

Atelier de photométrie:

# Principe de mesure et prétraitements

---

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)

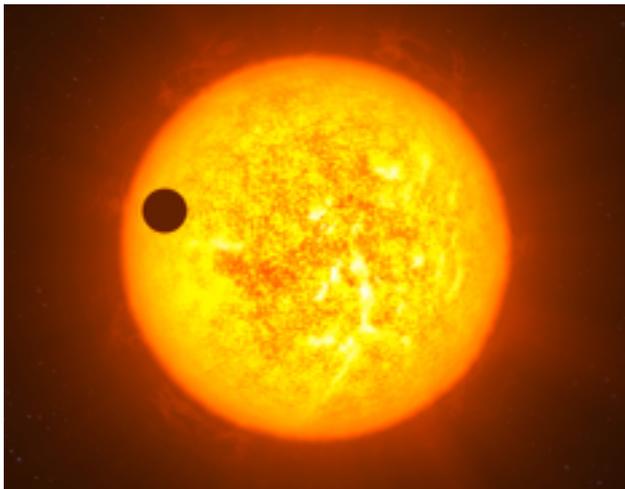
“Il n’y a rien de plus *imparfait* dans l’univers  
qu’une caméra CCD”

“Il n’y a rien de plus *imparfait* dans l’univers  
qu’une caméra CCD”

— Pr Alain Klotz —

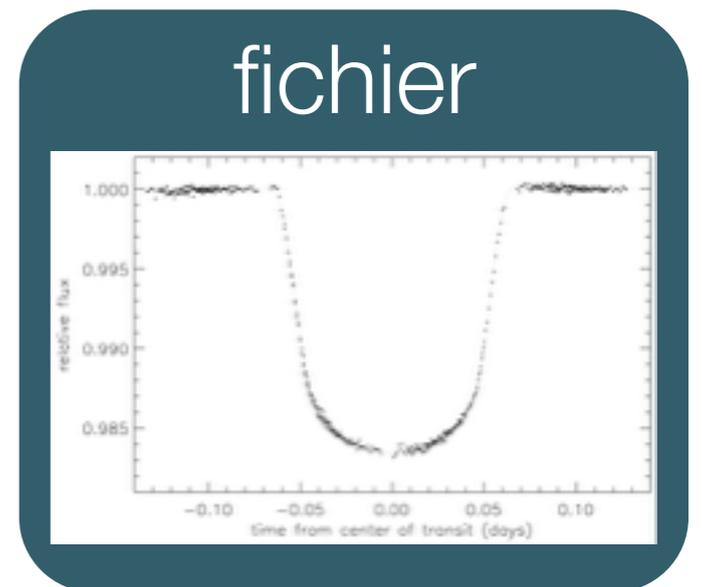
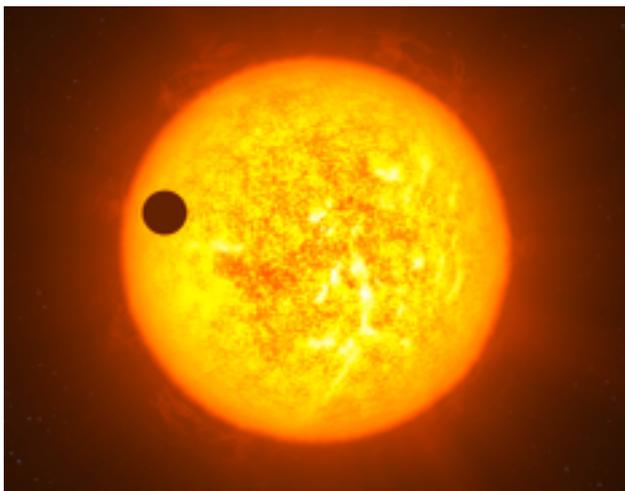
# Principe d'une observation

---



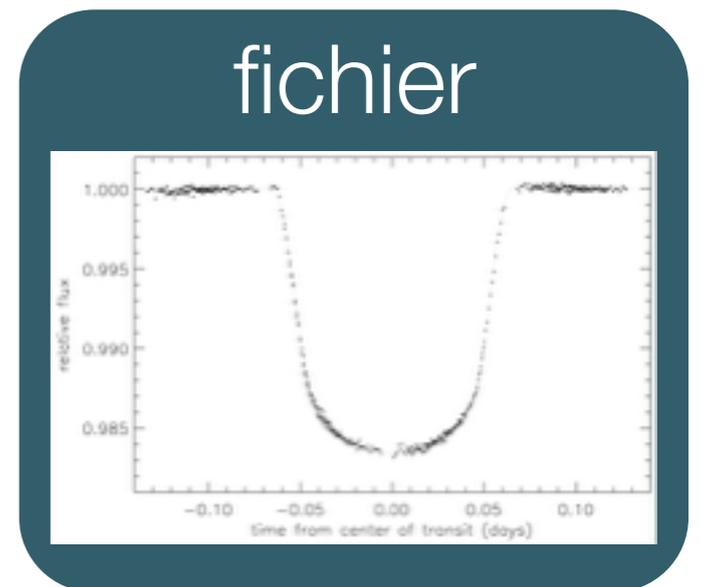
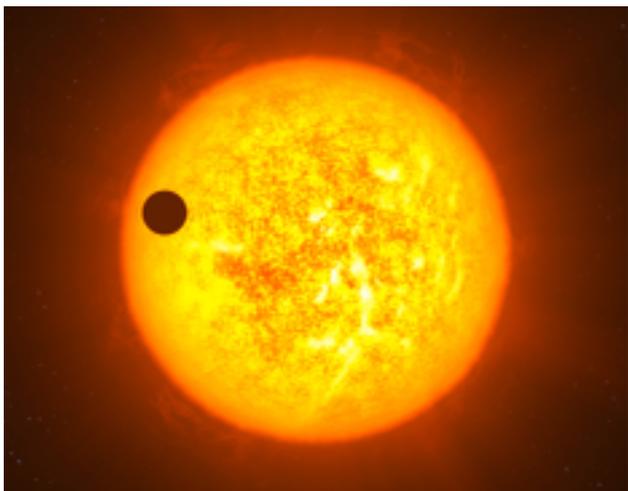
# Principe d'une observation

---



# Principe d'une observation

---

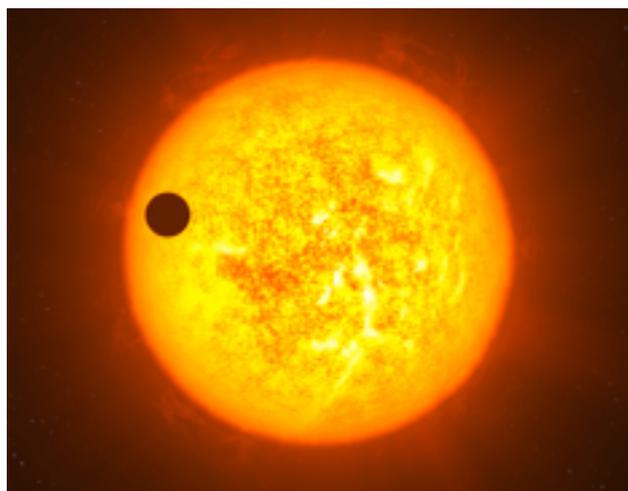
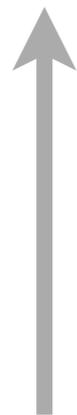


# Principe d'une observation

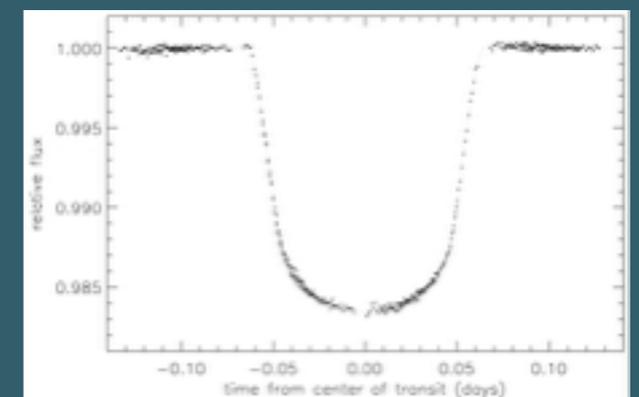
---



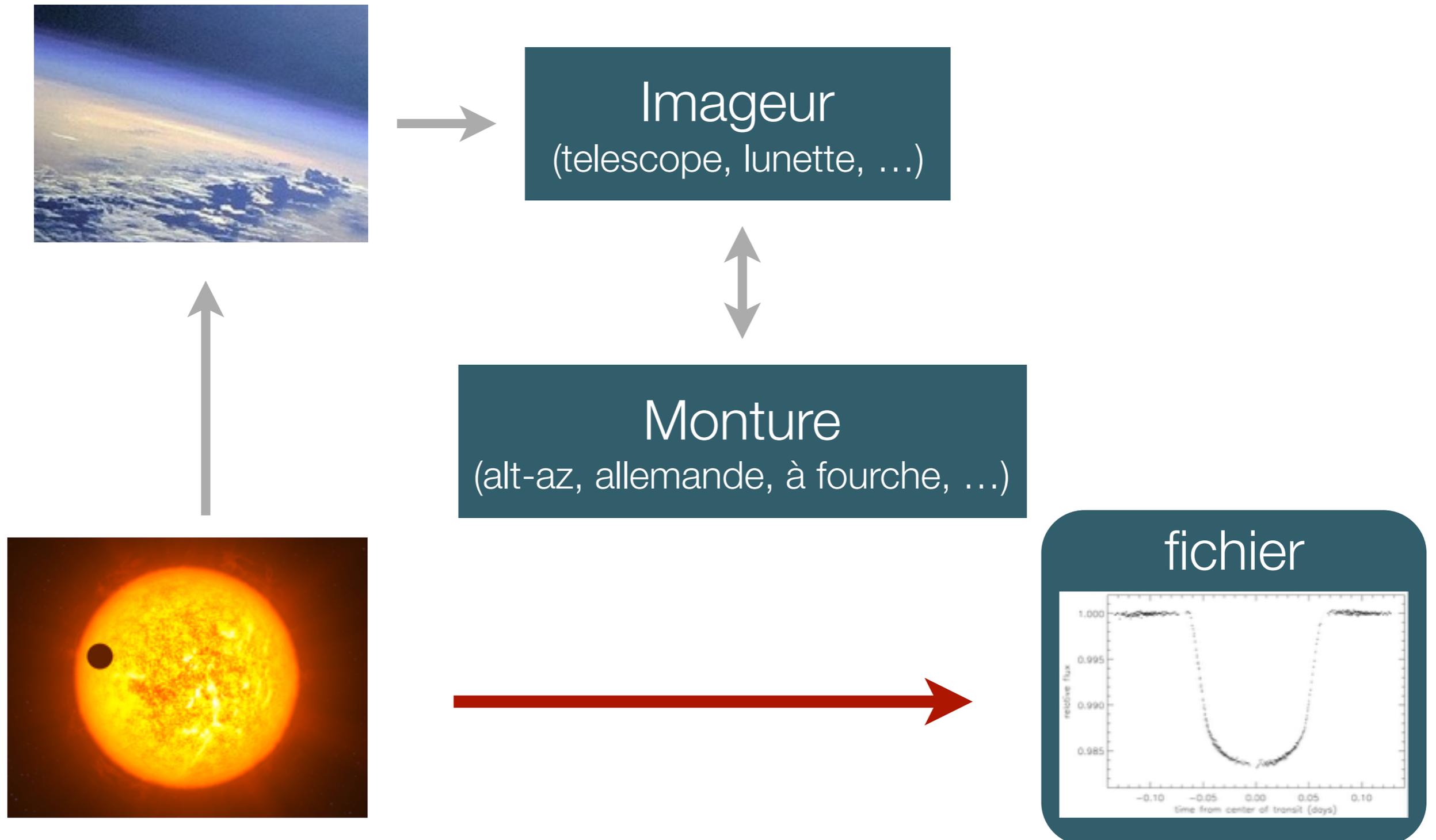
Imageur  
(telescope, lunette, ...)



