

Atelier de photométrie:

# Objectif 1 mmag !

Alexandre Santerne

*Marie Curie Fellow*

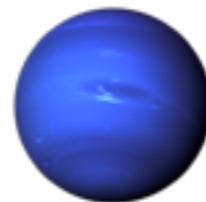
Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço

Universidade do Porto

[alexandre.santerne@astro.up.pt](mailto:alexandre.santerne@astro.up.pt)



10 mmag



1 mmag



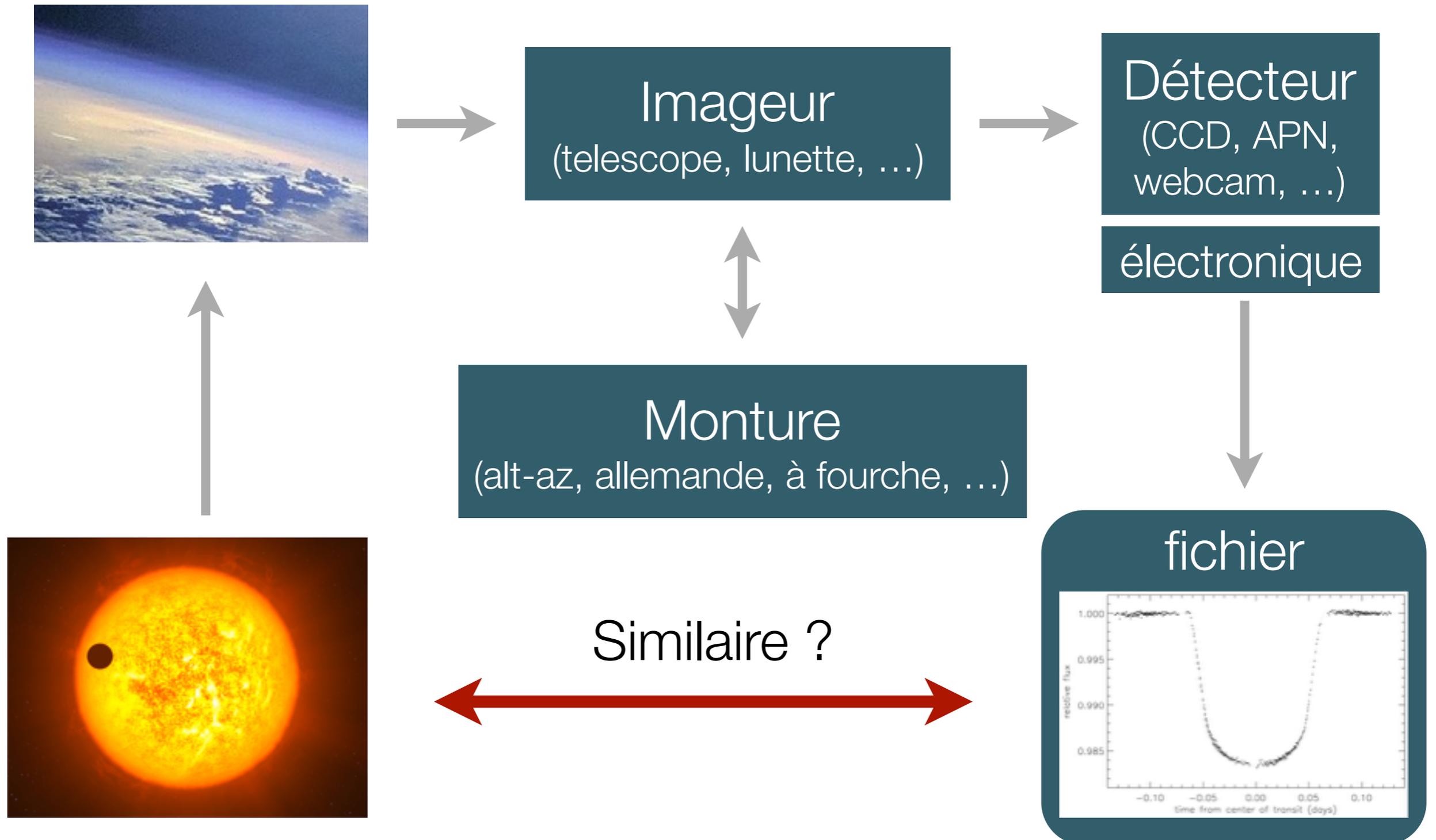
0.1 mmag

Comprendre c'est maîtriser

## Comprendre c'est maîtriser

- Comprendre le fonctionnement d'une caméra CCD
- Comprendre les propriétés de l'atmosphère
- Comprendre les propriétés des étoiles
- Comprendre les principes de base de statistique
- Comprendre les différentes sources de bruit

# Principe d'une observation





1 mmag  
0.001 magnitude  
1/1000e de flux

ou compter 1000 photons avec une erreur de 1 photon

## Source de bruit (1) : le bruit de photon

---

Bruit de photon :

$$\sigma = \frac{\sqrt{N_{e^-}}}{N_{e^-}}$$

## Source de bruit (1) : le bruit de photon

---

Bruit de photon :  $\sigma = \frac{\sqrt{N_{e^-}}}{N_{e^-}}$

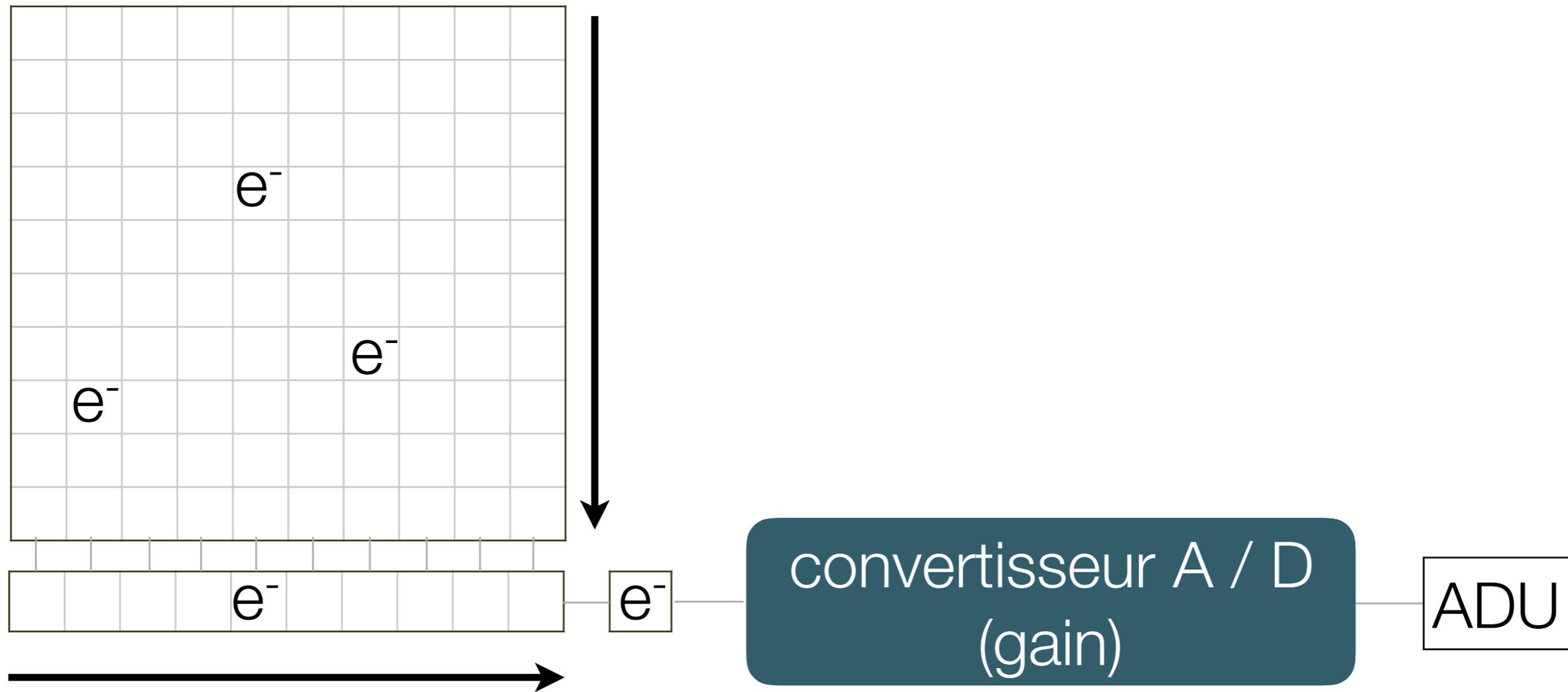
$$N_{e^-} = 10^4 \rightarrow \sigma = 0.01$$

$$N_{e^-} = 10^5 \rightarrow \sigma = 0.003$$

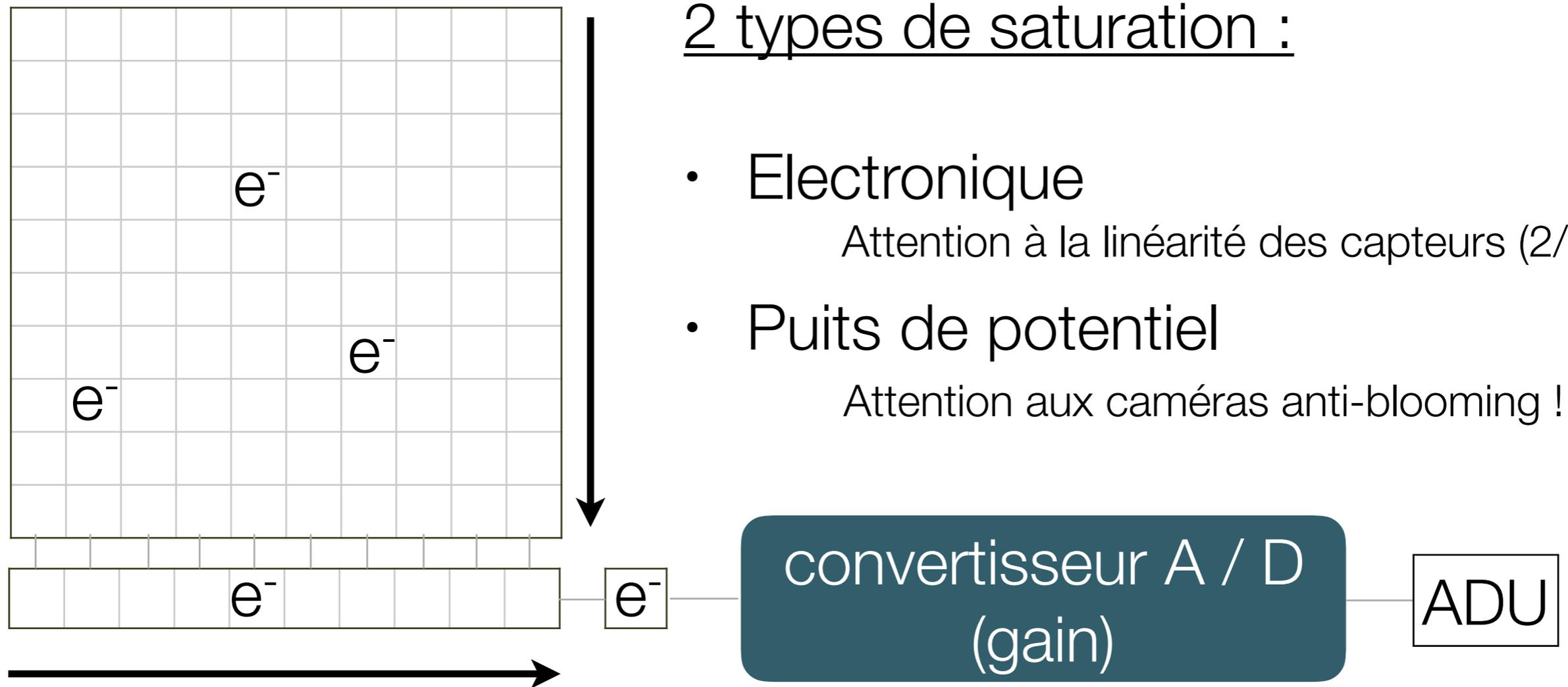
$$\sigma < 0.001 \rightarrow N_{e^-} > 10^6$$

