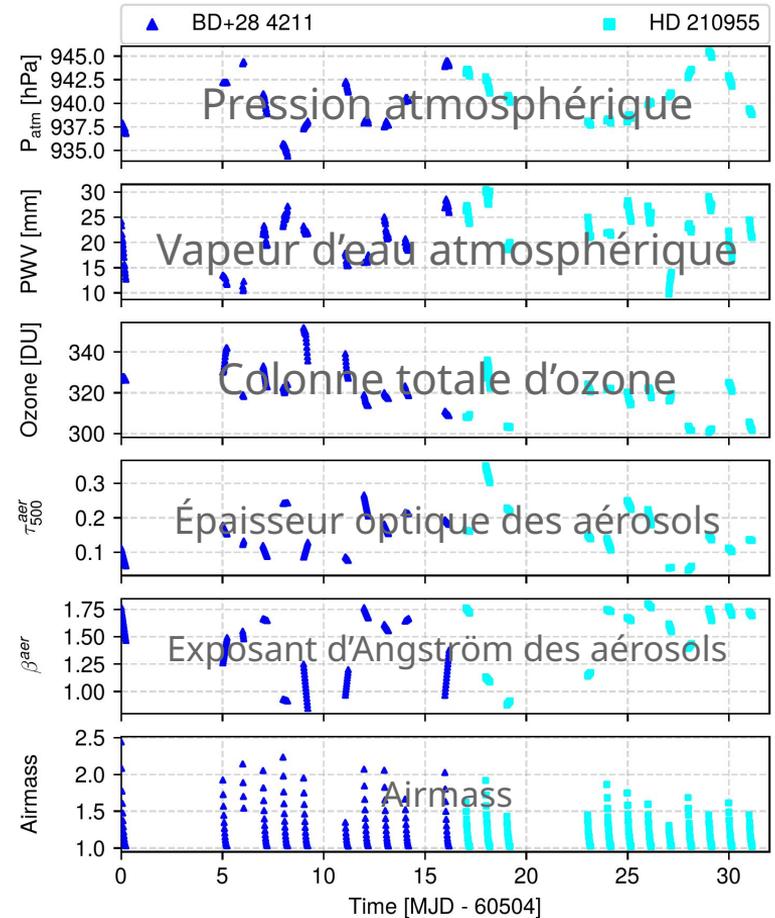
Campagne d'observations simultanées photométriques et radiométriques pour diverses conditions atmosphériques

Stratégie

1. Observations radiométriques et photométriques simultanées avec un setup expérimental dédié
2. Pré-traitement :
 - Implémentation d'une chaîne de réduction des données CMOS dédiée
 - Calibration radiométrique des images IR + empilement des images individuelles
3. Extraction :
 - Des flux photométriques de chaque source
 - Des radiances correspondantes aux positions de sources
4. Simulation d'une atmosphère par époque à partir des paramètres environnementaux **avec libRadtran** ⇒ **transmission chromatique optique + radiance infrarouge**
5. Calcul des résidus entre observations et simulations
6. Entraînement d'un modèle de correction sur une partie des sources ("calibration")
7. Application du modèle sur l'autre partie des sources ("test") pour évaluer ses performances

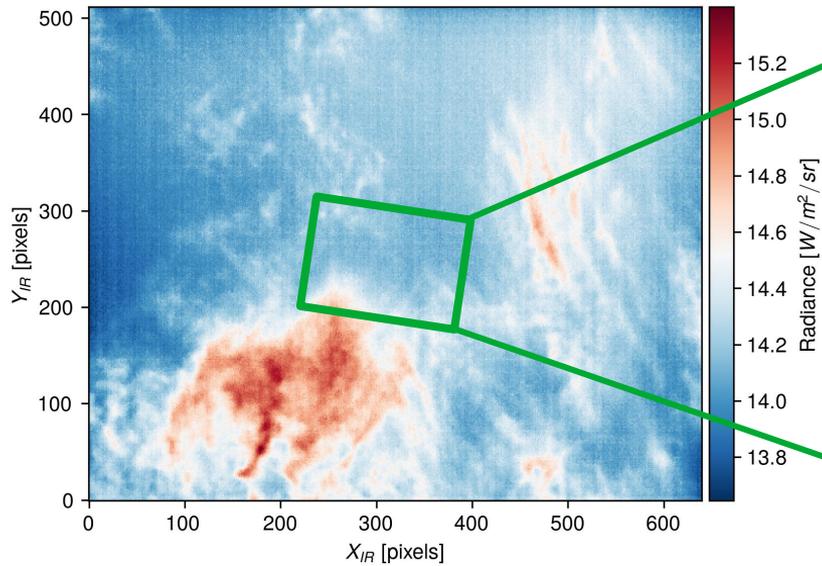
Campagne d'observations

- 23 nuits d'observation à distance entre mai et août 2024 → **conditions atmosphériques diverses**
- Suivi de 2 champs stellaires centrés sur **BD+28 4211** (CALSPEC) et **HD 210955**
- ~ **7000 images photométriques par champ** en bande SDSS r' uniquement
- Temps de pose fixe = 20 secondes
- ~ 75 images infrarouges par image photométrique



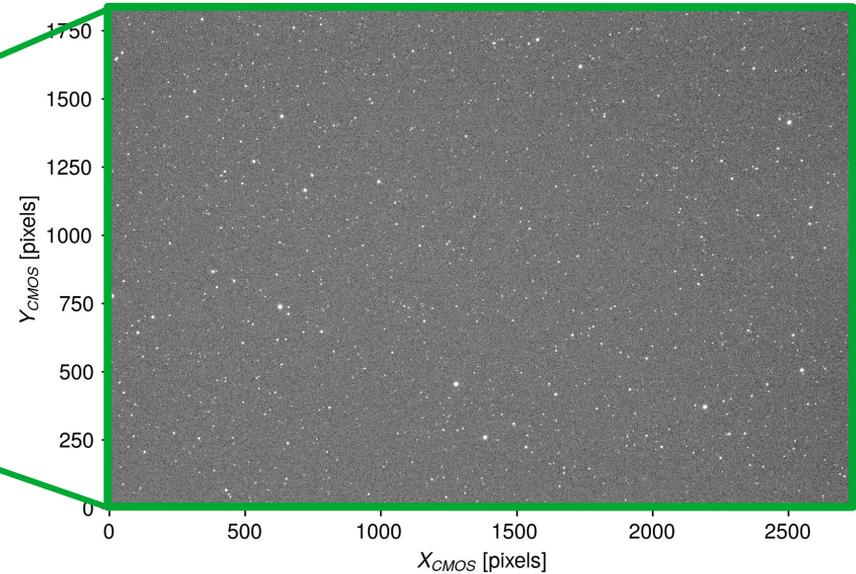
Exemples d'images

600 x 512 ; 58.7 arcsecondes/pixel



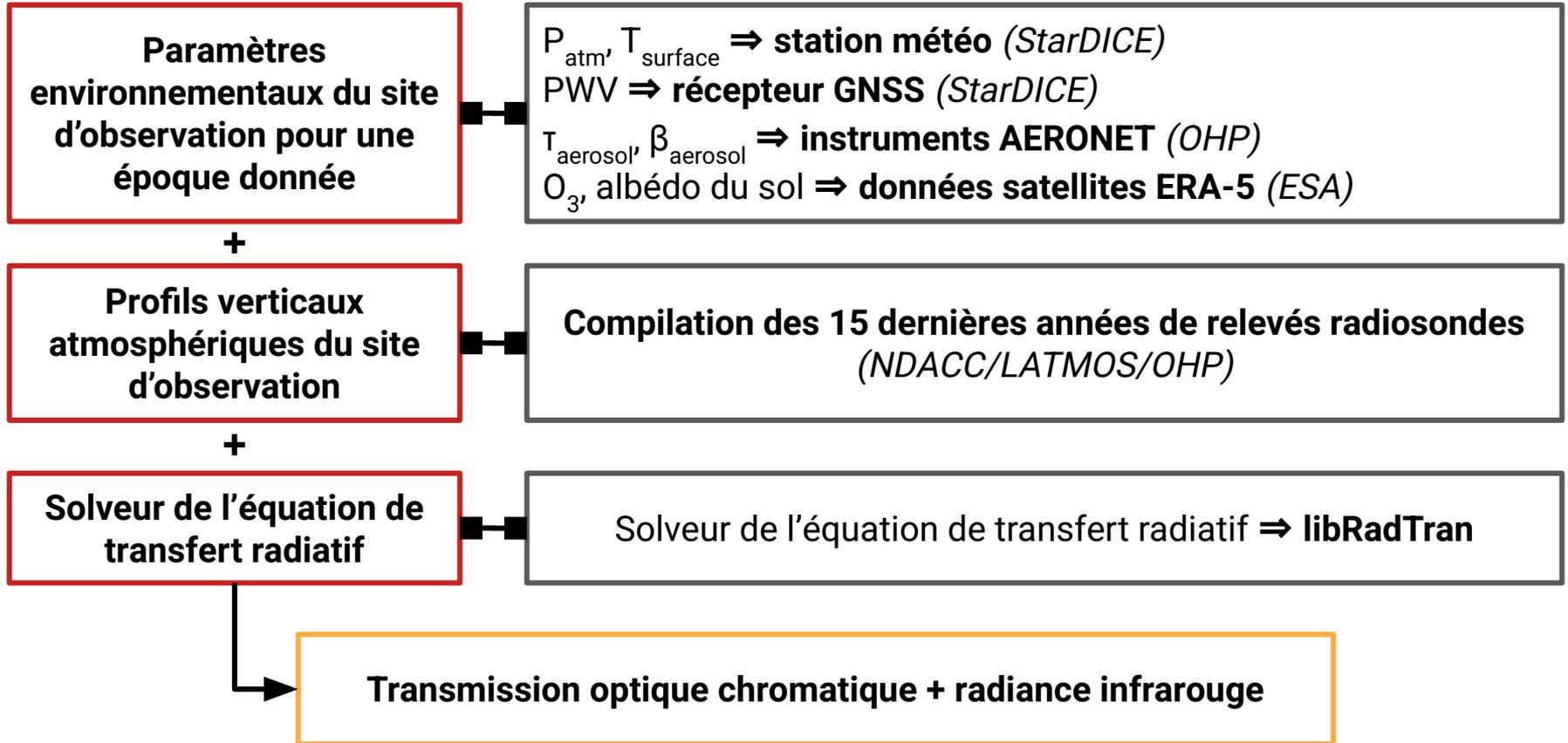
(1) Image infrarouge calibrée

2744 x 1836 ; 2.87 arcsecondes/pixel

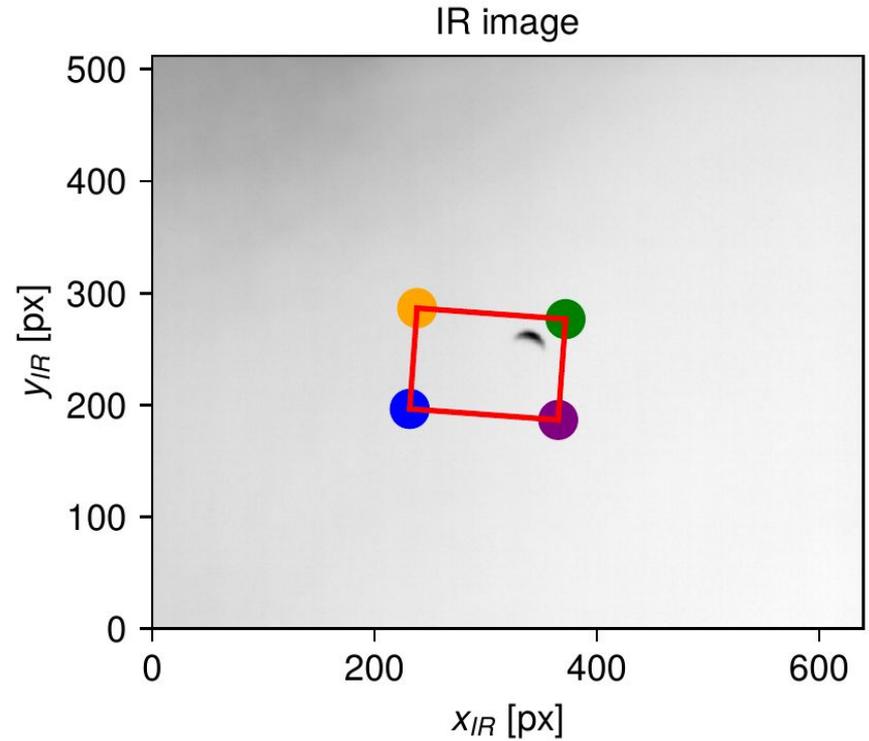
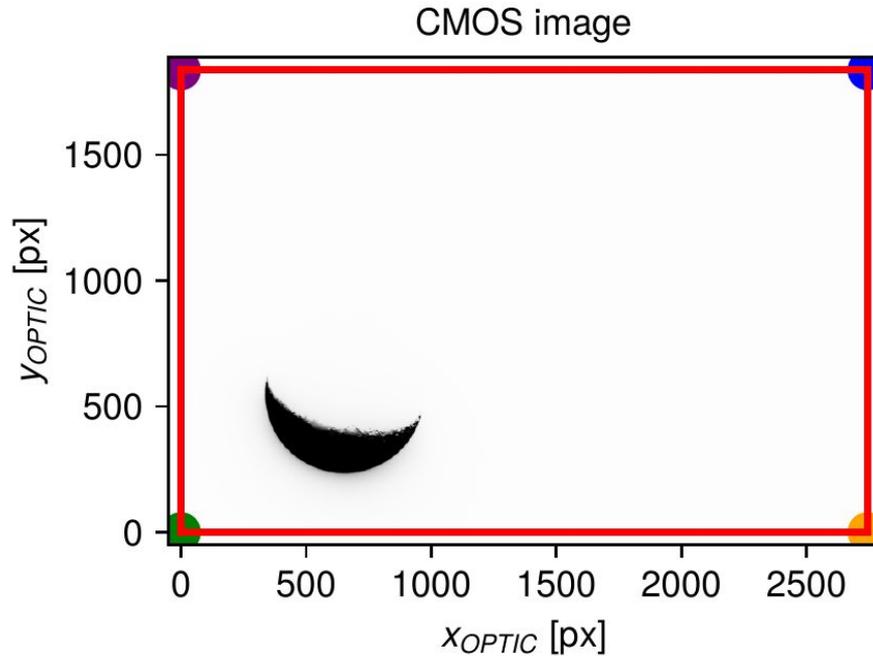


