

# ETALONNAGE DES MICROCAMÉRAS

VALÉRIAN LALUCAA, CÉDRIC VIRMONTOIS, JEAN-MARC BELLOIR  
ANTOINE MAILLARD, MAXENCE GUÉNIN, THOMAS BONASSI

TOULOUSE, FRANCE  
**25/06/2024**

# SUMMARY

**01**

Projets et instruments

**02**

Description des  
microcaméras

**03**

Défauts et Performances

**04**

Qualification  
environnementale

**05**

Capteur d'images

**06**

Capteur et optique

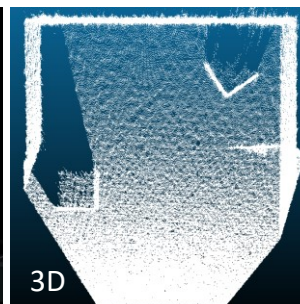
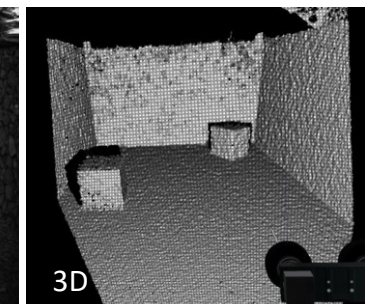
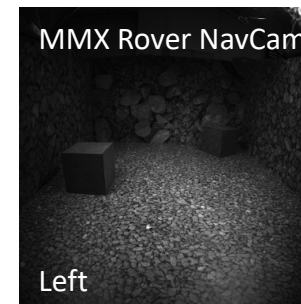
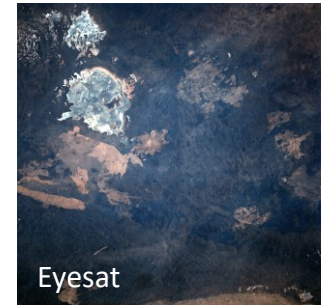
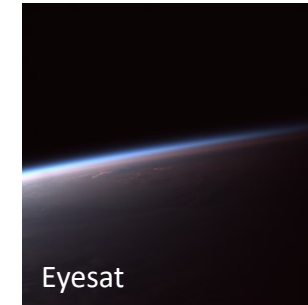
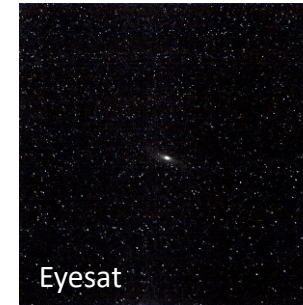
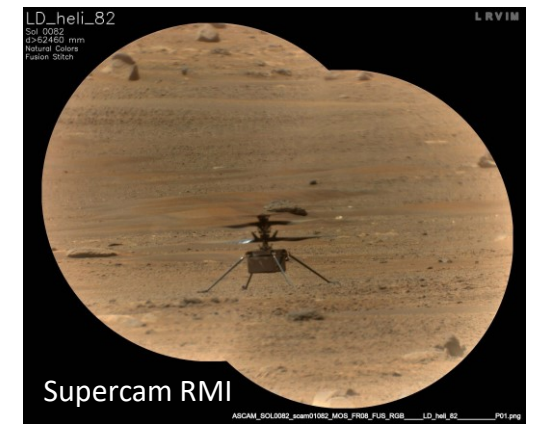
# PROJETS ET INSTRUMENTS

## OBJECTIF

Caractériser et étalonner des cameras pour des missions diversifiées :

- Science
  - Observation lointaine
  - Observation en champ proche
- Ingénierie
  - Détection d'objets de différentes tailles (manœuvres d'approche, localisation de déchets ...)
  - Détection d'environnement (surfaces et obstacles)
  - Localisation 3D (vision stéréo)

... Pour un budget et un planning « NewSpace » ...



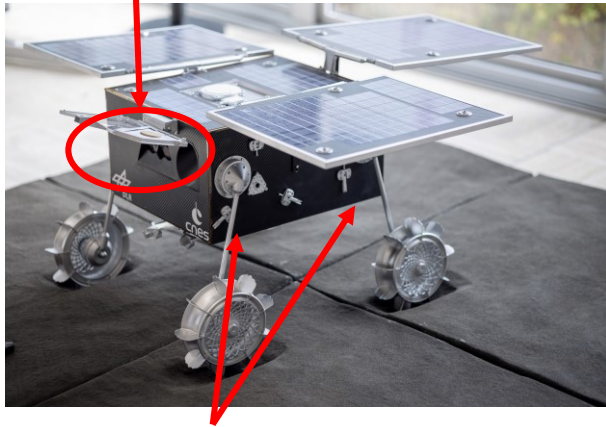
# PROJETS ET INSTRUMENTS



## ROVER MMX

2x NavCam (Vision stéréo de profondeur)

Ingénierie



2x WheelCam (dessous)

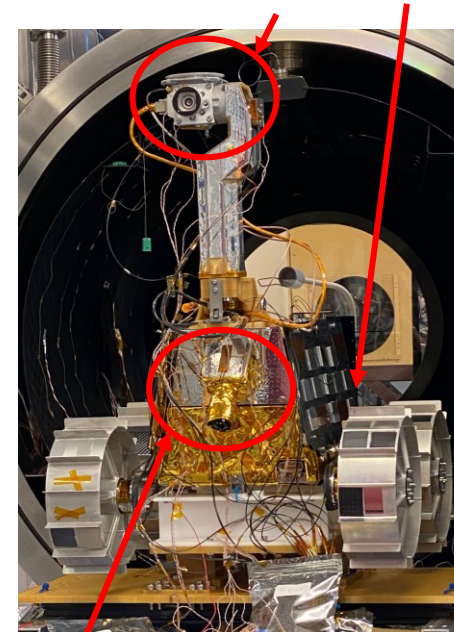
Science

Phobos (lune de Mars)



## ROVER RASHID 2

2x NavCam (mât et dos)



1x M-CAM (avant)

Lune





# DESCRIPTION DES MICROCAMÉRAS

## NAVCAM

Capteur OSRAM-AMS CMV4000

**Capteur couleur RGB (Bayer)**

$FoV_{\text{corner}}$  :  $118^\circ$

**$FoV_{\text{edge}}$  :  $83^\circ$**

**Band: 450-700nm**

Focal: 7.8mm

Aperture: F/8

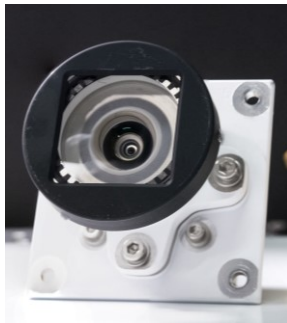
Ang. resolution: 1mrad

DoF: 35 cm to inf.

Best focus : 90cm

MTF @ Nyq.: > 0.2

Mass : < 200g



## WHEELCAM

Capteur OSRAM-AMS CMV4000

**Capteur panchromatique**

**$FoV_{\text{sensor edge}}$  :  $32.5^\circ$**

**$\lambda$  Band: 550-900nm**

Focal: 18 mm

Aperture: F# 7.3

Ang. resolution: 100 $\mu$ rad

Px. resolution < 100 $\mu$ m @ 30.35cm

Best focus : 30.35 cm

MTF @ Nyq.: > 0.2

Mass : 106g

DoF: Tilted 277-332mm (object size  $\leq 100\mu$ m)



## M-CAM

Capteur OSRAM-AMS CMV4000

**Capteur panchromatique**

**Sans optique au CNES**

*(optical assembly at KTO)*

CMOS image sensor

Global shutter

4Mpixels 2048 x 2048 5,5 $\mu$ m pitch

Read Noise : 13 e<sup>-</sup>,

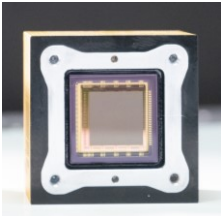
Dark current : 125 e<sup>-</sup>/s at 25°C

Saturation : 13 ke<sup>-</sup>

Multiple modes (ROI, binning, ...)