# Caméra CCD : rappel

---



# Caméra CCD : rappel



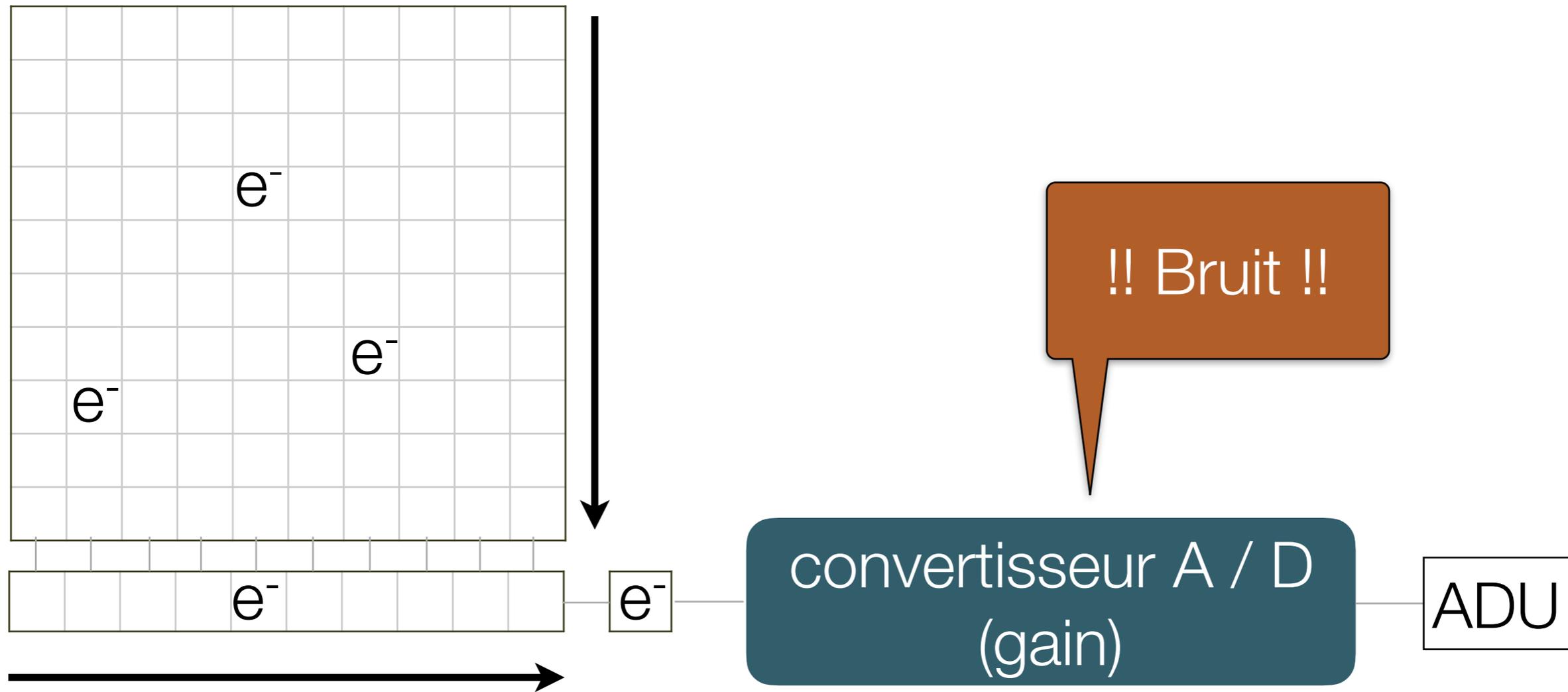
15 bits : saturation à 32 767 ADU

16 bits : saturation à 65 535 ADU

$$N_{e^-} = \text{gain} \times ADU$$

# Source de bruit (2) : bruit de lecture

---



correction des bias imparfaite

Pour limiter le bruit de lecture, faut-il :

Diminuer le nombre de lecture (e.g. binning 2x2, 3x3) ?

Augmenter le nombre de lecture (binning 1x1) ?

# Pour limiter le bruit de lecture, faut-il :

Diminuer le nombre de lecture (e.g. binning 2x2, 3x3) ?

Augmenter le nombre de lecture (binning 1x1) ?

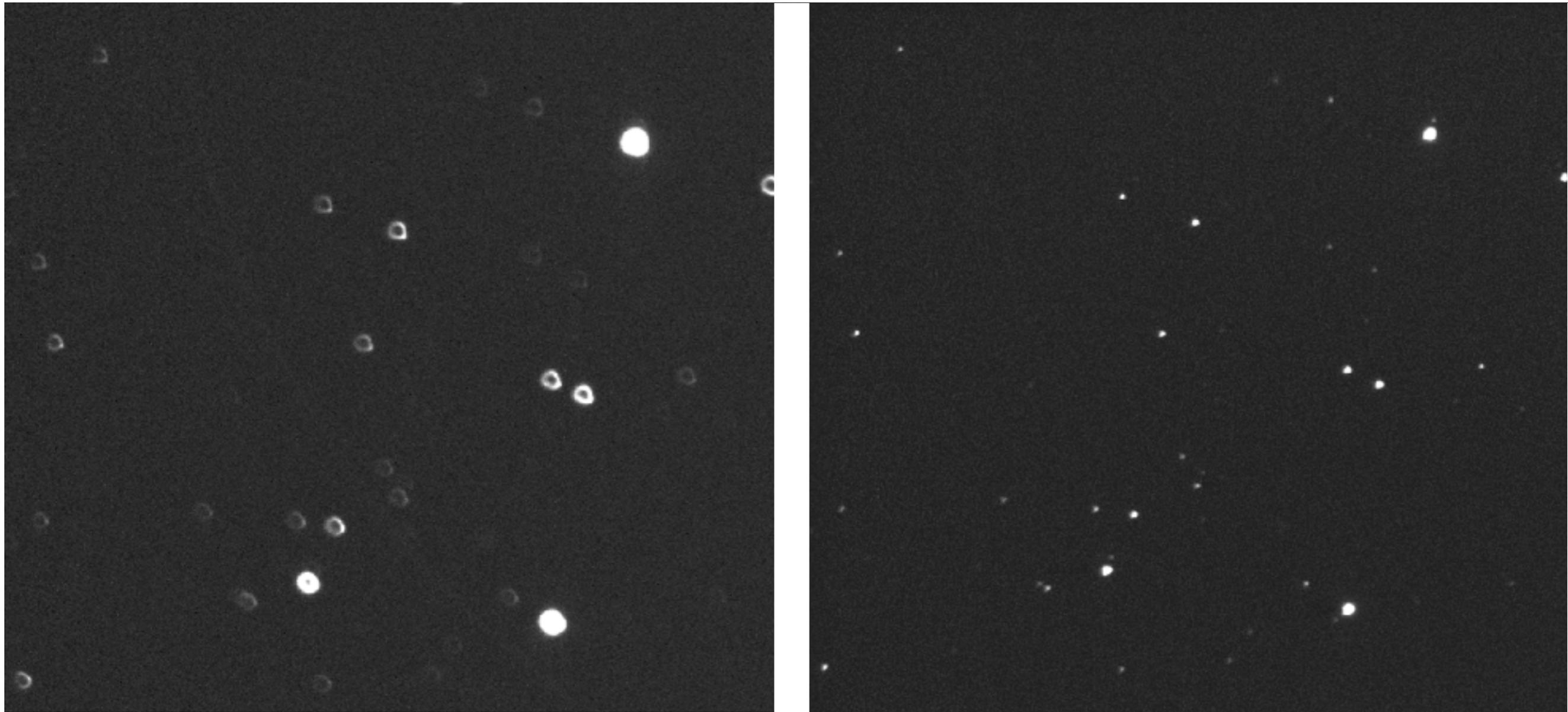
Augmenter le nombre de lecture permet de  
moyenner ce bruit de lecture

**Binning 1x1 obligatoire !**

$$N_{e^-} = \text{gain} \times ADU$$

1 million d'électrons sans saturer : défocaliser

---



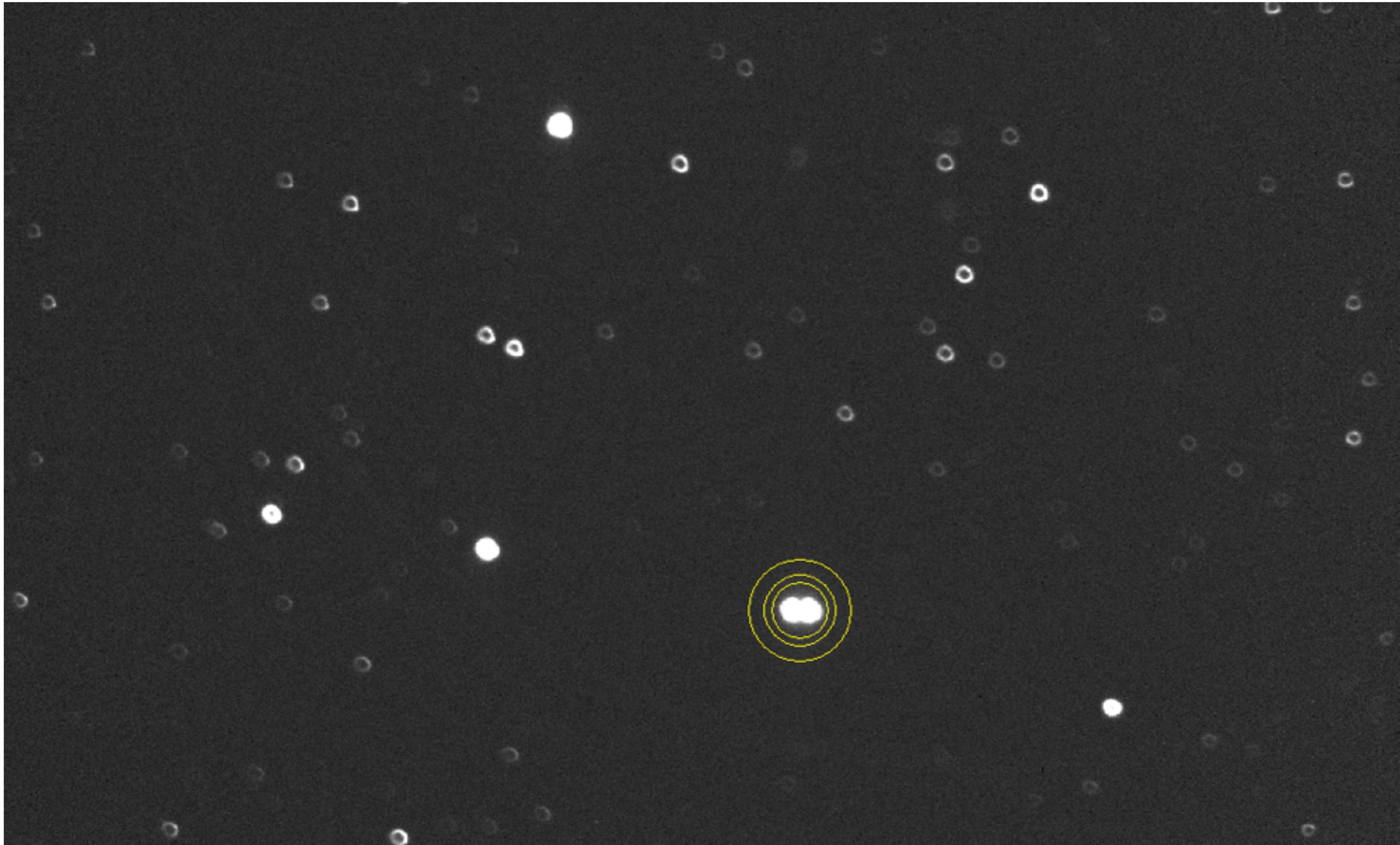
$$33\,333\,e^- \times 30\,\text{px} = 10^6\,e^-$$