(2) Image photométrique

Modélisation de l'atmosphère



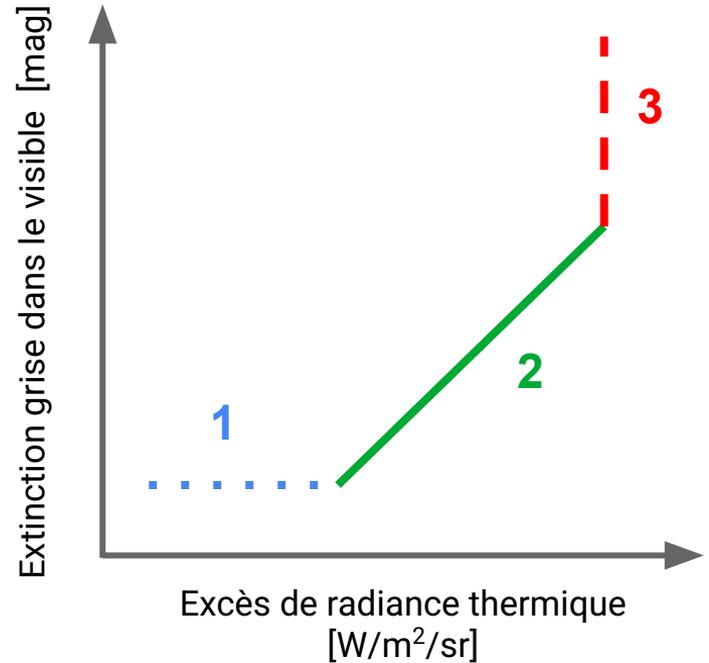
Alignement des champs



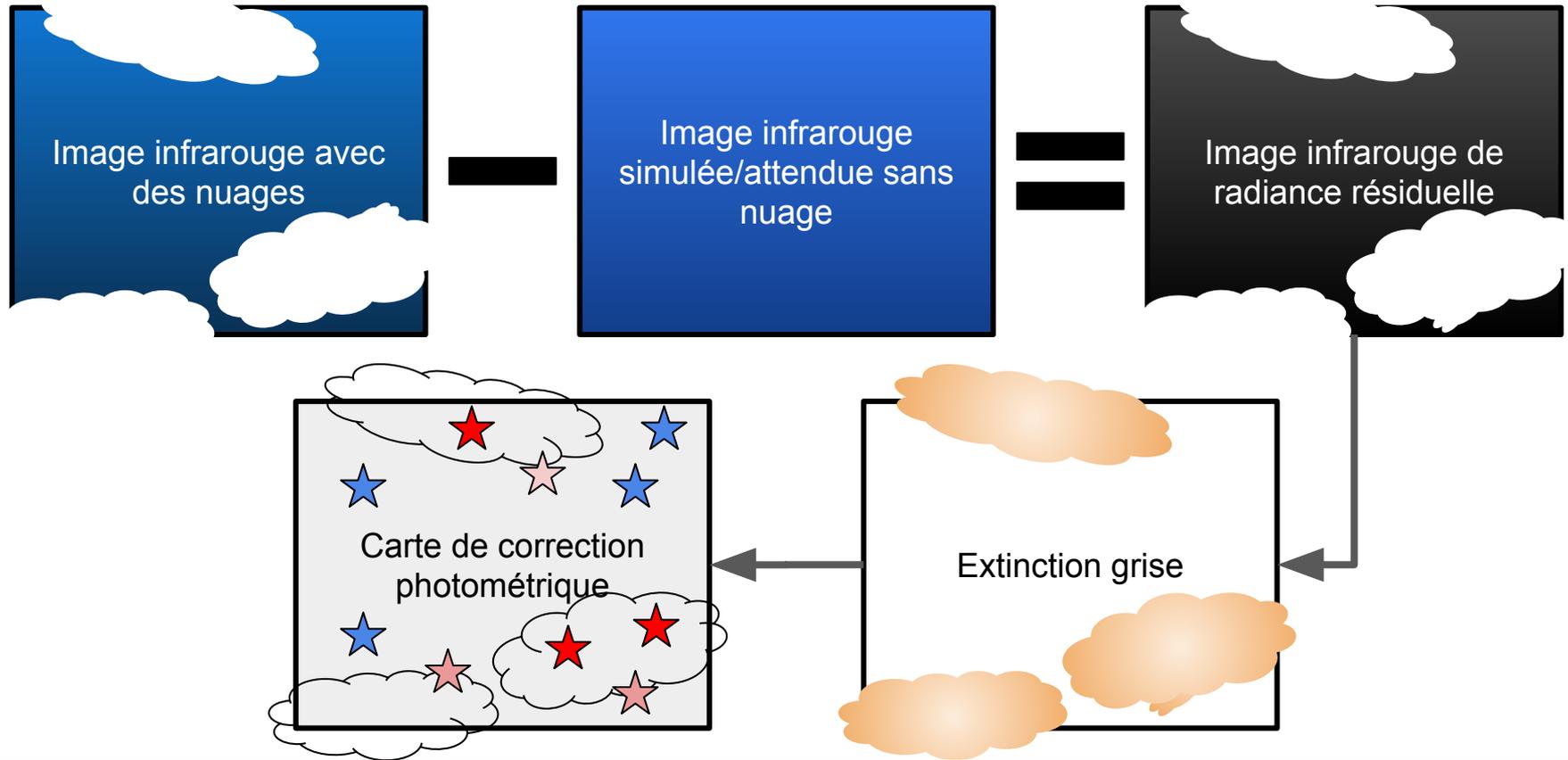
Sub-IR-pixel precision \Rightarrow match each star to pixel radiance

Allure du modèle de correction

1. Seuil de bruit de la caméra IR
2. Relation linéaire entre l'extinction optique et la radiance infrarouge thermique
3. Saturation de la radiance quand $\tau \gg 1$



Calcul des résidus de radiance radiométrique



Calcul des résidus de magnitudes photométriques

1. Simulation et soustraction de la contribution **chromatique atmosphérique** aux **observations photométriques** \Rightarrow **magnitude hors-atmosphère sans nuages**

$$m_{b,s,i}^{\text{TOA, obs}} = m_{b,s,i}^{\text{obs}} + \Delta m_{b,s,i}^{\text{pred}} \quad (1)$$

2. Calcul d'une **moyenne tronquée** à partir de la nuit aux "meilleures conditions" atmosphériques \Rightarrow **magnitude hors-atmosphère de référence**

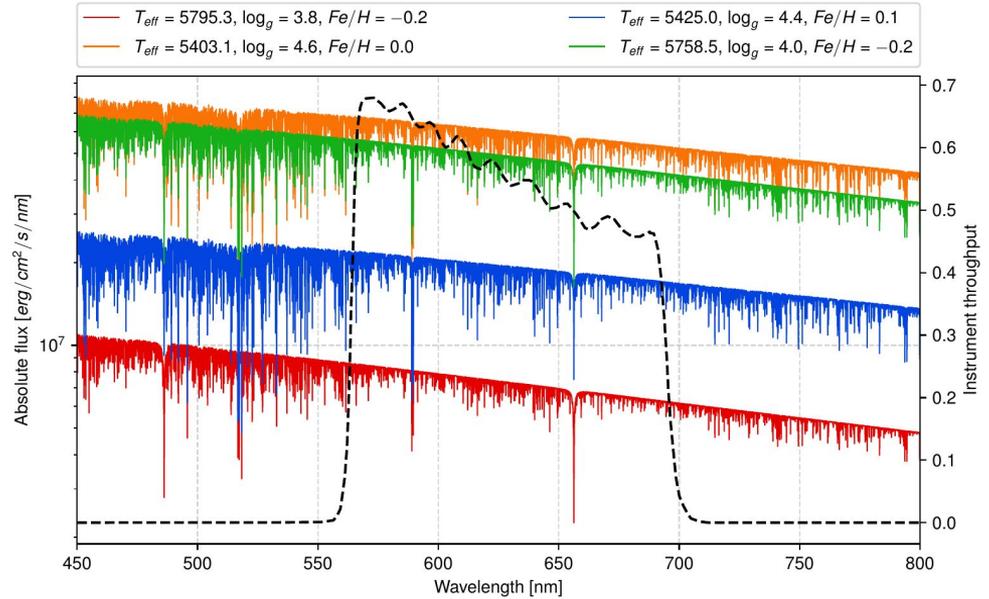
$$m_{b,s}^{\text{true}} \equiv \overline{m_{b,s}^{\text{TOA, obs}}} \quad (2)$$

3. Soustraction de la magnitude de référence à la magnitude observée \Rightarrow **extinction grise**

$$\delta m_{s,i} \equiv m_{b,s,i}^{\text{TOA, obs}} - \overline{m_{b,s}^{\text{TOA, obs}}} \quad (1) - (2)$$

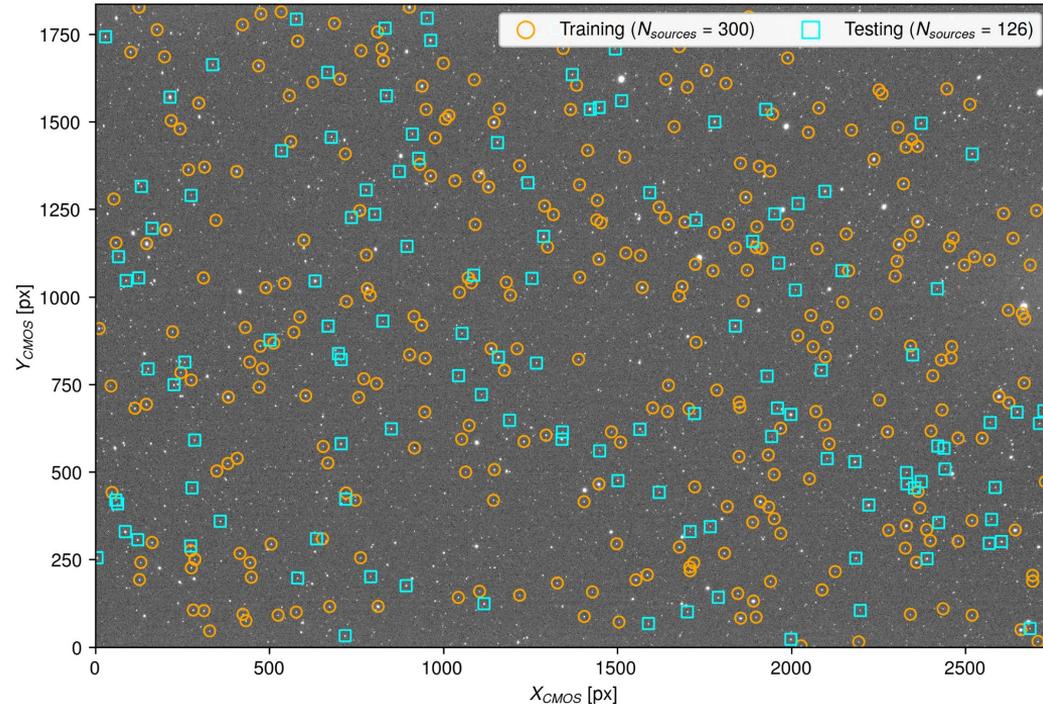
SEDs synthétiques

- Grilles AMBRE [de Laverny et al. 2012] depuis la base de données POLLUX [Palacios et al. 2010] <https://pollux.oreme.org/explore/AMBRE/>
- Interpolation linéaire 4D à partir des paramètres de Gaia DR3 : λ , T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$
- Pas nécessaire de connaître le rayon ou la distance de la source car les SEDs servent uniquement à estimer l'extinction en magnitude causée par la composante chromatique de la transmission atmosphérique.



Critères de sélection et catalogues d'objets

- **Objets issus du catalogue Gaia**
 - Photométrie forcée
⇒ **ensemble "non-biaisé" de sources**
 - Paramètres stellaires
⇒ **photométrie synthétique**
- **"Train-test split" :**
 - 70% des sources = catalogue "training"
⇒ **entraînement du modèle**
 - 30% des sources = catalogue "test"
⇒ **test des performances du modèle**

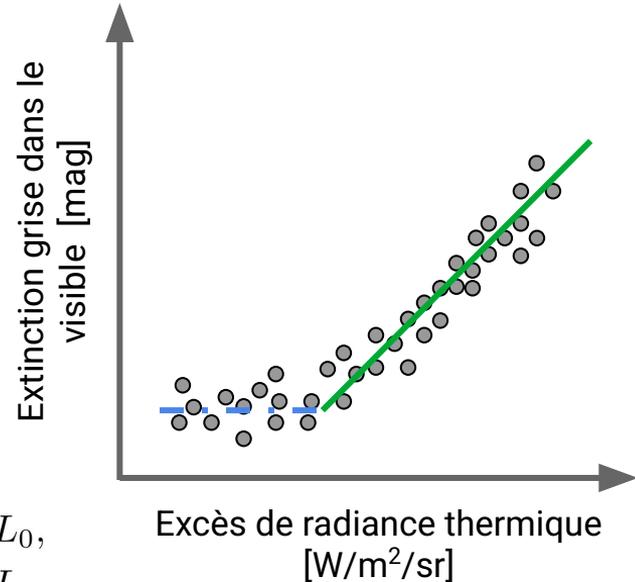


⇒ Environ 500-600 objets restants par image

Modèle de correction radiométrique

- Propriétés :
 - Considère l'intégralité des étoiles d'entraînement de l'image.
 - Ne suppose pas de structure spatiale particulière ⇒ **seule importe la radiance à la position de l'étoile**
- Ajustement du modèle via régression orthogonale ⇒ **considère les incertitudes sur la photométrie et la radiométrie.**
- Le modèle est défini comme :

$$\Gamma_i^{\text{gray}} = \begin{cases} \gamma_0 & \text{for } \Delta L_{s,i} < \Delta L_0, \\ \gamma_1 \times \Delta L_{s,i} + (\gamma_0 - \gamma_1 \times \Delta L_0) & \text{for } \Delta L_{s,i} \geq \Delta L_0. \end{cases}$$

