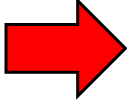
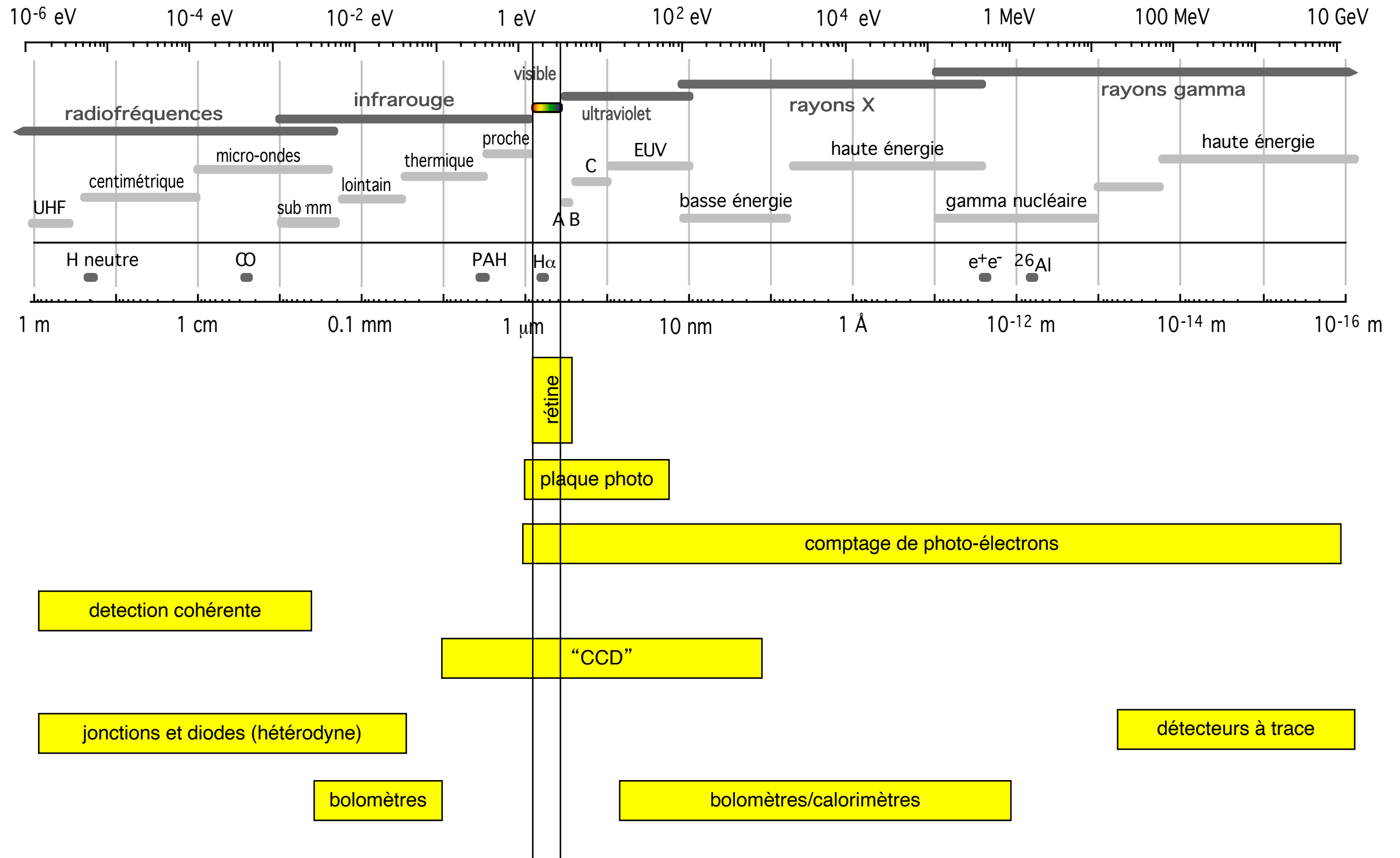


# Systemes d'observation pour le domaine visible

- le rôle de l'observation en astrophysique
- telescopes
  - systèmes optiques (réfracteurs, réflecteurs)
  - montures
  - optique active
  - optique adaptative
- instrumentation focale
  -  - les détecteurs pour le domaine visible
    - photométrie
    - imagerie
    - spectroscopie
- caractéristiques du système d'observation

# plan de détection - domaine visible



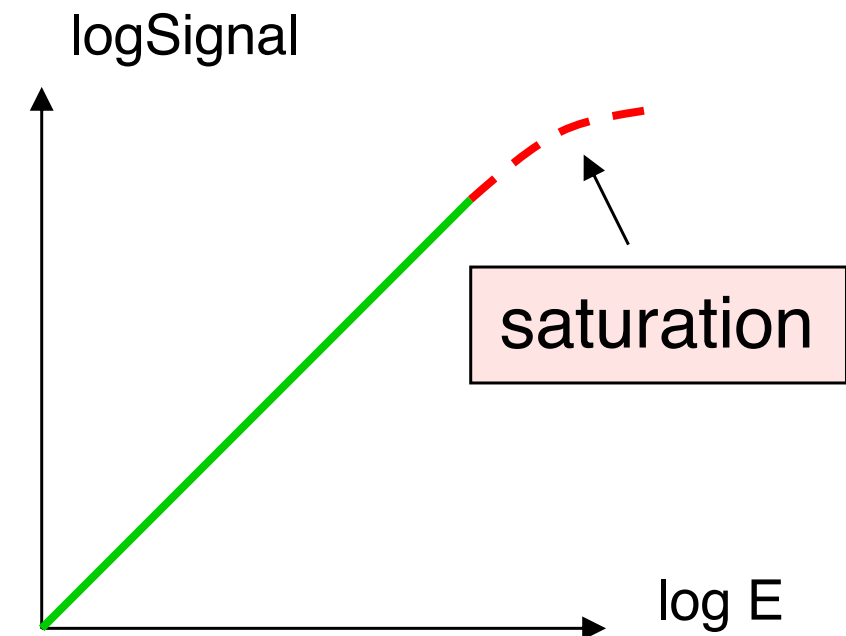
# Propriétés générales des détecteurs

**Dynamique** : le détecteur **idéal** répond linéairement avec le signal quelle que soit l'intensité de l'énergie reçue.

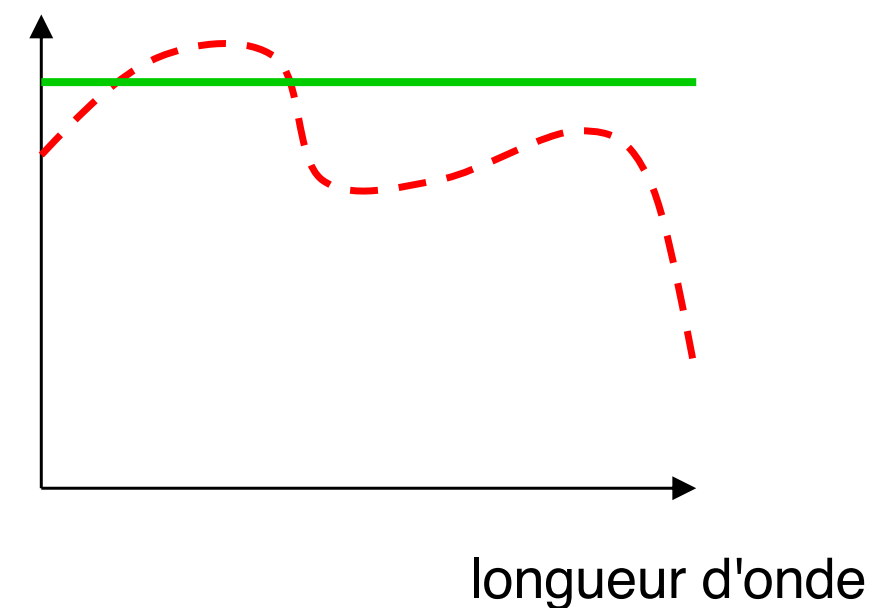
**Sensibilité** : le rendement  $\eta$  d'un détecteur **idéal** serait égal à 100% : 1 signal émis par 1 photon reçu (les détecteurs modernes s'en approchent !)

**Réponse spectrale** : le détecteur **idéal** a la même sensibilité quel que soit le domaine spectral

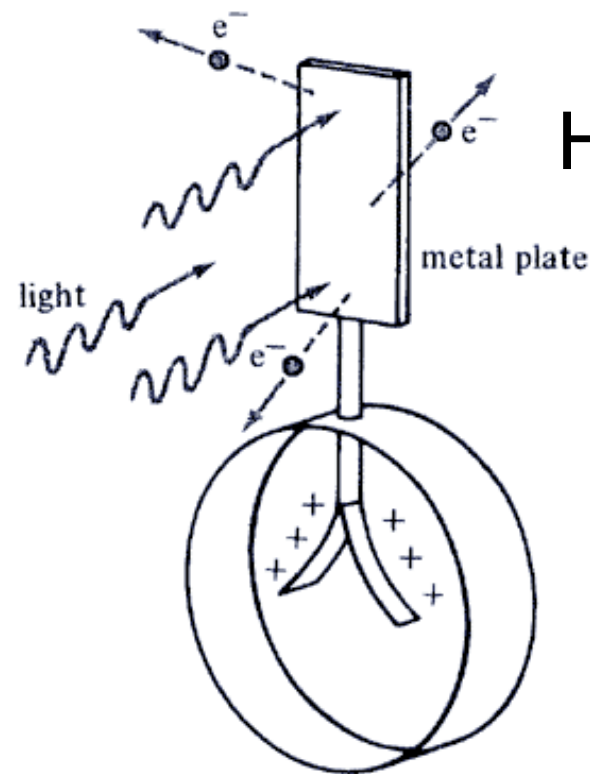
**Réponse temporelle** : le détecteur **idéal** réagit immédiatement à une variation de flux d'énergie reçue.



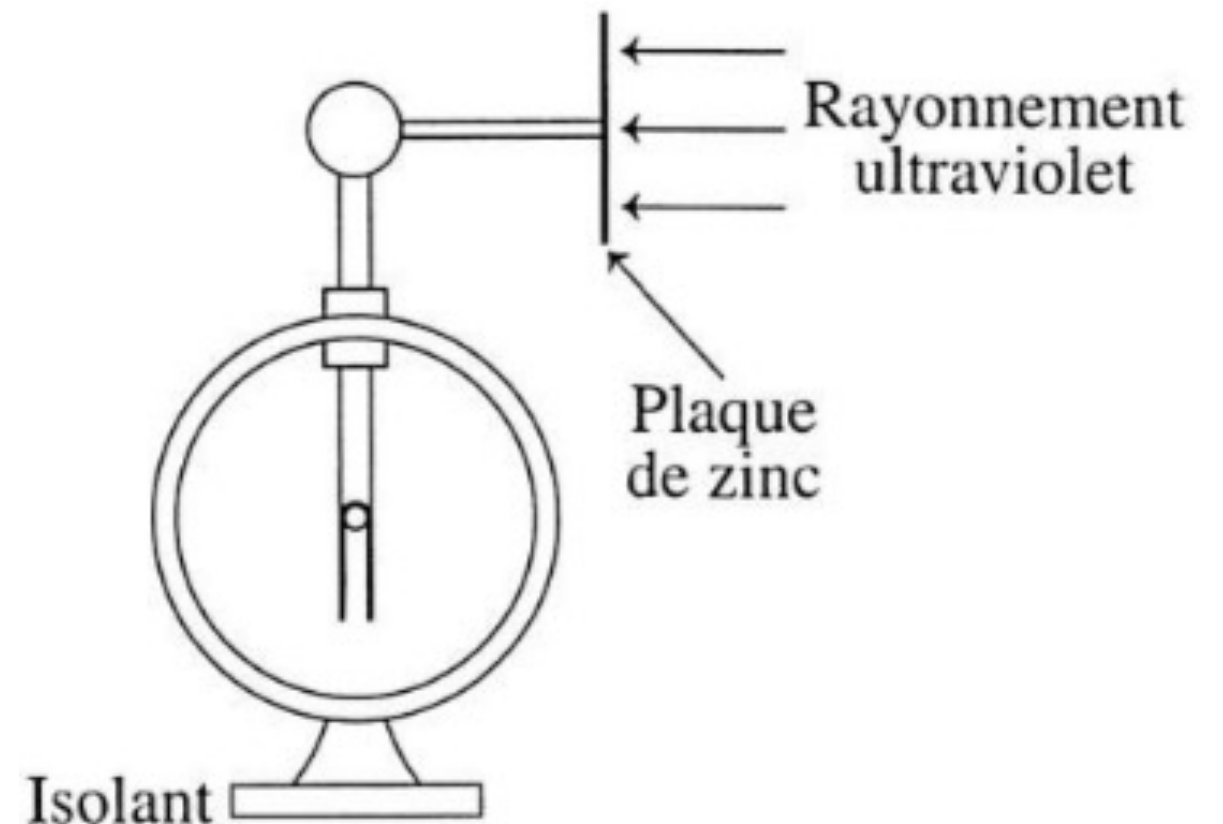
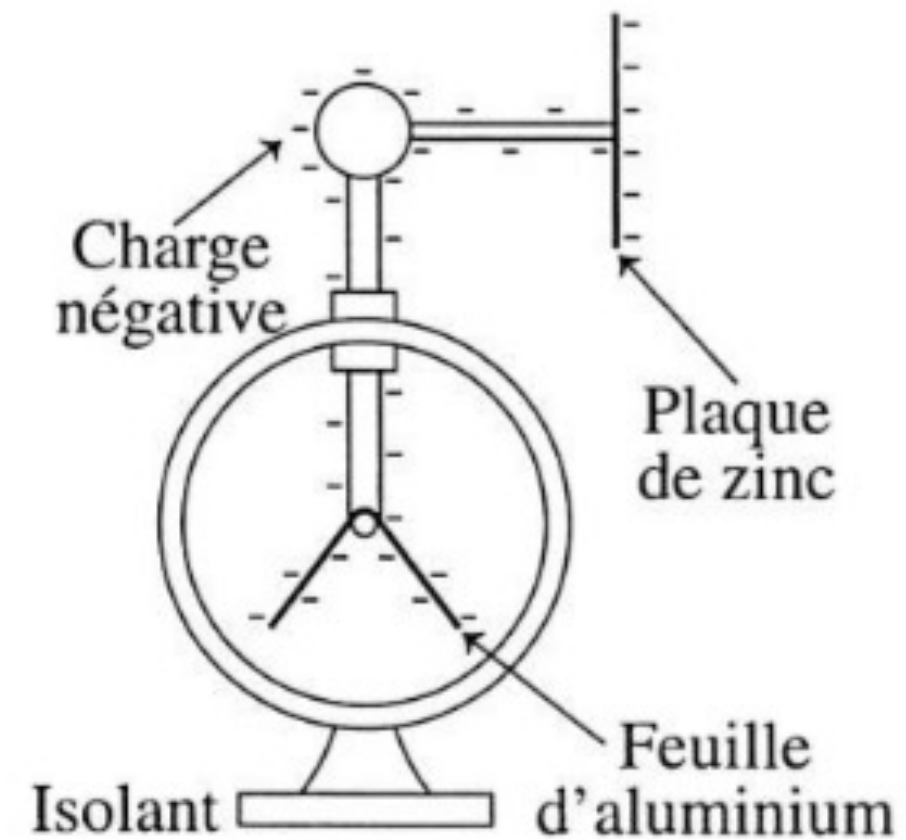
Signal par énergie envoyée