Si gain = 2.2, alors  $15\,000\,ADU \times 30\,\text{px} = 10^6\,e^-$

$$N_{e^-} = \text{gain} \times \text{ADU}$$

1 million d'électrons sans saturer : défocaliser

---

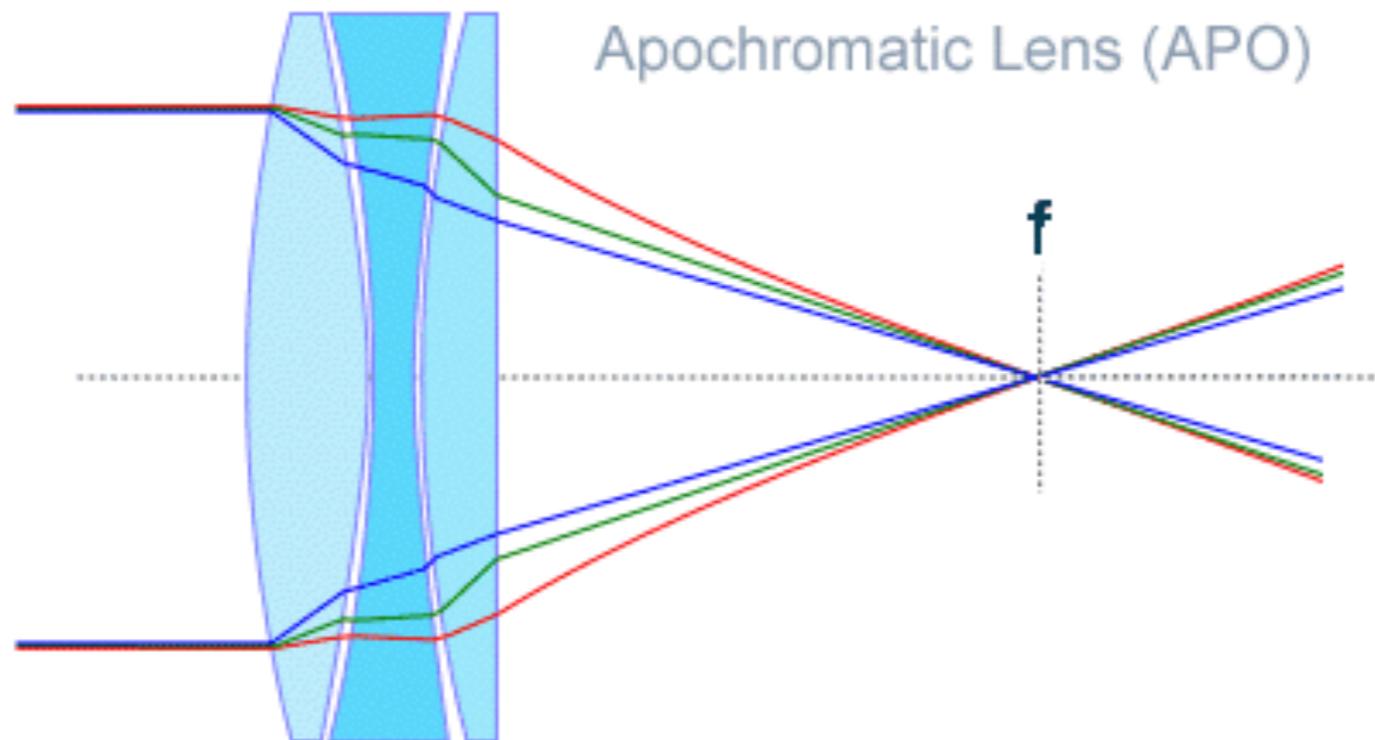




# Source de bruit (4) : correction du flat

---

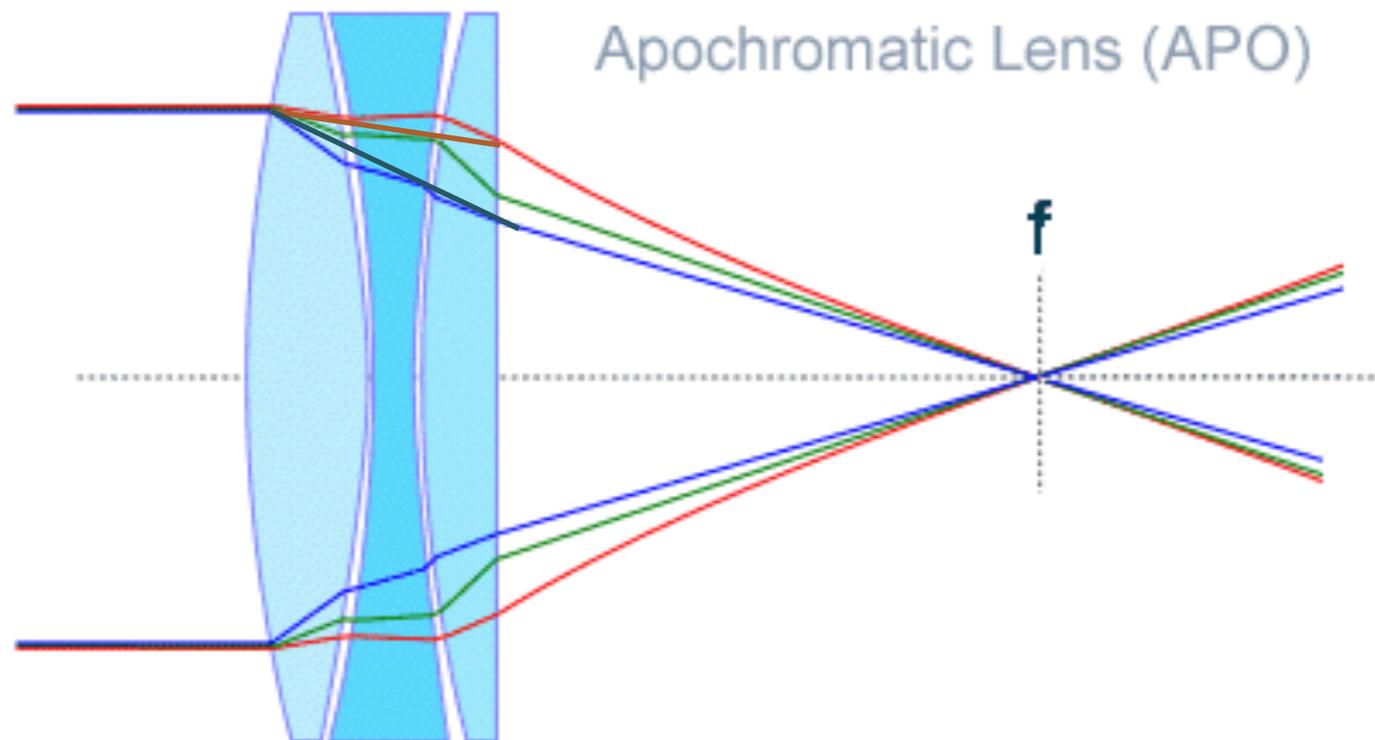
Un flat parfait n'existe pas !



# Source de bruit (4) : correction du flat

---

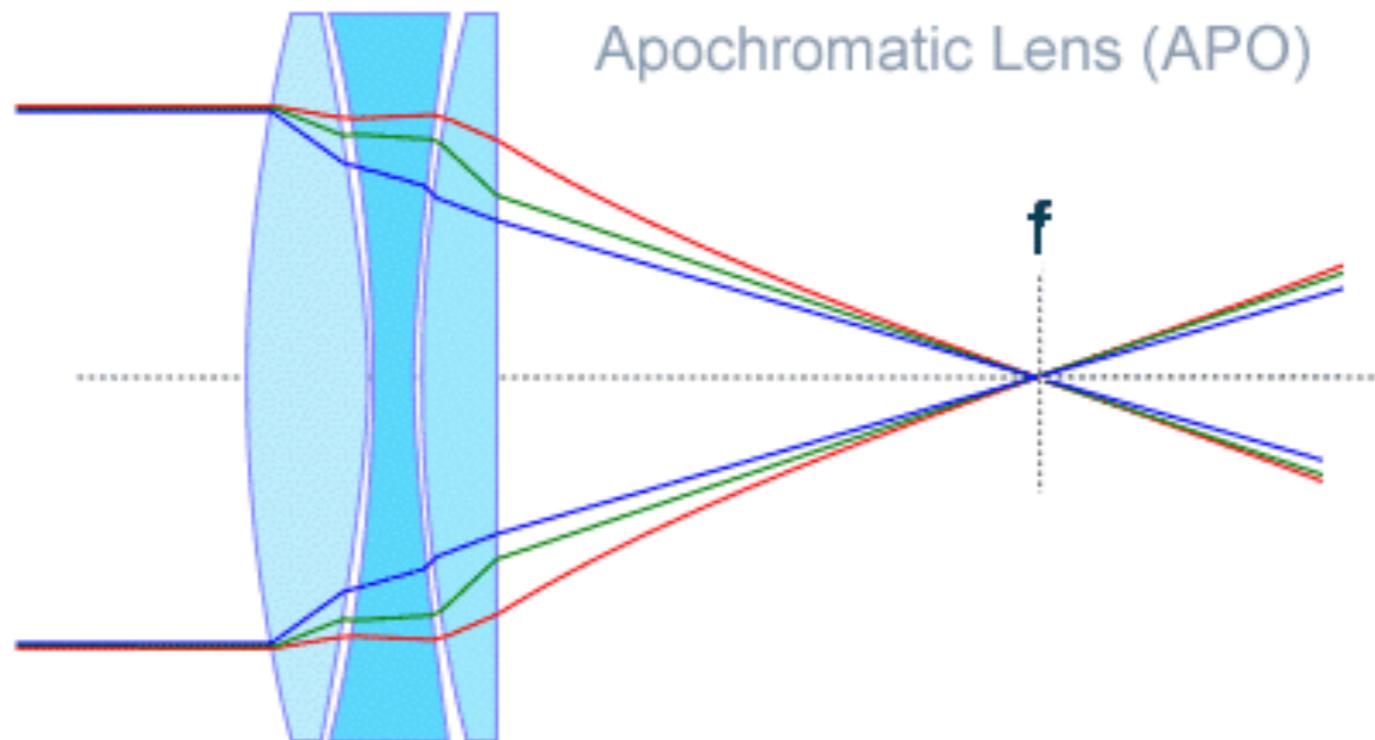
Un flat parfait n'existe pas !



