

# Rapport de caractérisation

|                                                                   |                                                            |                                                                                      |                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| <div>CAPTEUR</div> <div>IMX477</div> <div>4056 × 3040, BGGR</div> | <div>RAW</div> <div>12 bits</div> <div>SBGGR12_CSI2P</div> | <div>CONVERSION</div> <div>2,308 e<sup>-</sup>/ADU</div> <div>PTC · gain 1,000</div> | <div>TEMPÉRATURE</div> <div>0,4 °C</div> <div>8 télémétries absentes</div> |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|

## Synthèse des résultats

Résultats principaux et limites d'interprétation.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div>Analyse PTC</div> <div>Gain de conversion : 2,308 e<sup>-</sup>/ADU</div> <div>Dynamique : 11,11 diaphragmes</div> <div>Saturation observée ; capacité effective et dynamique calculées depuis la plage réellement exploitée avant écrêtage.</div> <div>Grandeurs non établies : indisponibles.</div> <div>VALIDÉE</div> | <div>Analyse du courant d'obscurité</div> <div>Analyse du courant d'obscurité : VALIDÉE</div> <div>Courant typique : NON RÉSOLU</div> <div>Statut de l'analyse thermique : VALIDÉE.</div> <div>Expositions : 8 paliers, de 0,1 à 300,0 s</div> <div>Une pente négative n'est ni un courant négatif ni nul.</div> <div>VALIDÉ</div> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## Qualité des mesures

Statut de validité des analyses, indépendamment du résultat mesuré.

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Format des données brutes (RAW) | VALIDÉ |
| Bruit de lecture                | VALIDÉ |
| PTC / linéarité                 | VALIDÉ |
| Analyse du courant d'obscurité  | VALIDÉ |
| Stabilité thermique             | VALIDÉ |

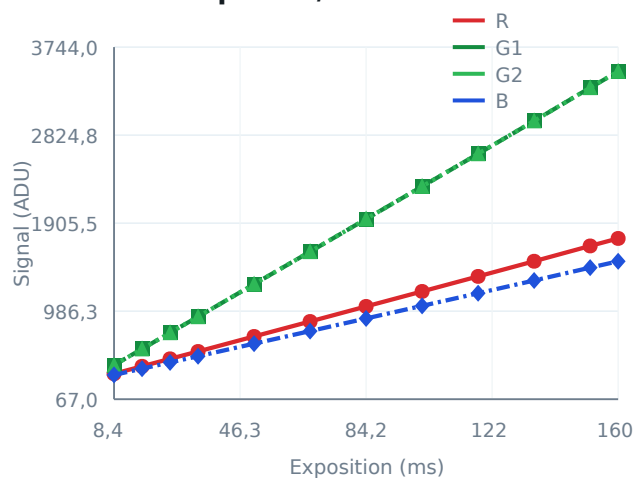
## Critères d'interprétation

Les conclusions privilégient les mesures stables et reproductibles.

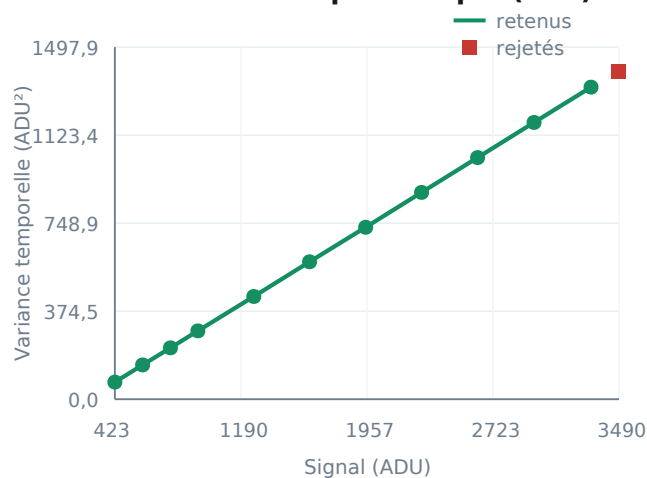
- Le gain de conversion est estimé sur la zone linéaire de la PTC.
- Les points clippés ou hors zone linéaire mesurée sont exclus du fit.
- Les images d'obscurité longues sont interprétables si la température reste stable.
- La température est quantifiée au degré, avec une marge de 2 °C crête à crête.
- Après reprise, seule la télémétrie thermique manque : les images sont conservées.