# Physique de la détection dans le domaine visible : Effet Photoélectrique



Hallwachs 1888

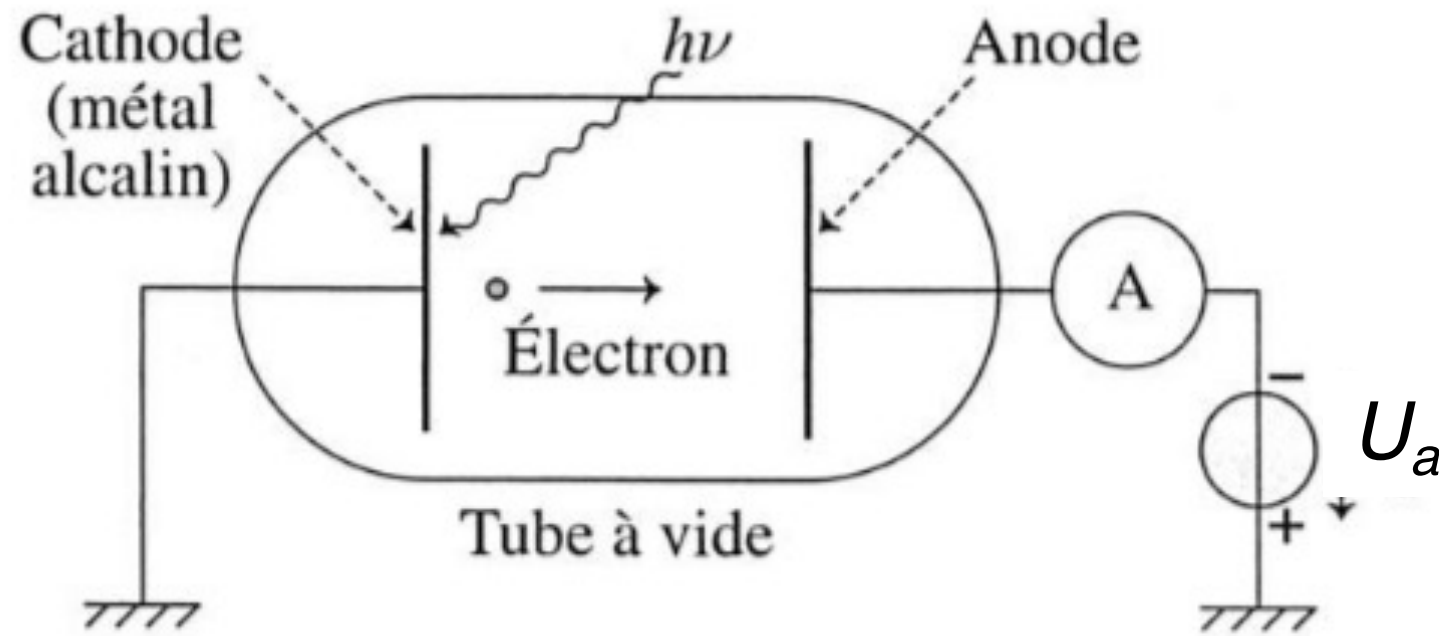


hypothèse d' Einstein (1905)

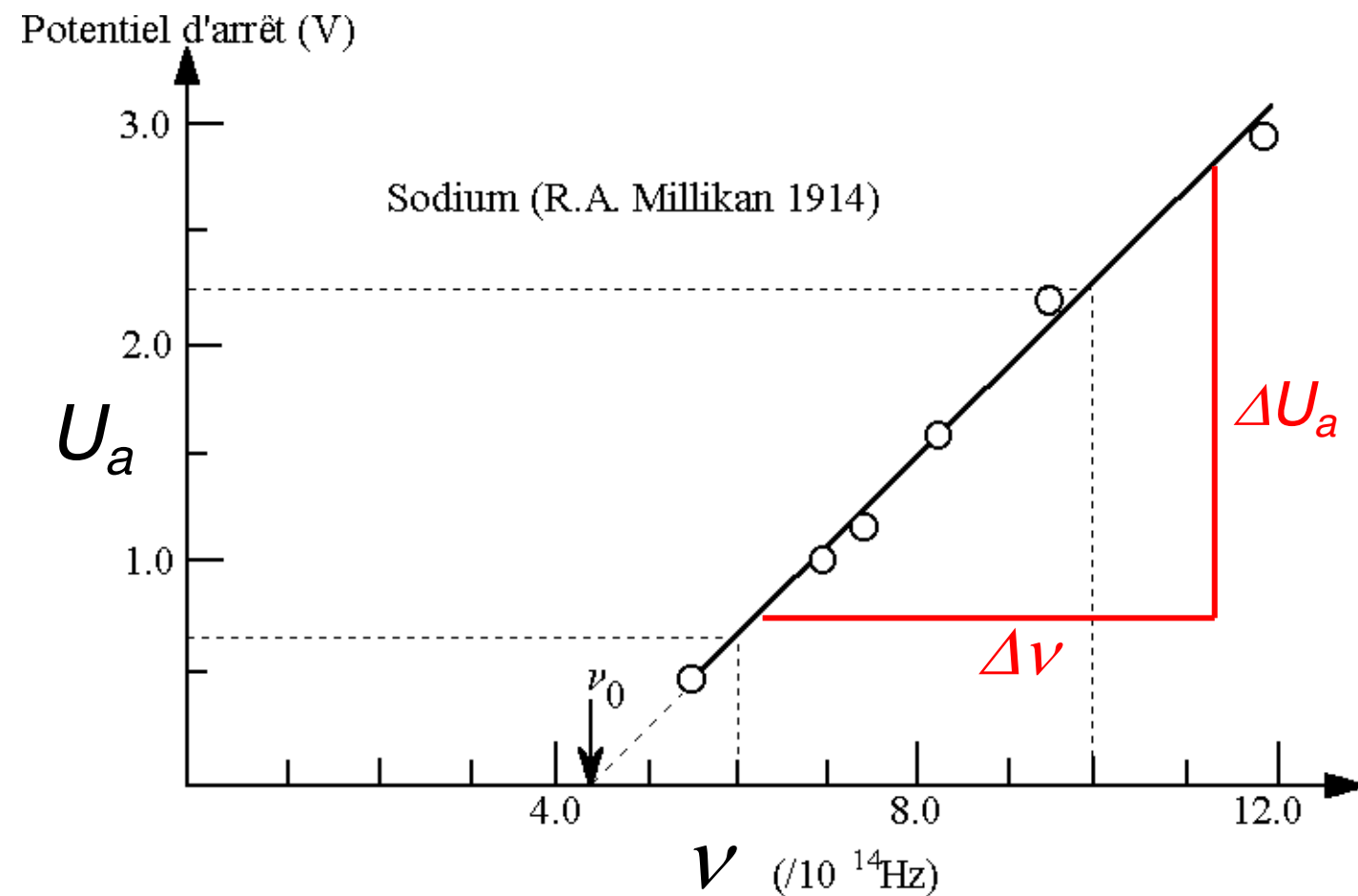
transfert d' énergie  
entre photons et électrons

quantification  
du champ électromagnétique  
sous la forme de photons

# Physique de la détection dans le domaine visible : Effet Photoélectrique



hypothèse d' Einstein (1905)  
 transfert d' énergie  
 entre photons et électrons  
 quantification  
 du champ électromagnétique  
 sous la forme de photons

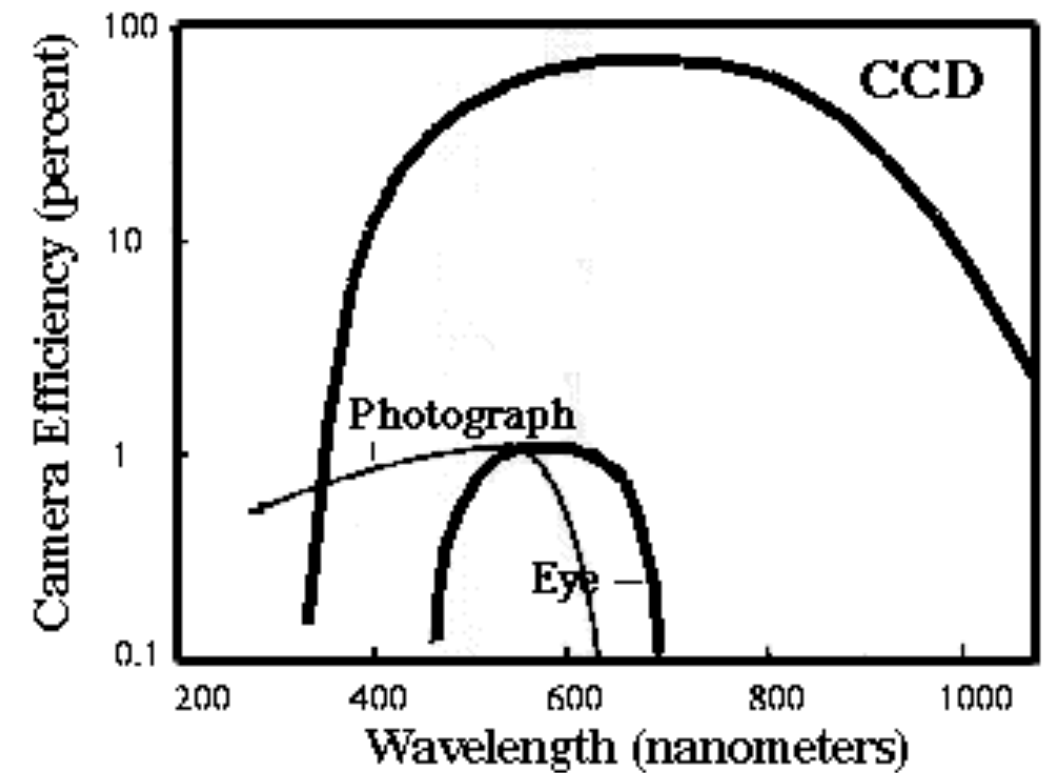
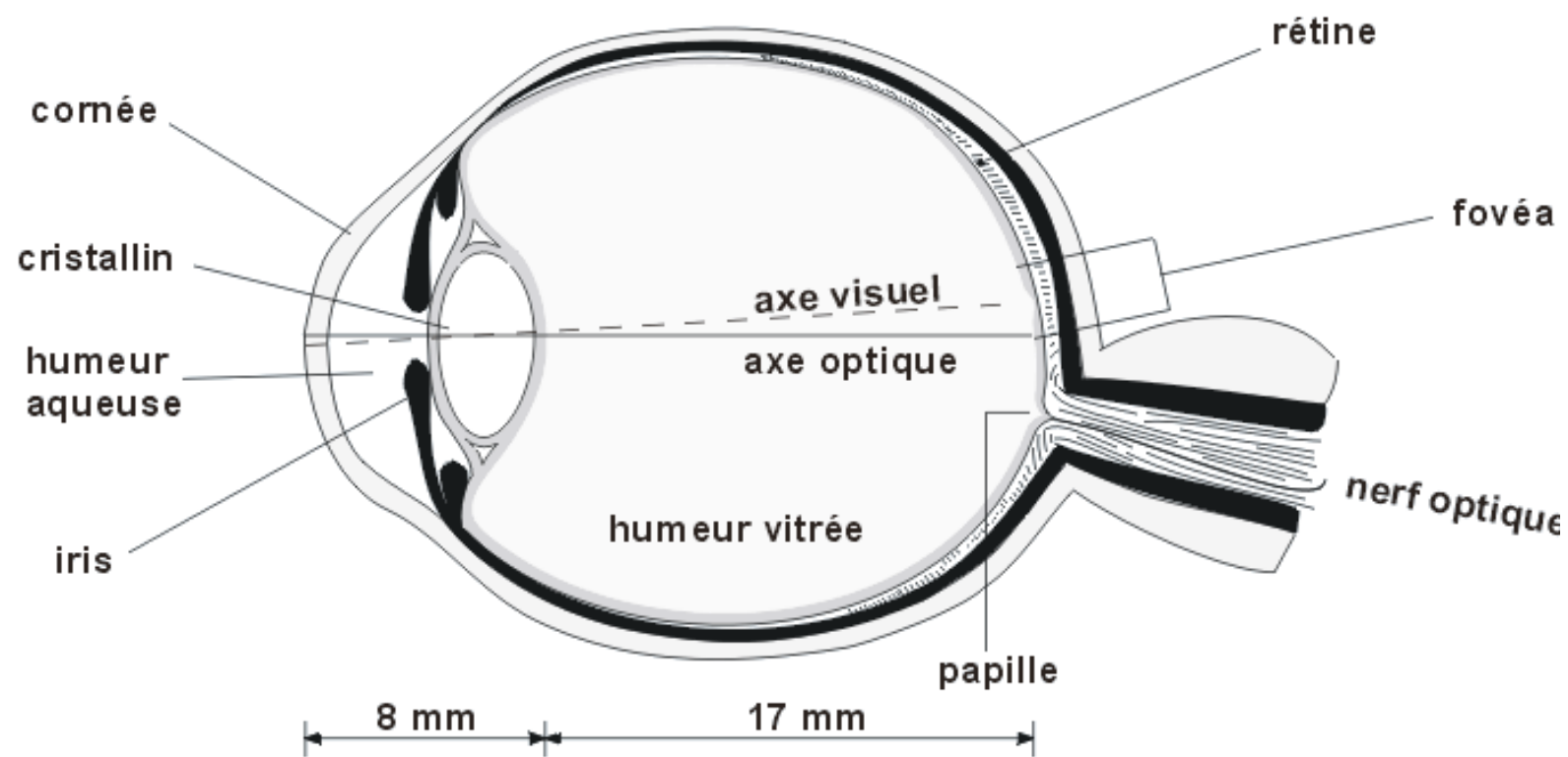


$$qU_a = E_c^{max} = h\nu - W_{ext}$$

$q$  charge des  $e^-$   
 $U_a$  potentiel d'arret  
 $E_c^{ma}$  energie cinetique max de  $e^-$   
 $W_{ext}$  travail de sortie