# Source de bruit (4) : correction du flat

---

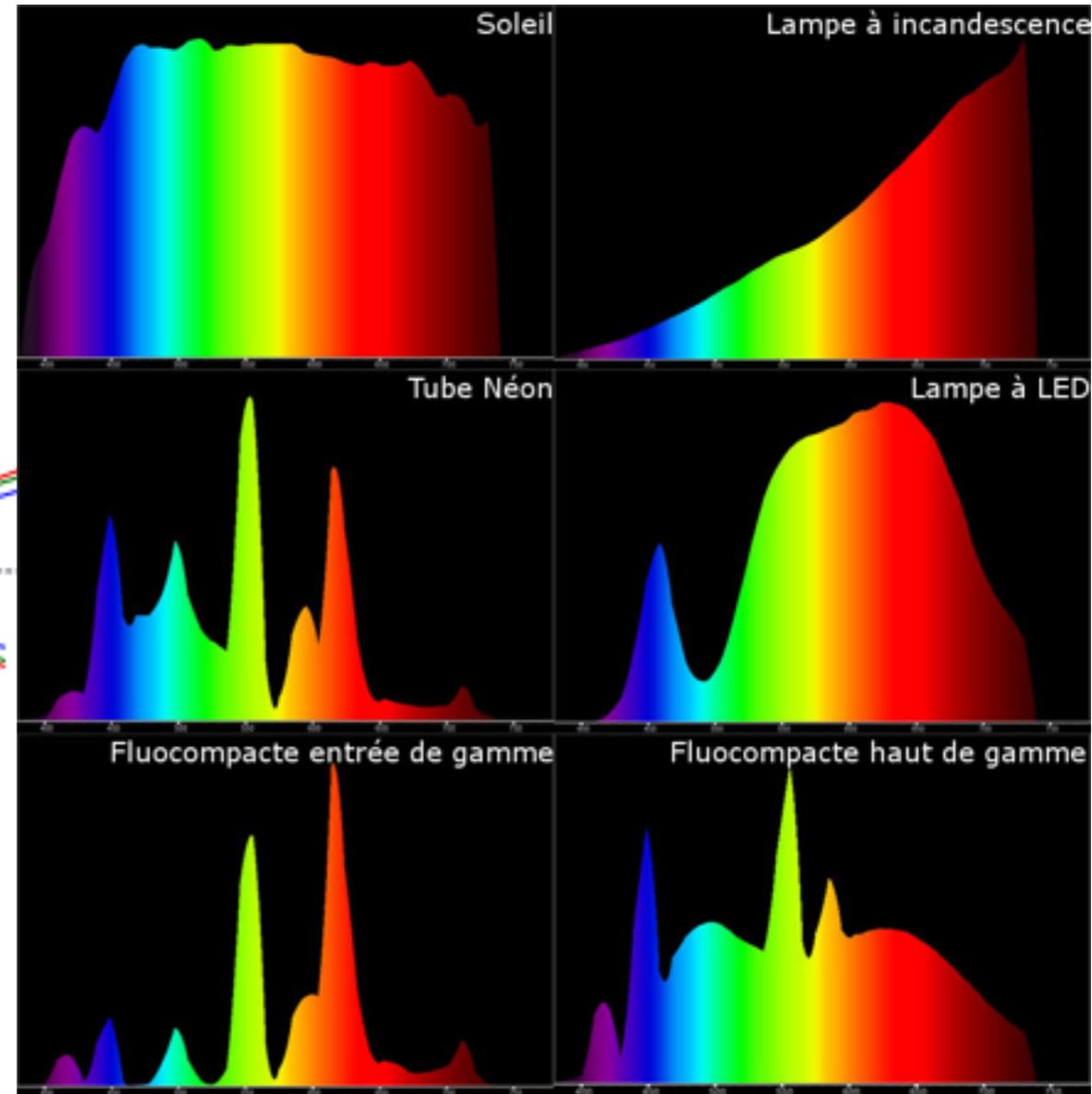
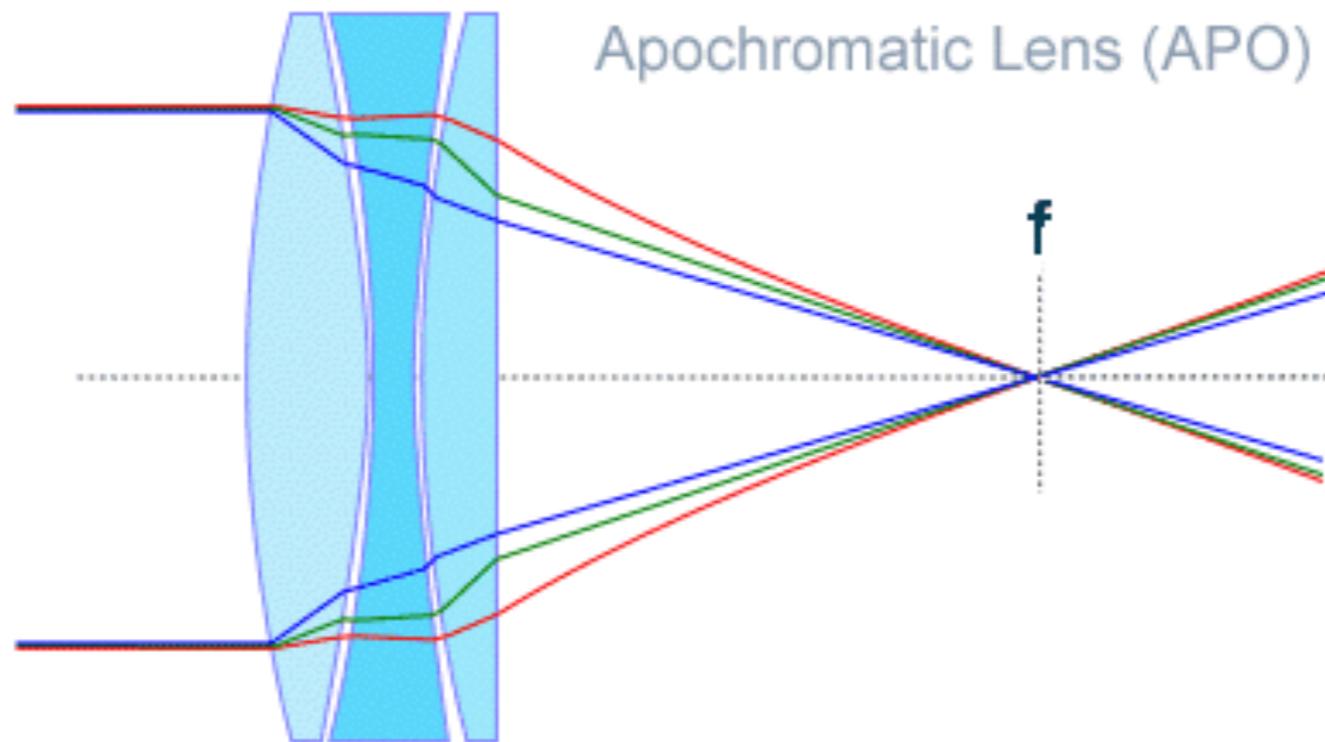
Un flat parfait n'existe pas !



Trajet rouge plus court que bleu  
-> Bleu plus absorbé que rouge

# Source de bruit (4) : correction du flat

Un flat parfait n'existe pas !



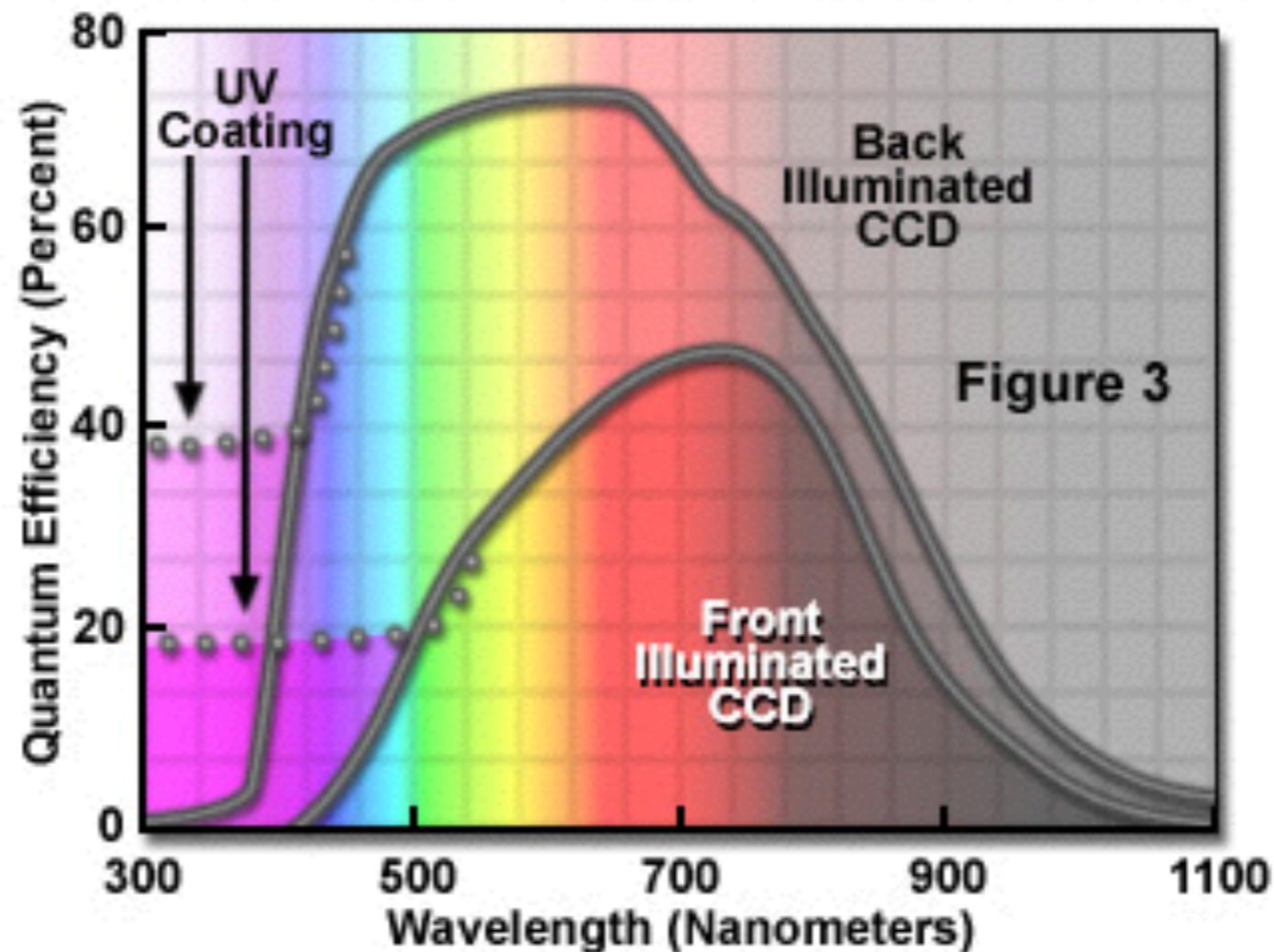
Trajet rouge plus court que bleu  
-> Bleu plus absorbé que rouge

# Source de bruit (4) : correction du flat

---

Efficacité des pixels est aussi chromatique

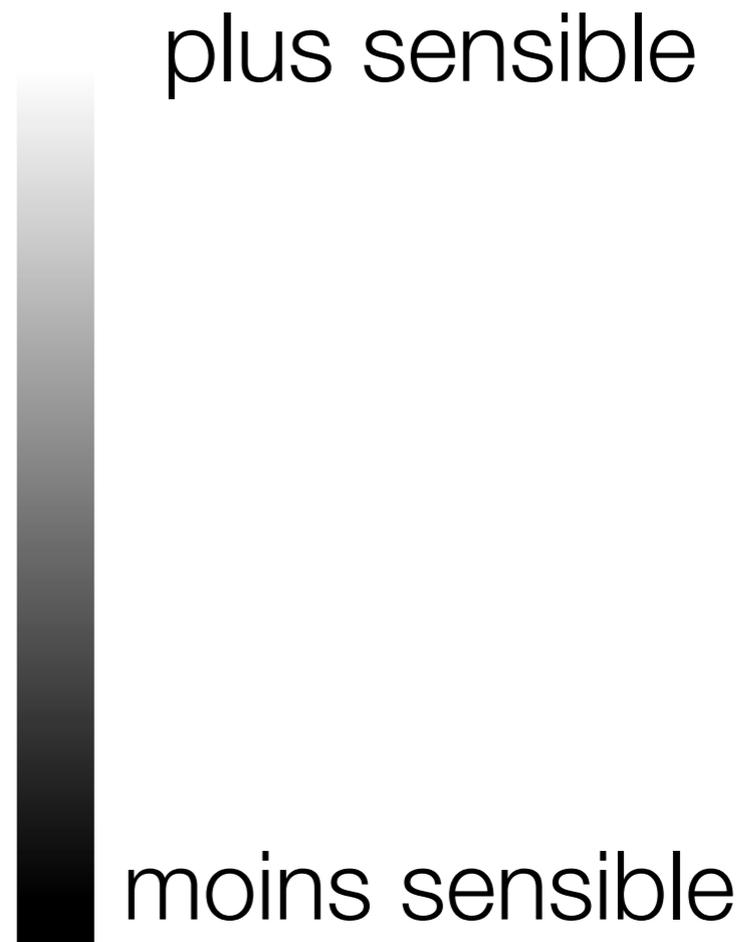
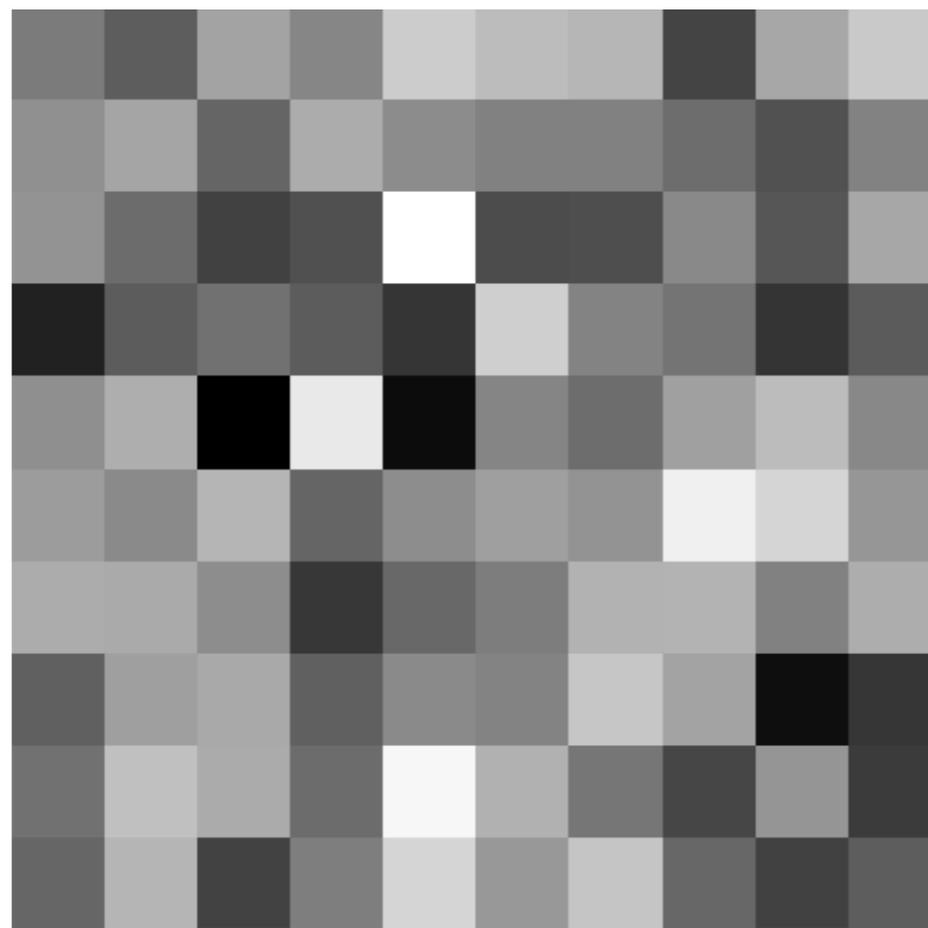
**Frontside and Backside CCD Quantum Efficiency**