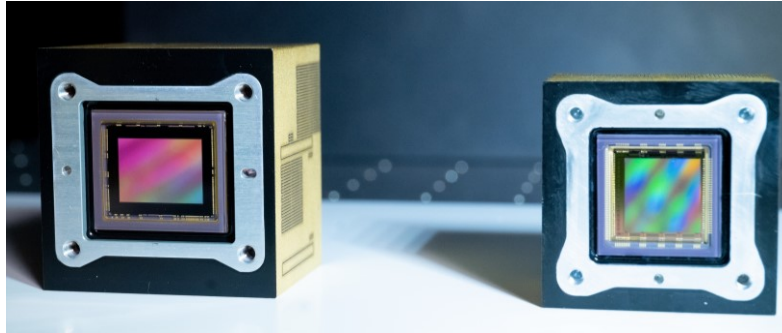
Digital output : SpaceWire

Operation from -40°C to +70°C



# PERFORMANCES ET PARAMÈTRES

## CUBE CAMÉRA



Courant d'obscurité et énergie d'activation

Bruit

Offset

Saturation

Facteur de conversion (Charge to Voltage Factor)

Efficacité quantique

**Non-uniformités** (obscurité et illumination)

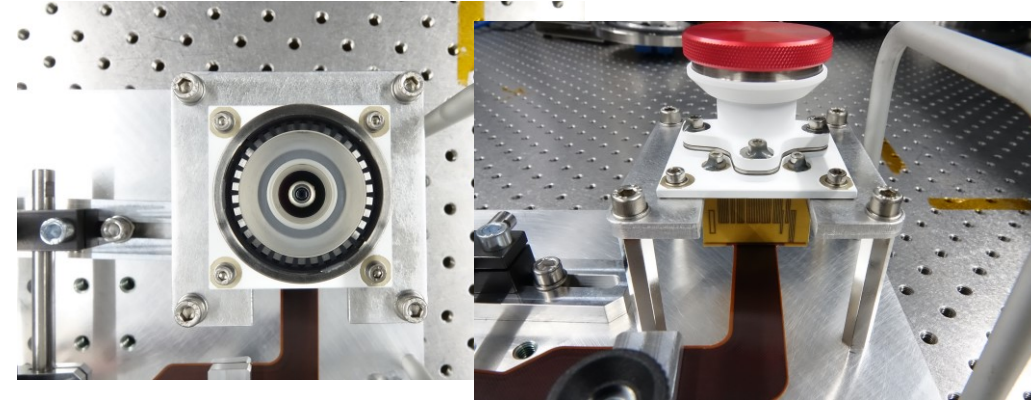
FTM / Résolution

Rémanence

Suréclairement

Pixels défectueux

## OBJECTIF



Transmission

Distorsion radiométrique

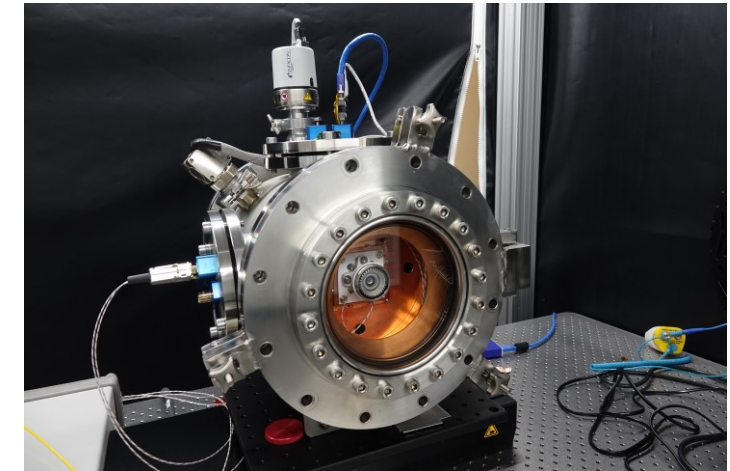
Distorsion géométrique

FTM / Résolution

## CAMERA COMPLÈTE

Calibration de température

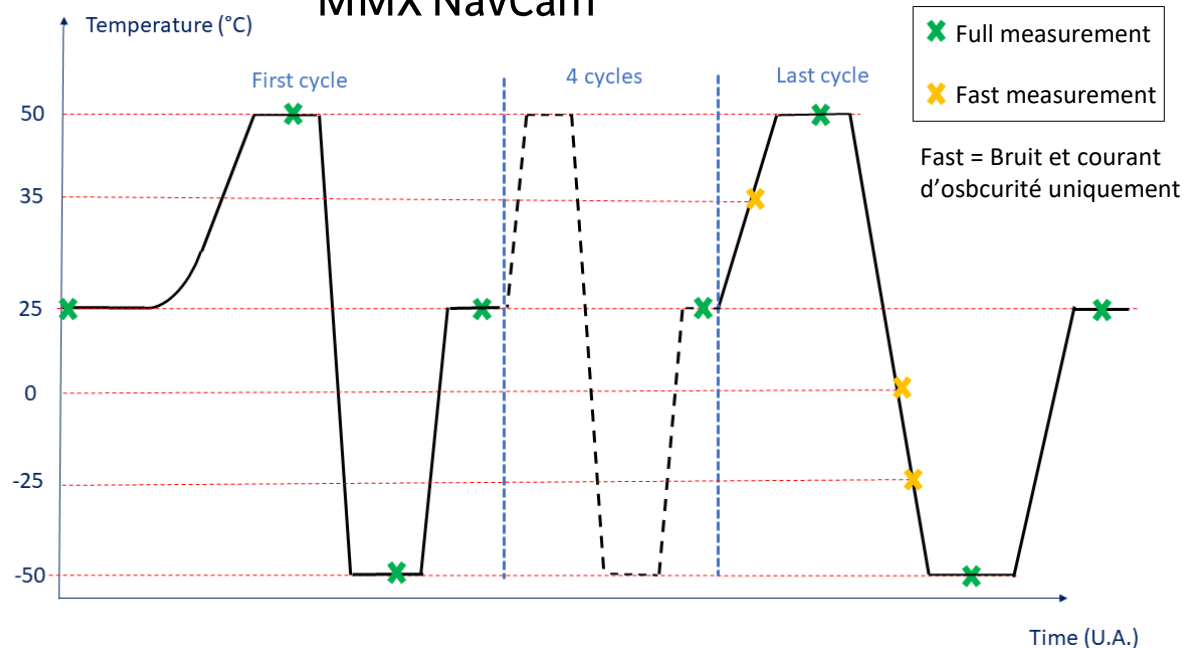
Lumière parasite (ghost)



CARACTÉRISATION INITIALE, DE DÉRIVE, ET FINALE POUR UNE CAMPAGNE DE QUALIFICATION ENVIRONNEMENTALE

# QUALIFICATION ENVIRONNEMENTALE

## MMX NavCam

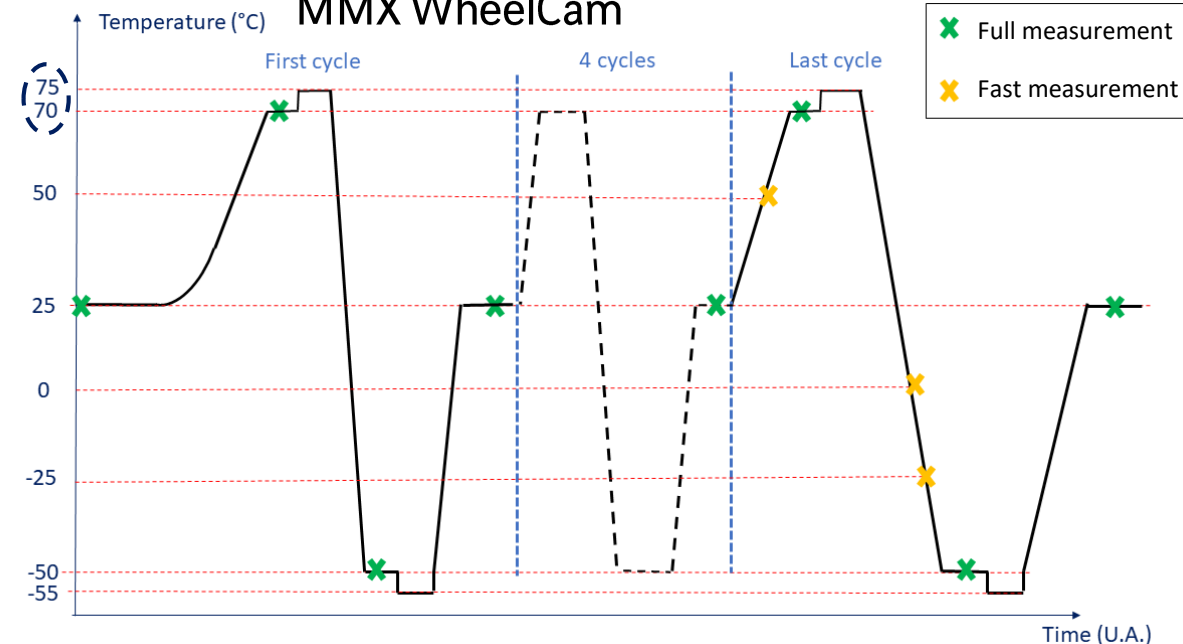


Cycles de température → Spécification du projet et/ou de la norme

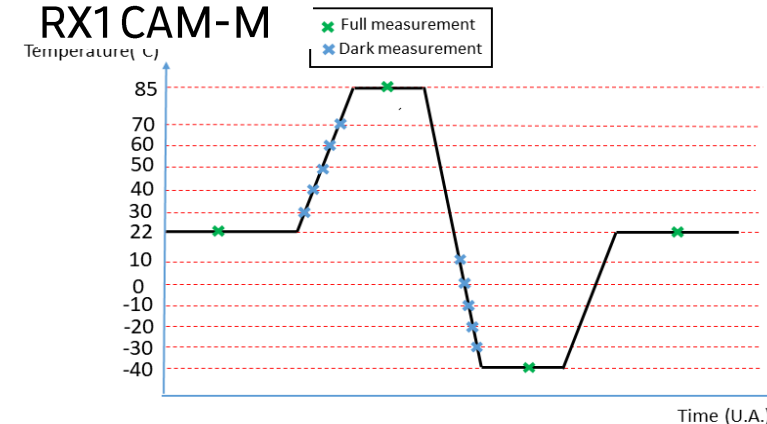
Paliers à plusieurs températures pour la mesure :