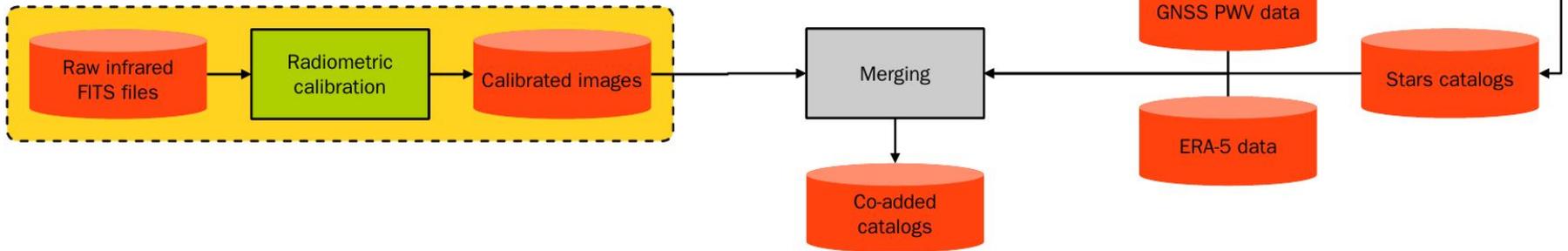


Pipelines de traitement

Photometry processing pipeline



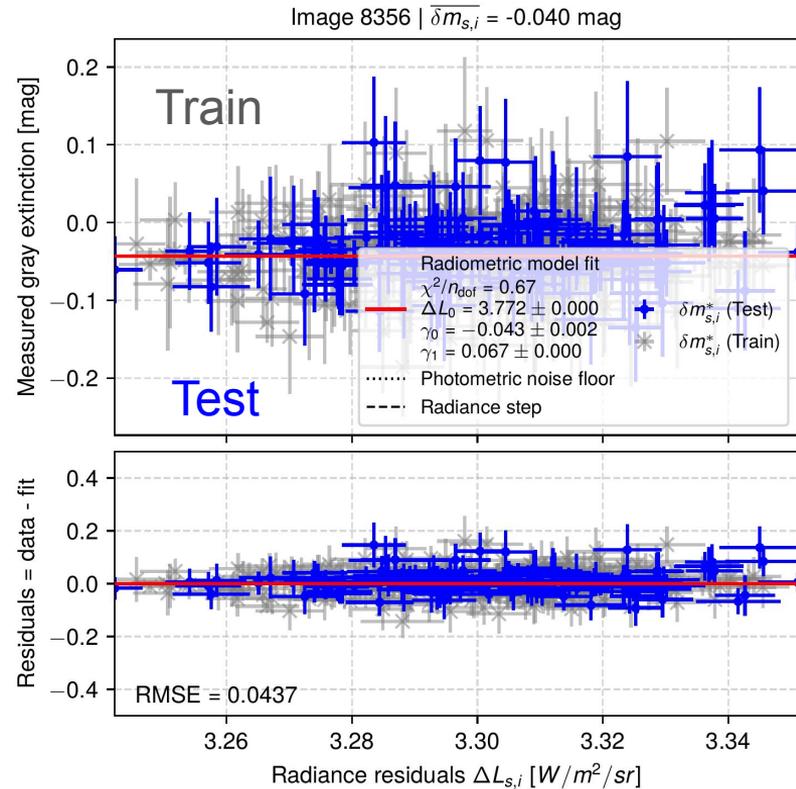
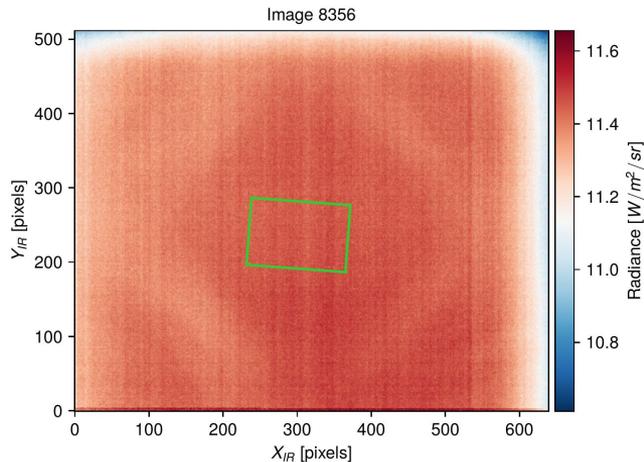
Radiometry processing pipeline

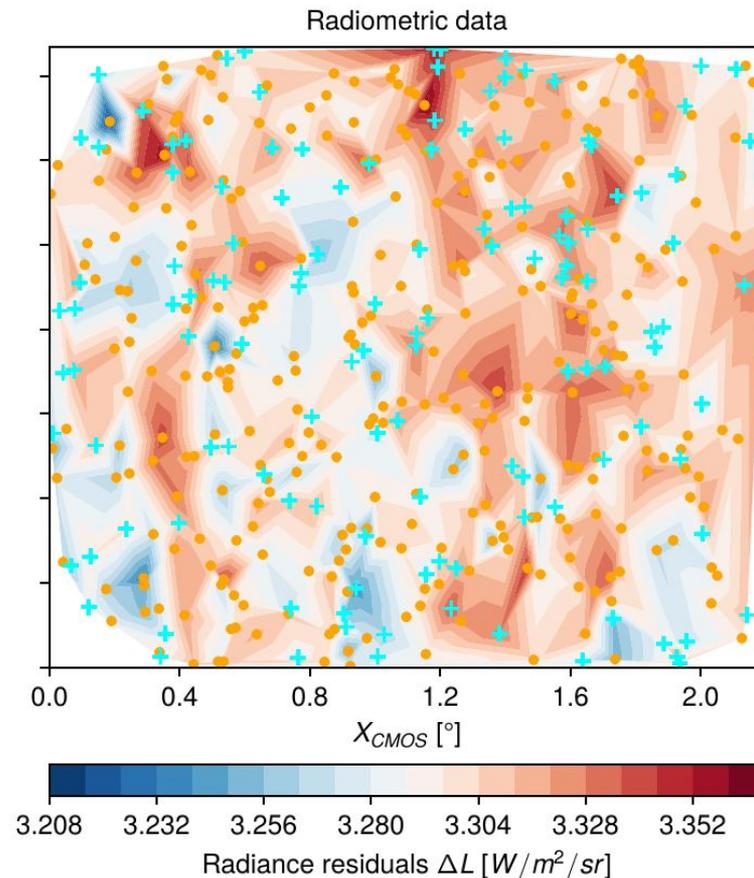
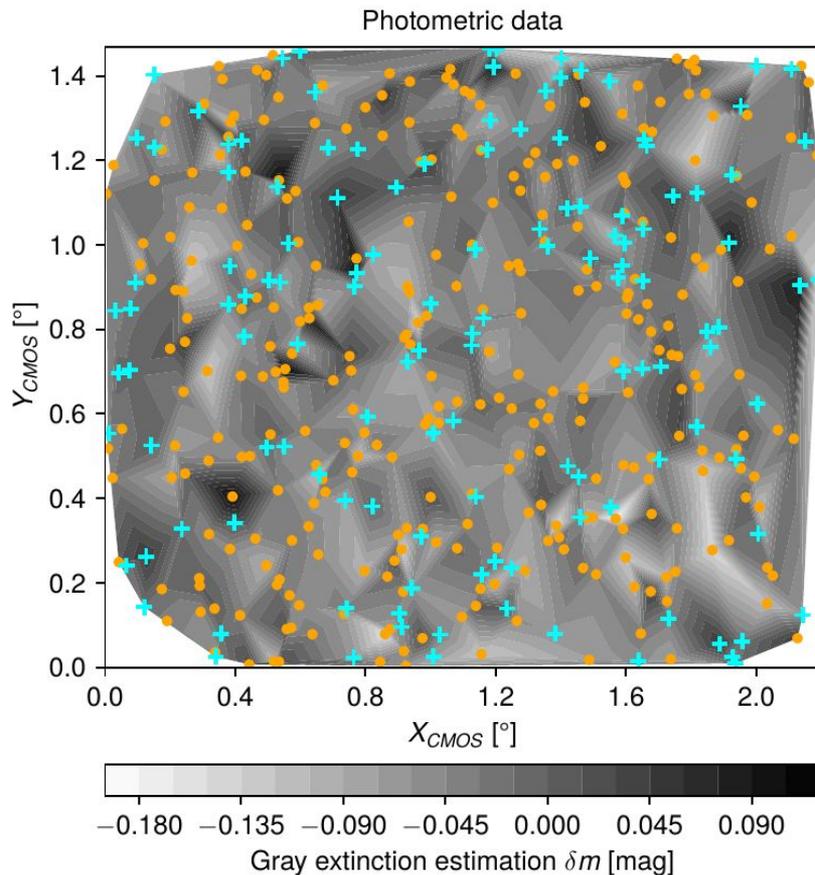


Résultats

Résultats : images individuelles

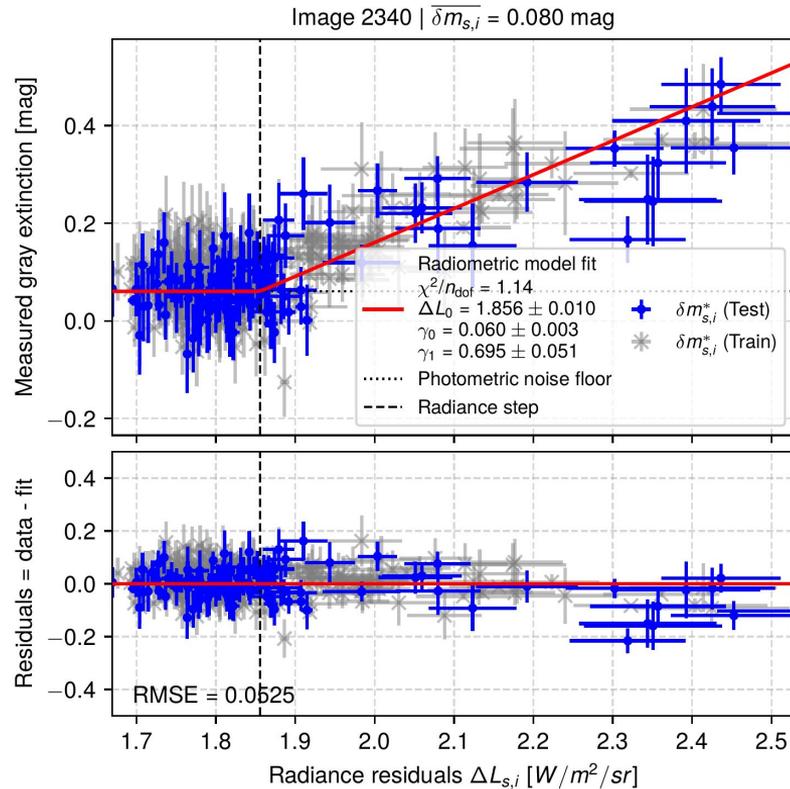
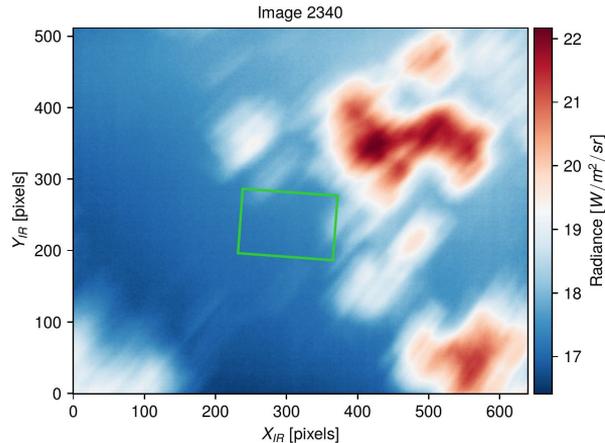
- Image 8356 → extinction grise quasi nulle + pas de structure
- Amplitudes très faibles des résidus radiométriques ⇒ sous le seuil de sensibilité

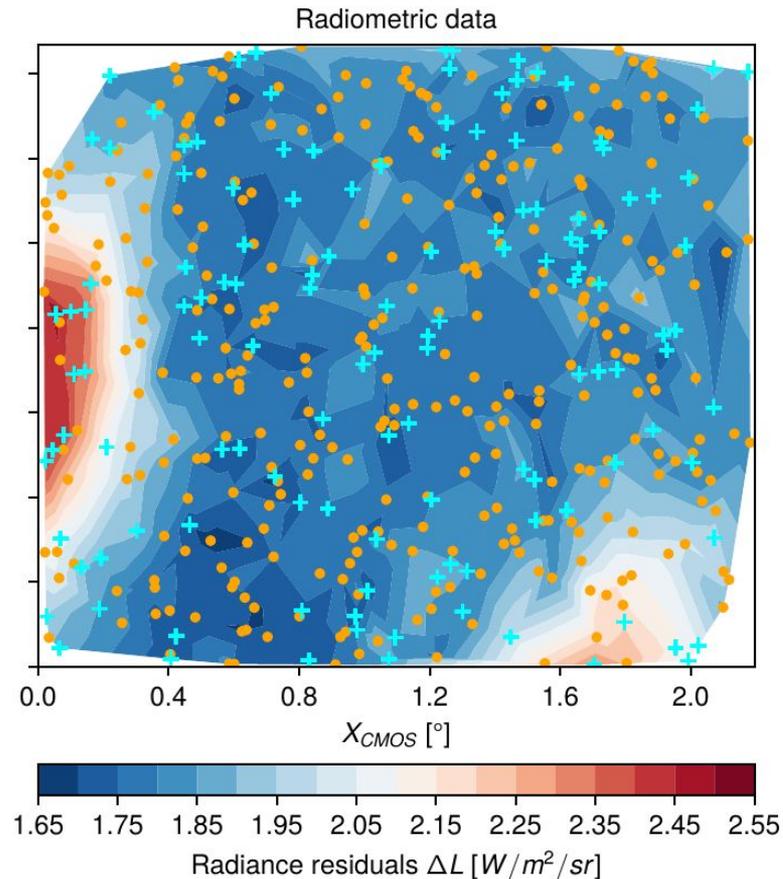
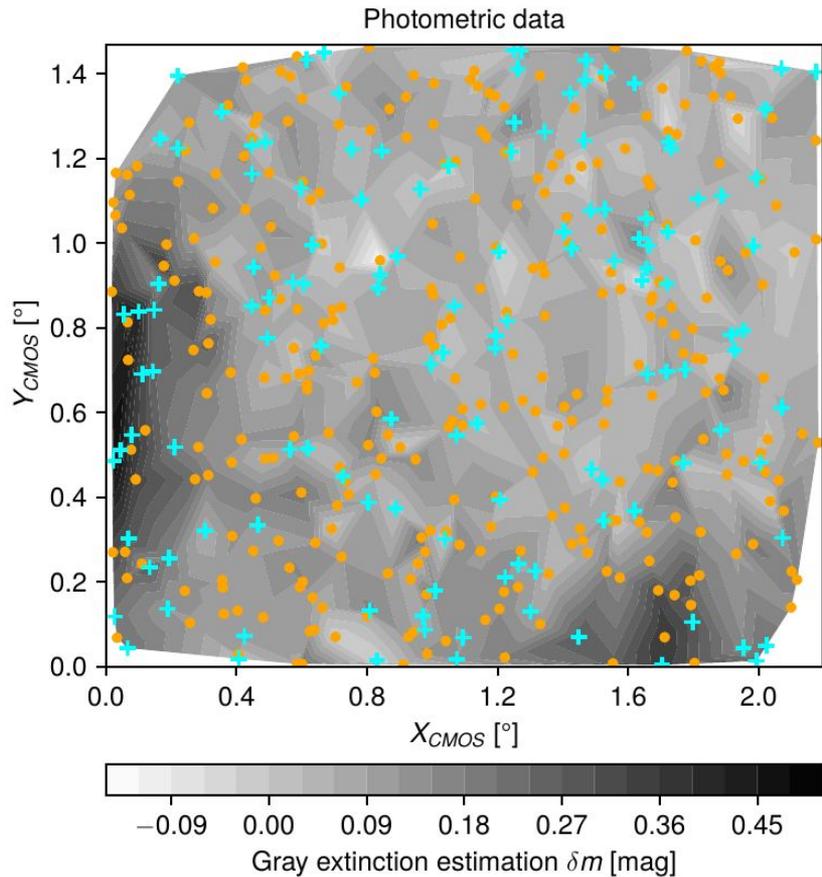