# Source de bruit (4) : correction du flat

---

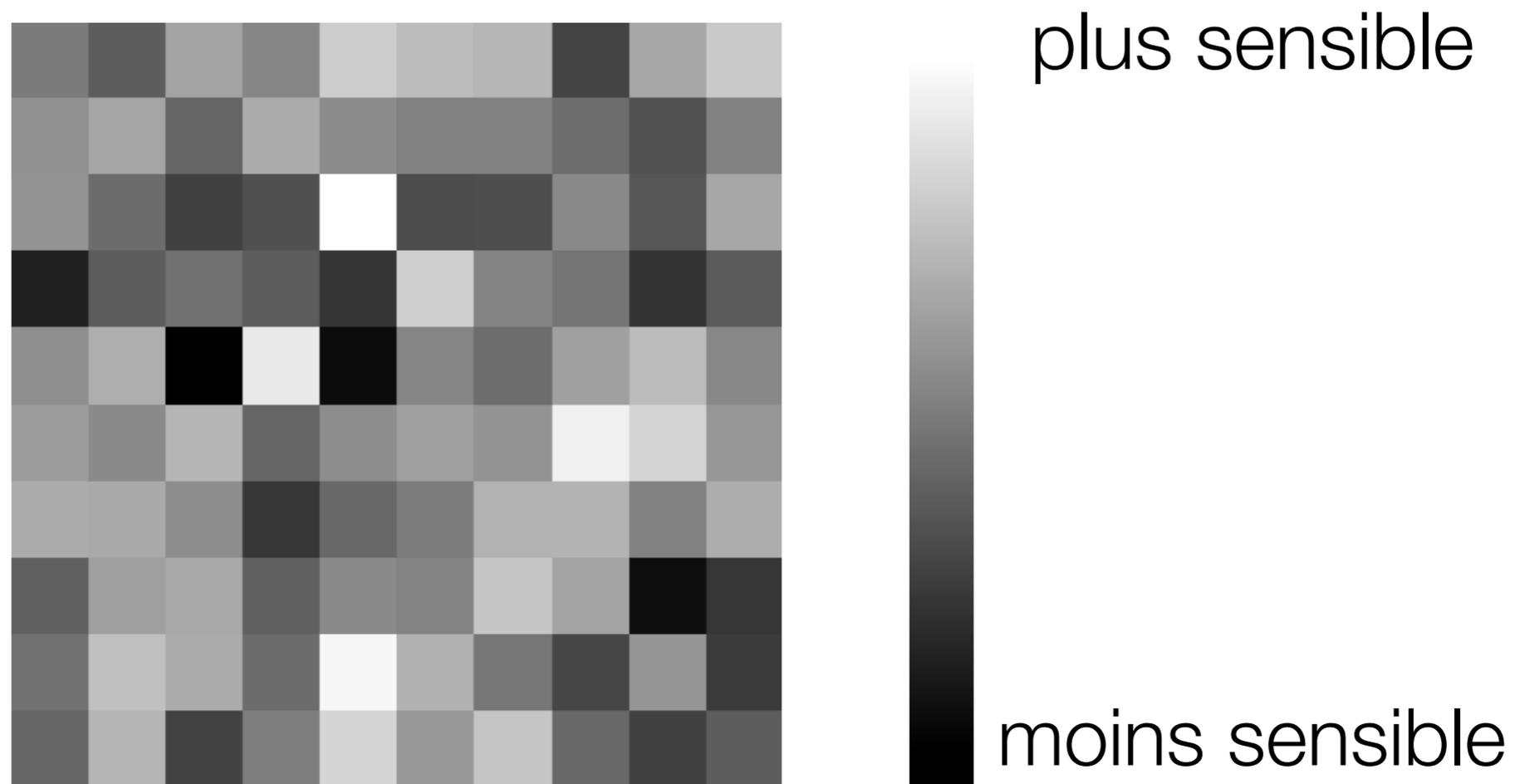
Efficacité entre les pixels est inégale



# Source de bruit (4) : correction du flat

---

Efficacité entre les pixels est inégale



Efficacité à l'intérieur d'un pixel est aussi non-uniforme

# Solutions

---

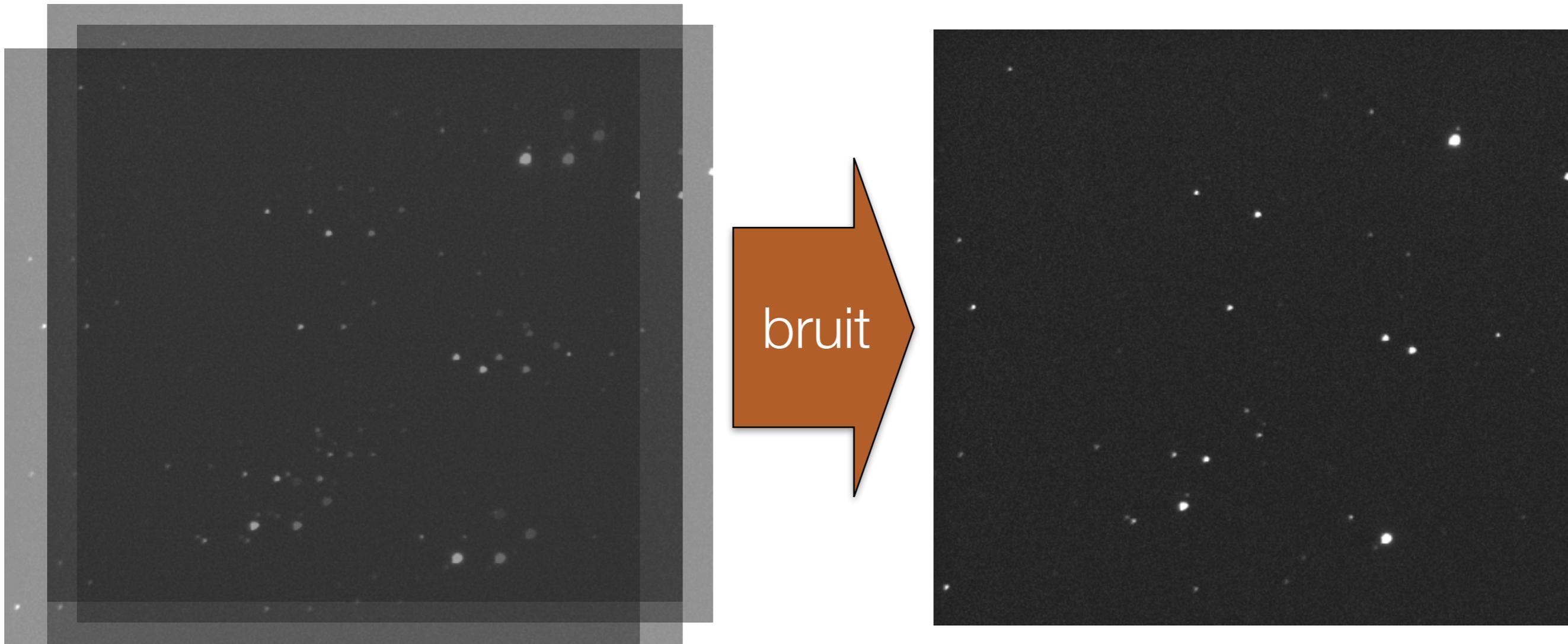
Soigner les flats : uniformité du champs

Choisir une lampe avec un spectre le plus proche possible de celui des étoiles ciblées (ciel / nuage)

limiter les déplacements des étoiles dans le champs :  
**guidage meilleur que 1 pixel !**