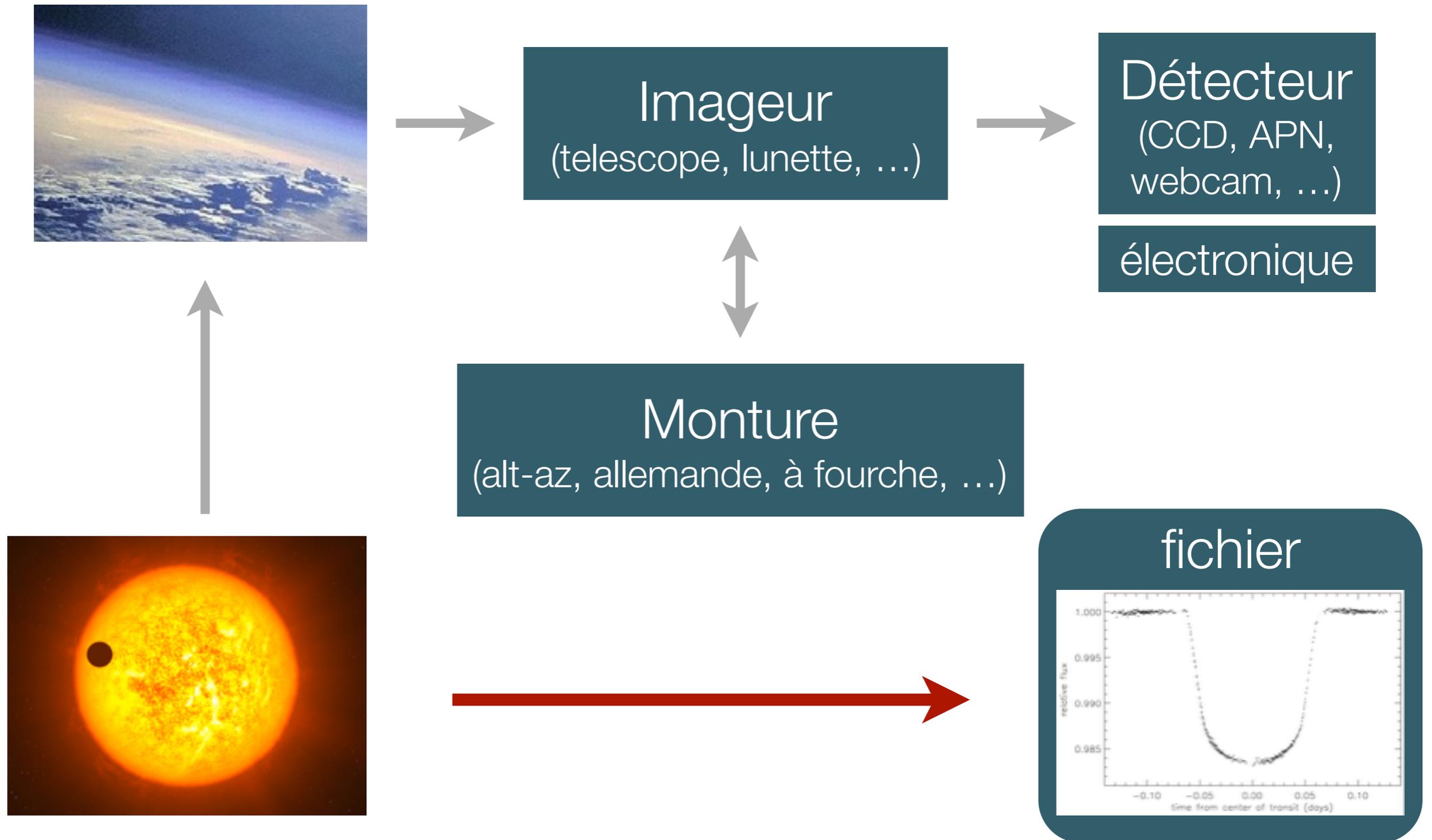
fichier



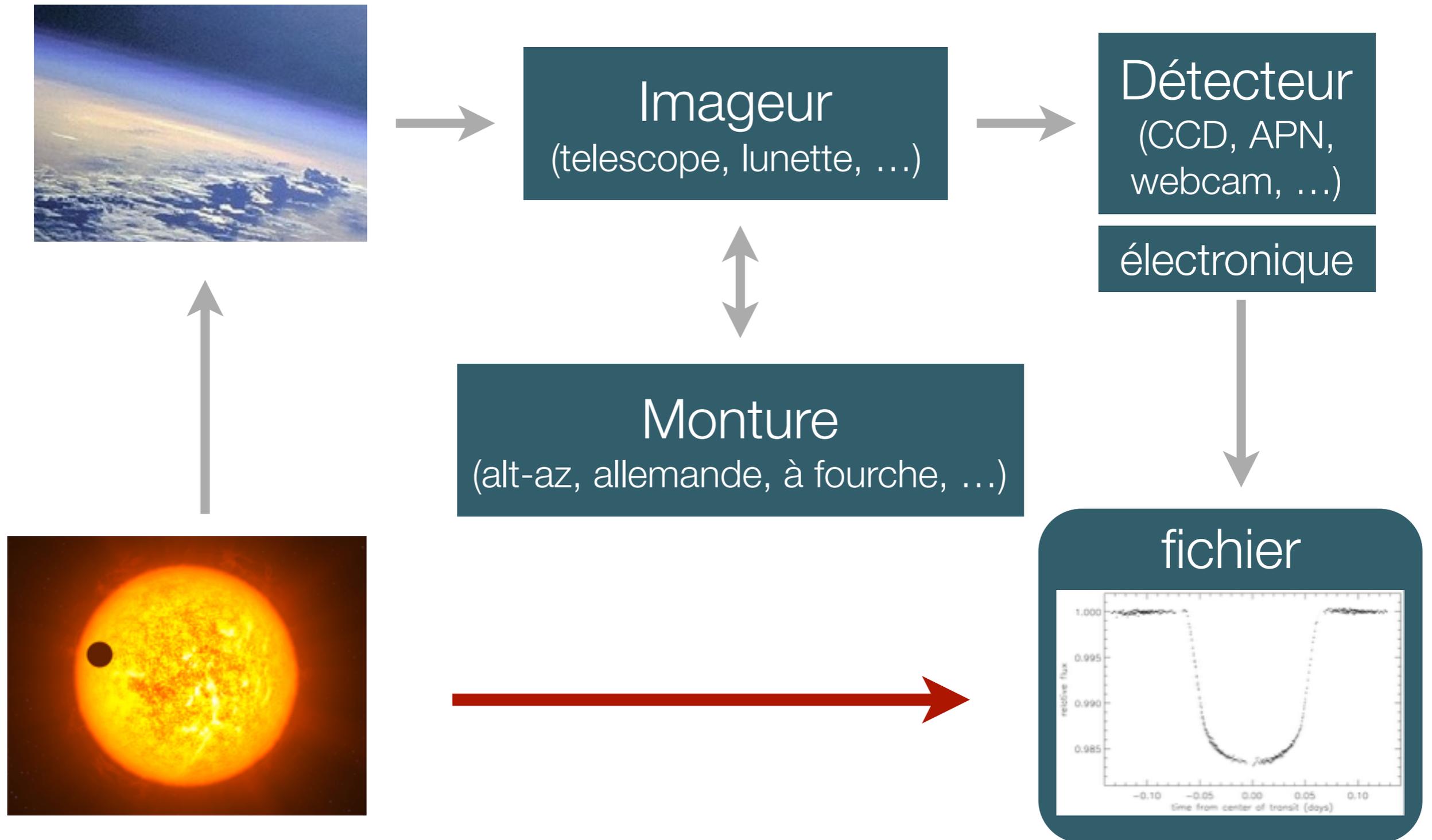
# Principe d'une observation



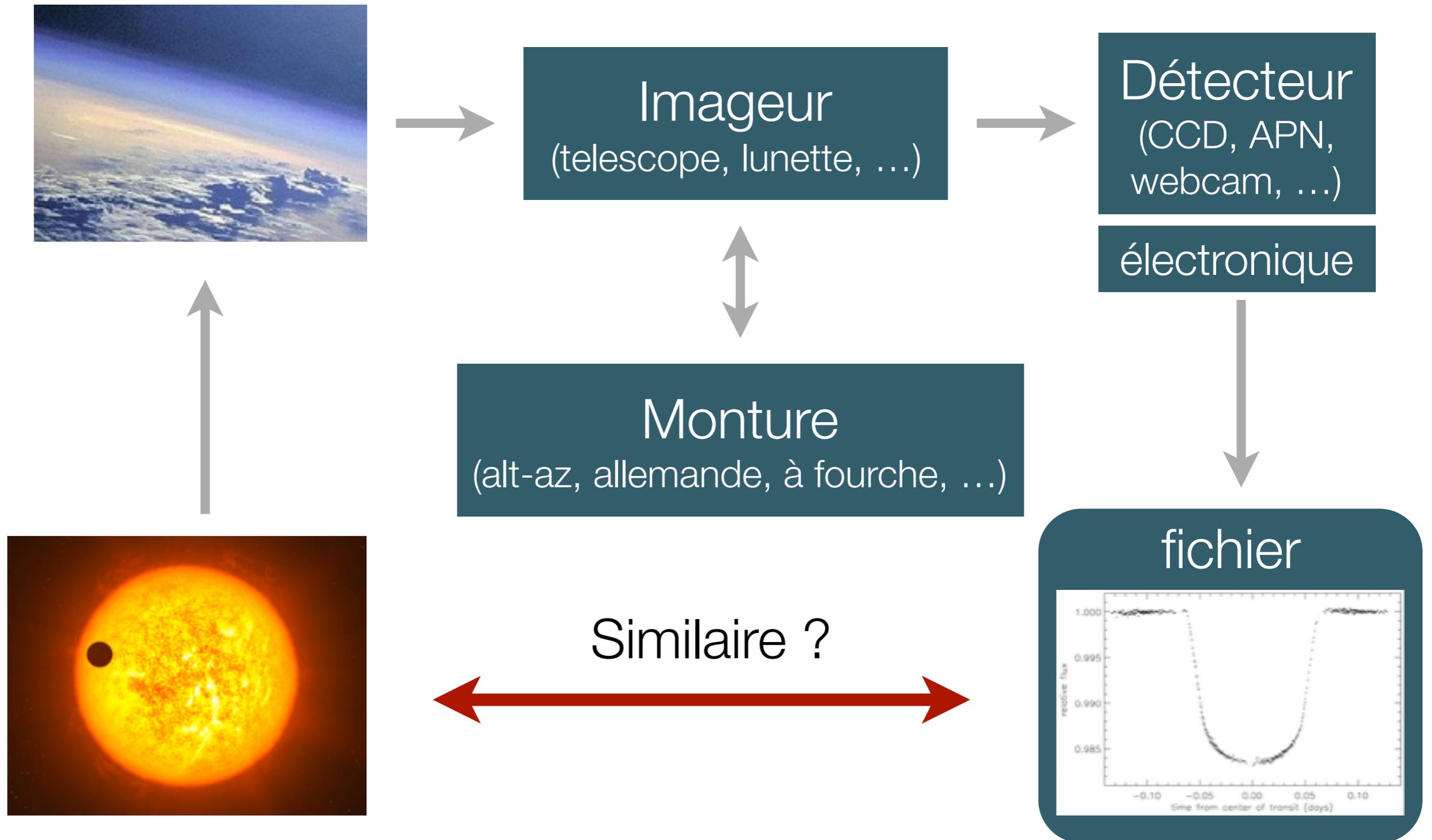
# Principe d'une observation



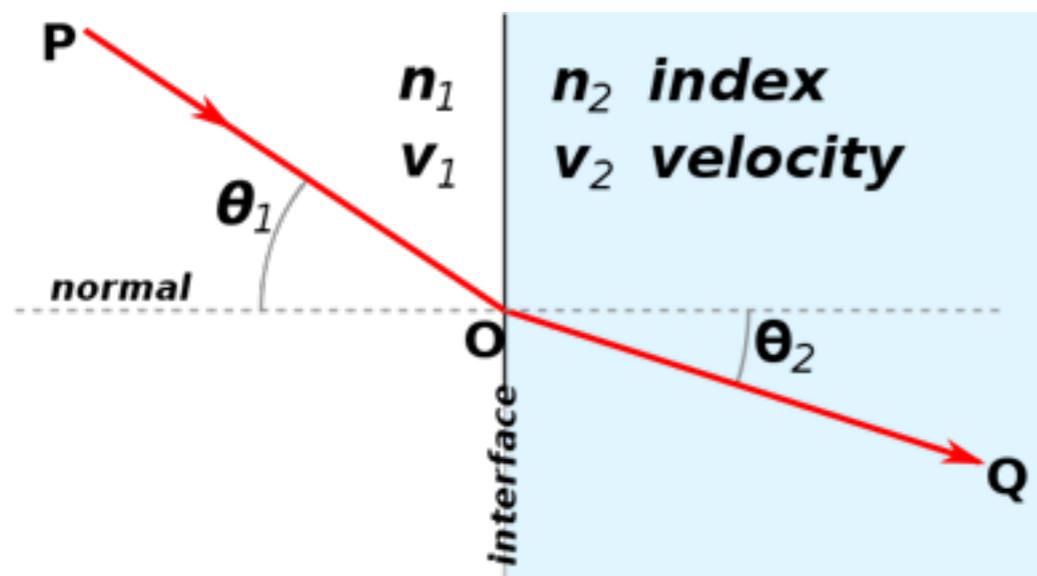
# Principe d'une observation



# Principe d'une observation



# L'atmosphère de la Terre (1): rappel de physique



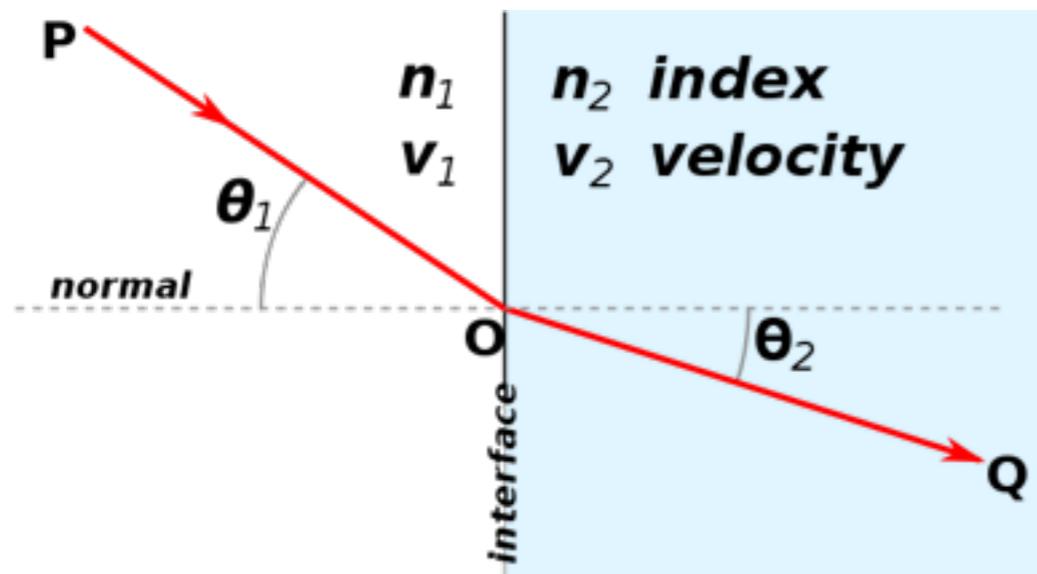
Loi de Snell - Descartes:  
 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$



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'atmosphère de la Terre (1): rappel de physique



Loi de Snell - Descartes:  
 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

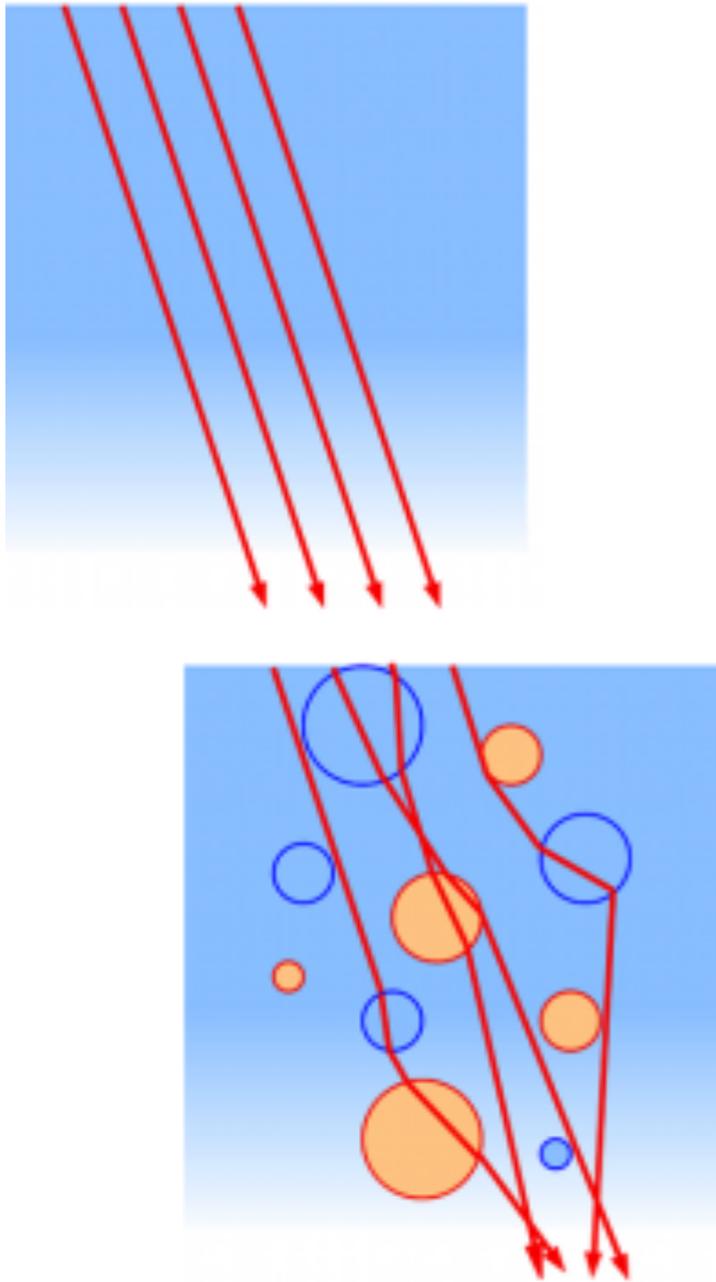


Indice de l'air (sous conditions normales)