● Training data ($N_{sources} = 311$)+ Testing data ($N_{sources} = 128$)

Résultats : images individuelles

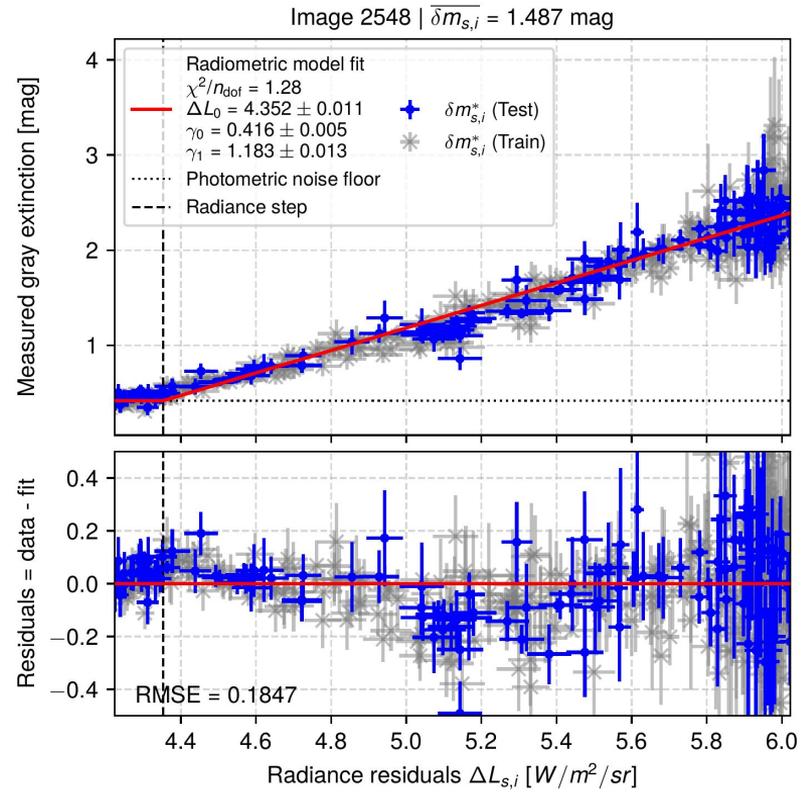
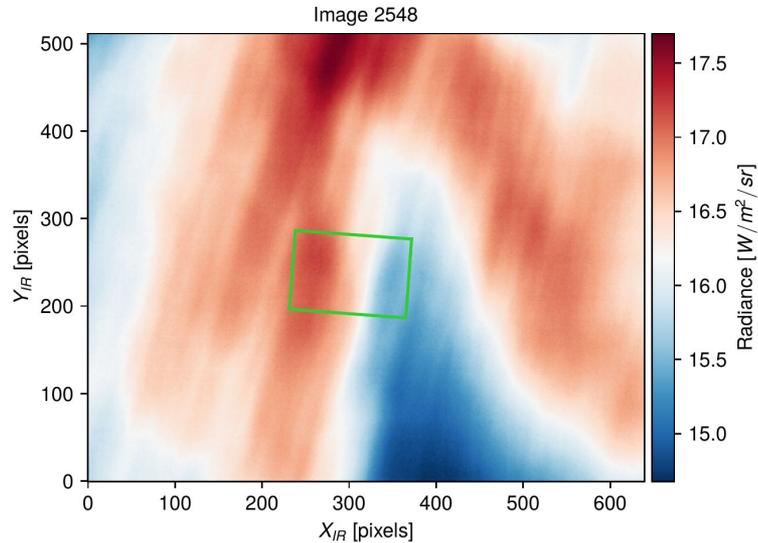
- Image 2340 → faible extinction grise moyenne 0.08 mag + structurée
- Quelques points de radiance élevée permettent d'ajuster la droite
- Le modèle "piecewise" permet d'ajuster la partie sous le seuil de détection

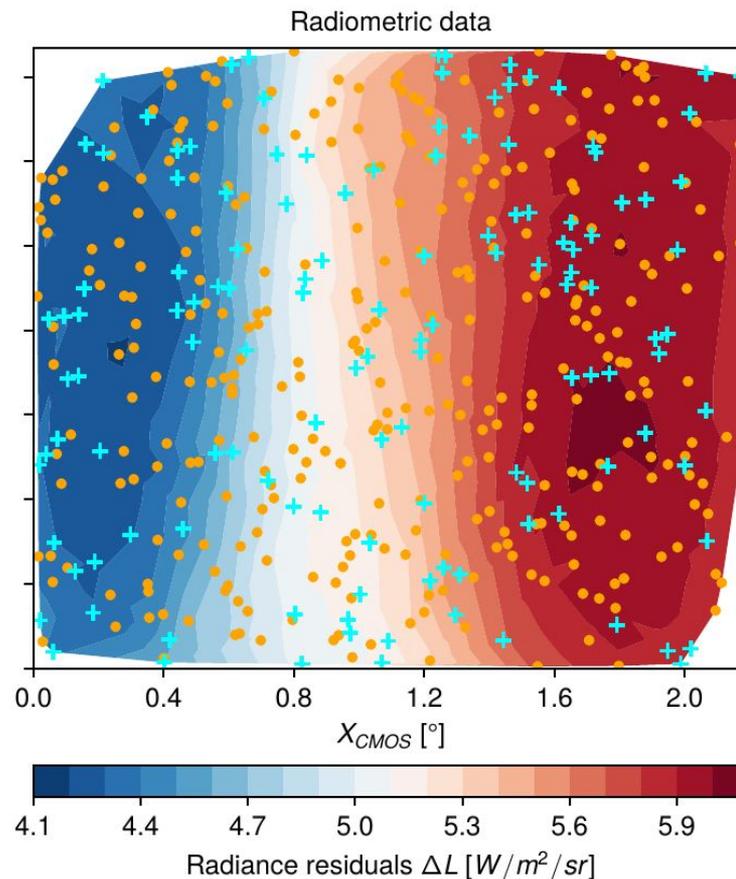
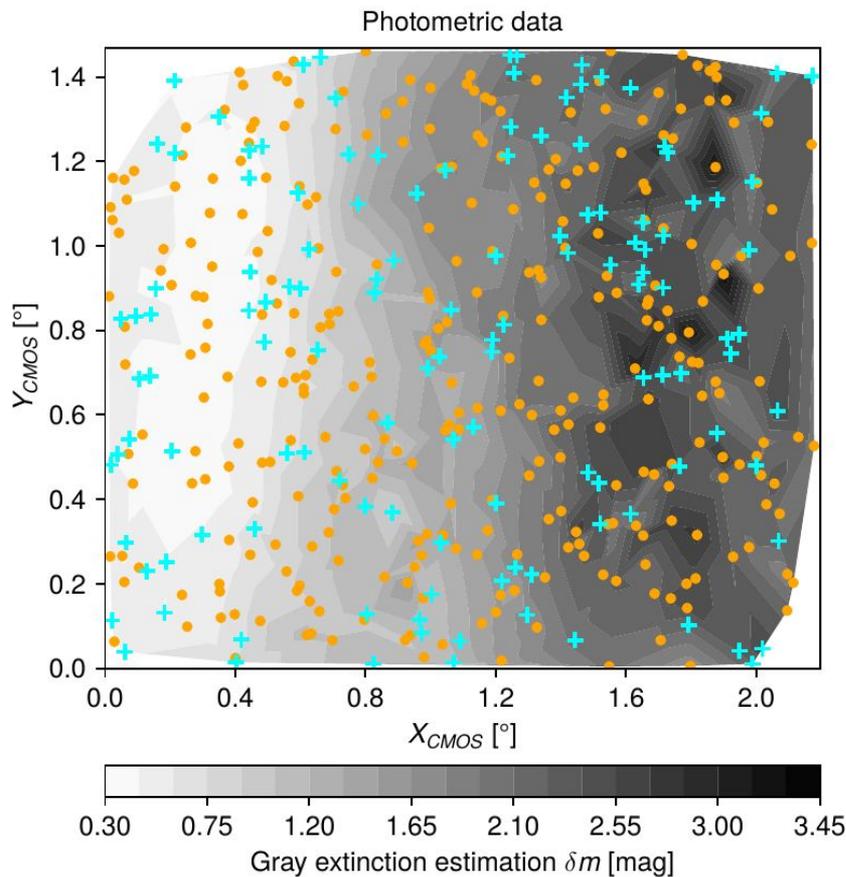


● Training data ($N_{sources} = 320$)+ Testing data ($N_{sources} = 129$)

Résultats : images individuelles

Image 2548 → forte extinction grise
moyenne 1.487 mag + très structurée
= cas extrême

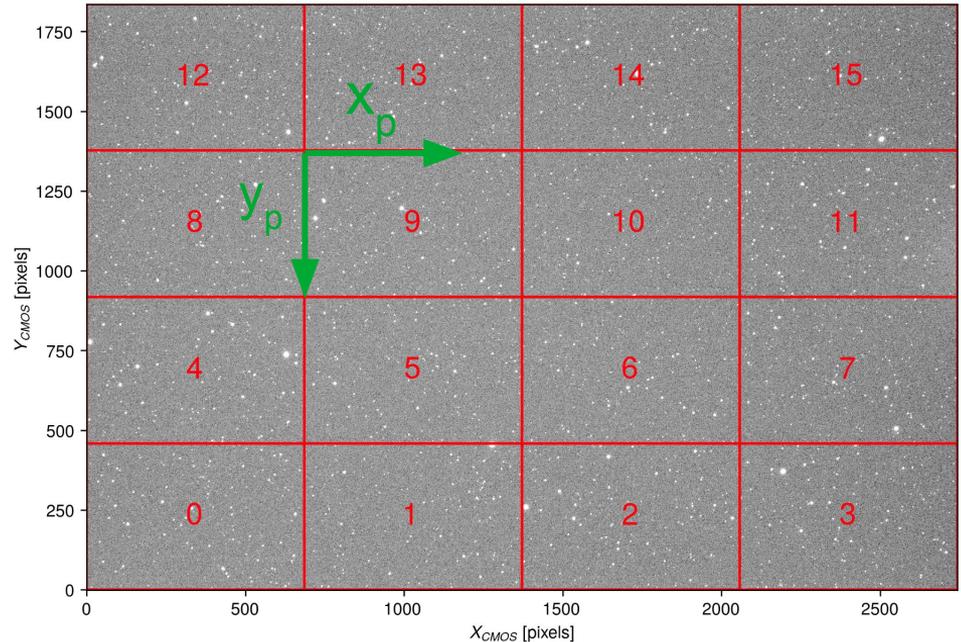


● Training data ($N_{sources} = 317$)+ Testing data ($N_{sources} = 128$)

Modèle de correction photométrique

- Référence pour comparer la performance du modèle de correction basé sur les mesures radiométriques
- Définition de patches sur l'image
⇒ ~30 étoiles/patch
- Ajustement d'une fonction polynomiale 2D par patch p sur chaque image i
⇒ **modélisation empirique de la structure nuageuse**

$$\Upsilon_{p,i}^{\text{gray}}(x_p, y_p) = \xi_{(0,0)}^{\text{gray}} + \xi_{(1,0)}^{\text{gray}} x_p + \xi_{(0,1)}^{\text{gray}} y_p + \xi_{(2,0)}^{\text{gray}} x_p^2 + \xi_{(1,1)}^{\text{gray}} x_p y_p + \xi_{(0,2)}^{\text{gray}} y_p^2$$

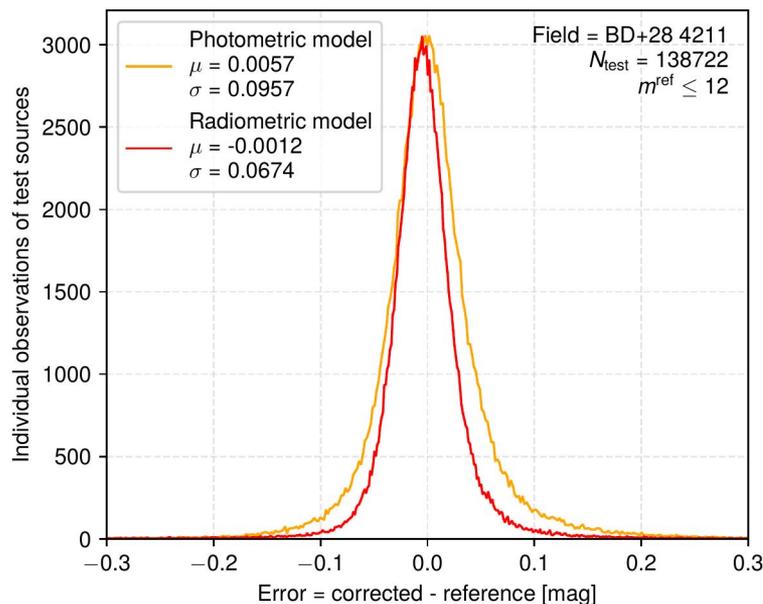
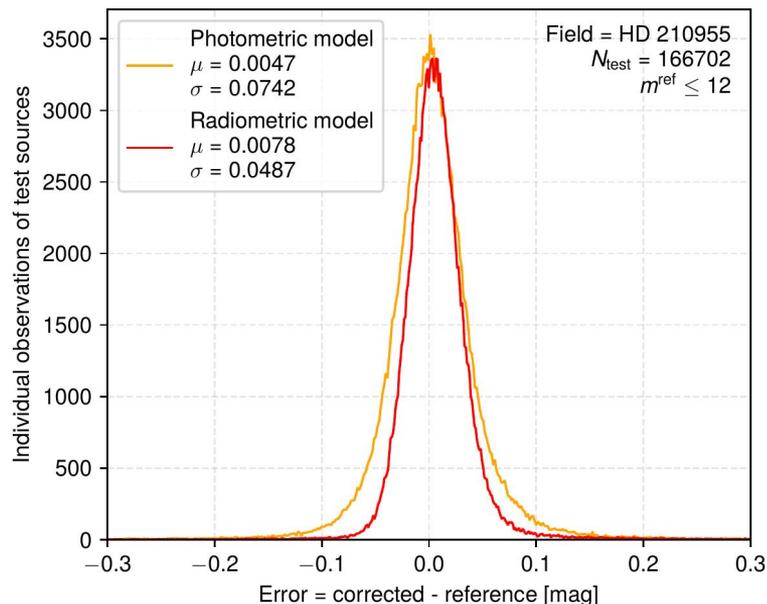


Performances globales

- Coupure de qualité \Rightarrow étoiles avec une incertitude photométrique ≤ 0.04 mag
- Erreur de correction pour chaque source s dans chaque image i :