# Source de bruit (5) : traitement des images

---

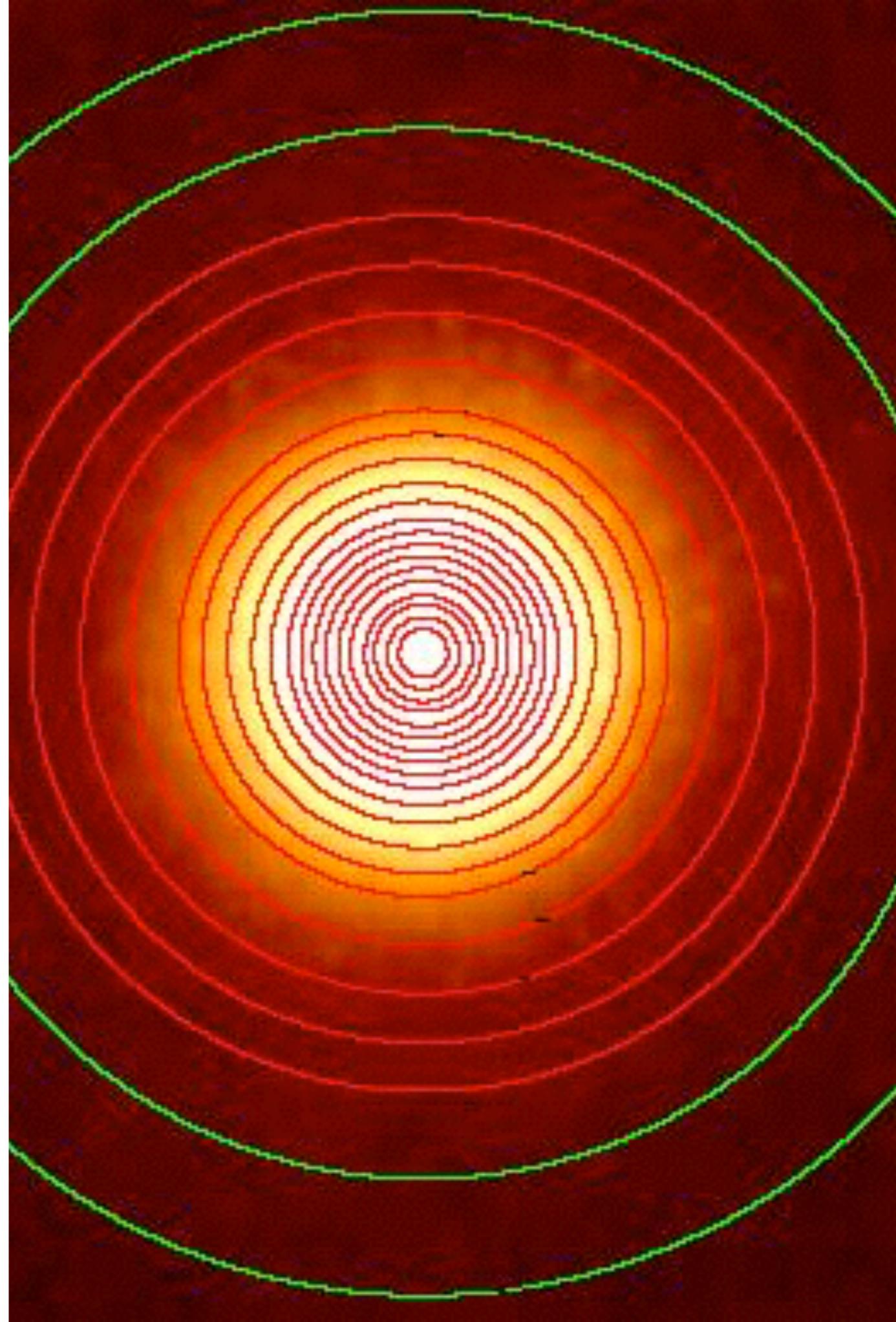


**guidage meilleur que 1 pixel**

# Source de bruit (6) : photométrie d'ouverture

---

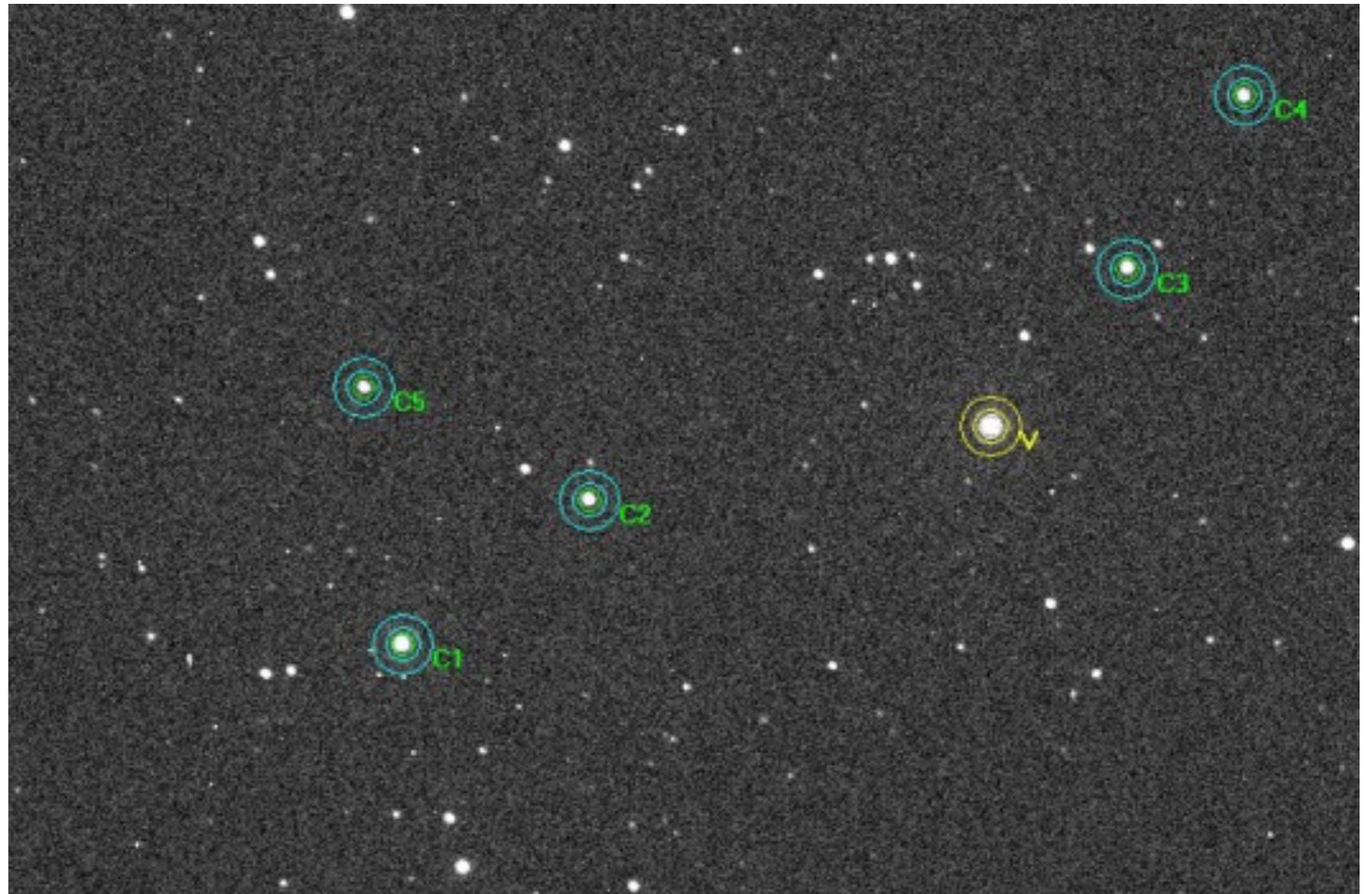
- Cercles trop petits :  
pixels avec  $S/B > 1$  exclus
- Cercles trop larges :  
pixels avec  $S/B < 1$  inclus



# Source de bruit (6) : photométrie différentielle

---

Utilisation de plusieurs étoiles de référence permet de moyennner les erreurs liées à la comparaison



# Étapes de la photométrie différentielle

---

1. Collecter les électrons / photons
2. Convertir les électrons en ADU
3. Corriger du dark
4. Corriger du flat
5. Traiter les images
6. Extraire la photométrie différentielle

# Étapes de la photométrie différentielle

---

1. Collecter les électrons / photons !! Bruit !!
2. Convertir les électrons en ADU !! Bruit !!
3. Corriger du dark !! Bruit !!
4. Corriger du flat !! Bruit !!
5. Traiter les images !! Bruit !!
6. Extraire la photométrie différentielle !! Bruit !!

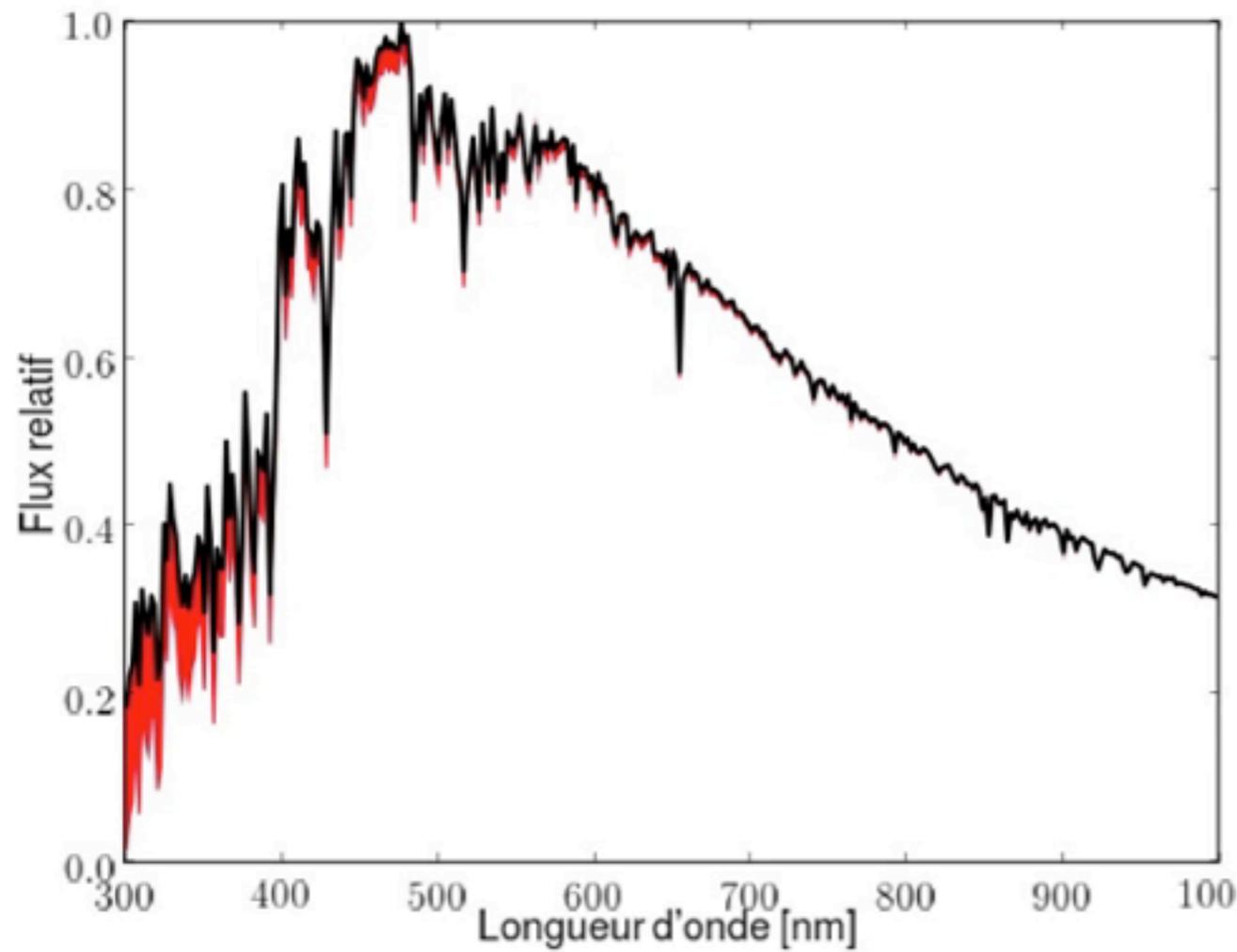
# Étapes de la photométrie différentielle