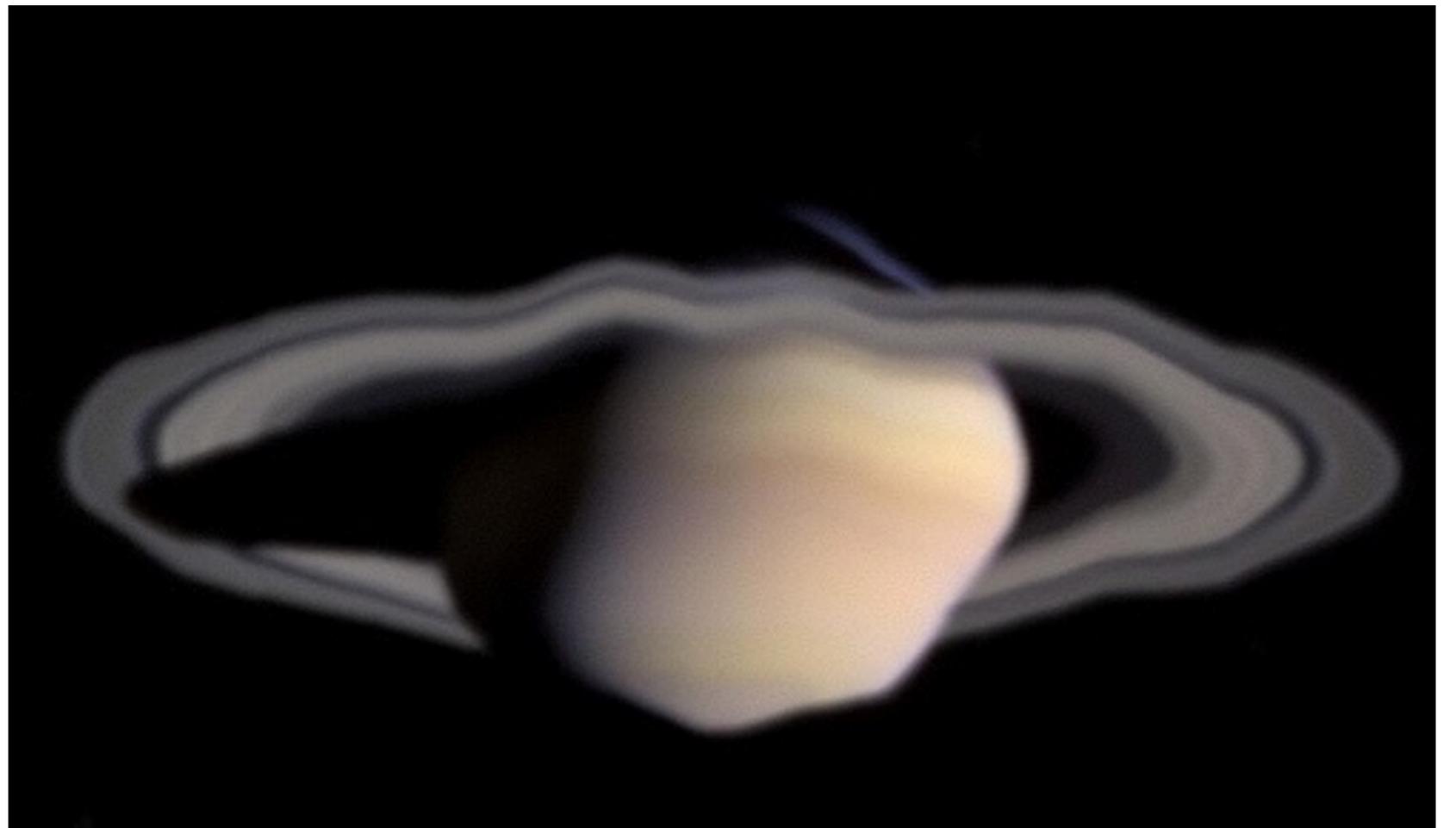
$$n_s = 1 + c_1 + \frac{c_2}{146 - (1000/\lambda)^2} + \frac{c_3}{41 - (1000/\lambda)^2}$$

Two red arrows point upwards from below the equation to the terms  $(1000/\lambda)^2$  in the denominators of the two fractions.

# L'atmosphère de la Terre (2): turbulence



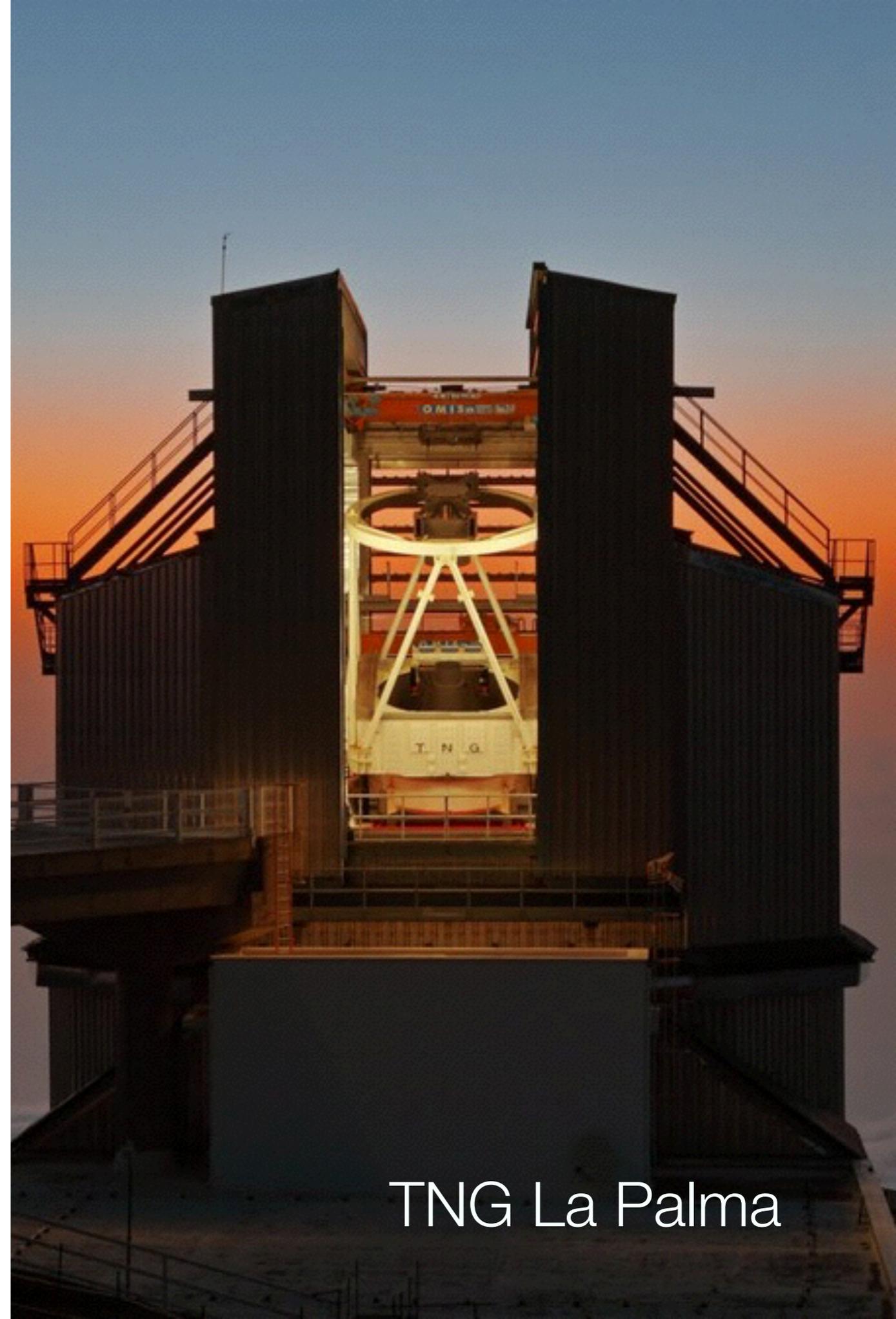
$$n = 1 + (n_s - 1) \times \left( \frac{P}{P_s} \right) \times \left( \frac{T_s}{T} \right)$$



# Perturbations atmosphériques

---

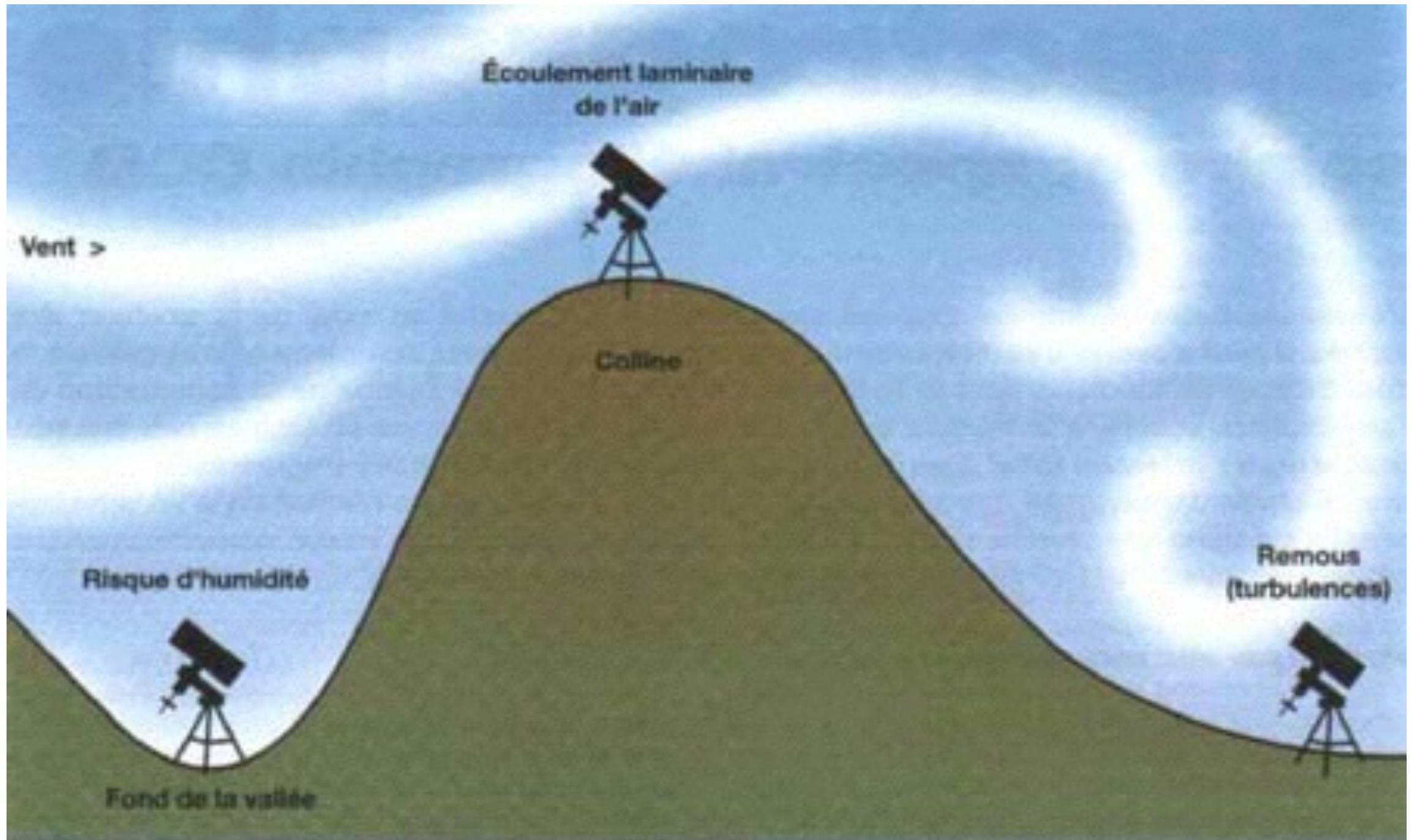
- Dépend de la longueur d'onde ( $\propto \lambda^2$ ):
  - le rouge est plus stable que le bleu
  - bande étroite meilleure que bande large
- Dépend de la taille de la couche d'air: zénith meilleur que l'horizon
- Dépend de taille des cellules de turbulence
- Dépend de la durée de cohérence des cellules de turbulence
- Attention à la turbulence à l'intérieur de la coupole ou du télescope !



TNG La Palma

# Voir haut ...

---

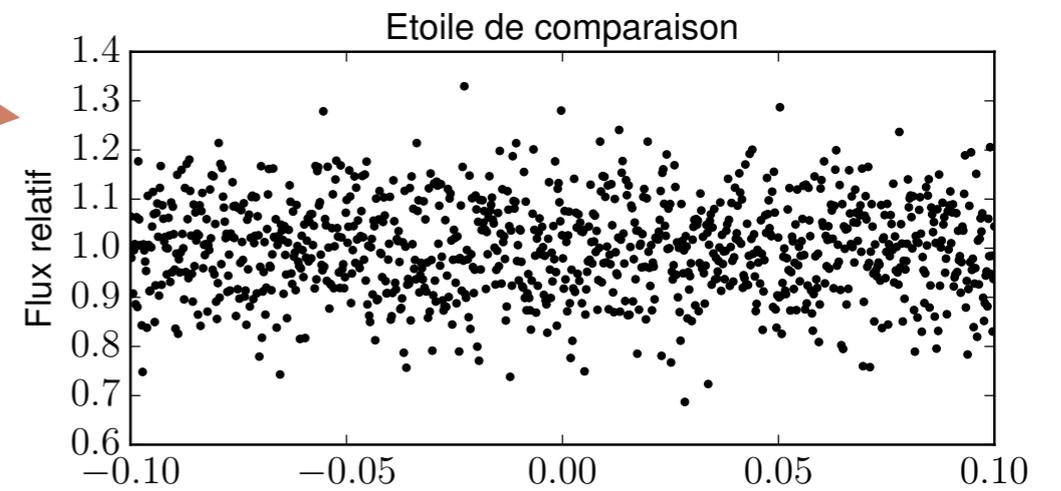
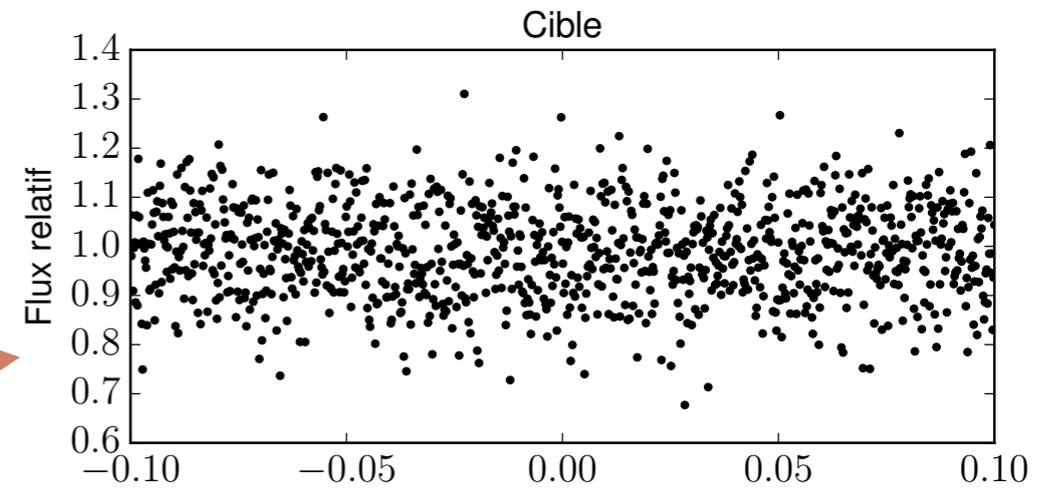
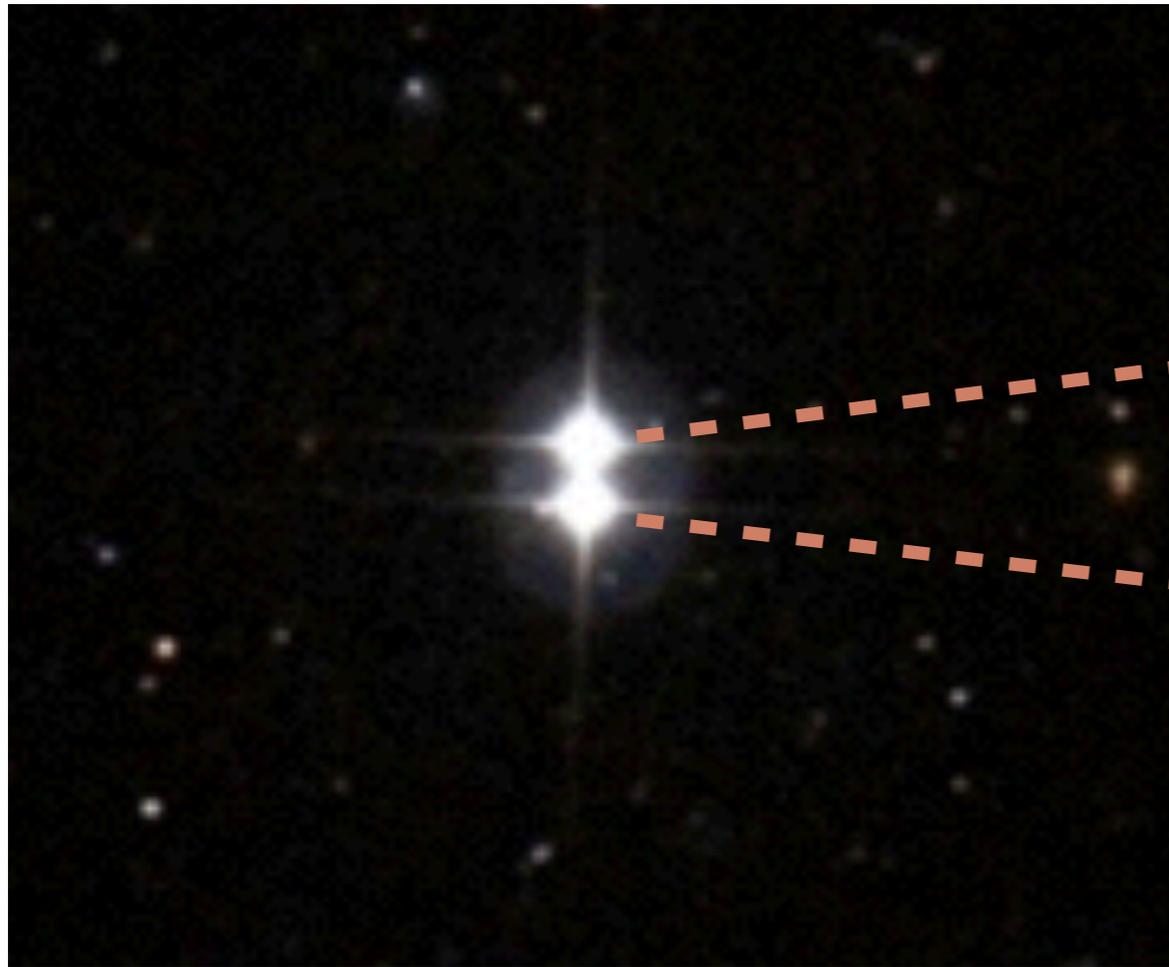