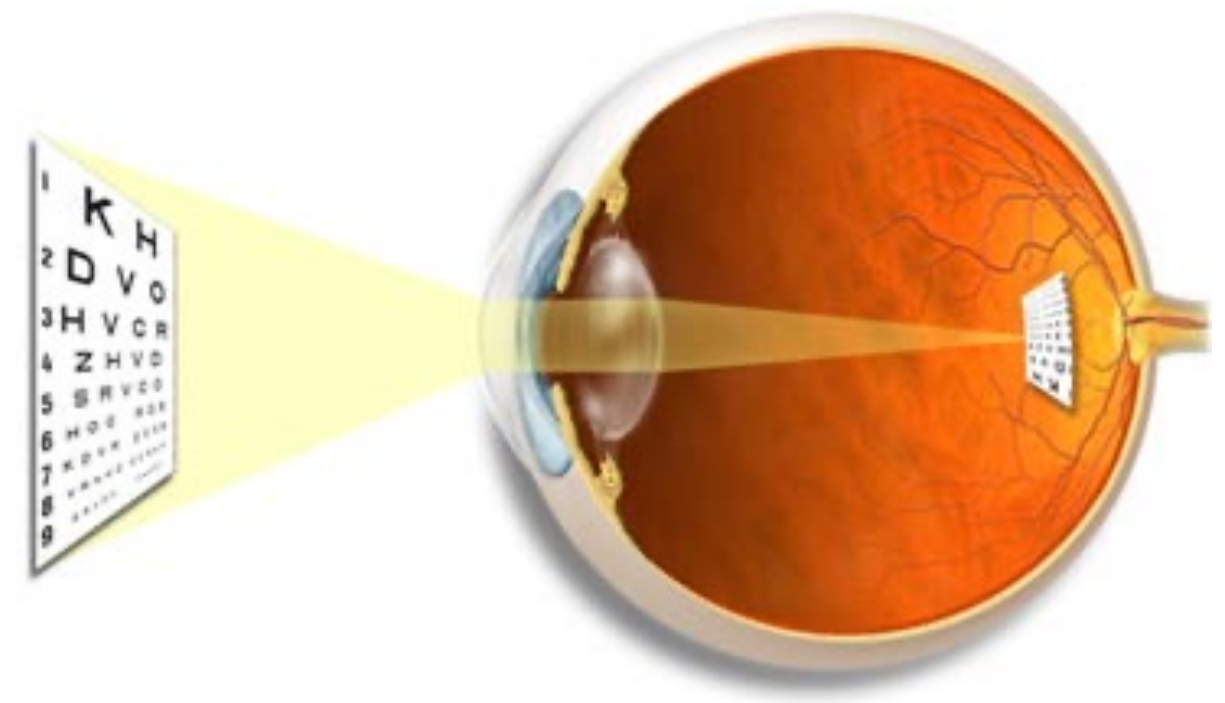
$$\frac{\Delta U_a}{\Delta \nu} = h$$

# Exemple : l'oeil humain



pour l'exemple de l'oeil,  
discussion des categories :

- détecteurs
- système optique
- imagerie



# plan de détection

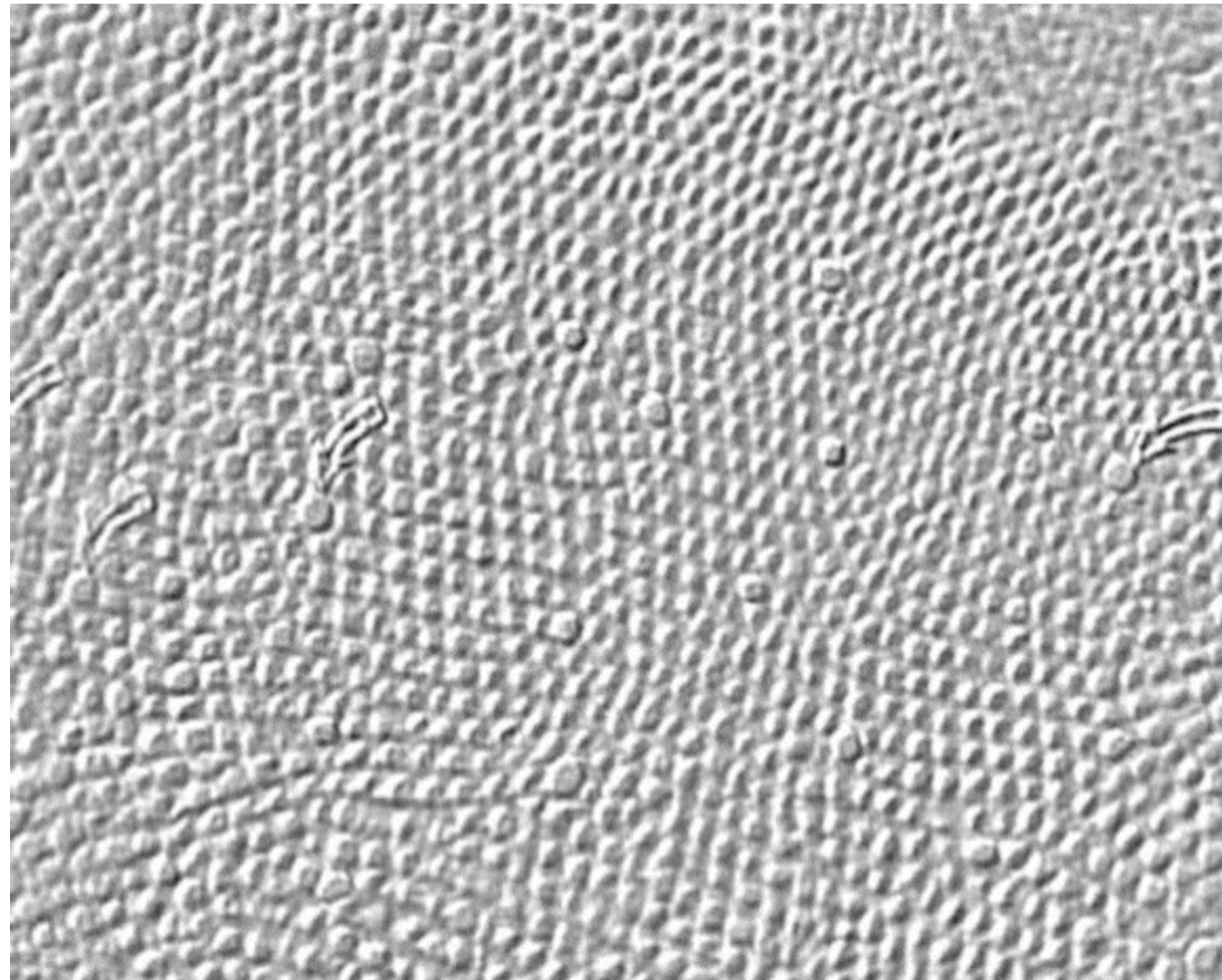
On distingue 4 zones :

- papille optique - émergence des fibres du nerf optique = point aveugle
- area centralis, tache jaune :  $\varnothing=6\text{mm}$  /  $15^\circ$  -  $20^\circ$
- fovéa :  $\varnothing=1.5\text{mm}$  /  $5^\circ$
- rétine périphérique

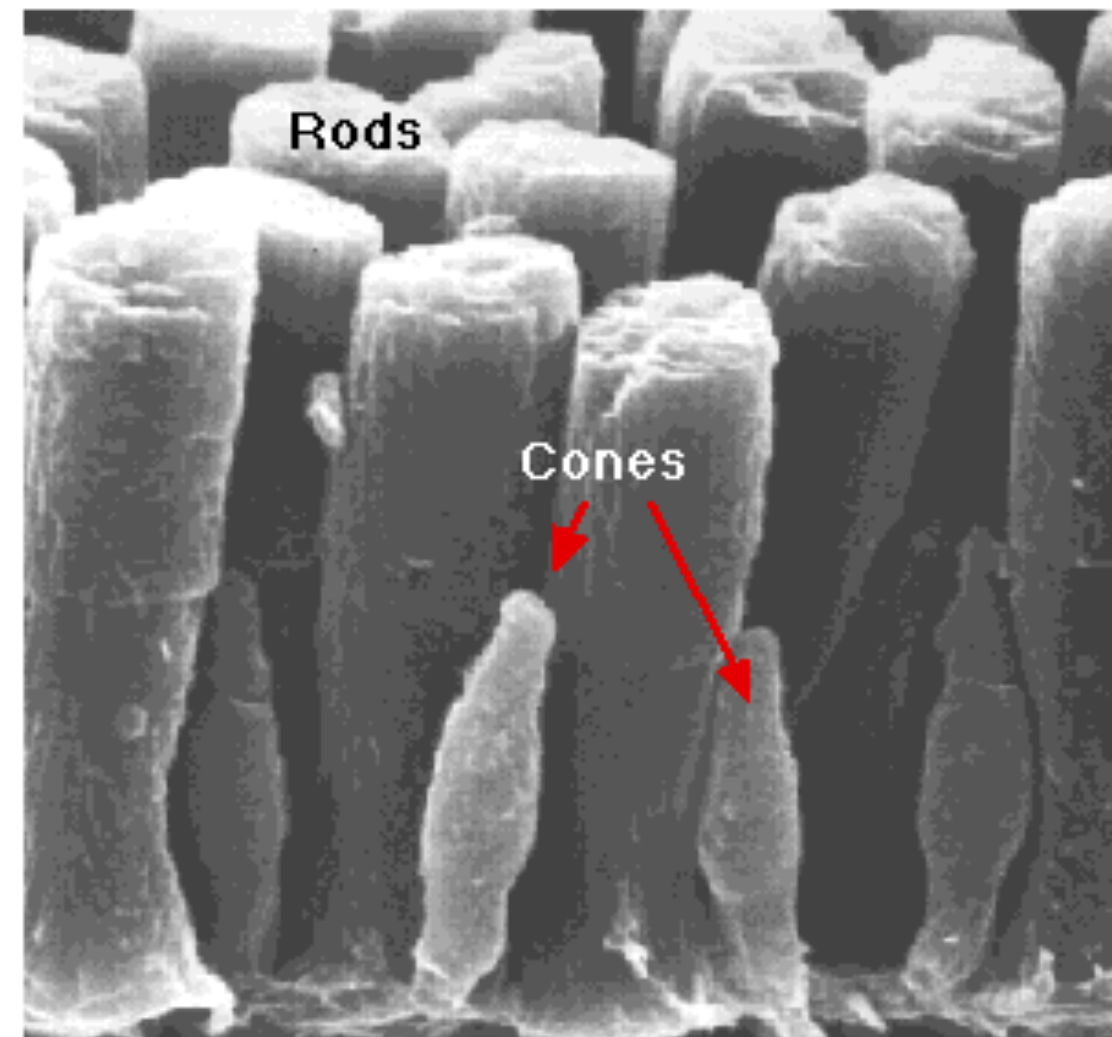
fovéa : lumière stimule un cône qui en relation avec un neurone bipolaire lui-même, relié à son neurone ganglionnaire : chaque cône a sa ligne de réponse.

rétine périphérique : plusieurs (3 à 5) bâtonnets sont en relation avec un neurone bipolaire. Plusieurs (4 à 6) neurones bipolaires sont eux-mêmes en relation avec un neurone ganglionnaire. Un neurone ganglionnaire est donc représentatif d'une zone de la rétine.