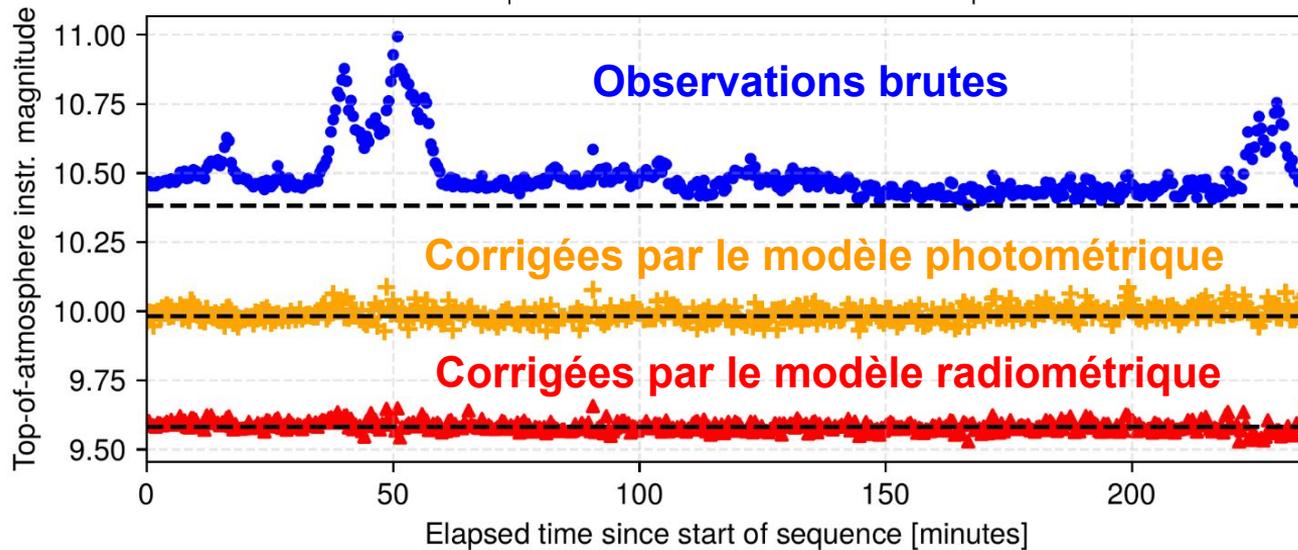
$$\epsilon_{b,s,i} = m_{b,s,i}^{\text{corr}} - m_{b,s}^{\text{true}} = (m_{b,s,i}^{\text{obs}} - \delta_{b,s,i}^{\text{gray}}) - m_{b,s}^{\text{true}}$$

b = bande,
 s = source
 i = image



Impact sur les courbes de lumières

2024-08-04 | Gaia ID = 1902026748071250944 | $r = 10.44$



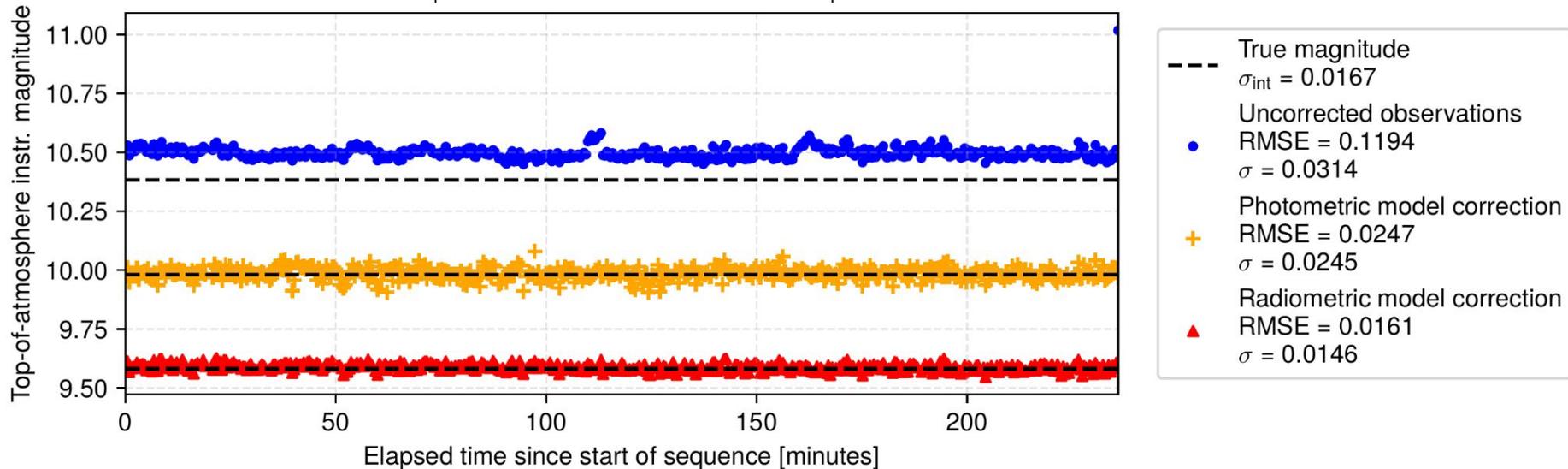
---	True magnitude
	$\sigma_{\text{int}} = 0.0167$
•	Uncorrected observations
	RMSE = 0.1477
	$\sigma = 0.0949$
+	Photometric model correction
	RMSE = 0.0278
	$\sigma = 0.0262$
▲	Radiometric model correction
	RMSE = 0.0188
	$\sigma = 0.0185$

σ = écart-type
⇒ **dispersion globale**
RMSE → erreur
quadratique moyenne
⇒ **dispersion par rapport à la vraie valeur**

(1) Conditions très variables

Impact sur les courbes de lumières

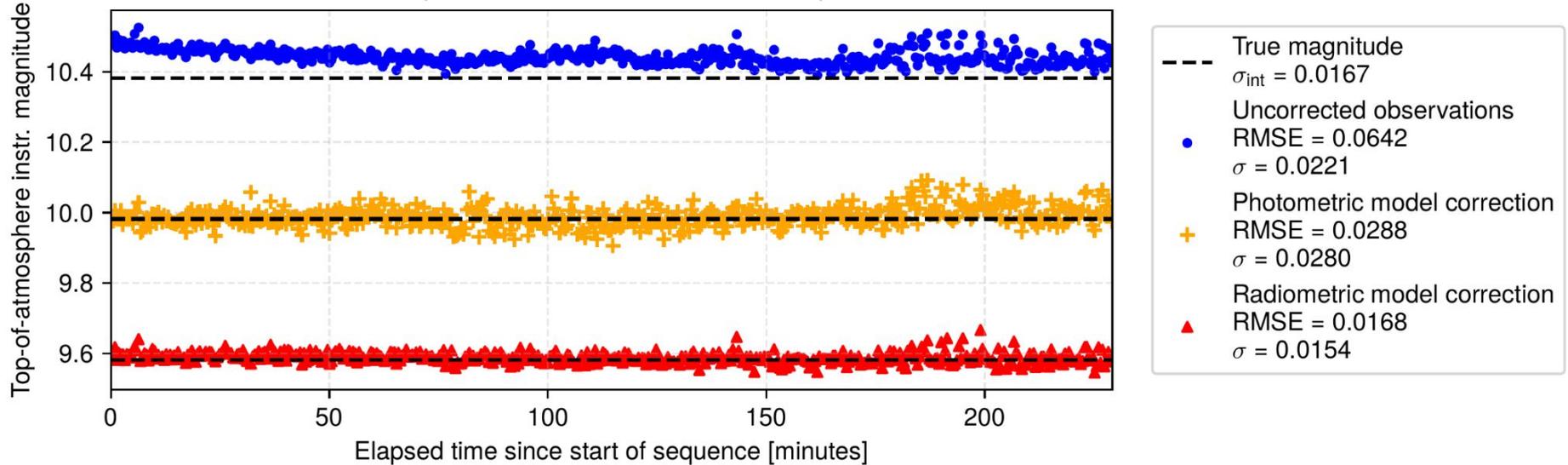
2024-08-10 | Gaia ID = 1902026748071250944 | $r = 10.44$



(2) Conditions légèrement variables

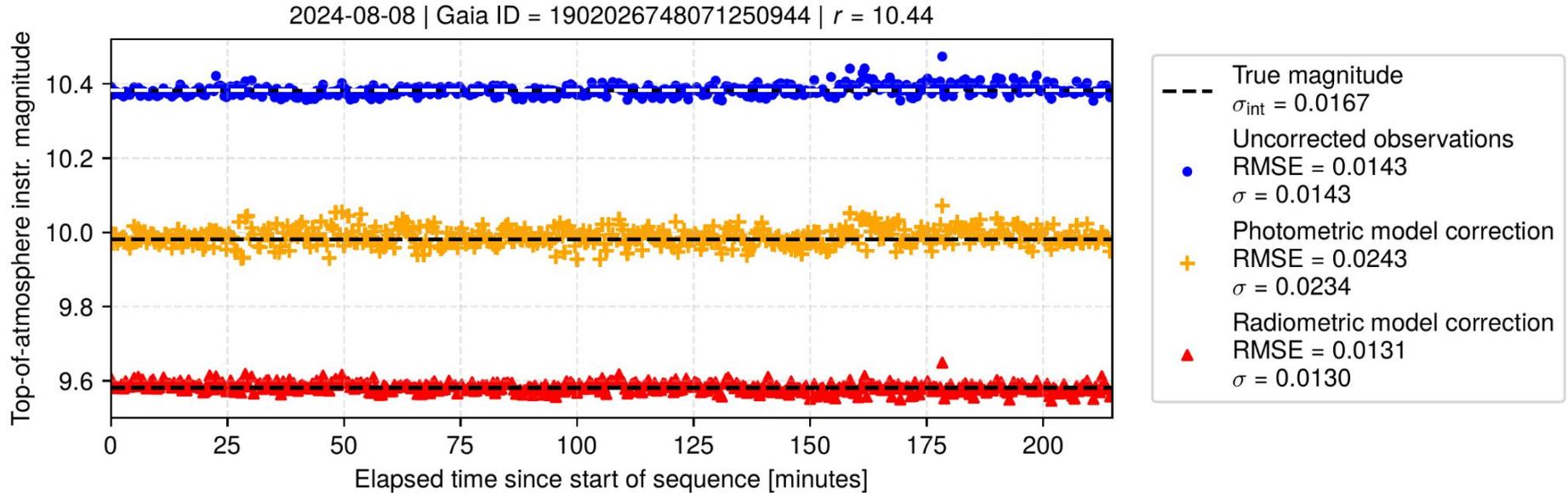
Impact sur les courbes de lumières

2024-08-12 | Gaia ID = 1902026748071250944 | $r = 10.44$



(3) Conditions correctes

Impact sur les courbes de lumières



(4) Conditions photométriques

Conclusions

- Implémentation d'une méthode complète de calibration radiométrique
- Mise en place d'un setup expérimental photométrique et radiométrique + collecte des données à distance
- Développement d'une méthode de traitement et d'analyses complètes pour extraire l'information d'extinction grise des données radiométriques
- Application à une campagne d'observations dédiée
- Modèle radiométrique ramène la dispersion des observations au niveau du bruit de photométrie intrinsèque pour les étoiles de magnitude $r \leq 12$

⇒ démonstration de la preuve de concept

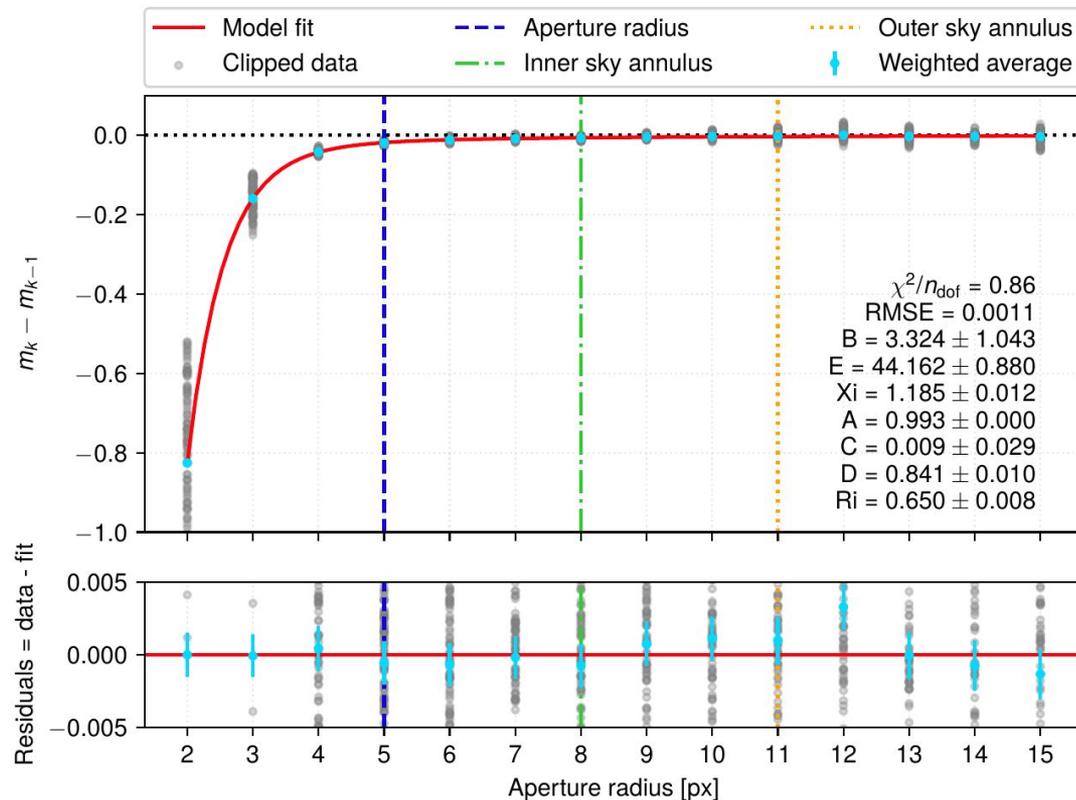
La suite

- **Observations *ugrizy* parallèles avec StarDICE**
 - À faire : acquisition + traitement
- **Transferts d'infos à Bertrand et Johann**
- **Gestion de transferts de données**

Backup

Correction d'ouverture

- sep (= Source Extractor python) + photutils
- Photométrie d'ouverture obligatoire car SNR trop faible pour PSF sur images dans des conditions atm. catastrophiques
- Application du modèle de Stetson 1990 :
 - Moyenne les courbes de croissance de toutes les étoiles sur chaque image
 - 1 valeur de correction par image
 - Erreur ~ 1-5 mmag



Correction du flat-field résiduelsynthétiques

Ajustement d'un polynôme 2D de second degré sur la séquence photométrique :