# Vaincre l'atmosphère : photométrie différentielle

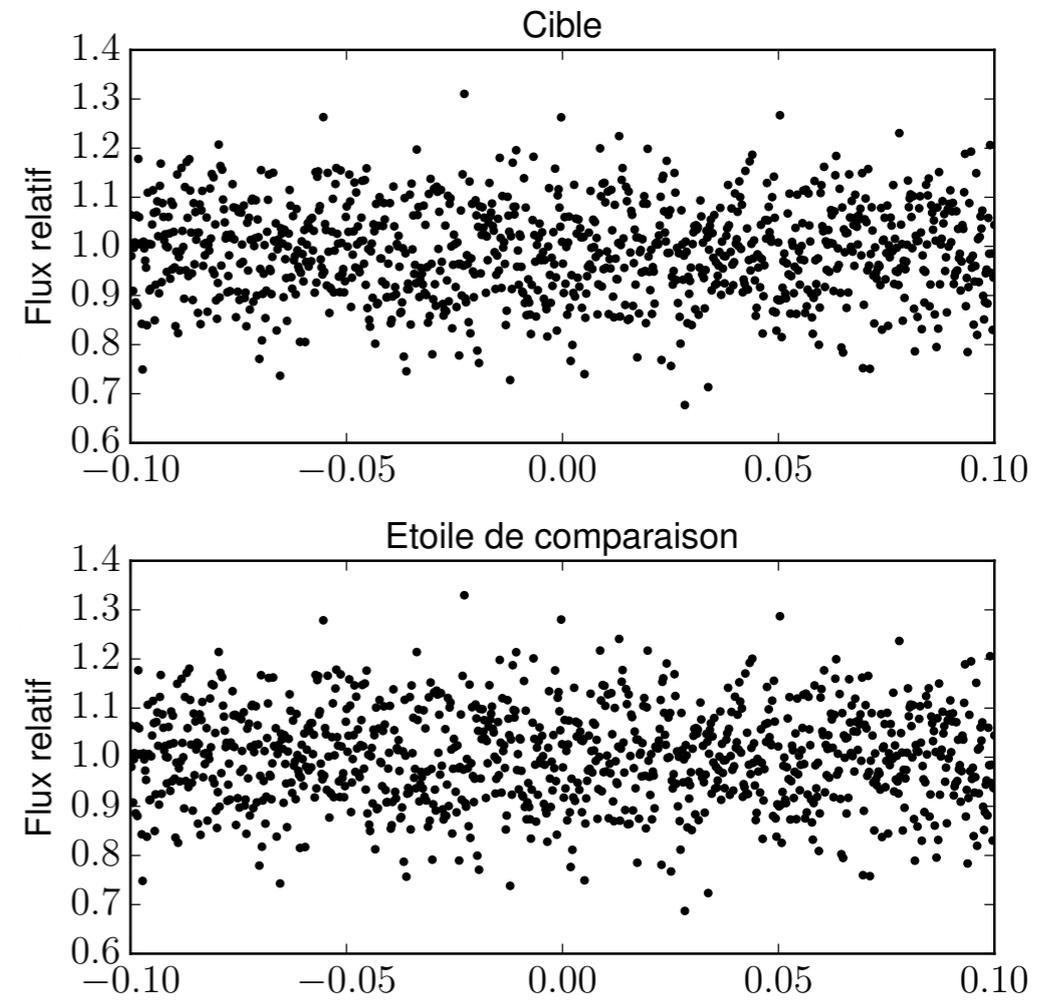
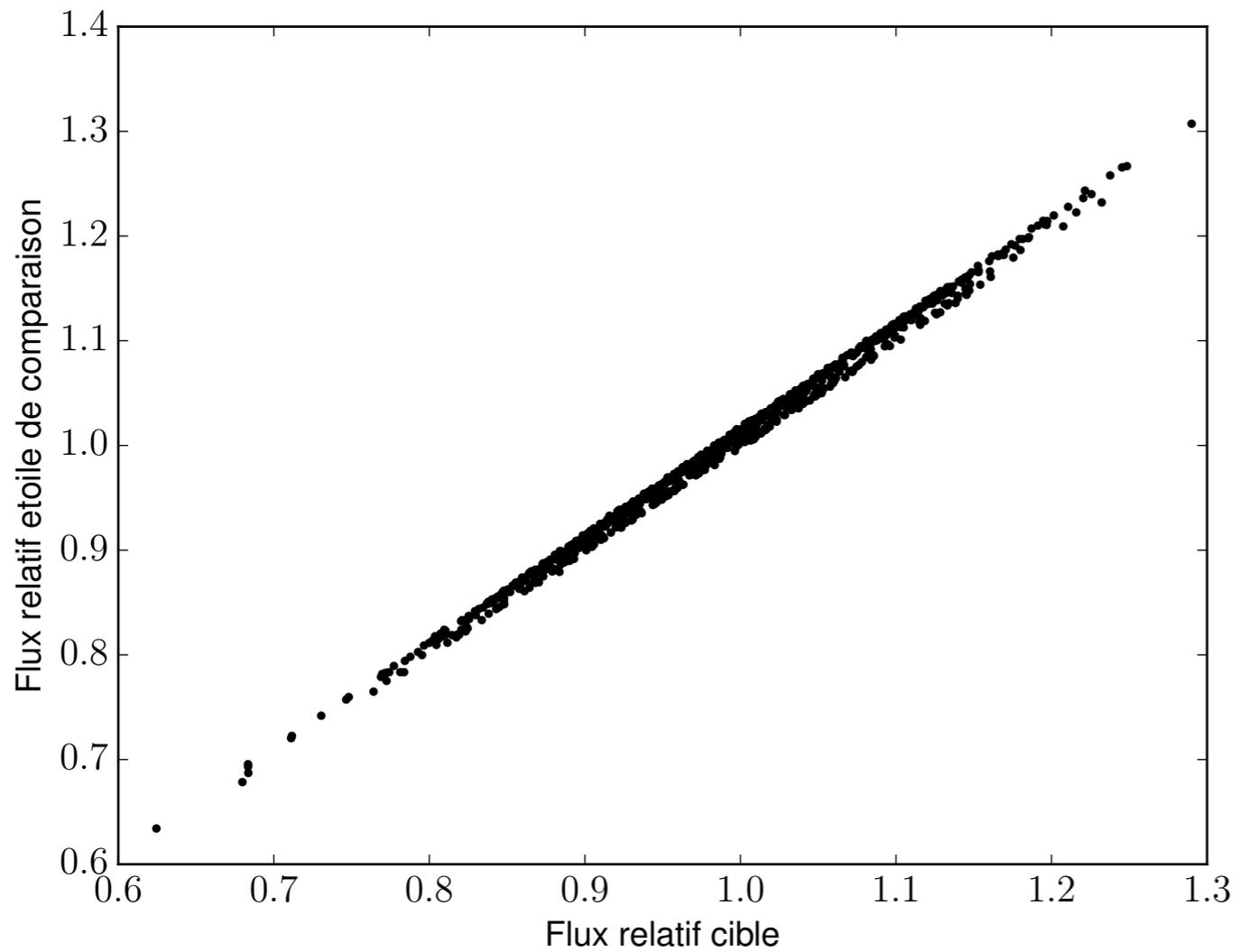
---



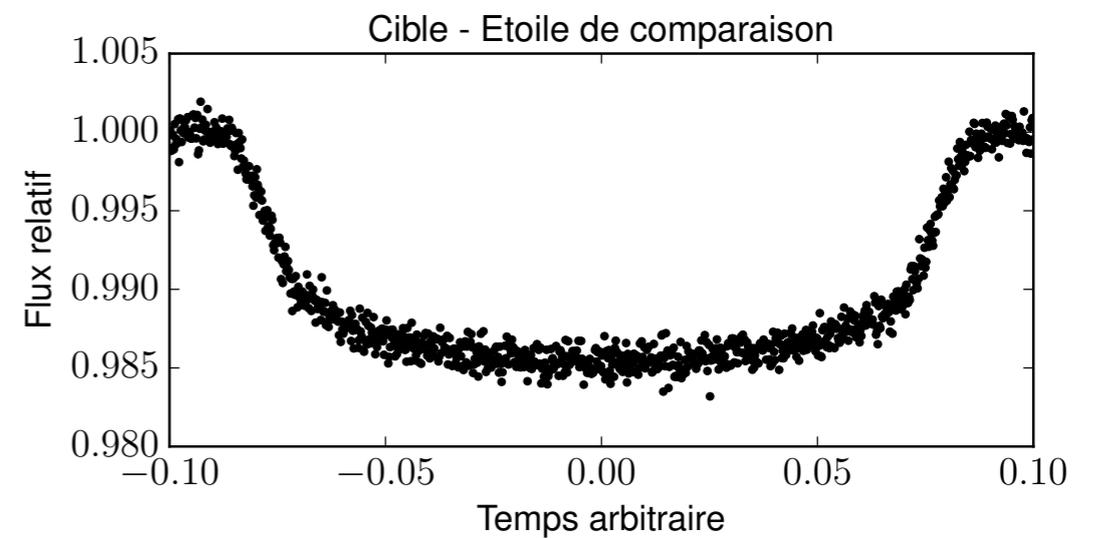
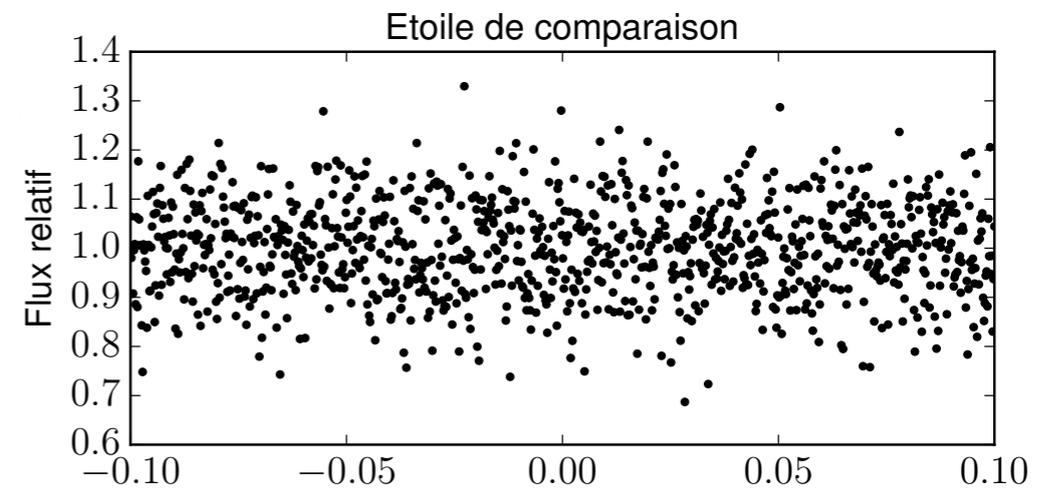
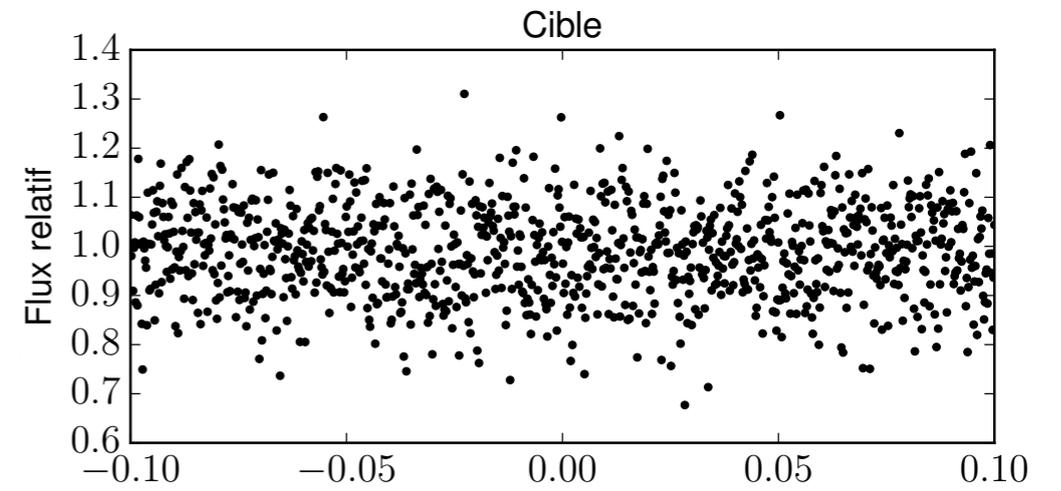
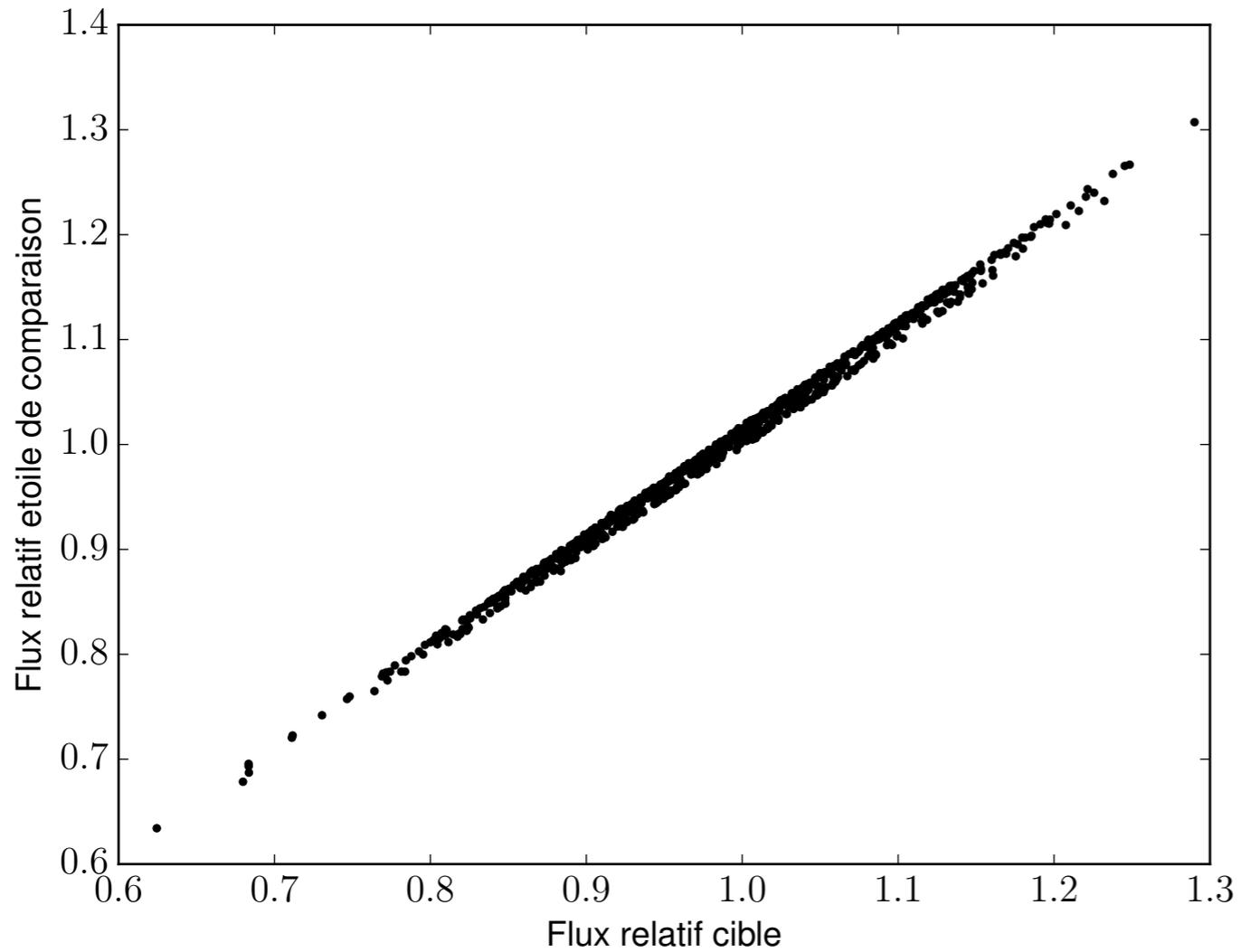
# Vaincre l'atmosphère : photométrie différentielle



