

TP d'observation M1
Observations télescopiques
avec détecteurs CCD

Stéphane Erard

Bibliographie

Howell S. B. (2000) Handbook of CCD astronomy (Cambridge)

Martinez P. et Klotz A. (1994) Le guide pratique de l'astronomie CCD (Adagio)

Léna Méthodes physiques de l'observation (CNRS-Interéditions, 3e édition)

Glass I.S. (1999) Handbook of infrared astronomy (Cambridge)

Chromey, F.R. (2016) To measure the sky (Cambridge), 2^e édition)

Fenêtres sur l'univers (et autres)

<http://media4.obspm.fr/public/FSU/>

+ <http://ufe.obspm.fr/Ressources-multimedia->

Cours en ligne de l'Ecole doctorale d'Astronomie d'IdF

<http://media4.obspm.fr/>

+ **Cours M1** (module instrumentation)

Applets tutorielles et docs (fabricants)

<http://learn.hamamatsu.com/tutorials>

=> <http://www.hamamatsu.com/us/en/technology/innovation/index.html>

<https://lot-qd.de/en/products/imaging/>

Documentation du cours:

<http://ufe.obspm.fr/article168.html>

Images

Origine des images utilisées :

<http://www.astrosurf.com/cidadao/>
+ autres sites astrosurf
http://www.cis.rit.edu/~ejipci/Reports/mcc_DIP_workshop.pdf
http://astrophoto.fr/obstruction_fr.html
<http://users.polytech.unice.fr/~leroux/>
doc LHIRES: <https://www.shelyak.com/produit/lhires-iii/>
Spectro: <http://www.astrosurf.com/buil/us/spe2/hresol4.htm>
+ Vos cours instrumentation / formation d'images

Visible :

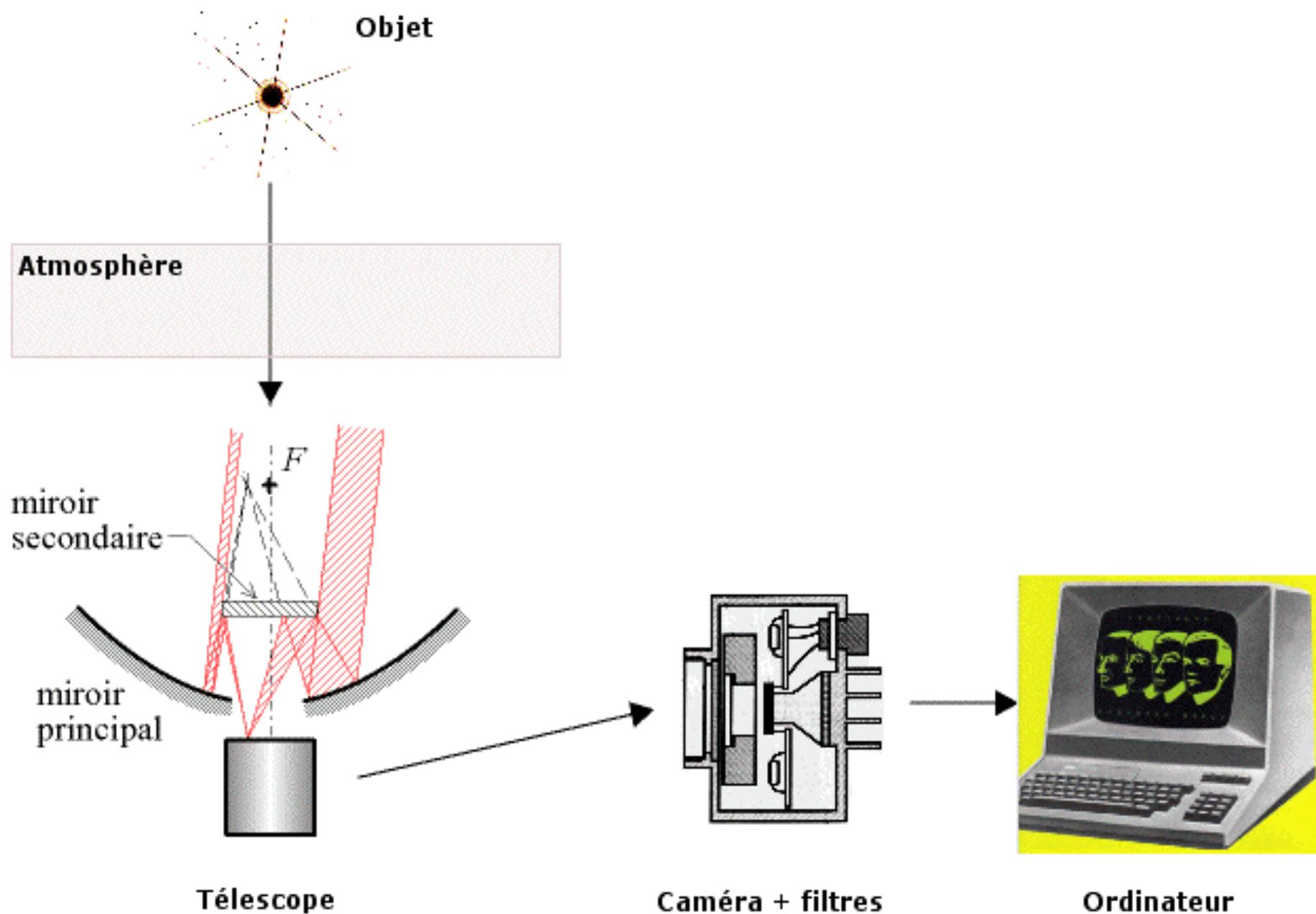
T1m / Meudon
T80 / OHP
T1m & TBL / OMP
AMIE / Smart-1, etc...

Infrarouge :

NACO / VLT
SofI / NTT
TBL / OMP
VIRTIS / Rosetta

<http://ufe.obspm.fr/Master/Master-Premiere-annee/Organisation-des-enseignements/Option-IMA/>

Chaîne d'acquisition en imagerie astronomique

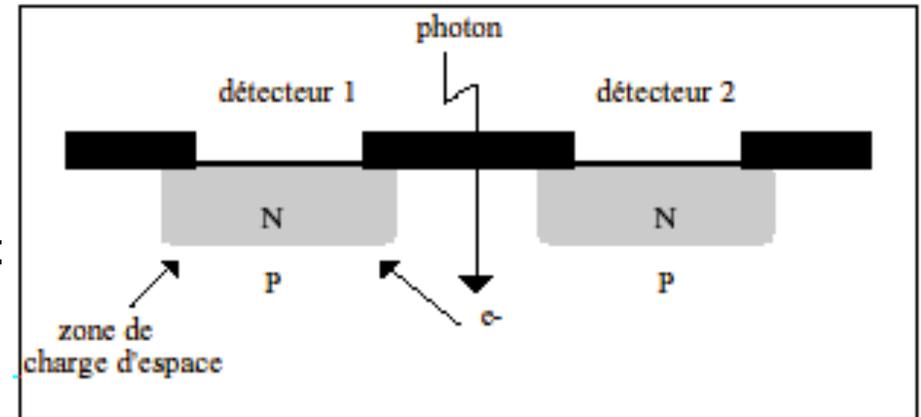


Détecteurs UV-Vis-NIR

Systemes modernes

- **Détecteurs numériques photosensibles**
(photodiodes semiconductrices)

Les charges électriques s'accumulent dans un photosite, en fonction de l'éclairement reçu



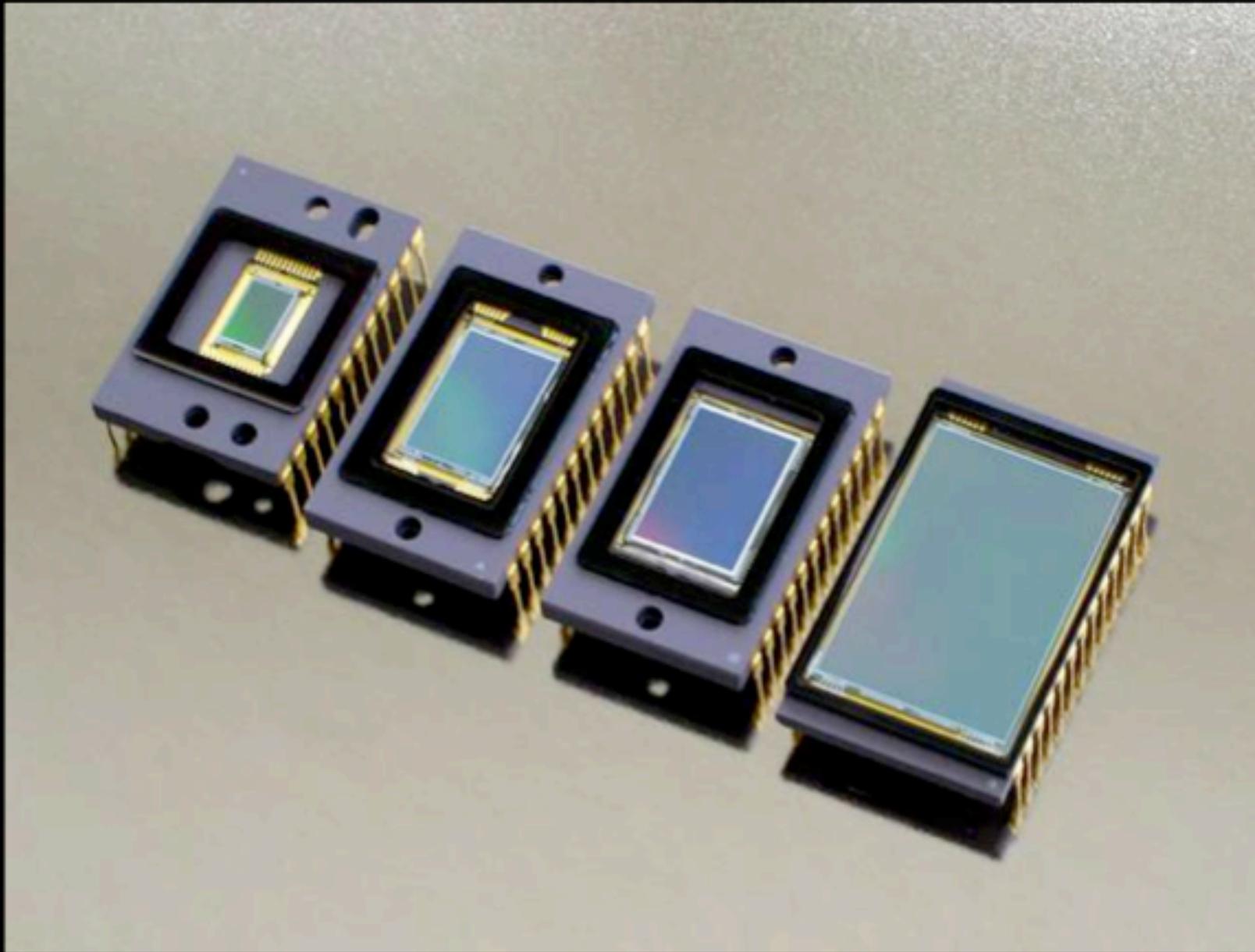
- **Matrices de détecteurs, livrées avec électronique de lecture et de contrôle**

Taille = 256 x 256 à 2048 x 2048 (jusque 10000 x 10000 en 2020)

⇒ **CCD ou CMOS en visible, systèmes équivalents (HgCdTe) en IR**
(systèmes de lecture différents)

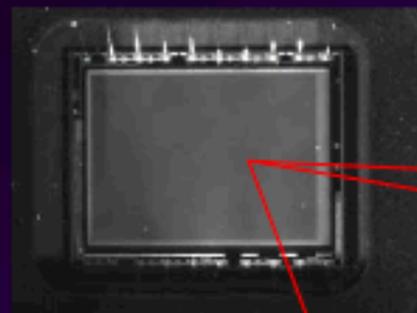
Propriétés

- **Très efficaces** (50-90 % de photons détectés, ~5 % pour les plaques photographiques)
- **Lecture rapide**
- **Large domaine spectral** (UV → 1 μm pour les CCD, matrices IR 1 → 6 μm)
- **Très bonne linéarité** (nb de charges \propto nb de photons incidents)



Kodak Full Frame CCDs: KAF-0402ME, KAF-1603ME, KAF-3200ME and KAF-6303E

Magnified View of a CCD Array



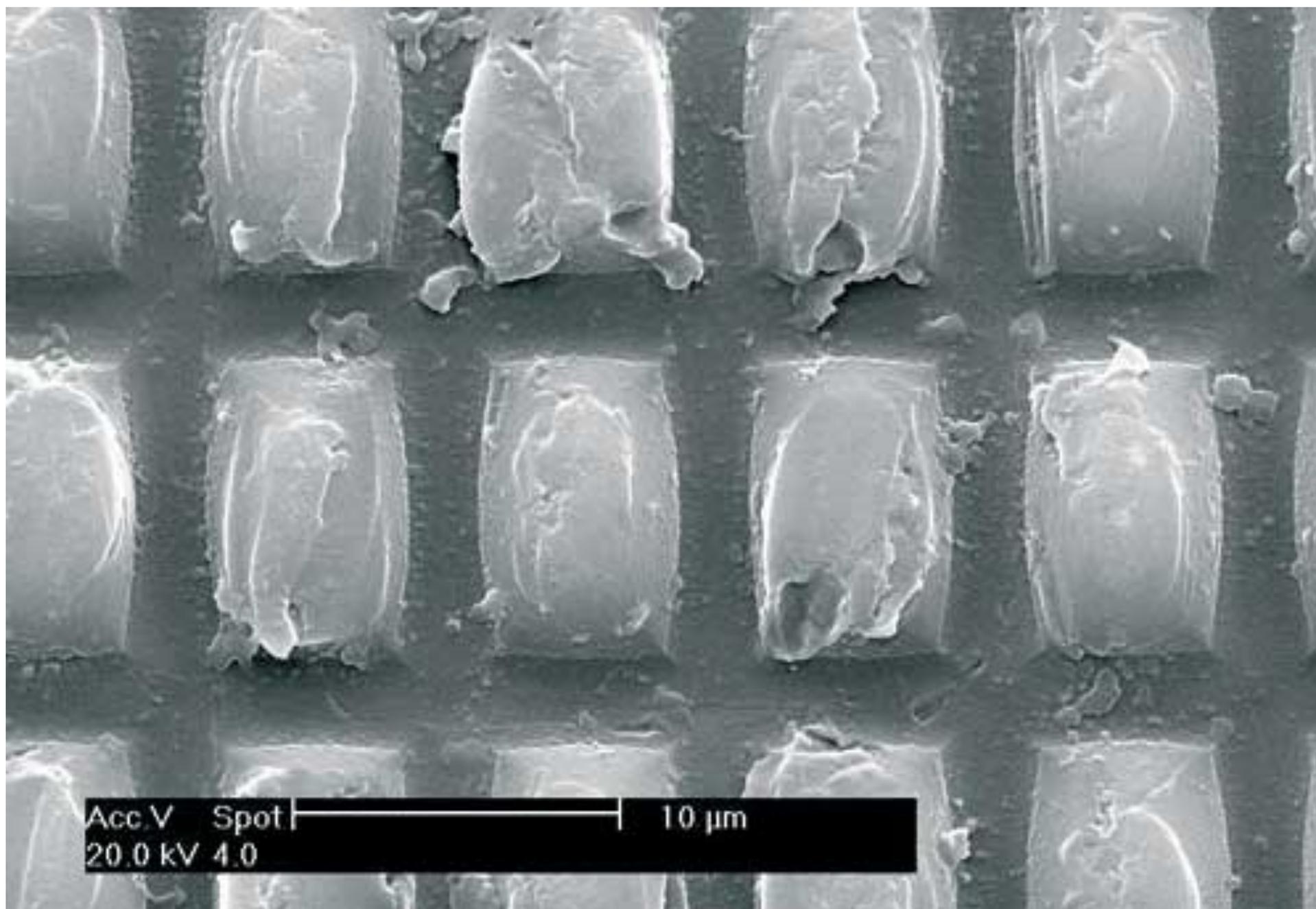
CCD

Individual picture element

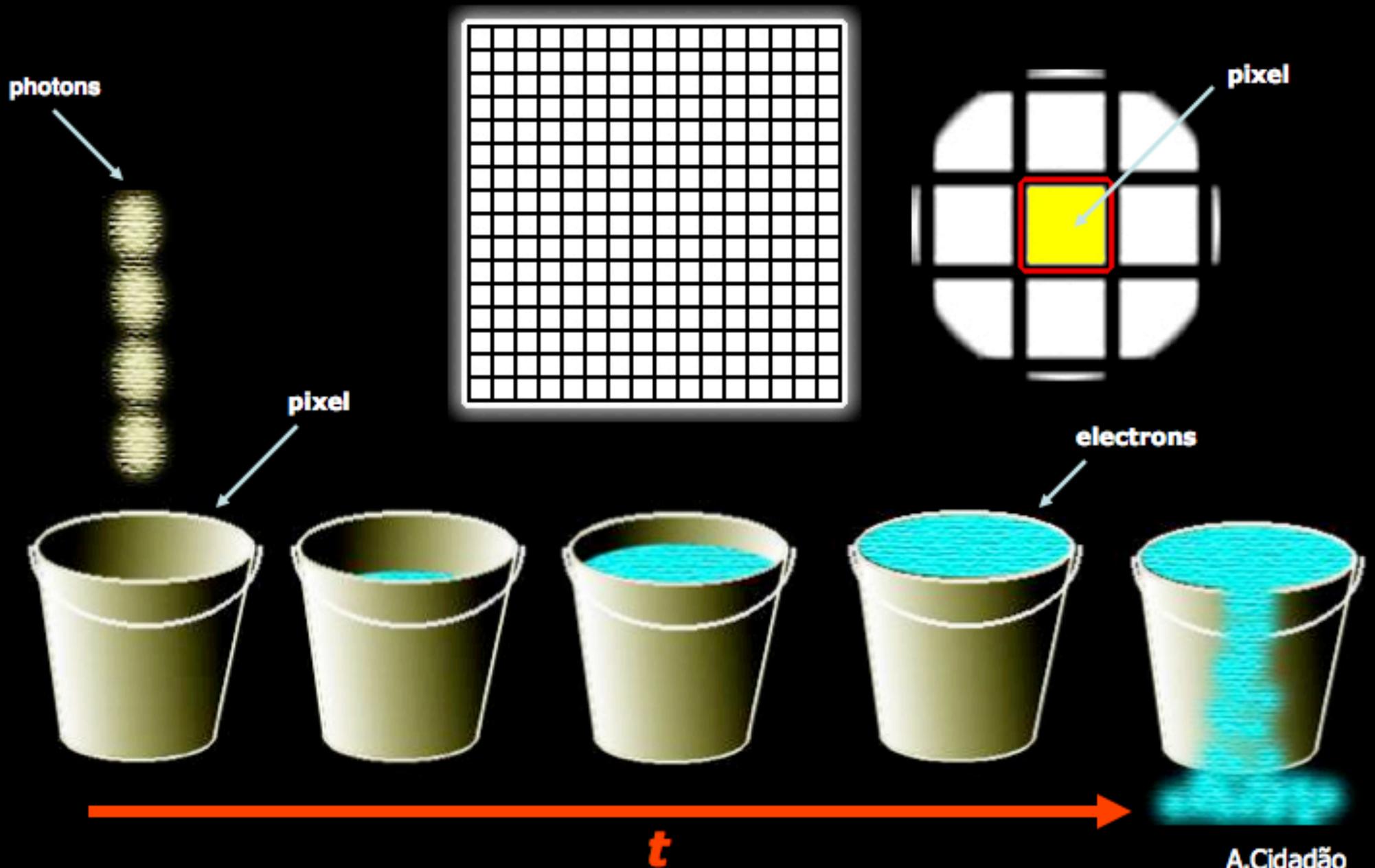


Close-up of a CCD Imaging Array

Photosites

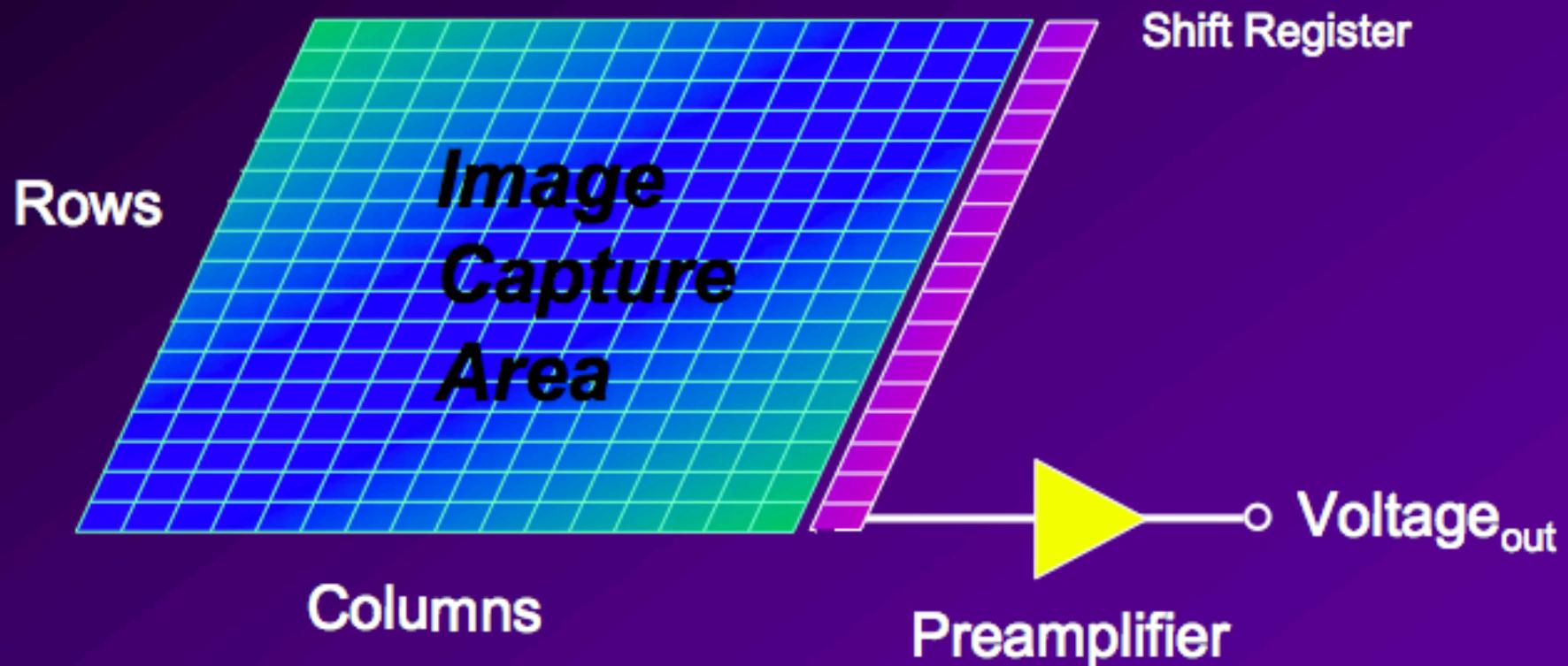


What is a "CCD" ?



Basic structure of CCD

Divided into small elements called pixels
(*picture elements*).



Lecture des CCD

Lecture

Electronique de contrôle => décalage en ligne, puis en colonne

On mesure la tension sur la broche de sortie

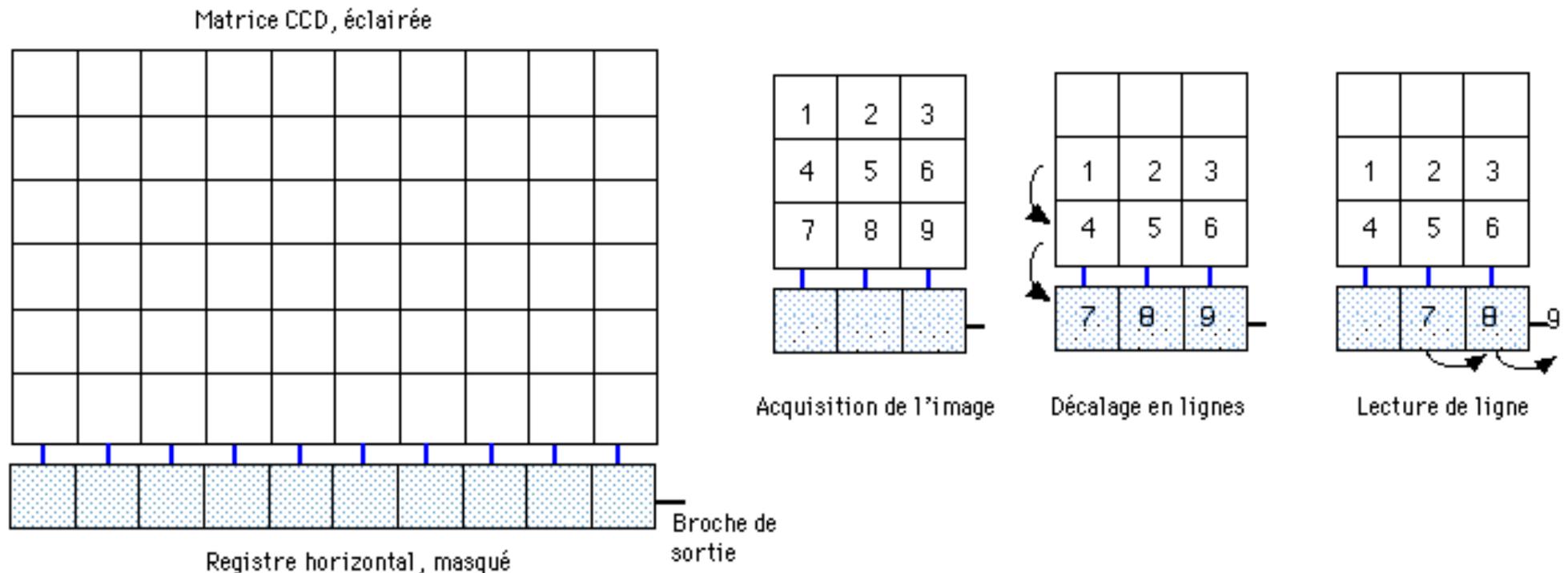
Les charges sont évacuées et la matrice réinitialisée dans le même temps

Temps de lecture typique ~ 1 s, c'est long

Modes particuliers

Fenêtrage

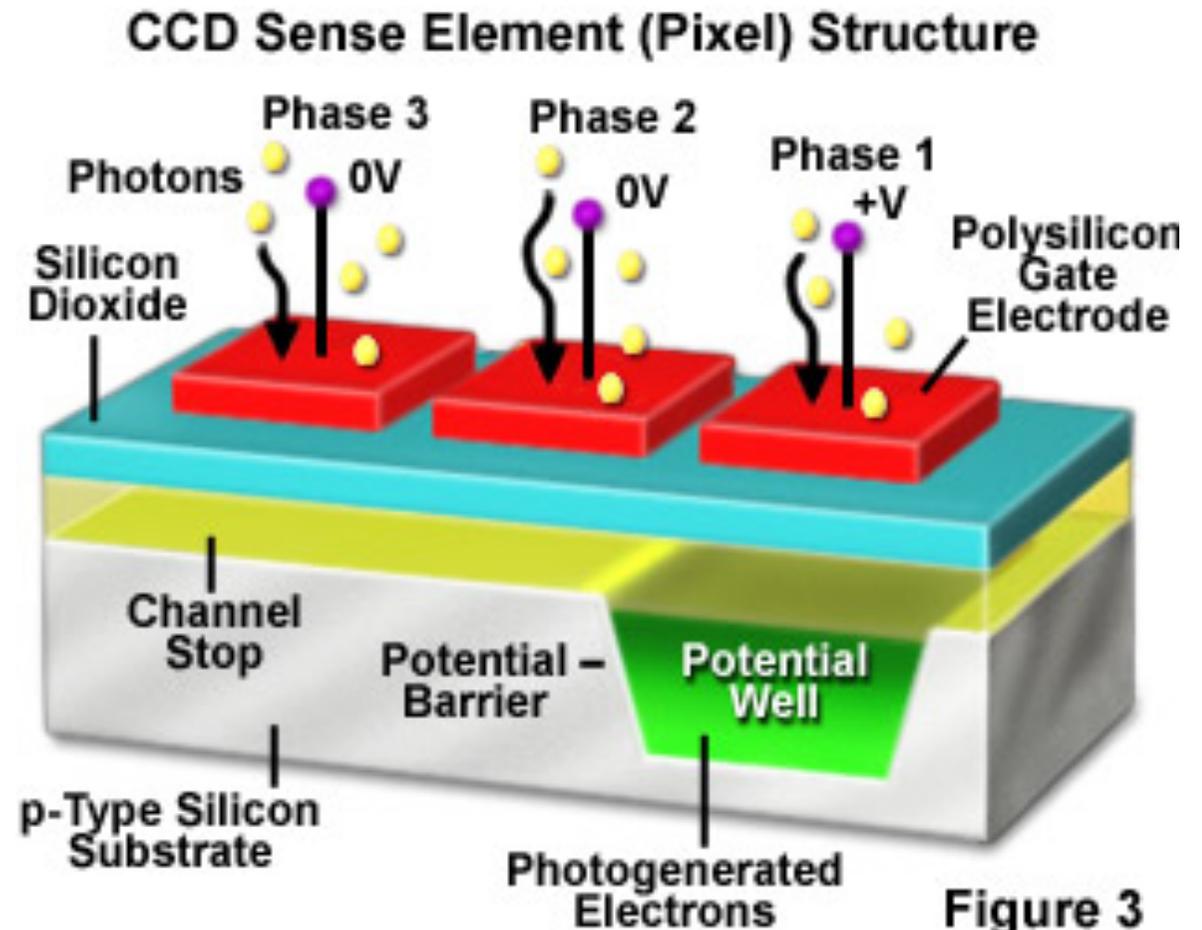
Binning (lecture simultanée de plusieurs pixels, avant conversion numérique)



Résumé CCD

Détection

Les photons incidents génèrent des électrons stockés localement durant la pose



Résumé CCD

Lecture

On décale les charges en modifiant les potentiels sous les lignes, de manière synchronisée

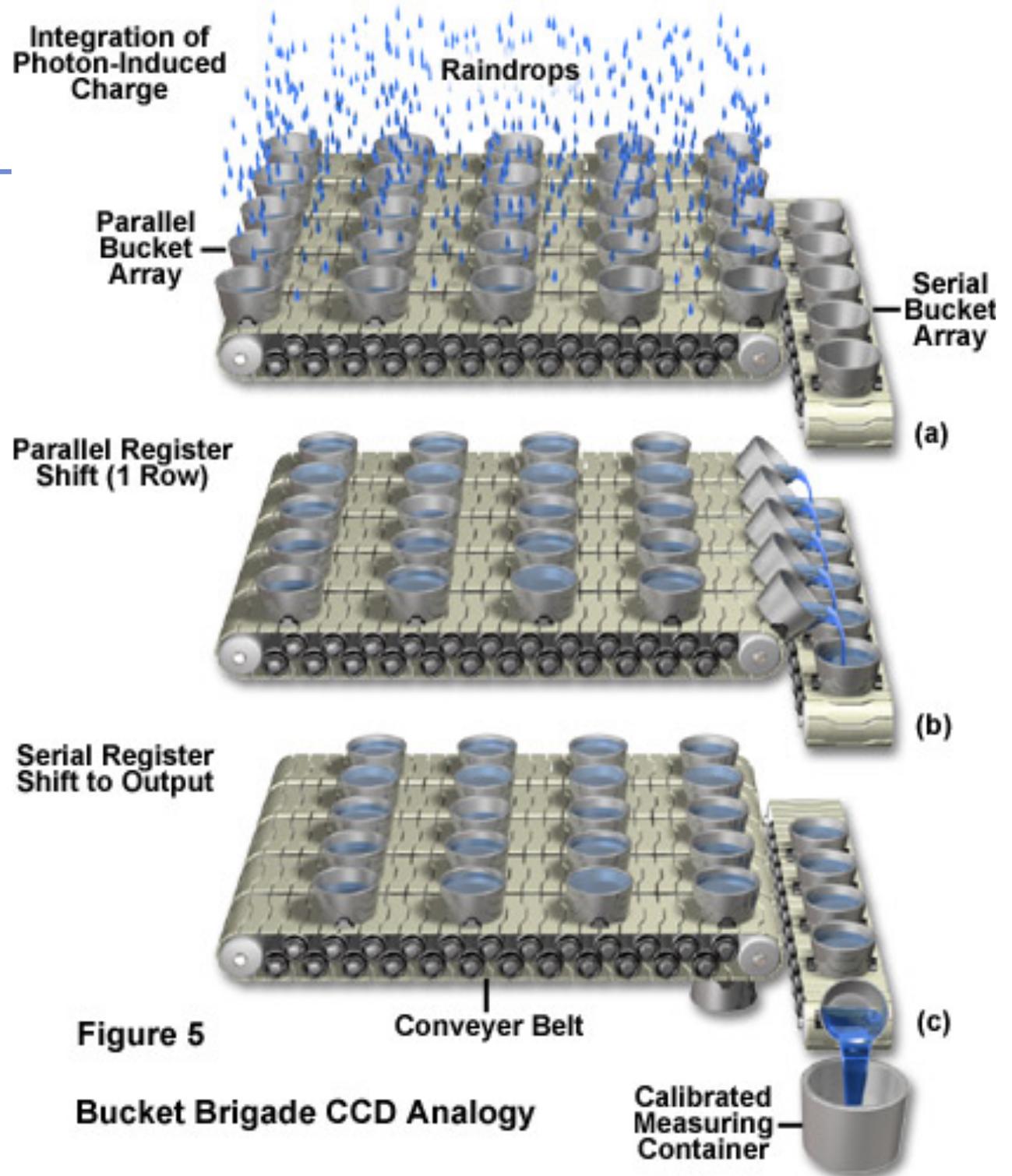
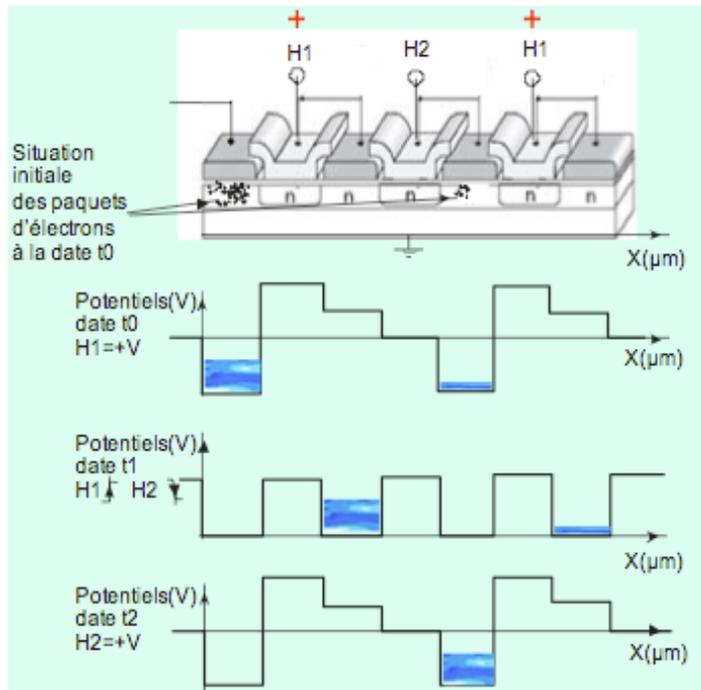


Figure 5

Bucket Brigade CCD Analogy

Calibrated Measuring Container

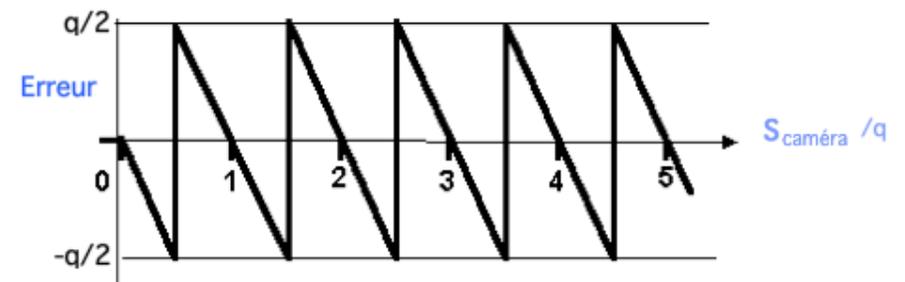
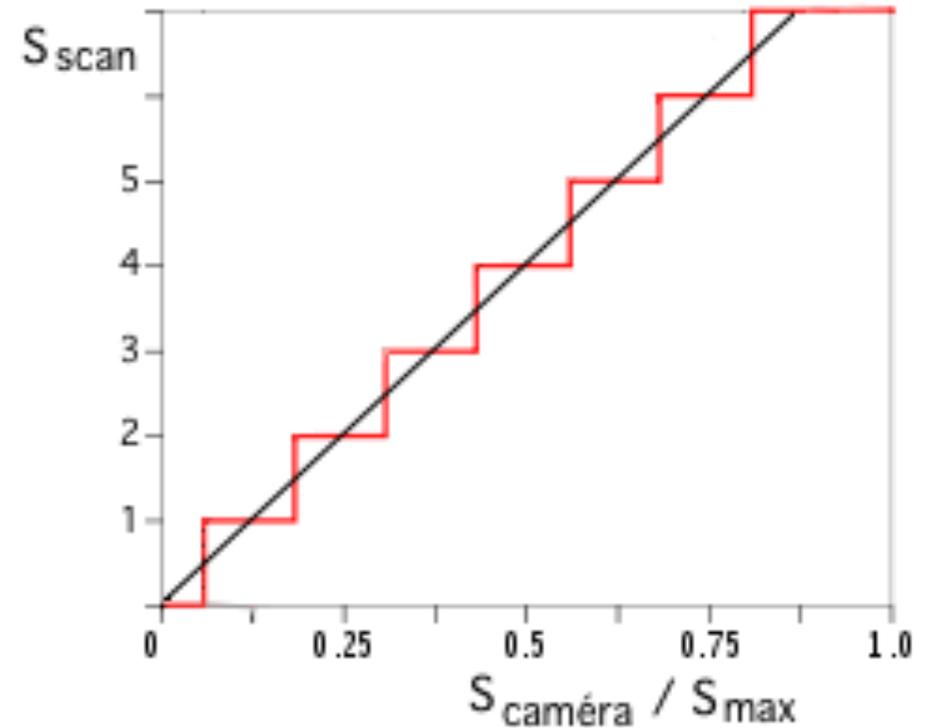
Résumé CCD

Numérisation

Le courant de sortie est amplifié et mesuré, puis numérisé par un convertisseur.

