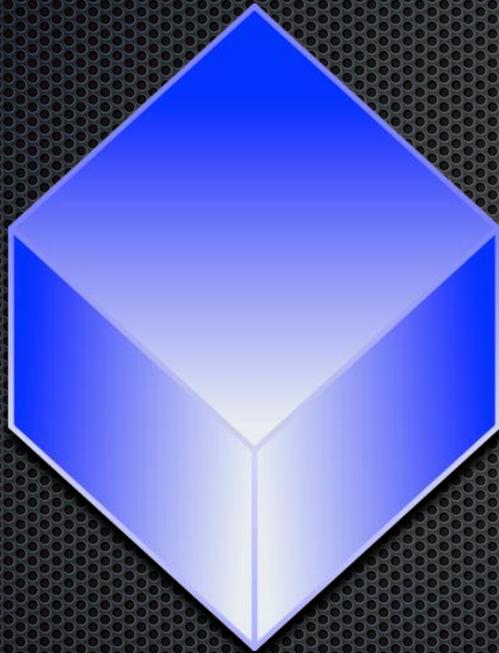


RCE Paris

1 – 3 novembre 2018



Théorie sur le bruit en astrophotographie



Didier Walliang

À PROPOS DE MOI



- ◉ Passionné d'astronomie depuis plus de 20 ans
- ◉ Fait de l'astrophotographie depuis 2008
- ◉ Membre et intervenant d'AIP depuis plusieurs années
- ◉ Président de la Société Lorraine d'Astronomie



AIP



- ◉ Astro-Images-Processing
- ◉ Association d'Astrophotographie
- ◉ Un site web avec des ressources (tutoriels vidéos, articles) : <https://www.astro-images-processing.fr>
- ◉ Des stages (acquisition et traitement : PixInsight, Photoshop, Siril...), concours de traitement...
- ◉ Cotisation : 25 € / an

AIP : CONFÉRENCES RCE 2018

◎ Salle 3



Date et heure	Conférence
Jeudi 1 ^{er} novembre	
11h00	Découverte de PixInsight pour les nuls – Valère PERROUD
12h00	Trucs et astuces sous Photoshop – Nicolas OUTTERS
16h30	Prétraiter une image APN avec PixInsight... – Patrick PELLETIER
18h30	Présentation de l'association AIP – Nicolas OUTTERS
Vendredi 2 novembre	
13h45	Nouveaux capteurs pour le ciel profond – Philippe BERNHARD
14h45	Théorie sur le bruit – Didier WALLIANG
16h45	Traiter une galaxie en LHaRGB avec PixInsight – Yves JONGEN
Samedi 3 novembre	
13h15	Gradients et calibration des couleurs avec PixInsight – Nicolas OUTTERS
14h15	Traiter une nébuleuse en SHO avec PixInsight – Georges CHASSAIGNE

CE QUE L'ON VERRA



- ◉ La théorie sur le bruit dans les images
- ◉ Orienté imagerie du ciel profond
- ◉ Quelques formules

CE QUE L'ON NE VERRA PAS



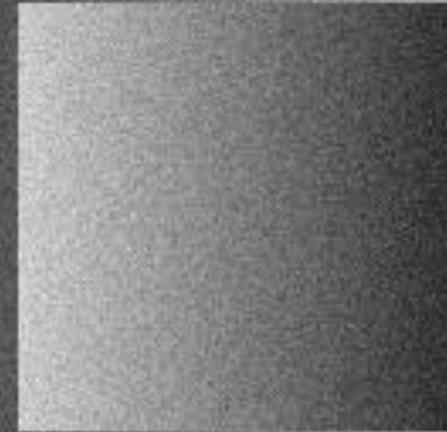
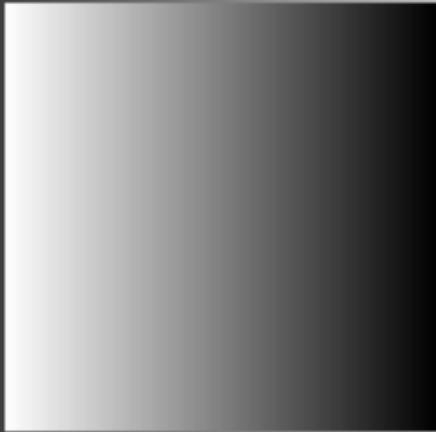
- ◉ Le traitement du bruit
- ◉ Des images couleur

PLAN



- ◉ Théorie sur la lumière
- ◉ Fonctionnement des capteurs numériques
- ◉ Les différents bruits
- ◉ L'addition des bruits

EXEMPLES D'IMAGES



Simulation du bruit

Source : <https://pixinsight.com/tutorials/nr-comparison/>

EXEMPLES D'IMAGES



M42 – Ha – 10x300s



M42 – Ha – 1x300s

Le bruit sur de vraies images



EXEMPLES D'IMAGES



- ◉ Le bruit est une fluctuation aléatoire autour de la vraie valeur de luminosité
- ◉ Analogue à une barre d'erreur dans une mesure

THÉORIE SUR LA LUMIÈRE



- ◉ Particularité de l'astrophotographie : très peu de lumière
- ◉ Le bruit doit être pris en considération
- ◉ Le concept de rapport signal/bruit est très important

DÉFINITIONS



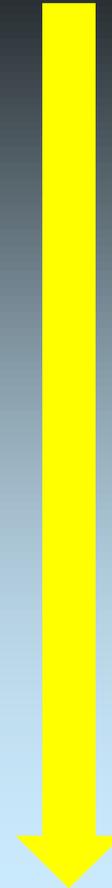
- ◉ Signal : reproductible
- ◉ Bruit : non reproductible, aléatoire
- ◉ Le bruit est une incertitude sur un signal (analogie avec une barre d'erreur)
- ◉ Un signal peut être reproduit et soustrait
- ◉ Un bruit peut être réduit mais jamais complètement éliminé
- ◉ Il existe des signaux indésirables (ex : signal thermique, pollution lumineuse , passage d'un satellite ...)
- ◉ A chaque signal est associé un bruit

LE SIGNAL LUMINEUX



- Les photons n'arrivent pas de manière régulière
- Ils arrivent de manière pseudo-aléatoire (loi de Poisson)
- Analogie avec les gouttes de pluie

Signal de l'objet



LE SIGNAL LUMINEUX



◉ Exemple de photons reçus :

- Première seconde : 21 photons
- Deuxième seconde : 19 photons
- Troisième seconde : 24 photons
- ...

LE SIGNAL LUMINEUX



- ◉ Cette fluctuation autour d'une valeur moyenne est appelée « bruit de photons »
- ◉ En statistique, on utilise l'écart type (sigma : σ) pour caractériser cette incertitude
- ◉ Avec peu de photons (astrophoto), le bruit de photons est très important par rapport au nombre de photons reçus

SIGNAL, BRUIT, RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT



◉ Exemple 1

- Signal : 100 photons
- Bruit : $\sqrt{\textit{photons}} = \sqrt{100} = 10$
- Rapport signal / bruit : $\frac{\textit{signal}}{\textit{bruit}} = \frac{100}{\sqrt{100}} = \frac{100}{10} = 10$

SIGNAL, BRUIT, RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT



◉ Exemple 2

- Signal : 1000 photons
- Bruit : $\sqrt{\textit{photons}} = \sqrt{1000} \approx 32$
- Rapport signal / bruit : $\frac{\textit{signal}}{\textit{bruit}} = \frac{1000}{\sqrt{1000}} \approx \frac{1000}{32} \approx 32$

CONCLUSION INTERMÉDIAIRE



- ◉ Le bruit de photons sera toujours présent (même avec un capteur parfait)
- ◉ Le bruit de photons dépend du nombre de photons reçus
- ◉ Plus le nombre de photons est important, plus le rapport signal/bruit est élevé

CONCLUSION INTERMÉDIAIRE

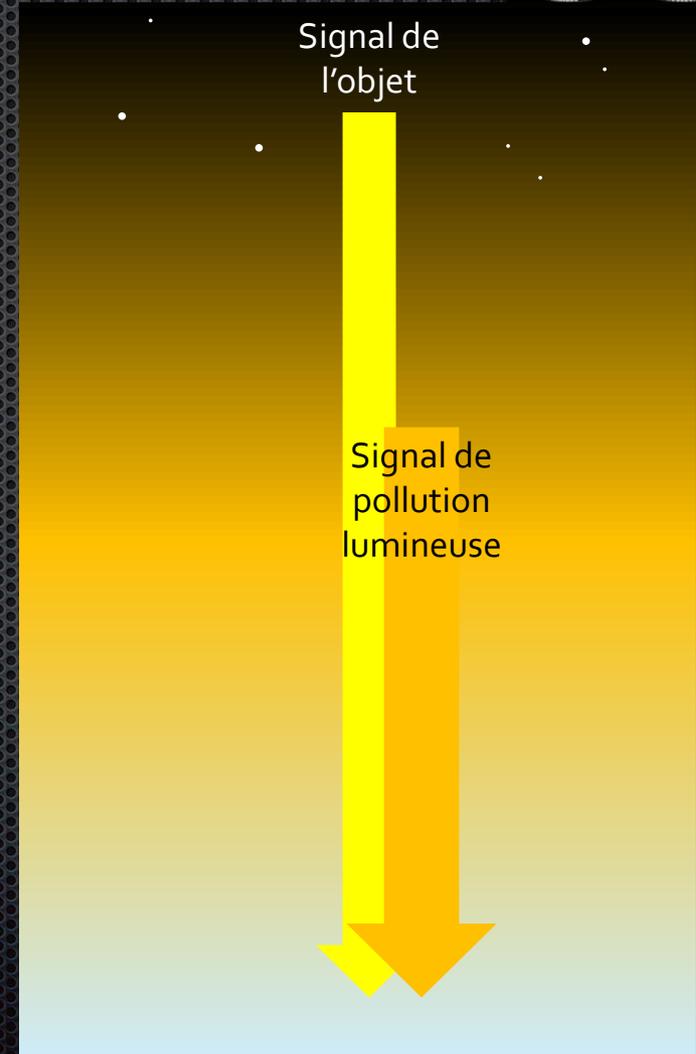


- Pour diviser le bruit par 2, il faut capturer 4x plus de photons :
 - temps de pose unitaire $\times 4$
 - ou 4x plus de poses unitaires
 - ou instrument plus ouvert (rapport f/d) d'un facteur 2
 - ou objet 2x plus lumineux en magnitude surfacique
- On peut aussi capturer une plus grande portion de ciel par pixel :
 - échantillonnage $\times 2$ (focale / 2 ou photosite 2x plus grand)
 - ou binning 2×2