# Vaincre l'atmosphère : photométrie différentielle

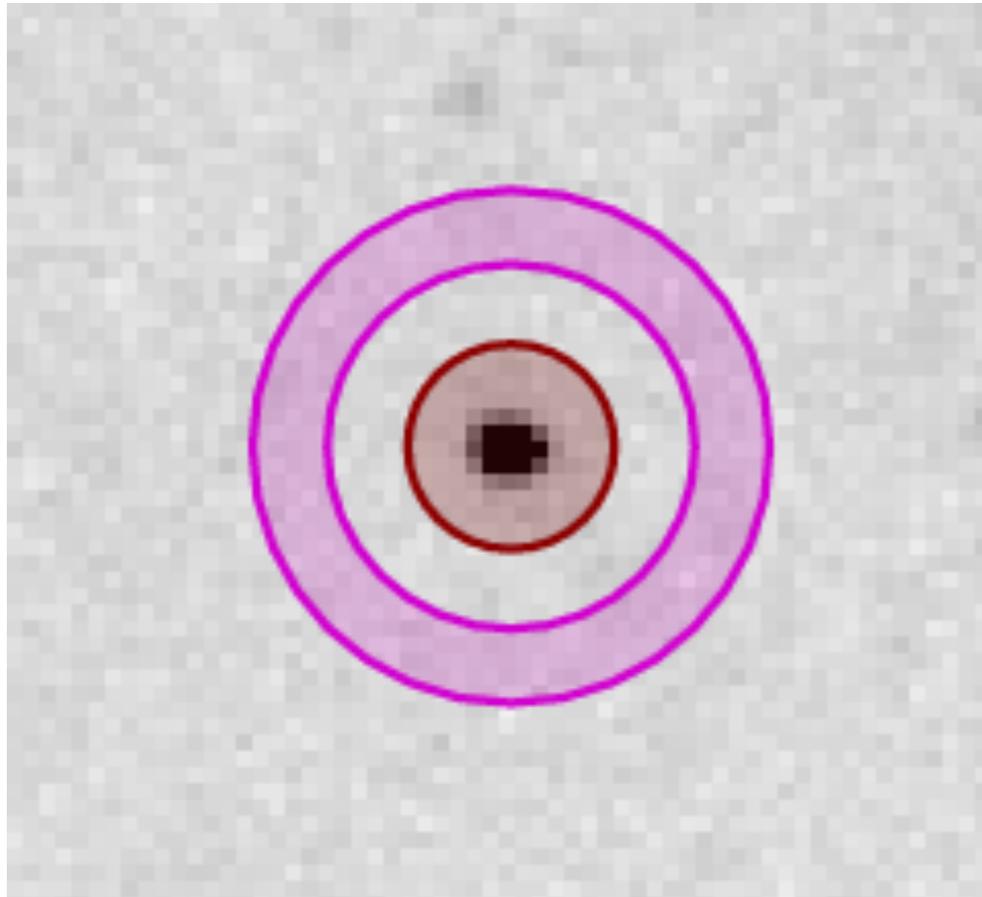


# Vaincre l'atmosphère : photométrie différentielle



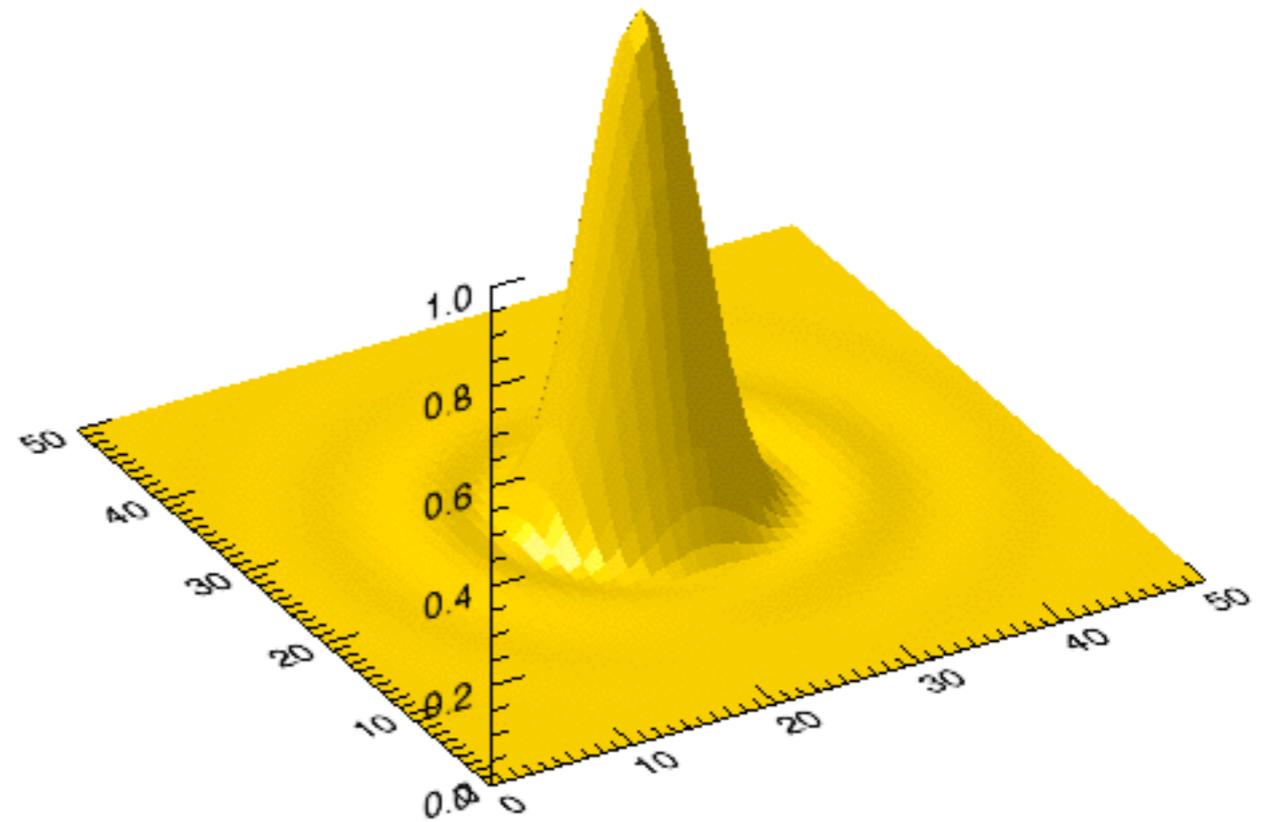
# Photométrie: plusieurs méthodes

---



## Photométrie d'ouverture

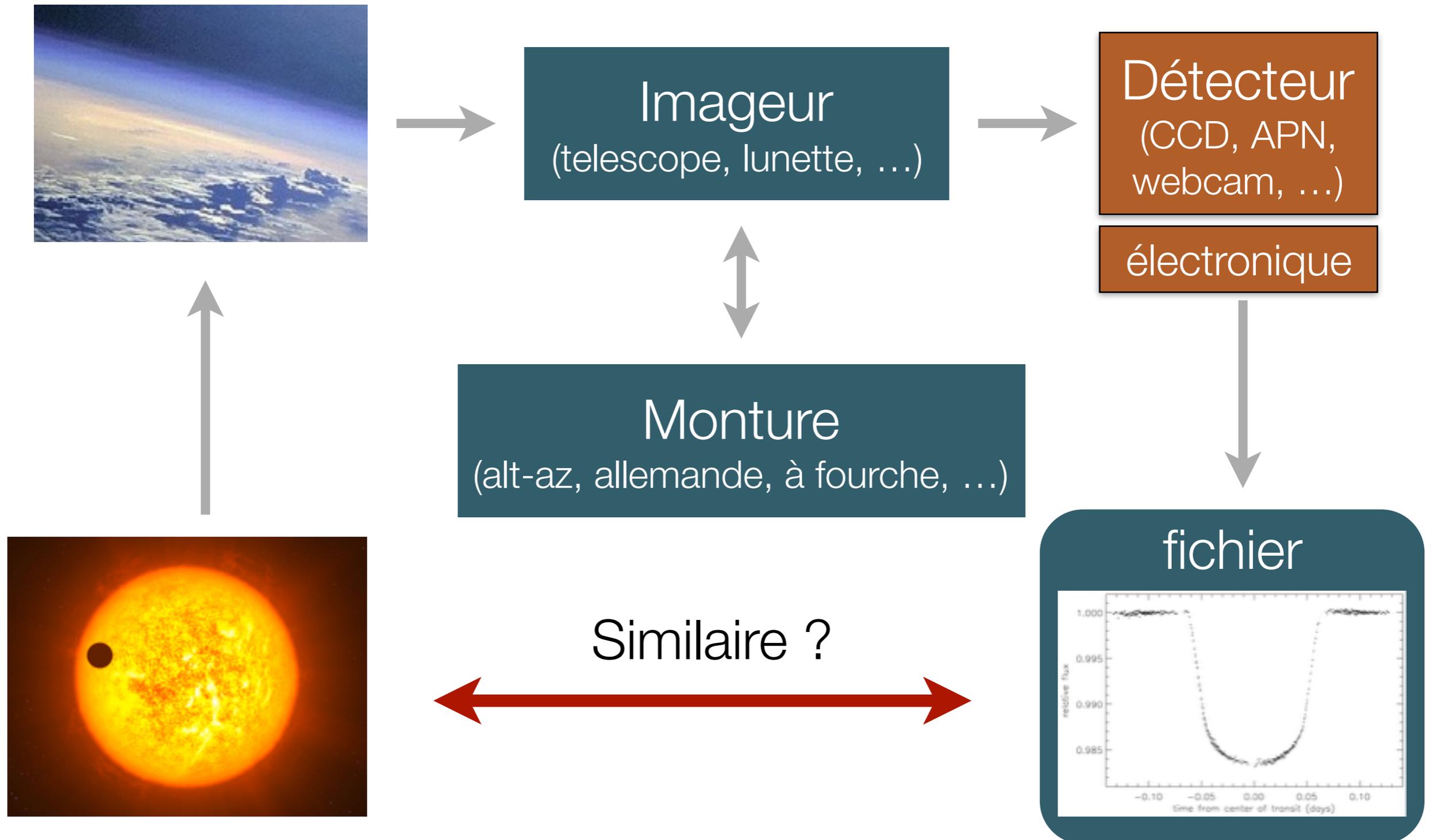
- Très bon résultats si faible densité d'étoiles
- Facile et rapide
- Modèle indépendant



## Modélisation de la PSF

- Bon résultats si forte densité d'étoiles (amas, centre galactique, binaires)
- Nécessite un bon modèle de PSF