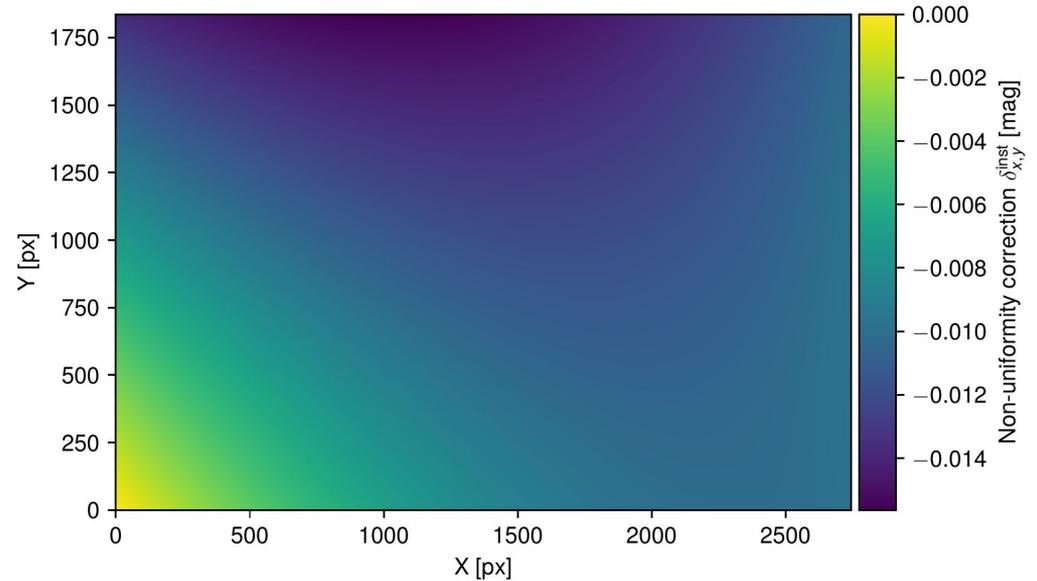
$$\delta_{x,y}^{\text{inst}} = \delta_1 x + \delta_2 y + \delta_3 x^2 + \delta_4 y^2 + \delta_5 xy$$

$$\chi^2 = \sum_s \frac{(\delta m_{s,i} - \delta^{\text{inst}}(x, y))^2}{\sigma^2(m_{i,s,k}^*)}$$

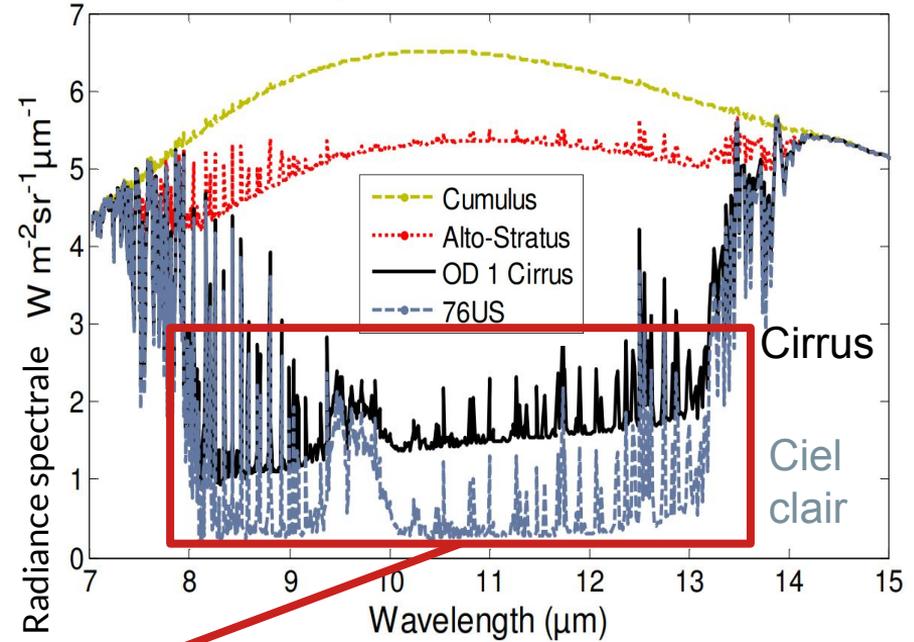
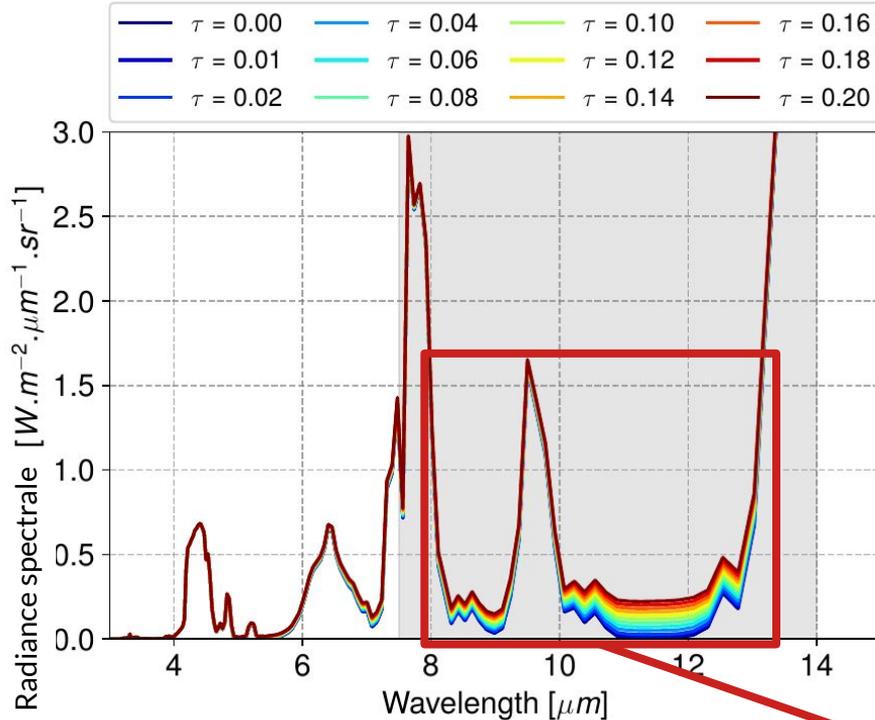
→ Amplitude de correction > -0.02 mag

L'extinction grise effective devient :

$$\delta m_{s,i}^* \equiv \delta m_{s,i} - \delta_{s,i}^{\text{inst}}$$



Impact de l'extinction grise sur la radiance infrarouge thermique



Émission thermique des nuages \Rightarrow augmentation significative de la radiance

Image 2548 | $\overline{\delta m_{s,i}} = 1.487$ mag

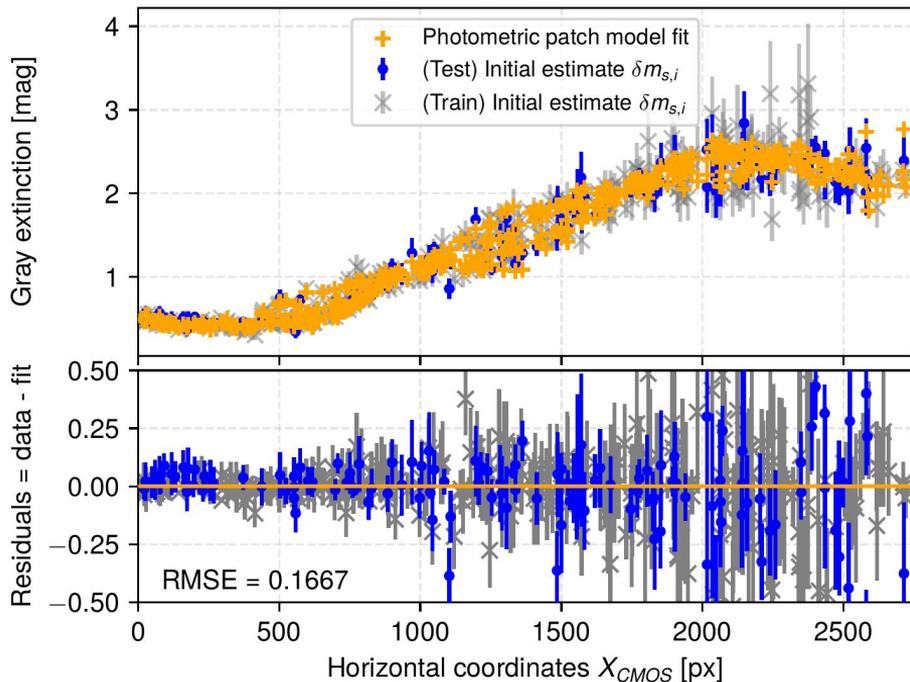


Image 2548 | $\overline{\delta m_{s,i}} = 1.487$ mag

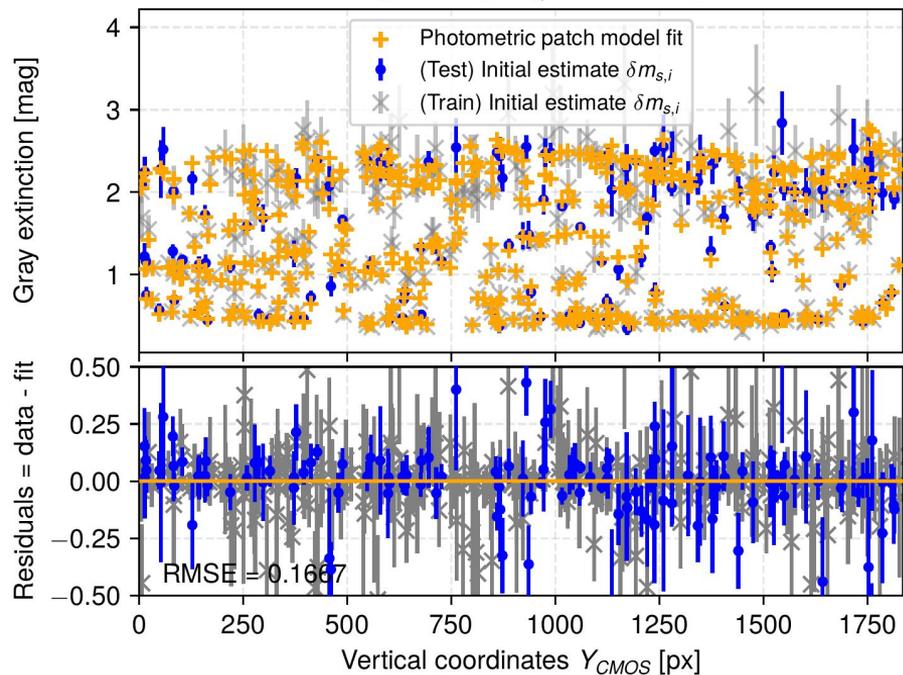
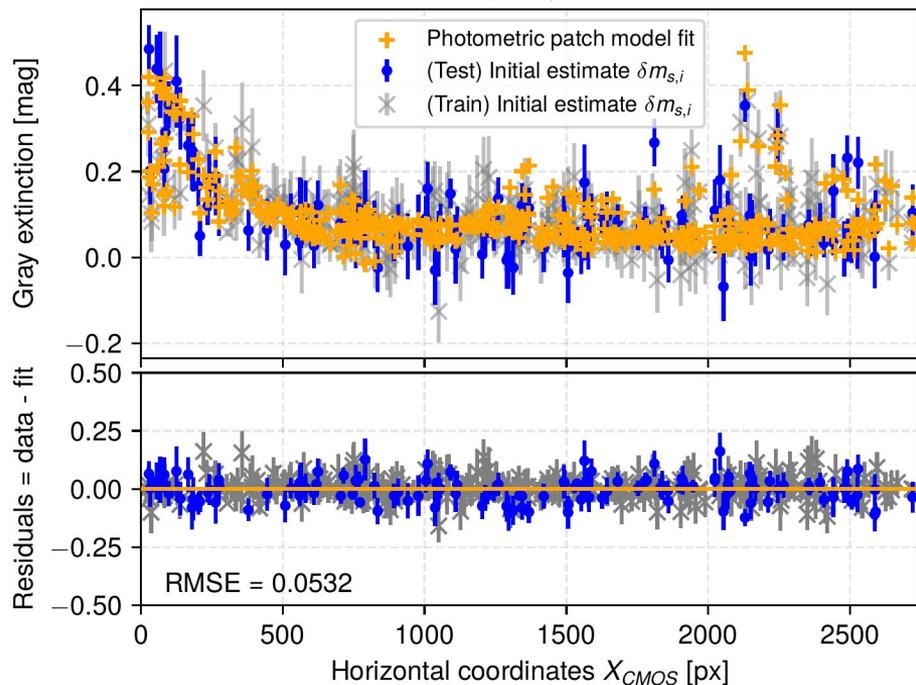
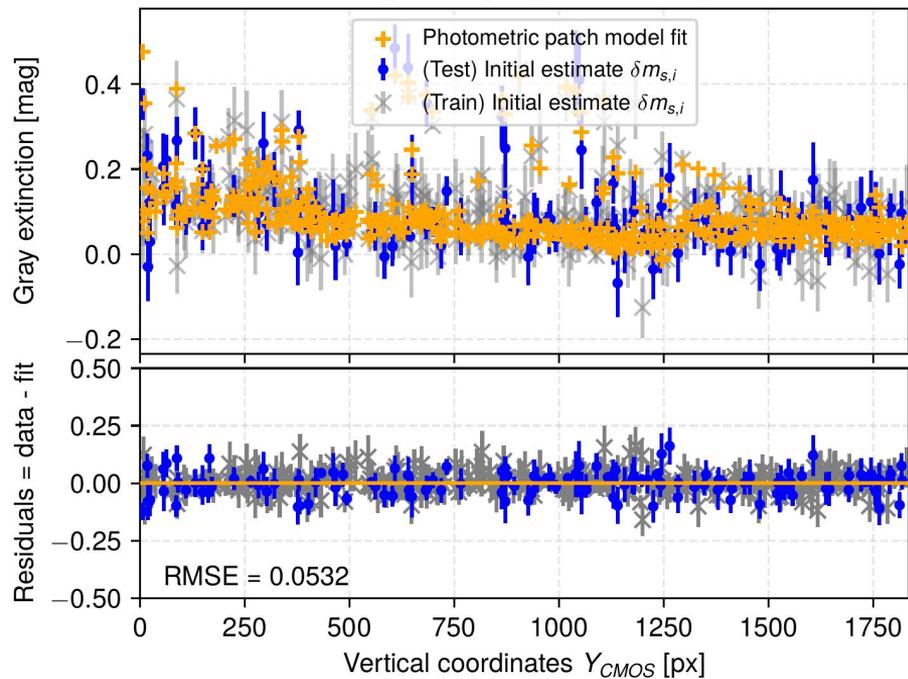
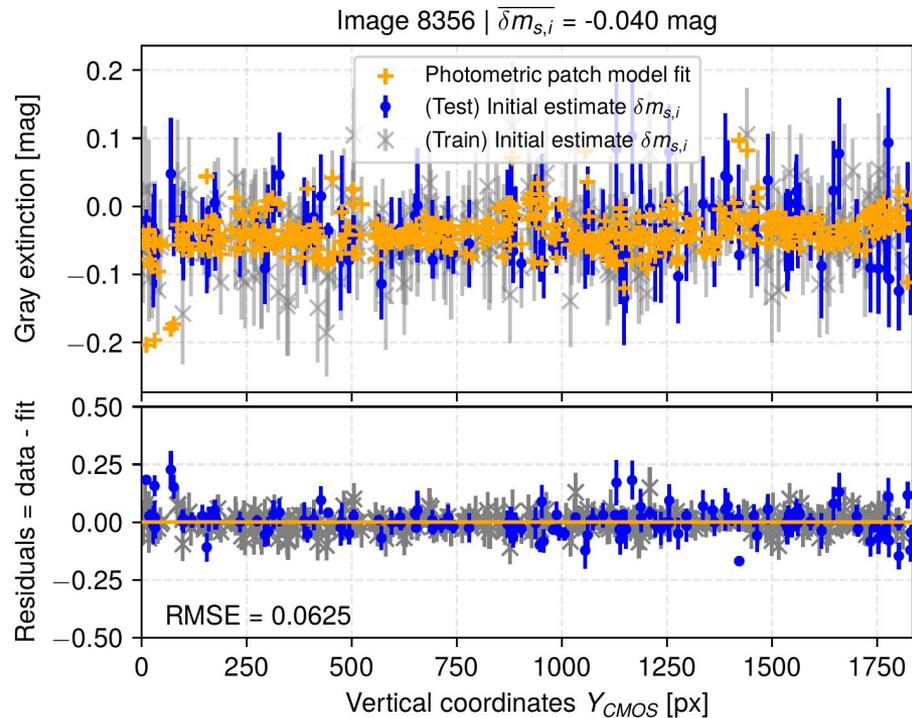
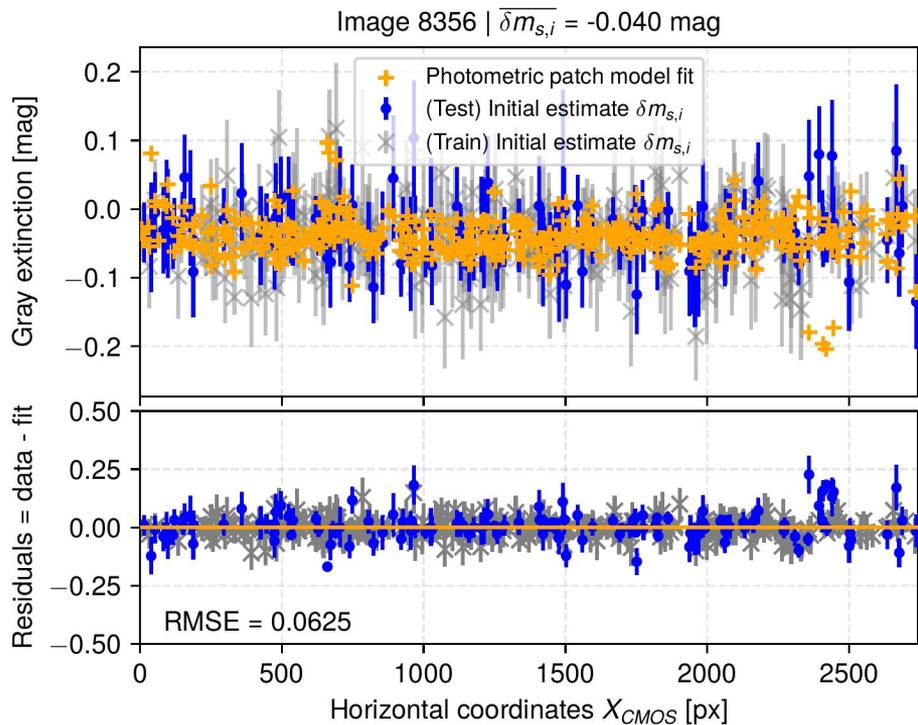