L'INFLUENCE DE LA POLLUTION LUMINEUSE (PL)



- Ajoute un signal (des photons) indésirable
- On ne peut distinguer ces photons des autres
- => sature plus vite, réduit la dynamique
- On peut soustraire ce signal
- Mais le bruit associé reste présent



SIGNAL, BRUIT, RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT AVEC PL



◉ Exemple

- Signal de l'objet : 1000 photons
- Signal de PL : 2000 photons
- Bruit : $\sqrt{\textit{photons}} = \sqrt{1000 + 2000} = \sqrt{3000} \approx 55$
- Rapport signal / bruit : $\frac{\textit{signal utile}}{\textit{bruit}} = \frac{1000}{\sqrt{3000}} \approx \frac{1000}{55} \approx 18$
- Rappel : rapport signal / bruit (sans PL) ≈ 32

SIGNAL, BRUIT, RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT AVEC PL



◉ Exemple en posant 3x plus longtemps

- Signal de l'objet : 3 x 1000 photons
- Signal de pollution lumineuse : 3 x 2000 photons
- Rapport signal / bruit : $\frac{\text{signal utile}}{\text{bruit}} = \frac{3000}{\sqrt{9000}} \approx 32$
- Rappel : rapport signal / bruit (avec PL en posant 3x moins) ≈ 18
- Rappel : rapport signal / bruit (sans PL en posant 3x moins) ≈ 32

L'INFLUENCE DE LA POLLUTION LUMINEUSE



- ◉ La pollution lumineuse diminue le rapport signal/bruit (à temps de pose égal)
- ◉ Plus le signal utile est faible, plus la pollution lumineuse a une influence sur le rapport signal/bruit
- ◉ => pour compenser, il faut poser plus longtemps (en temps de pose total => concrètement faire plus de poses et diminuer le temps de pose unitaire pour éviter la saturation et conserver la dynamique)
- ◉ ou utiliser des filtres (pour les nébuleuses à émission)
- ◉ ou trouver un lieu d'observation moins pollué

DÉFINITIONS



- ◉ Photosite : un « point » sur le capteur
- ◉ Pixel : un « point » sur l'image
- ◉ e- : électron

COMMENT LES CAPTEURS NUMÉRIQUES FONCTIONNENT

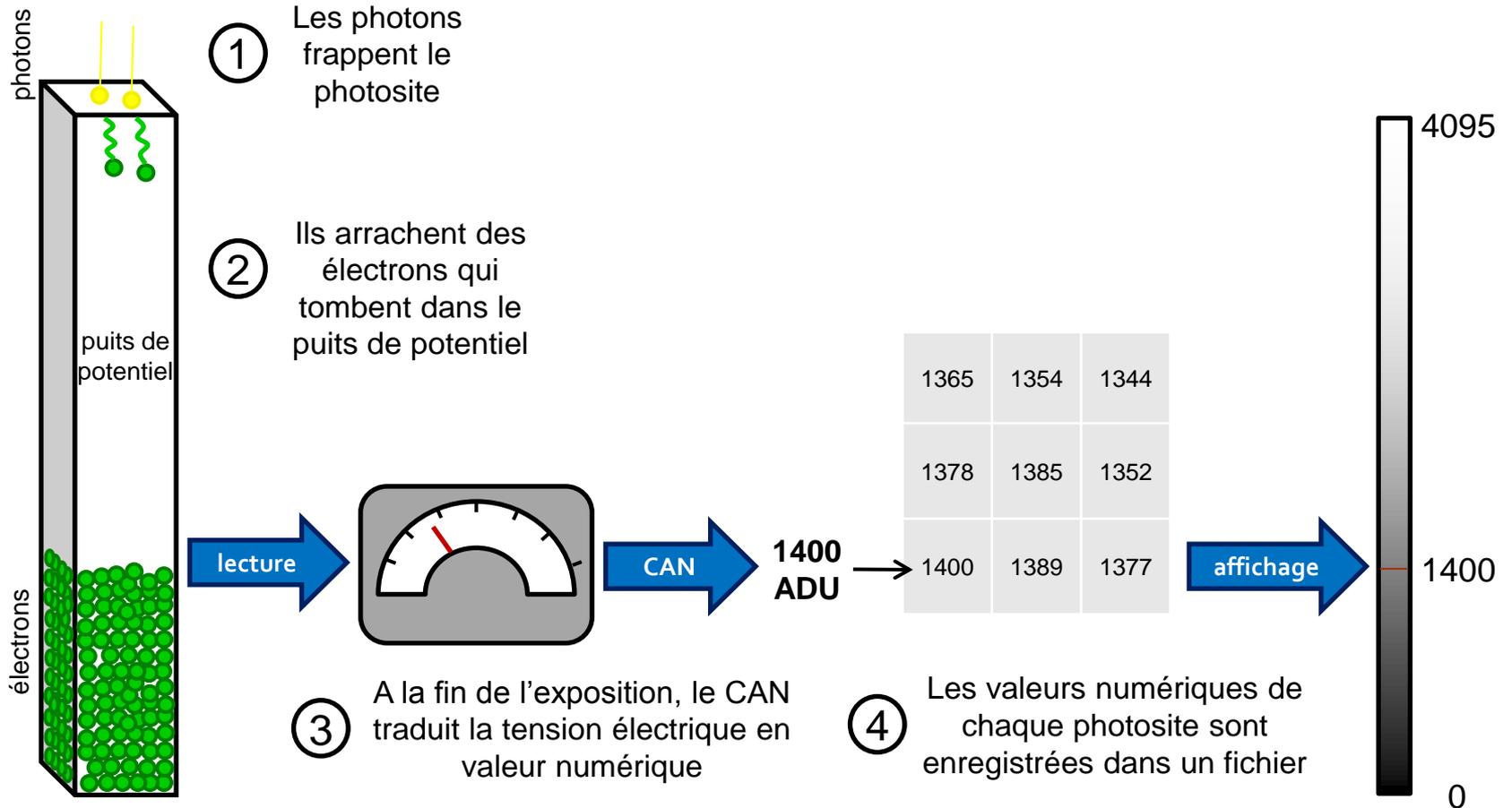
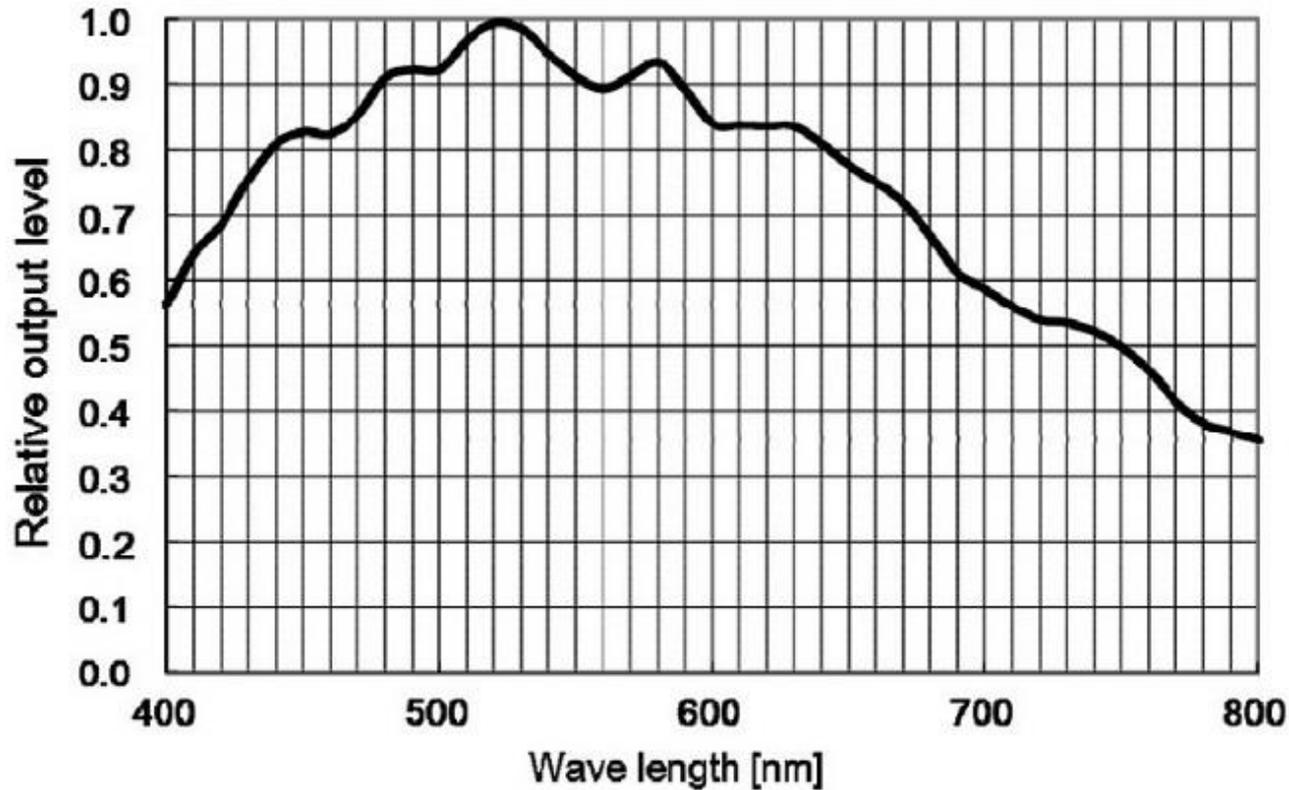