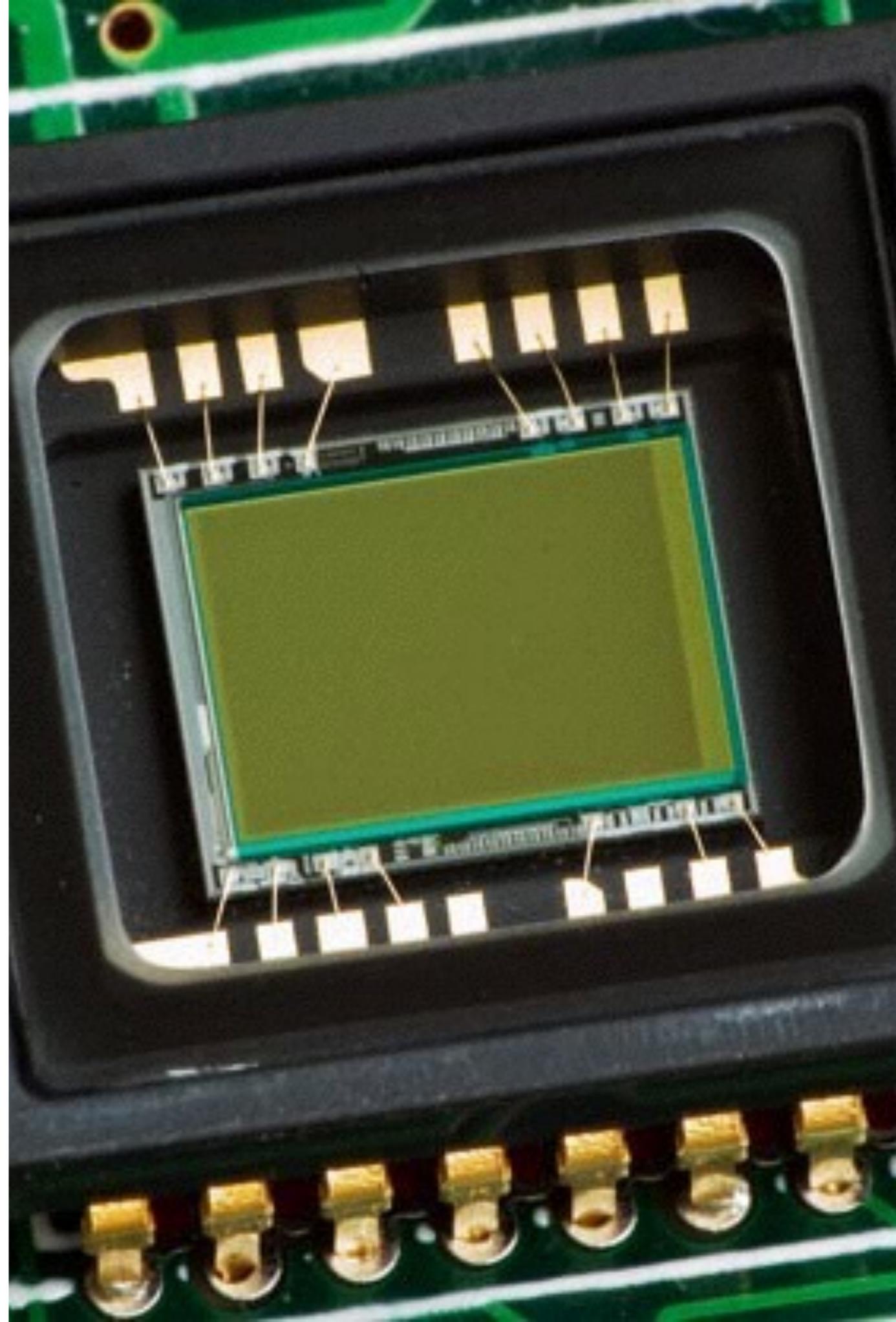
# Principe d'une observation



# Le détecteur

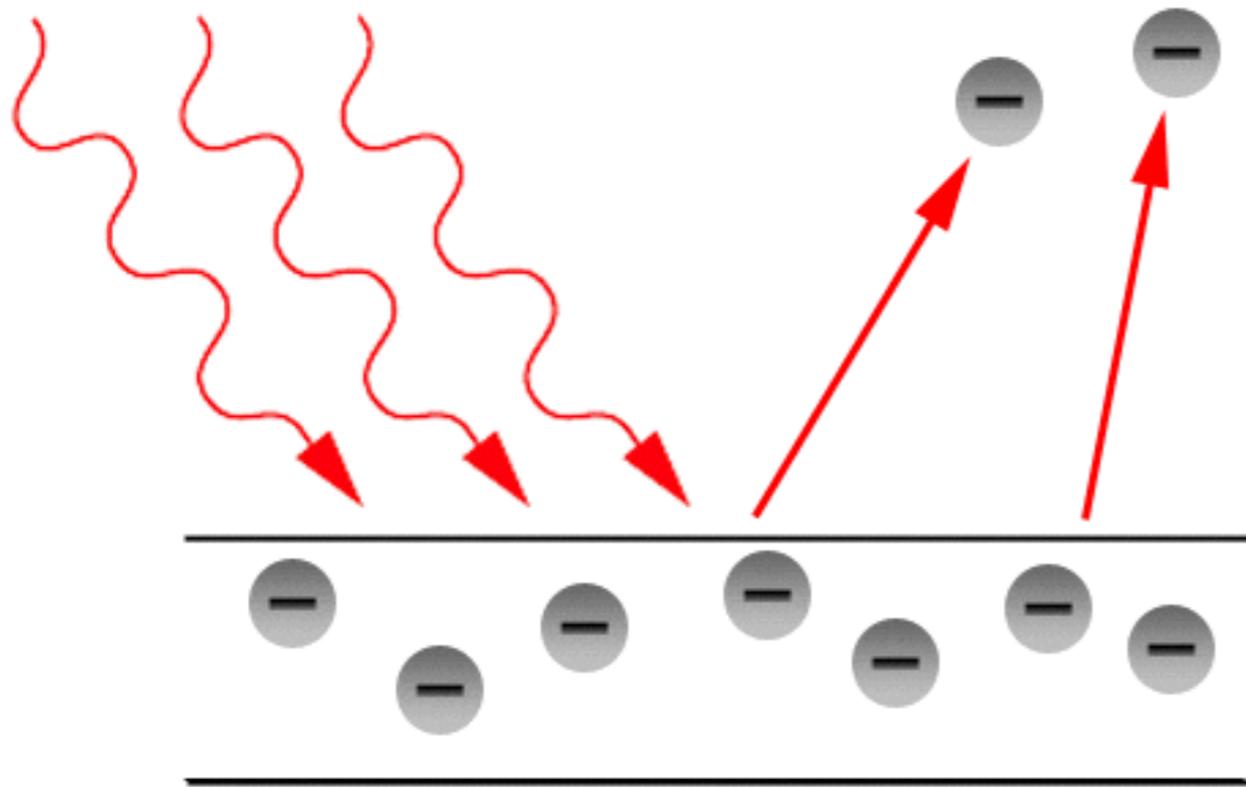
---

- Capteur CCD
- Capteur CMOS



# Principe de fonctionnement

---

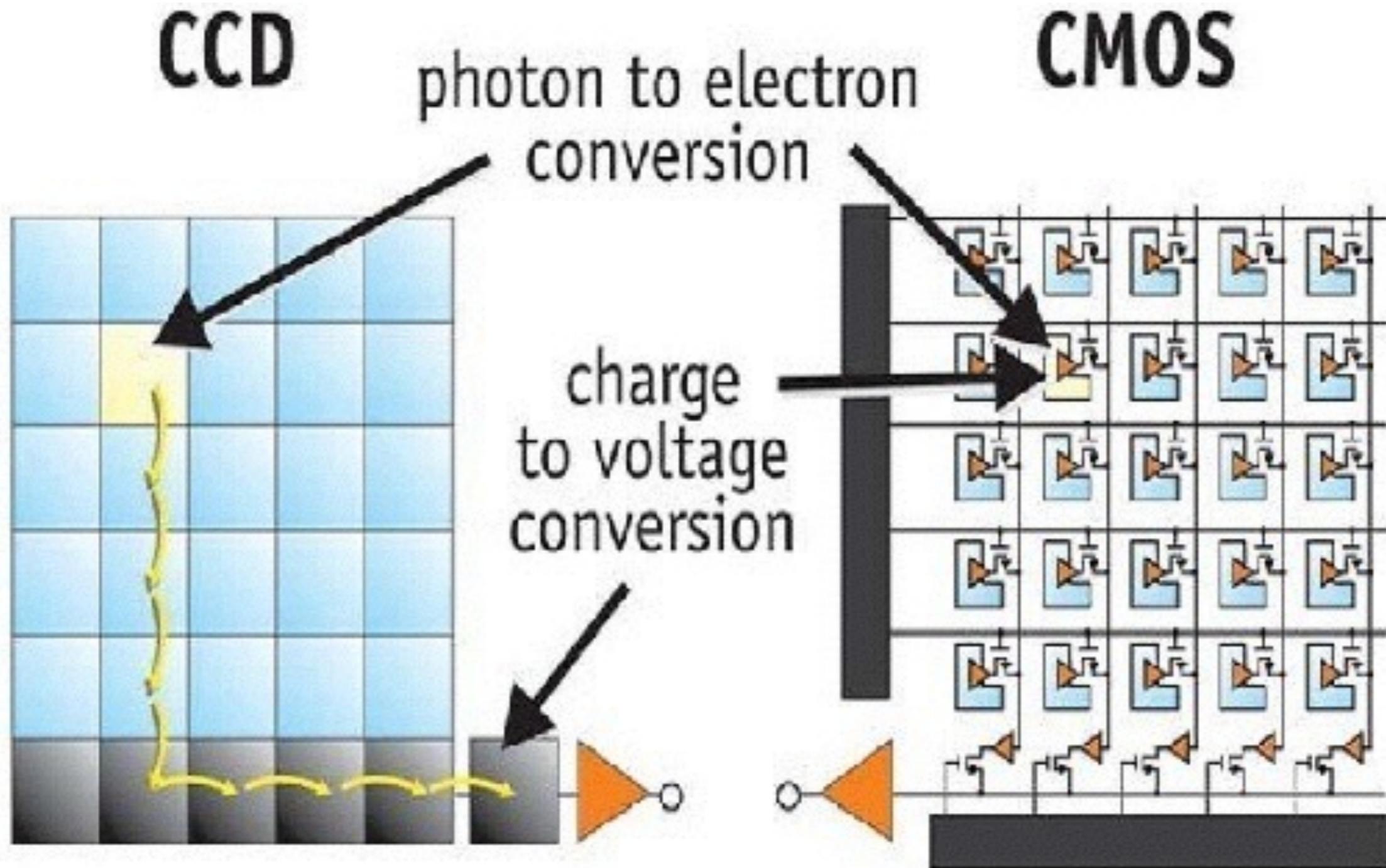


L'effet photo-électrique

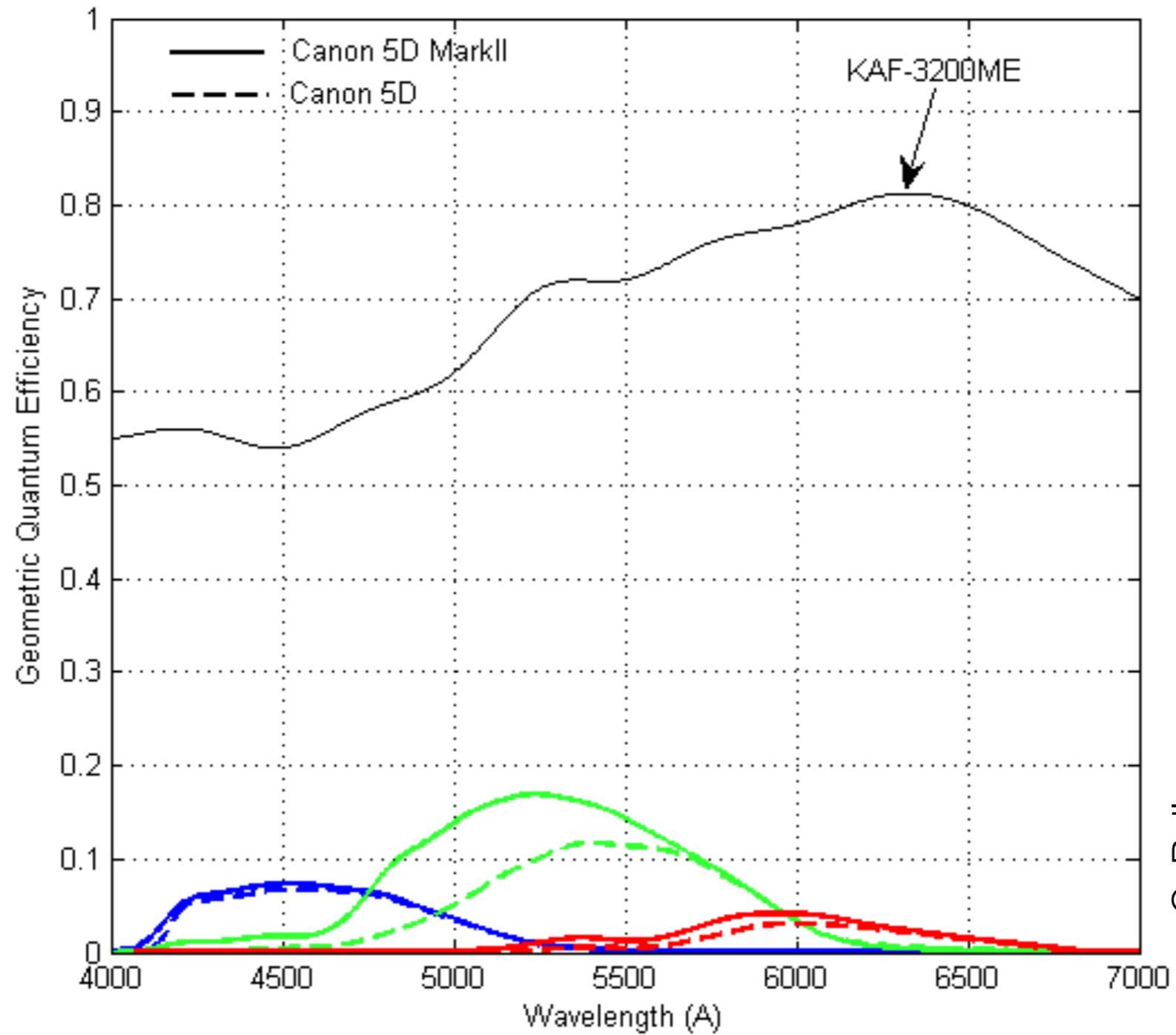
Efficacité quantique :

$$\frac{\text{nombre d'électrons générés}}{\text{nombre de photons reçus}}$$

# CCD vs CMOS



# CCD vs CMOS



C. Buil

# Avantages / inconvénients des CCDs vs CMOS

---

- temps de lecture plus lent
- plus sensible
- moins bruité

Développement technologique des CMOS change la donne

# Sources de bruit des détecteurs

---

- Bruit électronique (amplificateur)
- Bruit thermique (courant d'obscurité)
- Pixels "chauds"
- Pixels /colonnes "mort(e)s"
- Trappes
- Non-uniformité du champ

# Sources de bruit des détecteurs

---

- Bruit électronique (amplificateur)

Bias

- Bruit thermique (courant d'obscurité)

- Pixels "chauds"

Dark

- Pixels /colonnes "mort(e)s"

- Trappes

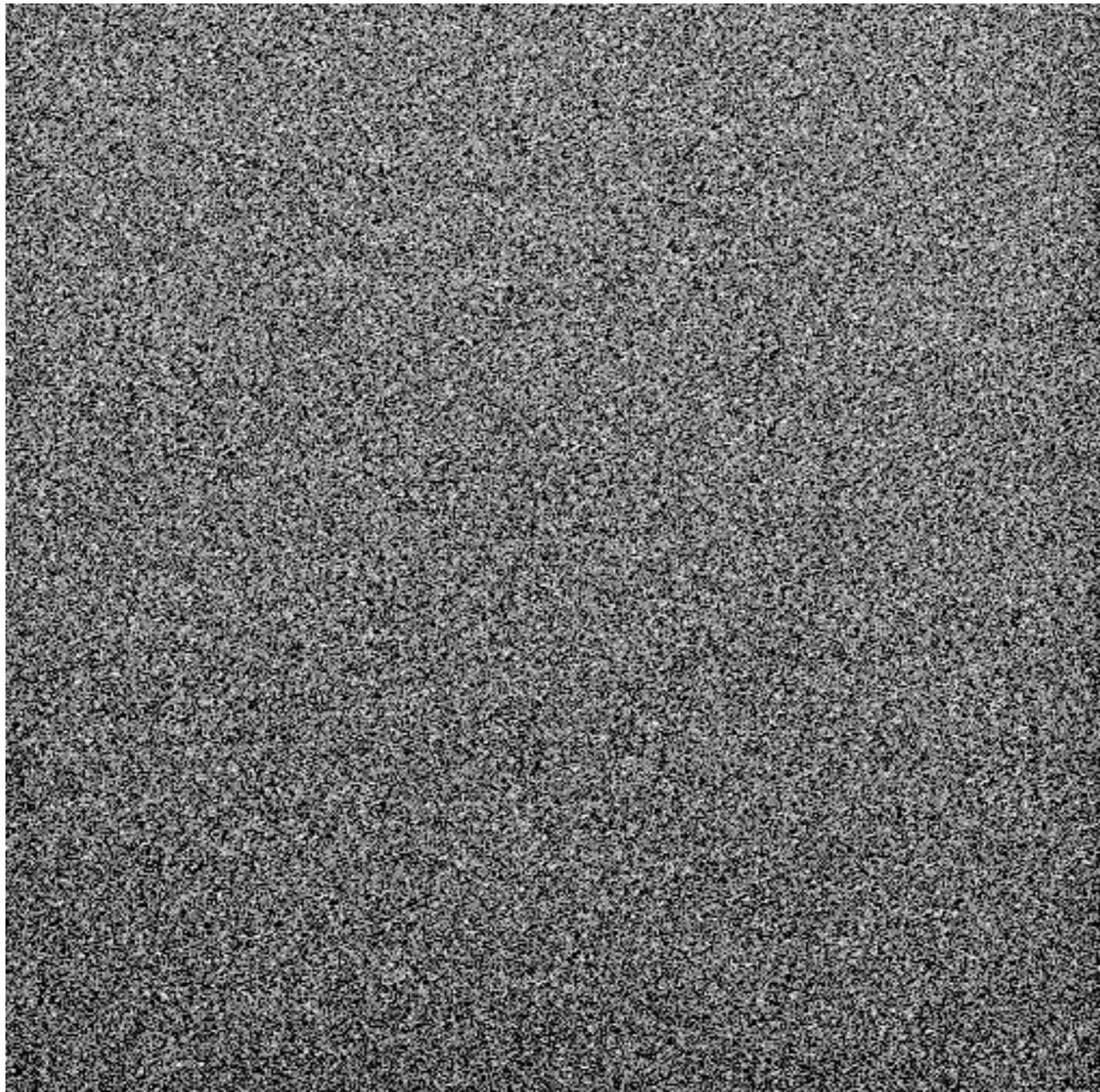
- Non-uniformité du champ

Flat

# Offset / bias

---

- Principe : faire une image avec temps d'exposition zéro
- Mesure le bruit introduit par l'électronique pendant la lecture du capteur