# plan de détection : la rétine

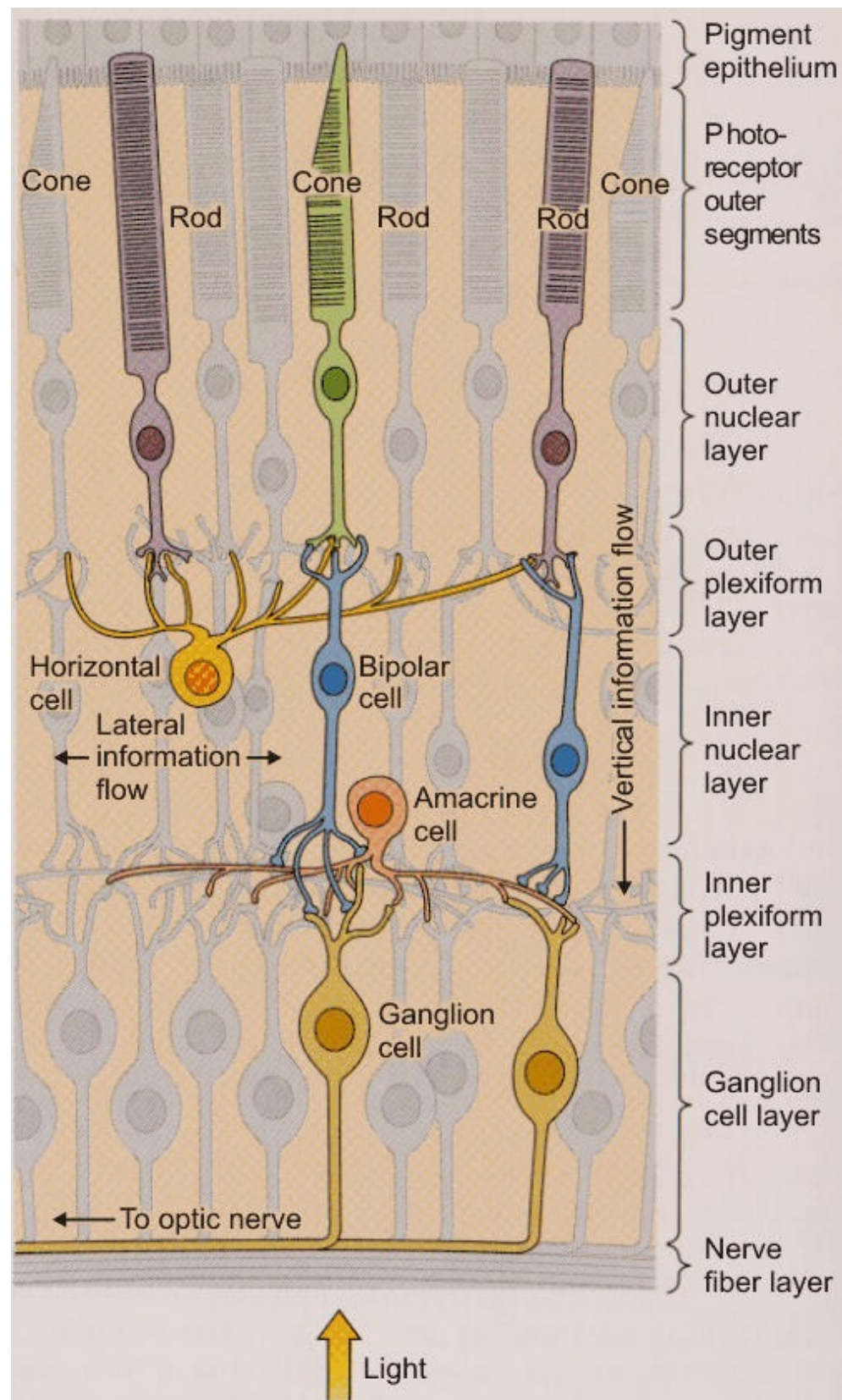


section de la fovea





# le plan de détection : la rétine



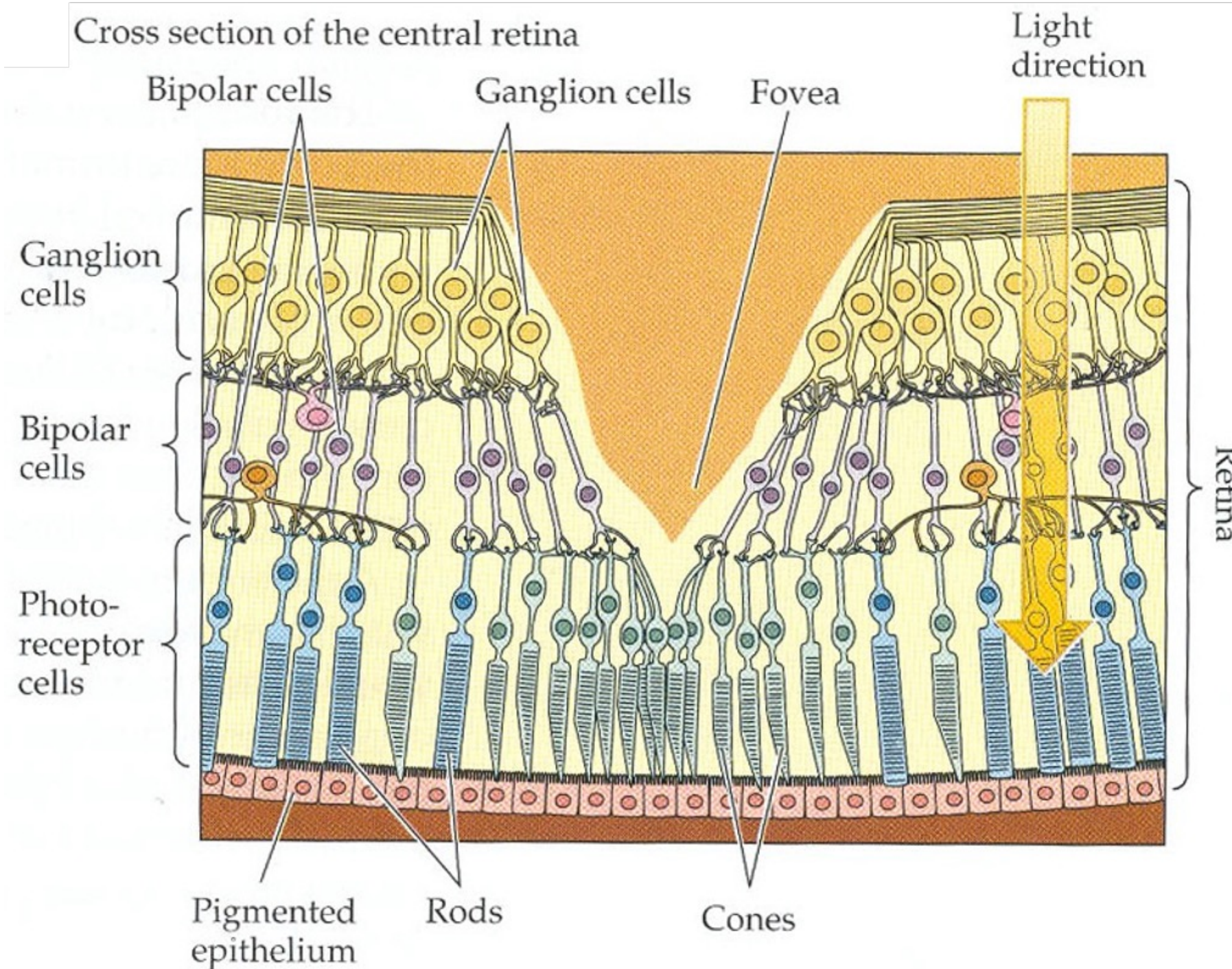
hautement organisé - plusieurs couches de neurones

couche extérieure de la rétine comprend les cellules photosensibles : photorécepteurs.

La transduction a lieu dans les cônes ou les bâtonnets ; l'information transite dans un neurone bipolaire et un potentiel d'action (ou une salve de potentiels d'action) naît dans une cellule ganglionnaire. Tous les axones convergent au niveau du point d'insertion du nerf optique et traversent la rétine.

"rétine inversée" : lumière arrive dans un sens et l'information chemine en sens inverse. (caractéristique des yeux de vertébrés - mollusques ne sont pas inversés)

# rétine

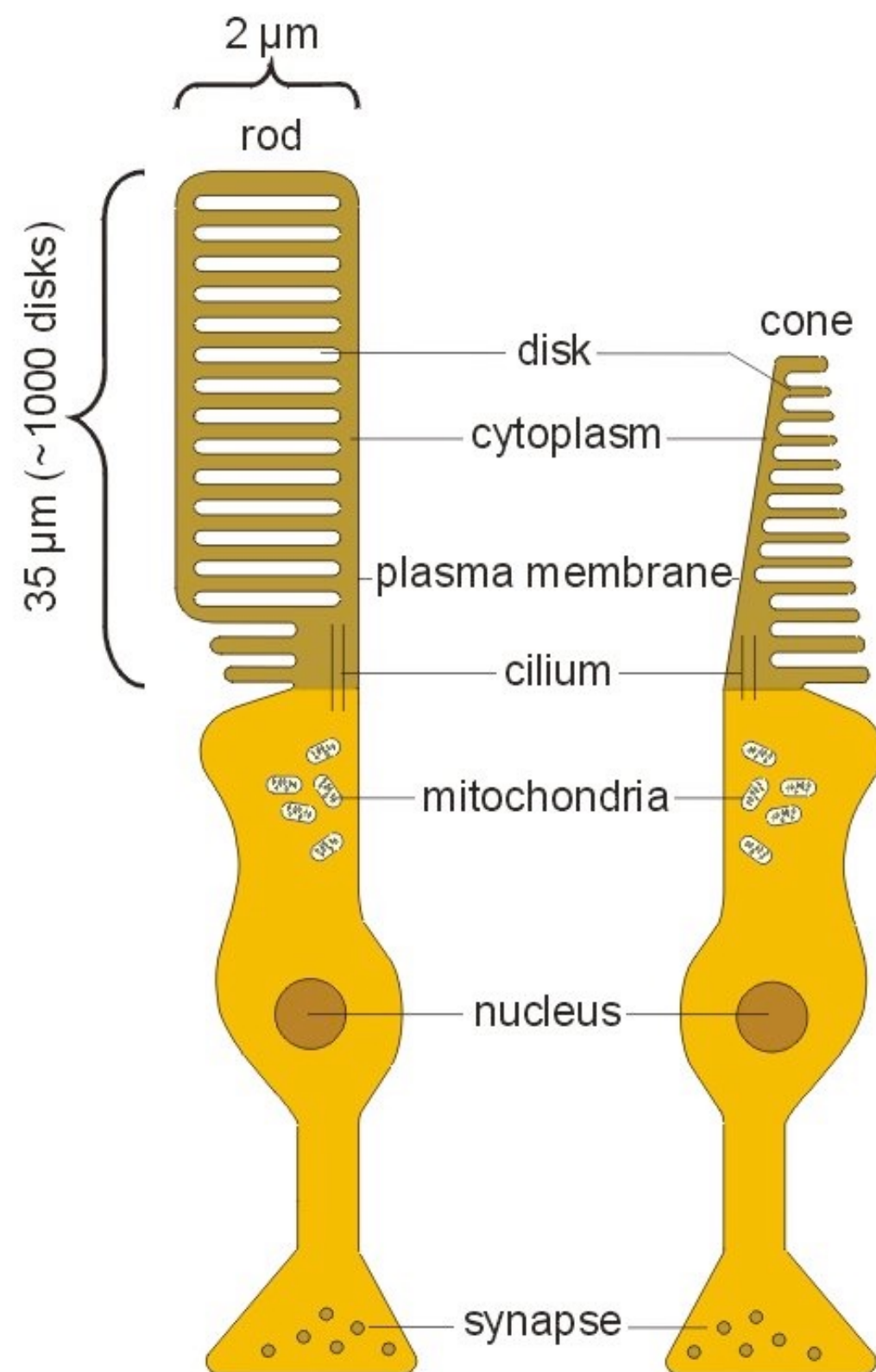


zone photosensible est au fond - lumière doit traverser les couches supérieures :

- Les neurones bipolaires.
- Les cellules ganglionnaires.

fovéa (région de la rétine dans l'axe optique) : rétine moins épaisse - deux premières couches sont déportées latéralement : la lumière arrive plus directement.

# cônes et bâtonnets



cônes et bâtonnets consistent de quatre parties majeures

les membranes des disques comprennent le pigment visuel : les rhodopsines

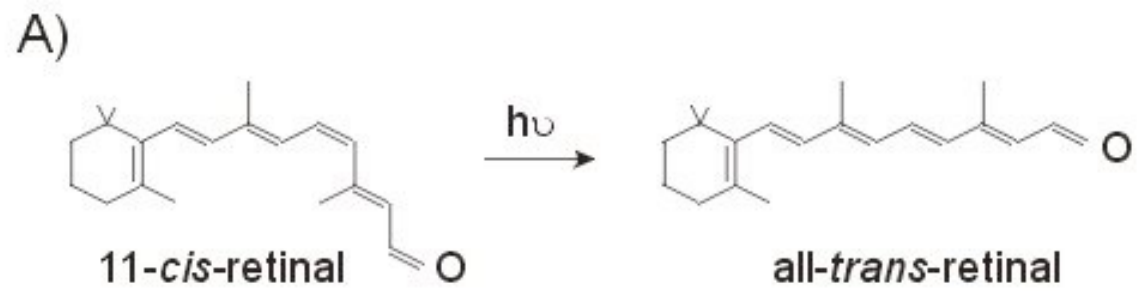
lumière -> rhodopsine,  
transformation du pigment en  
métrarhodopsine rétinale :

forme 11cis -> forme trans.  
(recyclage possible ~ 45 minutes)

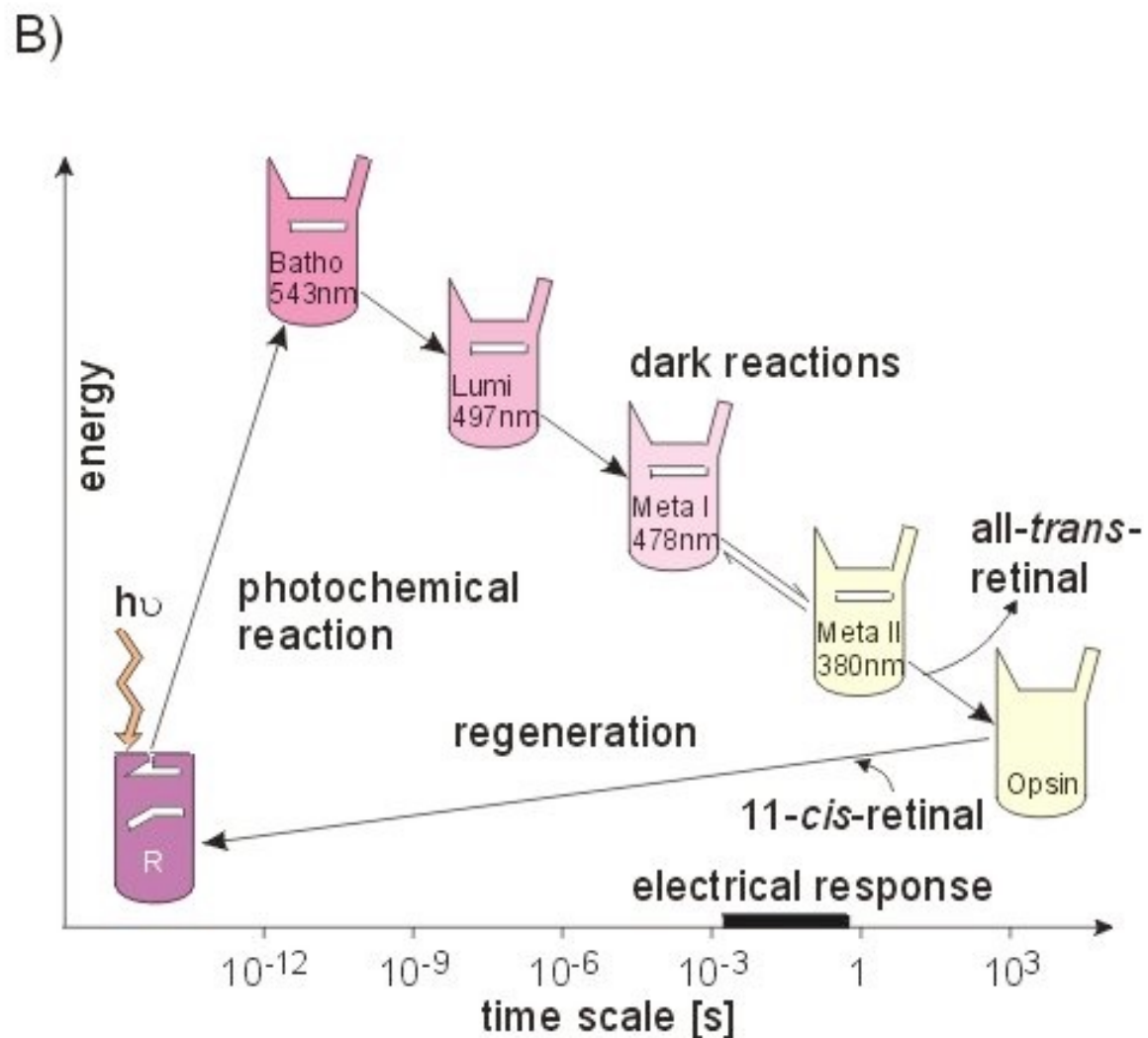
cônes : réponse d'un photons  $\approx 10^{-14}$  A

bâtonnets : réponse d'un photons  $\approx 10^{-12}$  A

# 11-cis-retinal $\rightarrow$ trans-retinal (isomerization)



A) Illumination triggers the isomerization of 11-*cis*-retinal to all-*trans*-retinal. (**absorption of photon promotes a p electron to a higher-energy orbital - p-p\* excitation**)