- Des performances
- De la dérive (contrôle du déverminage / screening)
- De la calibration (données de référence)

## MMX WheelCam



## RX1 CAM-M



# CAPTEUR D'IMAGES

## MODÈLES DE SIGNAL ET DE BRUIT

$$S_{pixel} = S_{offset} + S_{DC} + S_{photons}$$
$$S_{pixel} = S_{offset} + I_{DC} \cdot T_{int} + CVF \cdot EQE \cdot \phi_{photon} \cdot T_{int}$$

$S_{offset}$  Signal d'offset électrique [LSB]

$S_{DC}$  Signal du courant d'obscurité (Dark Signal) [LSB]

$I_{DC}$  Courant d'obscurité (Dark Current) [LSB/s] (ou [e-/s] avec le CVF)

$T_{int}$  Temps d'intégration [s]

$S_{photons}$  Signal issu de l'éclairement [LSB]

$CVF$  facteur de conversion en [LSB/e-]

$EQE$  Efficacité quantique externe [%]

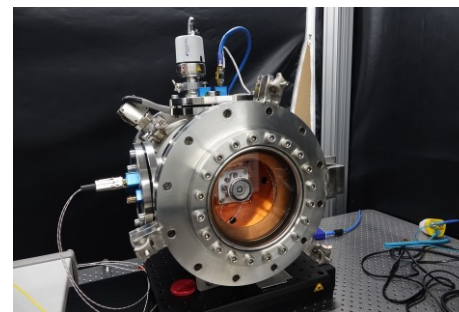
$\phi_{photon}$  Flux de photons dans le pixel [photon/s]

Et le bruit :  $\sigma_{pixel} = \sqrt{\sigma_{readout}^2 + I_{DC} \cdot T_{int} + CVF \cdot EQE \cdot \phi_{photon} \cdot T_{int}}$

LSB : Least Significant Bit du convertisseur analogique-numérique

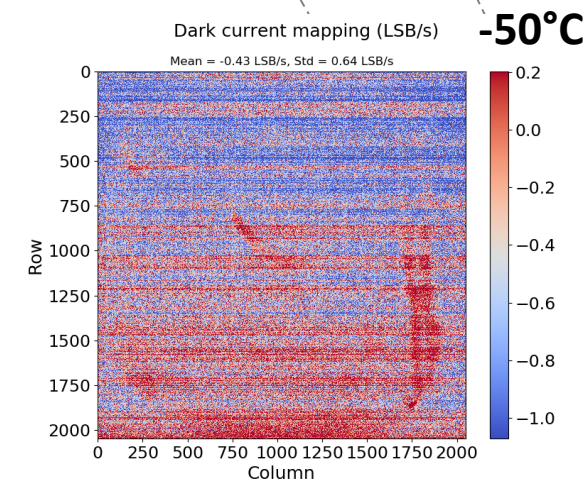


# CAPTEUR D'IMAGES COURANT D'OBSCURITÉ



Vitre du TVAC couverte par un cache  
Tente propre et salle plongée dans le noir  
Série de plusieurs temps d'intégration

Parameters	Value
ROI	Full size (2048*2048)
ADC bit depth	10 bits
Integration time (ms)	0; 1; 5 ;10; 50; 100; 300; 500; 700; 1000
Interframe time	2 s
Number of frame per integration time	30 images



Extraction à plusieurs températures (plusieurs paliers):

$$I_{DC} = I_0 \times \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

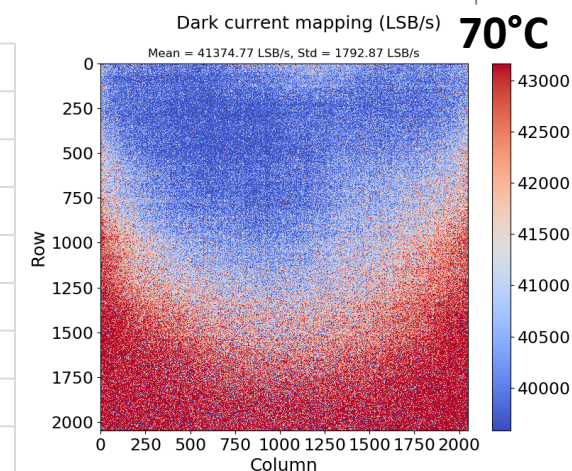
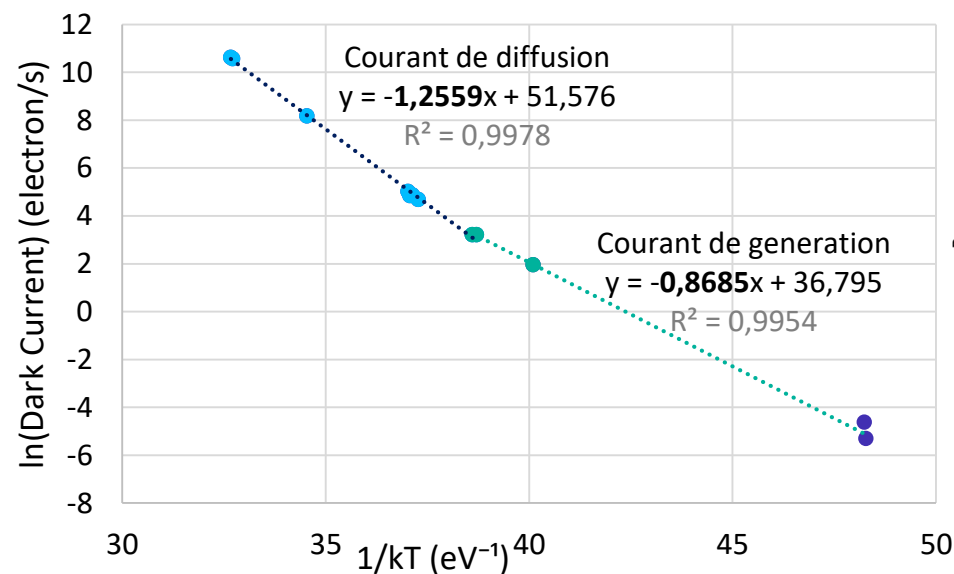
→ Graphe d'Arrhenius

→ Energie d'activation  $E_a$  sur une plage de température

(selon le mécanisme physique)

unité usuelle : [eV]

## Courant d'obscurité : Arrhenius

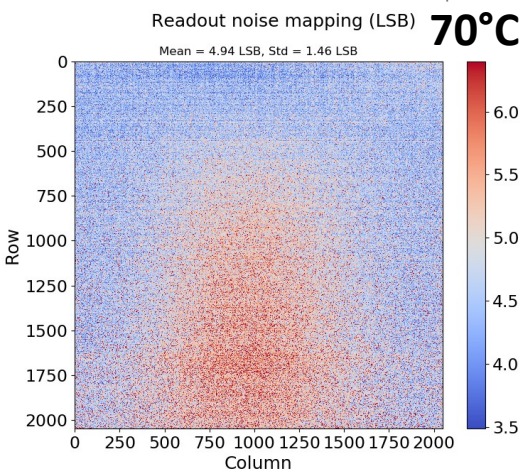
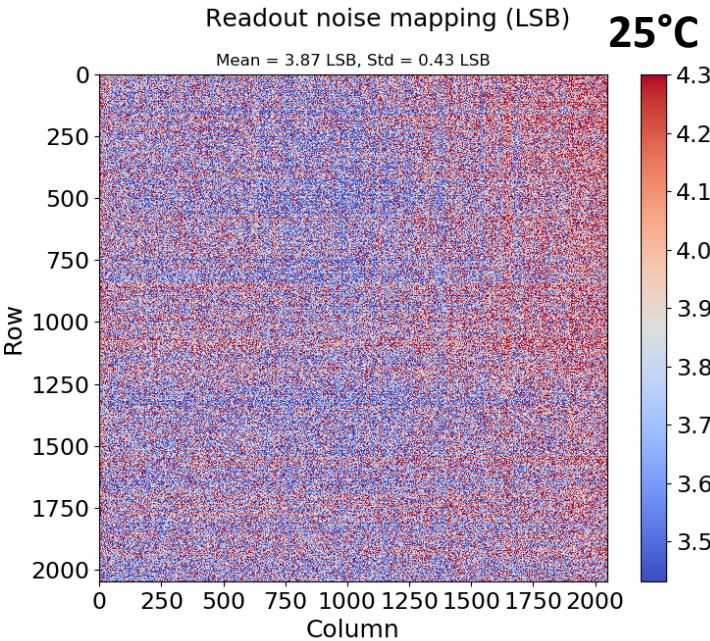
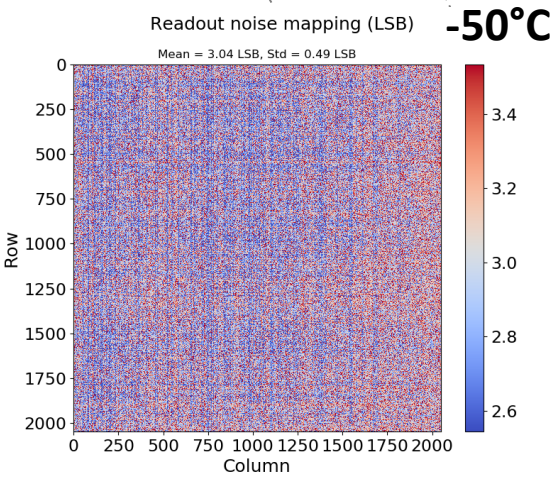
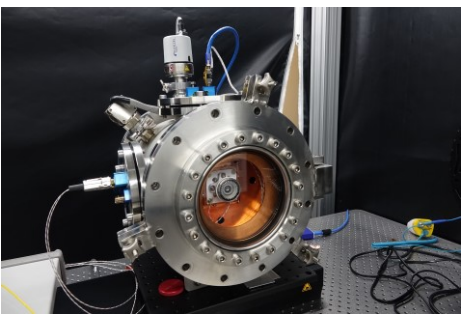