Bruit électronique

exemple de bias

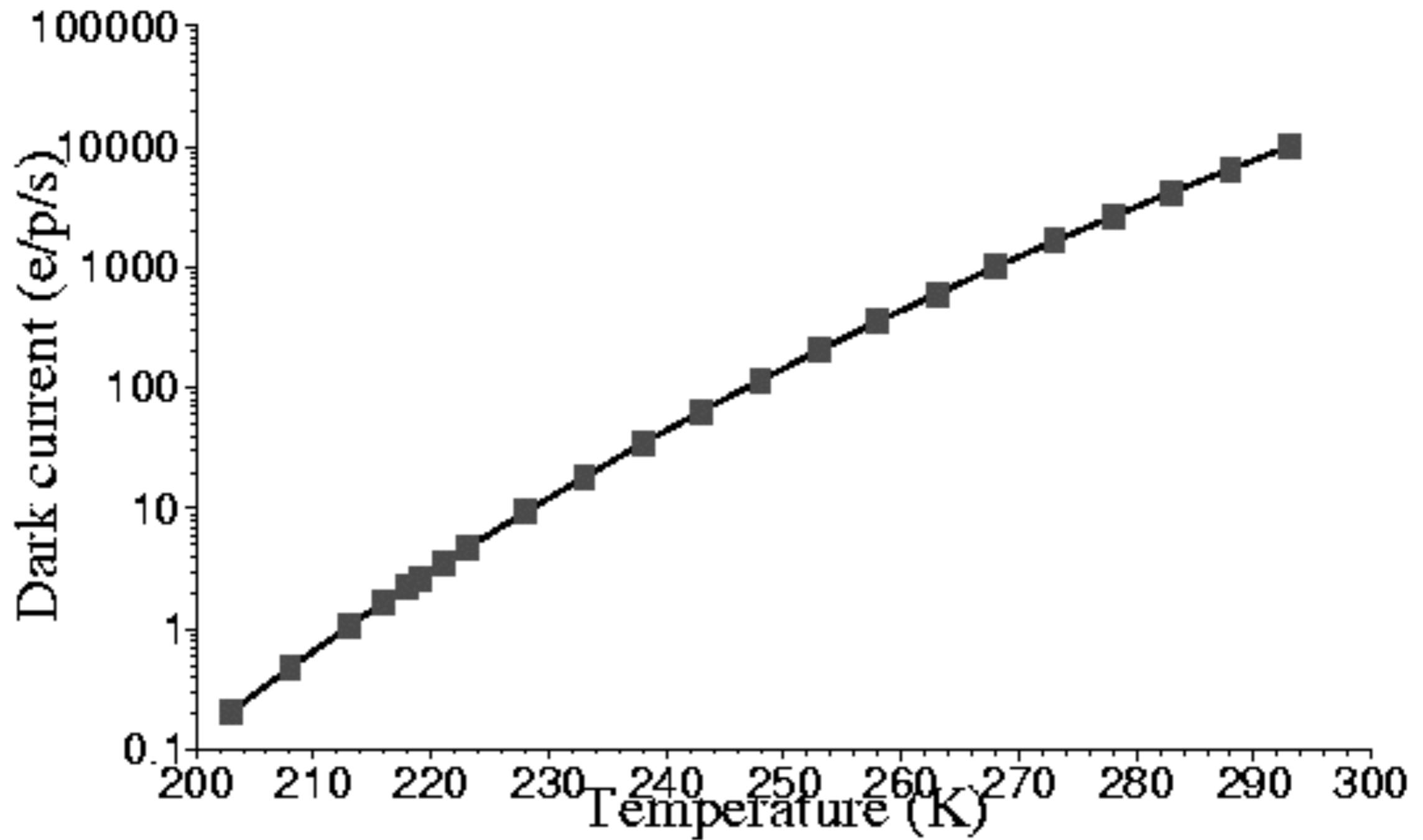
# Dark

---

- Principe : faire une image à flux incident zéro
- Mesure le bruit thermique de la CCD :  
“courant d’obscurité”
- Identifie les pixels chauds

# Influence de la température

---





Pixels chauds

exemples de dark



Electroluminescence

exemples de dark

# Faire des darks : 2 méthodes

---

# Faire des darks : 2 méthodes

---

- La méthode “brute”:
  - faire des séries de dark pour chaque temps d'exposition utilisé une nuit
  - faire une bibliothèque de darks pour tous les temps d'exposition et température de la CCD possibles

# Faire des darks : 2 méthodes

---

- La méthode “brute”:
  - faire des séries de dark pour chaque temps d'exposition utilisé une nuit
  - faire une bibliothèque de darks pour tous les temps d'exposition et température de la CCD possibles
- La méthode “adaptative”:
  - faire une bibliothèque de darks pour quelques temps d'exposition et quelques température de la CCD (mais sur une large gamme)



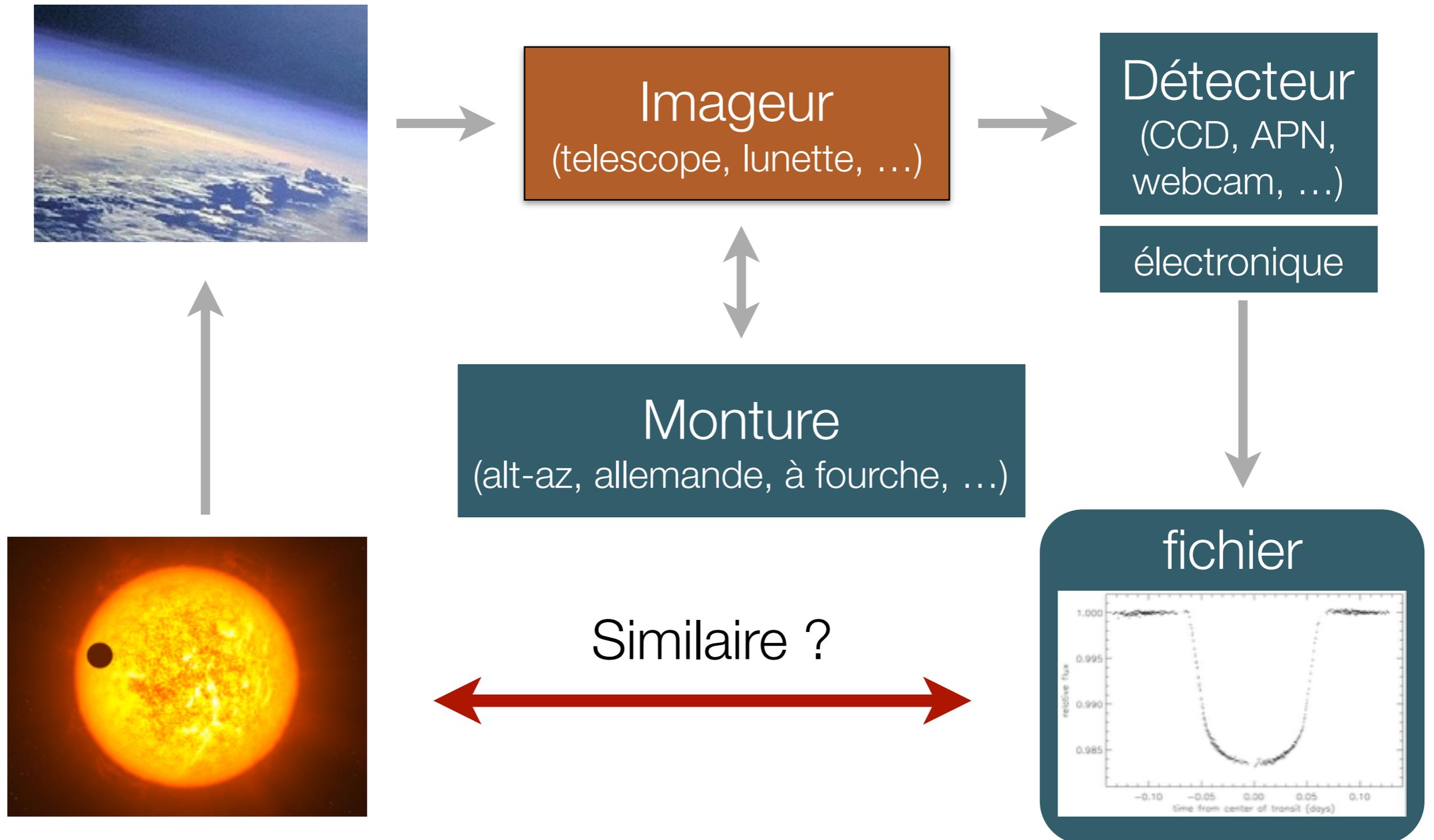
# Attention

---

Pour exploiter un dark, il faut d'abord soustraire le bias !  
(= thermique)

Sauf si le temps d'exposition du dark  
= temps d'exposition de l'image (bias inclu)

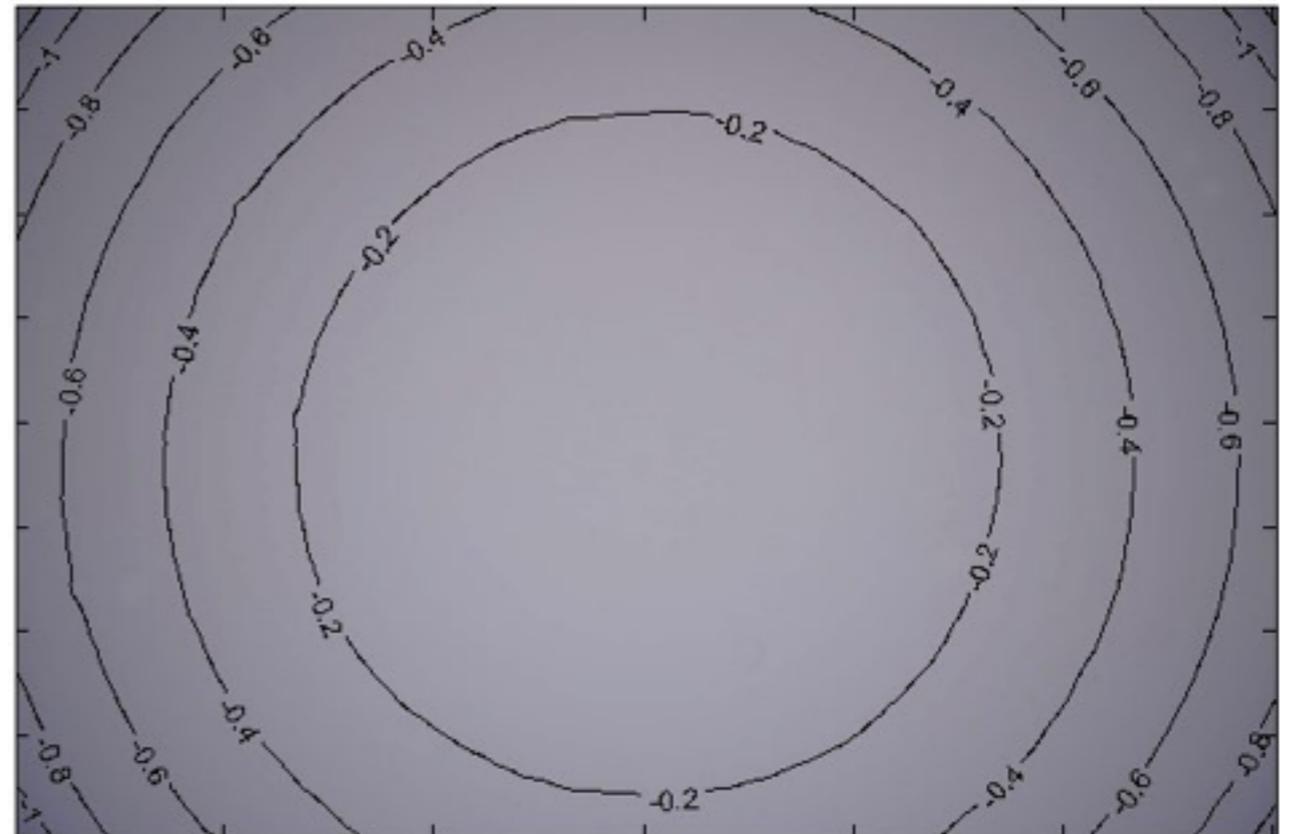
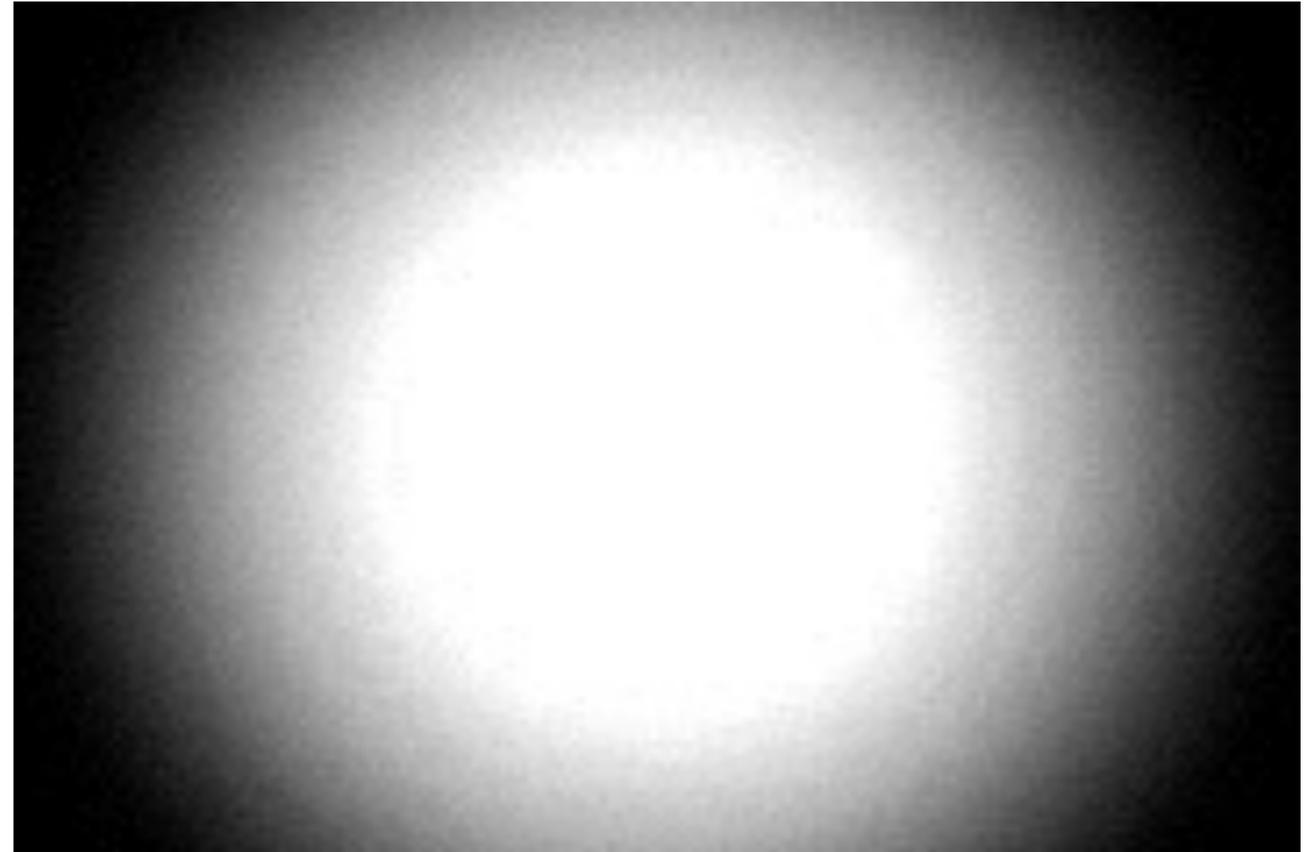
# Principe d'une observation