IMAGE FINALE



LE RENDEMENT QUANTIQUE



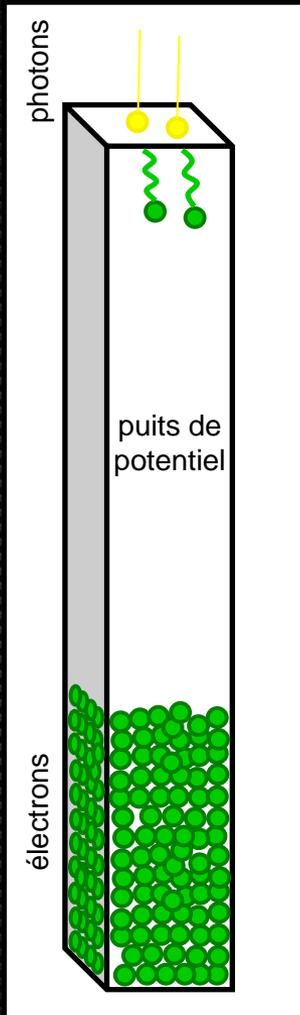
Rendement quantique relatif de l'ASI 1600MM (pic à environ 60%)

Source : <https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi1600mm-cool>



QE
60%

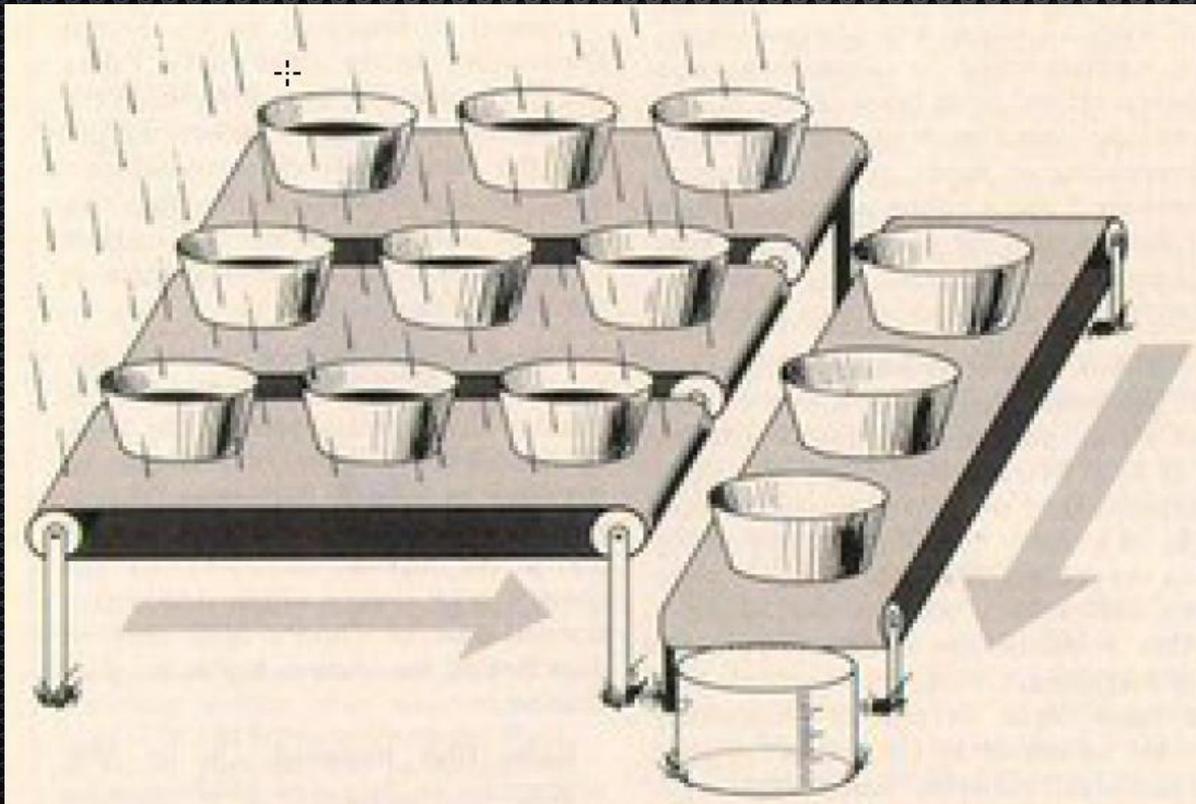
LA CAPACITÉ EN ELECTRONS



DIFFÉRENCE CCD-CMOS



- ◉ Lecture de l'information

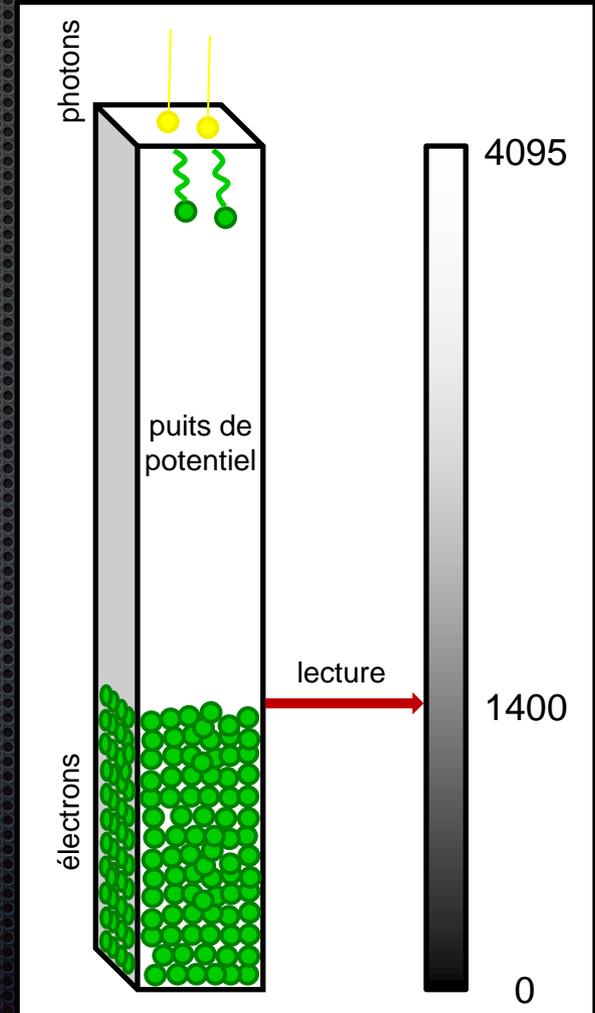
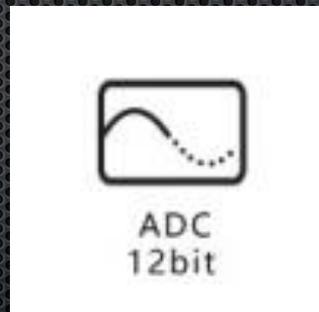


Lecture sur une caméra CCD
Source : ?

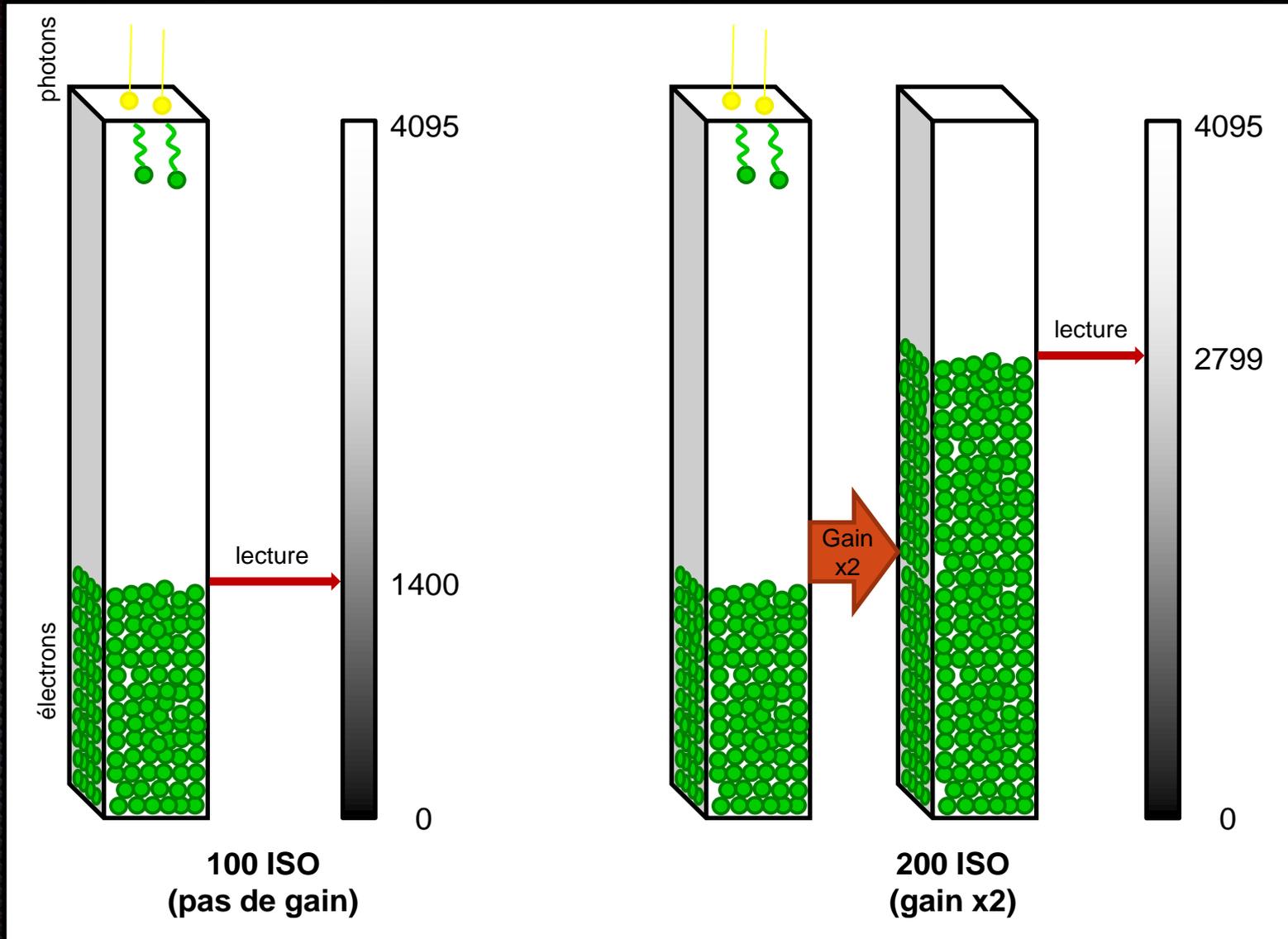
LE CONVERTISSEUR ANALOGIQUE- NUMÉRIQUE (CAN = ADC)