# Visualisation des mesures

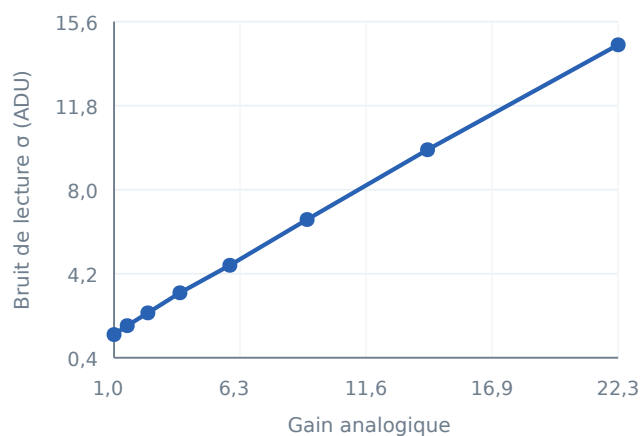
**Courbe de réponse / linéarité**



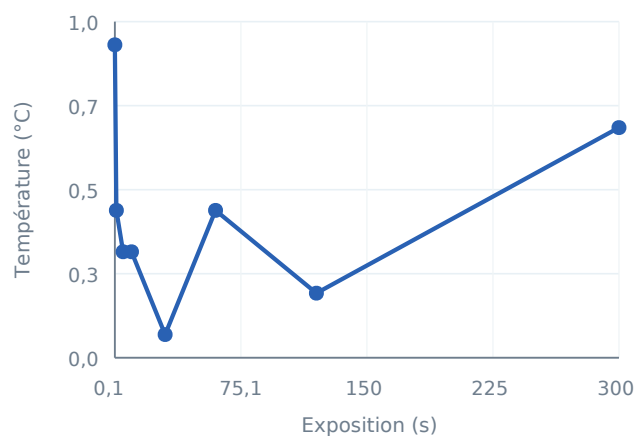
**Courbe de transfert photonique (PTC)**



**Bruit de lecture**



**Température moyenne par palier d'exposition**



## Interprétation

La pente PTC permet d'estimer le gain de conversion.

La dynamique utile combine la plage des données brutes (RAW) et le bruit de lecture.

Les images d'obscurité longues ne sont concluantes que sous température stable.

Les statuts décrivent la validité de l'analyse, indépendamment du résultat scientifique.

# Rapport de caractérisation

## Calibration des données brutes (RAW)

Niveau noir converti et plage numérique disponible en profondeur native.

Bits utiles : 12 bits

Niveau noir source : 64 · 10 bits ; niveau noir RAW converti : 256

Code blanc RAW : 4095 ; plage numérique RAW disponible : 3839 ADU

## Calibration PTC

Zone linéaire, incertitude et saturation observée.

Gain : 1,000 ; conversion : 2,3084 e<sup>-</sup>/ADU ± 0,0013

R<sup>2</sup> : 1,0000 ; niveaux acquis / retenus / rejetés : 12/11/1

Écrêtage maximal : 0,00169 ; seuil : 0,000100 ; saturation : observée

Plage effectivement exploitée avant saturation observée : 3234 ADU

Capacité effective correspondante : 7465 e<sup>-</sup> ; dynamique : 11,11 diaphragmes

## Bruit de lecture

Différence de paires ; bruit  $\sigma = \text{écart-type}(A-B)/\sqrt{2}$ .