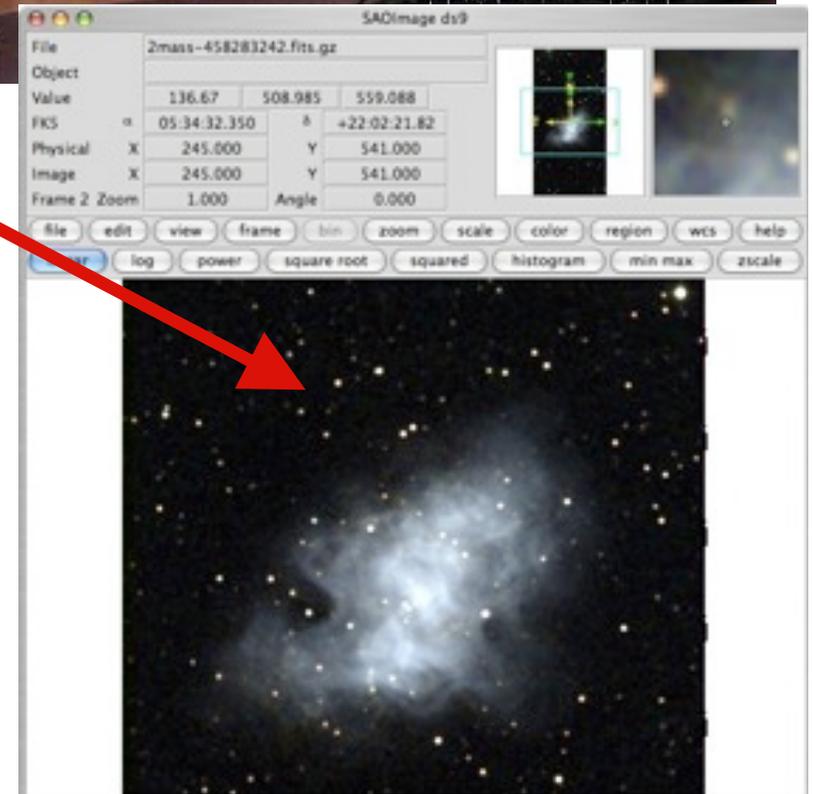
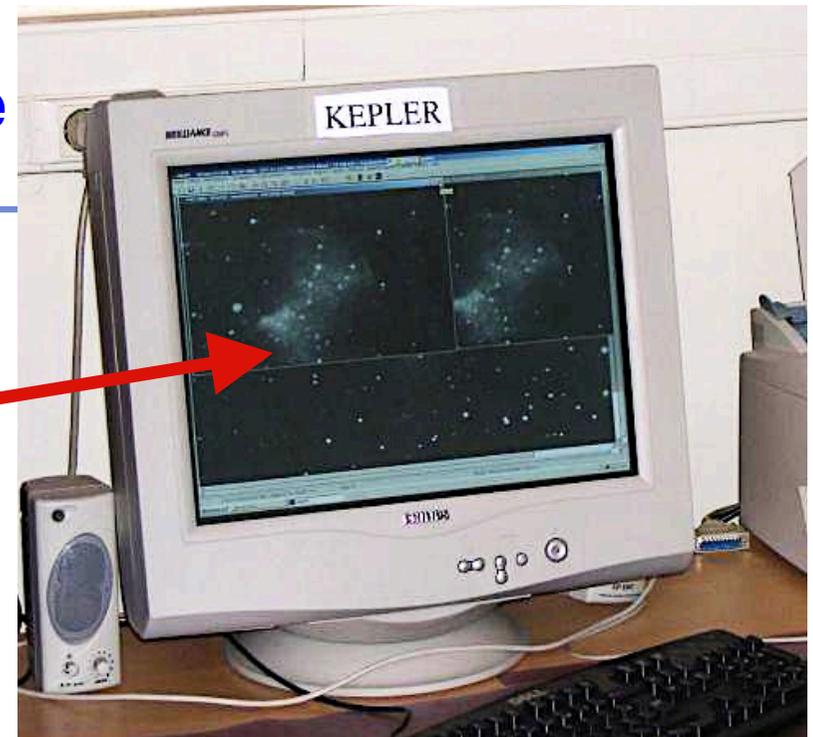
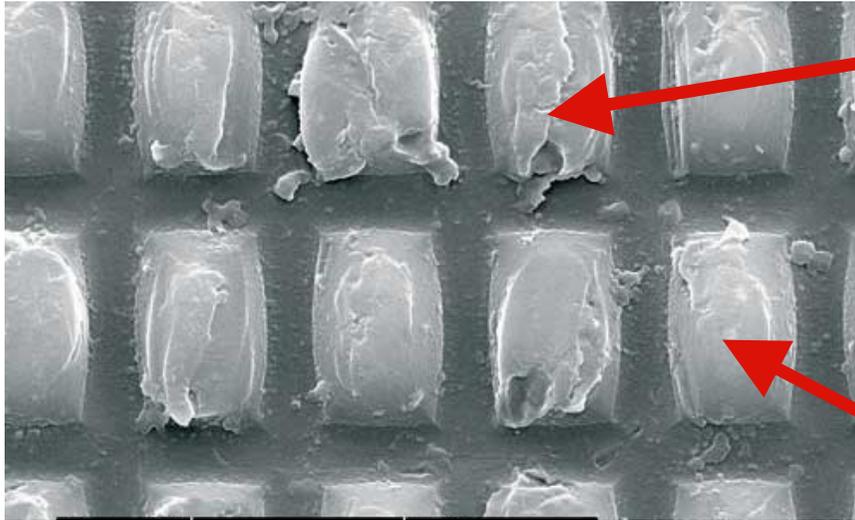
On travaille couramment en 8-16 bits

Avec une caméra astro, le signal numérisé est transmis à un ordinateur et stocké sous forme de fichier (FITS en général)



Chaîne d'acquisition en astronomie

Correspondance **pixel détecteur** ↔ **pixel écran**



Faire autrement implique rééchantillonnage et dégradation
(mais peut être nécessaire pour une vue complète)

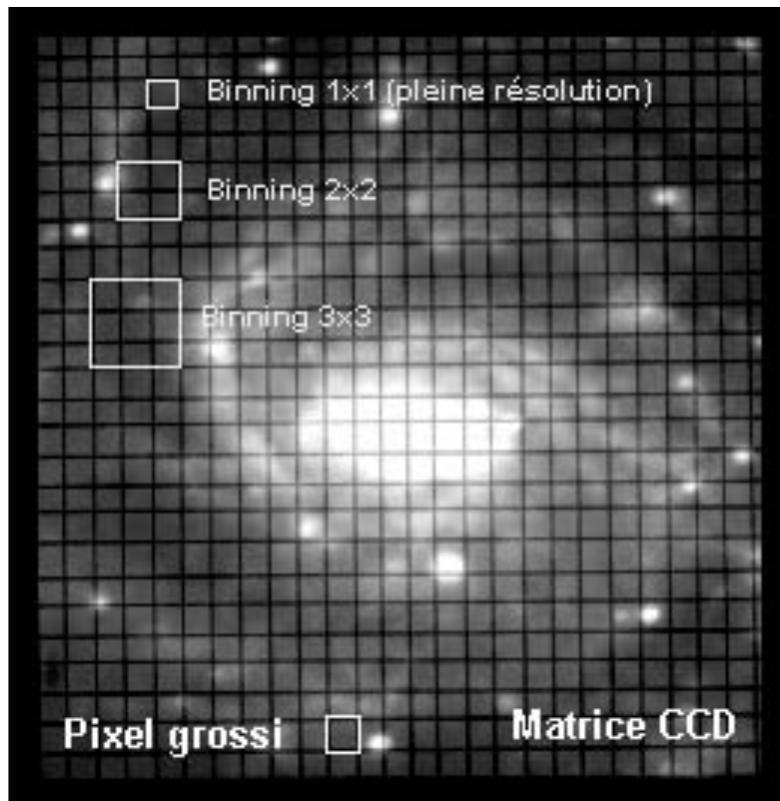
Outils de base pour affichage/analyse FITS :

- DS9/SAOimage
- Aladin
- ATV sous IDL
- astropy sous python — etc...

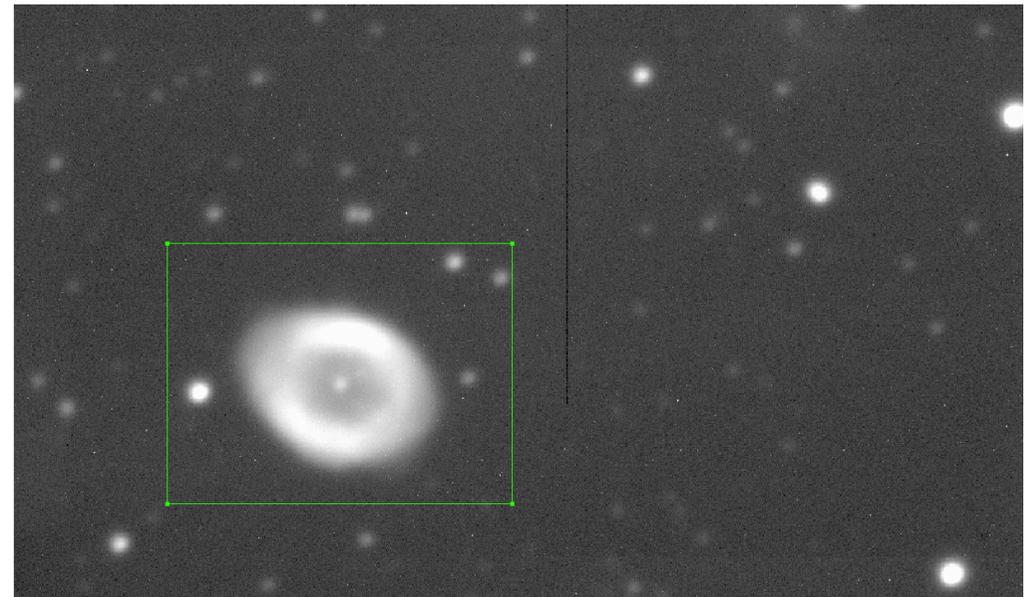
Résumé CCD

Modes de lecture particuliers

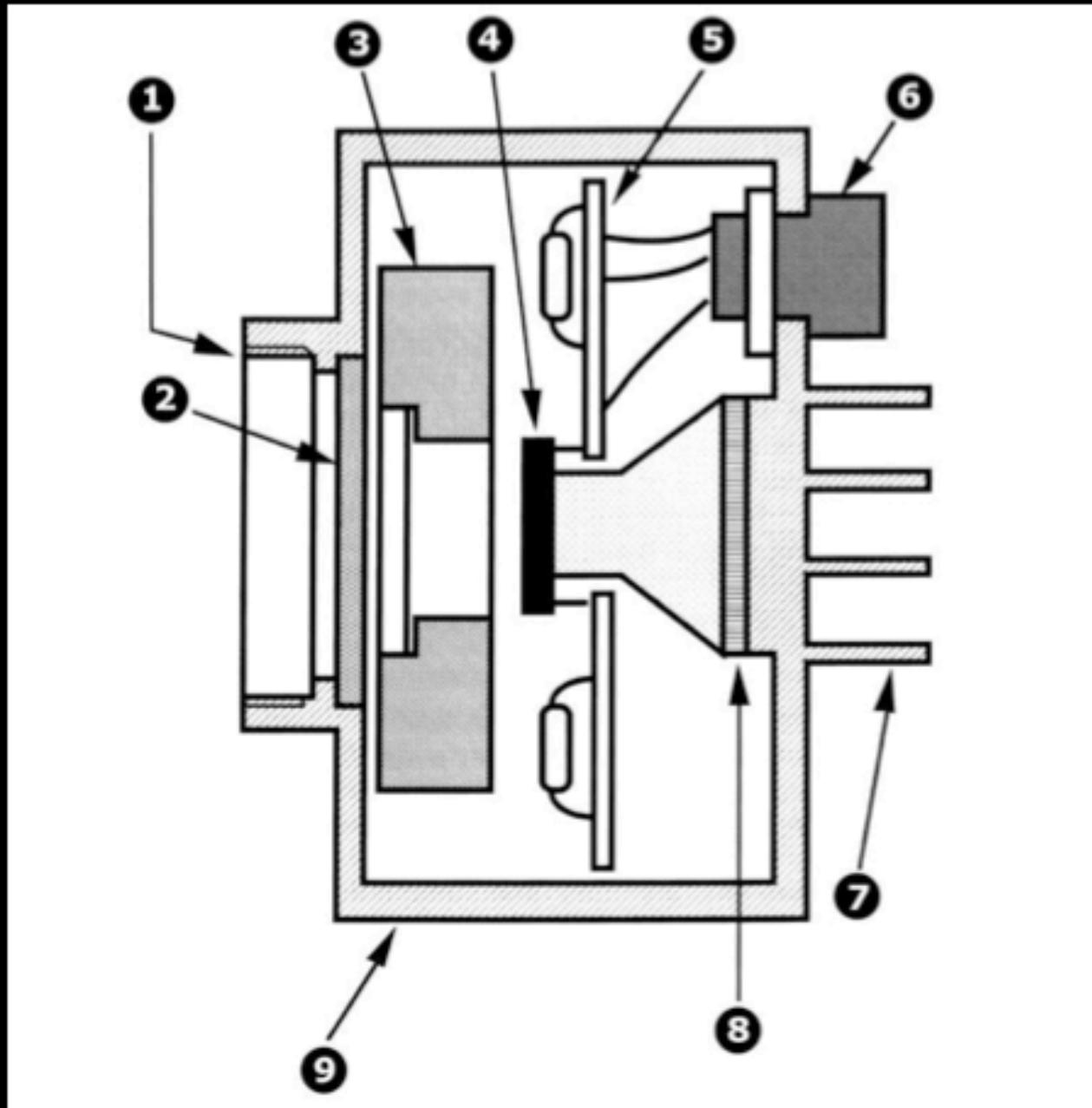
Binning : lecture simultanée de plusieurs pixels, avant conversion numérique – réduit le bruit de lecture



Fenêtrage : lecture plus rapide, par ex pour phénomènes évolutifs (occultations...)



Caméra

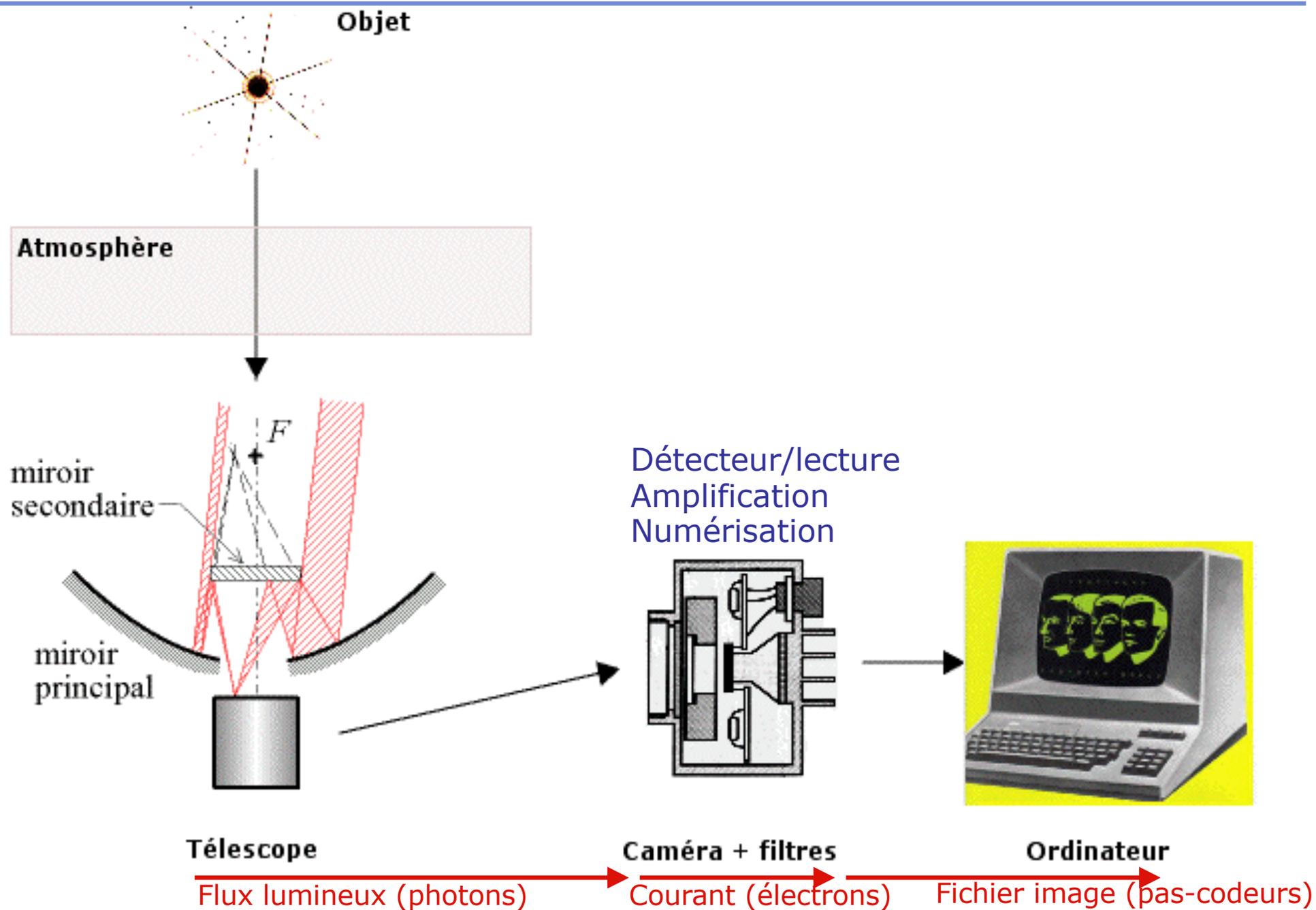


Anatomy of a CCD camera: 1- Adapter (M42); 2- Optical window; 3- Mechanical shutter; 4- CCD detector; 5- Amplifier; 6- Power connection; 7- Dissipator; 8- Peltier (cooling); 9- Housing.

SBIG's New STX Series



Chaîne d'acquisition en imagerie astronomique



Caractéristiques électroniques

Signal de sortie

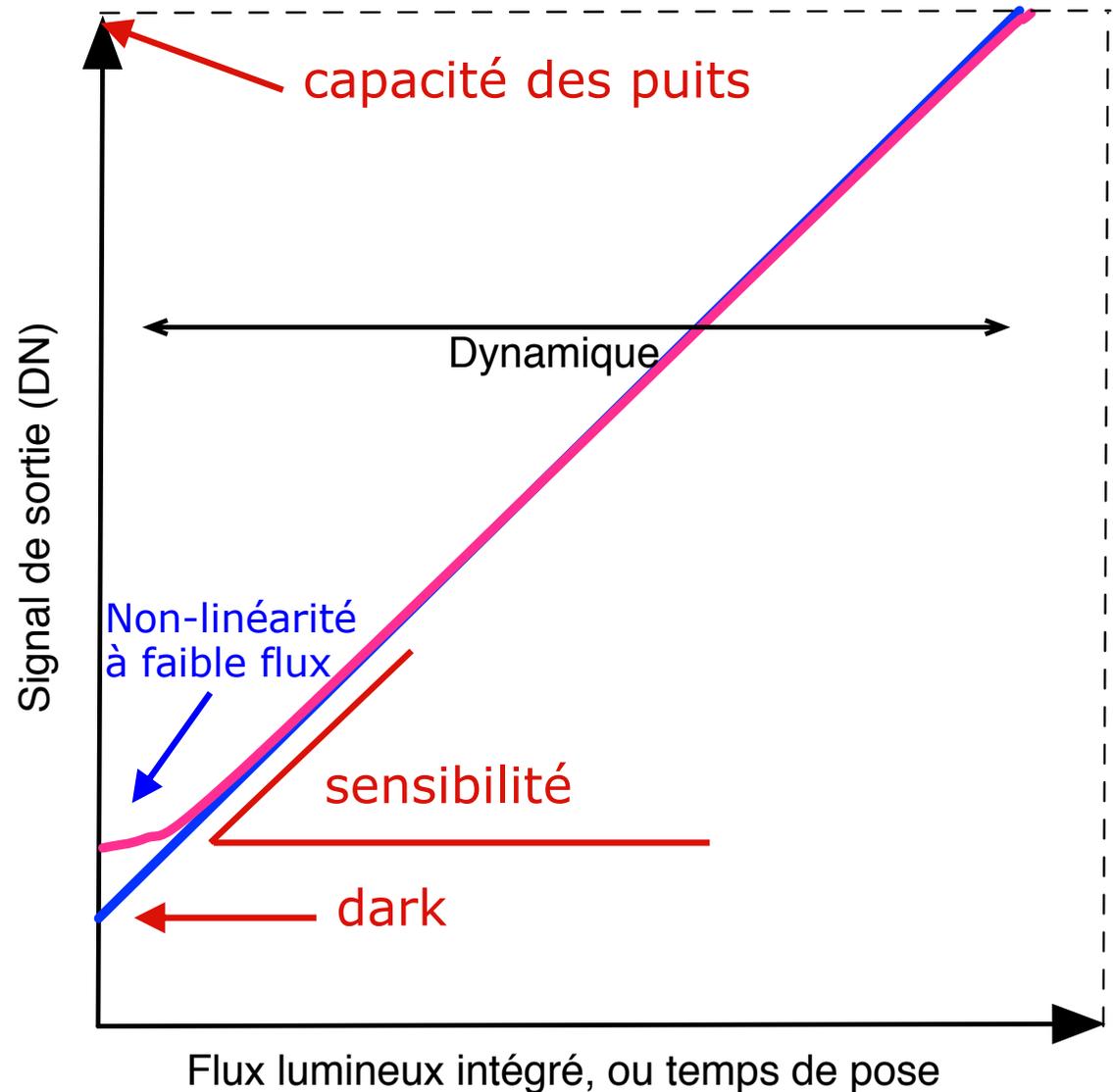
~ proportionnel au flux lumineux incident (dans un certain domaine de valeurs)

Pour chaque pixel:

$$\text{Signal} = \text{flux} * \text{sensibilité} + \text{dark}$$

⇒ sensibilité et dark doivent être mesurés en même temps que le signal, puis corrigés

Permet des mesures quantitatives du signal (photométrie)



Caractéristiques électroniques

Capacité / saturation

La capacité des sites est finie ($\sim 20\,000$ à $350\,000$ e⁻/pixel)

=> au-delà, les charges accumulées débordent sur les sites voisins (blooming/smearing)



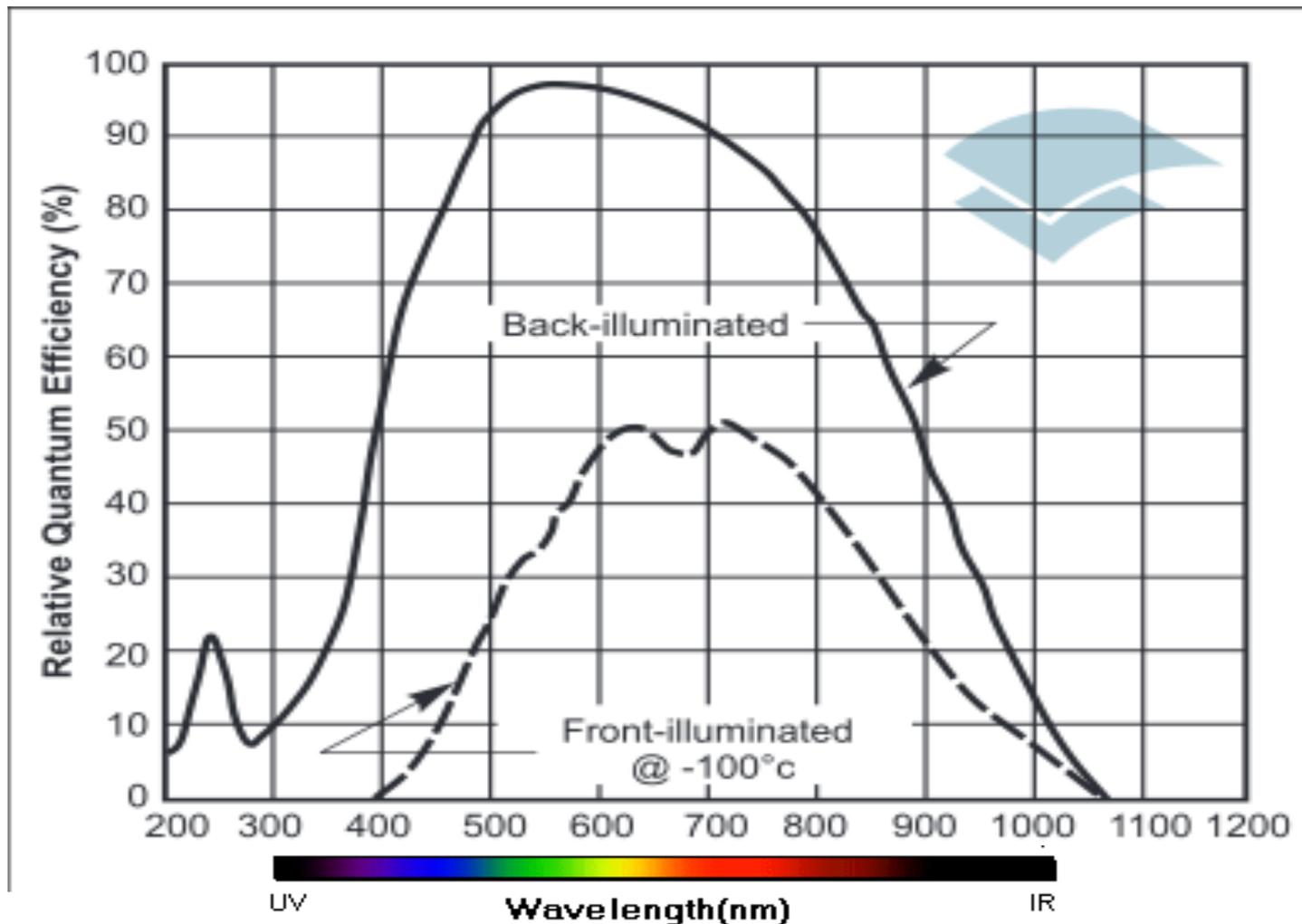
Caractéristiques électroniques

Sensibilité / détectivité

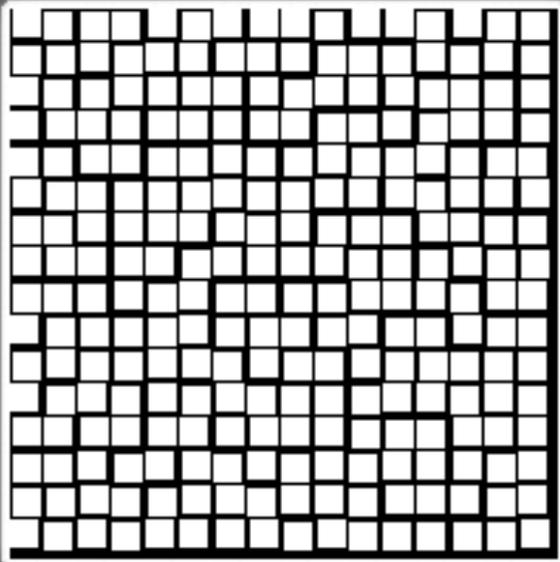
Rendement quantique équivalent (QE): nb d'électrons produits par photon incident

⇒ Fonction de la longueur d'onde $\sim 0.4\text{-}0.95 \mu\text{m}$ pour les CCD standard

On peut étendre le domaine spectral avec certaines configurations (amincissement...)