---

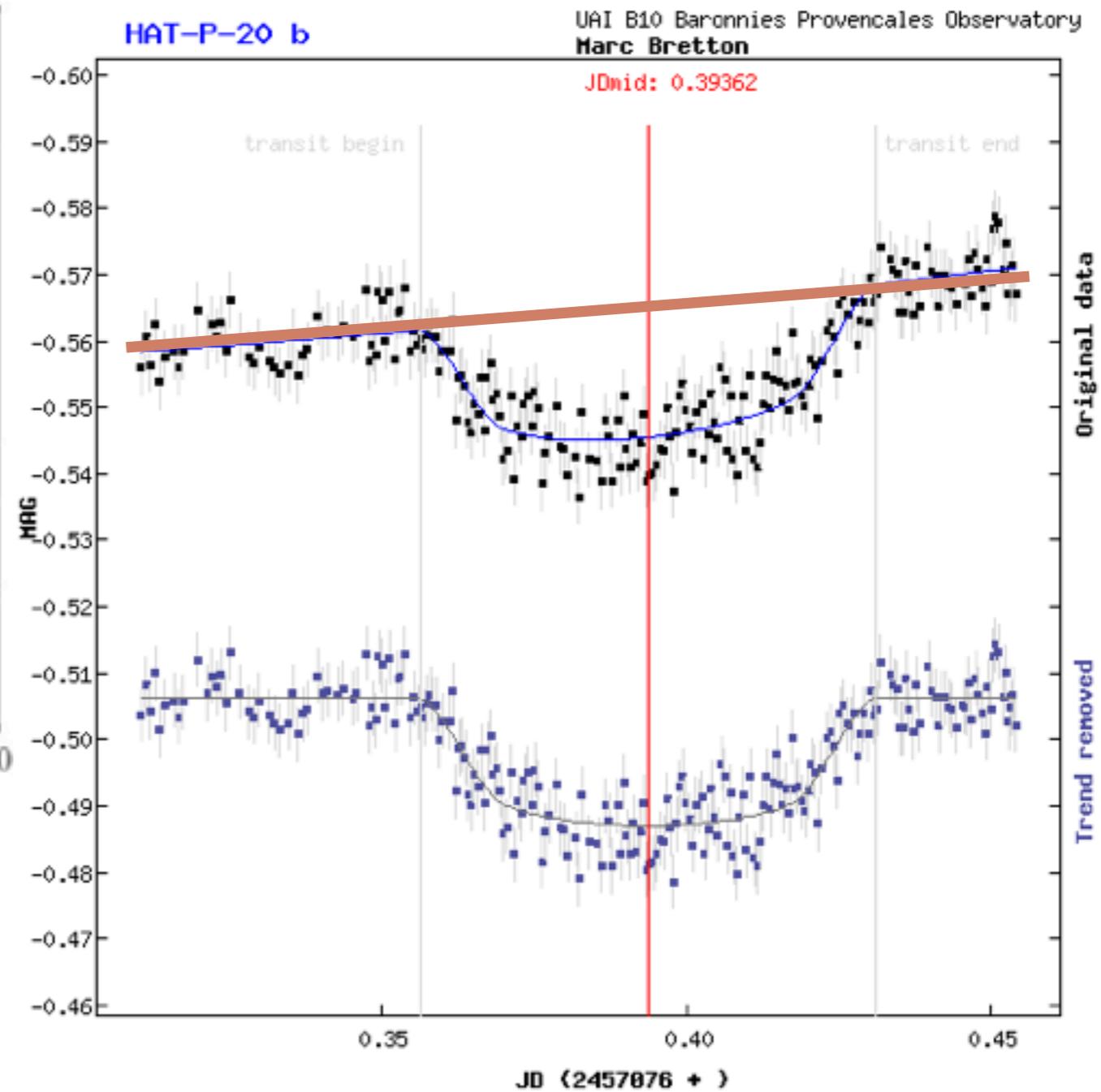
1. Collecter les électrons / photons !! Bruit !!
2. Convertir les électrons en ADU
3. Corriger du dark
4. Corriger du bruit !!
5. Traiter les images !! Bruit !!
6. Extraire la photométrie différentielle !! Bruit !!

Mais ce n'est pas tout ...

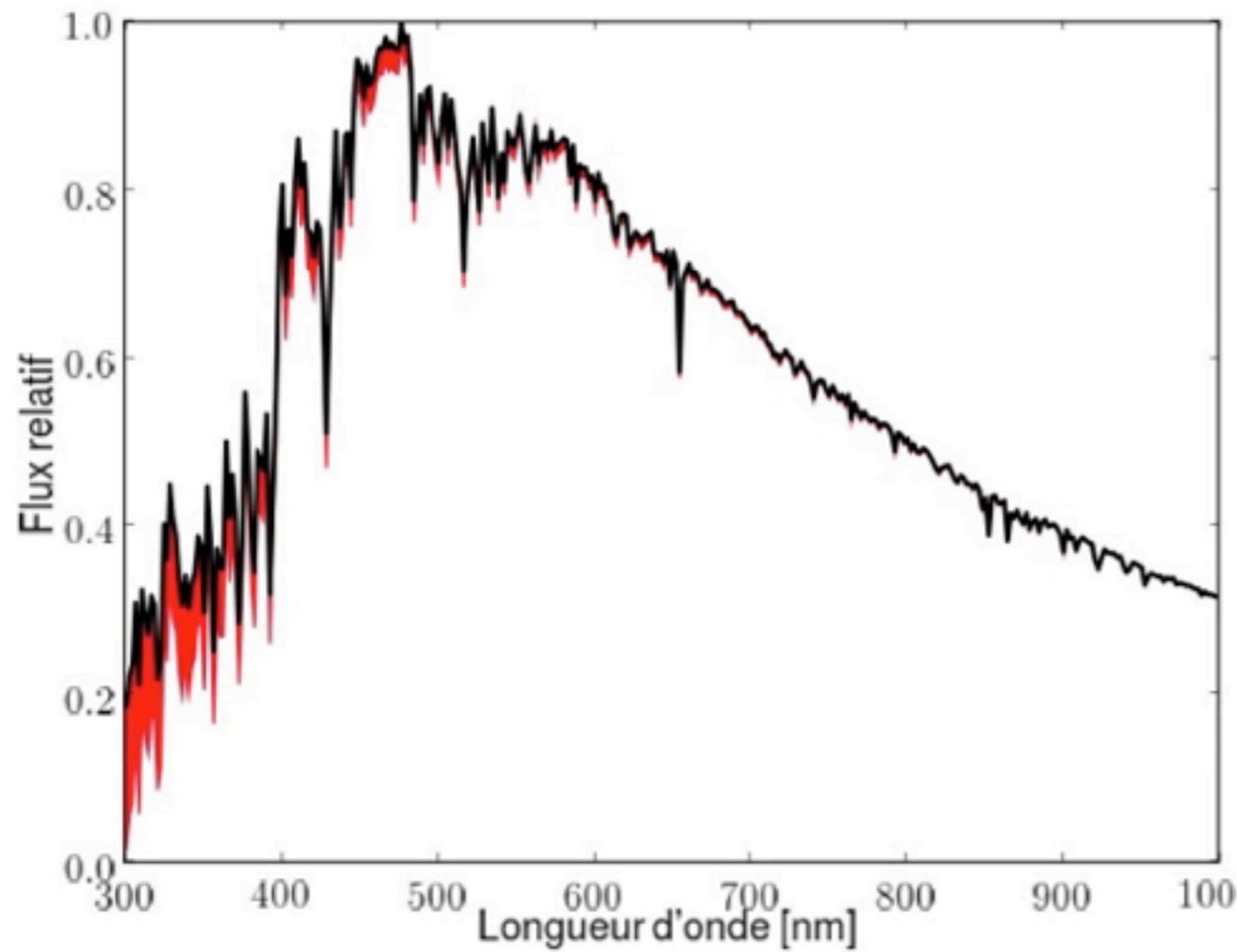
# Source de bruit (7) : l'atmosphère de la Terre



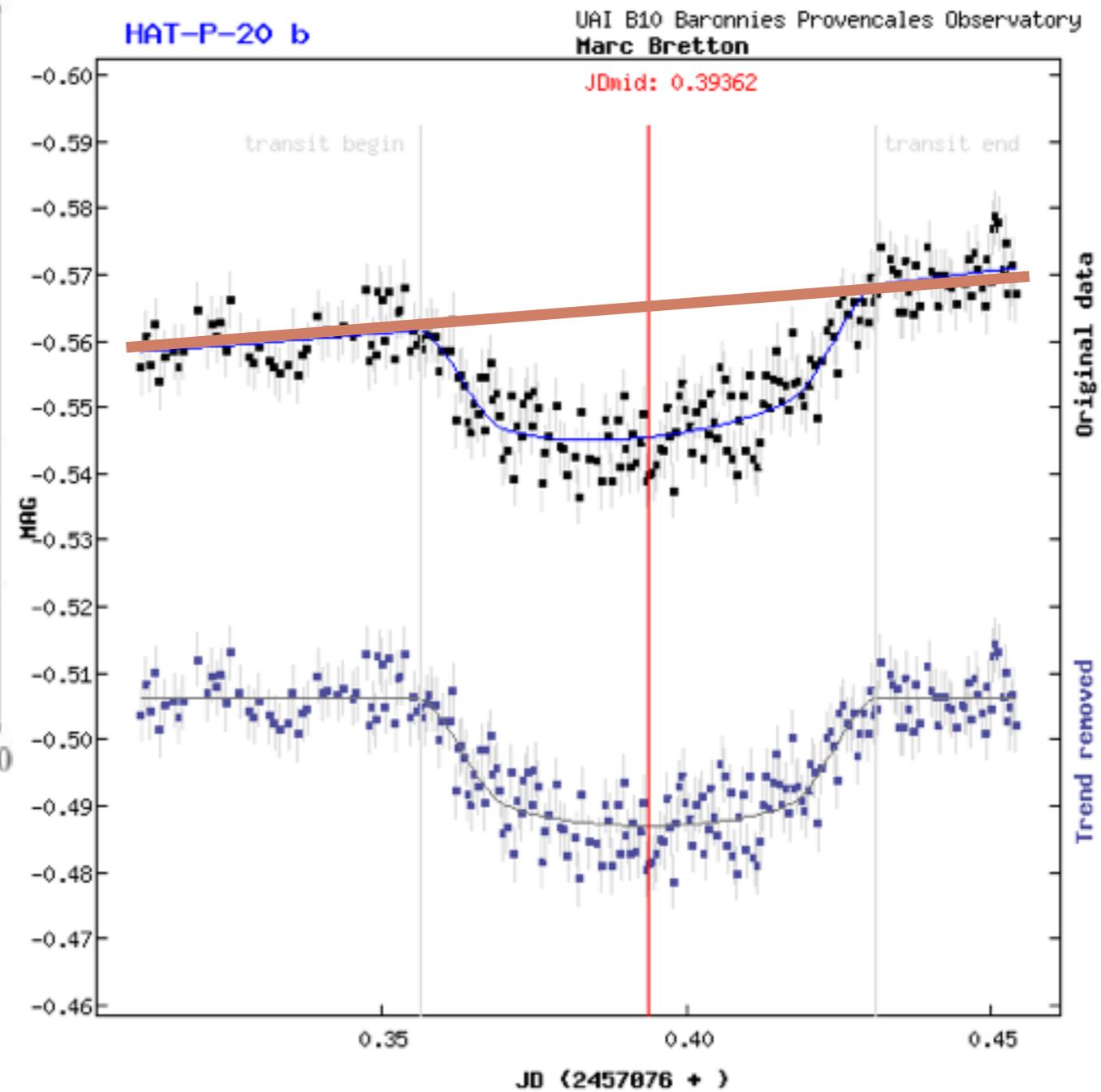
Effet Rayleigh  $\sim \lambda^{-4}$



# Source de bruit (7) : l'atmosphère de la Terre



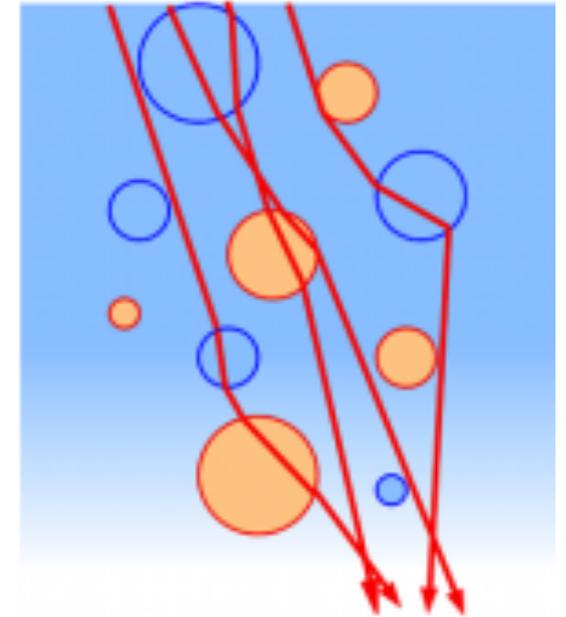
Effet Rayleigh  $\sim \lambda^{-4}$



# Source de bruit (7) : l'atmosphère de la Terre

Indice de l'air (sous conditions normales):

$$n_s = 1 + c_1 + \frac{c_2}{146 - (1000/\lambda)^2} + \frac{c_3}{41 - (1000/\lambda)^2}$$