- ◉ 8 bits => $2^8 = 256$ niveaux de gris
- ◉ 12 bits => $2^{12} = 4096$ niveaux
- ◉ 14 bits => $2^{14} = 16384$ niveaux
- ◉ 16 bits => $2^{16} = 65536$ niveaux
- ◉ Unité : e- => ADU



GAIN, ISO, DYNAMIQUE

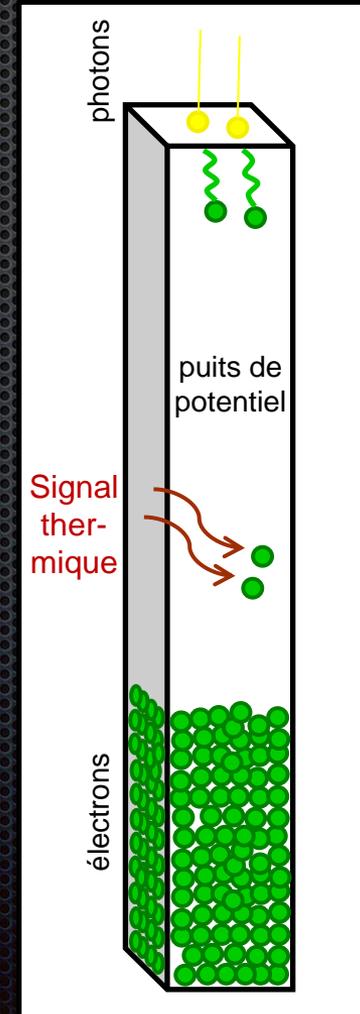
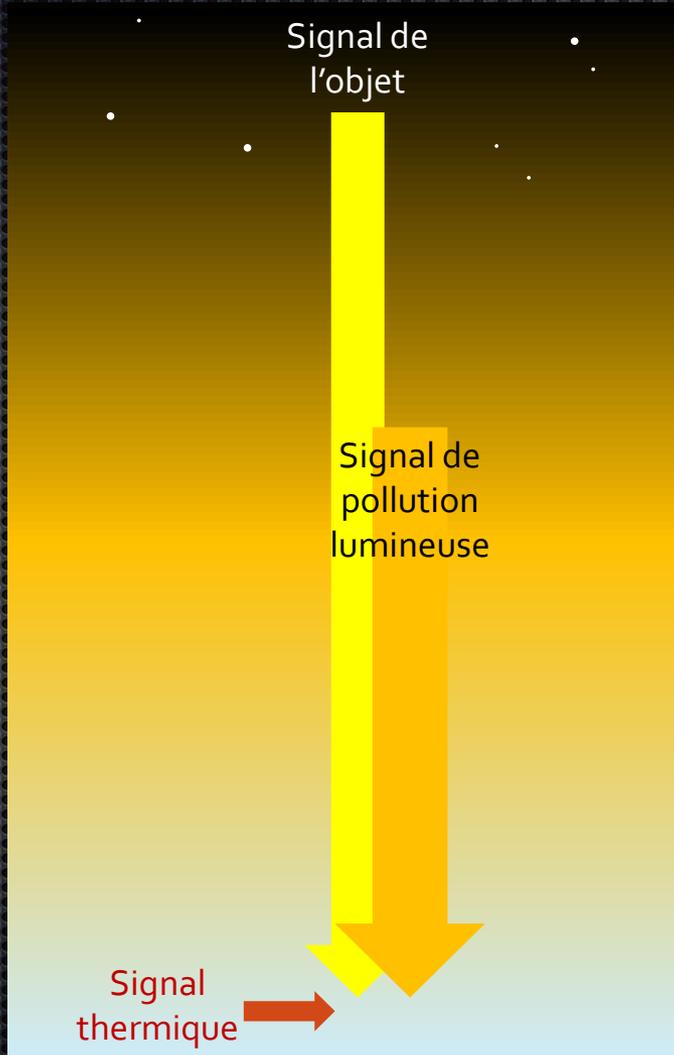


CHOISIR LES ISO OU LE GAIN



- ◉ Si l'objet est très lumineux ou a de grandes différences de luminosité, baisser le gain pour ne pas saturer et conserver toute la dynamique
- ◉ Si l'objet photographié est faible ou le temps de pose est court (lucky imaging), alors augmenter le gain pour discerner de faibles variations de lumière

LE SIGNAL THERMIQUE



LE SIGNAL THERMIQUE

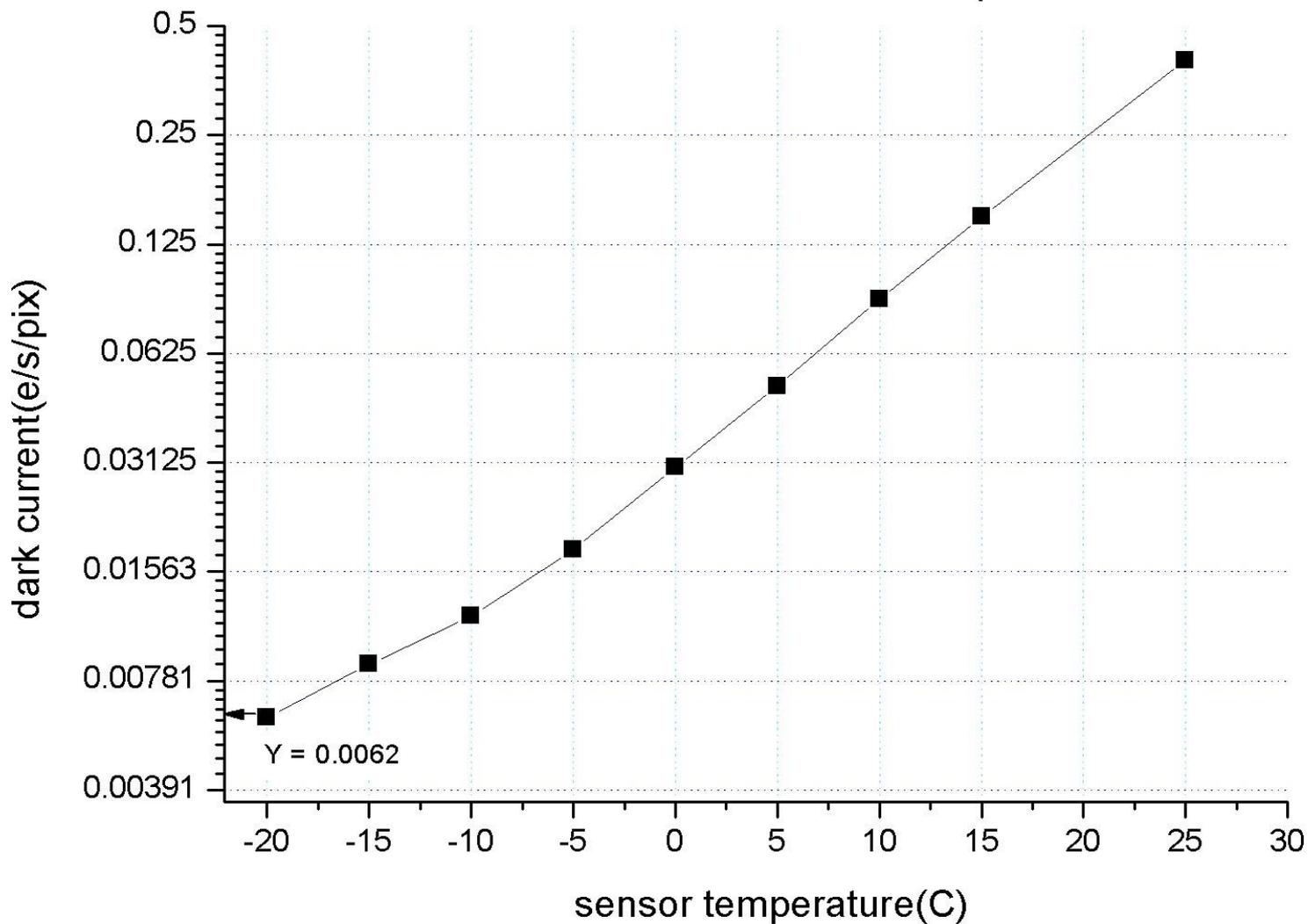


- Il dépend :
 - De la température
 - Du temps de pose
- Temps de pose x2 => signal thermique x2
- +6-7°C de température => signal thermique x2

=> d'où l'intérêt de refroidir les capteurs

- Ce signal est reproductible sur les darks (même température, temps de pose et gain), on peut le soustraire
- Mais à ce signal est associé un bruit (le bruit thermique) !
- Les constructeurs indiquent le signal thermique : courant d'obscurité

1600MC-Cool Dark current vs. temperature



Courant d'obscurité de l'ASI 1600 MC en fonction de la température (temps de pose : 300s)

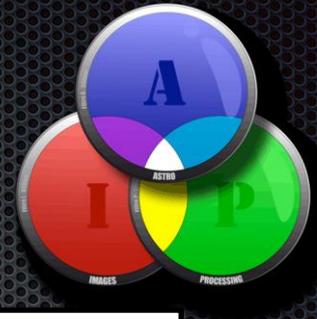
Source : <https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi1600mm-cool>