| Gain   | R (ADU) | G1 (ADU) | G2 (ADU) | B (ADU) | Global (ADU) | Global (e <sup>-</sup> ) |
|--------|---------|----------|----------|---------|--------------|--------------------------|
| 1,000  | 1,455   | 1,477    | 1,476    | 1,457   | 1,466        | 3,385                    |
| 1,556  | 1,865   | 1,874    | 1,875    | 1,864   | 1,870        | 2,785                    |
| 2,427  | 2,445   | 2,454    | 2,453    | 2,443   | 2,449        | 2,359                    |
| 3,779  | 3,356   | 3,359    | 3,364    | 3,359   | 3,359        | 2,089                    |
| 5,885  | 4,603   | 4,608    | 4,647    | 4,604   | 4,606        | 1,845                    |
| 9,143  | 6,675   | 6,685    | 6,772    | 6,675   | 6,680        | 1,730                    |
| 14,222 | 9,830   | 9,849    | 9,969    | 9,837   | 9,843        | 1,649                    |
| 22,261 | 14,576  | 14,614   | 14,776   | 14,582  | 14,598       | 1,573                    |

Conversion e<sup>-</sup> indisponible aux gains sans PTC valide correspondante.

## Courant d'obscurité et pixels chauds

Population normale, queue positive et dérive globale du niveau noir.

Expositions analysées : 100 000 · 1 000 000 · 5 000 000 · 10 000 000 · 30 000 000 · 60 000 000 · 120 000 000 · 300 000 000 μs

Pente médiane de population : -0,0058 ADU/pixel/s ; p90 : 0,0071 ; p99 : 0,0319

Population normale : courant typique non résolu au-dessus de la dérive d'offset.

Pixels chauds détectés par évolution temporelle : régression par pixel.

Seuil = max(10 × |pente médiane|, 6 × 1,4826 × MAD) = 0,0576 ADU/pixel/s ; branche dominante : pente médiane

Population temporelle : 16 060 pixels ; détectés 23 (0,14 %)

Dérive globale du niveau noir : -0,002135 ADU/pixel/s ± 0,000953 ; R<sup>2</sup>=0,455 ; pente non significative

## Température

Synthèse thermique des images d'obscurité longues.

Stabilisation thermique : repos entre paliers 60 s

Images d'obscurité : Tmin 0,0 °C, Tmax 1,0 °C, amplitude 1,0 °C ; 8 températures manquantes

Corrélation température / log<sub>10</sub>(exposition) : r = -0,46

Statut de l'analyse thermique : VALIDÉ

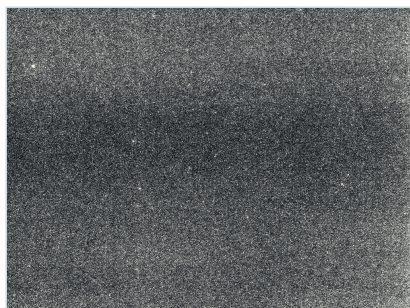
# Produits spatiaux dérivés

Analyse spatiale des images d'obscurité longues

page 4/6

## Master d'obscurité — vue réduite

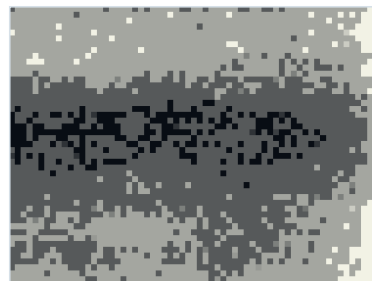
Master médian plein capteur réduit par surface · ADU



Échelle robuste : 254,908 à 257,586 ADU

## Structure basse fréquence (vue réduite)

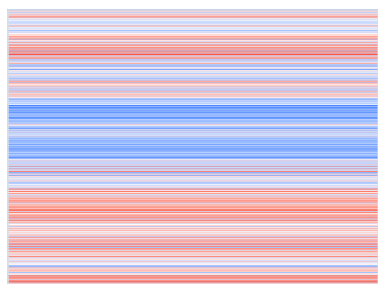
Bayer 2 × 2 · blocs de 32 × 32 cellules  
64 × 64 pixels · nearest-neighbor, sans antialias · ADU