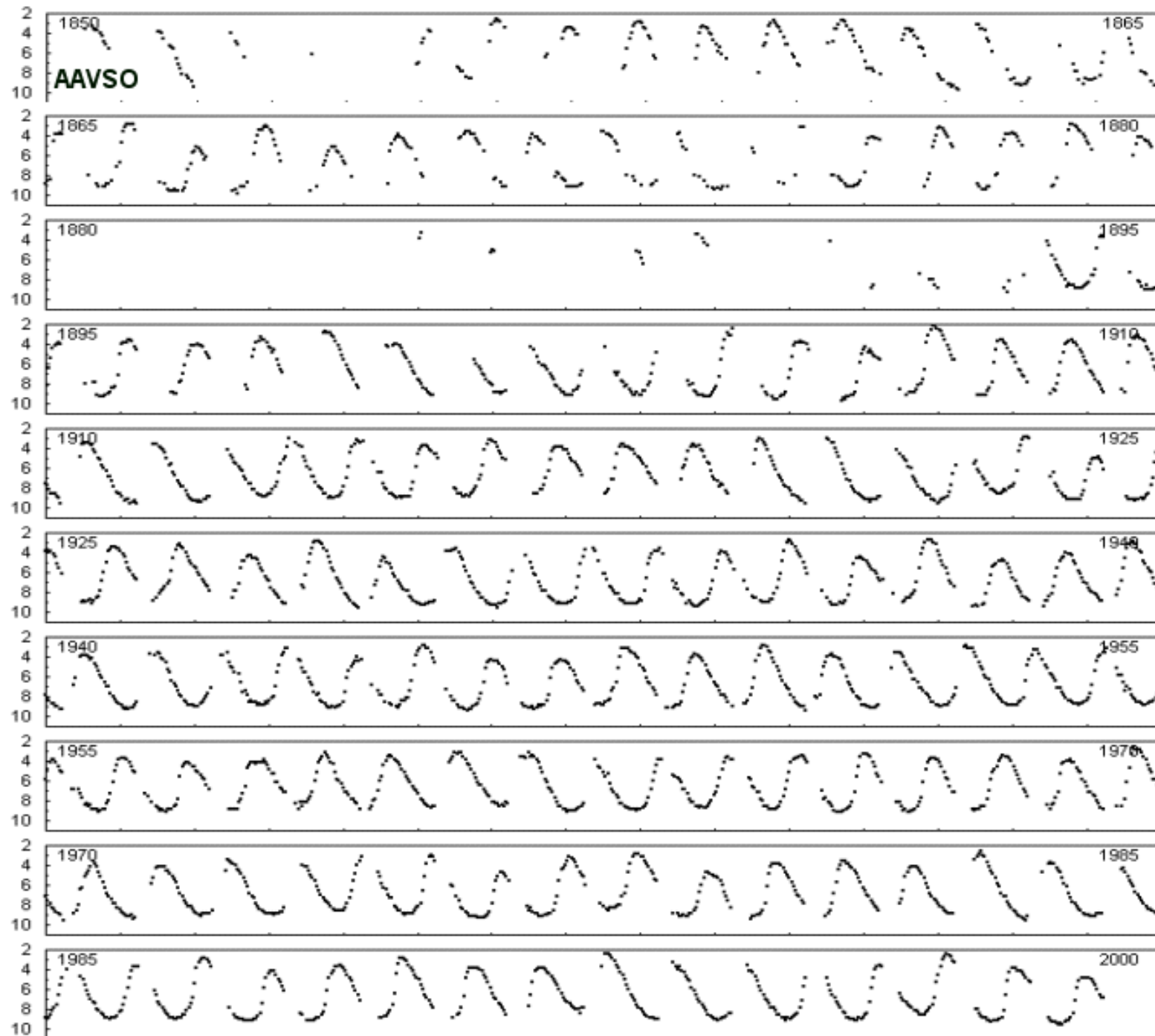


B) Upon illumination, rhodopsin undergoes a sequence of conformational changes that produce meta-rhodopsin II, a stable intermediate of the photocycle that activates the next protein in the transduction cascade, transducin.

# rétine exemple : MIRA (o Ceti) 1850-2000

Mira (omicron Ceti) is the prototype of pulsating long period variables and the first star recognized to have changing brightness. It has a period of 332 days. Generally, Mira varies between magnitudes 3.5 and 9, but the individual maxima and minima may be much brighter or fainter than these mean values. Its large amplitude of variation and its brightness make Mira particularly easy to observe.

Mira is one of the few long period variables with a close companion which is also variable (VZ Ceti).



rétine :

+ rendement quantique  $\sim 10\%$

+ dynamique  $\sim 10^8$

+ très grand CDV

+ traitement rapide

=> événements rares et imprévisibles

SN proches (SN 1987A)

-  $T_{\text{int}} \approx 0.05 \text{ sec}$

- pupille  $< 7 \text{ mm}$

=> sensibilité  $m_v > 6$ .

<- *American Association of Variable Star Observers*

# plaque photographique

- + capacité d'intégrer la lumière pendant un temps  $\sim 10^6$  fois plus que l'oeil
- + nombre de pixels élevé
- + stockage efficace de l'information (densité dépassée à partir de 1995, seulement).

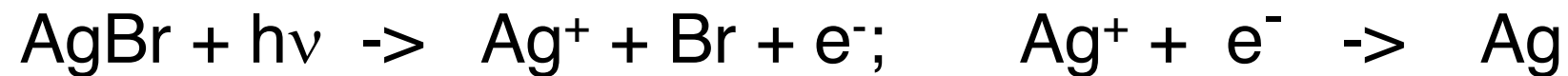
principe physique : propriétés du semi-conducteur AgBr.  
gélatine transparente avec cristaux de AgBr,  
AgBr : semi-conducteur, niveau de Fermi  $\approx 2\text{eV}$   
cristaux contiennent des ions  $\text{Br}^-$  et  $\text{Ag}^+$

détection en 3-phases :

Exposition  
Développement  
Fixation

# plaque photographique (effet photoélectrique au sein du cristal)

## Exposition



Ag pas stable - se lie avec d'autres atomes Ag  $\Rightarrow$  micro-cristaux stables à 3 atomes dans sites qui ont reçu  $h\nu$  au delà d'un seuil.

## Développement

signal sous forme micro-cristaux faible.

rendement quantique  $\approx 1\%$   $\Rightarrow$  amplification :

développement par la réaction de réduction  $\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}$



atomes Ag proches de micro-cristaux ( noyaux de cristallisation)

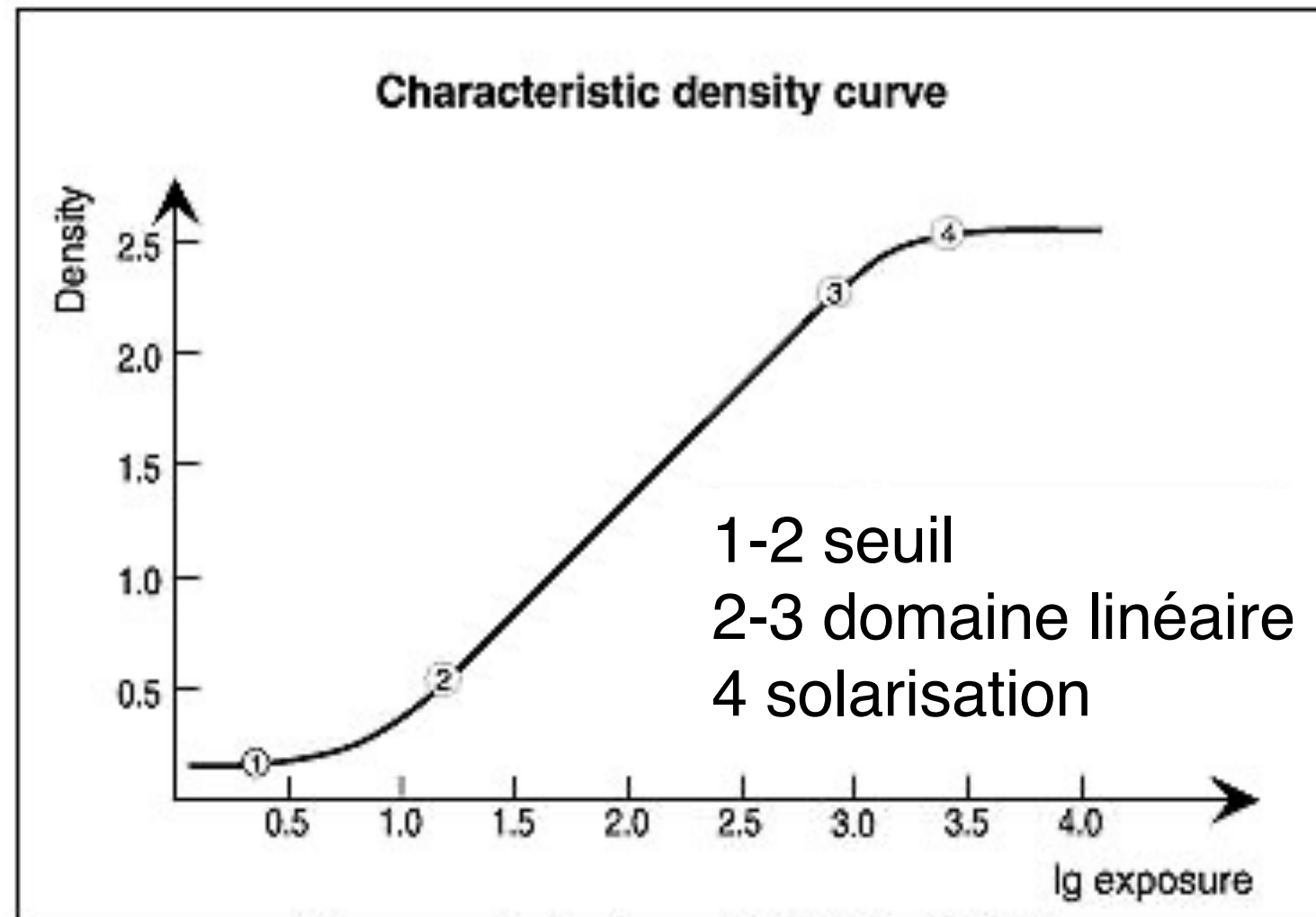
cristaux macroscopiques = opaques.

facteur d'amplification chimique  $\approx 10^4 - 10^6$

## Fixation

traitement de l'émulsion par un fixateur à l'hyposulfite de sodium permet de dissoudre le AgBr non réduit (mais encore sensible à  $h\nu$ )

# plaque photographique



Characteristic Curve © AGFA (1999)

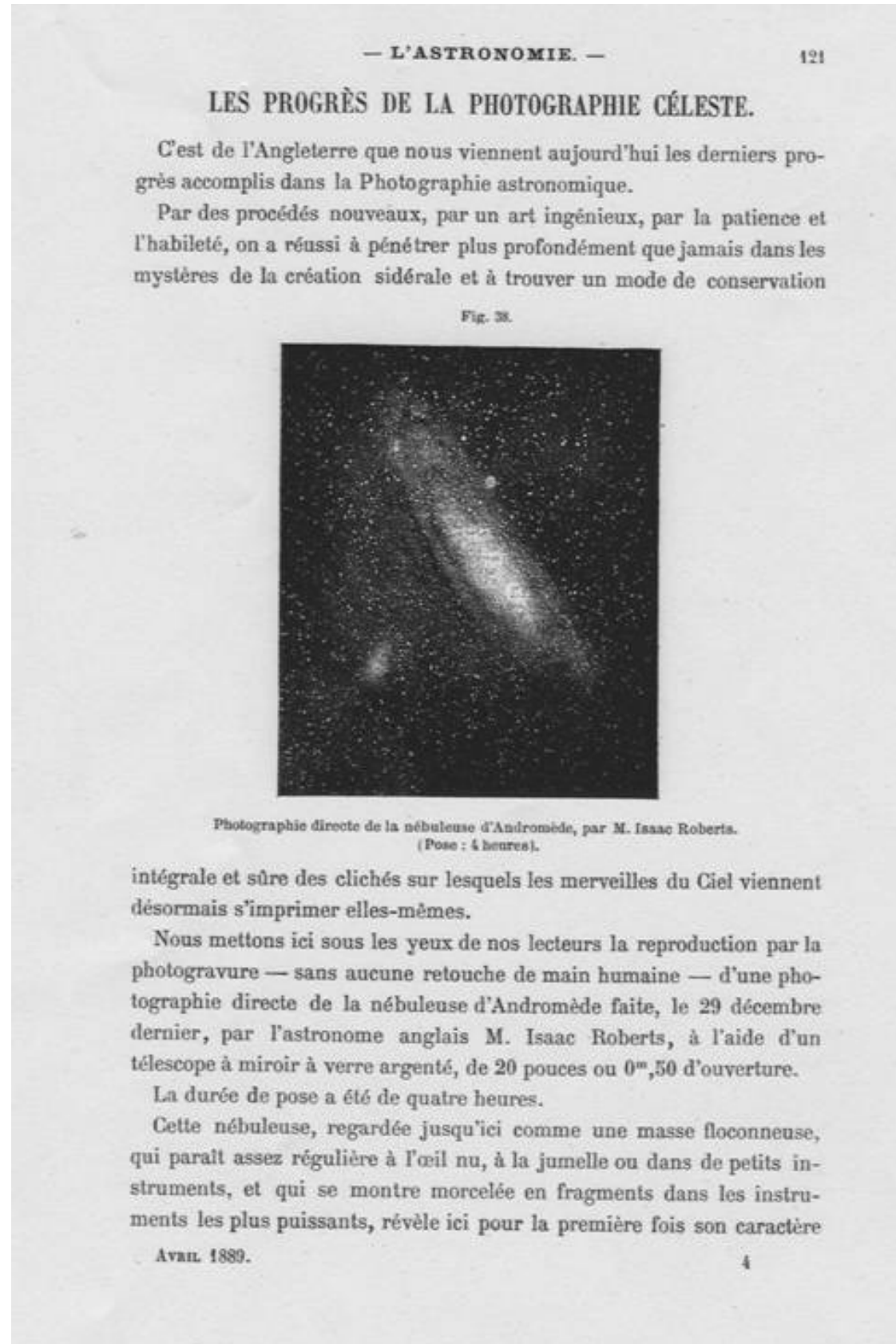
relation densité optique  $\sim$  signal photonique incident est complexe  
rendement quantique varie en fonction de l'exposition  $\approx 1\%$

information perdue dans la zone 1 et 4

le bruit résiduel est élevé (  $SNR < 50$ ), dynamique de 50  
performances assez modestes ...