LES POINTS CHAUDS

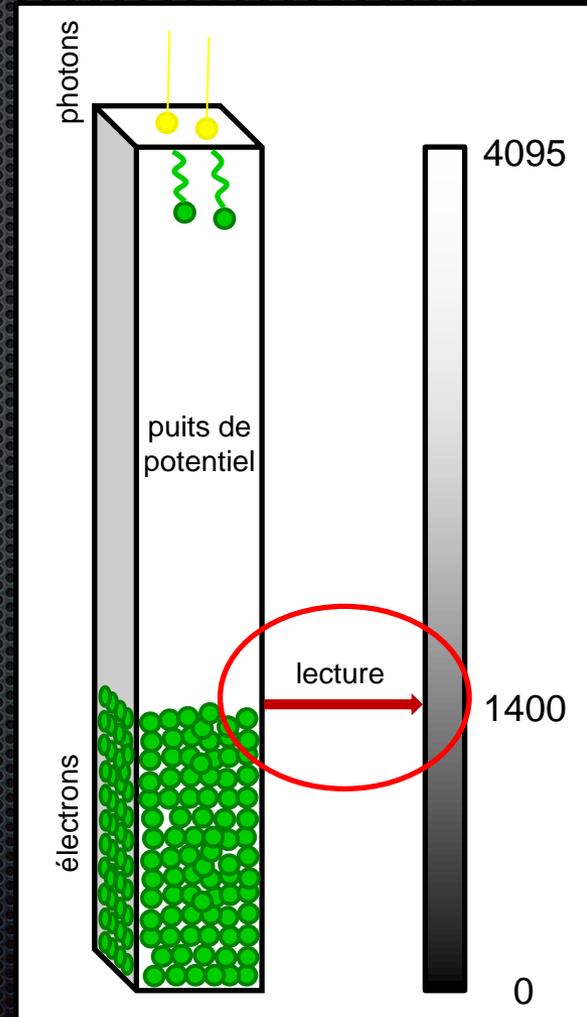


- Certains photosites sont plus sensibles au signal thermique que d'autres : cela donne des points chauds
- On peut les éliminer grâce aux darks
- Pour corriger certains points chauds récalcitrants, utiliser la correction cosmétique

LE BRUIT DE LECTURE



- Incertitude sur la mesure du courant électrique
- Unité : e-
- Selon les capteurs, compris entre 1 et 15 e-



LE BRUIT DE LECTURE



◉ Exemple :

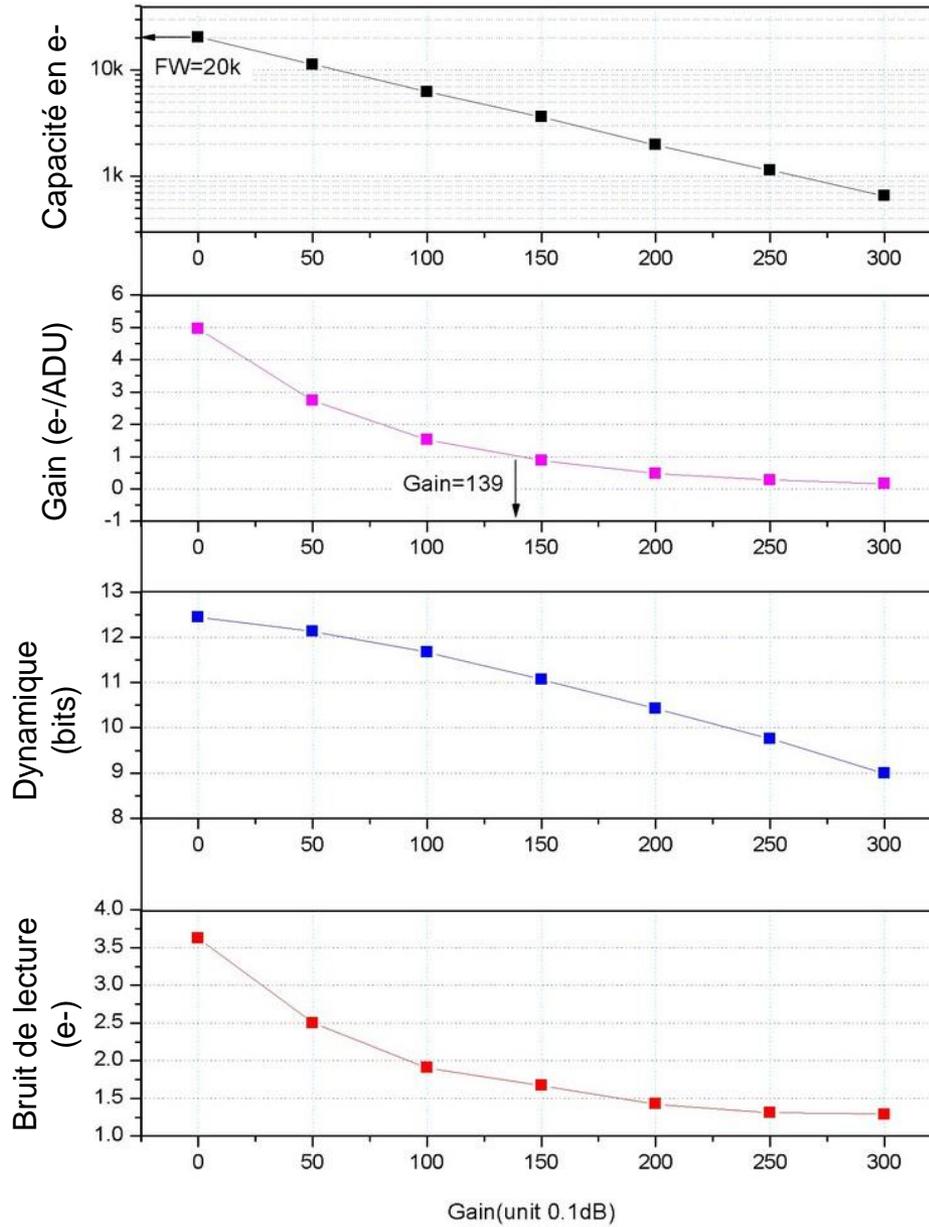
- 1000 e⁻ dans le puits de potentiel
- Gain : 1 e⁻/ADU
- Bruit de lecture : 10 e⁻
- Première lecture : 1011 ADU
- Deuxième lecture : 994 ADU
- Troisième lecture : 997 ADU
- ...

LE BRUIT DE LECTURE



- ◉ Le bruit de lecture ne dépend pas du temps de pose
- ◉ Il est introduit à chaque mesure du courant électrique (cad à chaque pose)
- ◉ Sur une caméra CCD, le bruit de lecture est fixe (car le gain est fixe)
- ◉ Sur une caméra CMOS (ou un APN), le bruit de lecture dépend du gain

Bruit de lecture, capacité en e-, gain et dynamique de l'ASI 1600



LE BRUIT DE QUANTIFICATION



- ◉ Lié à la numérisation du signal (convertisseur analogique-numérique – CAN/ADC)
- ◉ On passe d'un signal analogique *continu* à un signal numérique discret (nombre fini de valeurs)
- ◉ Si le CAN n'est pas assez précis, on perd de l'information
- ◉ En pratique, ce bruit est négligeable

LE BRUIT DE QUANTIFICATION



◉ Exemple :

- Capacité : 100 000 e-
- CAN : 10 bits ($2^{10} = 1024$ niveaux de gris)
- => ~ 100 e- pour 1 ADU
- => impossible de distinguer des différences de moins de 100 e-

CONCLUSION INTERMÉDIAIRE

SOURCES DE SIGNAL ET DE BRUIT

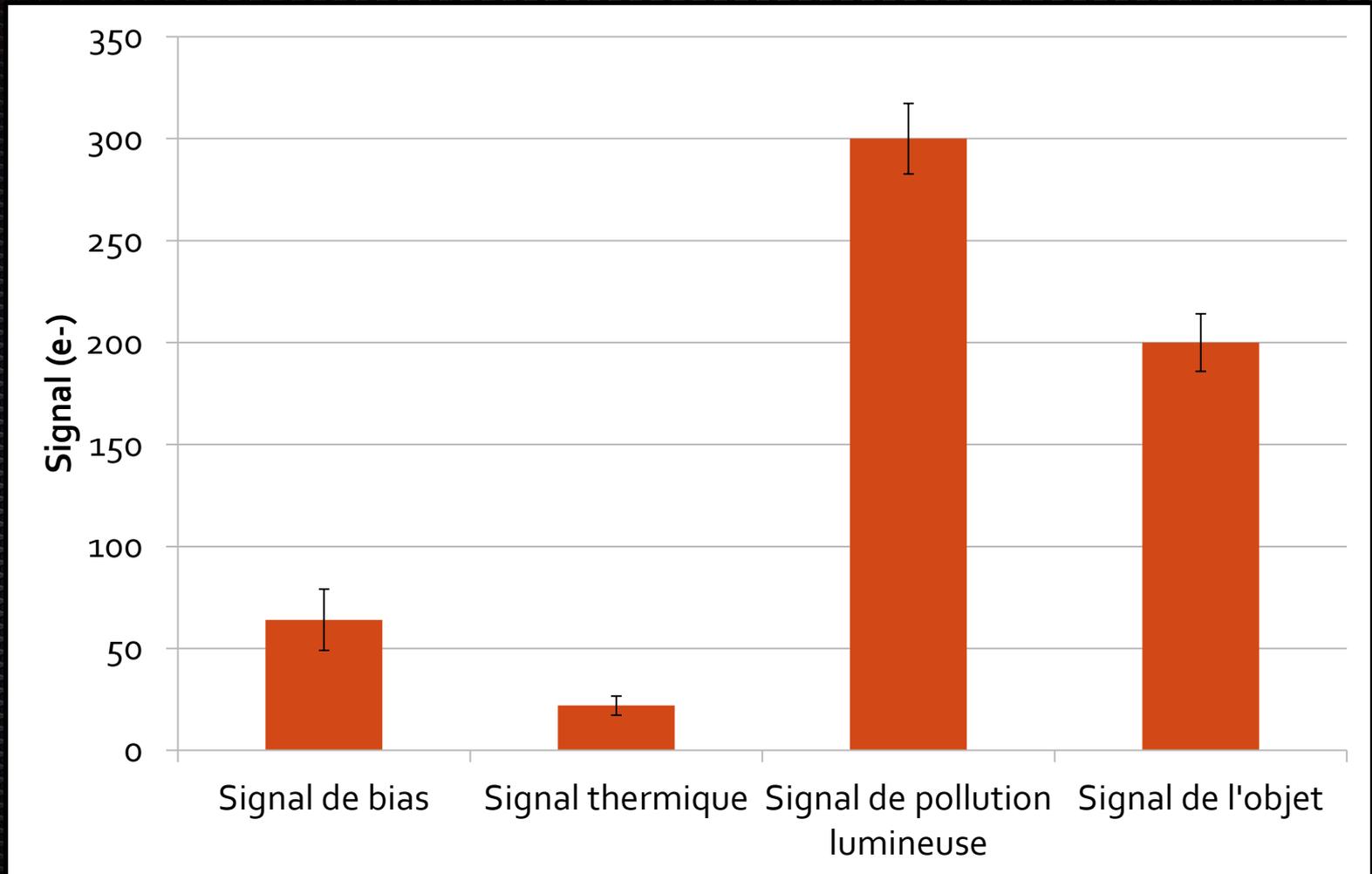


Source de signal	Bruit associé	Image pour les mesurer
Signal de bias (=offset)	<i>Bruit de lecture*</i>	Bias (=offset)
Signal thermique	Bruit thermique	Dark
Signal de pollution lumineuse	Bruit de photons	Light
Signal de l'objet	Bruit de photons	Light
	Bruit de quantification (négligeable)	