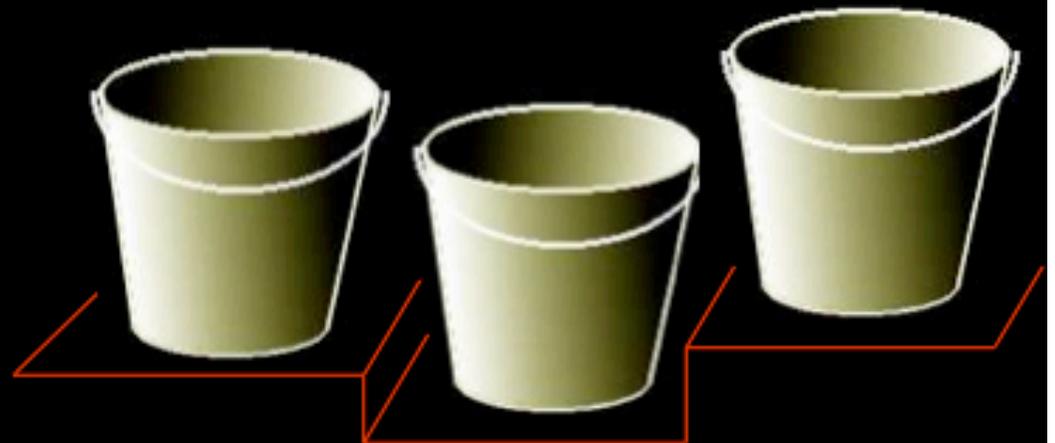


CCD Cameras - *Biais (offset)*

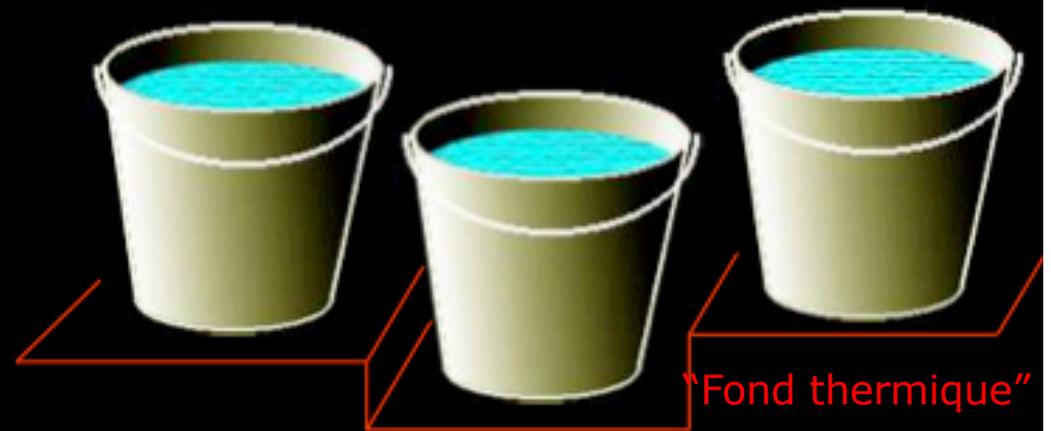
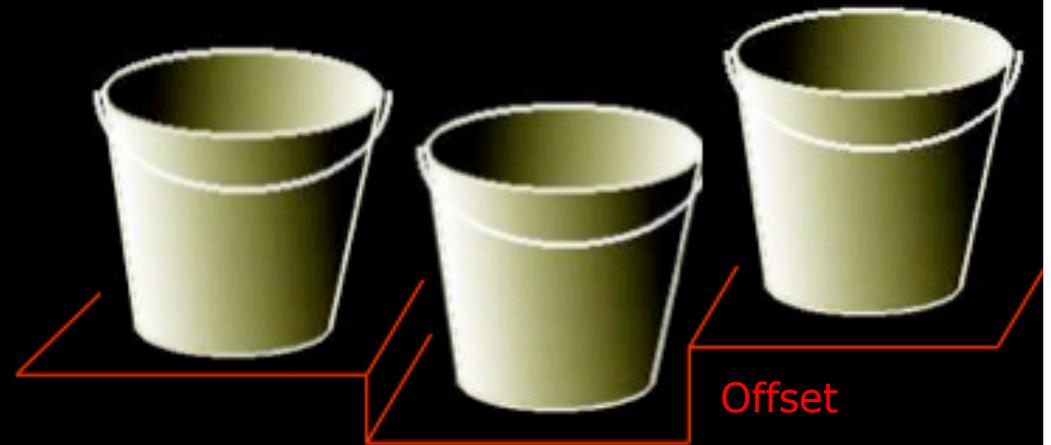
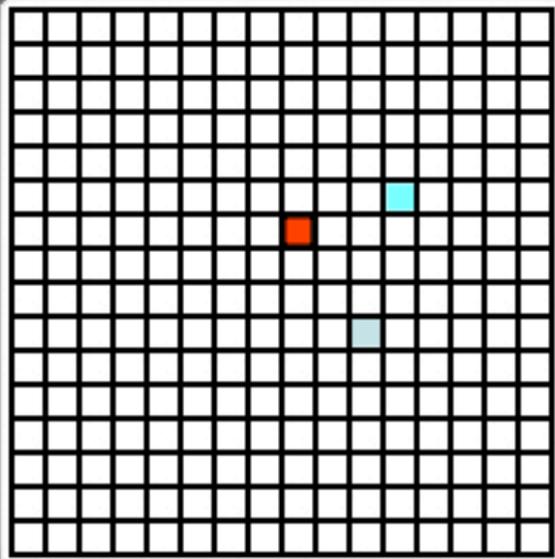


Pré-charge des pixels (polarisation),
fixe et reproductible

Forme des motifs plus ou moins réguliers,
souvent en colonne

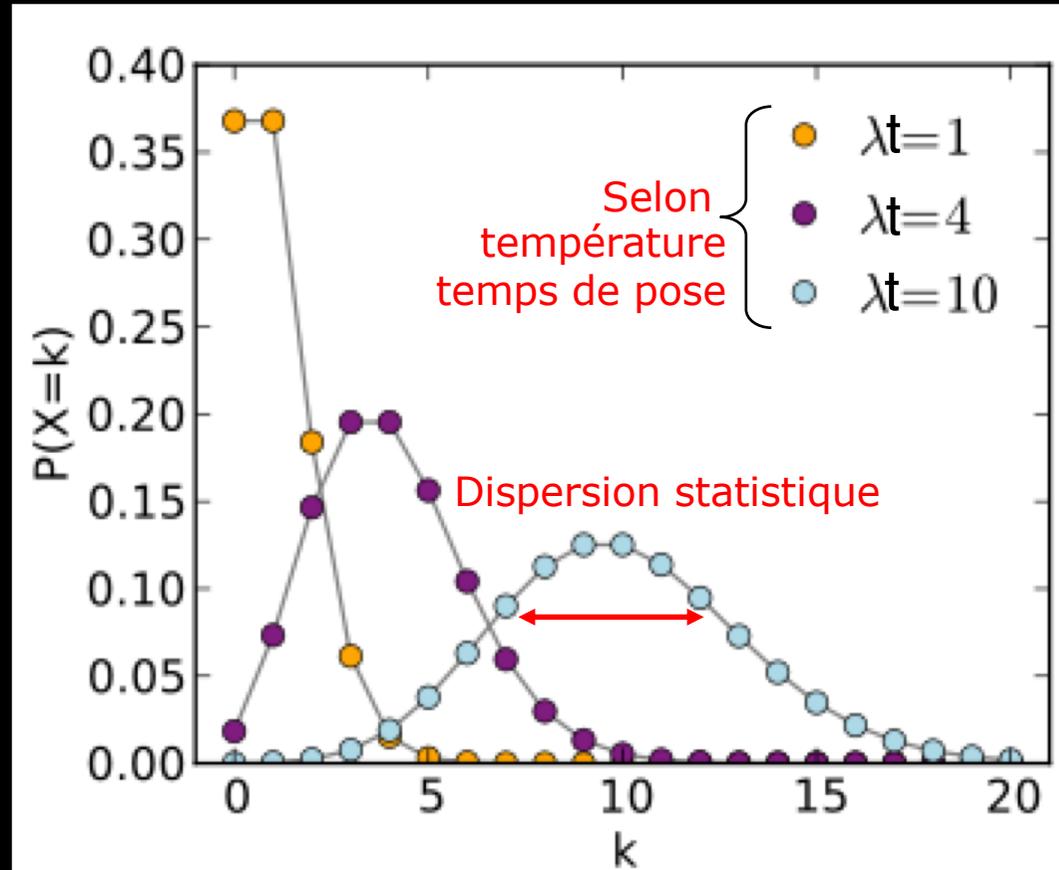
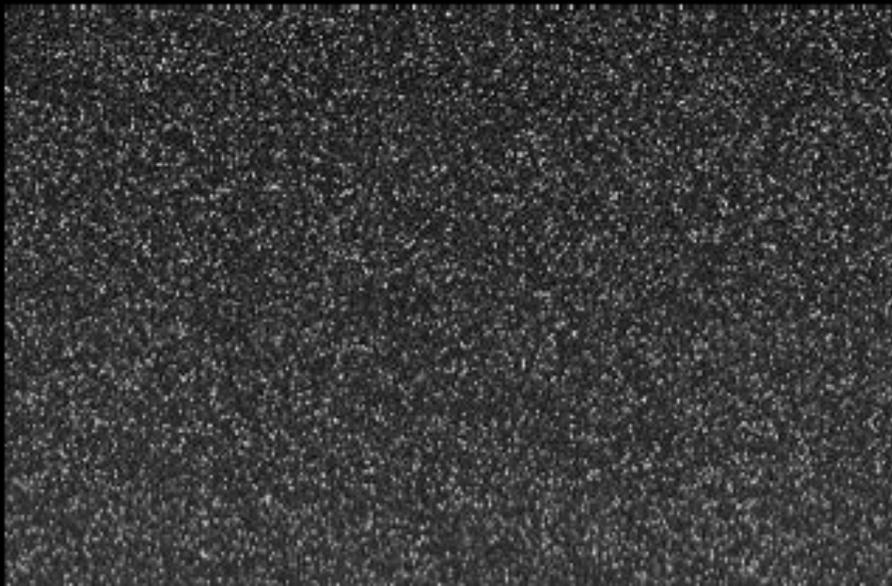
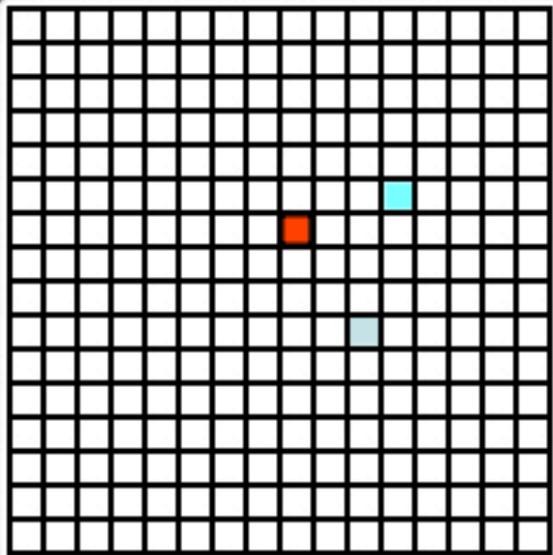


CCD Cameras - Courant d'obscurité (dark)



DARK FRAME = BIAS FRAME + THERMAL FRAME

CCD Cameras - Courant d'obscurité (dark)



Charges créées spontanément en l'absence de lumière
Pas nécessairement très grand devant l'offset

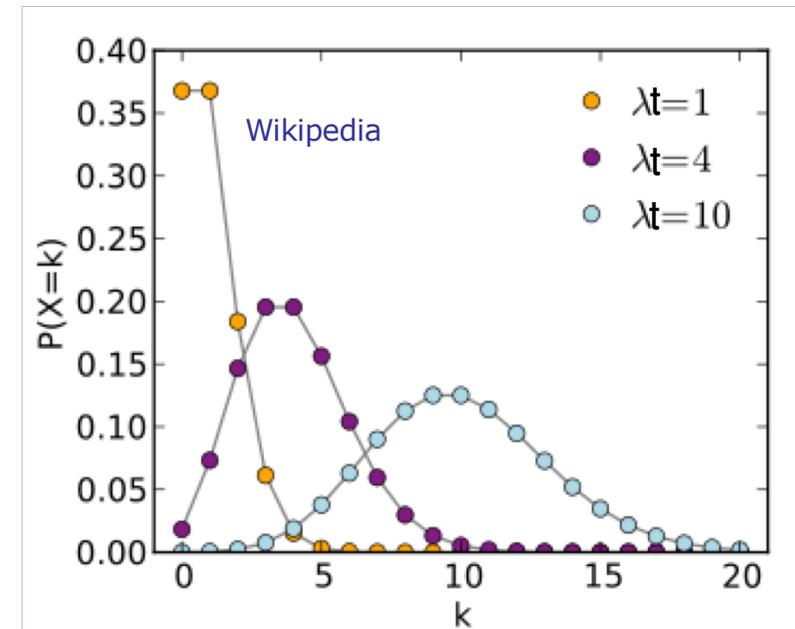
Suit une loi de Poisson

Intermède : loi de Poisson

Hypothèse: - événements aléatoires, indépendants
- fréquence des événements constante (λ)

Dans ce cas: émission de photon / création de charge thermique

Densité de probabilité pour avoir k événements dans le temps t : $P(k) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}$



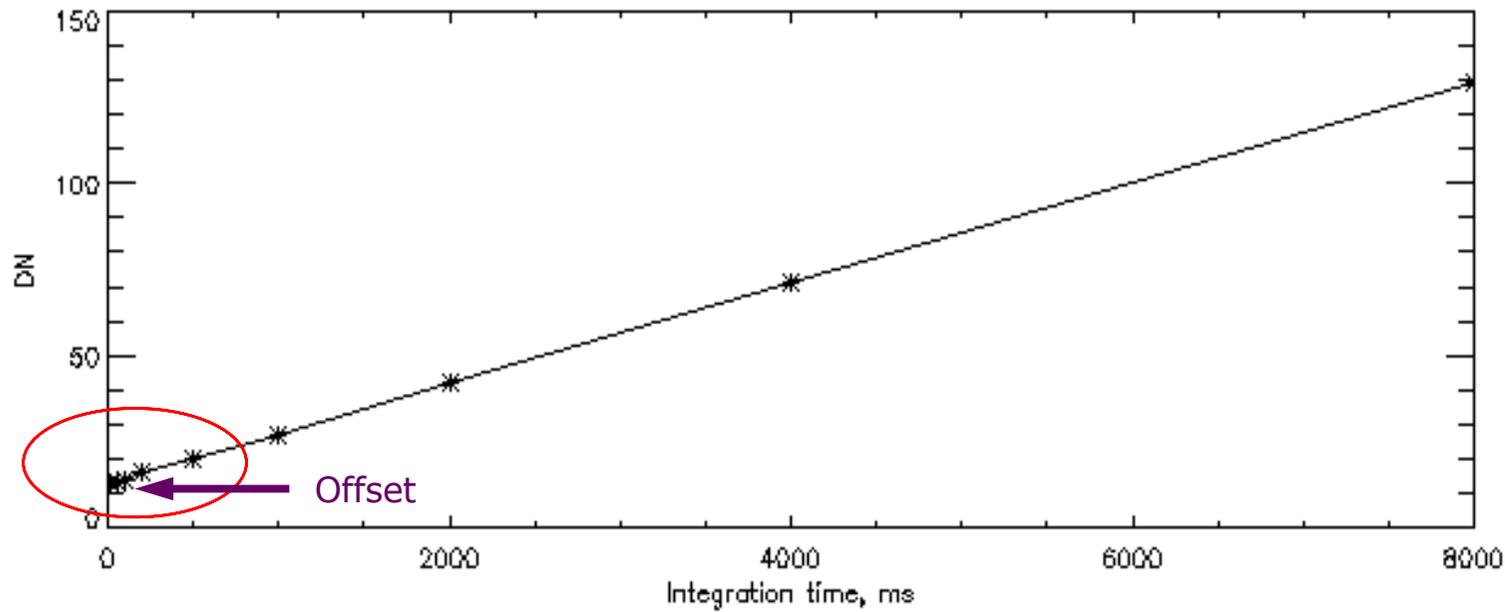
Tend vers une gaussienne pour λt grand

Avec $N = \lambda t$

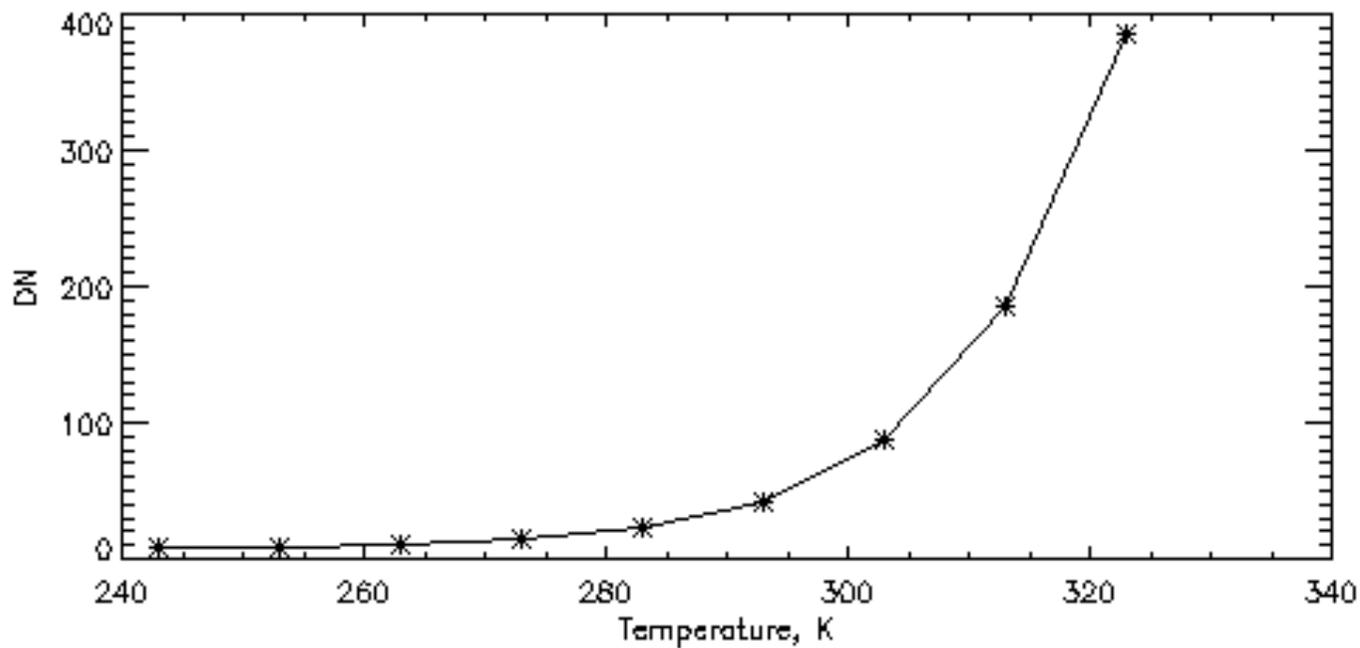
Moyenne = N (nb de photons reçus pendant le temps t) => Prédicible

Ecart-type: $\sigma = \sqrt{N}$ (variation moyenne autour de cette valeur, entre mesures successives)
=> Aléatoire : c'est du bruit

Darks : variations



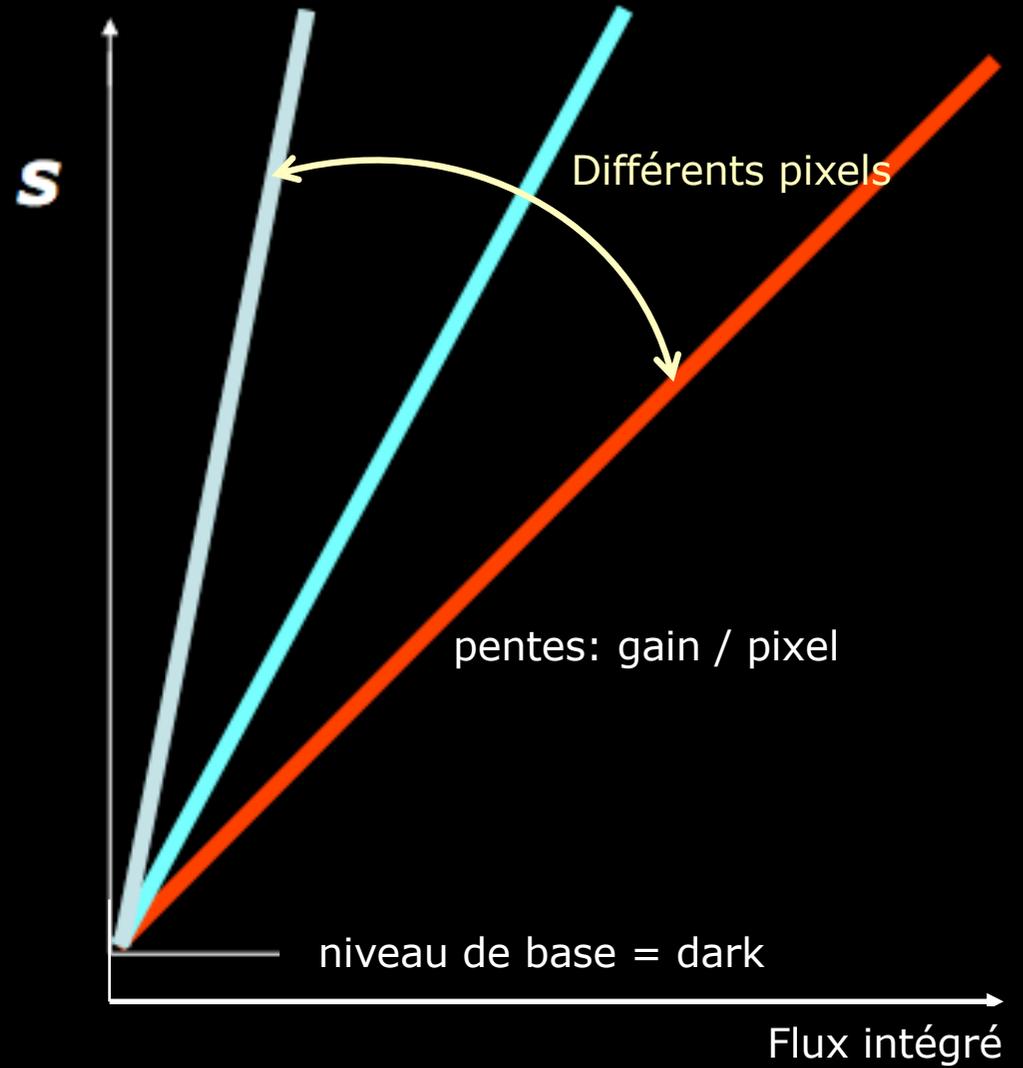
**~ linéaires avec
le temps de pose**
(tant qu'on ne sature pas)



Violentes avec la T
(Boltzmann)

=> On veut refroidir le CCD

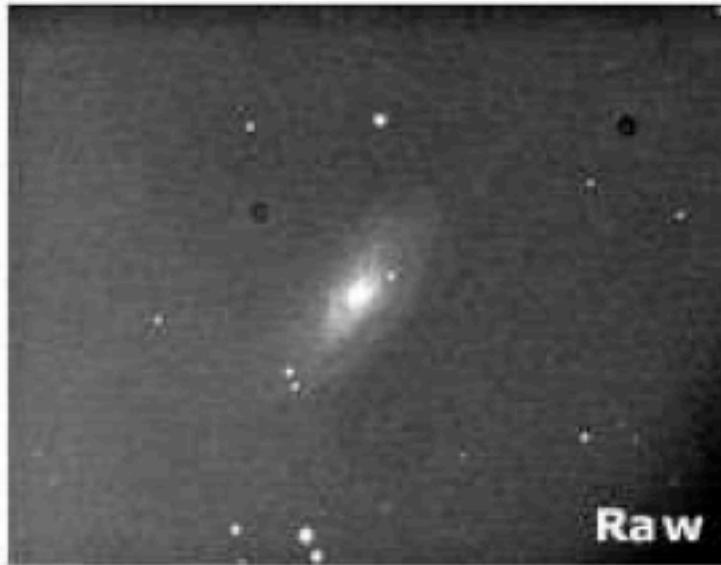
CCD Cameras - PLU (Flat-field)



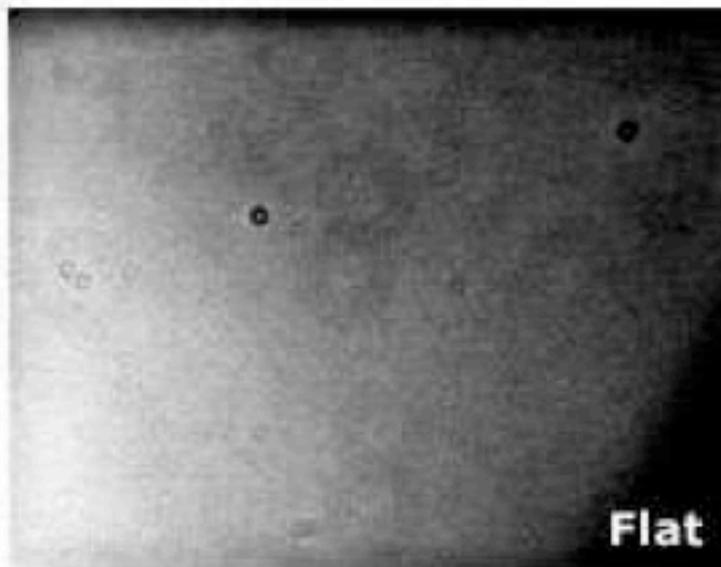
« Calibration » des images

Tp de pose t

Tp de pose t
Filtre F



Filtre F
Normalisé à
1s



$$\text{Calibrated} = (\text{Raw} - \text{Bias} - \text{Thermal}) / \text{Flat} = (\text{Raw} - \text{Dark}) / \text{Flat}$$

« Défauts » électroniques

Electroluminescence

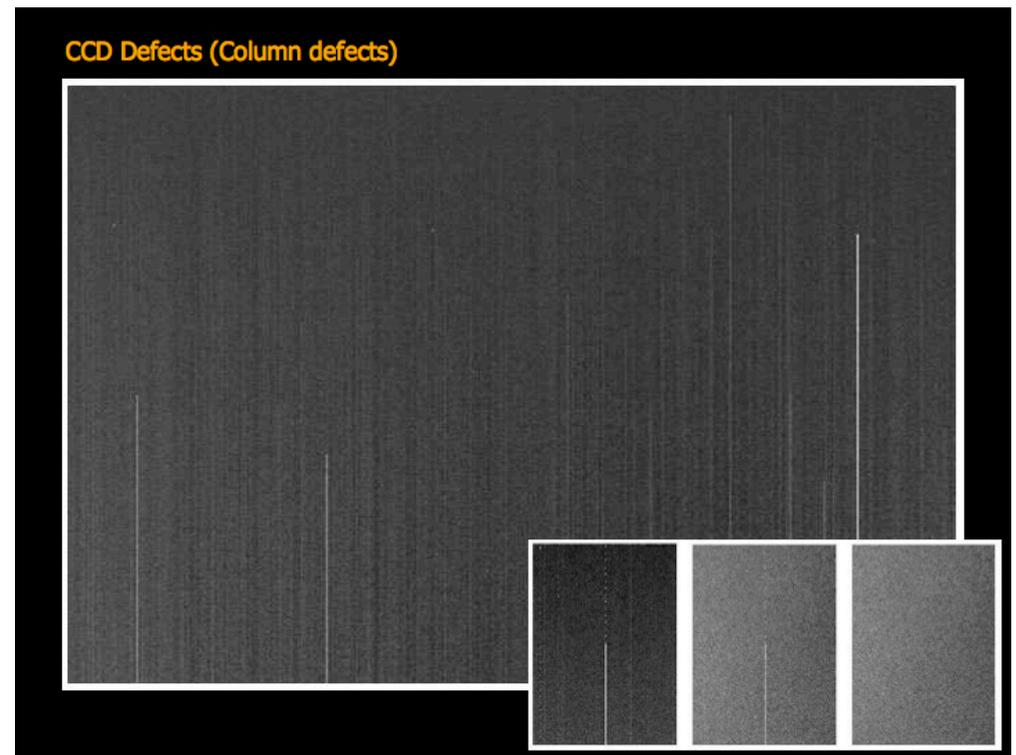
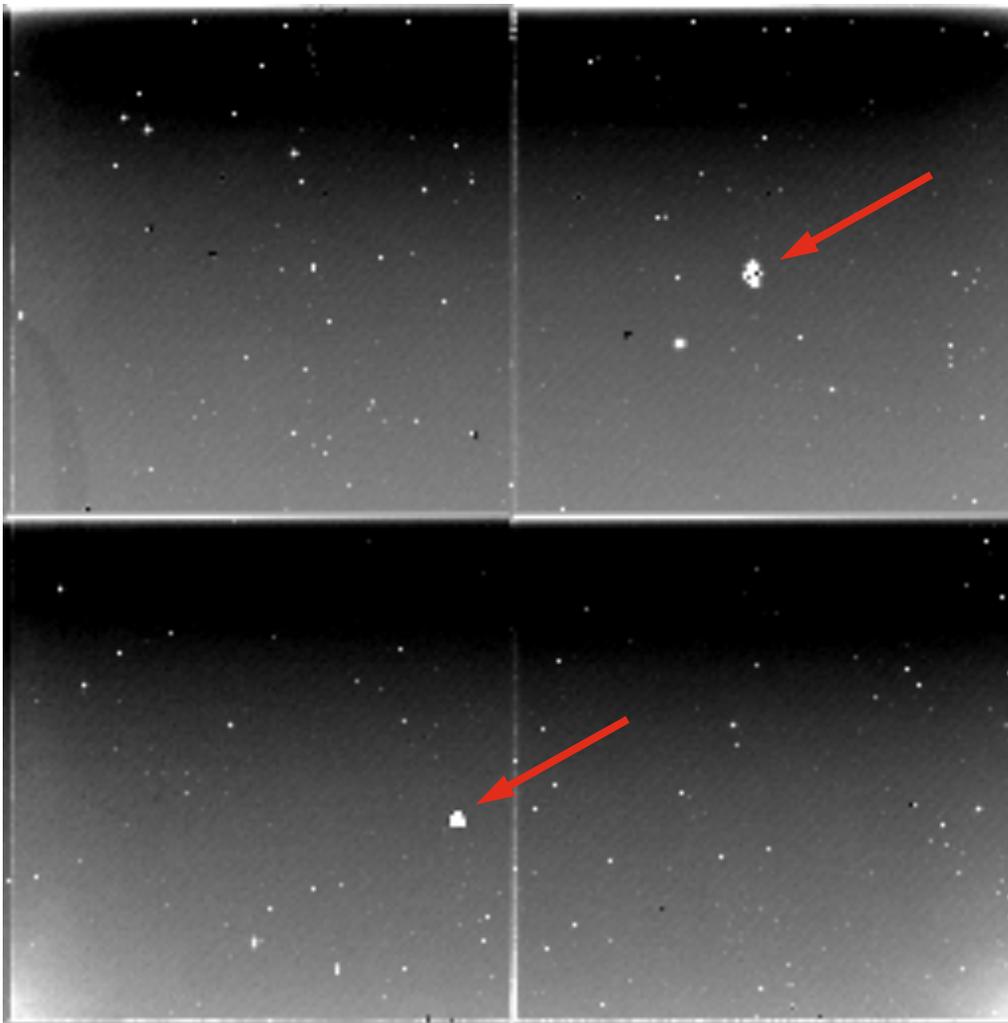
L'ampli chauffe une partie de la matrice et augmente le courant d'obscurité (et le bruit)



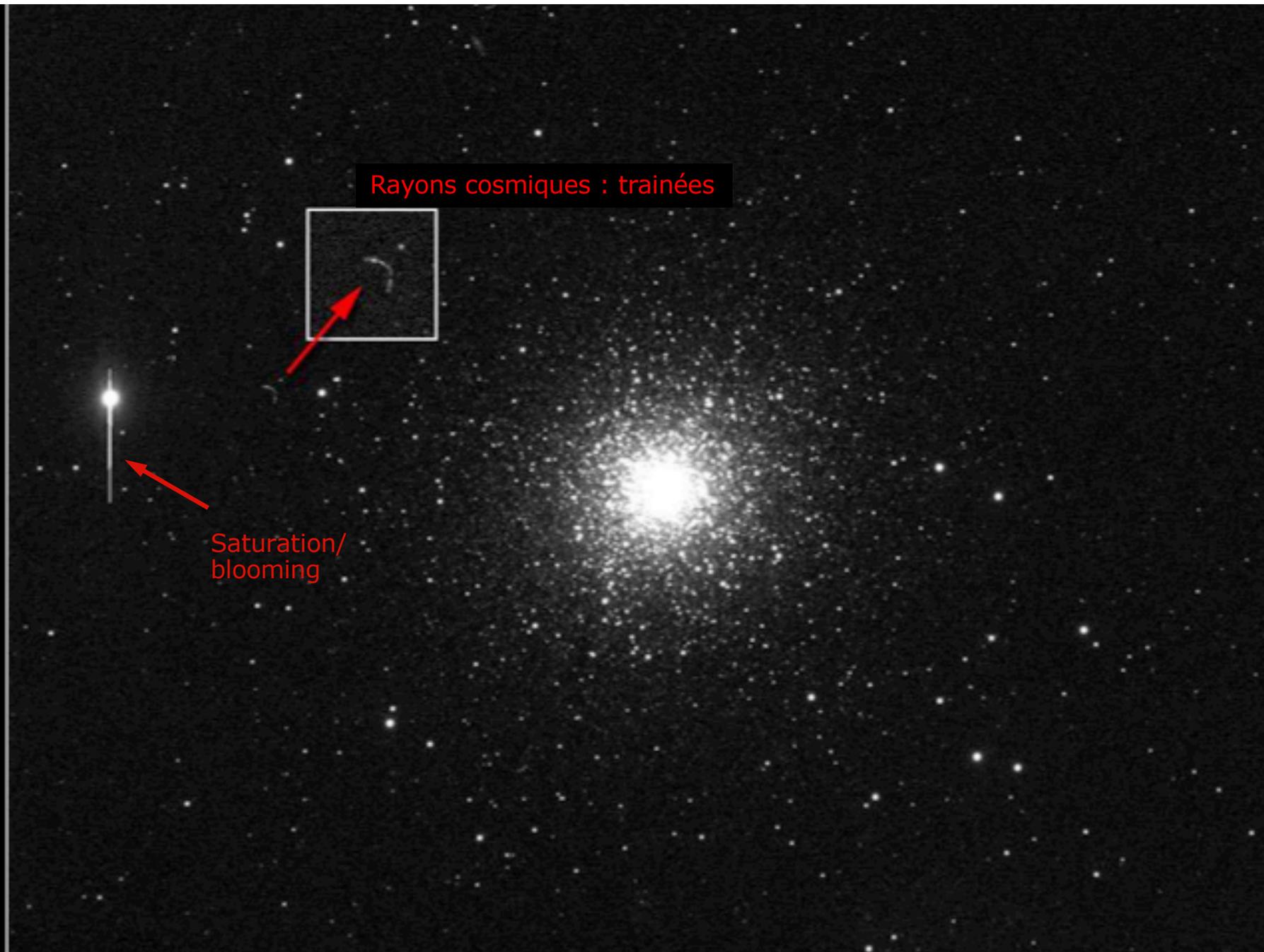
« Défauts » électroniques

Pixels morts / chauds / froids

Certains pixels ne réagissent pas normalement: pas ou peu de détection, non linéarités...
Souvent groupés en « clusters », motifs constants



« Défauts » électroniques: effets de saturation + rayons cosmiques



« Défauts » électroniques: étalement des charges

Même sans saturation, les charges s'étalent le long des colonnes pendant la pose
=> réduction de contraste et augmentation du bruit



« Défauts » électroniques

Bruit en $1/f$: événements ponctuels / granulosité

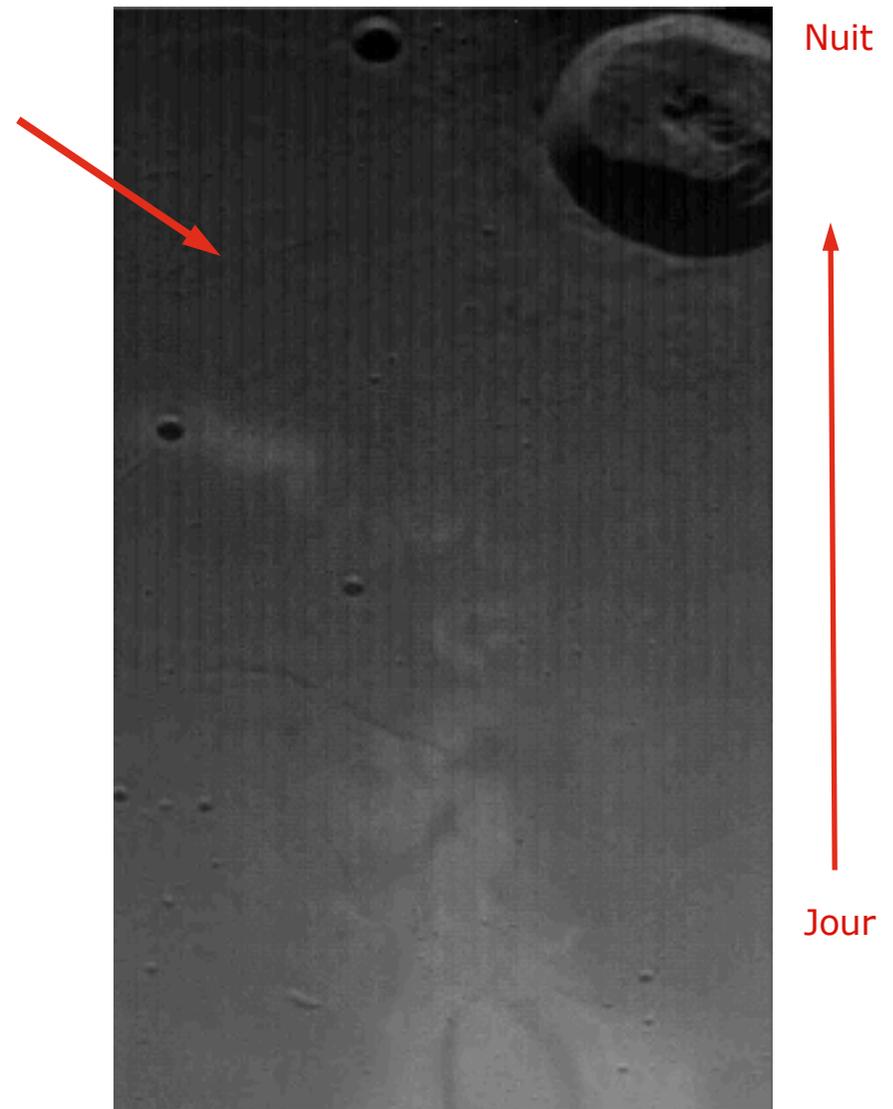
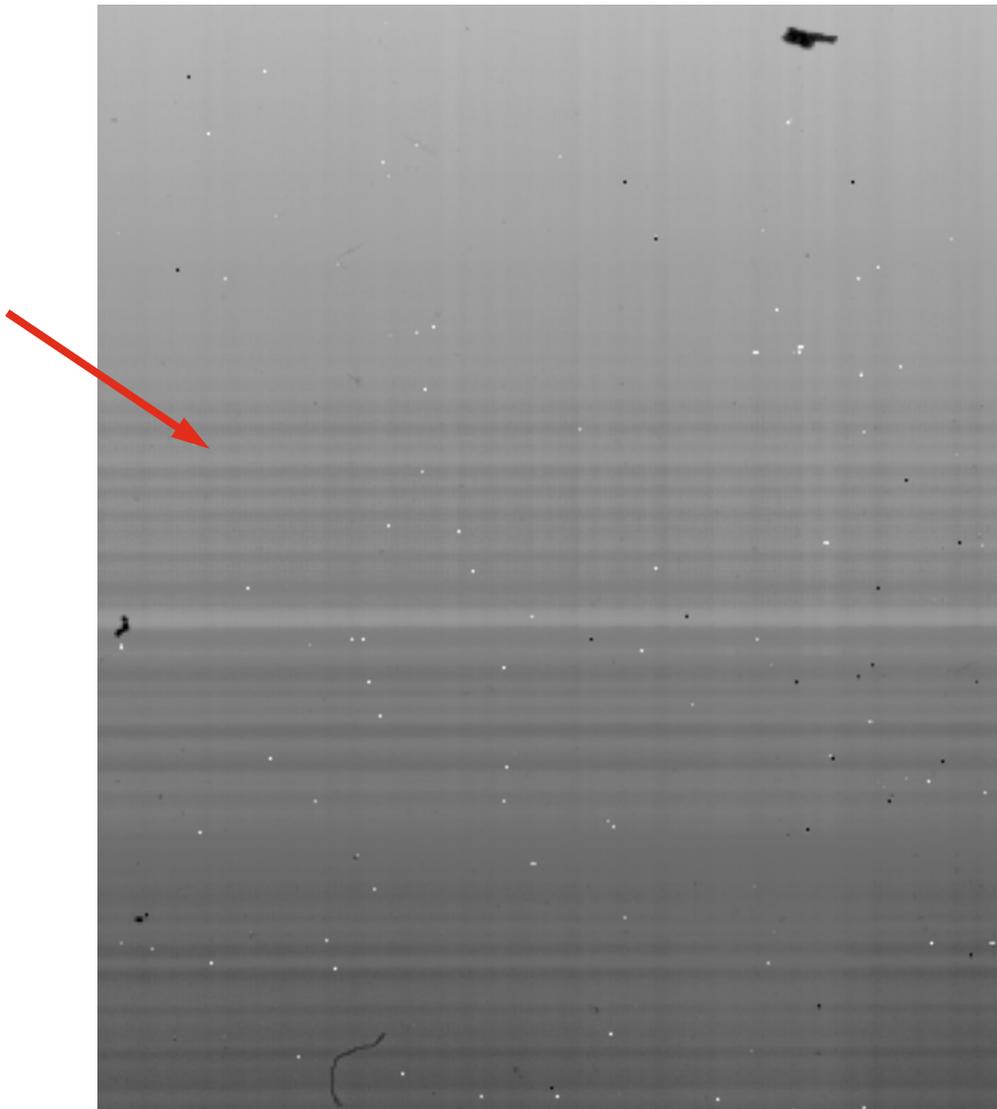
~pixels chauds, mais augmentent avec le temps de pose. Aléatoires, notables pour $t > 5$ min