Échelle robuste : 255,250 à 256,000 ADU

## Composante horizontale

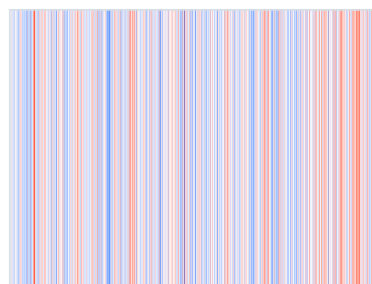
Vue réduite · carte rendue, moyenne par ligne  
(master réduit — basse fréquence) · ADU



Échelle : -0,117 à +0,117 ADU

## Composante verticale

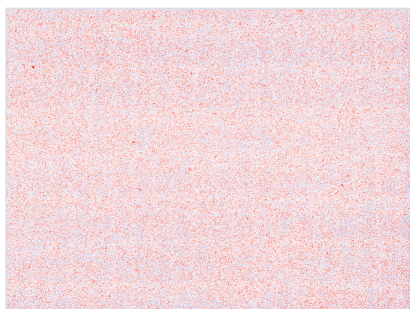
Vue réduite · carte rendue, moyenne par colonne  
(master réduit — basse fréquence) · ADU



Échelle : -0,115 à +0,115 ADU

## Résidu haute fréquence

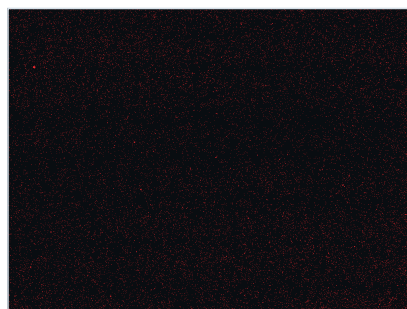
Vue réduite · master — fond — lignes — colonnes · ADU



Échelle : -1,888 à +1,888 ADU

## Candidats spatiaux de pixels chauds

Vue réduite · seuil 1,5517 ADU · masque binaire



Détectés : 26392 / 785408 (3,36 %)

Session : 20261006-173009\_libcamera

Algorithme : spatial\_dark\_analysis 1.1 · Capteur : IMX477 · CFA BGGR

Master : médiane temporelle entière de 10 images, 4056 × 3040 pixels · 300,000 s · gain 1,000

Vue : réduction surfacique du master plein capteur en 1024 × 767 pixels.

Mesures natives plein capteur : master médian entier ; masque p99,9 ; blocs directs 32 × 32 cellules Bayer.

Profils natifs : moyenne Bayer — médiane du bloc ; médiane par ligne/colonne ; profils centrés.

RMS des profils centrés : écart-type de population.

Cartes rendues : composantes horizontale/verticale = moyennes par ligne/colonne de (master réduit — fond basse fréquence).

PDF basse fréquence : blocs mesurés nearest-neighbor sans antialias ; reconstruction bilinéaire conservée pour H/V/résidu.

Candidats spatiaux : cellules de la vue réduite, pas des photosites ;  $|\text{résidu}| \geq \text{médiane}(|\text{résidu}|) + 6 \times \text{MAD}(|\text{résidu}|)$ , sinon  $\max(1e-9, p98(|\text{résidu}|))$ .