*Le bruit de lecture ne dépend pas du niveau du signal de bias

CONCLUSION INTERMÉDIAIRE

SOURCES DE SIGNAL ET DE BRUIT



ADDITIONNER LES SIGNAUX ET LES BRUITS



- Somme des signaux : somme classique
- Somme des bruits : somme quadratique
- $Bruit\ total = \sqrt{bruitA^2 + bruitB^2 + bruitC^2}$

ADDITIONNER LES SIGNAUX ET LES BRUITS



- *Bruit total* =
$$\frac{\sqrt{\text{bruit thermique}^2 + \text{bruit photons } PL^2 + \text{bruit photons objet}^2 + \text{bruit lecture}^2}}{\sqrt{\text{signal total en } e^- + \text{bruit lecture}^2}}$$
- Rapport signal / bruit = $\frac{\text{Signal utile}}{\text{Bruit total}}$

ADDITIONNER LES SIGNAUX ET LES BRUITS



○ Exemple :

	Signal (e-)	Bruit (e-)
Signal de bias	64	
Signal thermique	20	$\sqrt{20} \approx 4,5$
Signal de pollution lumineuse	300	$\sqrt{300} \approx 17,3$
Signal de l'objet	200	$\sqrt{200} \approx 14,1$
Bruit de lecture		15
TOTAL	584	$\sqrt{4,5^2 + 17,3^2 + 14,1^2 + 15^2}$ $= \sqrt{520 + 15^2} \approx 27,3$
Rapport signal/bruit		$200/27,3 \approx 7,3$

CONCLUSION INTERMÉDIAIRE



- Comme la somme des bruits est une somme de carrés, il faut réduire en priorité le bruit le plus élevé, les autres sont négligeables

A QUOI ÇA PEUT SERVIR ?



- ◉ A calculer l'impact du bruit des masters bias, dark et flat
- ◉ A calculer le temps de pose minimal (lucky imaging, filtres bande étroite, comètes, vidéos d'aurores...)
- ◉ Le temps de pose minimal dépend du bruit de lecture de la caméra et du niveau du signal reçu
- ◉ On considère que le signal de PL et de l'objet doit être au moins 3x supérieur au bruit de lecture

LE TEMPS DE POSE MINIMAL



M42 – Ha – 300s

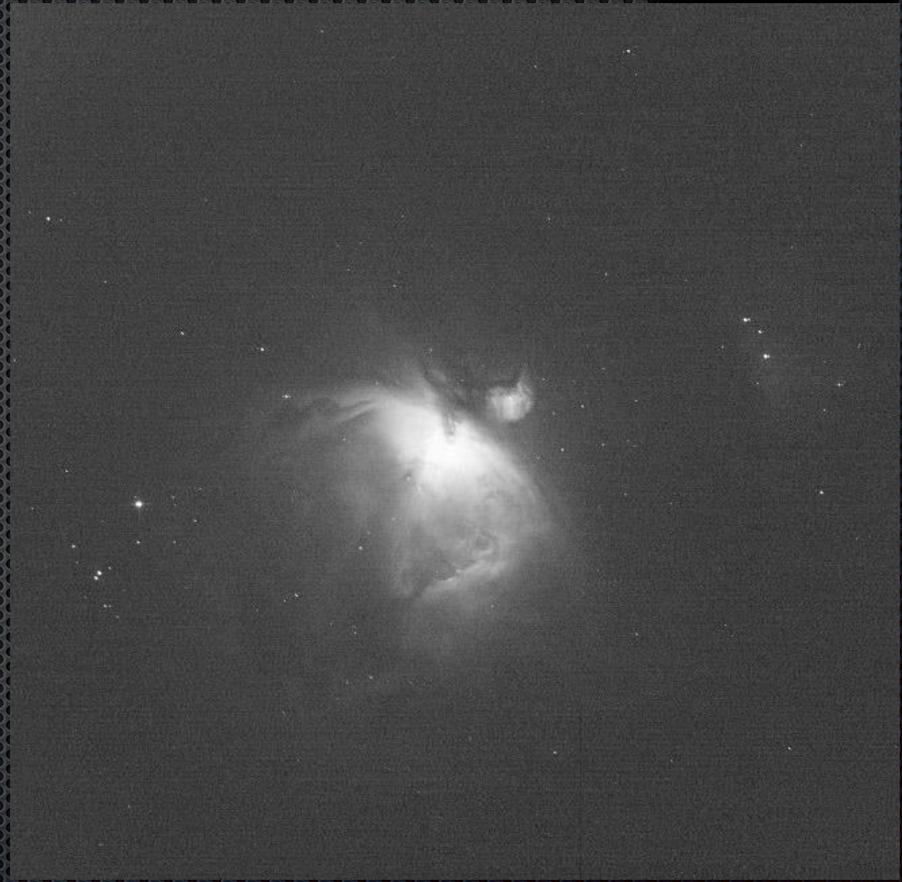


M42 – Ha – 10s

LE TEMPS DE POSE MINIMAL



M42 – Ha – 300s



M42 – Ha – 30x10s



10s est un temps de pose minimal trop court pour faire apparaître les extensions (même en empilant les images, on n'arrivera pas à faire ressortir les extensions)

CALCUL DU TEMPS DE POSE MINIMAL



- ◉ Mesurer le bruit de lecture en ADU
- ◉ Mesurer le niveau de fond de ciel en ADU sur une image prétraitée (masters bias et dark soustraits)
- ◉ Le niveau de fond de ciel doit être au moins 3x supérieur au bruit de lecture

MESURER LE BRUIT DE LECTURE



- Mesure simple :

- Bruit de lecture en ADU = écart type d'un bias

- Mesure pour les puristes :

- Soustraire deux bias (bias₁ – bias₂)
- Bruit de lecture en ADU = écart type (sur une zone) / $\sqrt{2}$

MESURER LE BRUIT SUR UNE IMAGE



Attention : par défaut « Standard deviation » n'est pas affiché dans le process Statistics de PixInsight

1

2

3

4

5

6

count (%)	100.00000
count (px)	5544
mean	1949.1
median	1950.0
stdDev	54.7
avgDev	43.9
MAD	37.5
minimum	1764.0
maximum	2163.0

Statistics Options

Available Statistics

- Count
- Mean
- Modulus
- Norm
- Sum of squares
- Mean of squares
- Median
- Variance
- Standard deviation
- Average absolute deviation
- Median absolute deviation (MAD)
- Biweight midvariance (BWMV)
- Percentage bend midvariance (PBMV)
- Sn
- Qn
- Minimum
- Maximum
- Minimum position
- Maximum position

Select All Unselect All Reset Save OK Cancel

TEMPS DE POSE MINIMAL



- ◉ Exemple avec M42
- ◉ Bias
 - Bruit de lecture mesuré: 17 ADU
- ◉ Pose de 10s
 - Fond de ciel : 20 ADU
- ◉ Pose de 300s
 - Fond de ciel : 170 ADU
- ◉ Temps de pose minimal
 - Entre 30 s et 100 s

TEMPS DE POSE MINIMAL

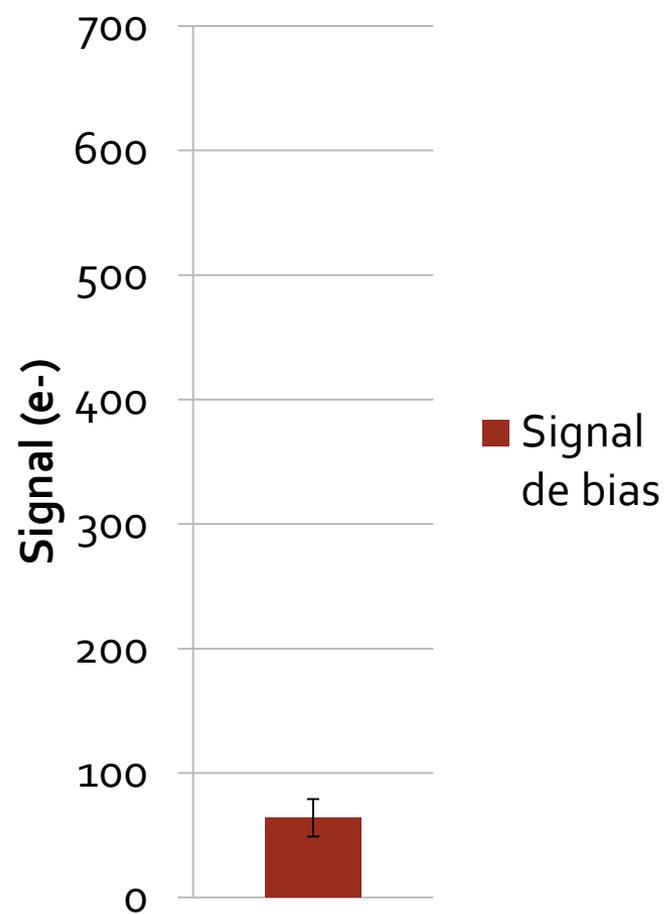


- ◉ Pollution lumineuse => temps de pose minimal plus court
- ◉ Filtre bande étroite => temps de pose minimal plus long