« Défauts » électroniques

Trames diverses dans les darks

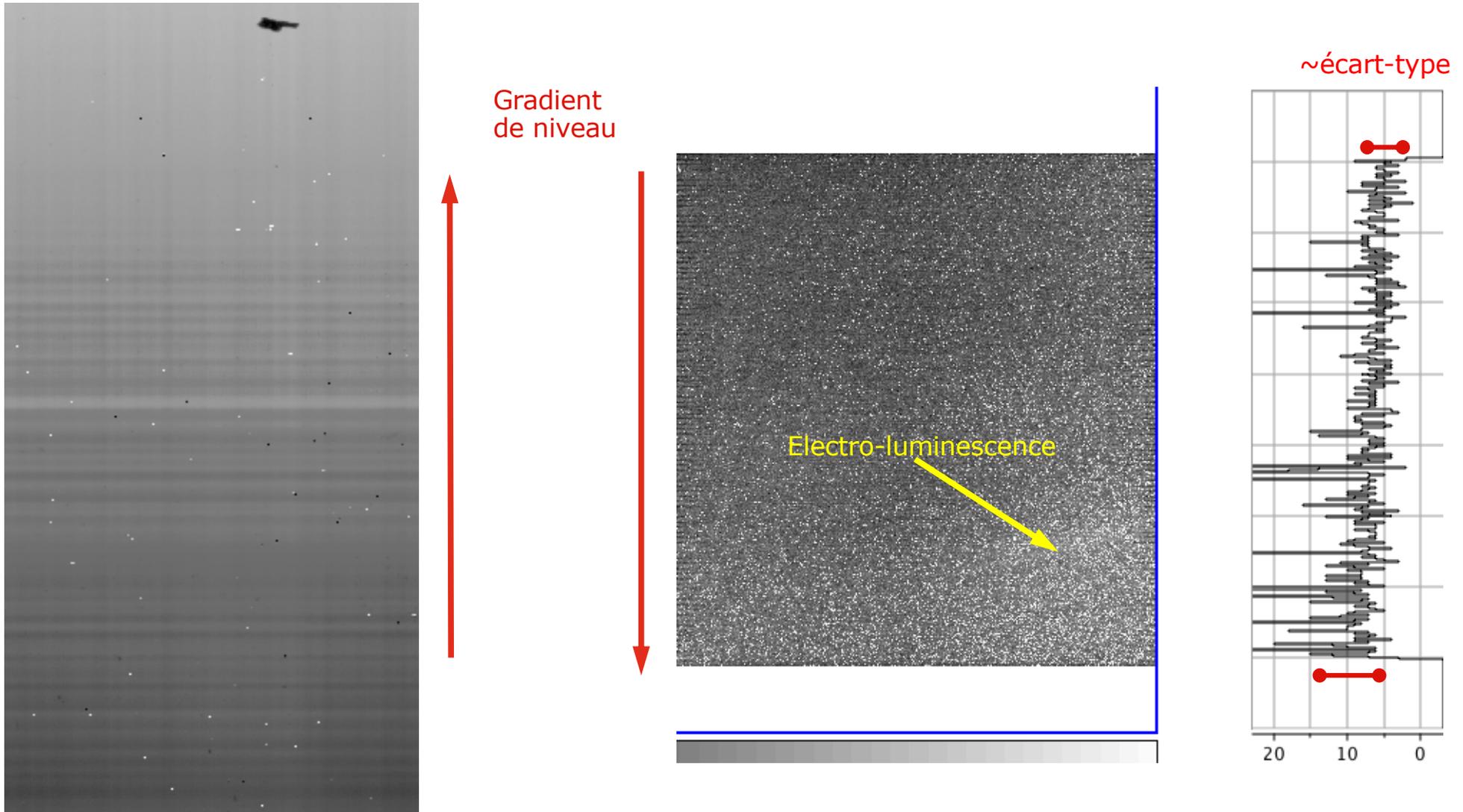
Selon circuit de lecture: entrelacement pair/impair, blocs, quadrants, motifs obliques...
Comportement non-linéaire en général (notable à faible flux)



« Défauts » électroniques

Gradients

Les dernières lignes lues ont un courant d'obscurité plus élevé (et plus de bruit)
et sont plus exposées aux erreurs de transfert ($\sim 10^{-5}$: notable pour les grandes matrices)

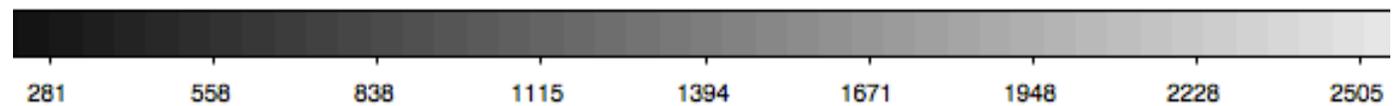
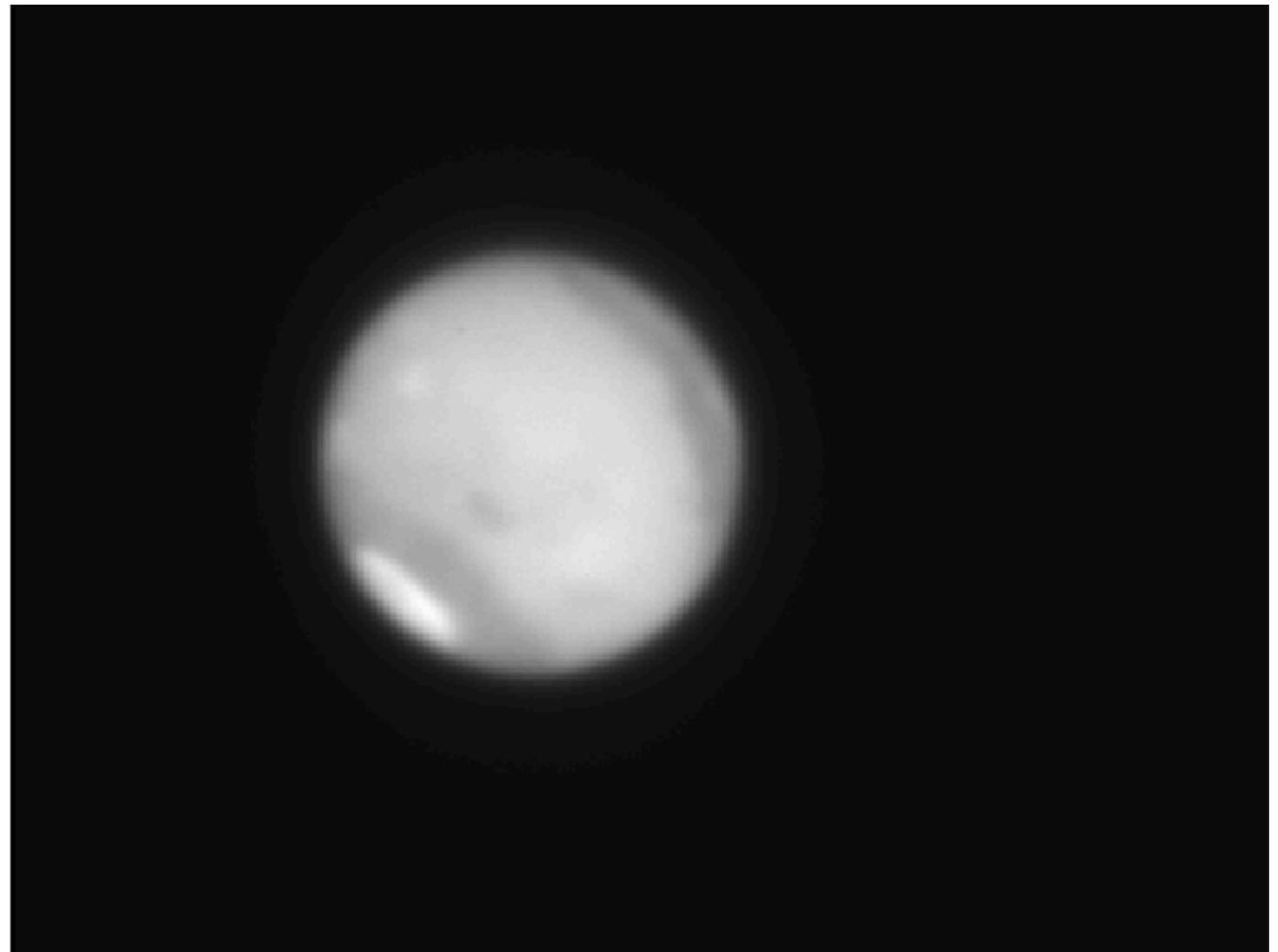


Analysez vos images !

Affichage / profiles

- Niveau / variations ?
- Structures / artefact ?
- Pixels morts/chauds ?

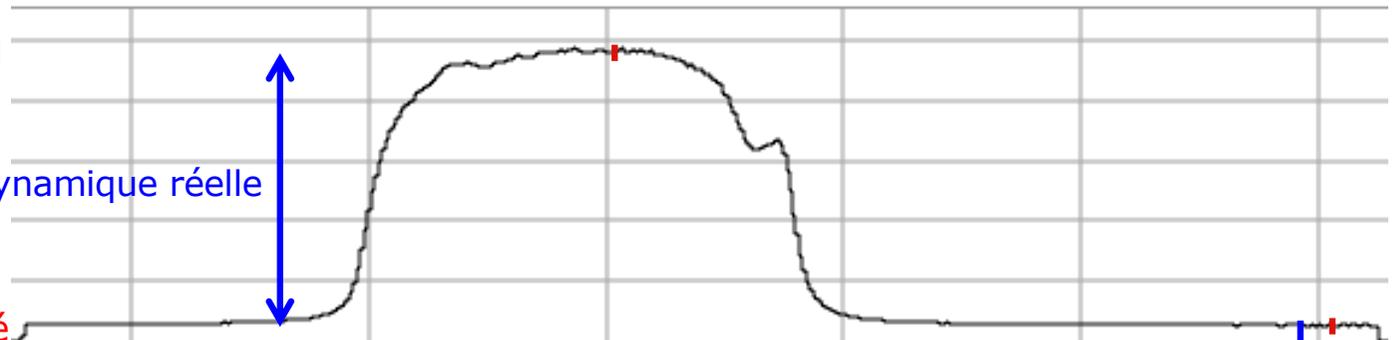
=> Modifier le contraste, les bornes, les échelles de couleur



Signal + bruit total

Dynamique réelle

Dark + bruit associé



Incidence : problème du dark

On veut toujours le minimiser, car :

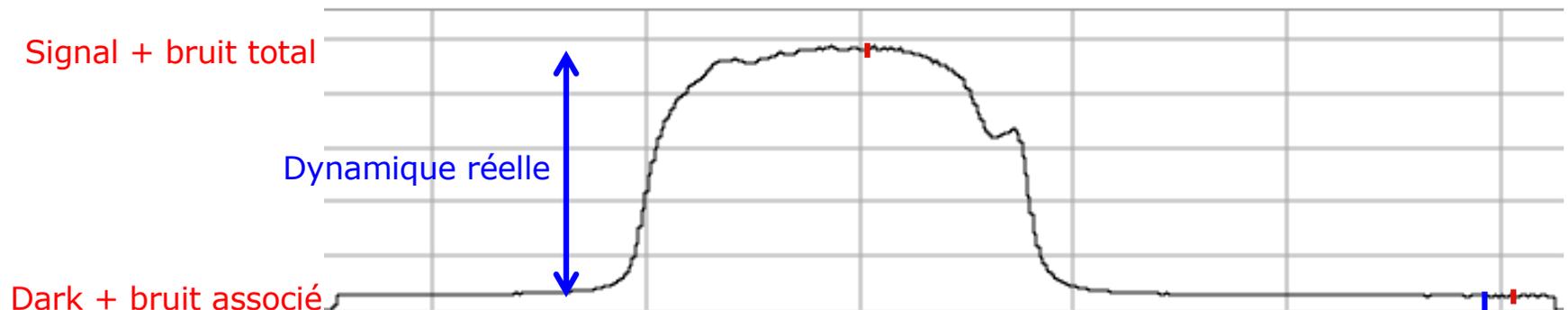
- Il mange la dynamique (moins de place pour le signal avant saturation)
- Il est associé à un bruit $\sigma = \sqrt{N}$

=> Réduire le temps de pose (mais réduit aussi le signal)

=> Baisser la température (très efficace)

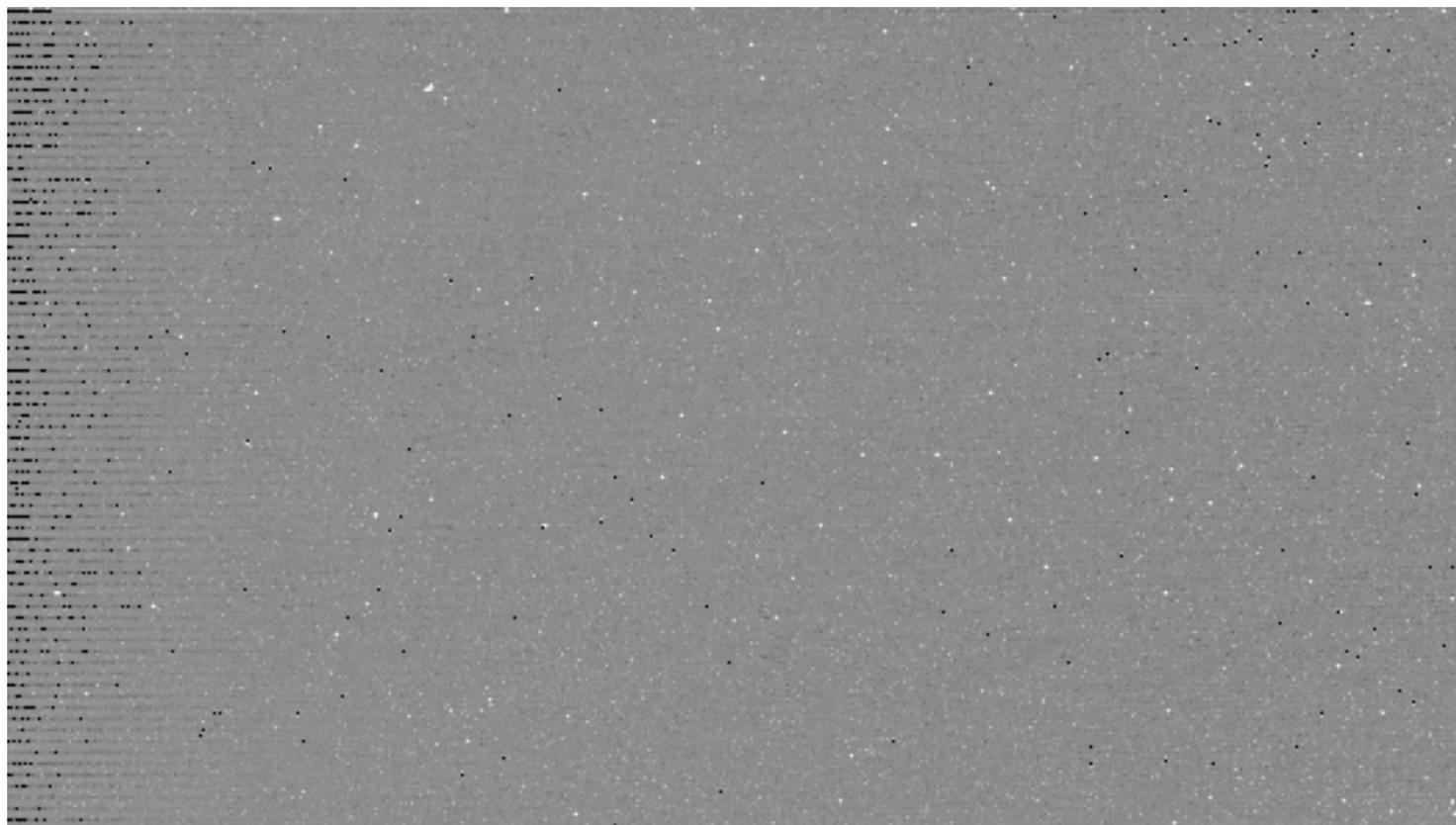
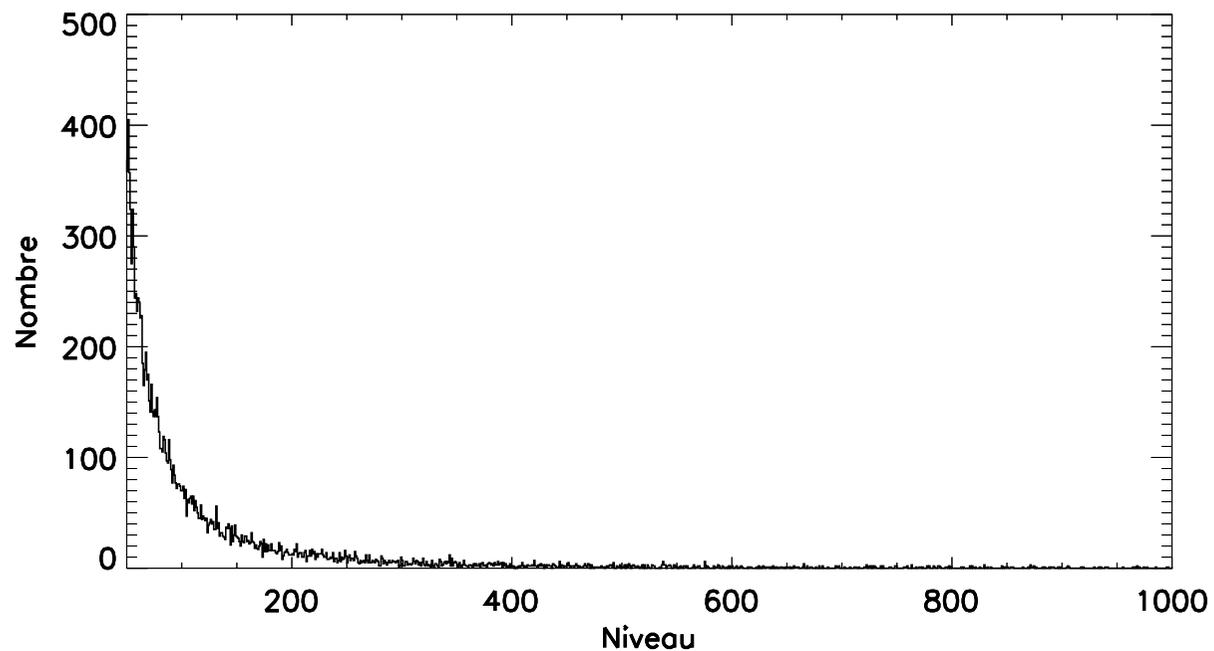
Problème particulier en IR ($> \sim 4 \mu\text{m}$) :

- Le fond de ciel est lumineux (et très rapidement variable)
- Le dark inclut aussi l'émission thermique de l'instrument (charges thermiques + photons *émis* par l'instrument lui-même)



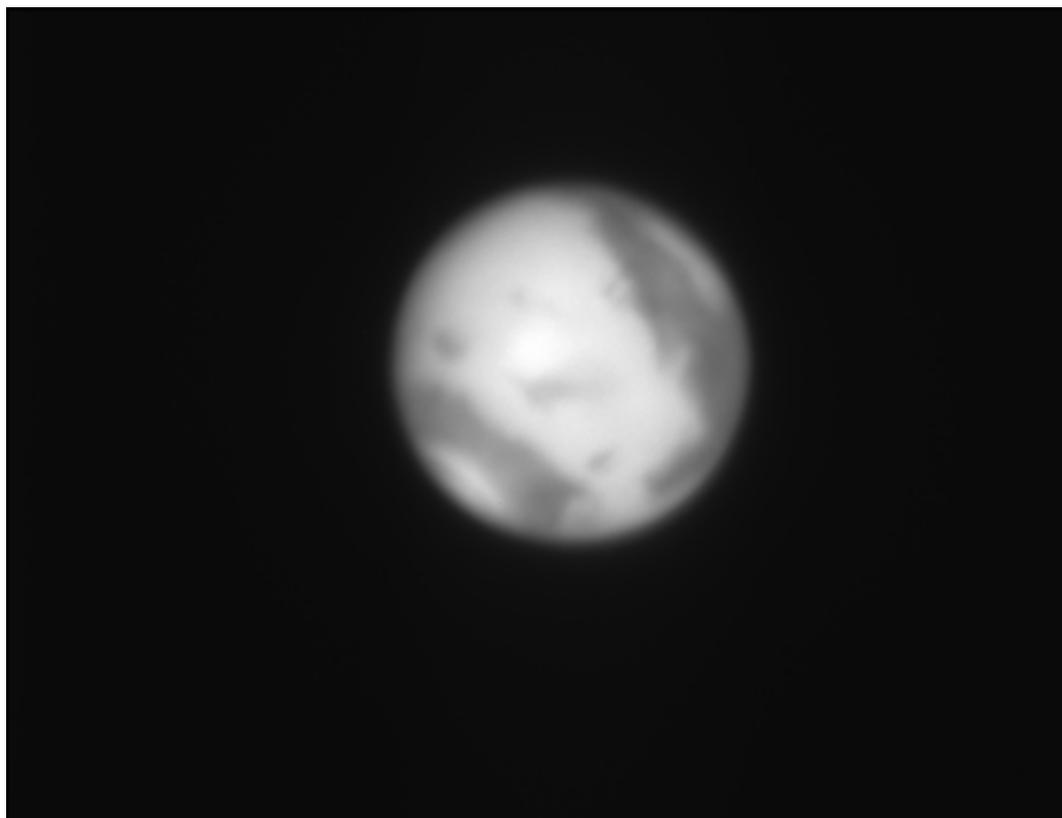
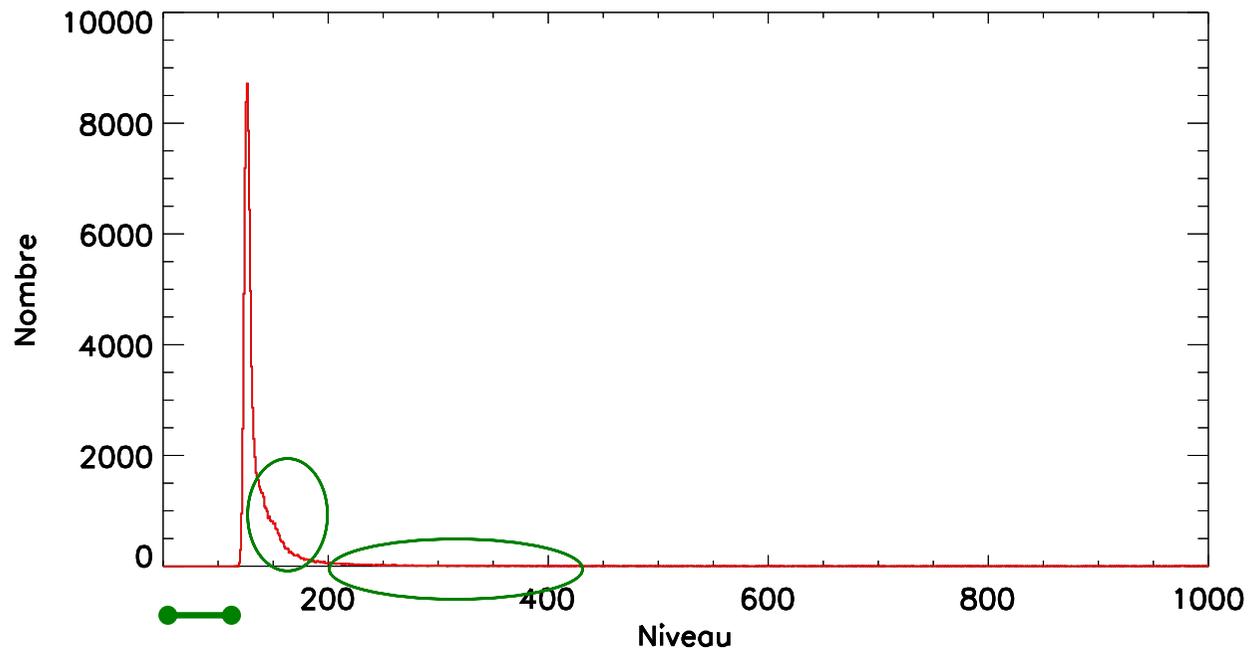
Récréation

Histogrammes
=> Quelle image ?

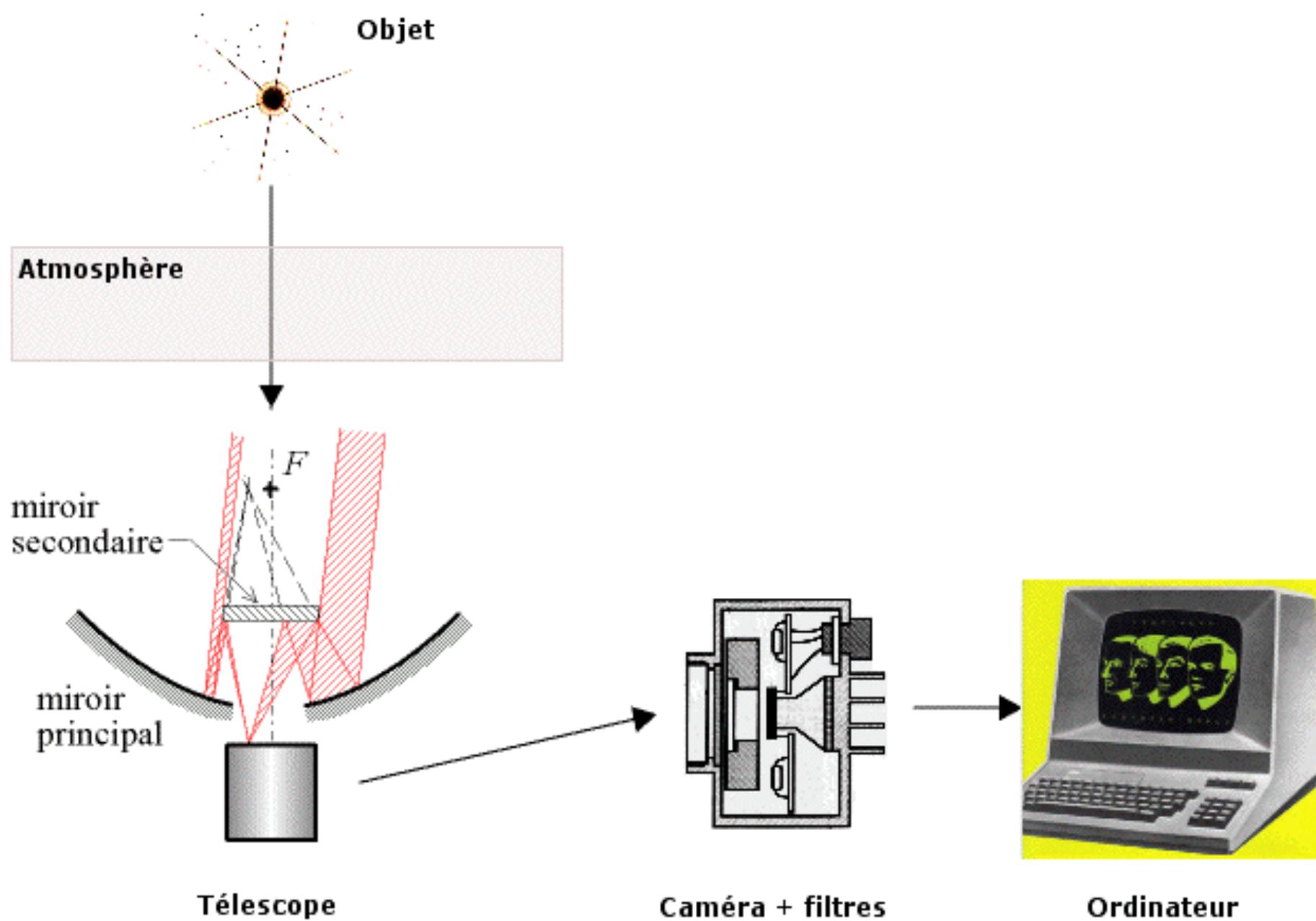


Récréation

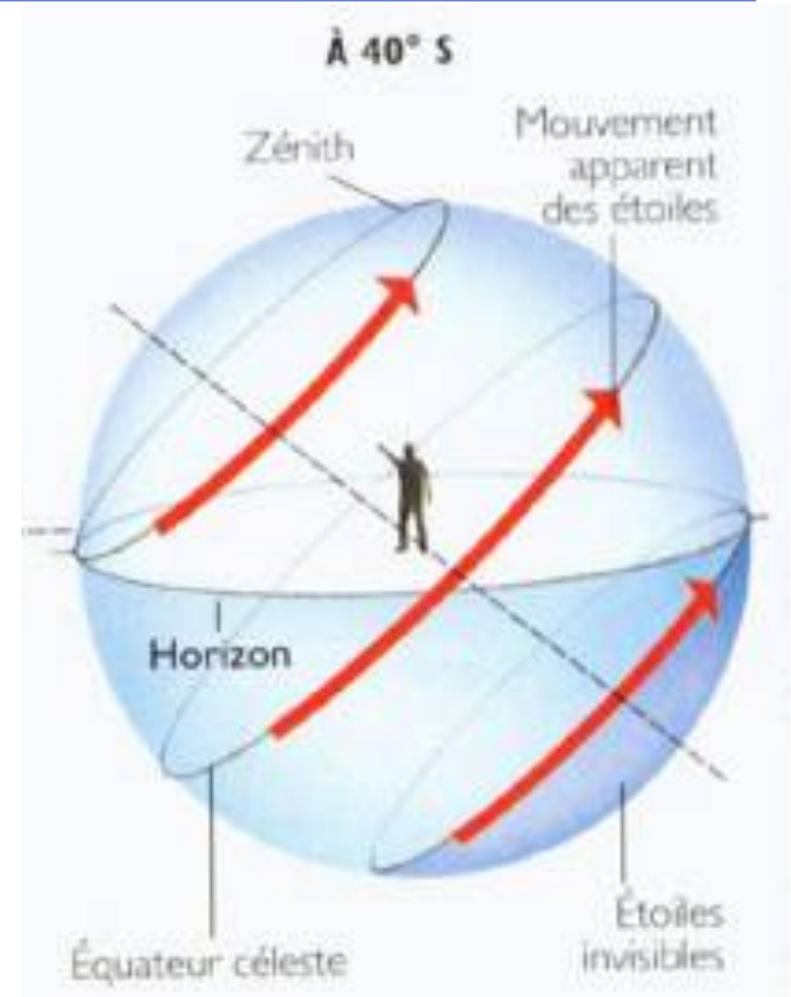
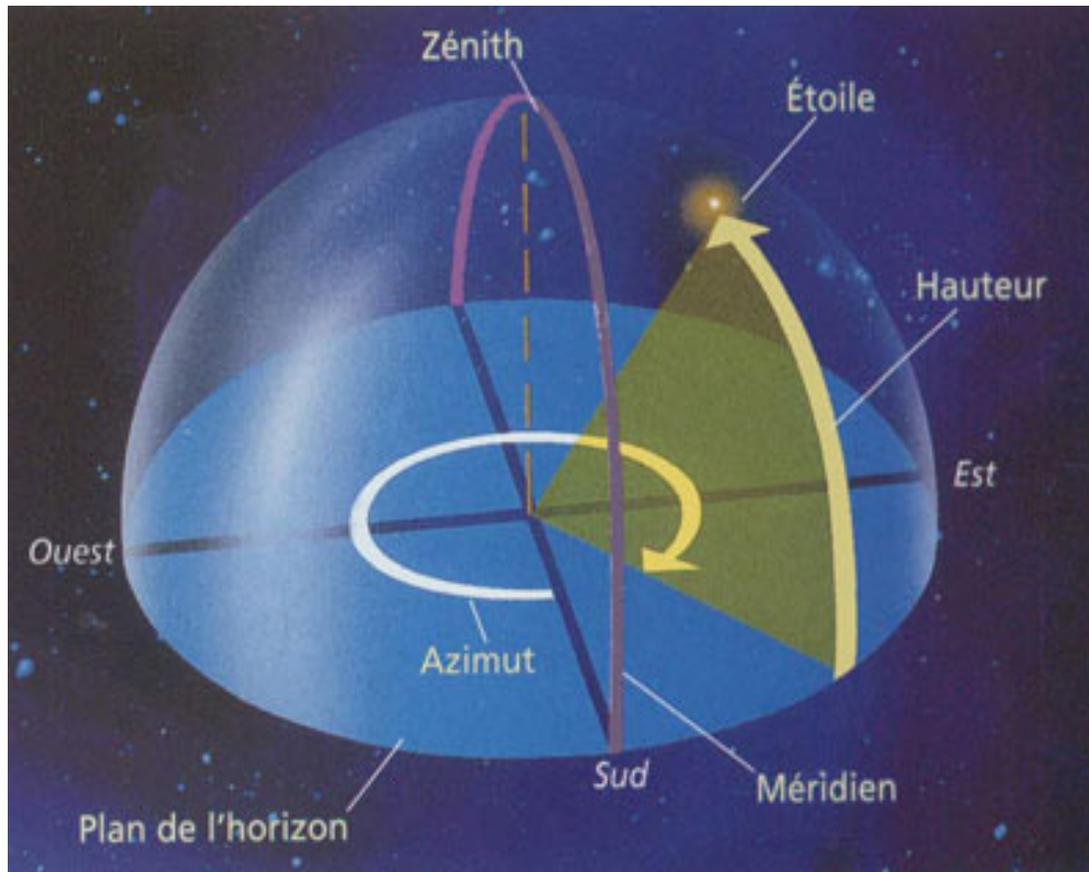
Histogrammes
=> Quelle image ?