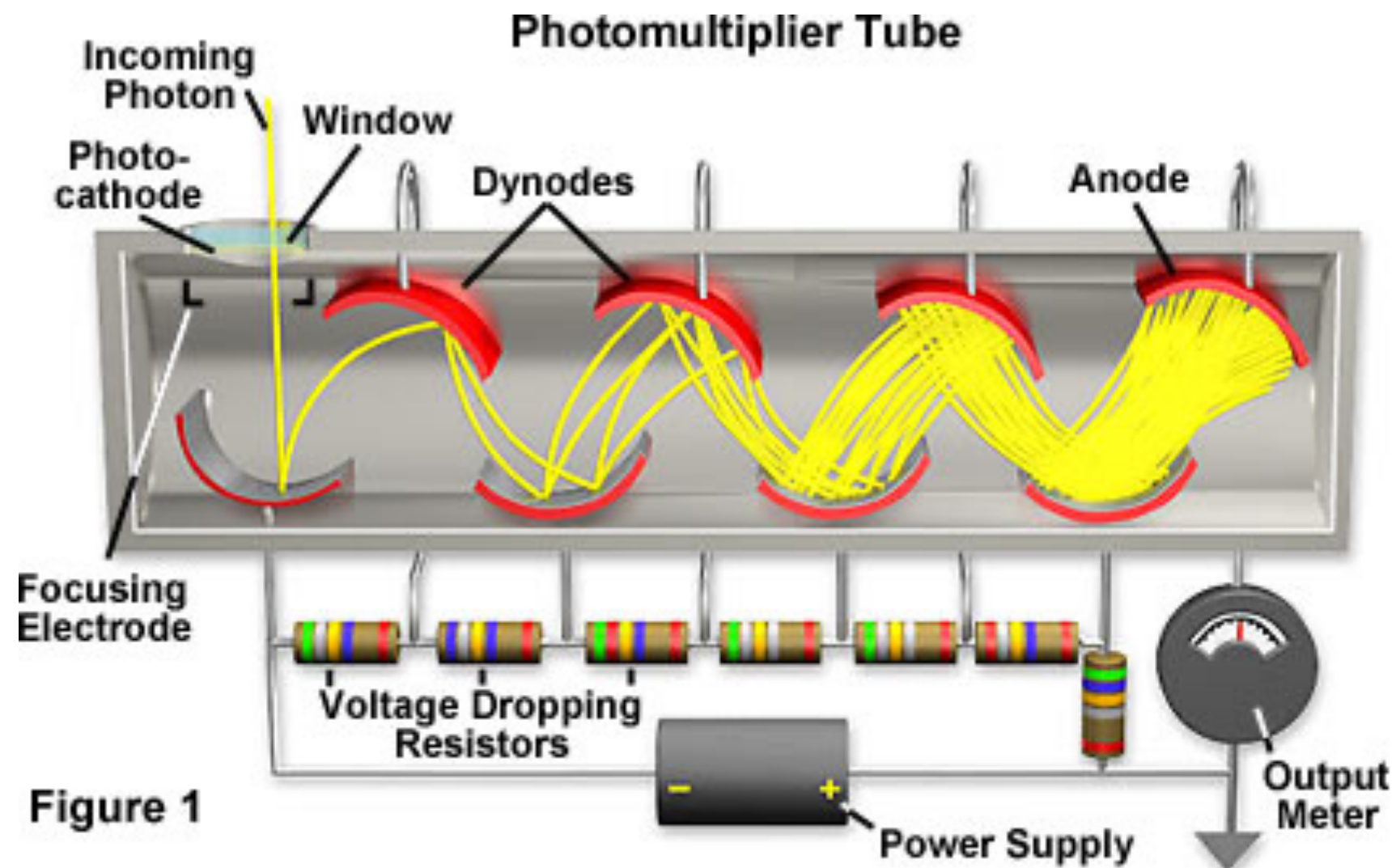


# plaque photographique



une des premières photographies de la  
galaxie d'Andromède  
I. Roberts, 1889

# Photomultiplicateur - PMT



Electrons, just like photons, when moving with sufficient  $E$ , not only release electrons from metals, but there is also **amplification**, with more electrons coming out of the metal than entering.

**Photomultiplier Tube** combines this effect with photoelectric effect to amplify weak incoming light to strong electrical signal

Individual photons are detected and measured (**photon counter**)

# Photomultiplicateur - PMT

## *photocathode*

conversion of incident photon  $\rightarrow$  photoelectron

- photoelectric effect :  $h\nu = E_e + W$  (1.5-2eV)  $\approx 3$  eV  
quantum efficiency  $QE \approx 20-30\%$

## *electron multiplication*

- $E_{\text{photoelectron}} < 1$  eV
- electrons are focused by electrodes
- secondary  $e^-$  emission on dynodes (bandgap  $\approx 2-3$  eV)
- potential of 1<sup>st</sup> dynode  $U_1 \approx X \cdot 100$  V  $\Rightarrow X \cdot 30$   $e^-$

## *charge collection on anode*

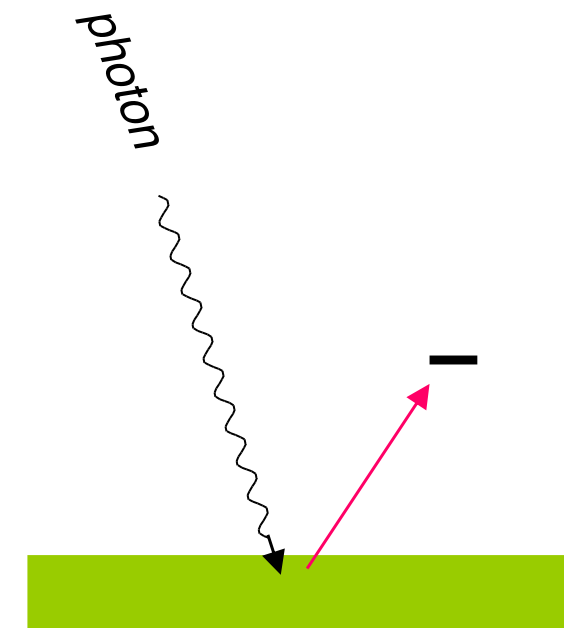
amplification factors of  $10^7 - 10^9$

effects on energy resolution :

- electron statistics (PMT)
- gain variation
- information loss (vis. light reflection in crystal etc.)

# Photomultiplicateur - PMT

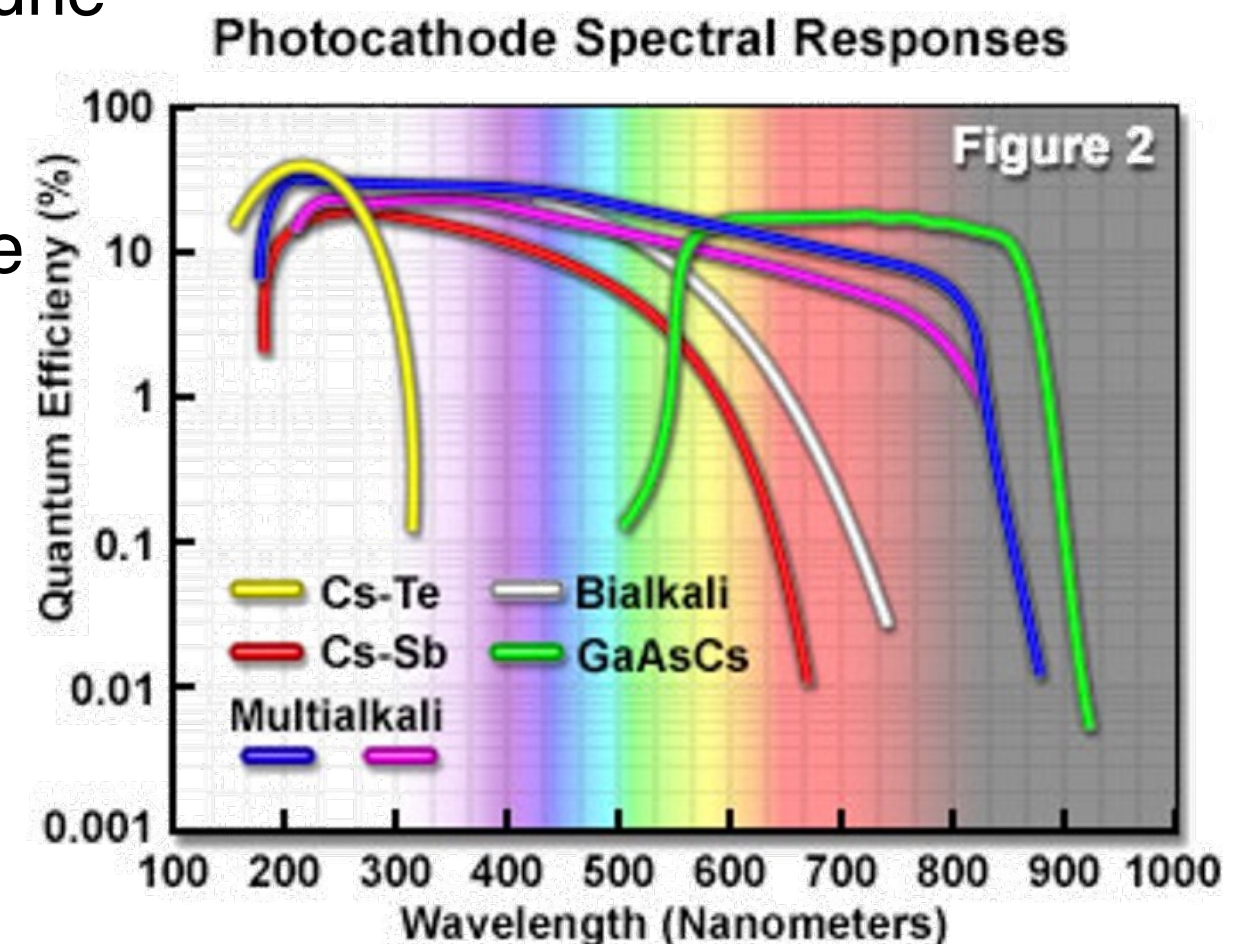
un photon incident dépasse l'énergie nécessaire pour franchir la barrière de surface d'une couche photo-émissive (énergie d'extraction  $W_{ext}$ ), la probabilité d'obtenir un électron à l'extérieur devient important et la détection possible. La couche peut être soit semi-conductrice soit métallique.



Associée à  $W_{ext}$ , pour chaque matériel, existe une longueur d'onde limite maximale (cut-off)

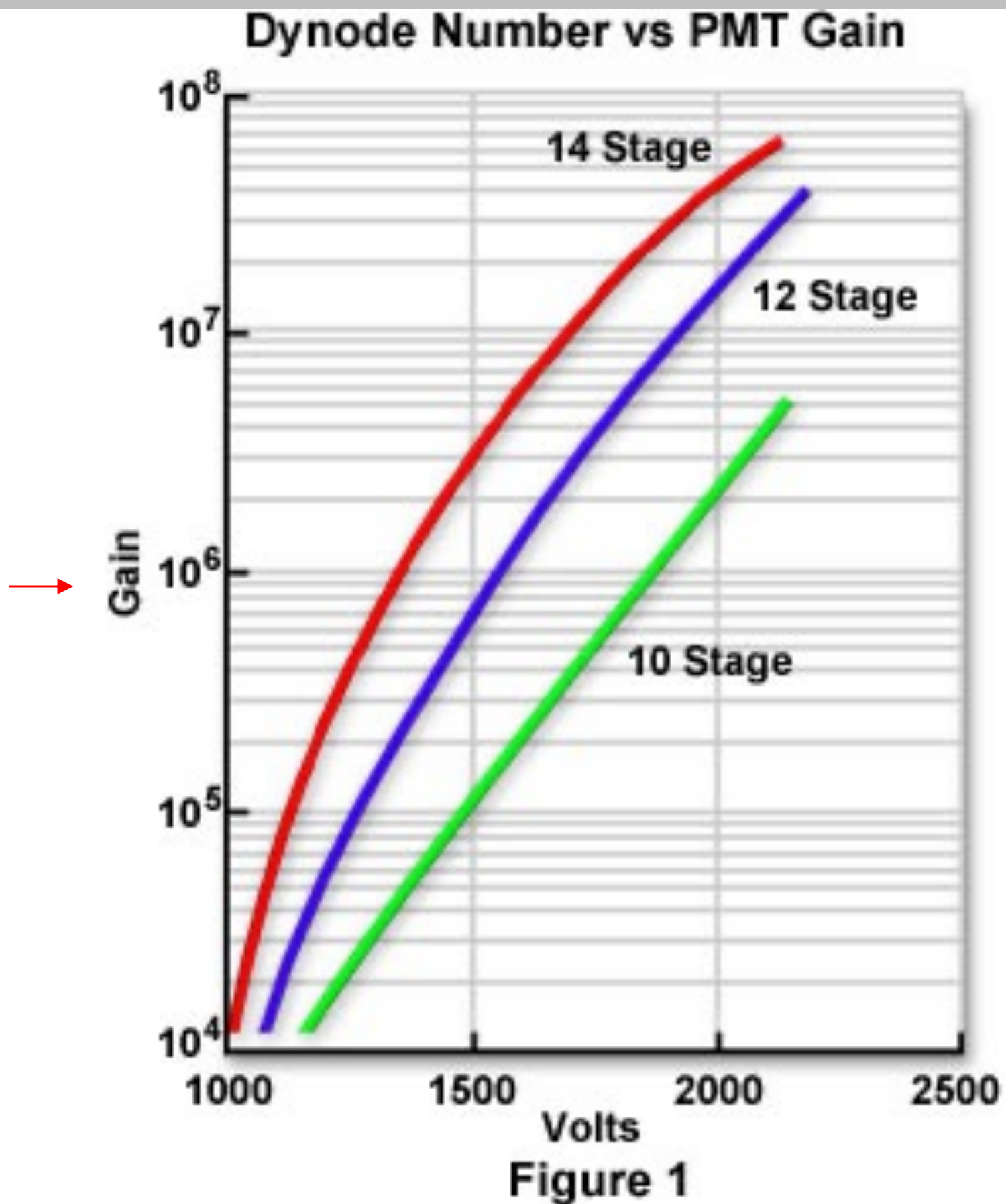
Matériaux des photo-cathodes, domaine visible

Matériel	$\lambda_{max}[\mu]$	$W_{ext}[eV]$
Sb	0.29	4.0
Ag	0.25	4.2
Rb	0.59	2.0
SbCs <sub>3</sub>	0.65	1.8

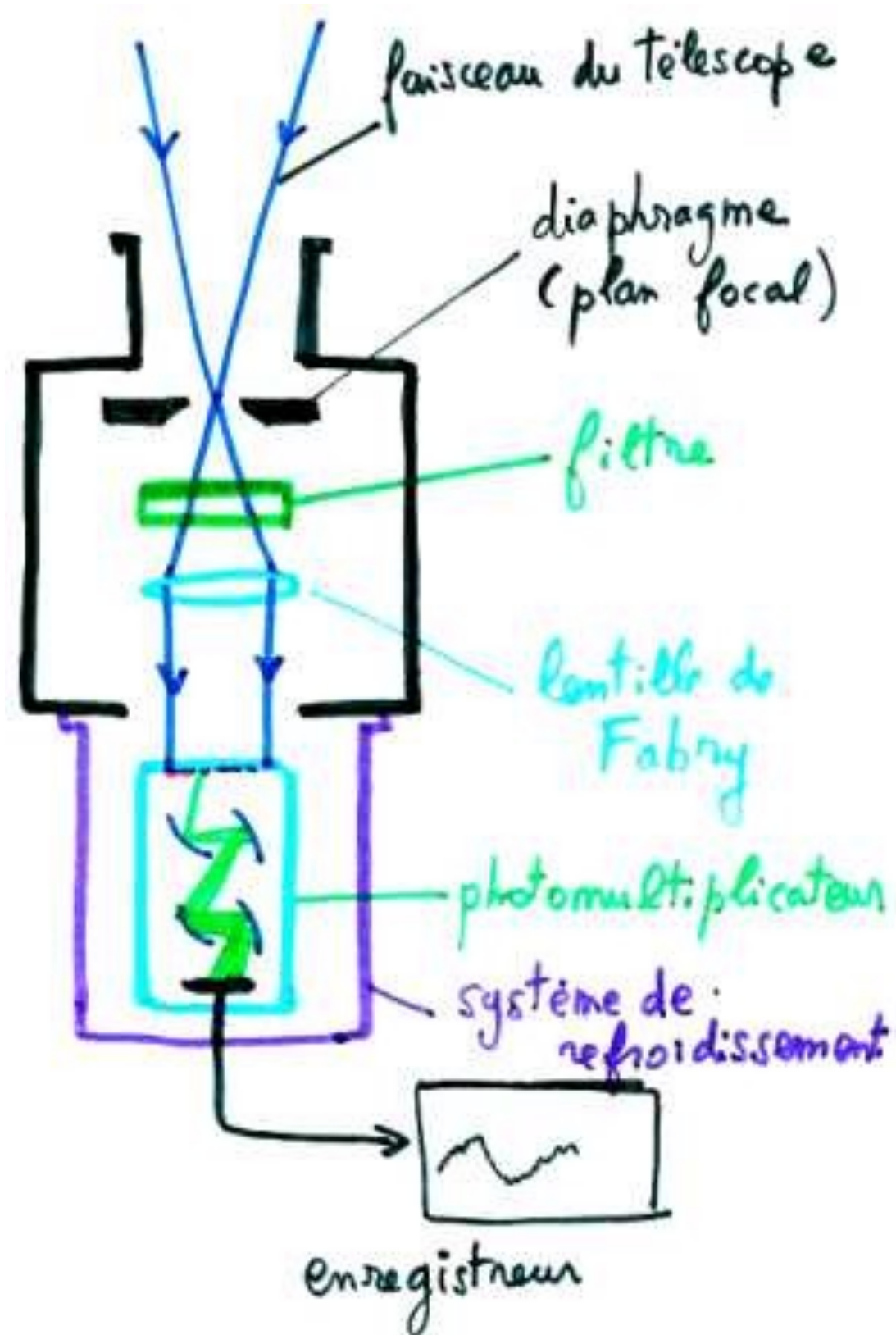


# Photomultiplicateur - PMT

Total electrons per photoelectron



# Photomultiplicateur – PMT e.g. ds Photomètre photoélectrique



montage optique de Ch. Fabry :  
forme l'image du miroir du télescope  
sur la photocathode (toujours la  
même partie de la photocathode qui  
est utilisée -> stabilité)