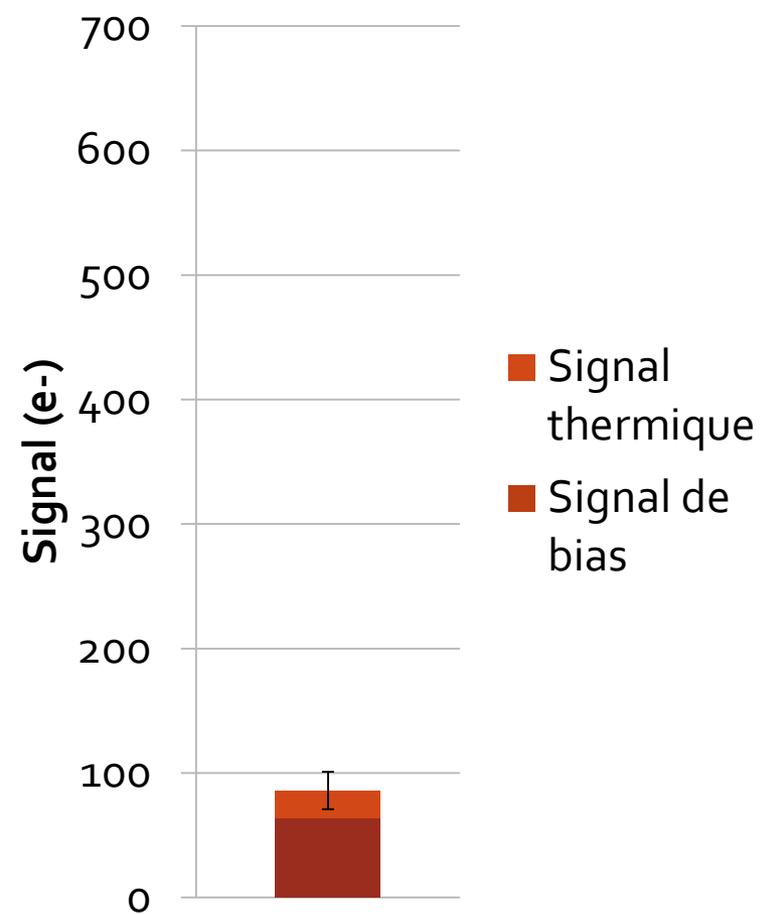
LES SIGNAUX ET BRUITS DANS LES IMAGES DE PRETRAITEMENT



Signal d'un bias



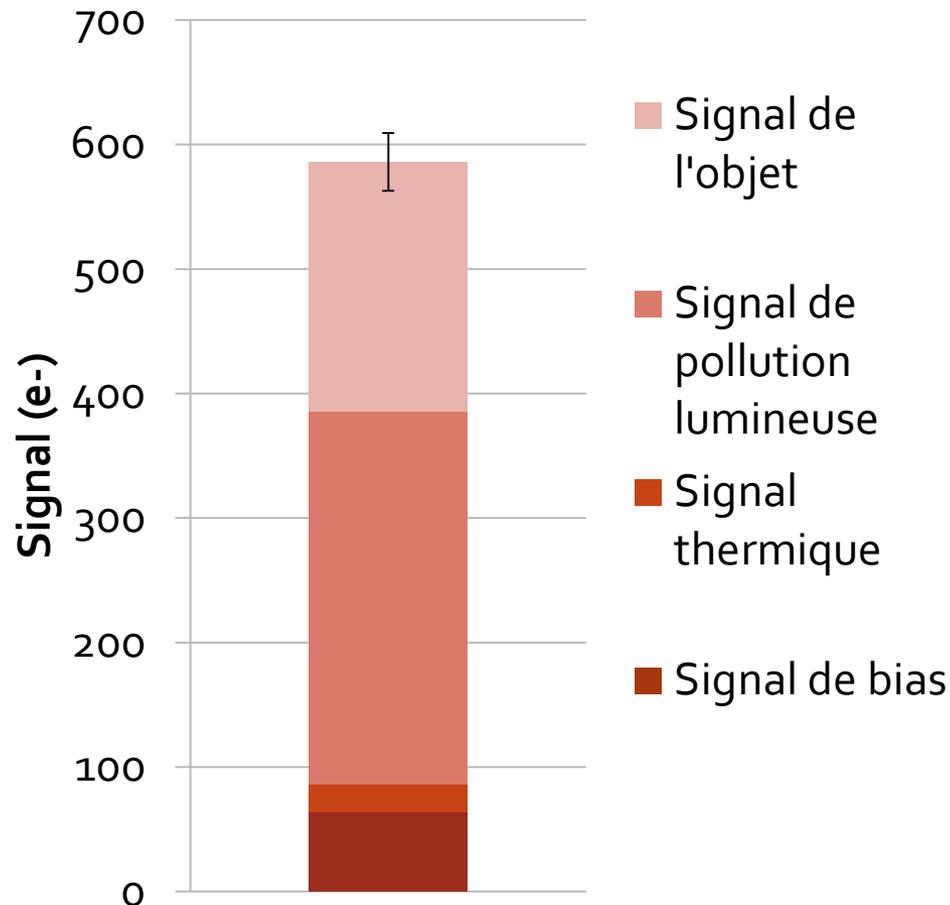
Signaux d'un dark



LES SIGNAUX ET BRUITS DANS LES IMAGES



Signaux d'une light



LES SIGNAUX ET BRUITS DANS LES IMAGES



Image	Signal présent	Bruit présent	Permet de mesurer
Bias	Signal de bias	Bruit de lecture	Signal de bias
Dark	Signal de bias Signal thermique	Bruit de lecture Bruit thermique	Signal thermique
Flat	Signal de bias Signal de photons (signal thermique si temps de pose > 10s)	Bruit de lecture Bruit de photons (bruit thermique)	Vignettage et poussières. Différence de sensibilité des photosites.
Light	Signal de bias Signal thermique Signal de photons	Bruit de lecture Bruit thermique Bruit de photons	Signal de l'objet

L'EMPILEMENT DES BIAS, DARKS ET FLATS



- L'empilement de plusieurs bias permet de réduire l'incertitude sur le signal de bias (fonction de $\sqrt{\text{nombre d'images}}$)

- 1 bias : incertitude = bruit de lecture
- 4 bias : incertitude = bruit de lecture / 2
- 16 bias : incertitude = bruit de lecture / 4
- 64 bias : incertitude = bruit de lecture / 8

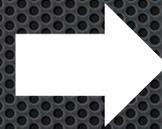
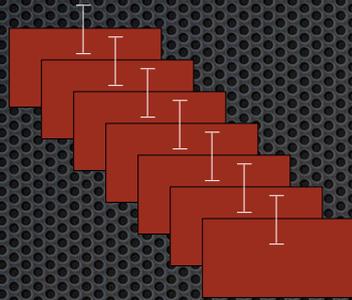


- L'empilement de plusieurs darks permet de réduire l'incertitude sur le signal de thermique
- L'empilement de plusieurs flats permet de réduire l'incertitude sur le signal de photons