Chaîne d'acquisition en imagerie astronomique



Coordonnées pour l'observation: coord. azimutales



Simple: azimut (a) et hauteur (h) [v/ horizon]

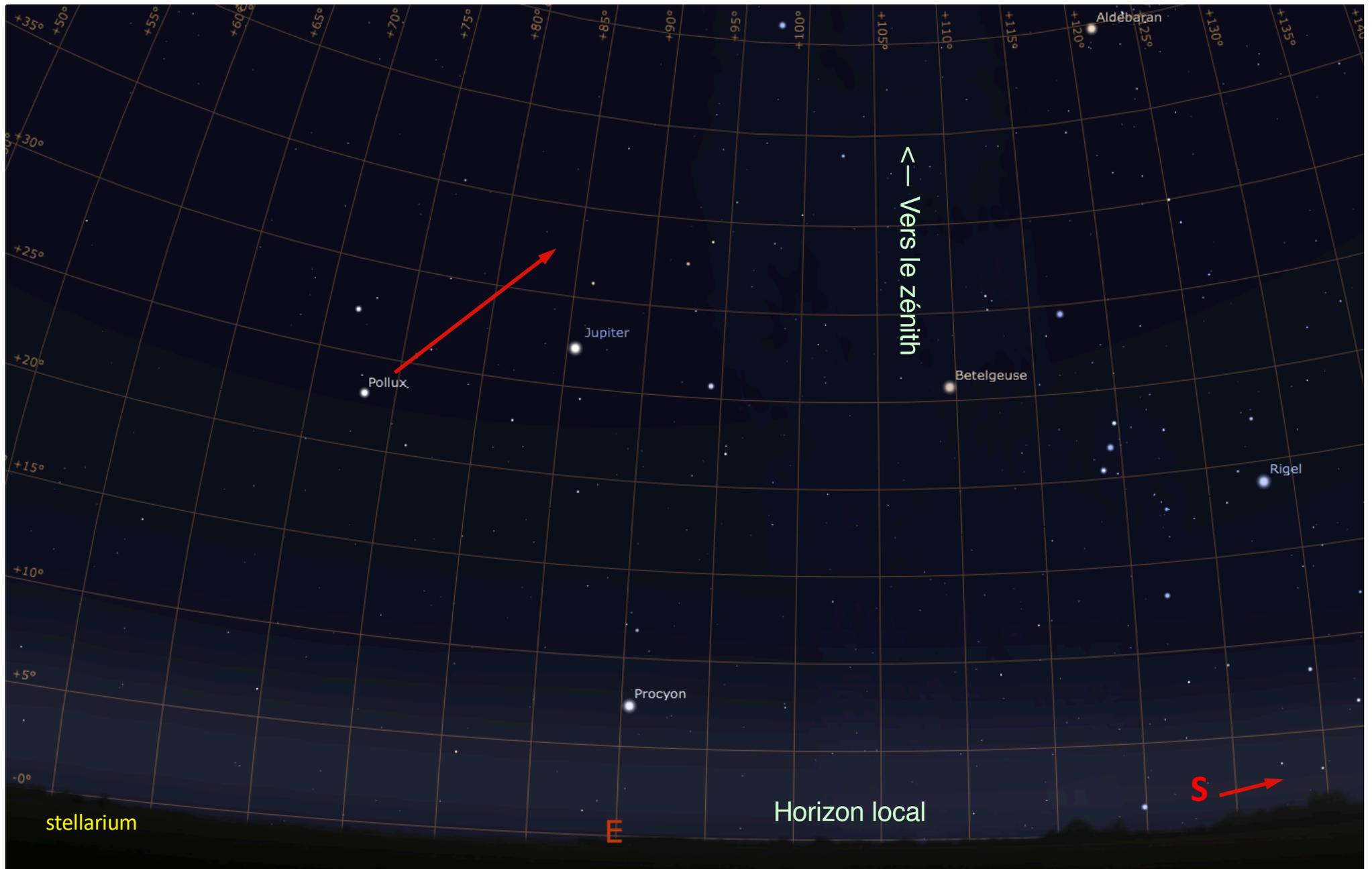
Problèmes:

-Dépendent du moment et du lieu => pas moyen de cataloguer les objets

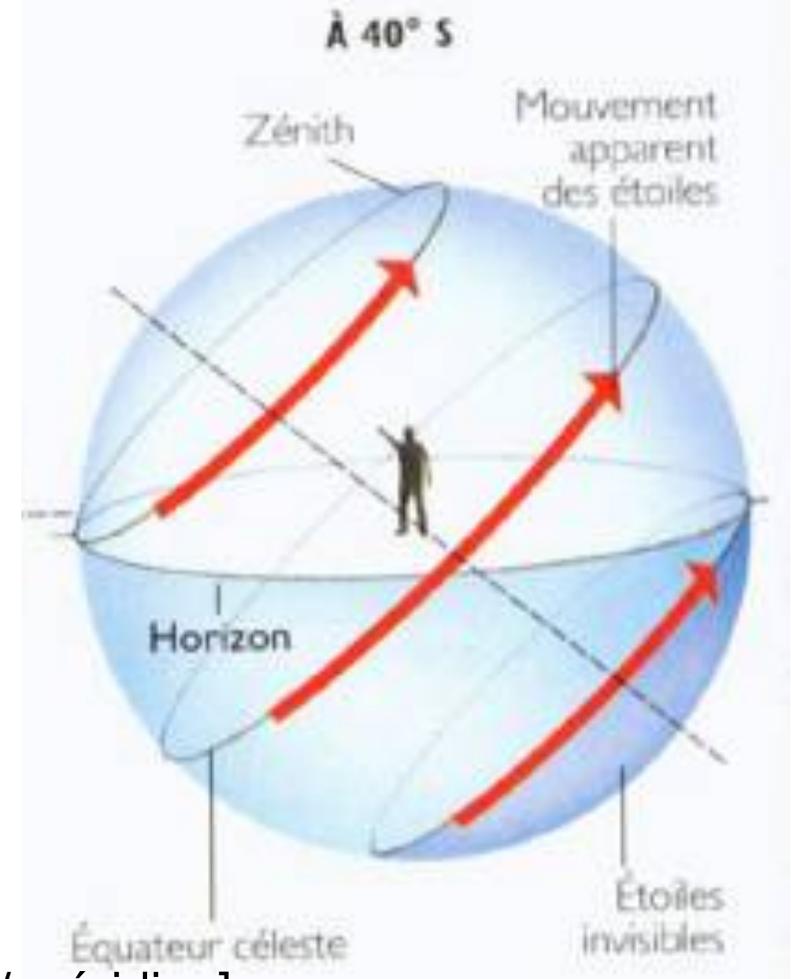
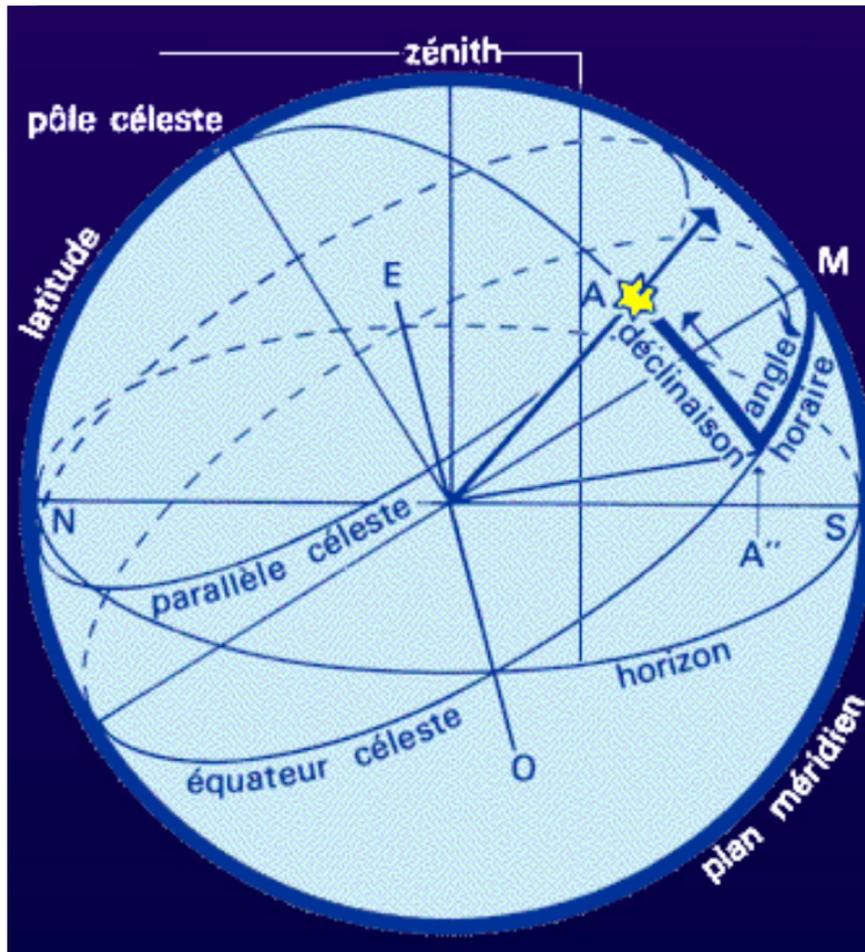
-Les étoiles tournent autour du pôle

=> leurs deux coordonnées changent au cours de la nuit

Coordonnées azimutales



Coordonnées pour l'observation: coordonnées horaires

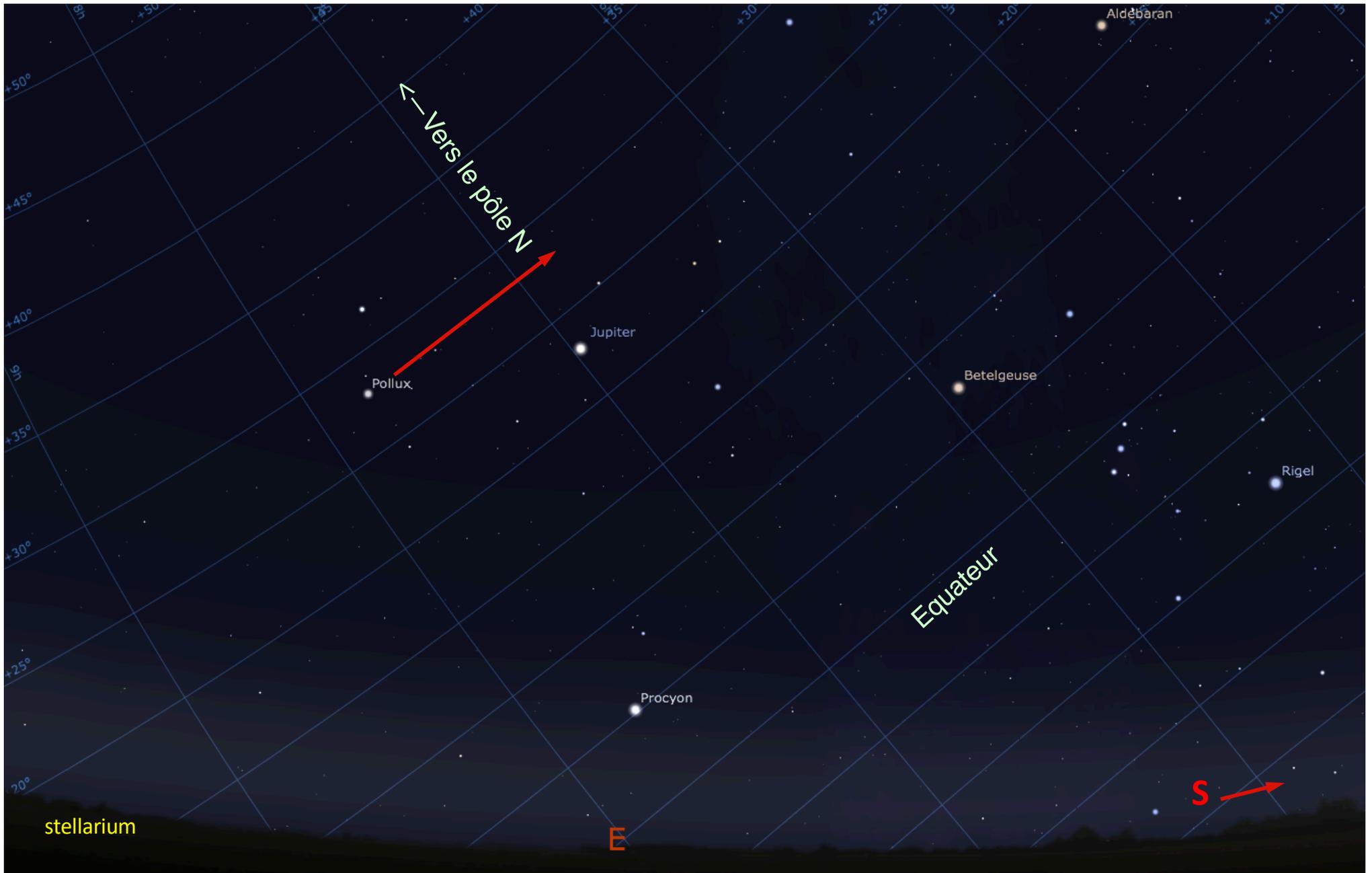


Déclinaison (δ) [v/ Equateur] et angle horaire (H) [v/ méridien]

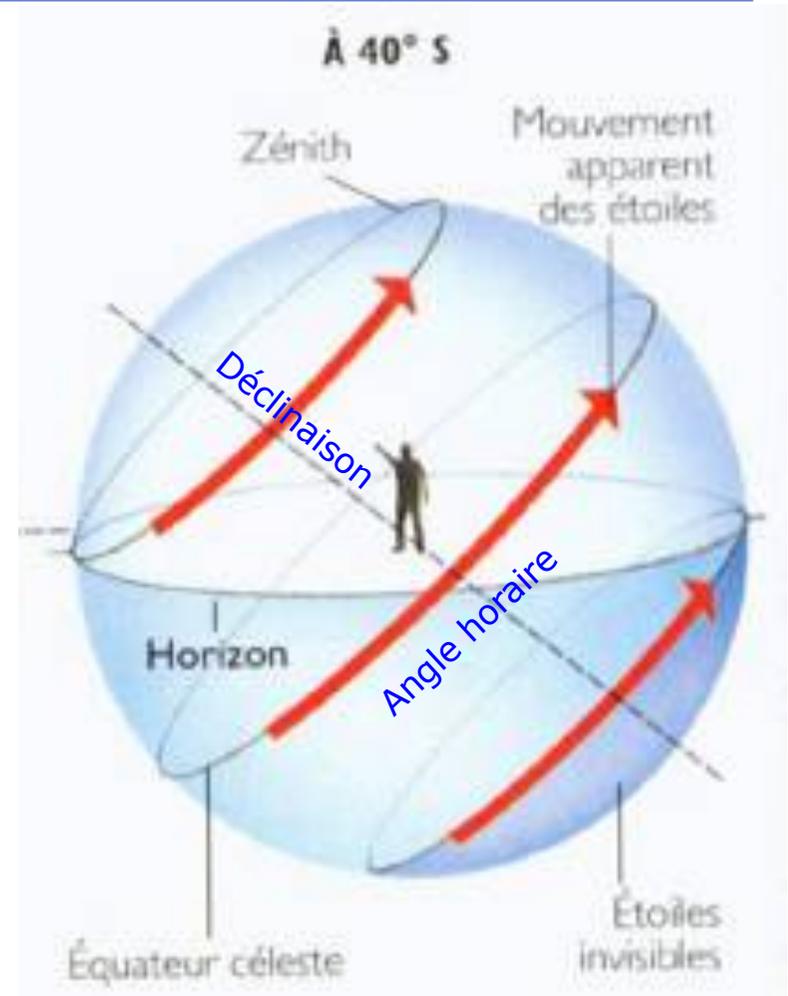
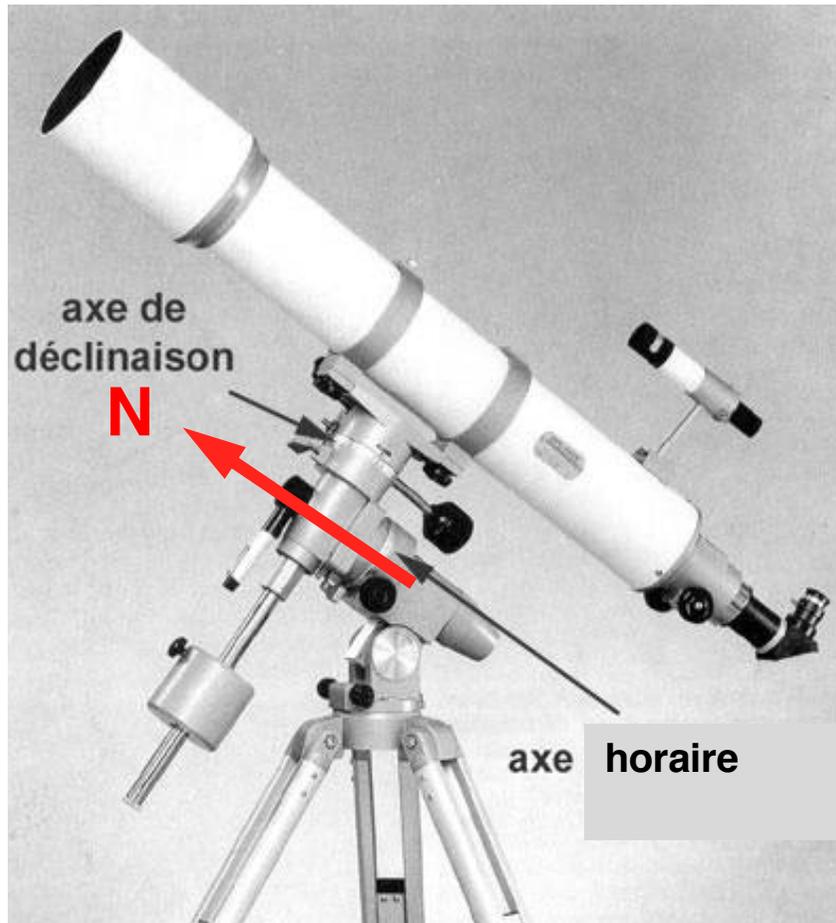
- **Permettent de cataloguer les objets** (à un endroit donné, avec correction de t_p)
- **Distance au pôle fixe**

=> une seule coordonnée change au cours de la nuit

Coordonnées horaires / équatoriales



Coordonnées pour l'observation: monture équatoriale



- Un axe // à celui des pôles
- Pour suivre un objet au cours de la nuit, il suffit de tourner à la même vitesse, la déclinaison reste fixe

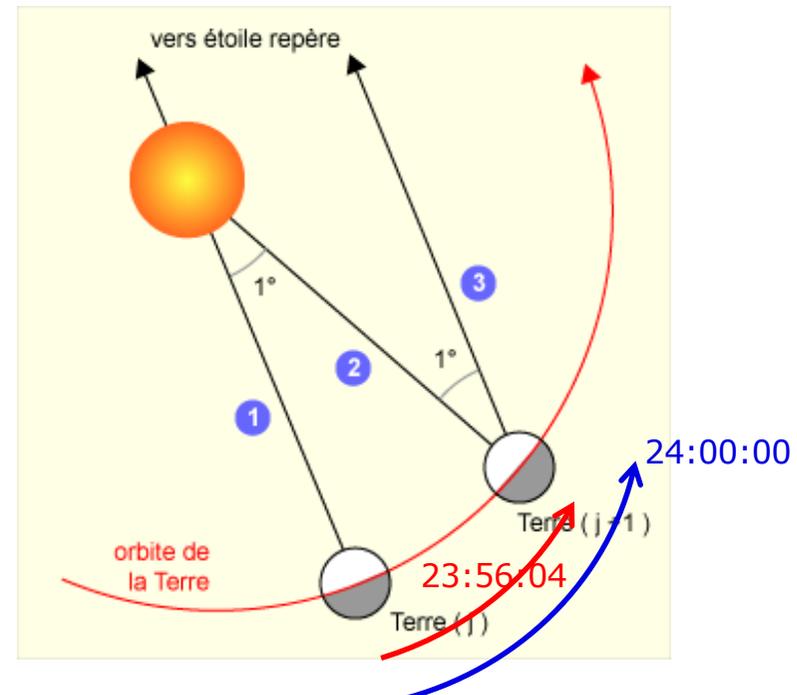
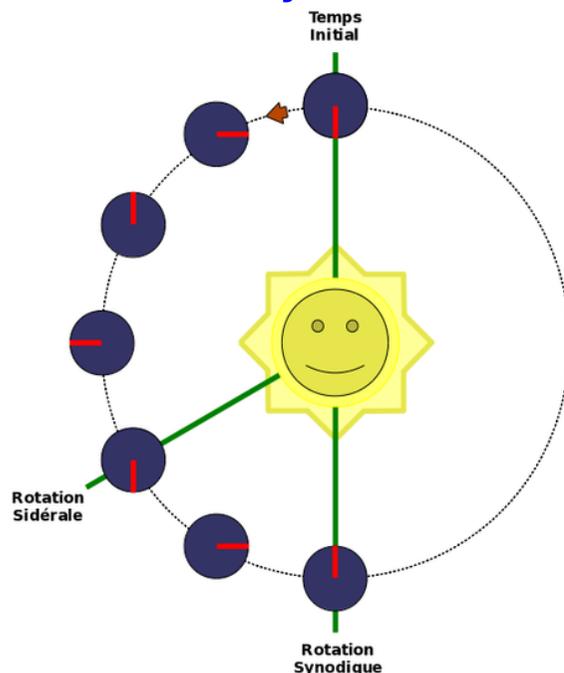
Question amusante et instructive

En combien de temps la Terre fait-elle un tour sur elle-même ?

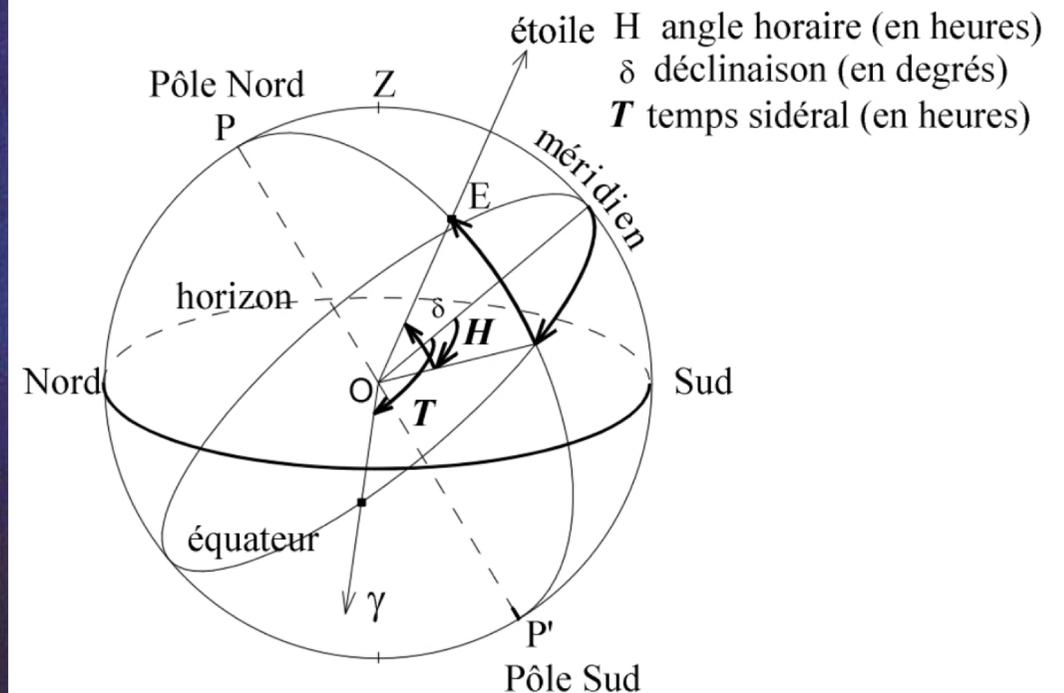
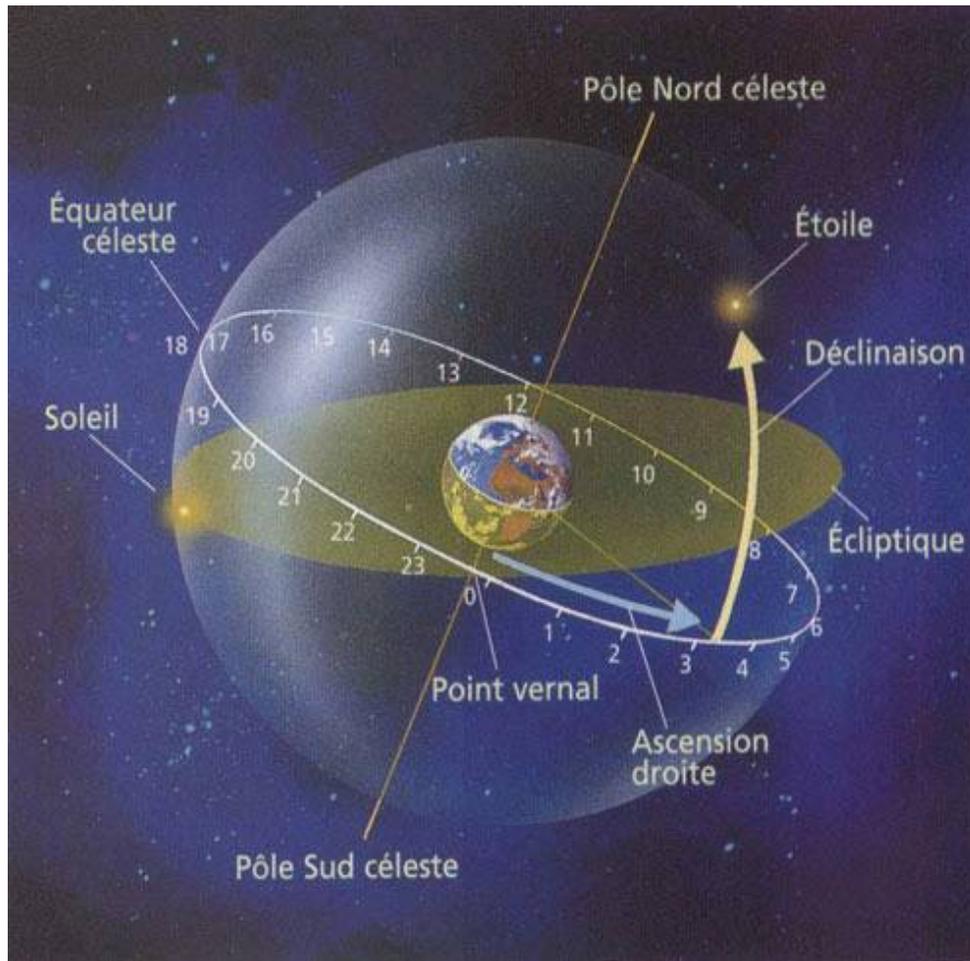
Réponse : ça dépend par rapport à quoi

24h = temps requis pour que Soleil revienne à la même place dans le ciel
= jour solaire *moyen* (dépend de la distance au Soleil)

23h 56' 04" = temps requis pour qu'une étoile revienne à la même place dans le ciel
= jour sidéral (~ période dans un repère inertiel)



Coordonnées pour l'observation: coordonnées équatoriales



Déclinaison (δ) [v/ Equateur] et ascension droite (α) [v/ point vernal]

- **Permettent de cataloguer les objets** (en absolu, sur de petites échelles de tp)
- **On définit une 2^e coordonnée fixe en corrigeant de la position de l'observateur (ascension droite α ; il faut définir un point de référence)**

Point vernal et temps sidéral

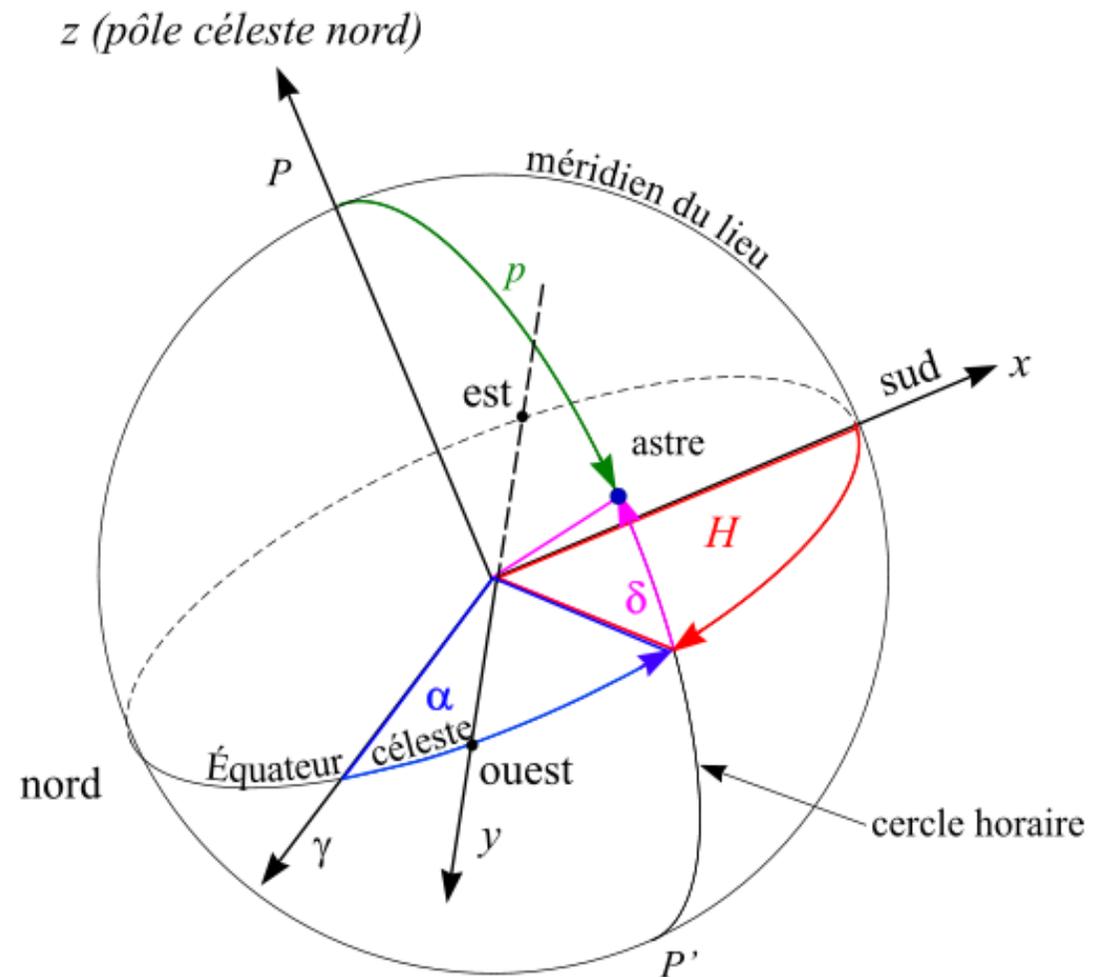
Point vernal γ = une direction de référence sur l'Equateur

Temps sidéral local Θ = angle horaire du point vernal (fct de l'heure et de la longitude)

Ascension droite (fixe) d'un objet α :
temps sidéral - angle horaire

$$\Theta = H + \alpha$$

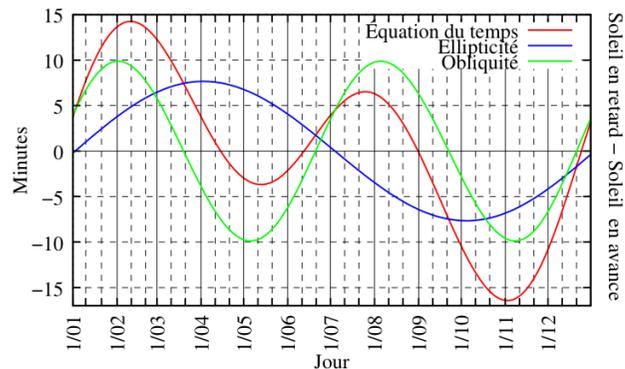
En pratique : on a α , on veut H
On utilise une applications de calcul
(entrées : date, heure, lieu, α)



Point vernal et temps sidéral

**Temps sidéral local Θ = angle horaire du point vernal (fct de l'heure et de la longitude)
= (à un tout moment) ascension droite des objets au méridien**

Le **temps solaire vrai** dépend de la forme de l'orbite terrestre et de l'inclinaison de l'axe
Equation du temps = différence entre temps solaires moyen et vrai, fct oscillante du temps solaire au cours de l'année



Voir Equation du temps sur Wikipedia ou ailleurs

<http://media4.obspm.fr/public/AMC>

• En plus, le point vernal se déplace avec la précession (période 26 000 ans, $\sim 50''/\text{an}$)

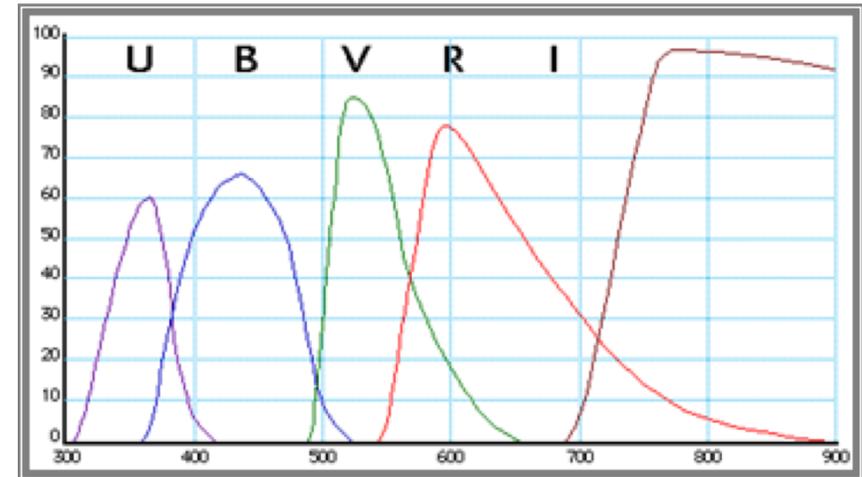
=> On fournit les coordonnées équatoriales à des moments donnés (J1950, J2000, à la date)