# L'imageur

---

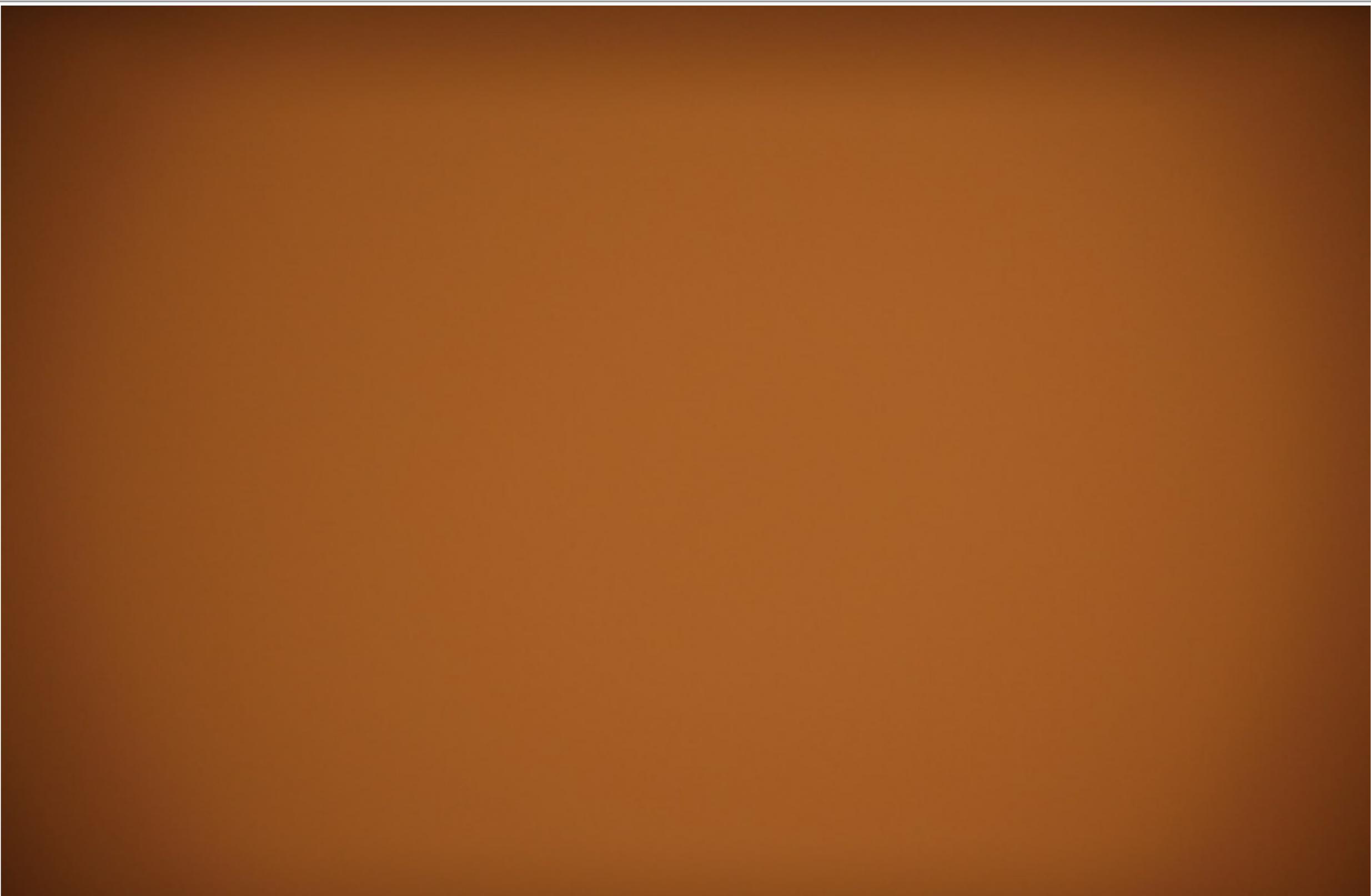
- Aberrations
- Chromatisme
- Focalisation
- Collimation
- Vignettage



# Flat

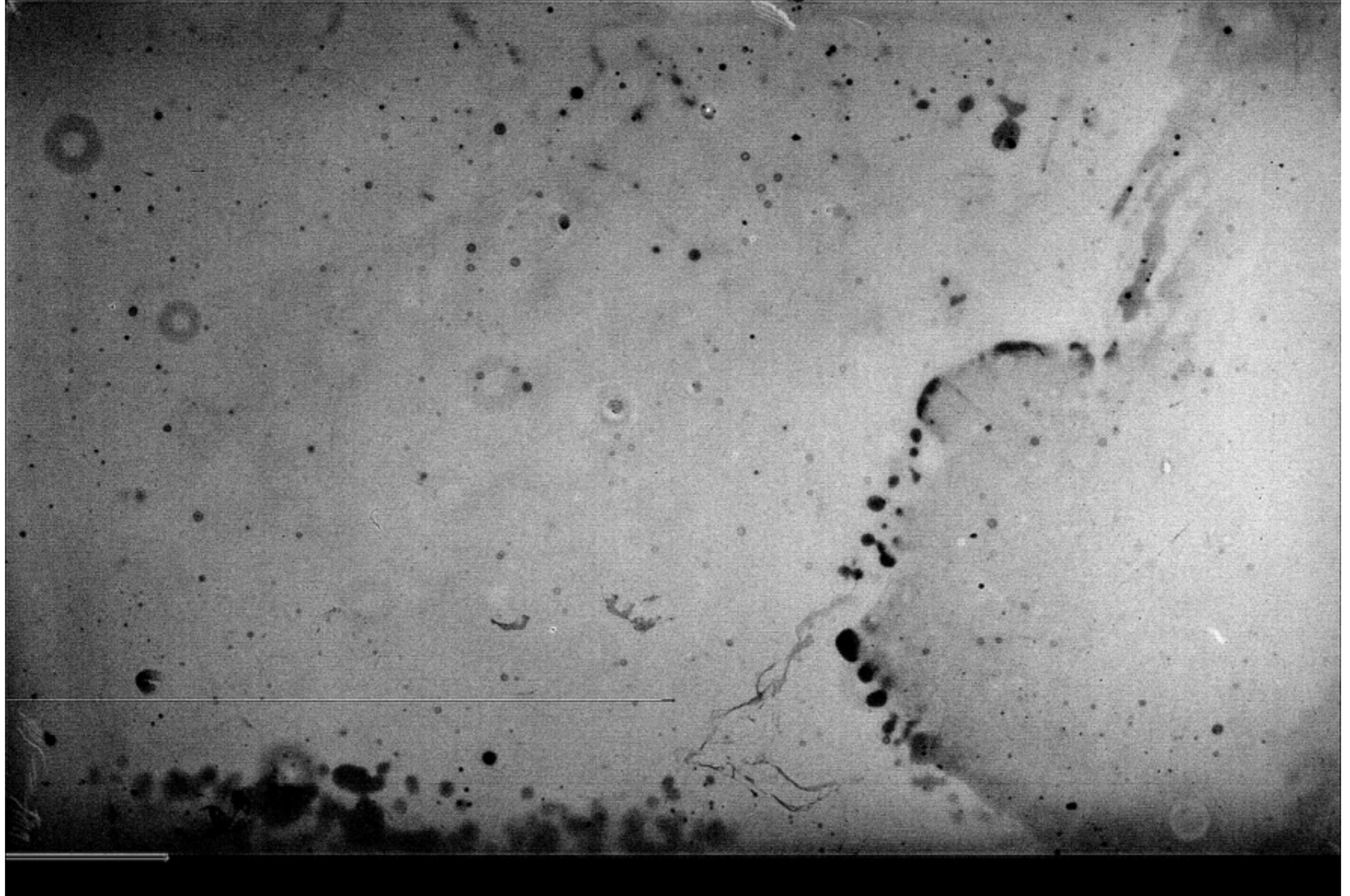
---

- Principe : illuminer l'instrument d'observation avec une source **blanche**, **continue** et **uniforme**.
- mesure le vignettage
- identifie les pixels / colonnes mort(e)s
- mesure la réponse / efficacité de chaque pixel



Balance des blancs

exemples de flat



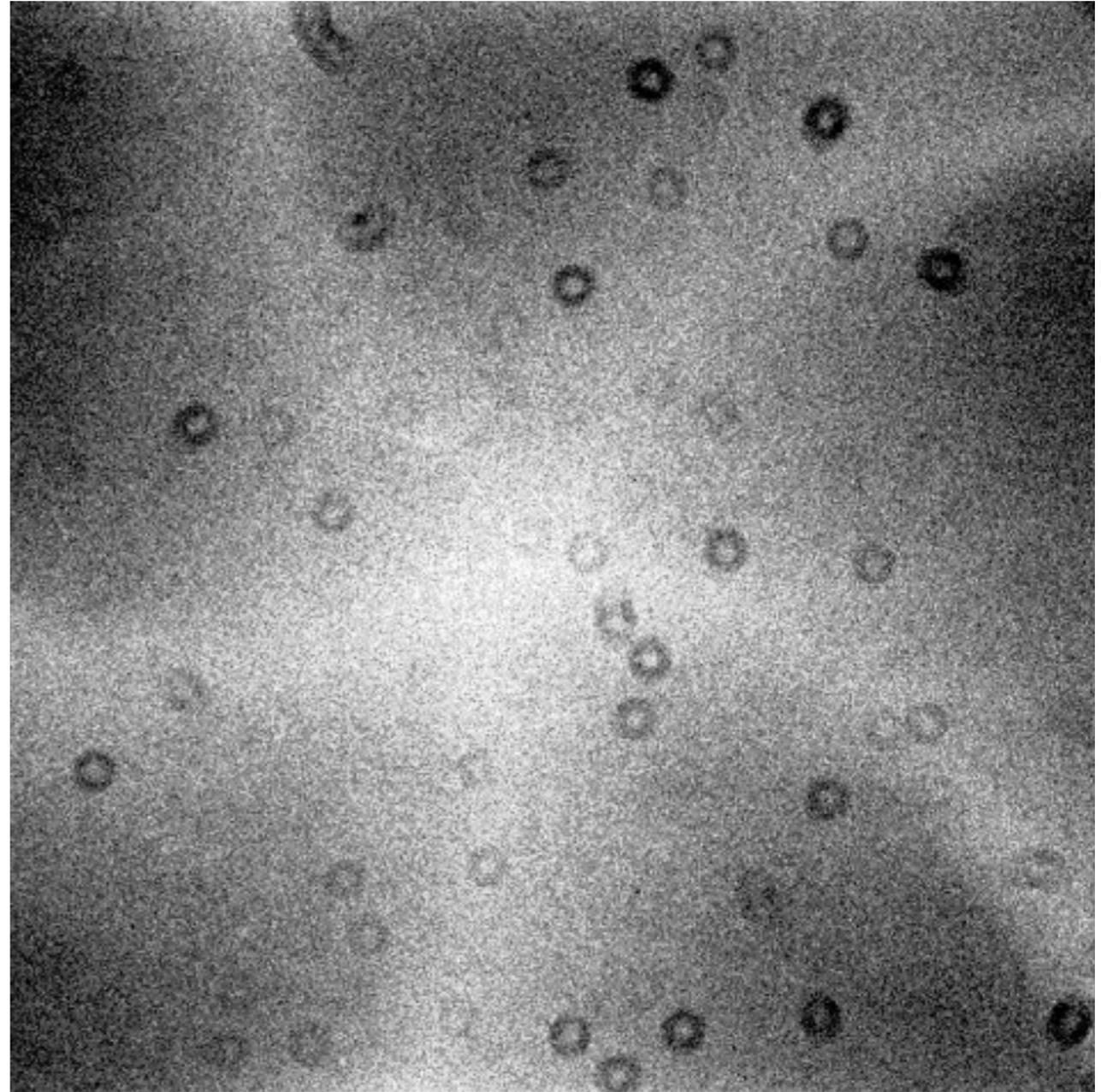
Traces sur le capteur

exemples de flat

# Comment faire un bon flat field...?

---

- Le flat ne doit pas ajouter trop de bruit: très haut signal-sur-bruit nécessaire ( $\sim 2/3$  de la dynamique du capteur)
- Le temps de pose ne doit pas être trop court ( $> \sim 10s$ ) pour éviter des effets d'obturateur
- La source du flat doit être uniforme (pas d'étoiles, pas d'ombres ou structures dans l'image)
- conserver la même configuration instrumentale (filtres, orientation des optiques // détecteur, focalisation, etc...)
- Ne doit pas être fait trop longtemps avant ou après l'observation
- Faire plusieurs mesures ( $> 5$ ) pour augmenter le signal sur bruit



$T_{exp} = 0.1s$

# Comment faire un bon flat field...?

---

## Sur un support

(boite-à-flat, sur la coupole, ...)

- difficile d'être uniforme
- angle d'incidence différent
- couleur maîtrisable mais attention au profil spectral des lampes
- maîtrise du flux incident

les meilleurs flats  
sont fait sur le ciel

(CCD monochrome)

## Sur le ciel

- non blanche (ok si filtres)
- assez uniforme + angle d'incidence parfait
- contraintes temporelles
- le ciel évolue d'un flat à l'autre
- nécessite un ciel uniforme (pas de nuages ou complètement nuageux)

Filtre	minutes après coucher du Soleil
U	5
B	23
V	24
R	25
I	26

# Corriger les images (1)

---

- Faire des séries pour chaque calibration (offset, dark, flat) pour éviter les effets ponctuels (e.g. cosmic).
- Prendre la médiane de chaque série (et non la moyenne)
- Le nombre de calibration par série n'a pas besoin d'être impair, sauf peut-être pour certains logiciels.

## Corriger les images (2)

---

$$\text{Image corrigée} = \frac{\text{Image brute } (T_{\text{exp}_i}, T_{\text{temp}_i}) - \text{bias} - \text{dark\_c } (T_{\text{exp}_i}, T_{\text{temp}_i})}{\text{Flat\_c}}$$

$$\text{dark\_c } (T_{\text{exp}_i}, T_{\text{temp}_i}) = (\text{dark } (T_{\text{exp}_d}, T_{\text{temp}_d}) - \text{bias}) * f_{\text{correction}}$$

$$\text{flat\_c} = \text{flat } (T_{\text{exp}_f}, T_{\text{temp}_f}) - \text{bias} - \text{dark\_c } (T_{\text{exp}_f}, T_{\text{temp}_f})$$

# Côté pratique

---

- Une bibliothèque de bias et dark pour différentes températures est extrêmement pratique ! (attention au vieillissement du capteur + électronique).
- Les flats sont à faire chaque nuit !

# Conclusions

---

- Toute acquisition d'une image doit être corrigée des différents sources de bruits liées à l'optique, au détecteur et à l'électronique.
- Soigner l'acquisition des dark, flat et offset pour obtenir de bonnes données astronomiques.
- Faire des bons flats est difficile, l'entraînement est primordiale.
- Faire une bibliothèque de darks + offset prend du temps, mais est très pratique. A suivre de temps en temps.