PRÉTRAITEMENT : EMPILEMENT DES BIAS



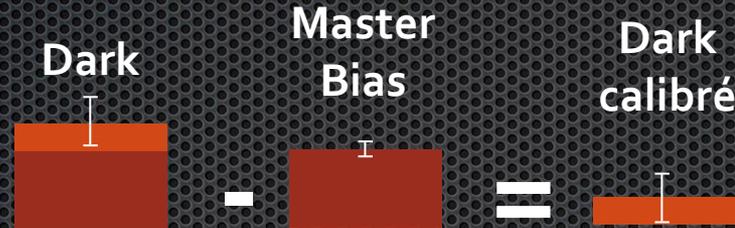
Bias



Master
Bias



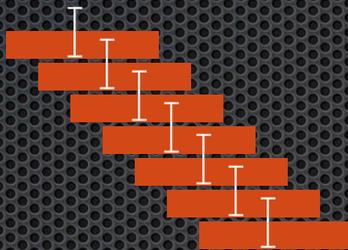
PRÉTRAITEMENT : CALIBRATION DES DARKS



PRÉTRAITEMENT : EMPILEMENT DES DARKS



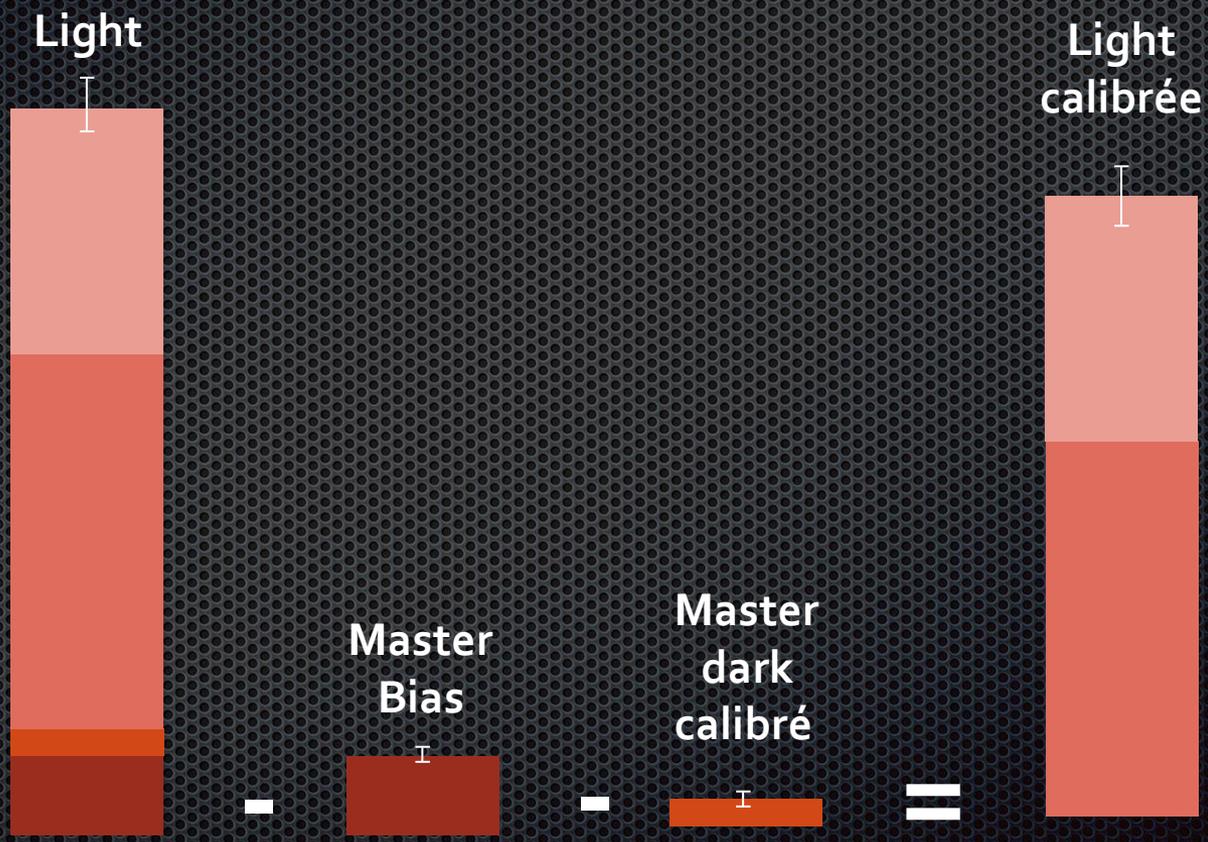
Darks
calibrés



Master
dark
calibré



PRÉTRAITEMENT : CALIBRATION DES LIGHTS



CONCLUSION INTERMÉDIAIRE



- ◉ Contrairement à une idée reçue, le pré-traitement ajoute du bruit
- ◉ Le bruit ajouté est négligeable si le nombre de bias, darks et flats est suffisant
- ◉ Le pré-traitement enlève des signaux inutiles (bias, signal thermique, points chaud...)

EMPILEMENT DES LIGHTS



- L'empilement de N images de X secondes est équivalent en terme de rapport signal / bruit à une seule image de N x X secondes (si temps de pose unitaire supérieur ou égal au temps de pose minimal)
- En faisant une moyenne, bruit divisé par $\sqrt{\text{nombre d'images}}$
 - 4 images : bruit / 2
 - 8 images : bruit / 2,8
 - 16 images : bruit / 4
 - 32 images : bruit / 5,6
 - 64 images : bruit / 8
- En faisant une médiane, bruit divisé par $0,8 \times \sqrt{\text{nombre d'images}}$

CONCLUSION



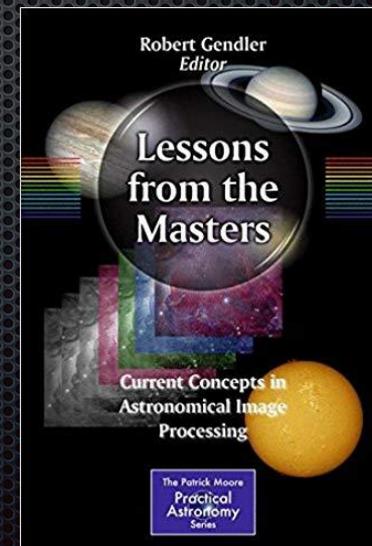
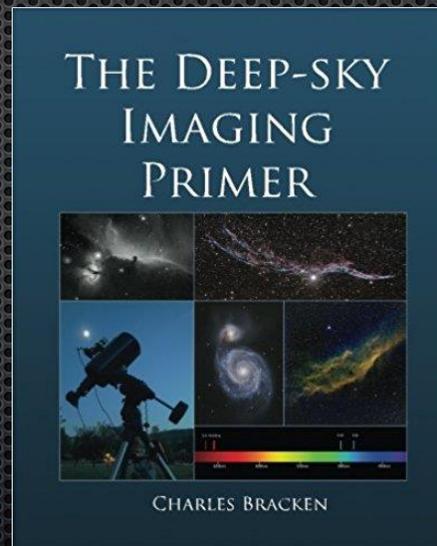
◎ La gestion du bruit commence à l'acquisition !

- En CP, il faut avoir un temps de pose total très long (plusieurs heures) à cause du bruit de photons qui sera toujours présent
- Pour limiter le bruit supplémentaire introduit lors du prétraitement, faire suffisamment de bias, darks et flats (plusieurs dizaines), faire du dithering
- Chercher un site d'observation avec le moins de PL possible
- ou utiliser des filtres bandes étroites ou anti-pollution sur les nébuleuses à émission
- En fonction du bruit de lecture et du fond de ciel, ne pas faire des temps de pose individuels trop courts

BIBLIOGRAPHIE



- ◉ *The Deep-sky Imaging Primer* par Charles Bracken
- ◉ *Lessons from the Masters: Current Concepts in Astronomical Image Processing* dirigé par Robert Gendler



ANNEXE : TRADUCTION



- ◉ Full well capacity = capacité en électrons
- ◉ Dark current = courant d'obscurité
- ◉ Read noise = bruit de lecture
- ◉ Quantum efficiency = rendement quantique
- ◉ SNR = rapport signal sur bruit
- ◉ Standard deviation = écart type
- ◉ Mean = moyenne

ANNEXE : MESURE DU GAIN



Pré-requis : disposer de 2 flats

1. Sélectionner une zone homogène sur un des flats et mesurer la valeur moyenne (M)
2. Soustraire un flat par l'autre (flat₁-flat₂). Attention aux logiciels qui ne gèrent pas les valeurs négatives (=> ajouter une constante).
3. Sélectionner la même zone et mesurer l'écart type (sigma)
4. Gain (en e-/ADU) = $M / (0,5 \times \text{sigma}^2)$

ANNEXE : MESURE DU BRUIT DE LECTURE



Pré-requis : disposer de 2 bias (et avoir mesuré le gain)

1. Soustraire un bias par l'autre (bias₁-bias₂).
Attention aux logiciels qui ne gèrent pas les valeurs négatives (=> ajouter une constante).
2. Sélectionner une zone et mesurer l'écart type (sigma)
3. Bruit de lecture (en ADU) = $\text{sigma} / \sqrt{2}$
4. Bruit de lecture (en e-) = Bruit de lecture en ADU * gain (en e-/ADU)

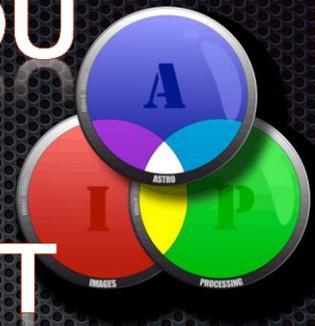
ANNEXE : MESURE DU SIGNAL D'OBSCURITÉ



Pré-requis : disposer d'un dark (avec un temps de pose long) et d'un bias

1. Faire dark – bias
2. Courant d'obscurité (en ADU) = moyenne de l'image résultante
3. Courant d'obscurité (en e-) = courant d'obscurité (en ADU) x gain (en e-/ADU)
4. Courant d'obscurité (en e-/s) = Courant d'obscurité (en e-) / temps de pose (en s)

ANNEXE : MESURE DU GAIN, DU BRUIT DE LECTURE ET SIGNAL D'OBSCURITÉ AVEC PIXINSIGHT



1. Ouvrir 2 bias, 2 darks (avec des temps de pose différents) et 2 flats
2. Aller dans Scripts > Instrumentation > BasicCCDParameters
3. Renseigner les paramètres et cliquer sur « Report »

Basic CCD Parameters v0.3.1 — A script to determine basic CCD Parameters

Flat frames

F1: flat_1x1_20_c_90s_ha_001 Exp[s]:90.000000
 F2: flat_1x1_20_c_90s_ha_002 Exp[s]:90.031000

Bias frames

B1: offset_1x1_20c_001 Exp[s]:0.001000
 B2: offset_1x1_20c_002 Exp[s]:0.001000

Dark frames

D1: dark_1x1_20c_010s_001 Exp[s]:10.000000
 D2: dark_1x1_20c_300s_001 Exp[s]:300.000000
 Exposure[s] D1: Exposure[s] D2:

Camera properties

CFA Readout depth: A/D bits: Maximum ADU:

Region of interest

ROI:

Measurement	R/C0	G/C1	B/C2	-/C3	Units
mean B1	337.574	---	---	---	ADU
stddev B1	17.151	---	---	---	ADU
mean D1	336.688	---	---	---	ADU
stddev D1	18.313	---	---	---	ADU
mean D2	338.381	---	---	---	ADU
stddev D2	83.292	---	---	---	ADU
mean F1+F2	76859.324	---	---	---	ADU
stddev F1-F2	345.213	---	---	---	ADU
mean B1+B2	675.298	---	---	---	ADU
stddev B1-B2	24.226	---	---	---	ADU
mean D1-B1	-0.885	---	---	---	ADU
gain	0.642	---	---	---	e/ADU
readout noise	11.005	---	---	---	e
readout noise	17.130	---	---	---	ADU
dark current	0.357	---	---	---	e/sec
fullwell cap.	42102.413	---	---	---	e
dynamic range	3825.656	---	---	---	steps



ANNEXE : POUR EN SAVOIR PLUS



- Mesurer le gain, le bruit de lecteur et le signal d'obscurité de sa caméra
- Caméras ISO-less

ANNEXE : TESTS ASI 1600MM



- Paramètres de gain et d'offset de l'ASI 1600MM
- Test ASI 1600MM par C. Cavadore
- Test ASI 1600MM par C. Buil

ANNEXE : PARAMETRES PREDEFINIS ASI 1600MM



○ Grande dynamique

- Gain = 0
- Offset = 10

○ Gain 1:1

- Gain = 139 (1 e- = 1 ADU)
- Offset = 21

○ Bruit de lecture bas

- Gain = 300
- Offset = 50

ANNEXE : FORMULES UTILES



- ◉ Dynamique réelle = capacité en e- / bruit de lecture en e-
- ◉ $\text{dB} = 20 \times \log_{10}(\text{intensité } 1 / \text{intensité } 2)$

« BRUIT » À MOTIF FIXE



- ◉ Souvent problème des capteurs CMOS
- ◉ « Bruit » fixe spatialement, parfois varie dans le temps
- ◉ A traiter en faisant :
 - Des bias(, des darks) et des flats
 - Beaucoup d'images (>20)
 - Du dithering
 - Un empilement avec rejection