# CAPTEUR D'IMAGES

## BRUIT

Vitre du TVAC couverte par un cache  
Tente propre et salle plongée dans le noir  
Temps d'intégration minimal (20µs)

Parameters	Value
ROI	Full size (2048*2048)
ADC bit depth	10 bits
Integration time	20 µs
Interframe time	2 s
Number of frame per integration time	100 images



Temporal noise model

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{readout}^2 + \sigma_{dark\ current\ shot\ noise}^2 + \sigma_{photon\ shot\ noise}^2$$

↑fixe      ↑dépend de  $T_{int}$       ↑dépend de  $T_{int}$

→ Plusieurs méthodes possibles pour extraire le  $\sigma_{readout}^2$

→ Avec le temps d'intégration minimum

→ no signal → no photon and dark current shot noises

$$\sigma_{total}^2(T_{int\ Min}) = \sigma_{readout}^2$$

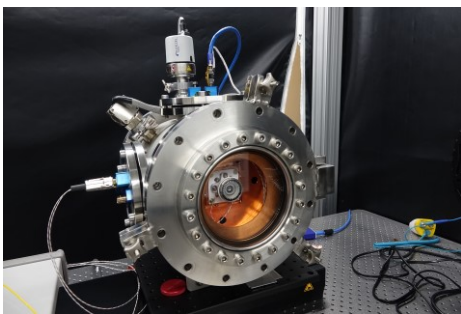


# CAPTEUR D'IMAGES OFFSET

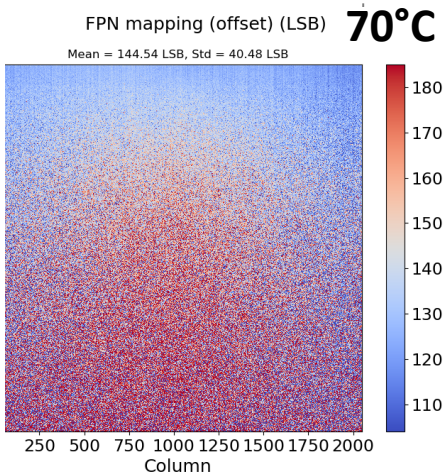
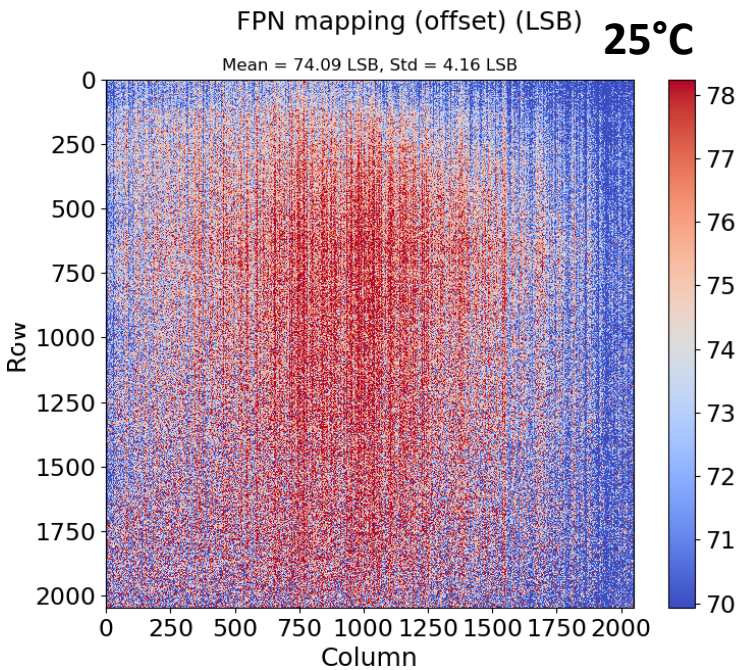
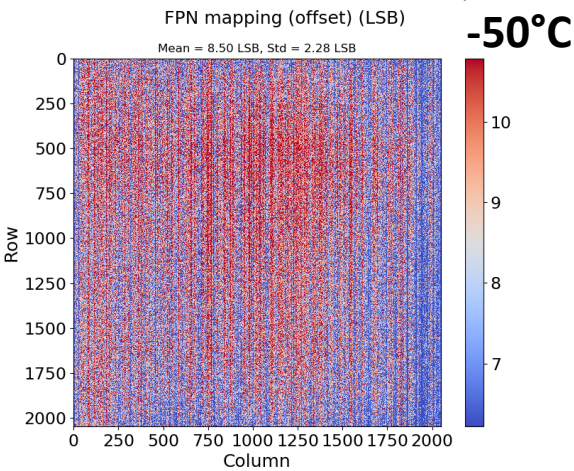
Vitre du TVAC couverte par un cache  
Tente propre et salle plongée dans le noir  
Temps d'intégration minimal (20µs)

Offset  
Signal électronique analogique moyen  
additionné au signal des composants photosensibles (pinned photodiodes)  
Objectif : tous les pixels doivent avoir une plage de tension dans la plage  
du Convertisseur Analogique Numérique (CAN) interne

Défaut : **Varie avec la température !**

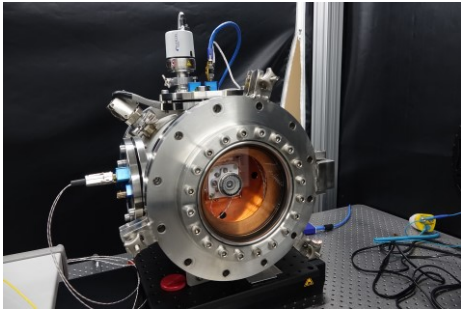


Parameters	Value
ROI	Full size (2048*2048)
ADC bit depth	10 bits
Integration time (ms)	0; 1; 5 ;10; 50; 100; 300; 500; 700; 1000
Interframe time	2 s
Number of frame per integration time	30 images



# CAPTEUR D'IMAGES

## FACTEUR DE CONVERSION



Parameters	Value
ROI	Full size (2048*2048)
ADC bit depth	10 bits
Integration time (ms)	0,02 to 1000
Interframe time	2 s
Number of frame per integration time	30 images
Wavelength	3 (example: 450, 550, 650 nm)

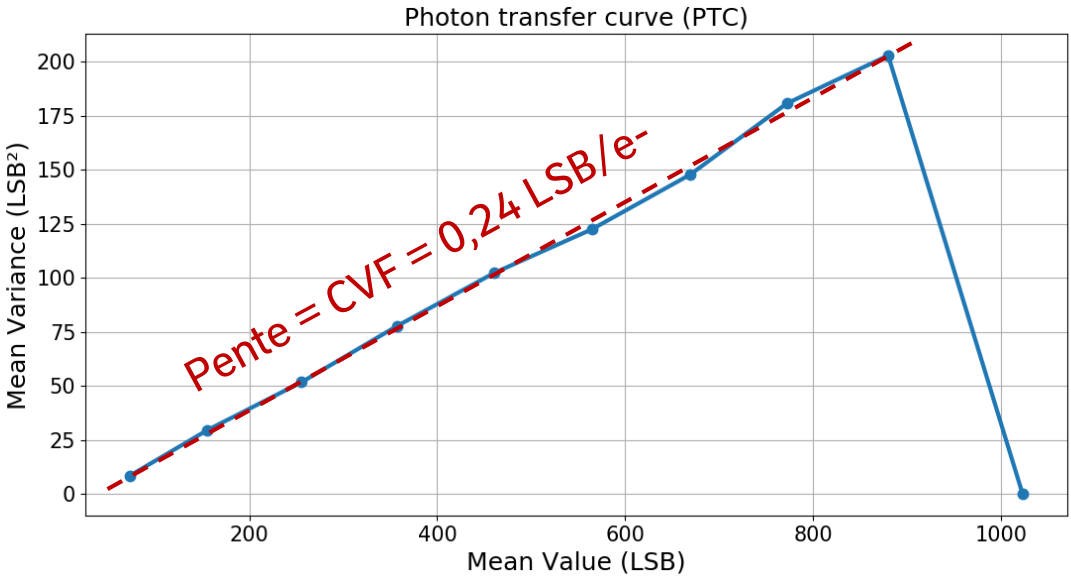
Eclairement homogène (LED & sphère intégrante)  
Tente propre  
Série de plusieurs temps d'intégration