Image 2340 | $\overline{\delta m_{s,i}} = 0.080$ magImage 2340 | $\overline{\delta m_{s,i}} = 0.080$ mag



Correction des effets chromatiques de l'atmosphère

- **Transmission atmosphérique optique chromatique :**

$$\mathcal{T}^{\text{chromatic}}(\lambda, \Theta_{\text{atm}}) = \mathcal{T}^{\text{mol}} \times \mathcal{T}^{\text{PWV}} \times \mathcal{T}^{\text{aer}}$$

- **Courbe de réponse instrumentale théorique :**

$$\mathcal{T}_b^{\text{inst}}(\lambda) = \mathcal{T}^{\text{filter}}(\lambda) \times \eta^{\text{CMOS}}(\lambda) \times \mathcal{T}^{\text{refractor}}(\lambda)$$

- **Magnitude instrumentale top-of-atmosphere (TOA) :**

$$m_{b,s,i}^{\text{TOA, pred}} = -2.5 \times \log_{10} \left(\int_0^{\infty} \mathcal{S}_s(\lambda, T_{\text{eff}}, \log g, \text{Fe}/\text{H}) \times \mathcal{T}_b^{\text{inst}}(\lambda) \times \frac{\lambda}{hc} \times d\lambda \right) \quad (1)$$

- **Magnitude instrumentale à travers une atmosphère chromatique :**

$$m_{b,s,i}^{\text{pred}} = -2.5 \times \log_{10} \left(\int_0^{\infty} \mathcal{S}_s(\lambda, T_{\text{eff}}, \log g, \text{Fe}/\text{H}) \times \mathcal{T}_b^{\text{inst}}(\lambda) \times \mathcal{T}^{\text{chromatic}}(\Theta_{\text{atm}}) \times \frac{\lambda}{hc} \times d\lambda \right) \quad (2)$$

- Contribution chromatique = (1) - (2)

$$\Delta m_{b,s,i}^{\text{pred}} = m_{b,s,i}^{\text{TOA, pred}} - m_{b,s,i}^{\text{pred}}$$

Estimation de l'extinction grise

- La “**vraie**” **magnitude** est définie comme la moyenne (avec *sigma-clipping*) des observations d'une séquence de référence (i.e., dans les meilleures conditions photométriques) :

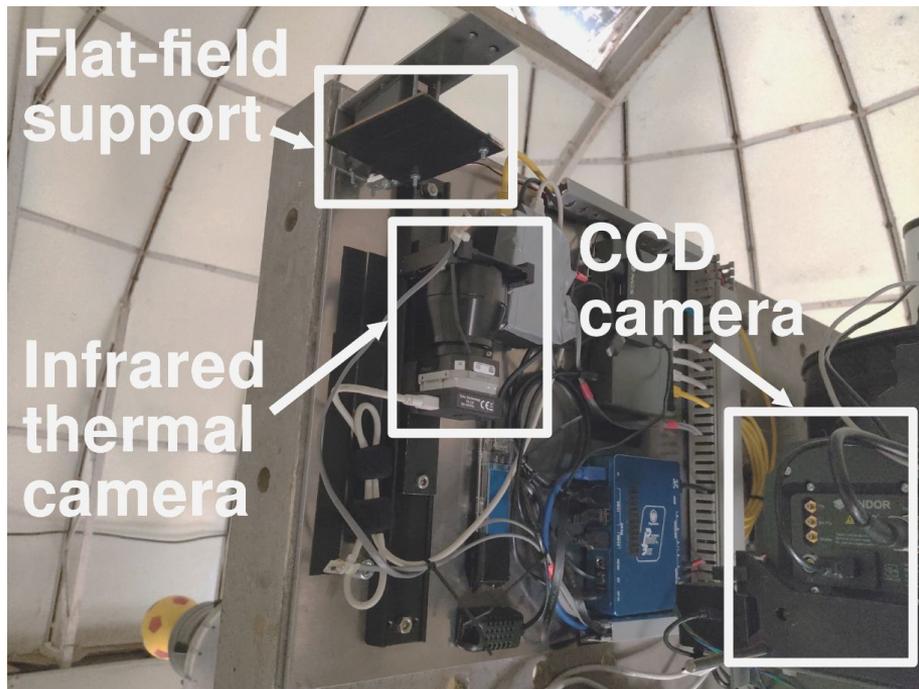
$$m_{b,s}^{\text{true}} \equiv \overline{m_{b,s}^{\text{TOA, obs}}} = \frac{1}{N_{\text{phot}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{phot}}} m_{b,s,i}^{\text{TOA, obs}}$$

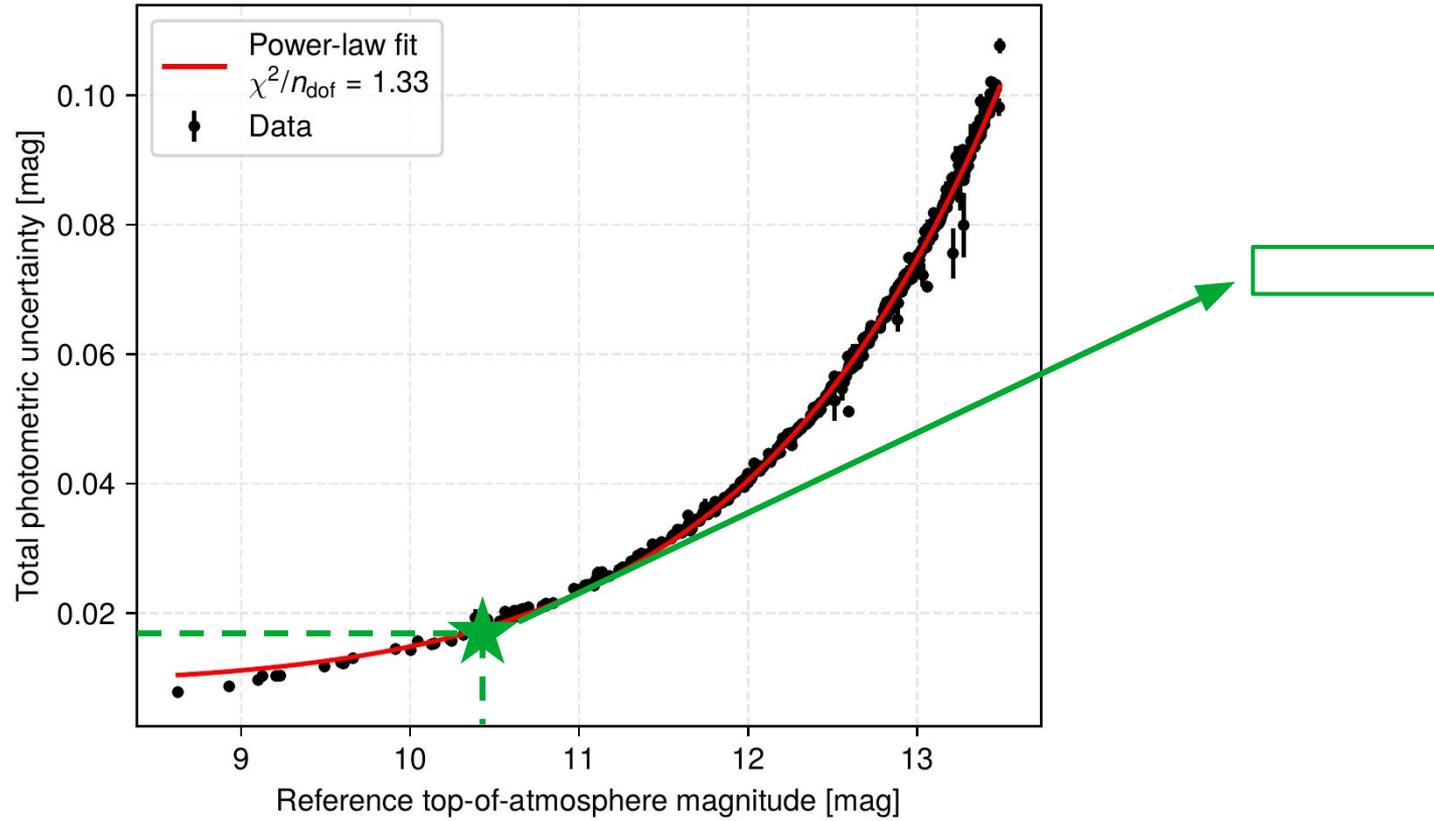
- La **magnitude extrapolée hors-atmosphère** (TOA) :

$$m_{b,s,i}^{\text{TOA, obs}} = m_{b,s,i}^{\text{obs}} + \Delta m_{b,s,i}^{\text{pred}}$$

- Pour chaque source s dans une image i , l'extinction grise est estimée comme la différence entre la magnitude instrumentale TOA et la “vraie” magnitude.

$$\delta m_{s,i} \equiv m_{b,s,i}^{\text{TOA, obs}} - \overline{m_{b,s}^{\text{TOA, obs}}}$$





Photométrie synthétique

$\mathcal{T}_b^{\text{inst}}(\lambda)$ \longrightarrow Courbes fournies par les fabricants

$\mathcal{T}^{\text{chromatic}}(\lambda, \Theta_{\text{atm}})$ \longrightarrow Simulée avec libRadtran pour un vecteur de paramètres d'entrée par époque d'observation

$\mathcal{S}_s(\lambda, T_{\text{eff}}, \log g, \text{Fe}/\text{H})$ \longrightarrow SED synthétique calculée à partir de modèles d'atmosphères synthétiques (AMBRE) et des paramètres stellaires de Gaia DR3

Objectifs

Niveau 0

Corréler les diminutions de flux photométriques aux augmentations de radiance infrarouge