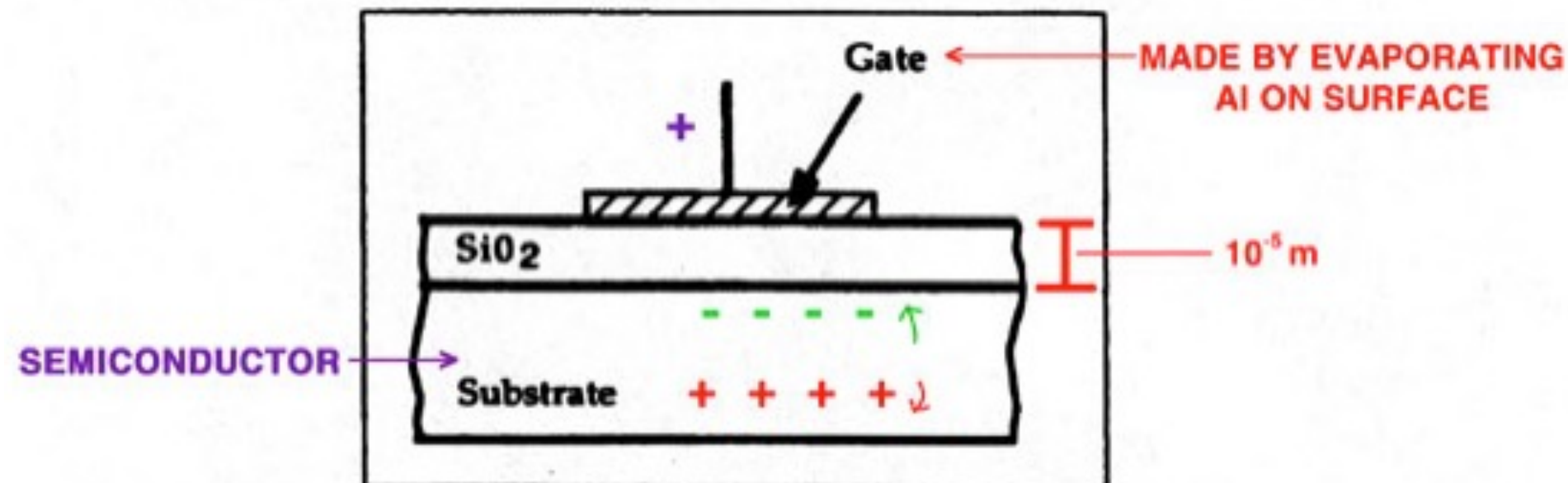
fournit qu'un seul canal de mesure -  
adapté à la mesure d'étoiles  
individuelles. Des filtres, interposés  
dans le faisceau, permettent d'isoler  
un domaine spectral bien défini pour  
réaliser, après plusieurs mesures,  
une sorte de spectrophotométrie à  
basse résolution.

# MOS semi-conducteur

## metal oxide semiconductor (MOS) capacitor

= la base du **pixel** dans les CCD, CMOS et autres instruments.

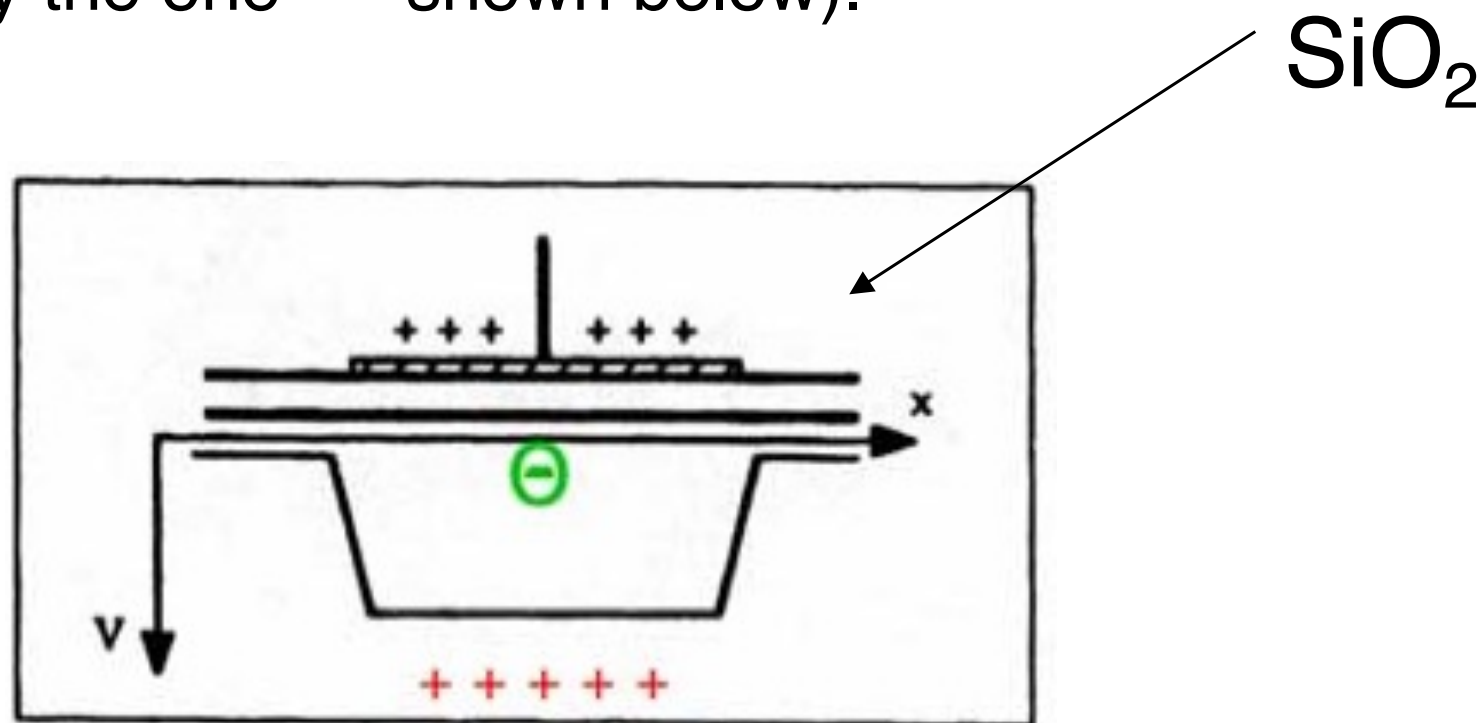
- semiconductor avec une fine couche isolante  $\text{SiO}_2$ .
- small electrode (gate) on top
- add positive charge to gate, free electrons in semiconductor move towards gate (and holes away) but they can't cross insulator. This is a **capacitor**.



# MOS semi-conducteur

- substrate out of a p-doped semiconductor, gate at +10 V:
- holes move away from the gate as before, *but* there are virtually no free electrons to move closer to SiO<sub>2</sub>.
- The region near the SiO<sub>2</sub> layer is called a depletion region or depletion zone.

Thus, if there are no thermally created electron-hole pairs, i.e. the device is cold, *only photoelectrons will collect near the Si-SiO<sub>2</sub> interface* (represented by the one “-” shown below).

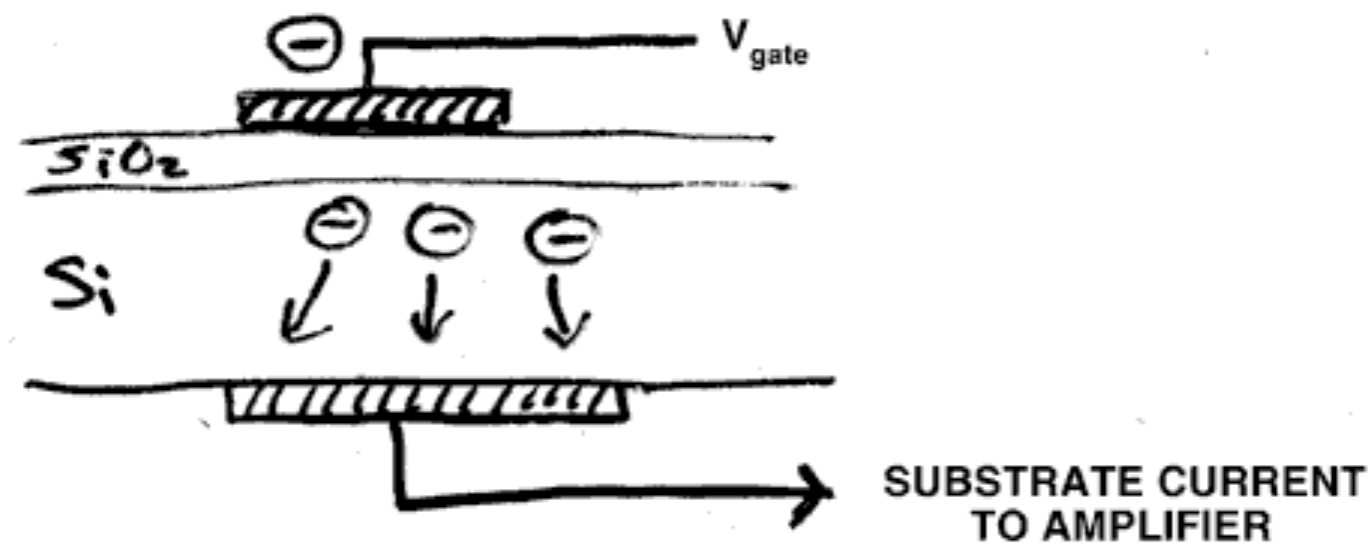




# MOS semi-conducteur

The depletion region can be thought of as a well, where photoelectrons are stored. The size of the well is proportional to the gate voltage : **bias voltage**

- maximum charge (number of electrons) in a pixel : **well capacity**.
- Well capacity ( units of e-) E.g. CCDs > 150,000 e-/pixel.
- key to *integration* : create and store photoelectrons in the pixel wells.
- How do we monitor the total charge collected in the pixels ?
- One way : switch the gate voltage and drive the electrons into the substrate