L'étoile bleue est plus affectée par la turbulence que l'étoile rouge

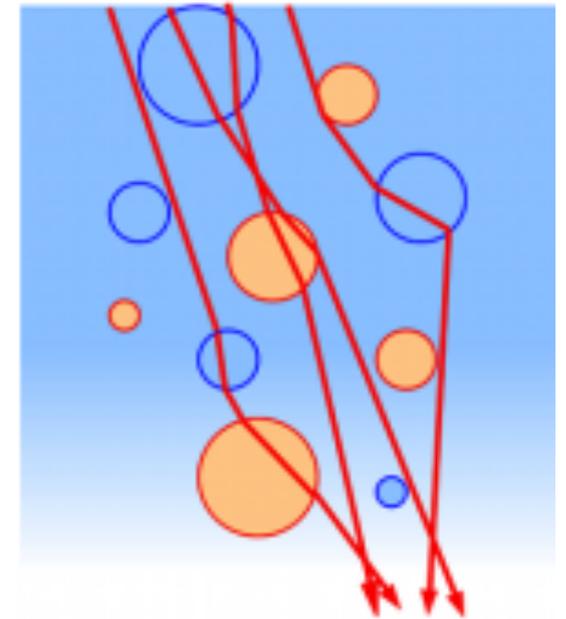
Donc, l'étoile bleue n'est pas une bonne étoile de comparaison



# Source de bruit (7) : l'atmosphère de la Terre

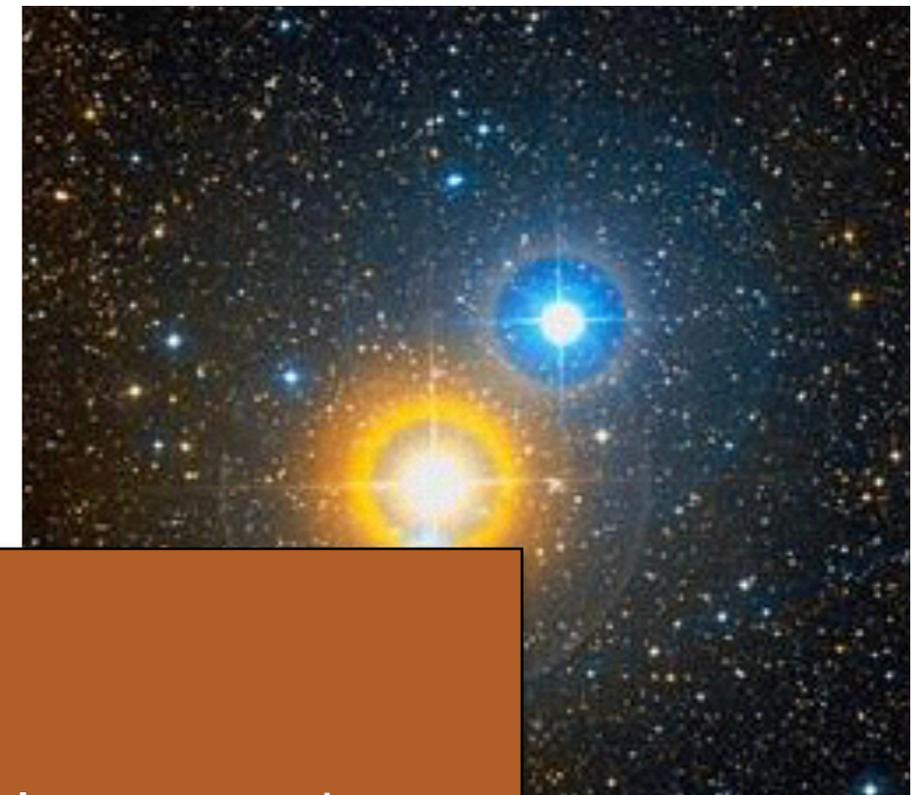
Indice de l'air (sous conditions normales):

$$n_s = 1 + c_1 + \frac{c_2}{146 - (1000/\lambda)^2} + \frac{c_3}{41 - (1000/\lambda)^2}$$

L'étoile bleue est plus affectée par la turbulence que l'étoile rouge

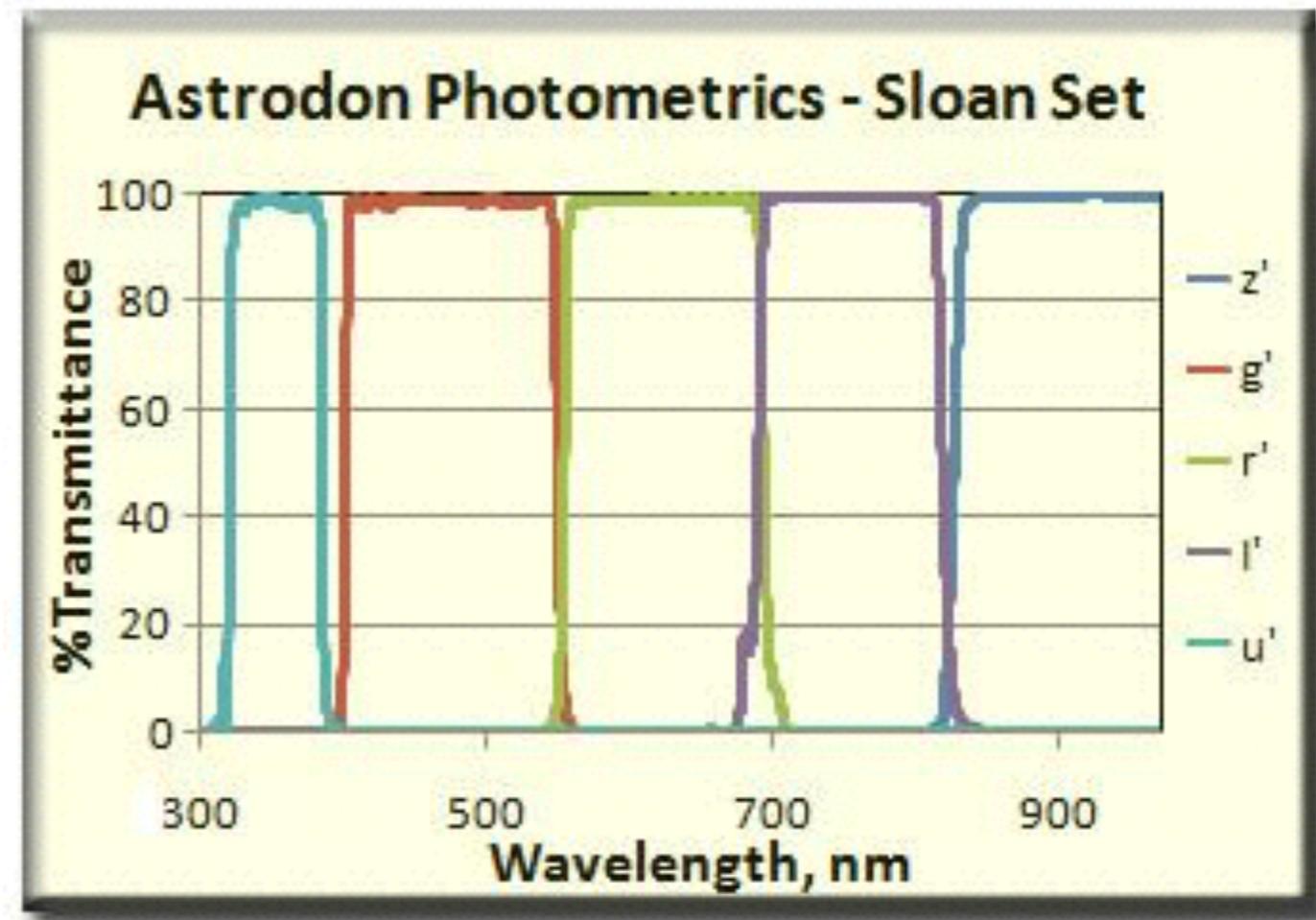
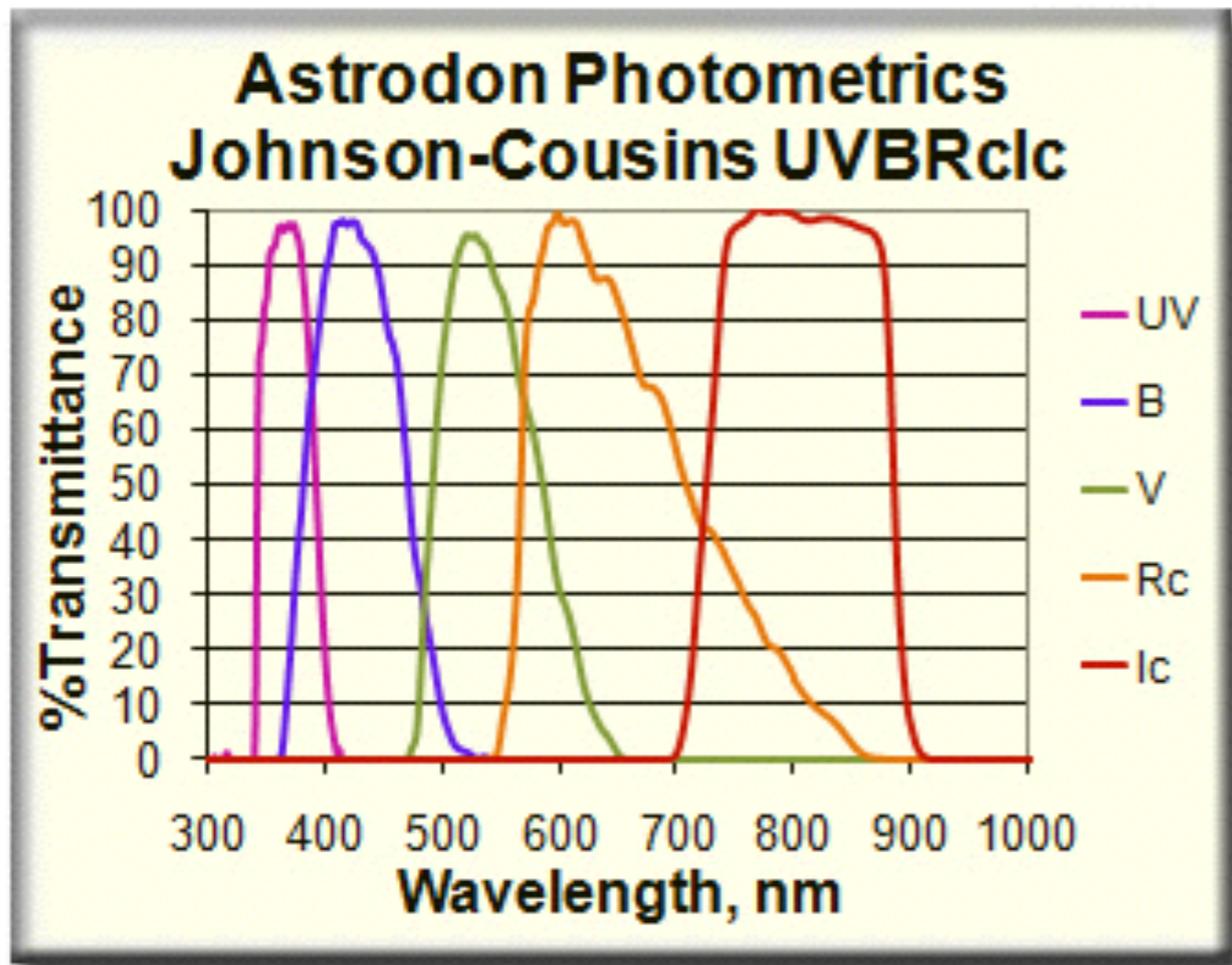
Donc, l'étoile bleu n'est pas une bonne étoile de comparaison



Les solutions :

- utiliser des filtres
- choisir des étoiles de comparaison avec couleur proche

# Différent filtres photométriques



Référence Johnson - Cousin  
référence historique

Référence Sloan  
Meilleure transmission  
Pas de chevauchement

# Autres sources de bruit

---

- Bruit de scintillation (temps de pose très court)
- non linéarité de la CCD (caméra anti-blooming)
- conditions météo (nuages)
- imperfection optiques (astigmatisme, ...)
- bruit stellaire (étoile cible, étoiles de comparaison)
- etc ...

# Conclusions

---

- Différentes sources de bruit, à toutes les étapes de la photométrie -> il faut les moyenner !
- 1mmag = 1 million d'électrons ;
- une bonne qualité de flat est primordiale
- un excellent guidage est primordiale
- un filtre (rouge) résout beaucoup de problèmes
- expérience = précision

# Importance des effets

---

- haut signal sur bruit (bruit de photons = bruit fondamental)
- guidage au pixel
- flat “aux petits oignons” (profil spectral, uniformité, ...)
- utilisation d'un filtre (rouge)