# Caractérisation PTC multi-gain

Évolution des performances avec le gain analogique

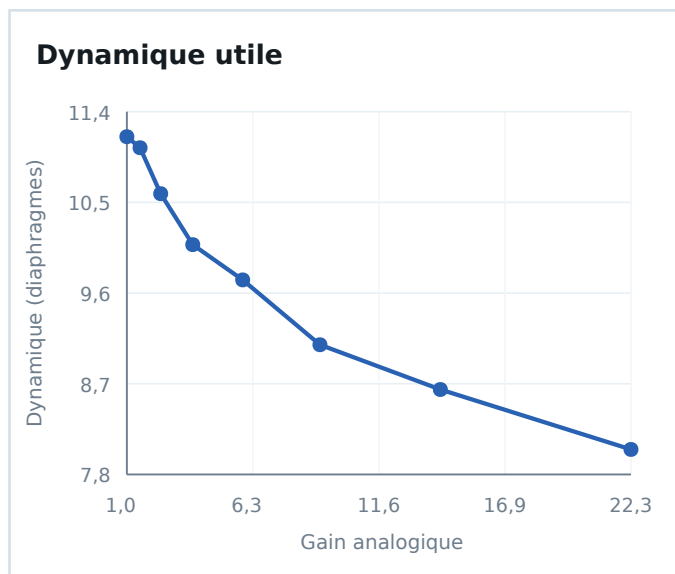
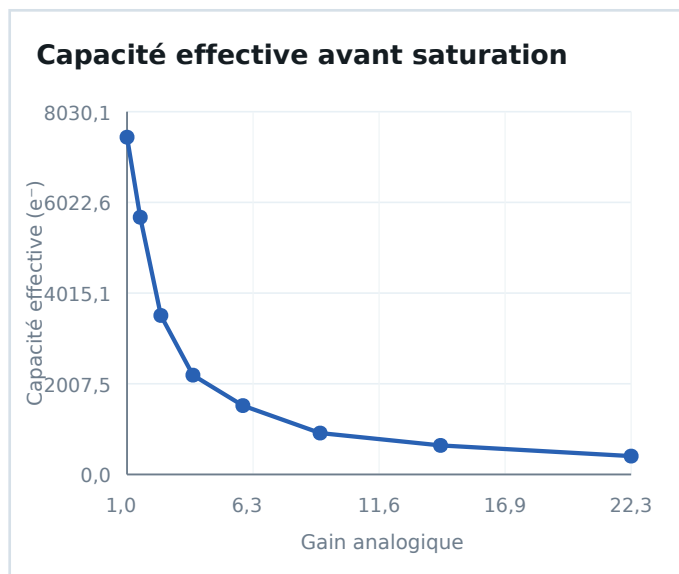
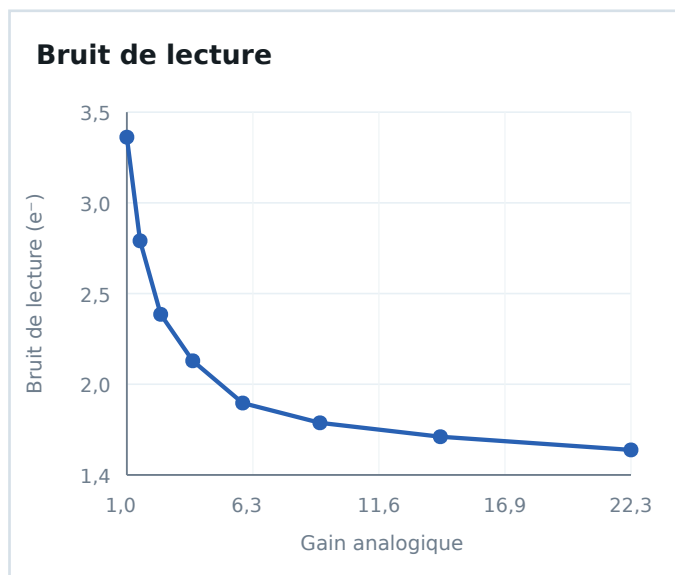
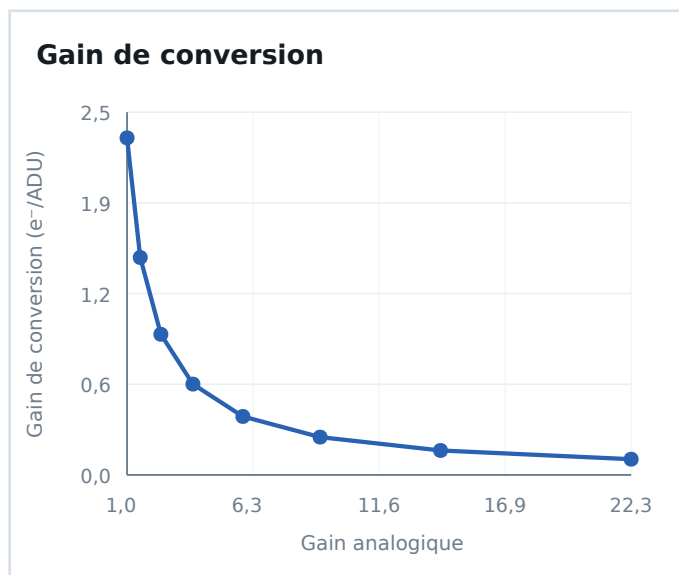
page 5/6