Imagerie à filtres

On sélectionne le rayonnement en intercalant des filtres

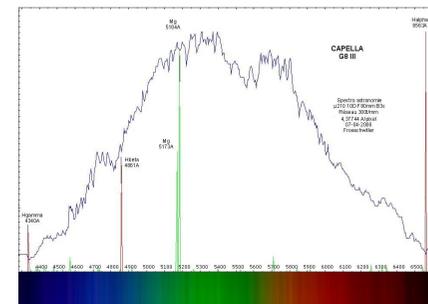
- Différents types
 - Bandes larges: U, B, V, R, etc
(autant de systèmes que de fabricants)

⇒ Isolent une partie du spectre visible



- **Etroits:** H α (656,3 nm) : H, rouge foncé
OIII (500,7 nm) : O²⁺, turquoise

⇒ Isolent des transitions atomiques



Spectre de Capella (G8)

↑ H β

↑ H α

Même échelle en lg d'onde

Imagerie à filtres

Le flux incident est le produit Source x Filtre

$$I = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} I_{source} T_{filtre} d\lambda$$

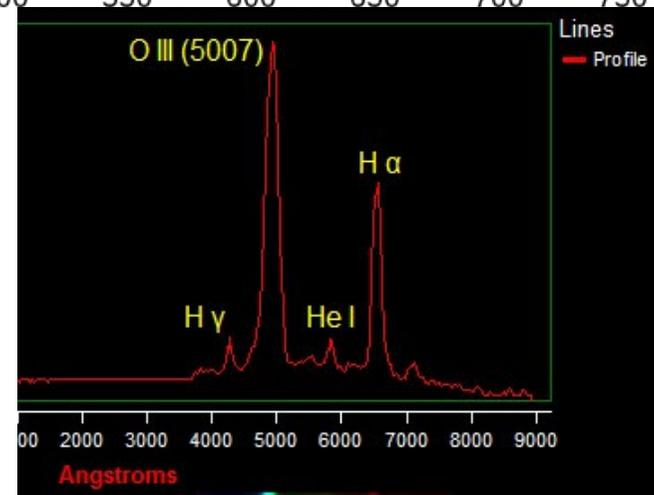
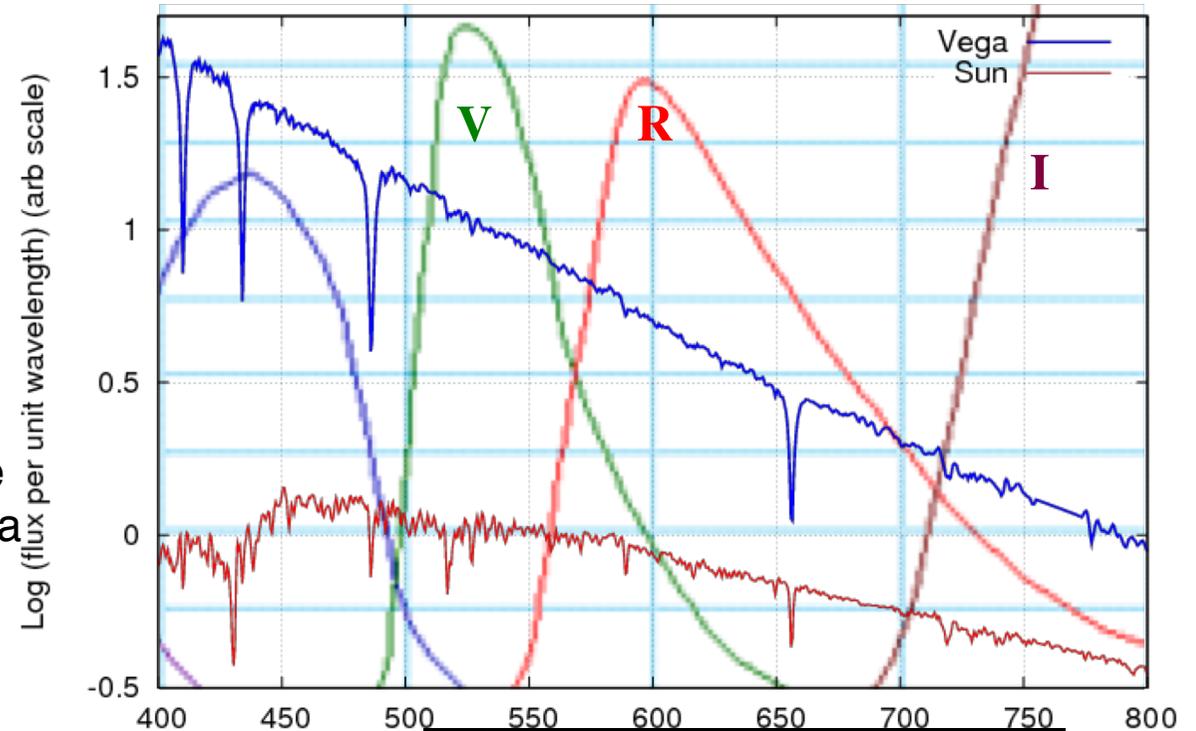
⇒ **perte de flux**

Il faut en plus multiplier par la réponse spectrale du CCD (qui dépend de la longueur d'onde)

⇒ **Il faut adapter le temps de pose selon le filtre et la source**

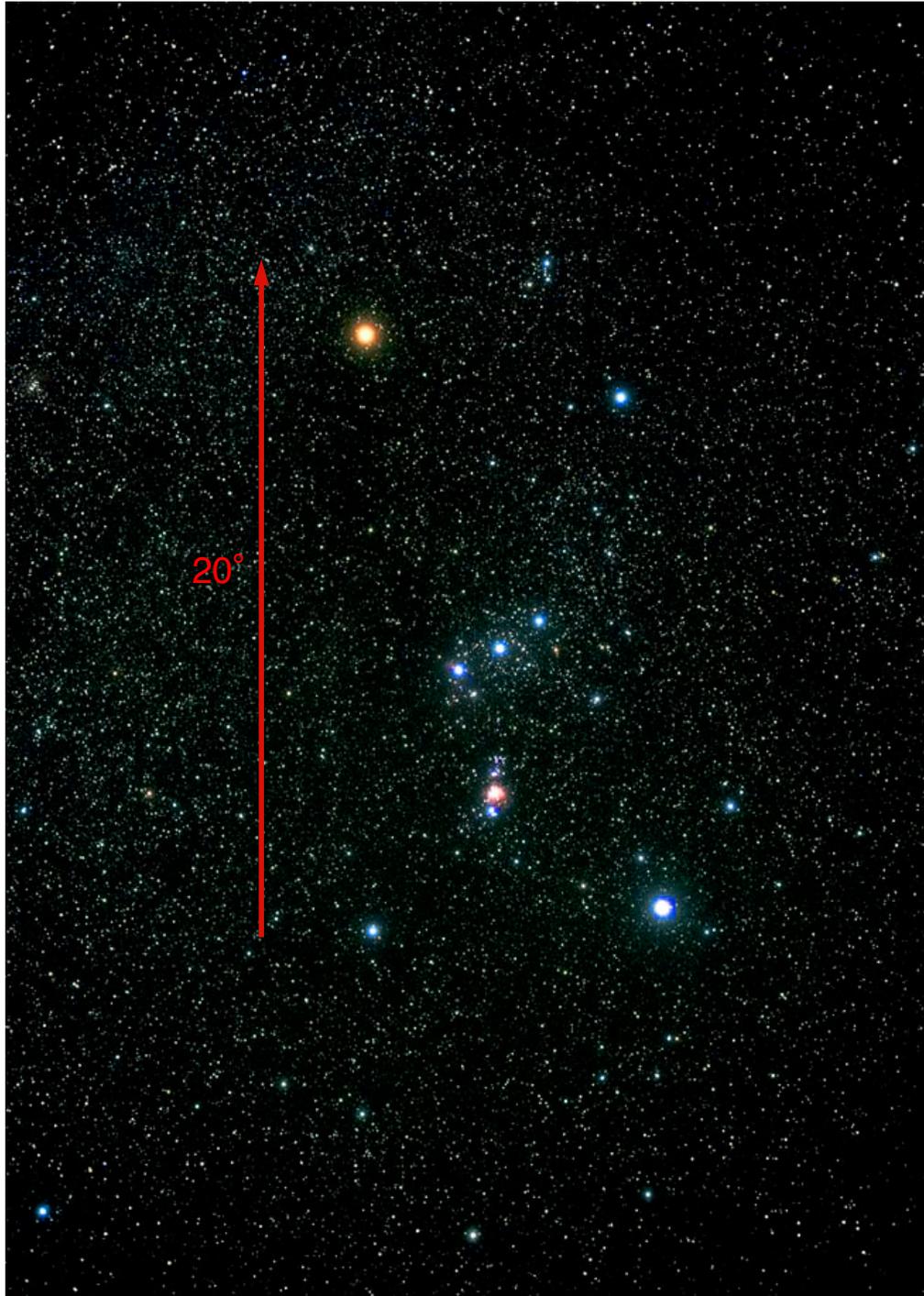
Les filtres étroits permettent par ex. de mesurer des émissions

Spectra of two stars



NGC 709, nébuleuse planétaire

Imagerie à filtres



Constellation d'Orion: RVB

+ H α



Signal et bruit

Chaque mesure est entachée d'incertitude

- **Bruit de lecture (~10 à 100 e⁻ / pixel)**

- Efficacité du transfert de charges
- Précision de l'amplification analogique
- Généralement dominant

⇒ S/B augmente en posant plus longtemps

- **Bruit thermique**

- Incertitude sur les charges thermiques accumulées
- Loi de Poisson ⇒ $\sigma_{therm} = \sqrt{N_{therm}}$

⇒ S/B augmente
- en posant plus longtemps
- en refroidissant

- **Bruit de photon**

- Variabilité intrinsèque de la source
- Loi de Poisson ⇒ $\sigma_{source} = \sqrt{N_{source}}$

⇒ S/B augmente
- en posant plus longtemps
- en moyennant

Bruit total = somme quadratique des différents bruits

(car on suppose les bruits indépendants)

Rapport signal sur bruit = Moyenne du signal corrigé / Ecart-type du bruit total

Signal et bruit

Signal mesuré: $S_{tot} = S_{source} \times Flat + Dark$

Bruit total : $\sigma_{tot}^2 = \sigma_{source}^2 + \sigma_{dark}^2 + \sigma_{lecture}^2 + \sigma_{numer}^2$

Bruit total = somme quadratique des différents bruits
(car supposés indépendants)

Objectif: - augmenter le rapport signal / bruit
- minimiser le bruit *relatif*

Rapport signal sur bruit = Signal corrigé / bruit total

Loi de Poisson

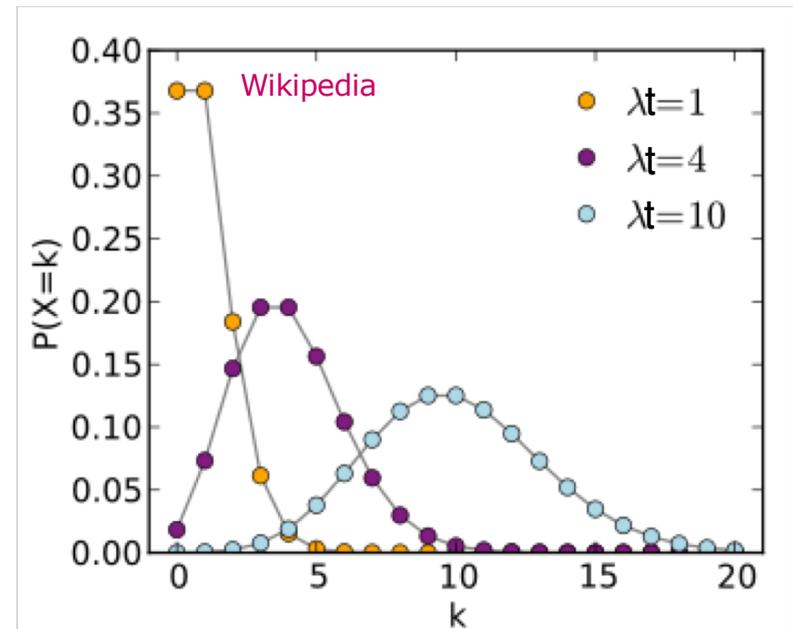
Hypothèse: - événements aléatoires, indépendants
- fréquence des événements constante (λ)

Dans ce cas: émission de photon / création de charge thermique

Densité de probabilité pour avoir k événements dans le temps t : $P(k) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}$

Démonstration : voir site MPA

http://media4.obspm.fr/public/AAM/pages_proba/poisson.html



Tend vers une gaussienne pour λt grand

Avec $N = \lambda t$

Moyenne = N (nb de photons reçus pendant le temps t)

Ecart-type: $\sigma = \sqrt{N}$ (variation moyenne autour de cette valeur, entre mesures successives)

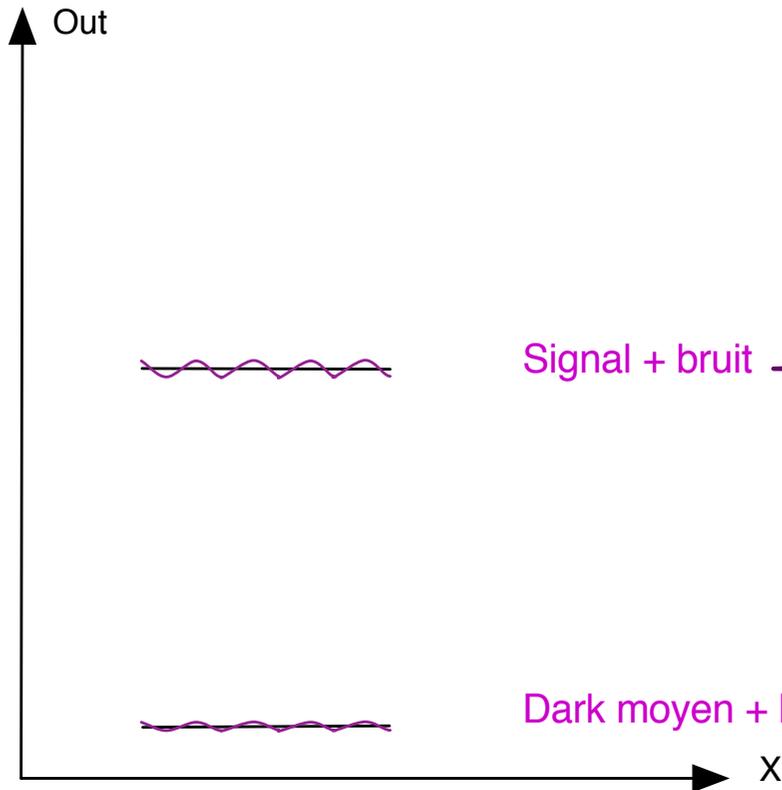
Signal et bruit

Signal de la source $S/B = \frac{S_{source}}{\sigma_{source}} = N / \sqrt{N} = \sqrt{N} = \sqrt{\phi \cdot t}$

Rapport S/B augmente en racine de t (lentement)

Source uniforme

Out



Signal + bruit {
Bruit de photon ($\sqrt{\text{signal source}}$)
Bruit de lecture (constant)
Bruit de numérisation (petit)

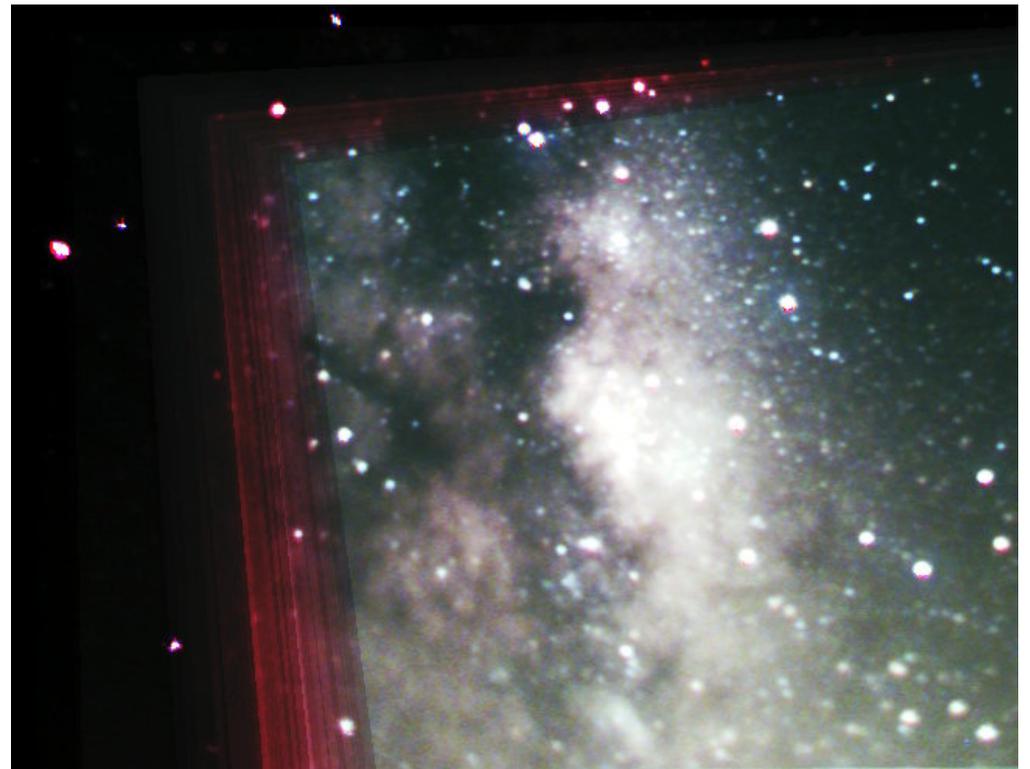
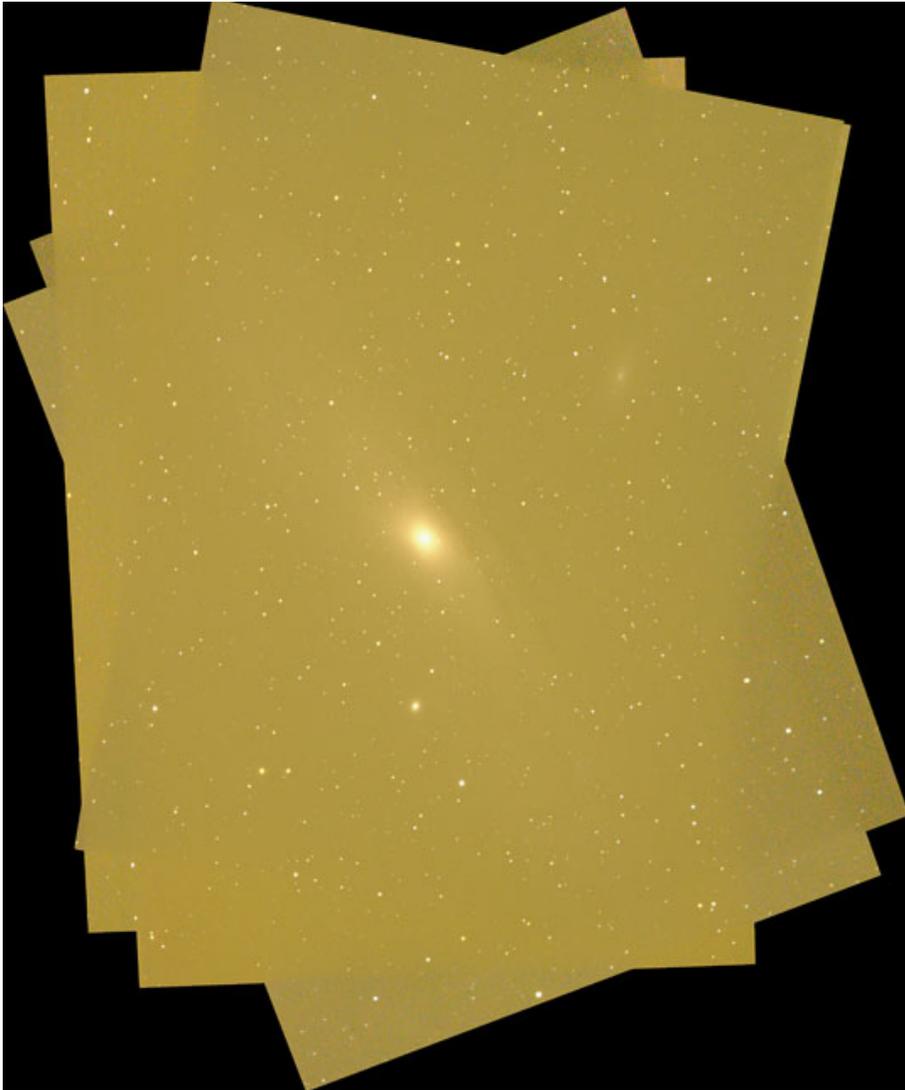
↑ Allonger le temps de pose

Sommer ?

↓ Refroidir

Réduction du bruit par moyennes

- Poses successives => piles d'images recentrées/alignées sur l'objet



Réduction du bruit par moyennes

- Correspondance dans le plan X/Y
=> centrage, rotation, agrandissement
- Sommation, moyenne ou médiane en Z

n images

S : signal moyen

B : bruit individuel



Réduction du bruit

	Signal total (moyenne)	Bruit de lecture (écart-type)	Rapport signal sur bruit
Pose de 1 seconde	Signal	σ_{lect}	$R = \text{Signal} / \sigma_{\text{lect}}$
Somme de 10 poses de 1 seconde	10 . Signal	$\text{sqrt}(10) \cdot \sigma_{\text{lect}}$	$\text{sqrt}(10) \cdot R$
1 pose de 10 secondes	10 . Signal	σ_{lect}	10 . R

Rapport signal sur bruit dans une situation dominée par le bruit de lecture (usuelle)

Techniques de réduction du bruit

- **Sommation de poses successives**

- Signaux ajoutés ($n \times S$)
- Bruits de lecture ajoutés quadratiquement ($\sqrt{n} \times B$)
- Rapport signal sur bruit augmente lentement ; applicable aux darks

- **Pose longue**

- Signaux ajoutés ($n \times S$)
- Bruit de lecture inchangé (B)
- Signal sur bruit augmente vite ssi on est limité par le bruit de lecture !
- Signal sur bruit augmente lentement quand on est limité par le bruit de photon

=> Optimiser le temps de pose et le binning à l'acquisition !

- **Binning**

- Efficace si effectué pendant la lecture (bruit de lecture inchangé)
- Moins efficace si effectué après acquisition (par logiciel)

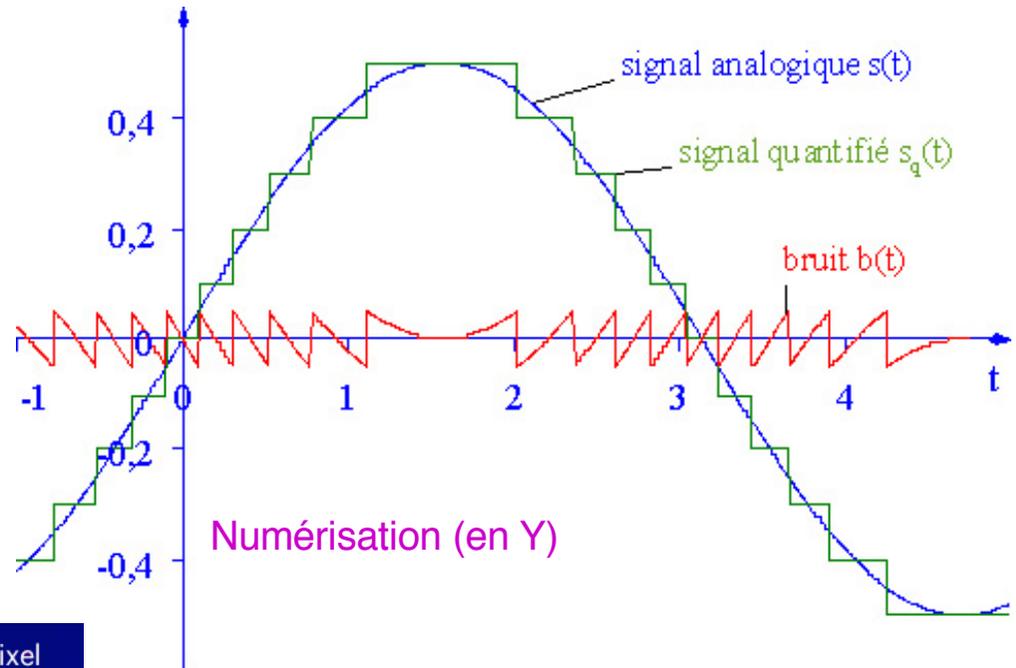
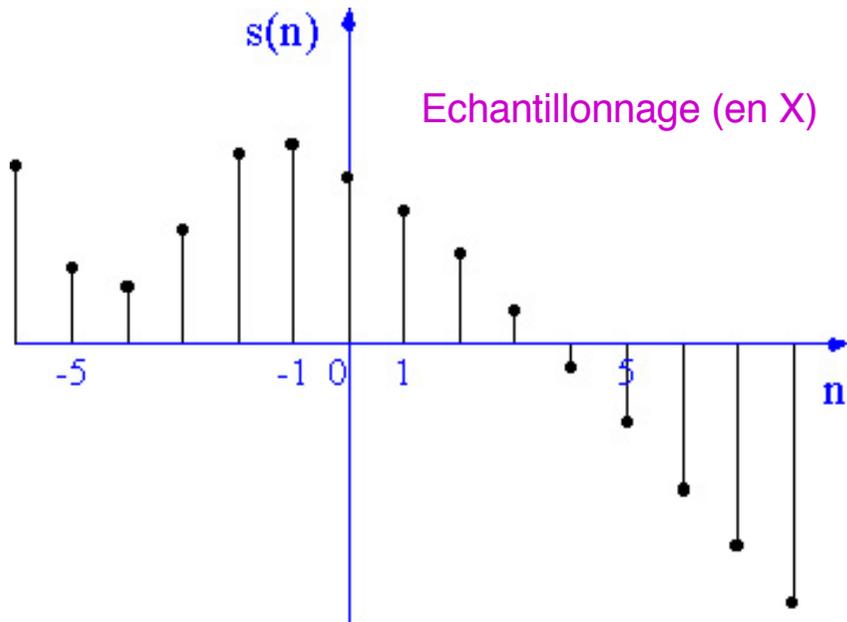
- **Médiane de poses successives**

- Très efficace pour filtrer les mesures aberrantes (rayons cosmiques, parasites...)
- Ne réduit pas le bruit à strictement parler (mais \sim équivalent avec ≥ 30 images)

- **Sigma-clipping**

- Moyenne + rejet des valeurs aberrantes : élimine les pics et augmente le S/B

Numérisation (rappel)



Niveaux de gris	Bits / pixel
2	1
4	2
8	3
16	4
32	5
64	6
128	7
256	8

Nb de niveaux de gris = $2^{\text{bit/px}}$

Bruit numérique = erreur d'arrondi

Dépend du nombre de bits de codage

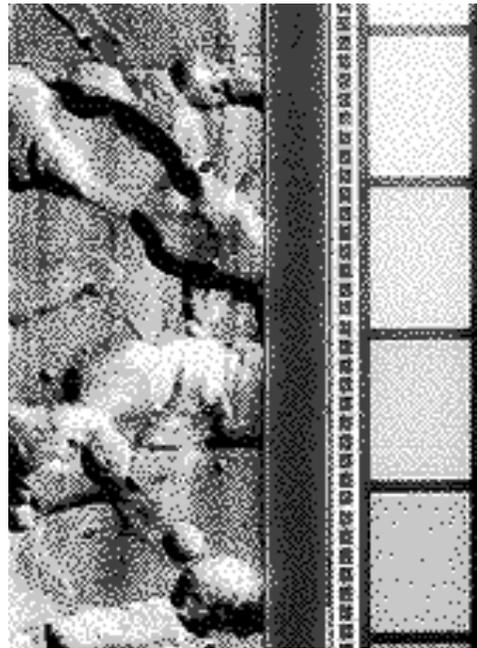
Exercice amusant : montrer que

$$\sigma_{numer} = 1/\sqrt{12} \quad (\text{en pas-codeurs})$$

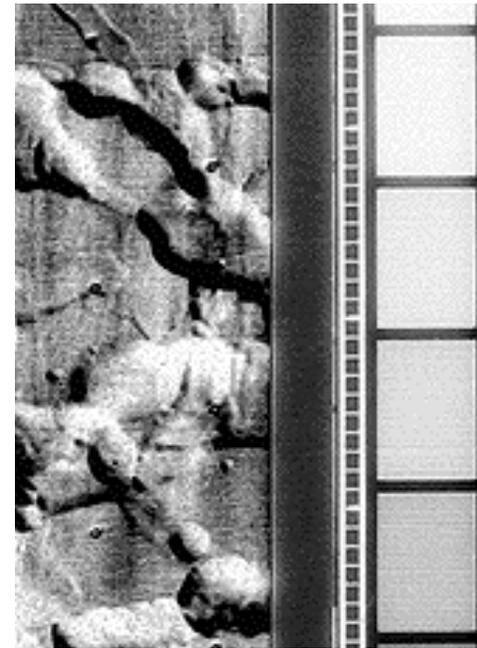
Numérisation (rappel)



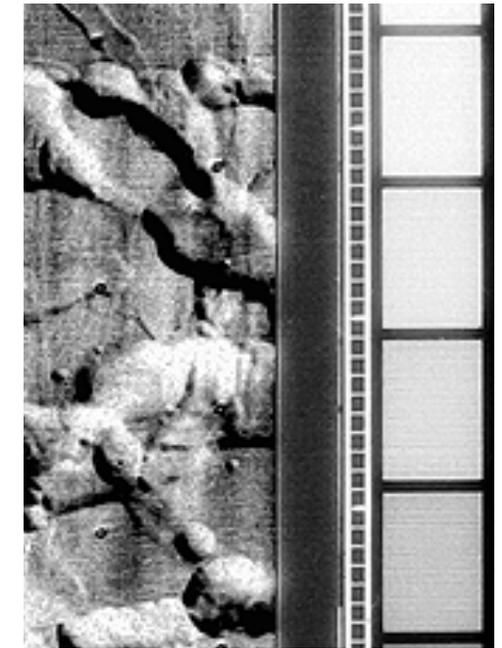
1 bit
2 possible values



2 bits
4 possible values



4 bits
16 possible values



8 bits
256 possible values

Mariner 9 / Mars

=> La dynamique affecte la résolution spatiale

CCD astro typiquement en 12-16 bits

Attention: la profondeur annoncée n'est pas forcément atteinte (rampe irrégulière)

Numérisation (rappel)

Idem en couleurs



2 bits



4 bits



8 bits

CCD astro typiquement en 12-16 bits

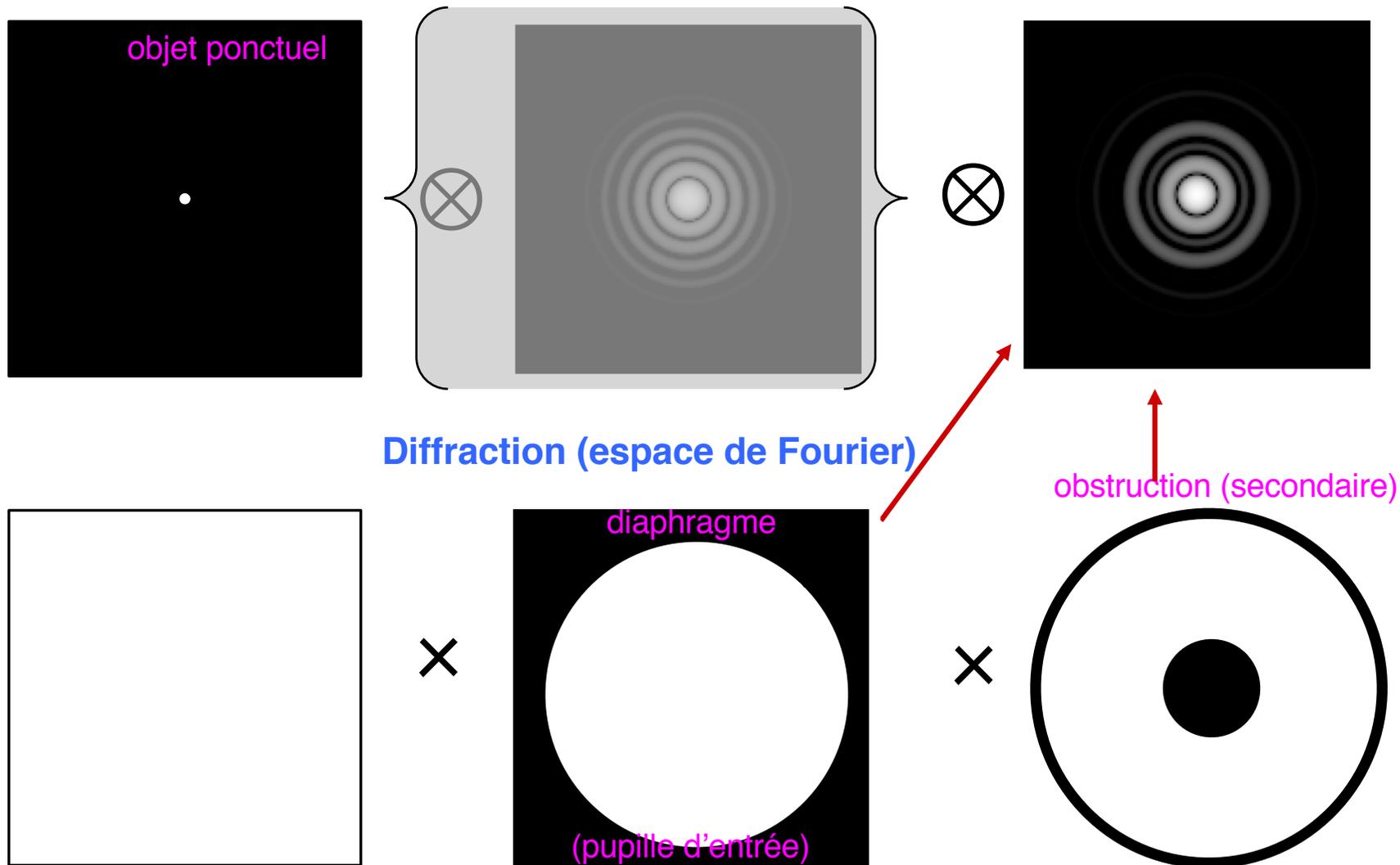
Attention: la profondeur annoncée n'est pas forcément atteinte (rampe irrégulière)

Formation d'images (rappels)

Voir cours d'optique / instrumentation

Qu'est-ce qu'il y a dans le champ de vue ?