Plusieurs méthodes possibles.  
La PTC et la Mean-Variance sont les plus simples et efficaces :

Pour un flux lumineux constant et homogène  
 $S_{pixel} = S_{offset} + CVF \cdot N_{photoelectrons}$

Photon shot noise :  
 $\sigma_{pixel}^2 = CVF^2 \cdot N_{photoelectrons} = CVF \cdot (S_{pixel} - S_{offset})$

25°C



# CAPTEUR ET OPTIQUE

## TRANSMISSION

Mesure absolue avec un **laser** et **radiomètre** calibré

Mesure relative avec un **spectromètre** et une **source large bande**

(Solution alternative : directement avec un spectro-radiomètre calibré)

Pour chaque étape :

- Mesure sans objectif (référence)
- Mesure avec objectif

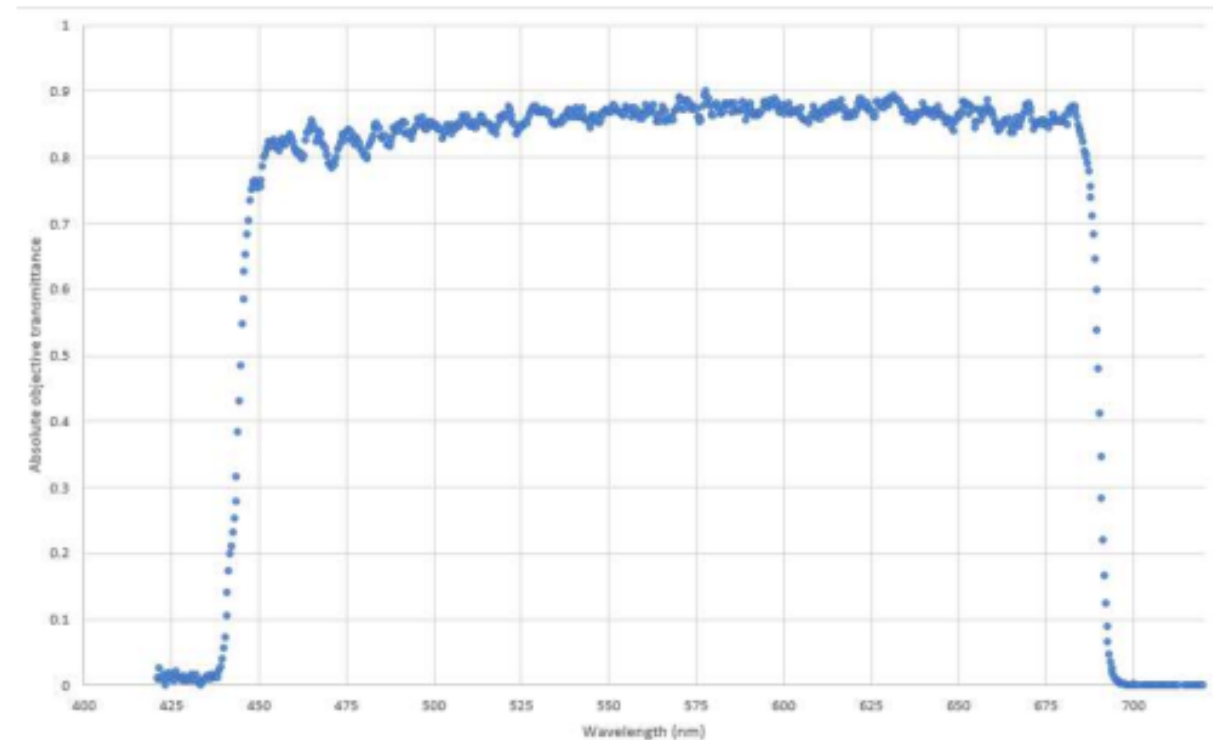
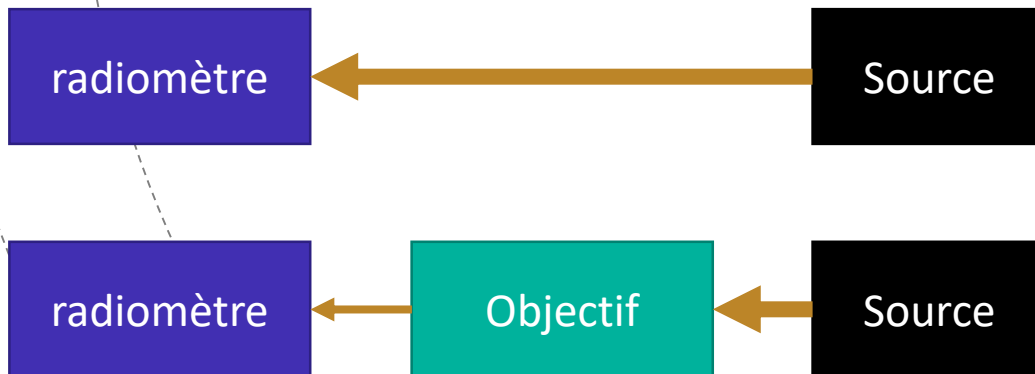


Figure 4-7 : Absolute spectral transmittance measurement



# CAPTEUR ET OPTIQUE

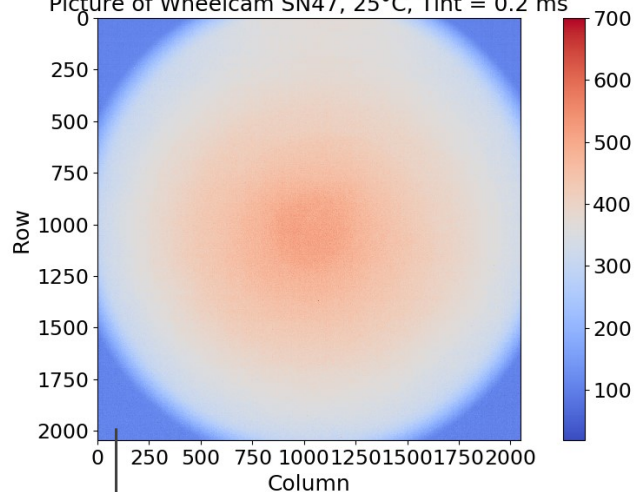
## DISTORSION RADIOMÉTRIQUE

Mesure de champ plat :

Source et sphère intégrante couvrant l'ensemble du champ de vue

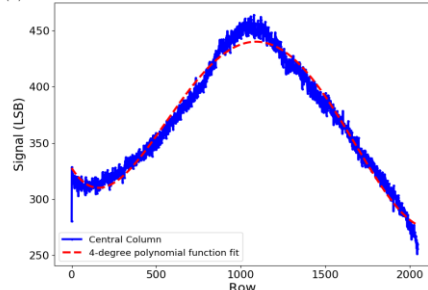
Extraction selon les applications (coefficient direct par pixel ou fit polynomial par ligne)

Picture of Wheelcam SN47, 25°C, Tint = 0.2 ms



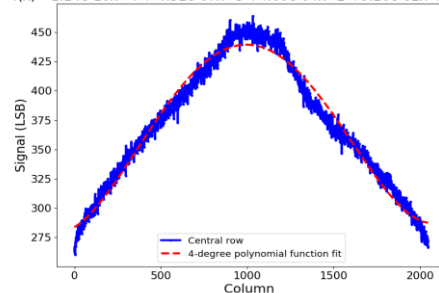
Col. centrale:

Central column of the spot of light with the 4-degree polynomial function fit  
 $f(x) = 1.63e-10x^4 + 7.30e-07x^3 + 9.15e-04x^2 + 2.39e-01x + 3.28e+0;$



Ligne. centrale:

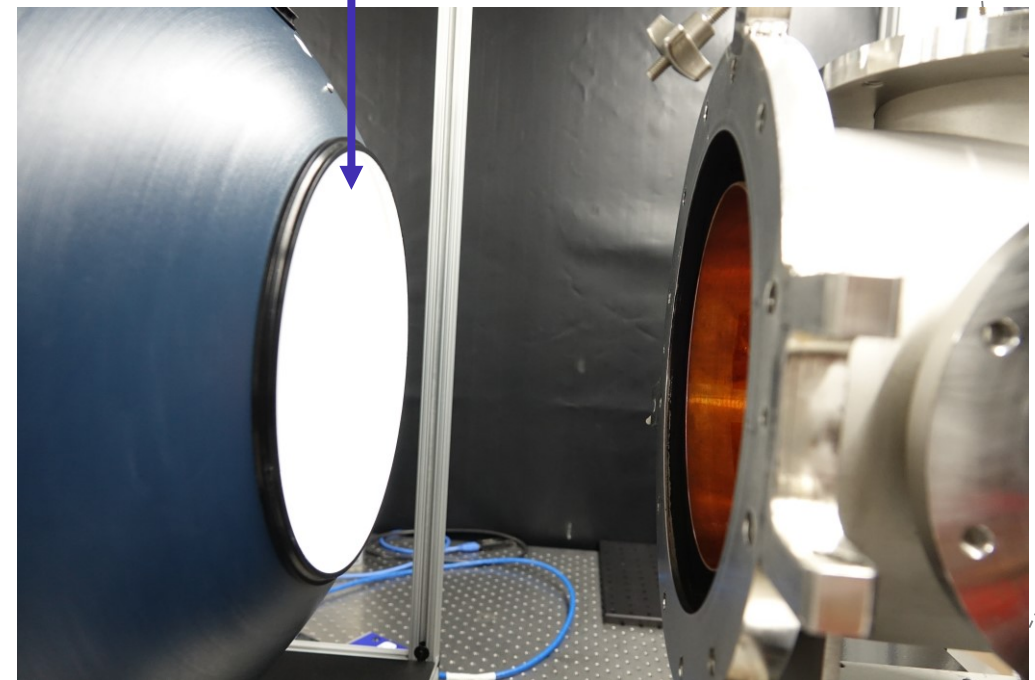
Central row of the spot of light with the 4-degree polynomial function fit  
 $f(x) = 1.14e-10x^4 + 4.51e-07x^3 + 4.00e-04x^2 + 9.20e-02x + 283.70$



L'objectif est rond et n'éclaire pas les bords du capteur carré

Port de sortie ~50cm

pour les caméras large champ >84° en bord d'image



# CAPTEUR ET OPTIQUE

## DISTORSION GÉOMÉTRIQUE

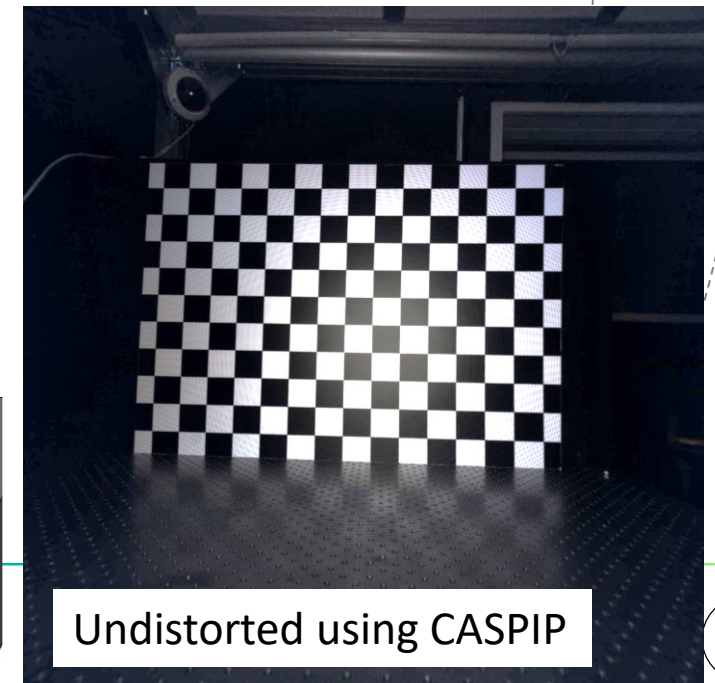
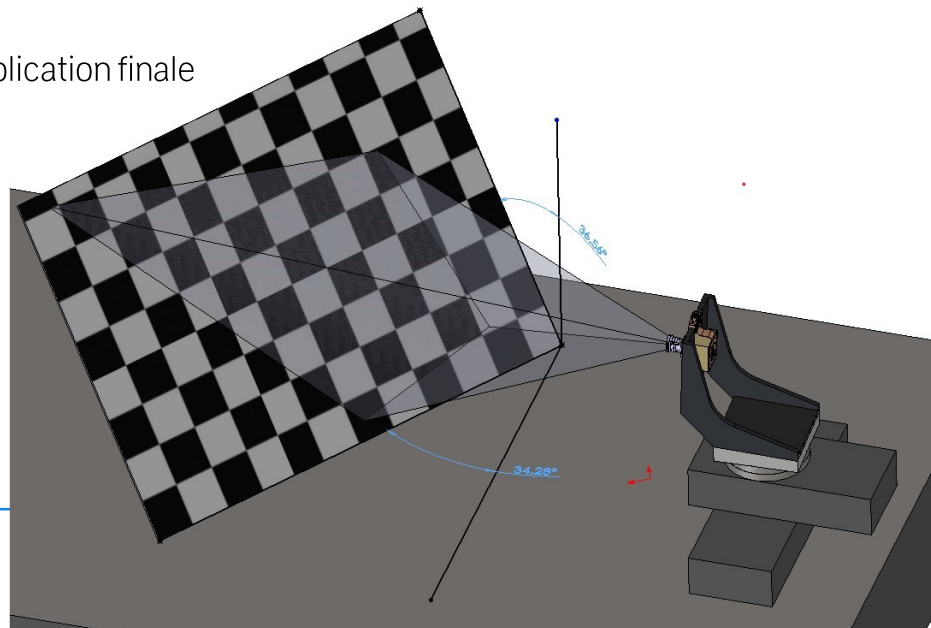
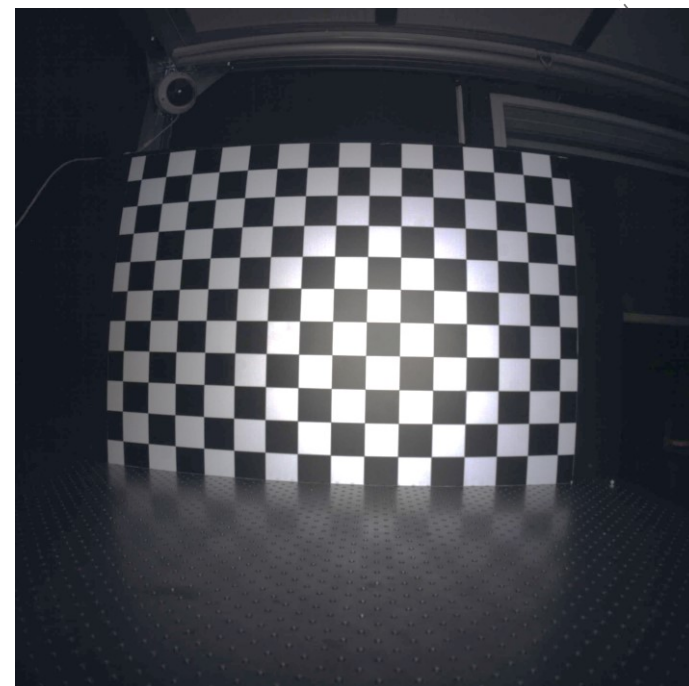
Plusieurs solutions possibles

Mires damiers de plusieurs tailles :

- Avec des **cases de taille intermédiaires**
  - Pas trop grandes pour avoir un bon échantillonnage du champ de vue
  - Pas trop petites pour avoir suffisamment de pixels par carré du damier
- Couvrant **tout le champ de vue**
- Distance et géométrie représentative de l'application finale

Les données sont utilisées pour le logiciel CASPIP de l'équipe qualité image du CNES

<https://www.connectbycnes.fr/caspiip>

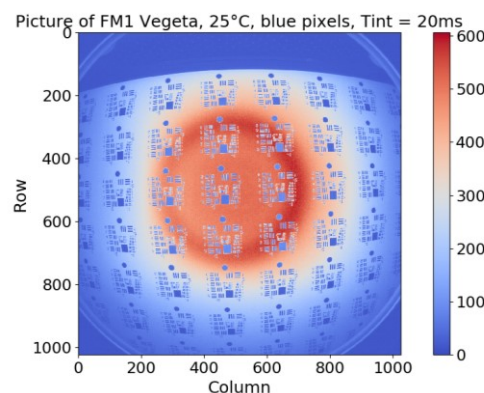
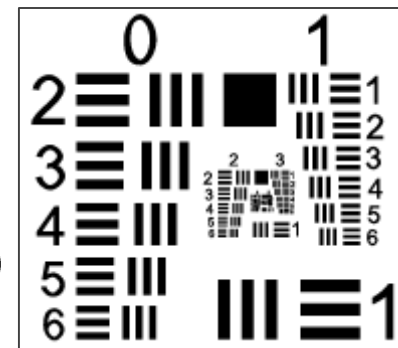
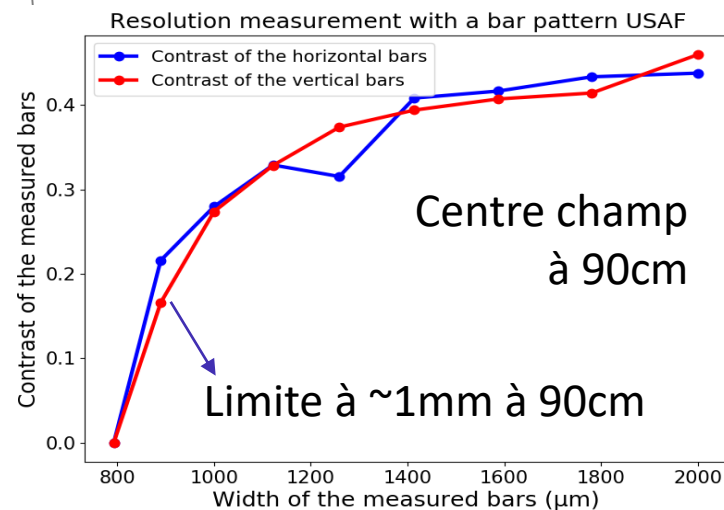