## Gains analogiques réellement mesurés : 8

Rupture de régime : aucune rupture statistiquement démontrée

Modèle continu retenu :  $c(g)=\exp(\text{polynôme}(\log g))$ , degré 1, BIC 12,15, monotone

Comparaison par loi de puissance :  $C = 2,309$  ;  $p = 0,988$



## Interprétation des résultats

Augmenter le gain analogique réduit généralement le bruit de lecture exprimé en électrons, mais diminue aussi la charge maximale mesurable avant saturation.

Une rupture candidate doit battre le meilleur modèle continu ( $\Delta\text{BIC} \geq 6$  et valeur p de rééchantillonnage  $\leq 0,01$ ) ; elle reste à confirmer par une campagne indépendante et n'est ni un gain optimal ni une consigne.

# Détail de la PTC multi-gain

Tous les gains disposant d’une PTC valide sont présentés.

La capacité effective combine la plage effectivement exploitée avant saturation observée et le gain de conversion ; elle ne décrit pas la capacité physique du photosite.

| Gain demandé | Gain réel | Conversion $e^-/ADU \pm inc.$ | Niveaux acquis / retenus / rejetés | Paires | Signal retenu (ADU) | Capacité effective ( $e^-$ ) | Écrêtage global |
|--------------|-----------|-------------------------------|------------------------------------|--------|---------------------|------------------------------|-----------------|
| 1,000        | 1,000     | $2,3084 \pm 0,0013$           | 12/11/1                            | 120    | 423,2 à 3320,1      | 7 465                        | observé         |
| 1,558        | 1,556     | $1,4893 \pm 0,0023$           | 12/8/4                             | 120    | 518,1 à 3409,3      | 5 694                        | observé         |
| 2,427        | 2,427     | $0,9632 \pm 0,0013$           | 12/9/3                             | 120    | 459,2 à 3108,9      | 3 519                        | observé         |
| 3,780        | 3,779     | $0,6220 \pm 0,0007$           | 12/11/1                            | 120    | 413,7 à 3110,3      | 2 198                        | observé         |
| 5,889        | 5,885     | $0,4005 \pm 0,0005$           | 12/8/4                             | 120    | 502,1 à 3229,1      | 1 524                        | observé         |
| 9,173        | 9,143     | $0,2590 \pm 0,0002$           | 12/9/3                             | 120    | 447,8 à 2939,2      | 917                          | observé         |
| 14,290       | 14,222    | $0,1676 \pm 0,0002$           | 12/6/6                             | 120    | 553,8 à 2630,7      | 643                          | observé         |
| 22,261       | 22,261    | $0,1078 \pm 0,0001$           | 12/8/4                             | 120    | 487,7 à 3050,0      | 407                          | observé         |

Écrêtage observé globalement par la fraction de photosites au code blanc ; l’écrtage par canal CFA n’est pas mesuré.