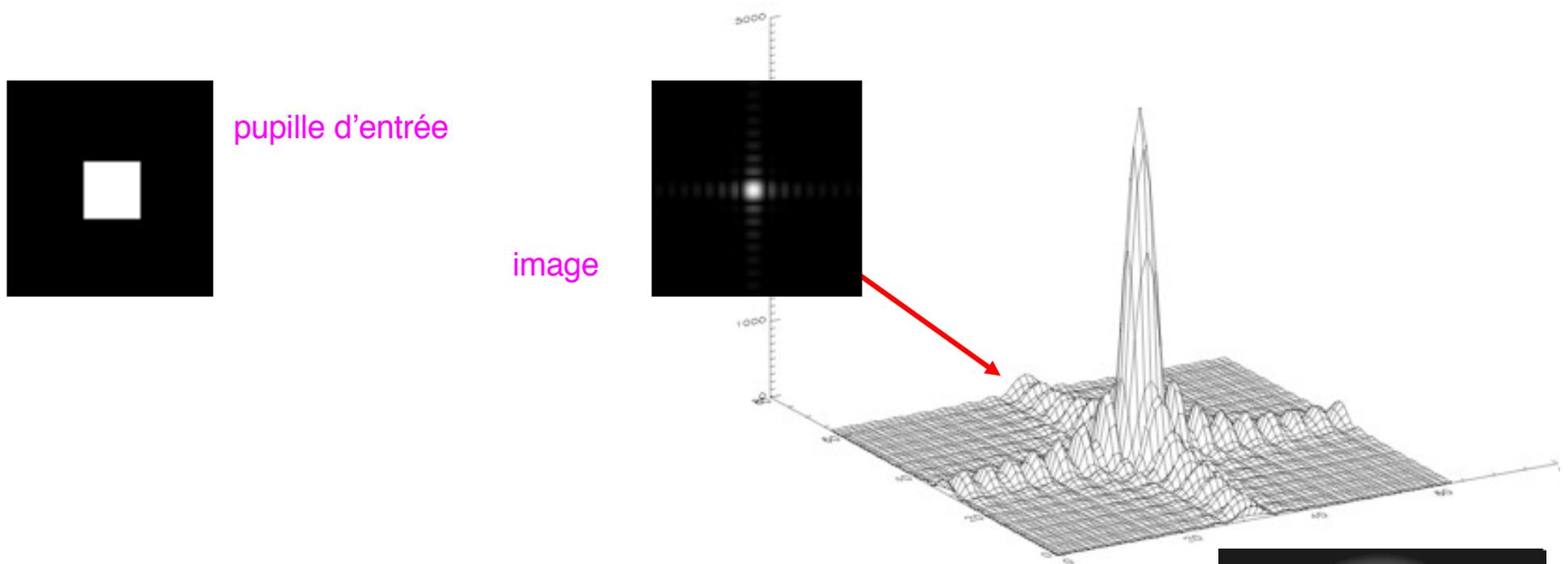
Source à l'infini (espace direct)



Formation d'images (rappels)

Voir cours d'optique / instrumentation

- Dans les meilleures conditions, l'image d'un point est une tache
 - Pupille éclairée par une source à l'infini \Rightarrow **Intensité image = (TF de la pupille)²**
 - Pupille rectangulaire, fente de spectro \Rightarrow **Intensité en (sinus cardinal)²**



- Pupille circulaire \Rightarrow idem à symétrie circulaire :
fonction d'Airy (fait intervenir des fonctions de Bessel de 1re espèce)

\Rightarrow **l'image d'un point par une optique parfaite avec pupille circulaire est une série d'anneaux concentriques, décroissants**

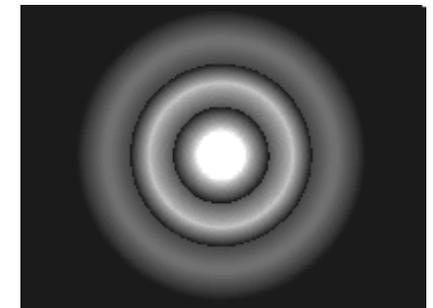
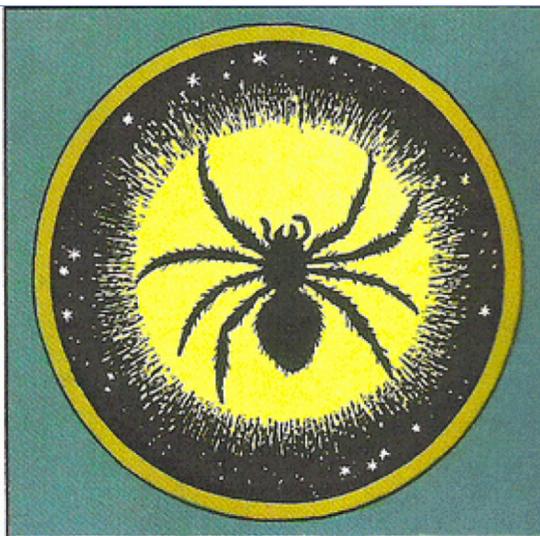
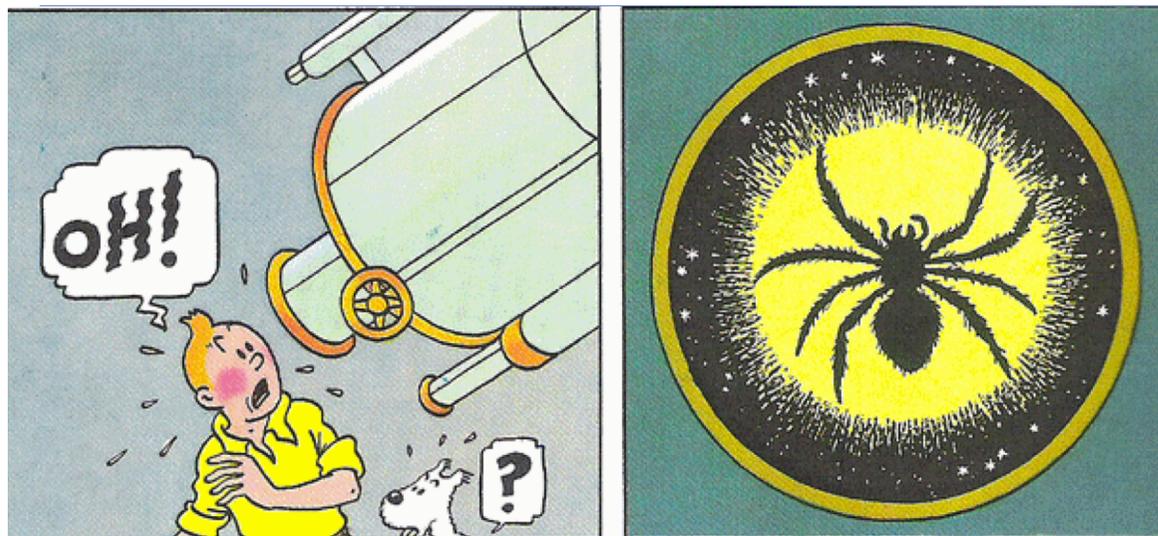


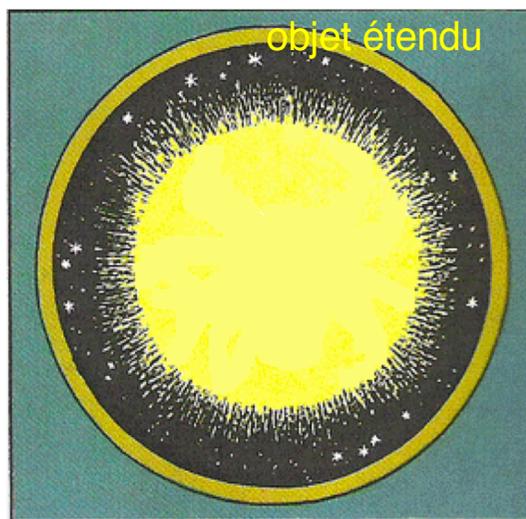
Figure 1 : Image d'une étoile

L'araignée non-fouriériste

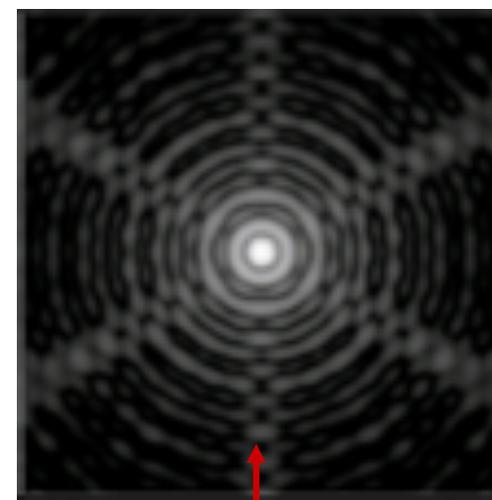


?

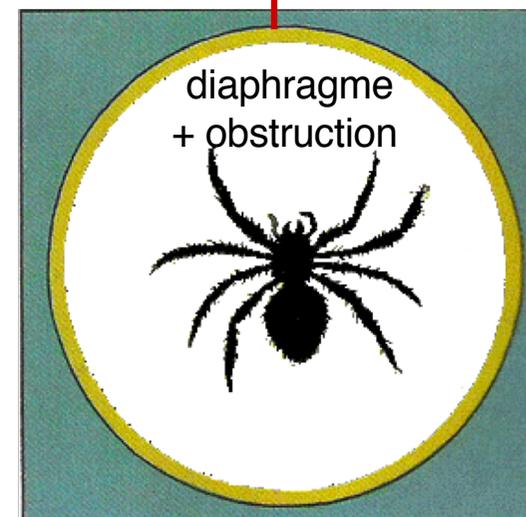
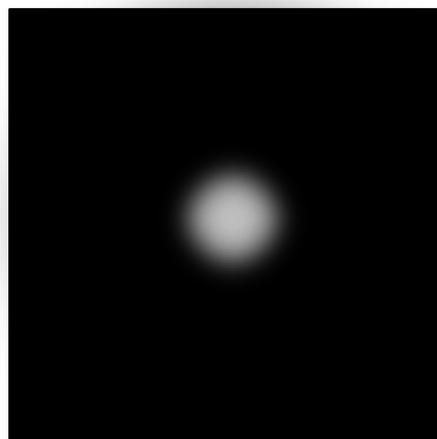
L'araignée non-fouriériste



Source à l'infini (espace direct)



Diffraction (espace de Fourier)



Formation d'images

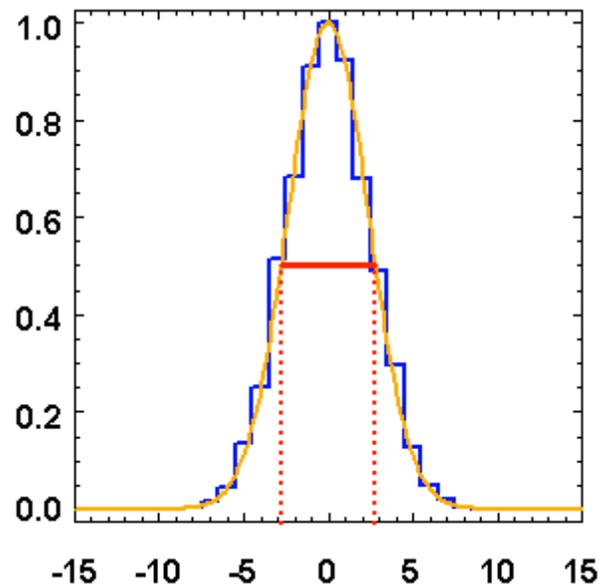
En pratique :

Réponse impulsionnelle en intensité = **Fonction d'étalement de point (PSF)**

Plutôt à profil gaussien (TF de la pupille étalée par la turbulence atmosphérique)

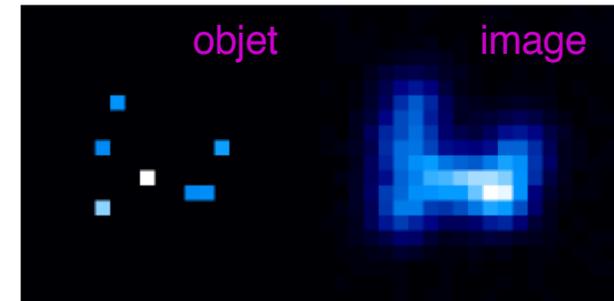
$$\text{Image} = \text{objet} \otimes \text{PSF}$$

convolution



Si PSF compacte et symétrie circulaire,
caractérisée par sa largeur à mi-hauteur (FWHM)

Pas nécessairement uniforme sur le champ
Il peut exister des lobes secondaires



Fonction de transfert de modulation (FTM ou MTF) ~ TF de la PSF, normalisée

Pupille finie => MTF à support borné <=> filtre les hautes fréquences spatiales

Plus la pupille/le miroir est large, plus on a de détails (tant qu'on n'est pas limité par autre chose)

(pupille = filtre passe-bas pour les fréquences spatiales)

De quoi dépend la PSF ?

- **Télescope** (diamètre D) :

Résolution angulaire $\sim 1,22 \lambda / D$ (position du premier zéro de la tache d'Airy,
= mi-largeur du pic central, en radians)

Ça va mieux à courtes longueurs d'onde et avec un grand miroir

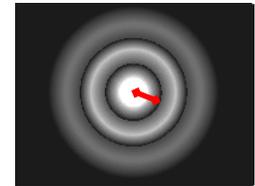


Figure 1 : Image d'une étoile

- **Atmosphère** :

La turbulence dégrade la résolution angulaire

Cellules => télescope de ~ 50 cm (= paramètre de Fried)

Ça se passe mieux à grandes longueurs d'onde (infrarouge), aux courtes poses et vers le zénith

Seeing :

Estimation de la résolution au moment des observations

2" est très bien, 0.5" exceptionnel (= limite de diffraction avec $D \sim 1$ m)

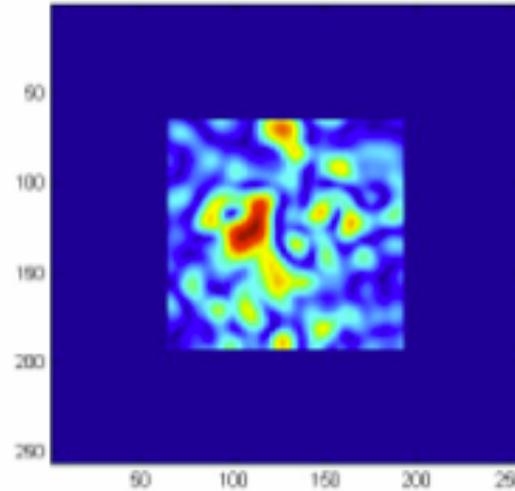
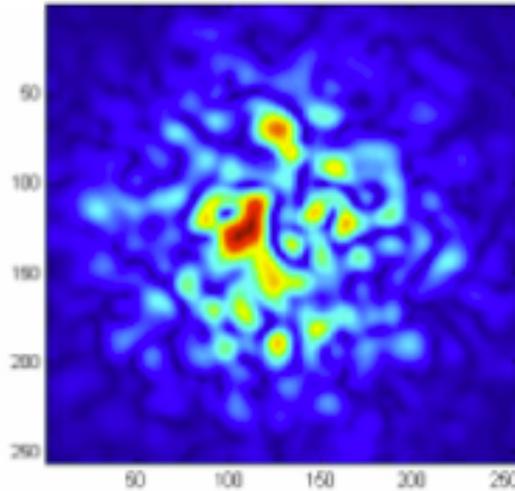
Améliorations possibles:

- enlever l'atmosphère (télescope orbital)
- corriger la turbulence (poses courtes, interféro. des tavelures, Optique Adaptative)

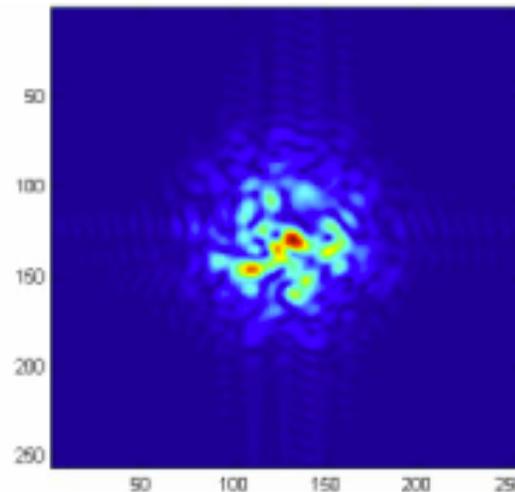
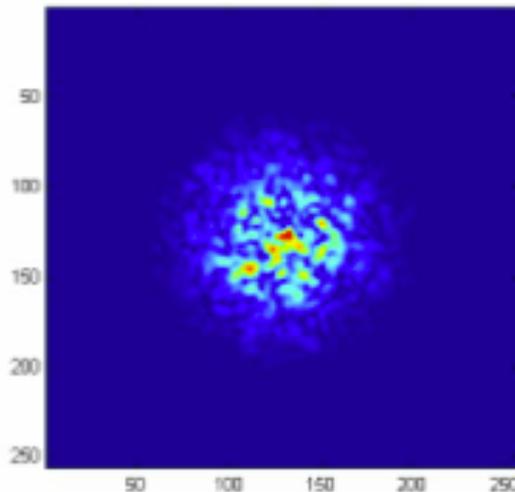
De quoi dépend la PSF ? Largeur du champ

Ouverture large u

$u \cdot \text{rect}$ Ouverture diaphragmée



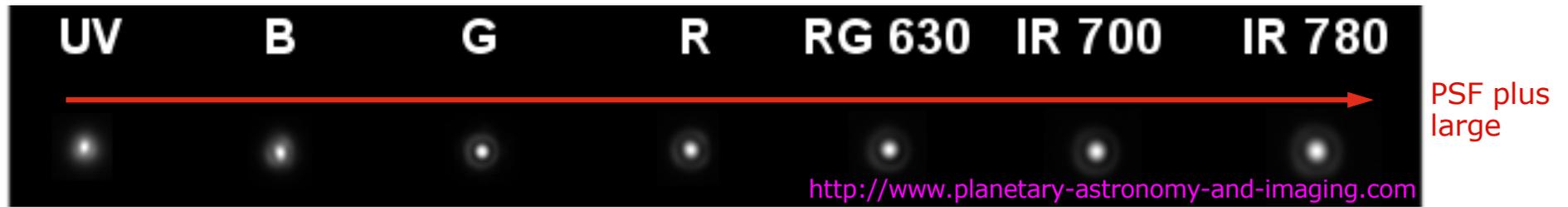
Plan de Fourier



Plan image

- Perte de résolution
- « Ringing »
(\leq lobes secondaires du sinus cardinal)

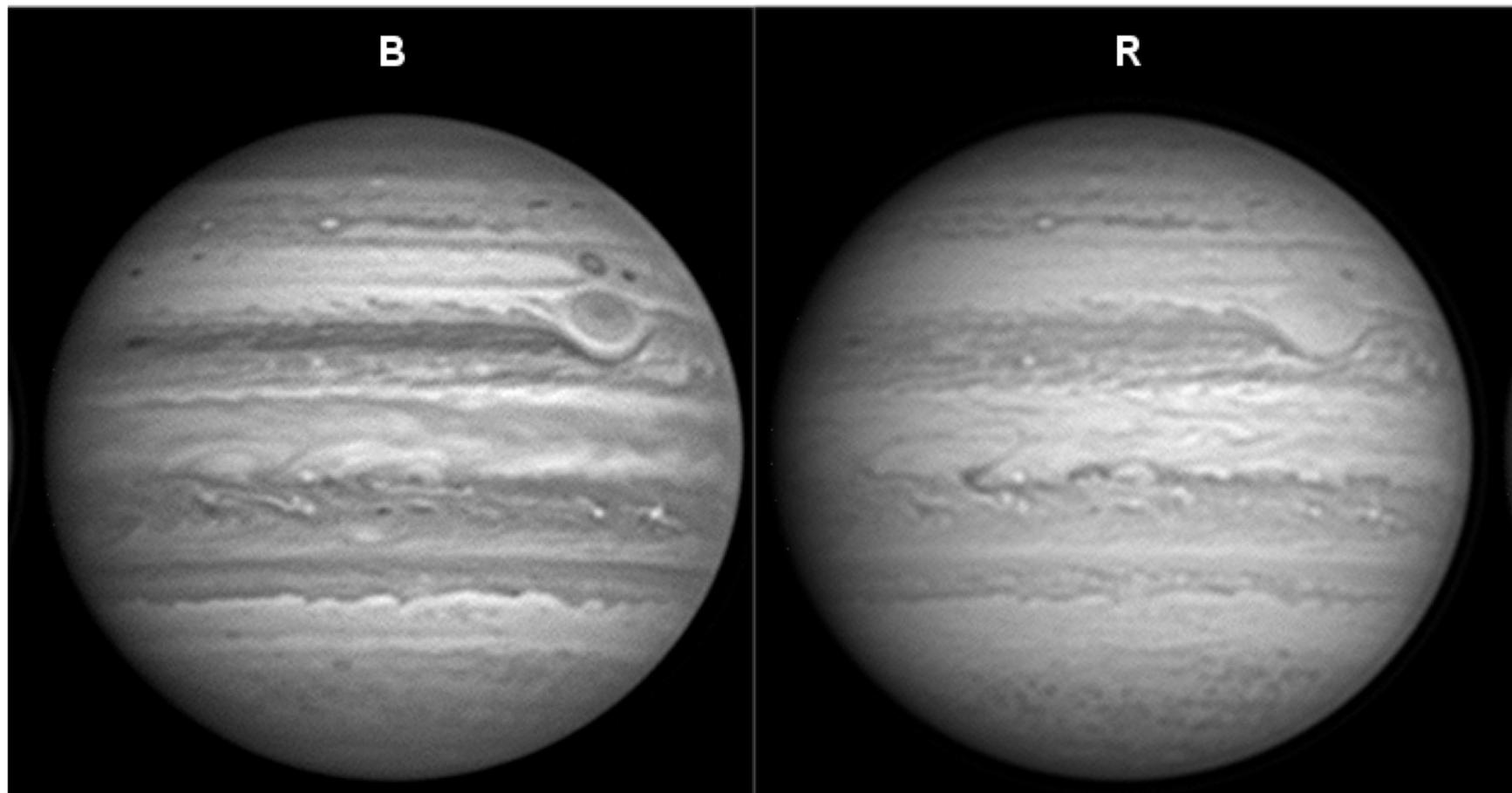
De quoi dépend la PSF ? Longueur d'onde



Variation avec la longueur d'onde: effet de l'optique

(situation d'atmosphère très stable [plutôt rare] et petit télescope)

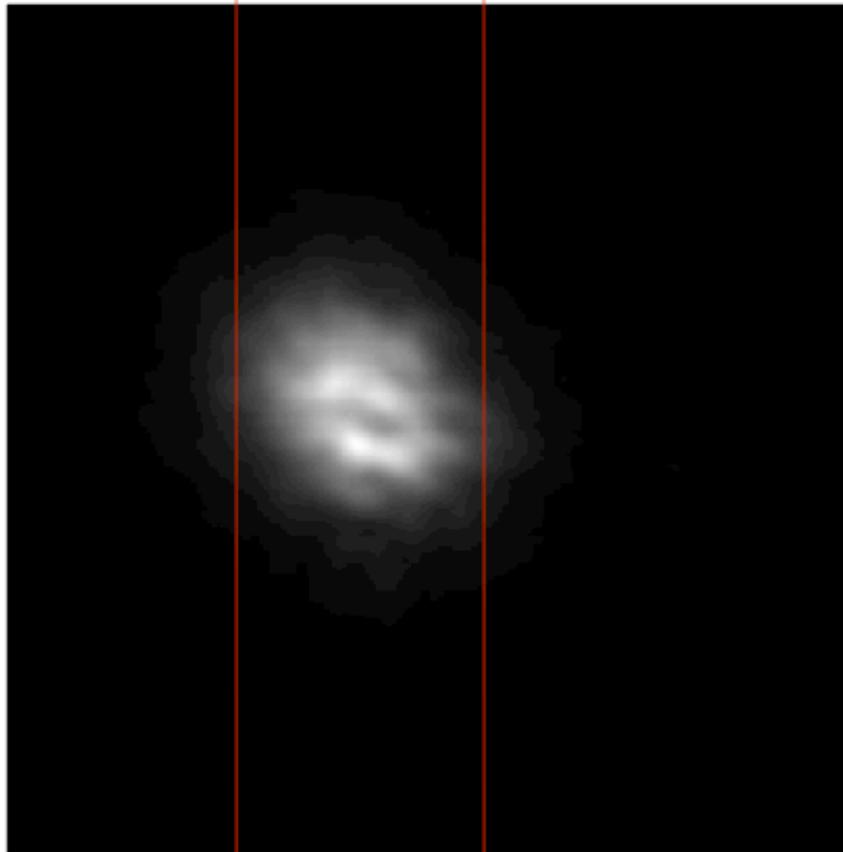
$D = 0,25 \text{ m}$



De quoi dépend la PSF ? Turbulence

Source ponctuelle

0,4"



Meilleure image VLT
atmosphérique

0,04"

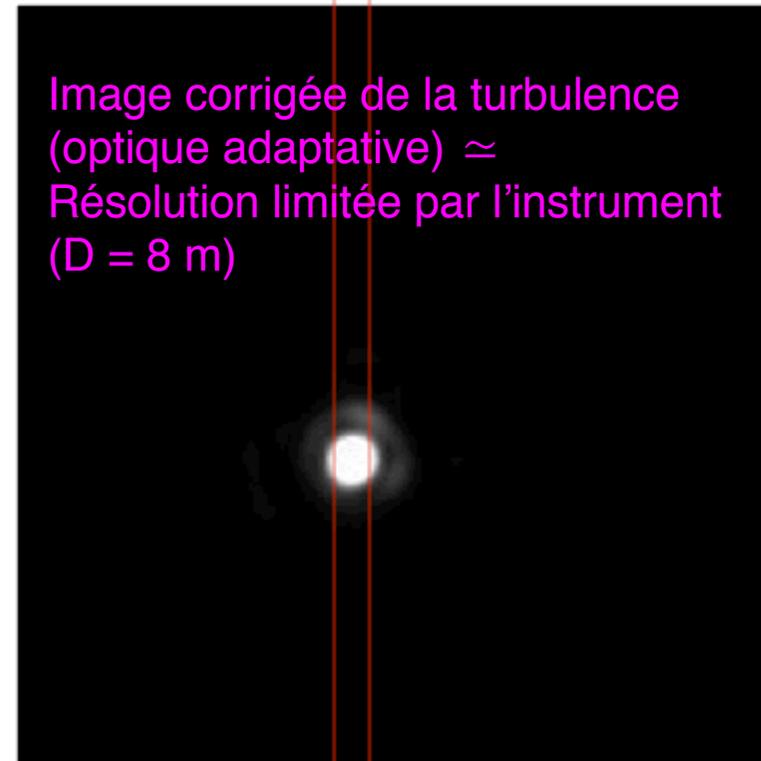


Image corrigée de la turbulence
(optique adaptative) \simeq
Résolution limitée par l'instrument
(D = 8 m)

Image VLT+NAOS à 2,2 μm

$1,22 \times 2,2 \mu\text{m} / 8 \text{ m} \sim 0,31 \cdot 10^{-6} \text{ rad} \sim 0,07''$

Résolution angulaire

Champ continu

Objet \otimes turbulence

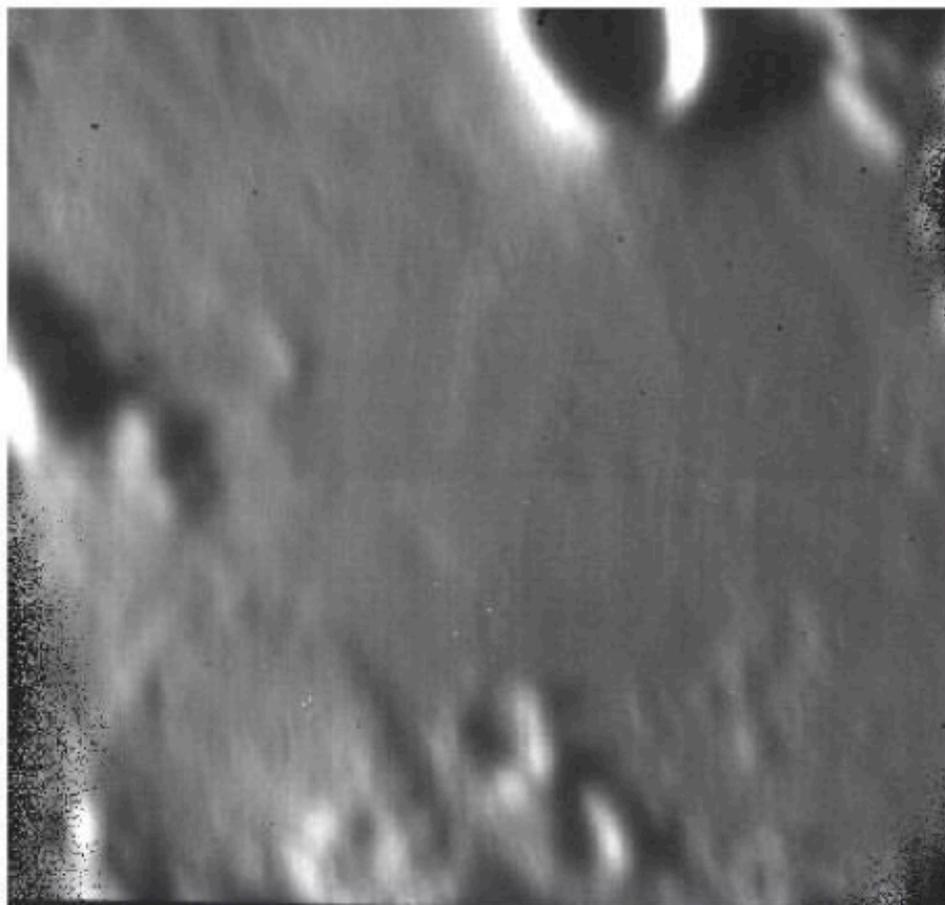


Image corrigée AO, objet \otimes instrument

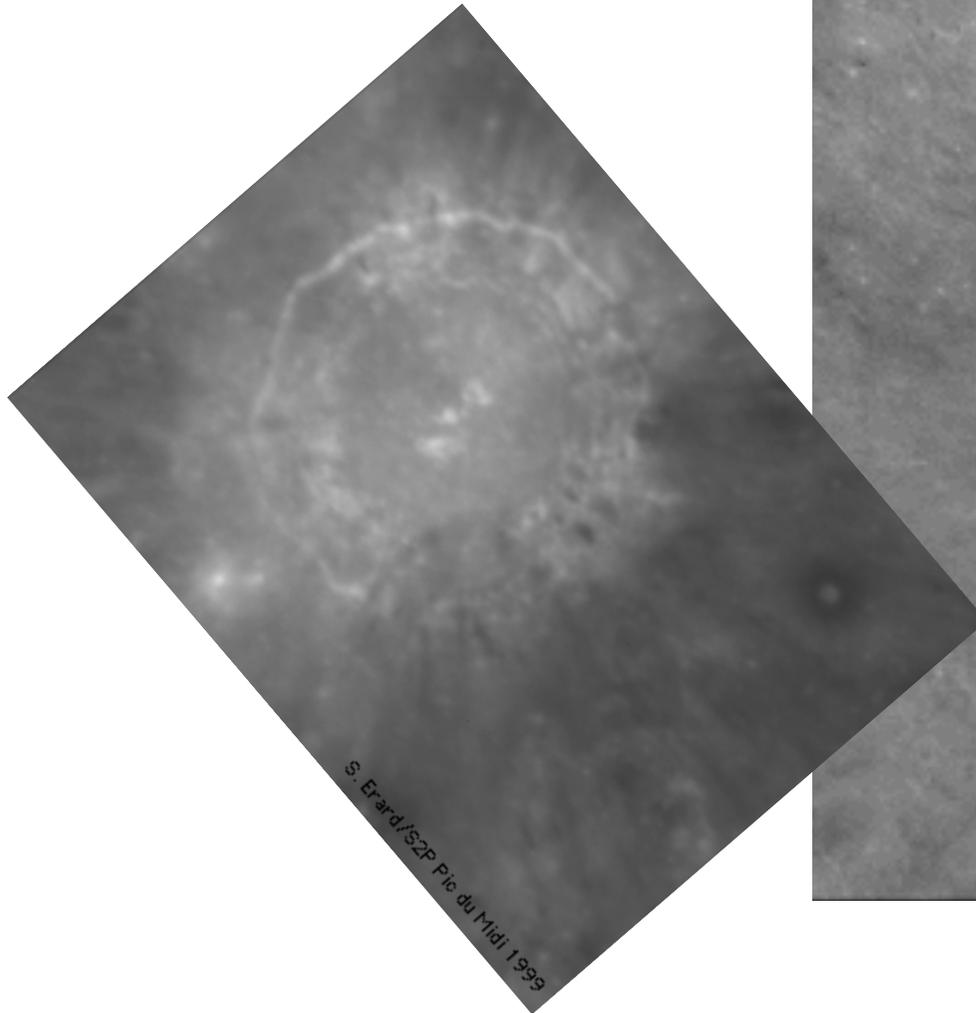


~60 km ~30 arcsec

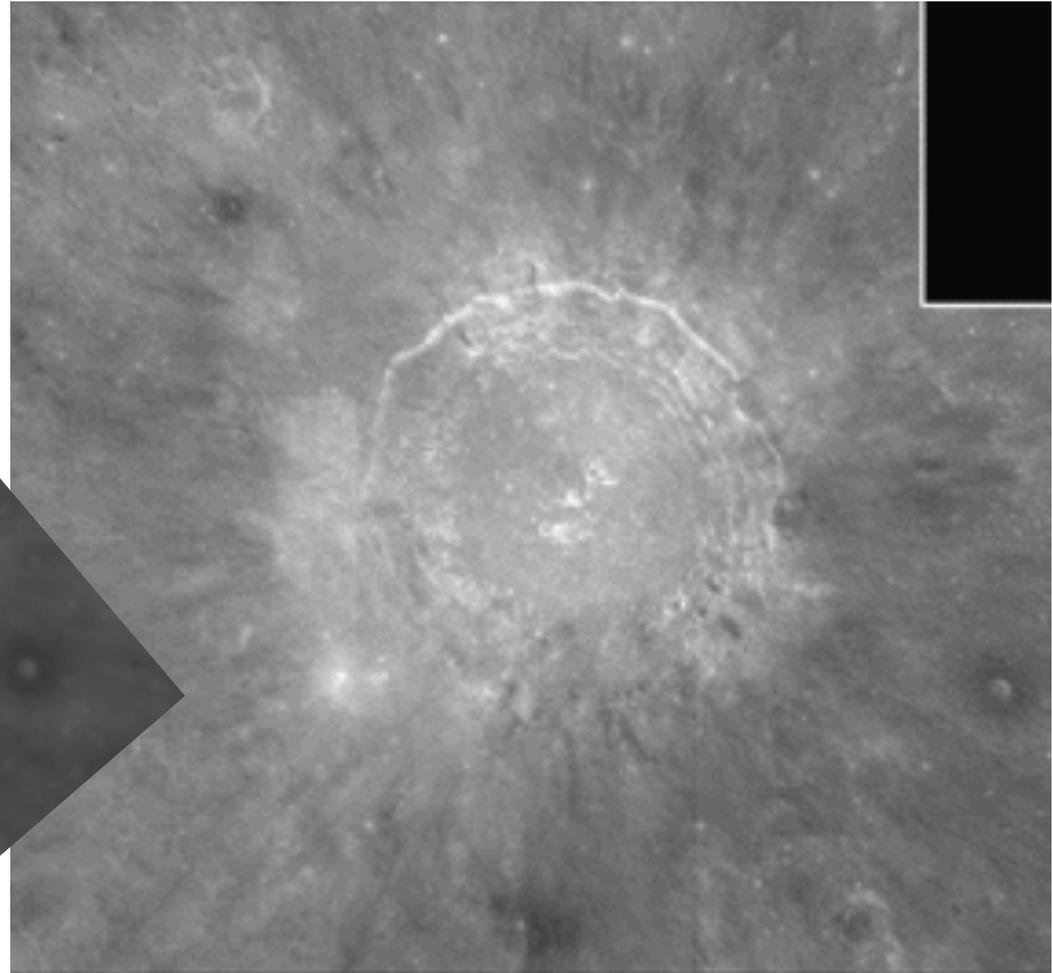
Résolution angulaire

Champ continu

T1m / OMP (altitude 3000 m,
pose courte, très bonne image)