# CAPTEUR ET OPTIQUE RÉSOLUTION

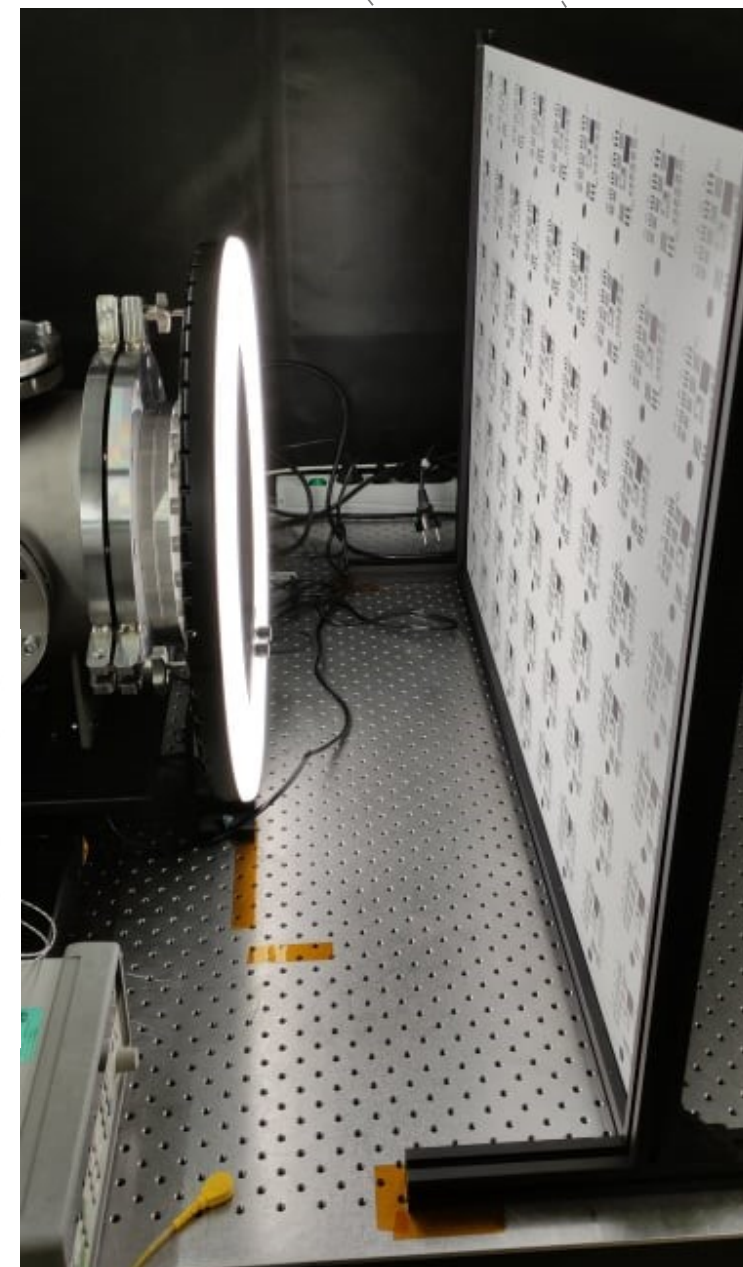
Plusieurs solutions possibles

Pour la simplicité de mise en œuvre et d'extraction : Mire USAF (MIL-STD-150A de 1951)

- Plusieurs largeurs de résolution en horizontal et vertical
- Extraction directe par le contraste en fonction de la largeur des bandes
- Extraction possible dans plusieurs zones du champ de vue

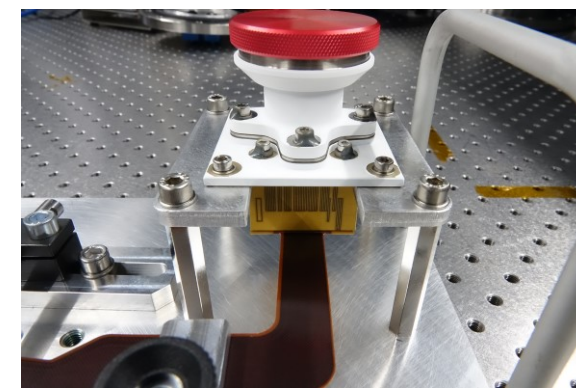
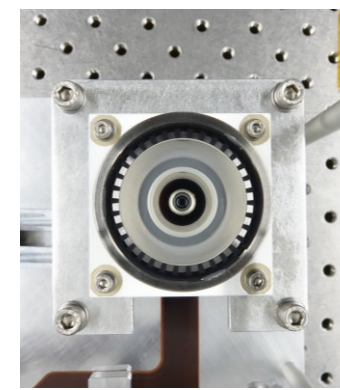
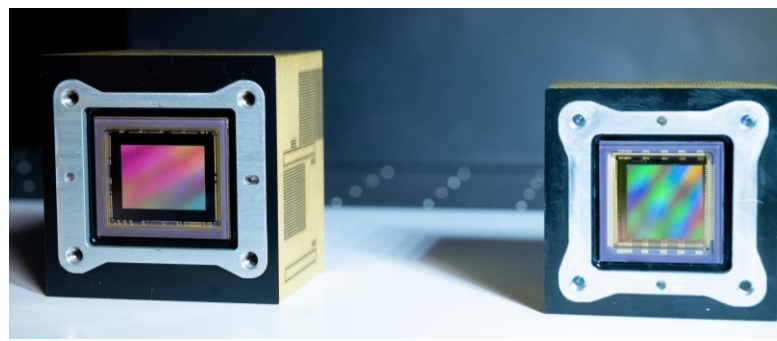


$$\text{Contrast} = \frac{\text{MaxVal} - \text{MinVal}}{\text{MaxVal} + \text{MinVal}}$$





# CONCLUSION



## CUBE CAMÉRA

Courant d'obscurité et énergie d'activation

Bruit

Offset

Saturation

Facteur de conversion (Charge to Voltage Factor)

Efficacité quantique

**Non-uniformités** (obscurité et illumination)

FTM / Résolution

Rémanence

Suréclairement

Pixels défectueux

## OBJECTIF

Transmission

Distorsion radiométrique

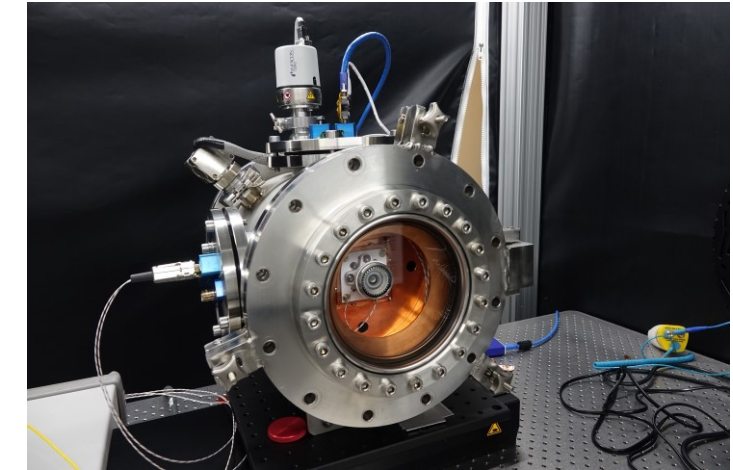
Distorsion géométrique

FTM / Résolution

## CAMERA COMPLÈTE

Calibration de température

Lumière parasite (ghost)