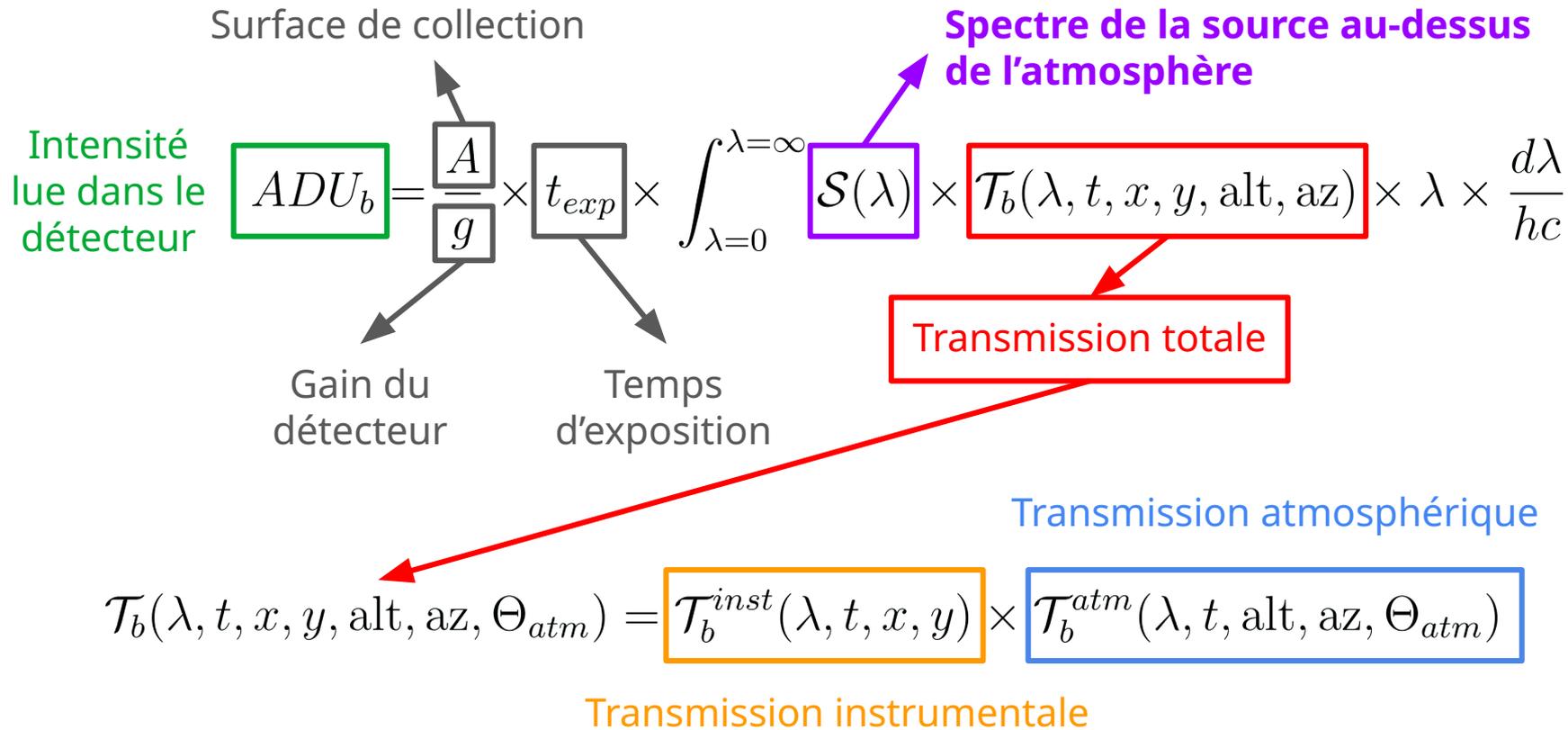
Niveau 1

Identifier les séquences photométriques au cours d'une nuit

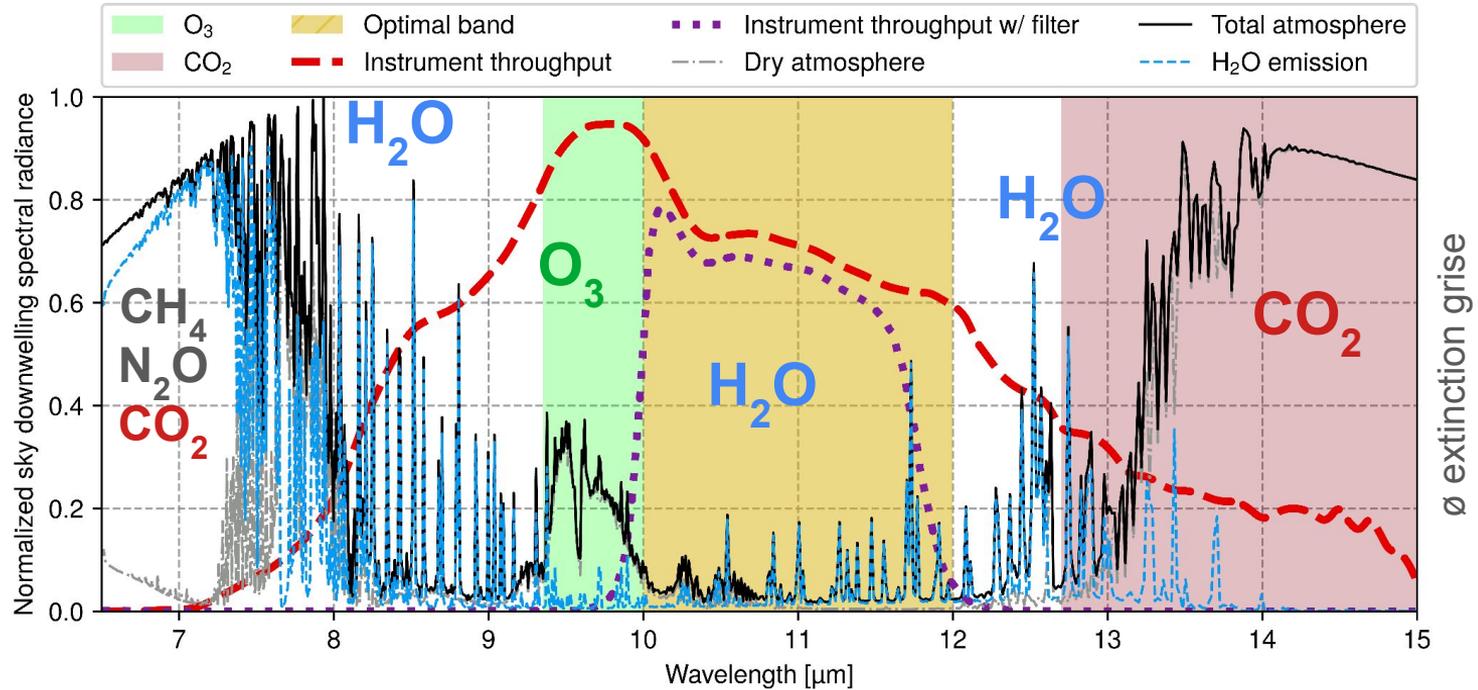
Niveau 2

Corriger les magnitudes photométriques de l'extinction grise

⇒ campagne d'observations simultanées photométriques et radiométriques pour diverses conditions atmosphériques



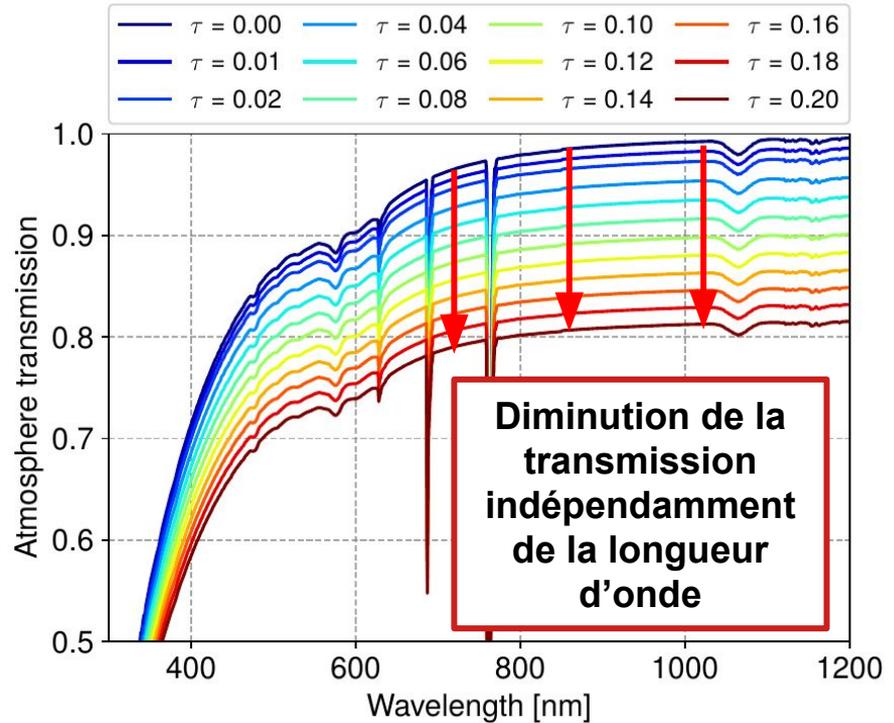
L'atmosphère dans l'infrarouge thermique



Rayonnement de raies moléculaires ⇒ à modéliser pour extraire l'information d'extinction grise

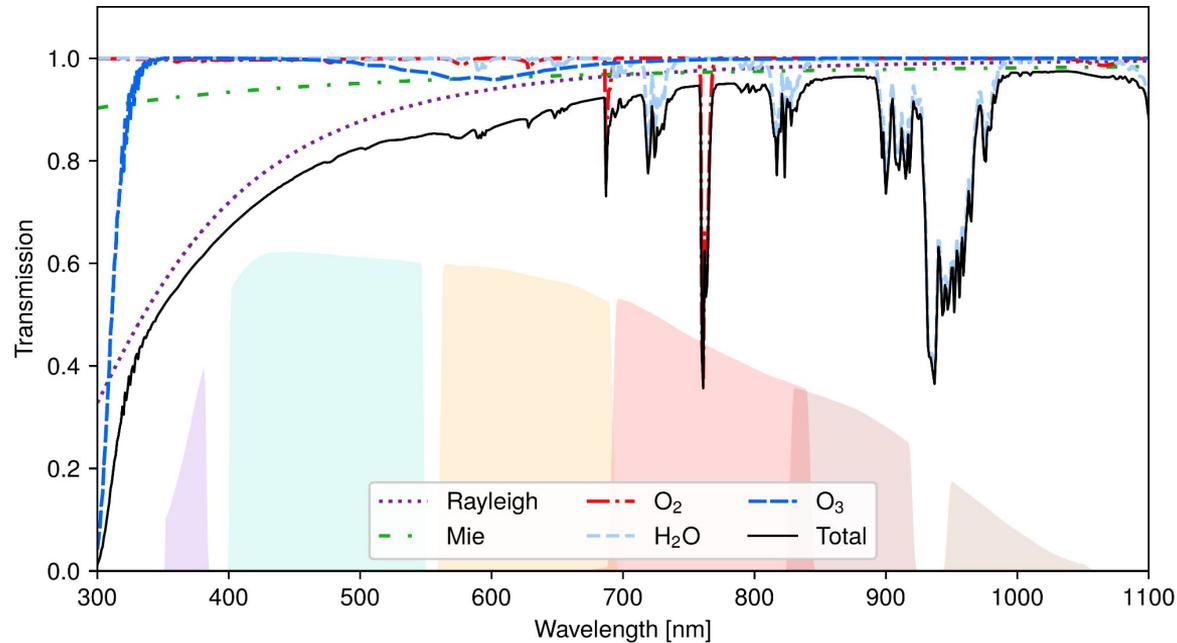
Extinction grise

- Effet achromatique = **extinction grise** due aux cristaux de glace et gouttelettes d'eau dans les nuages.
- Varie de quelques % sur des échelles de temps de quelques minutes \Rightarrow **difficile d'atteindre mieux que 1% en répétabilité photométrique depuis le sol.**
- Difficulté de caractérisation des cirrus fins qui présentent des inhomogénéités spatiales de 0.02 à 0.1 mag sur des échelles de 1° [Ivezic et al, 2007].
- Important pour LSST, qui observera sous des conditions atmosphériques dégradées.
- StarDICE représente un excellent cas d'étude pour tester une nouvelle méthode.



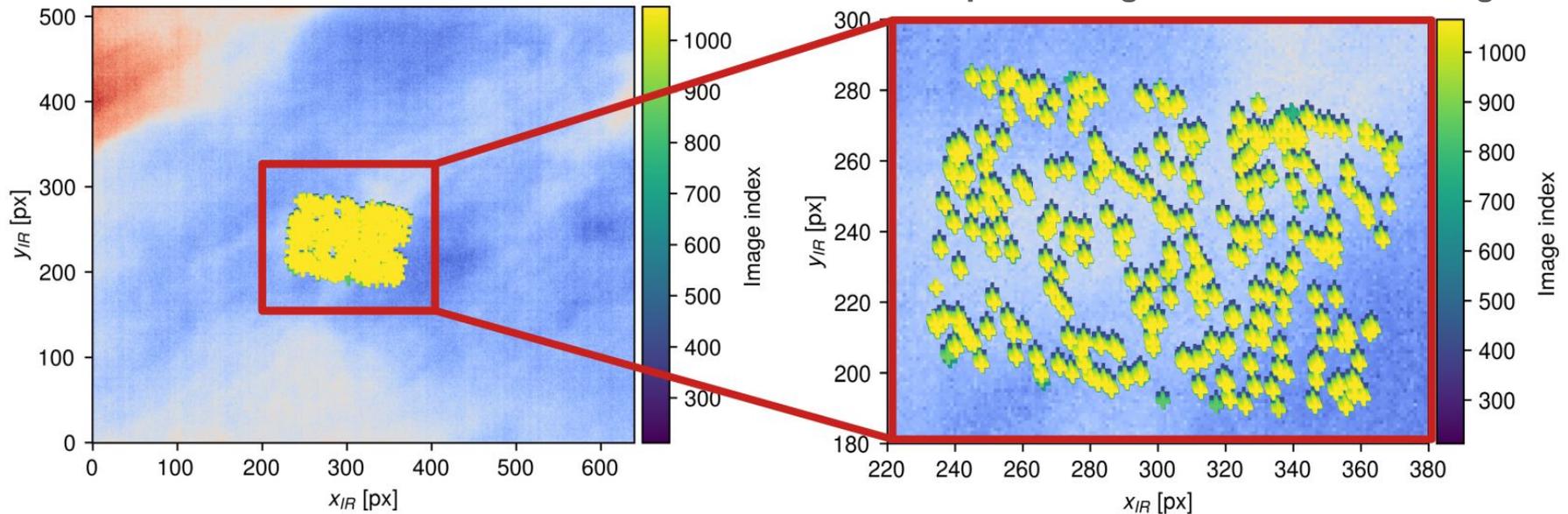
Transmission chromatique de l'atmosphère

- Effets chromatiques :
 - Absorption moléculaire par O_2 , O_3 , H_2O et d'autres éléments traces
 - Diffusion de Rayleigh (molécules)
 - Diffusion de Mie par les aérosols (particules de taille > longueur d'onde)



Extraction des radiances

- Moyenne du stack pixel à pixel
- Transformation géométrique du centroïde des sources entre système de coordonnées CMOS \leftrightarrow IR
- Interpolation des plus proches voisins



Transformation de système de magnitudes

$|r(\text{Gaia}) - \text{true mag}| \leq 3\sigma(\text{Gaia})$
avec $\sigma(\text{Gaia}) = 0.03776 \text{ mag}$

Transformation Gaia G vers système photométrique r :

$$\begin{aligned} G - r = & -0.09837 + 0.08592 \times (G_{BP} - G_{RP}) \\ & + 0.1907 \times (G_{BP} - G_{RP})^2 \\ & - 0.1701 \times (G_{BP} - G_{RP})^3 \\ & + 0.02263 \times (G_{BP} - G_{RP})^4 \end{aligned}$$

Puis transformation “vraies” magnitudes instrumentales extrapolées hors-atmosphère avec $z_p = 17.269$ pour accorder les échelles.

→ Environ 450-500 objets restants par image