HST (pas de turbulence, D = 2,4m)

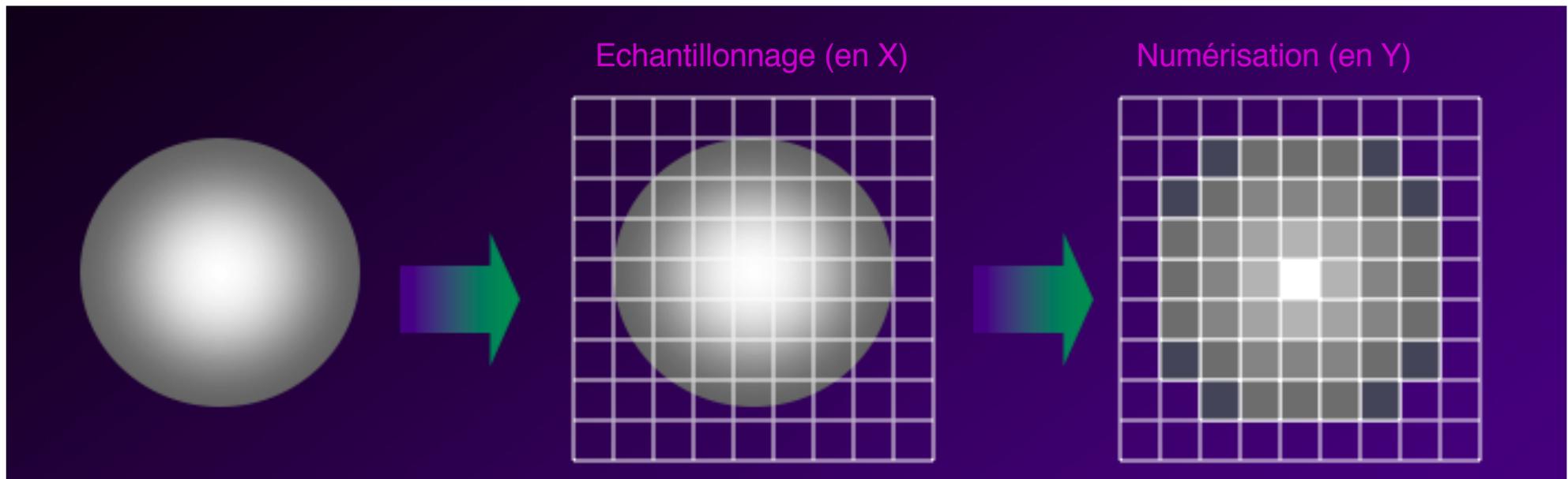
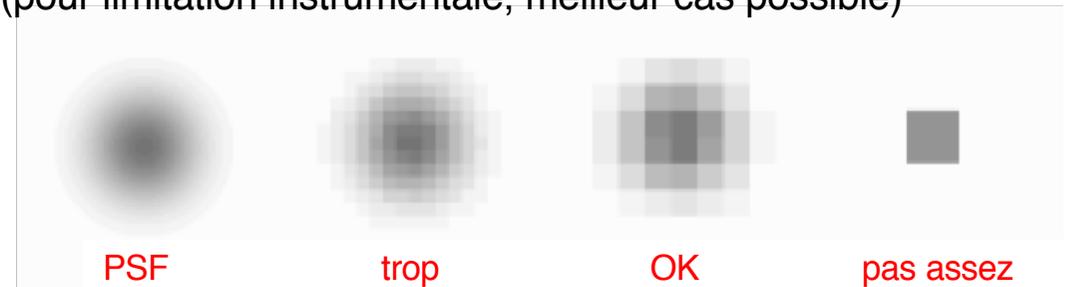


Echantillonnage du plan image (rappel)

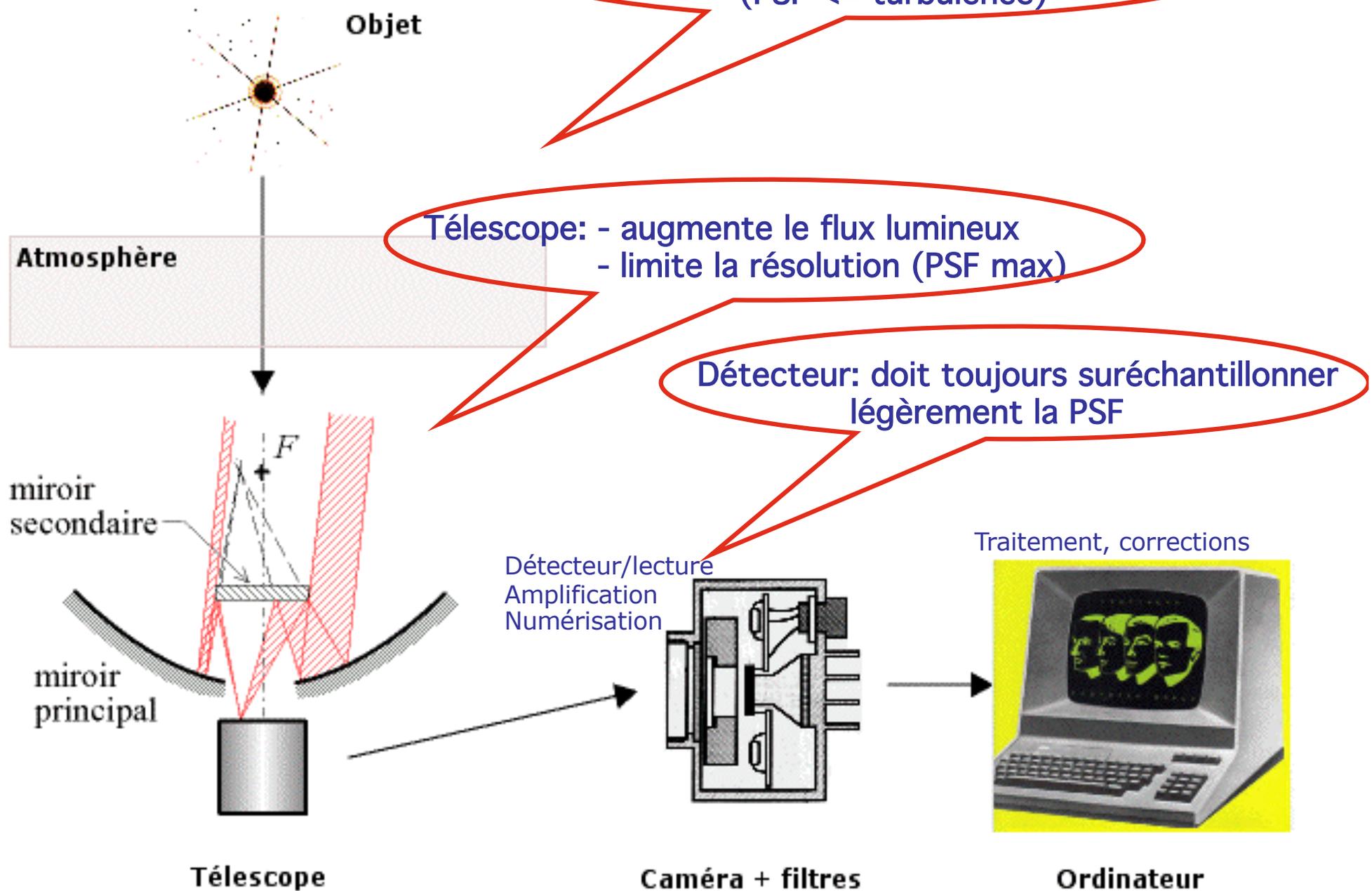
- Taille de Θ_{\min} dans le plan image = $f \times \Theta_{\min}$
- Théorème de Shannon : 2 points de mesure / élément résolu (ie : dans la PSF)

⇒ taille des pixels détecteur = $0,61 f \lambda / D$ (pour limitation instrumentale, meilleur cas possible)

Résolution \neq taille pixel !
C'est la PSF qui donne la résolution,
pas la taille du pixel,
qui est toujours plus petite



Influence des autres éléments



Vade-mecum

A optimiser au moment de l'acquisition

- **Seeing** (qualifie la turbulence)
- **Temps de pose** (signal max, sans saturation)
- **Binning** (bruit de lecture min, sans perte de résolution)
- **Ne pas oublier de mettre au point !**

Après coup (dans logiciel de traitement)

- **Piles, + moyennes / médianes <= recalage**
- **Calibration**
- **Traitements**

Spectroscopie

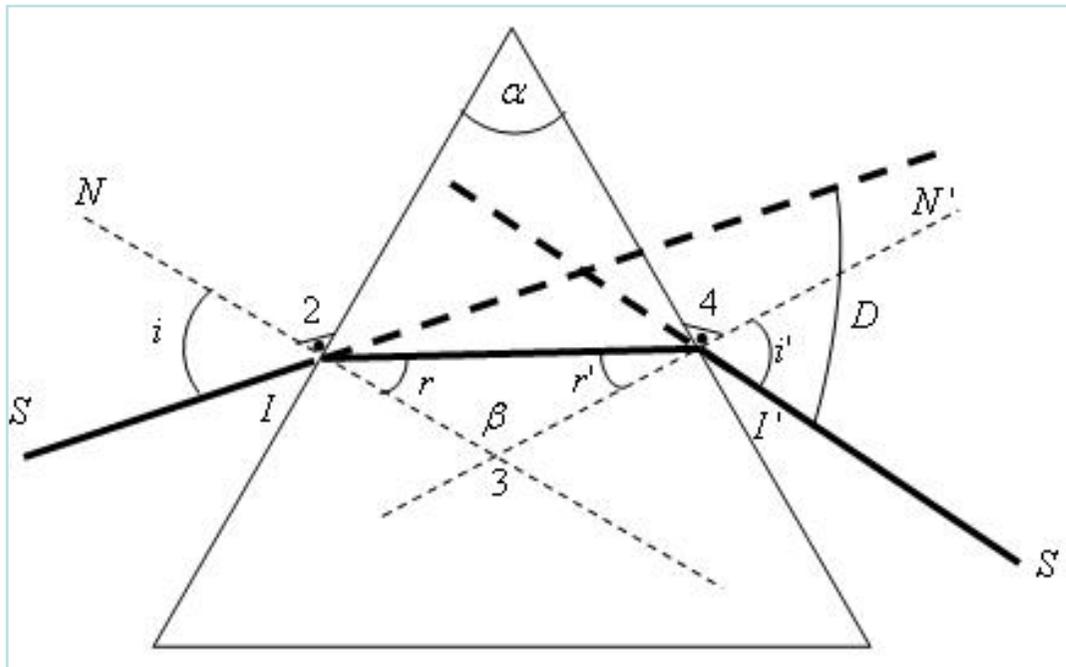
Avec un télescope, on peut faire d'autres choses

Spectroscopie

- **Dispersion de la lumière en longueur d'onde**
 - ⇒ **Estimation de la température des objets**
 - ⇒ **Étude de la composition (raies d'émission ou d'absorption)**
 - ⇒ **En haute résolution: pression, températures... (profil des raies)**

Spectroscopie

Prisme

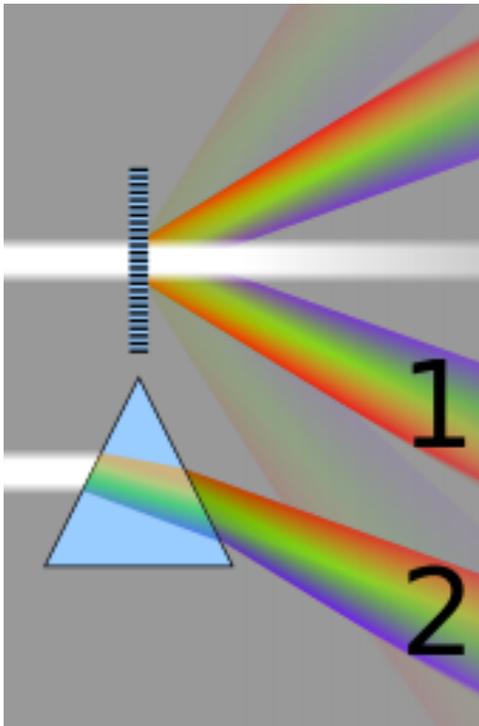


Indice n , fonction de la \lg d'onde

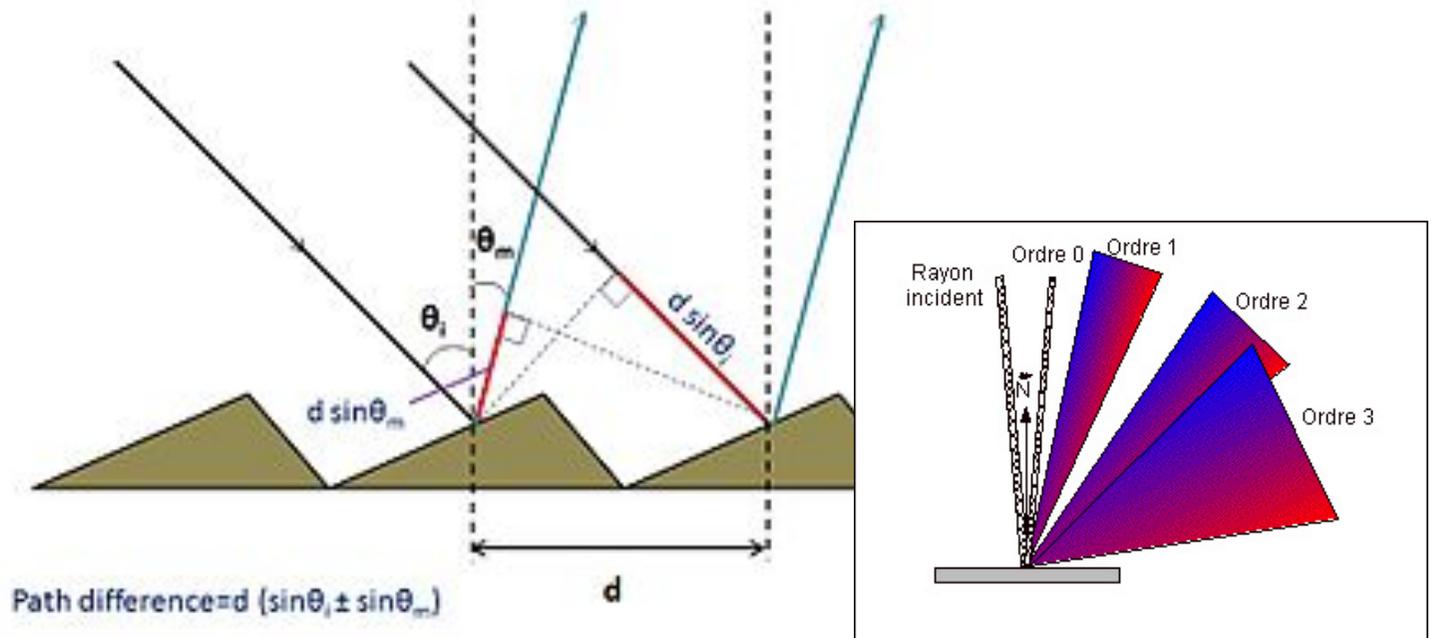
Réfraction dans des directions différentes => dispersion de la lumière

Spectroscopie

Réseau en transmission



Réseau en réflexion



Interférences constructives dans certaines directions θ_m
pour λ donné

⇒ Max de luminosité

$$n_1 \sin \theta_m = n_1 \sin \theta_i - m \frac{\lambda}{d}$$

(d = distance entre traits du réseau)

m = nombre entier ⇒ plusieurs spectres (ordres successifs)

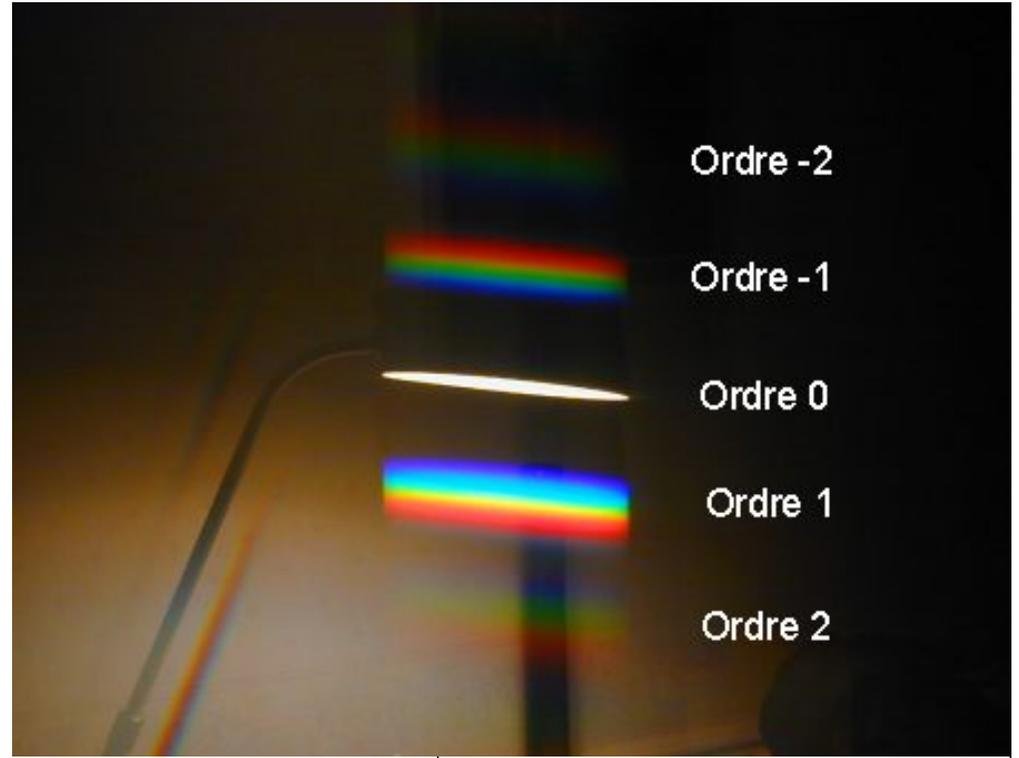
L'ordre 0 n'est pas dispersé (réflexion simple)

Spectroscopie

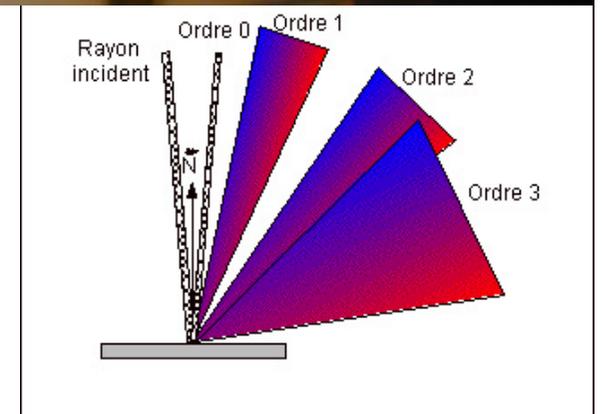
Réseau en réflexion



Source monochromatique (laser)



Lumière blanche

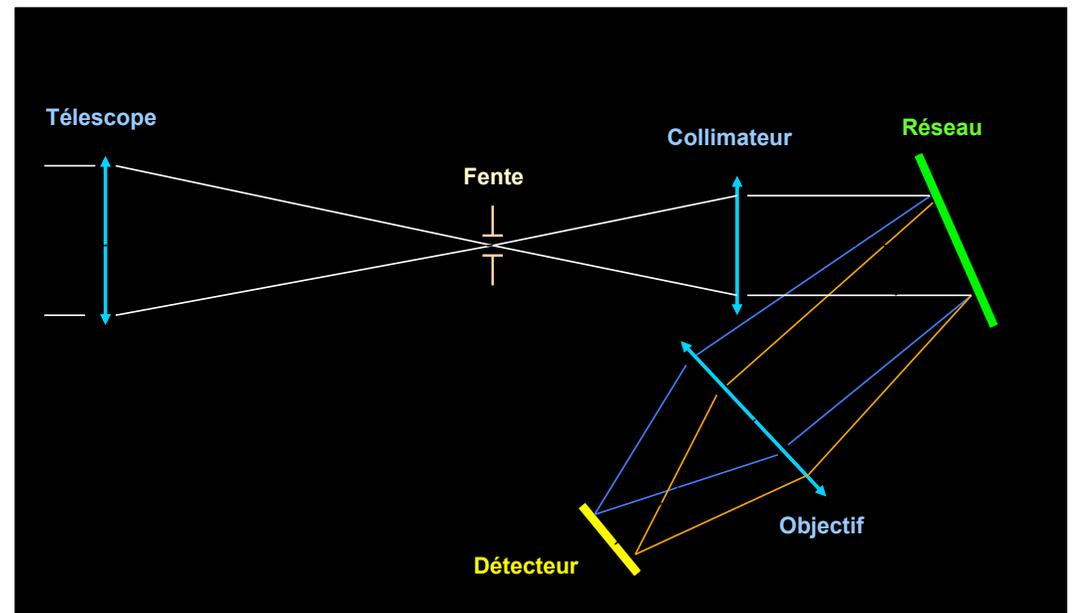


Spectroscopie

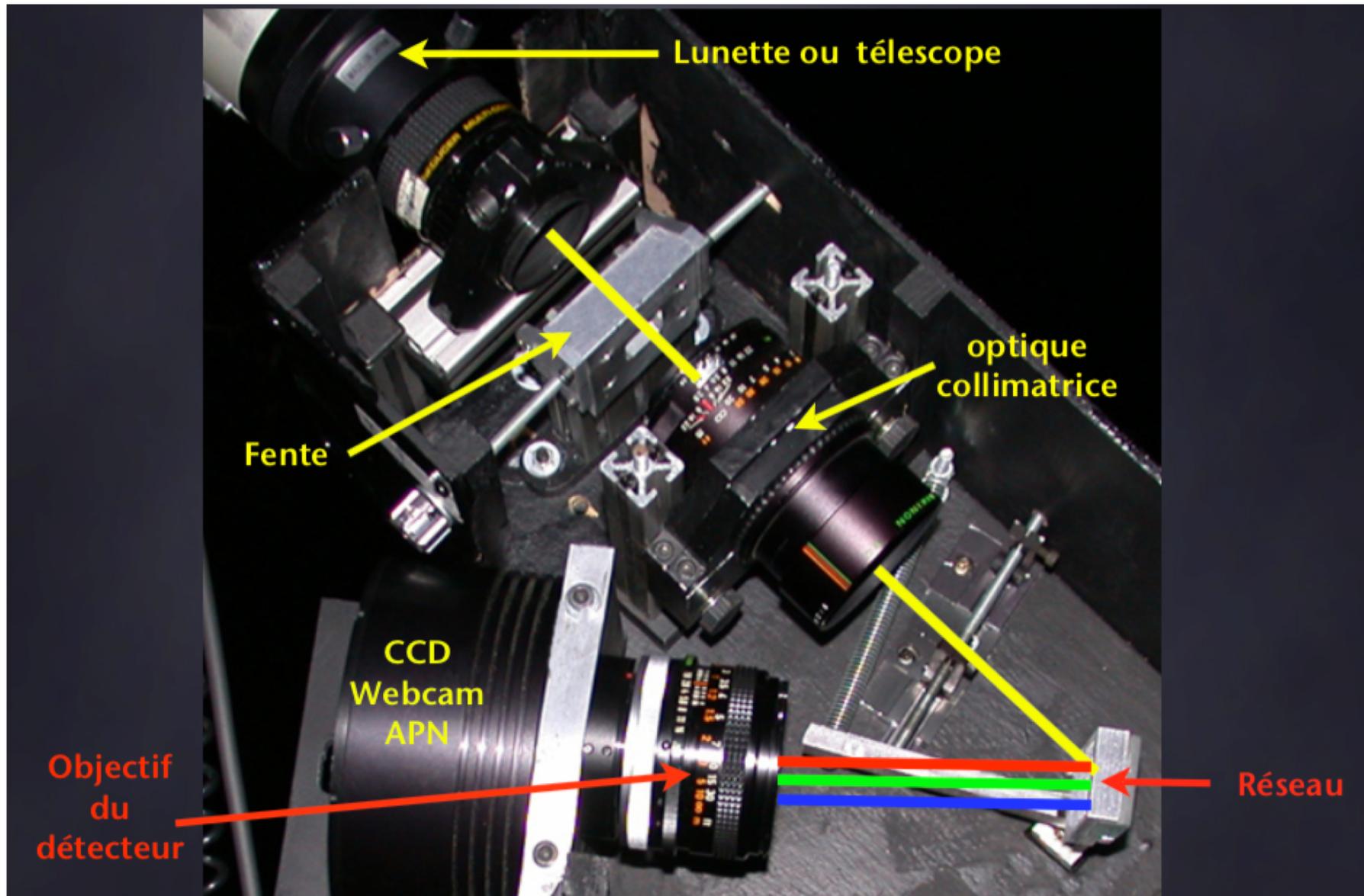
Spectromètre

- On étale la lumière des objets selon une direction spectrale
 - ⇒ On bloque le faisceau dans cette direction pour isoler les objets
 - ⇒ Fente d'entrée orthogonale
 - ⇒ Sur le CCD: une dimension spectrale, une spatiale
- Eclairage du réseau avec un faisceau collimaté
 - ⇒ lentille derrière le télescope
- Il faut faire une image après le réseau
 - ⇒ lentille derrière le réseau
- Si la dispersion est forte:
 - ⇒ basculer le réseau pour sonder tout le domaine spectral

Montage avec 2 lentilles confondues: Littrow



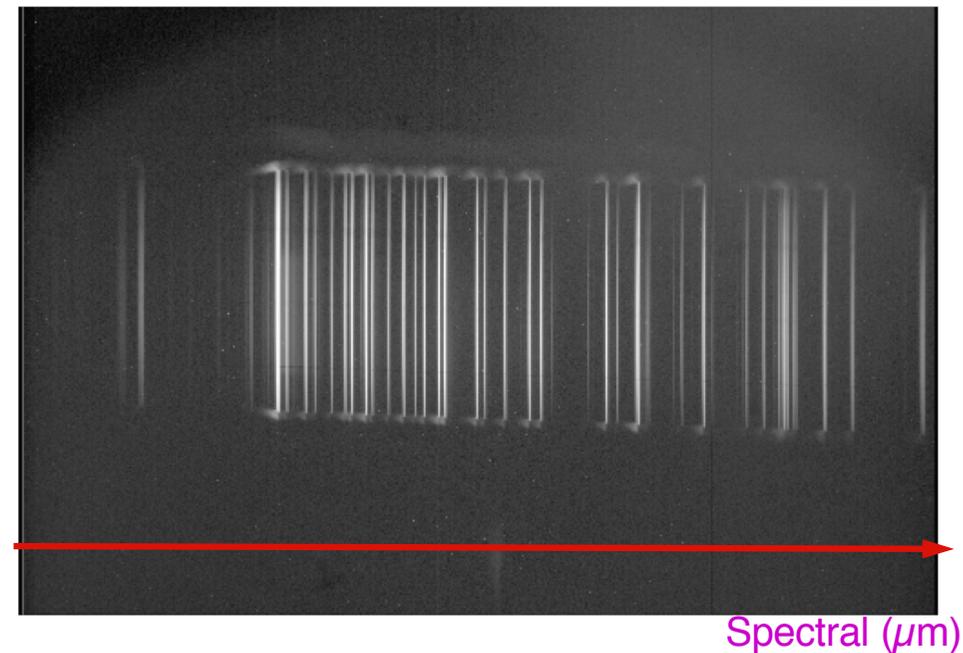
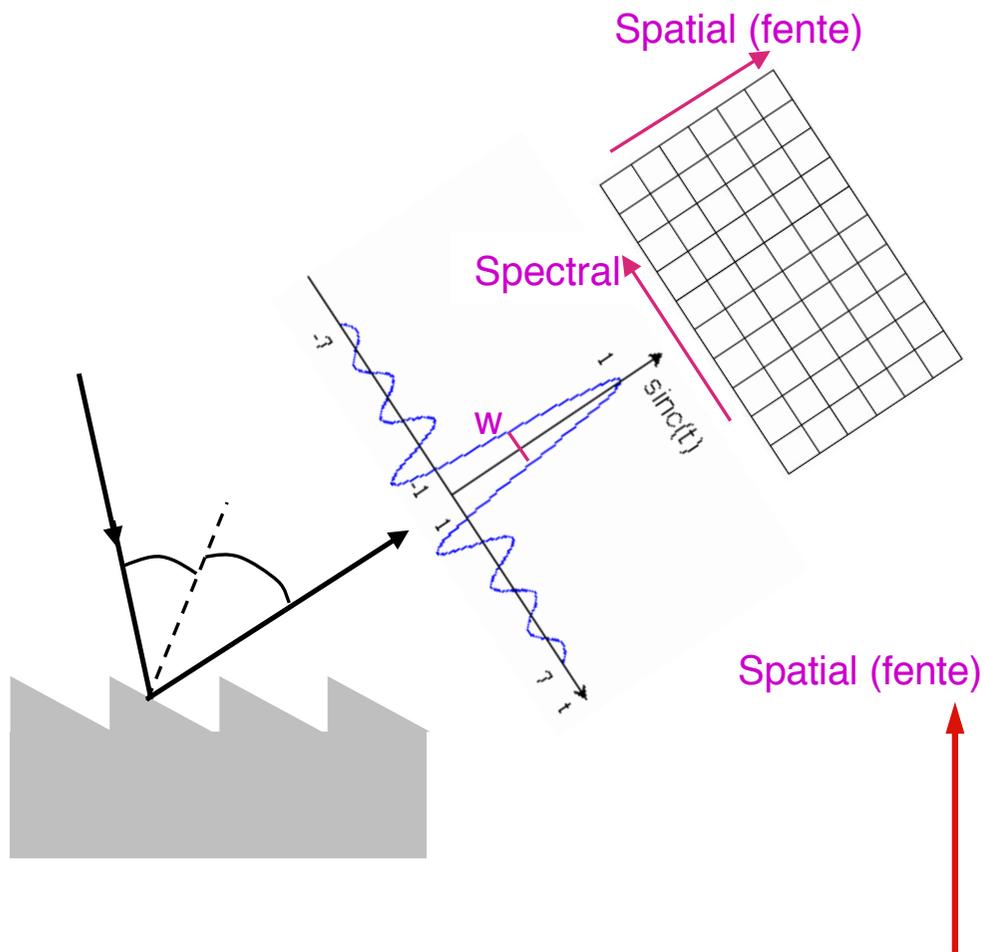
Spectroscopie



Spectroscopie

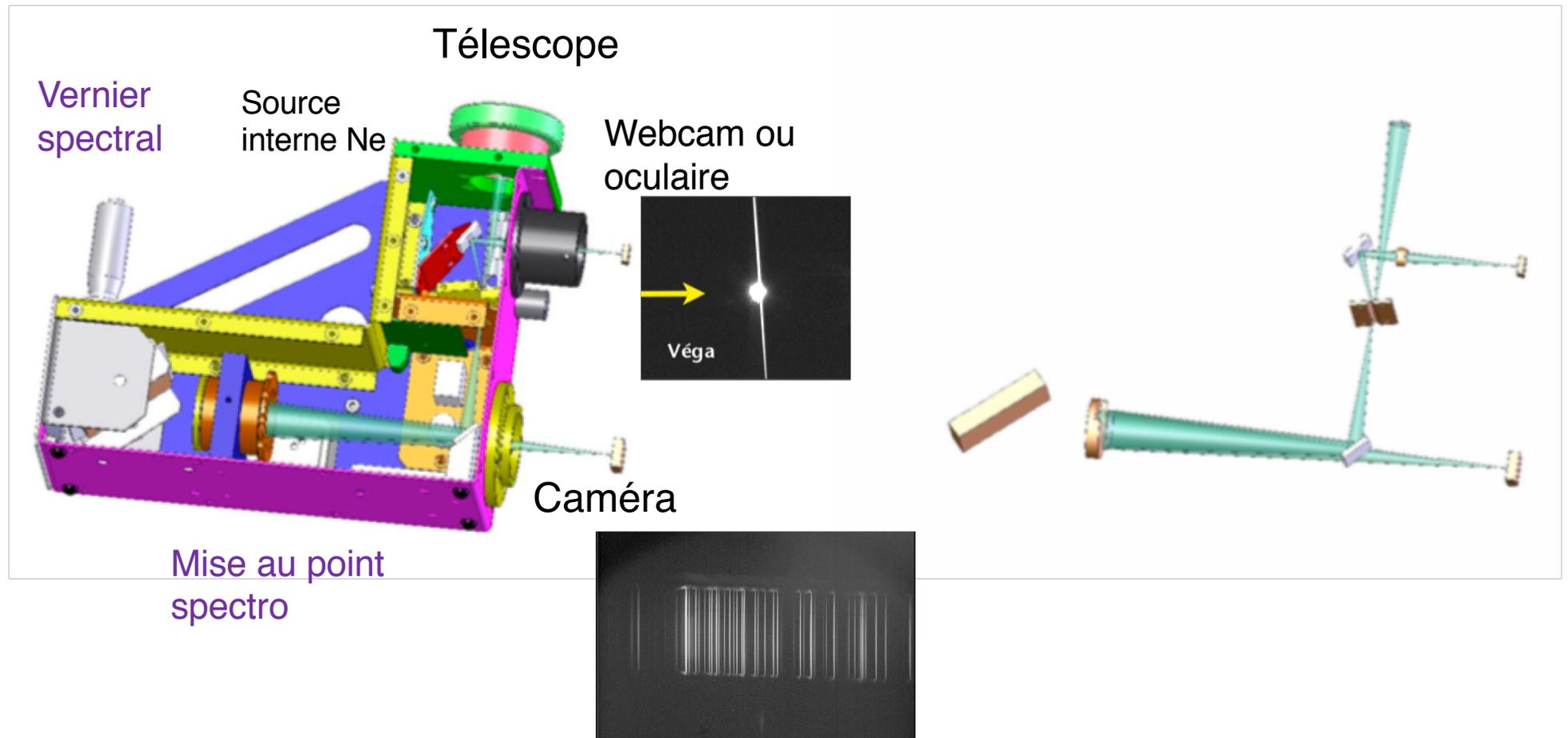
Image de la fente dans diverses longueurs d'onde

- Il faut aligner la fente correctement
 - Il faut étalonner l'axe spectral
- ⇒ Source de référence (avec raies connues: Ne)



Spectroscopie

LHIRES



Spectroscopie

LHIRES

Réglages:

- Repérer 3 positions fixes du vernier pour sonder différentes parties du spectre (rouge, vert, bleu), sans caméra (utiliser la source interne et le plafonnier)
- Etalonner l'axe X avec la source interne (néon) sur les 3 positions du vernier
- Aligner la caméra (image de la fente // axe Y)
- Mettre au point (caméra dans le plan focal de la lentille, raie fines)

- Mettre au point (fente dans le plan focal télescope)
- Mettre la cible dans la fente (oculaire)
- Acquisitions sur les 3 positions du vernier