**CALIBRATIONS LONGUES (NOMBREUX CYCLES) ET PARFOIS DIFFICILES (BRUIT, DISTORSIONS, LUMIÈRE PARASITE ...)**

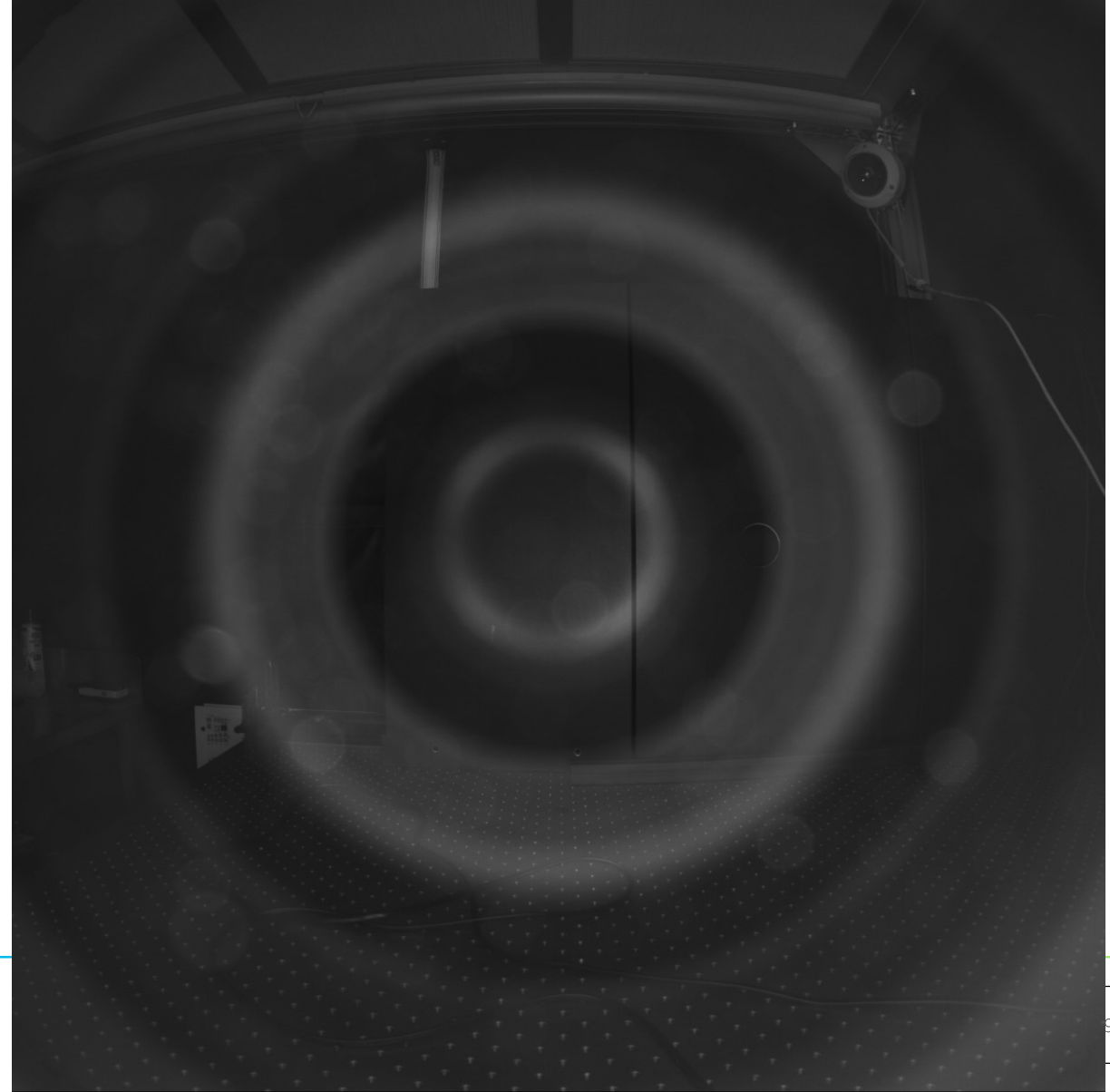
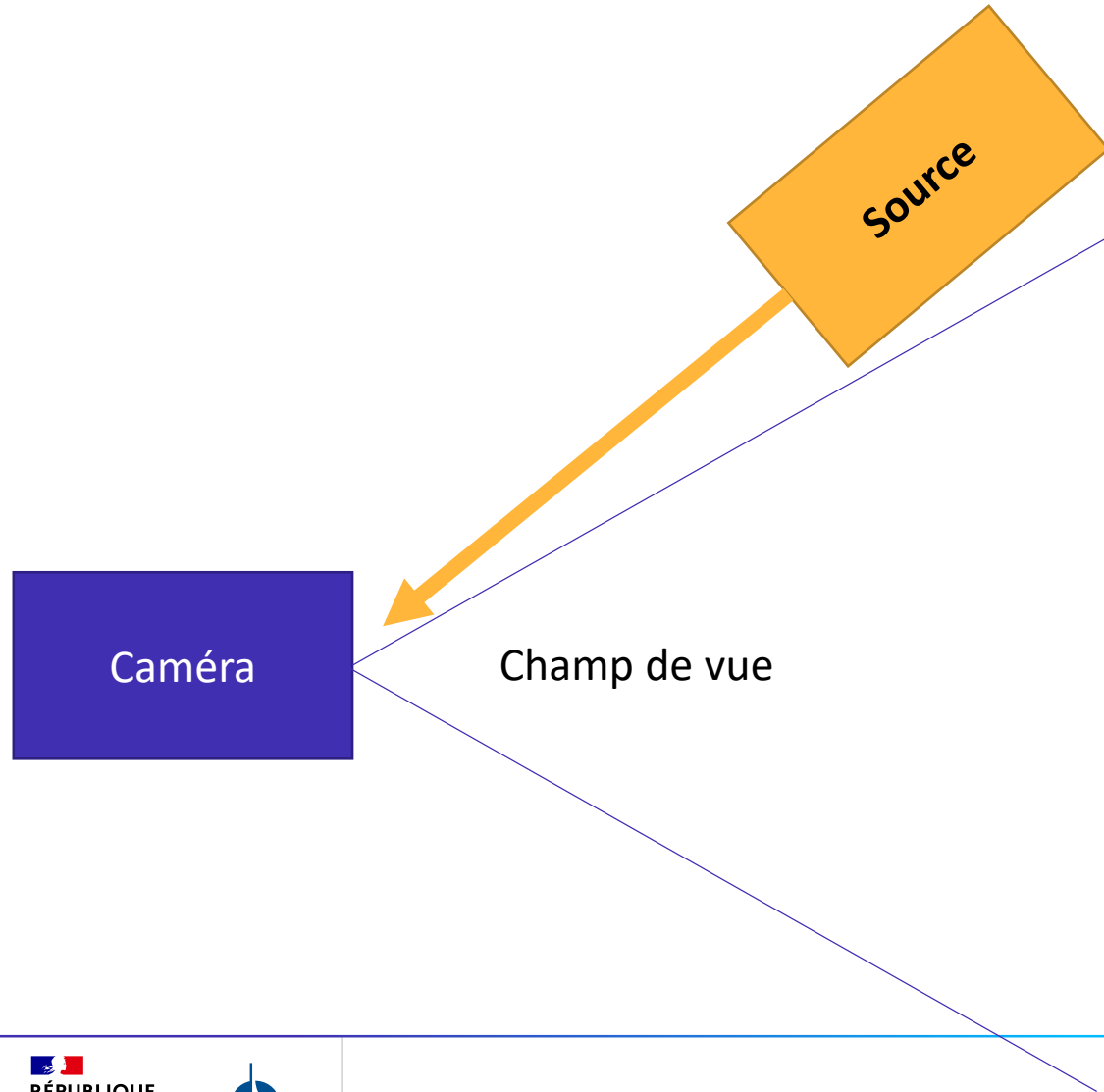


# MERCI POUR VOTRE ATTENTION

DES QUESTIONS ?



# CAPTEUR ET OPTIQUE LUMIÈRE PARASITE

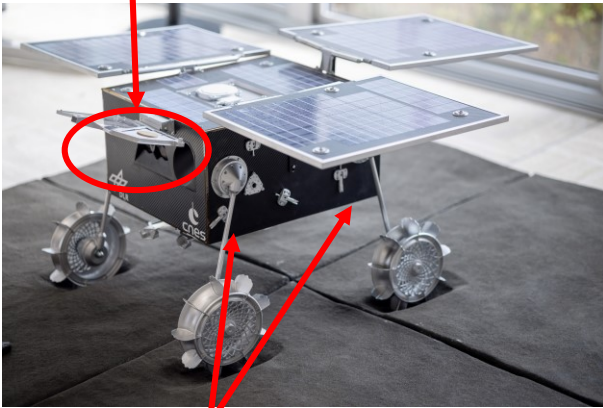


# PROJETS ET INSTRUMENTS



## ROVER MMX

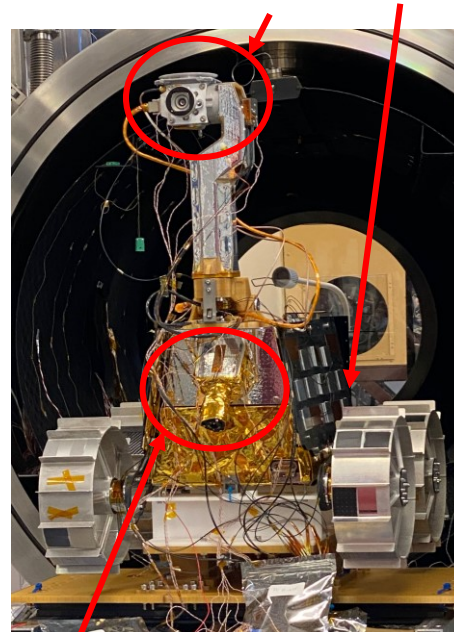
2x NavCam (stereo depth mapping)  
Engineering



2x WheelCam (dessous)  
Science

## ROVER RASHID 2 (RX1)

2x NavCam (mât et dos)



1x M-CAM (avant)

## ROVER RASHID 3 (RX2)

Caméras multi-spectrales  
au delà des 3 bandes classiques  
Rouge-Vert-Bleu

CAM-8 : 8 bandes

CAM-25 : 25 bandes