# CCD amincis

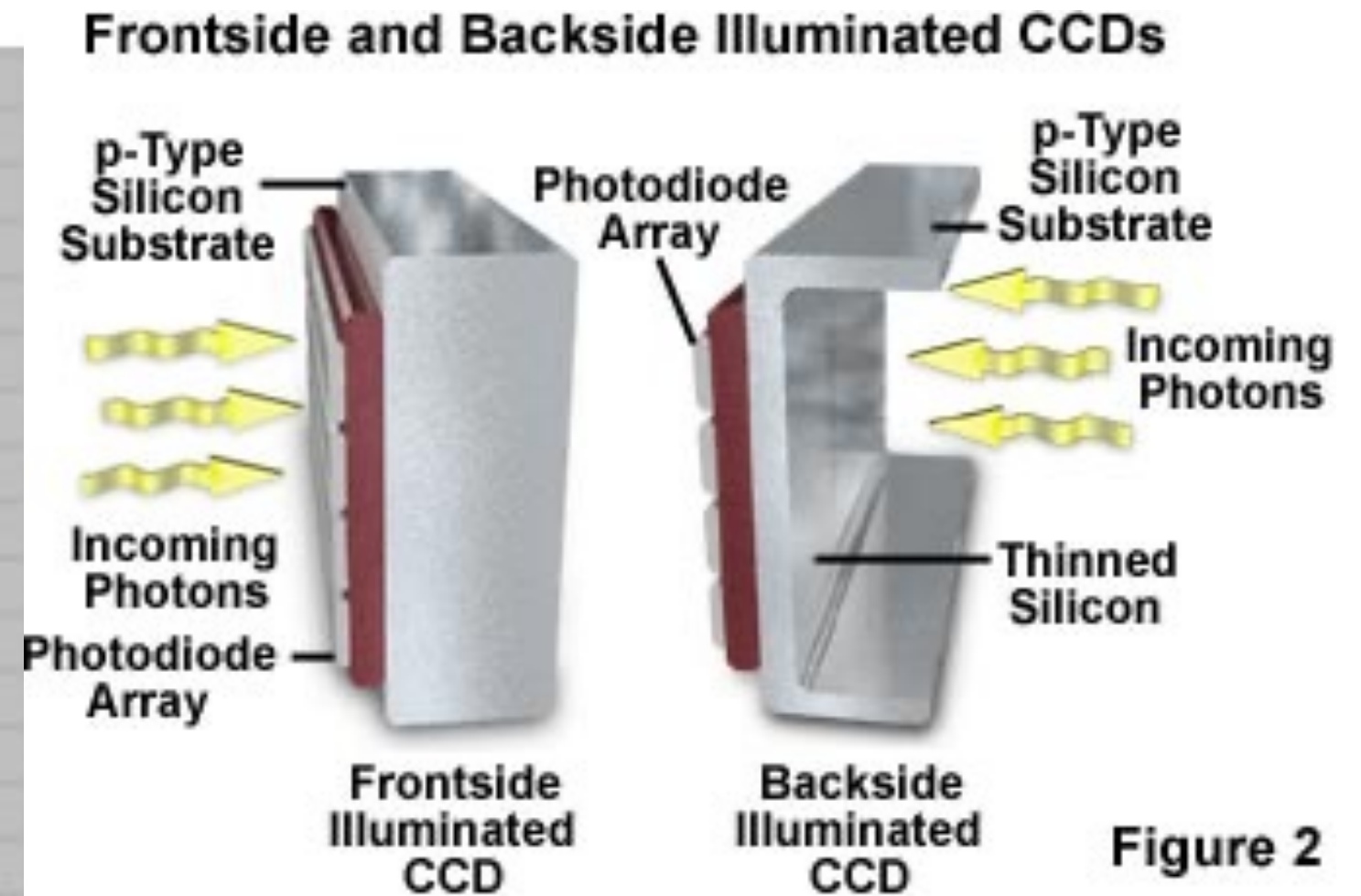
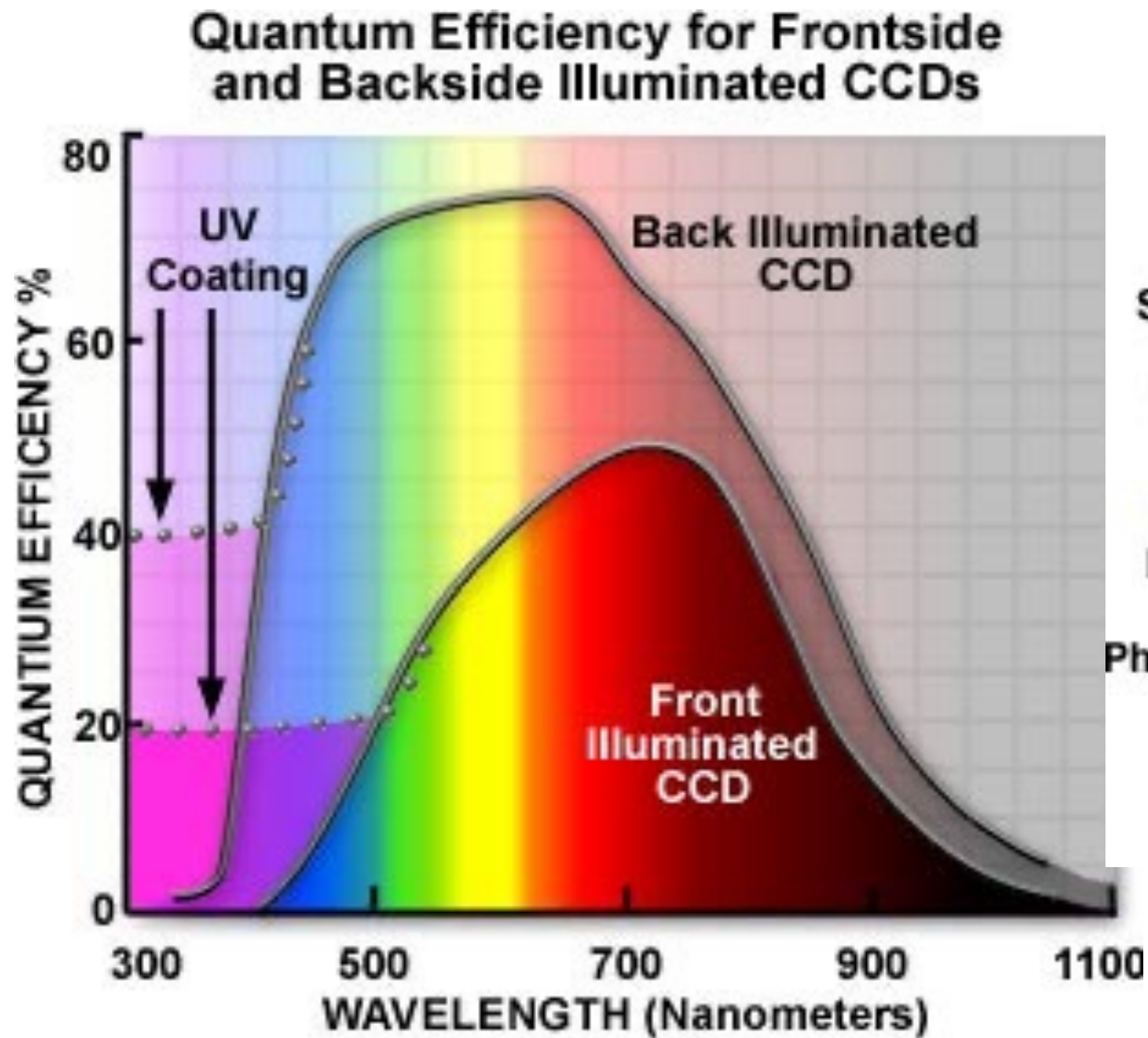


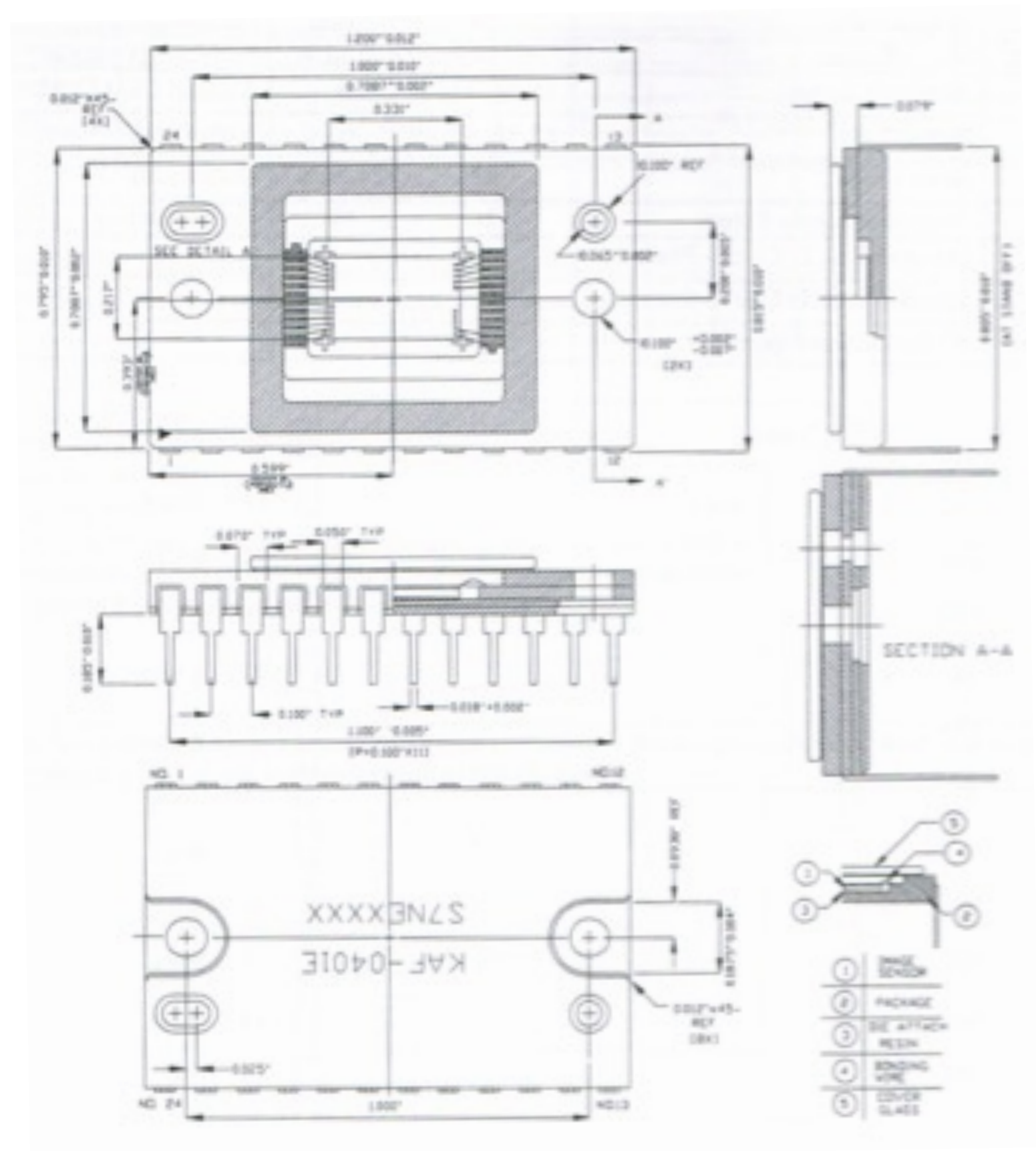
Figure 2

amélioration de  $\eta$  par la suppression partielle du substrat : exposer le CCD par sa face arrière permet aux photons UV de pénétrer directement dans la couche épitaxiale sensible sans avoir à traverser les électrodes.

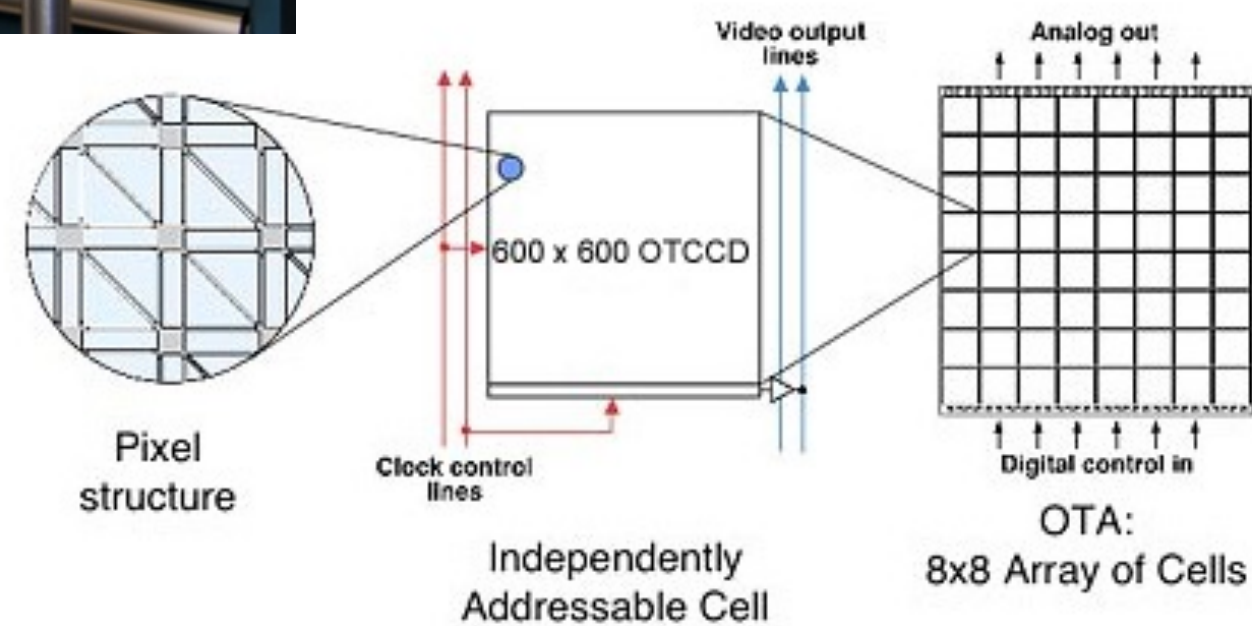
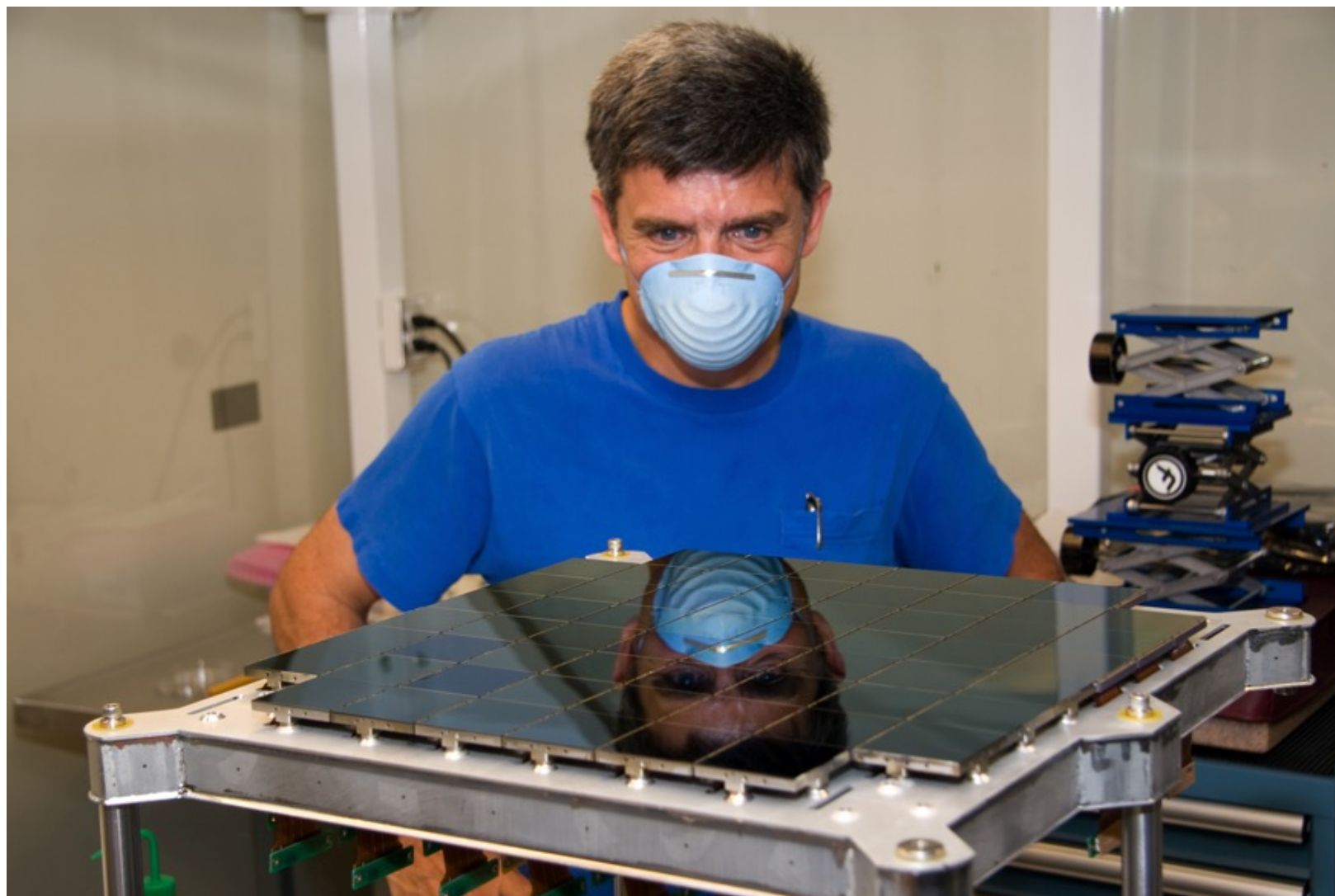
=> cahier de Travaux Pratiques

CCD primer de Kodak

CCD KAF-0401E

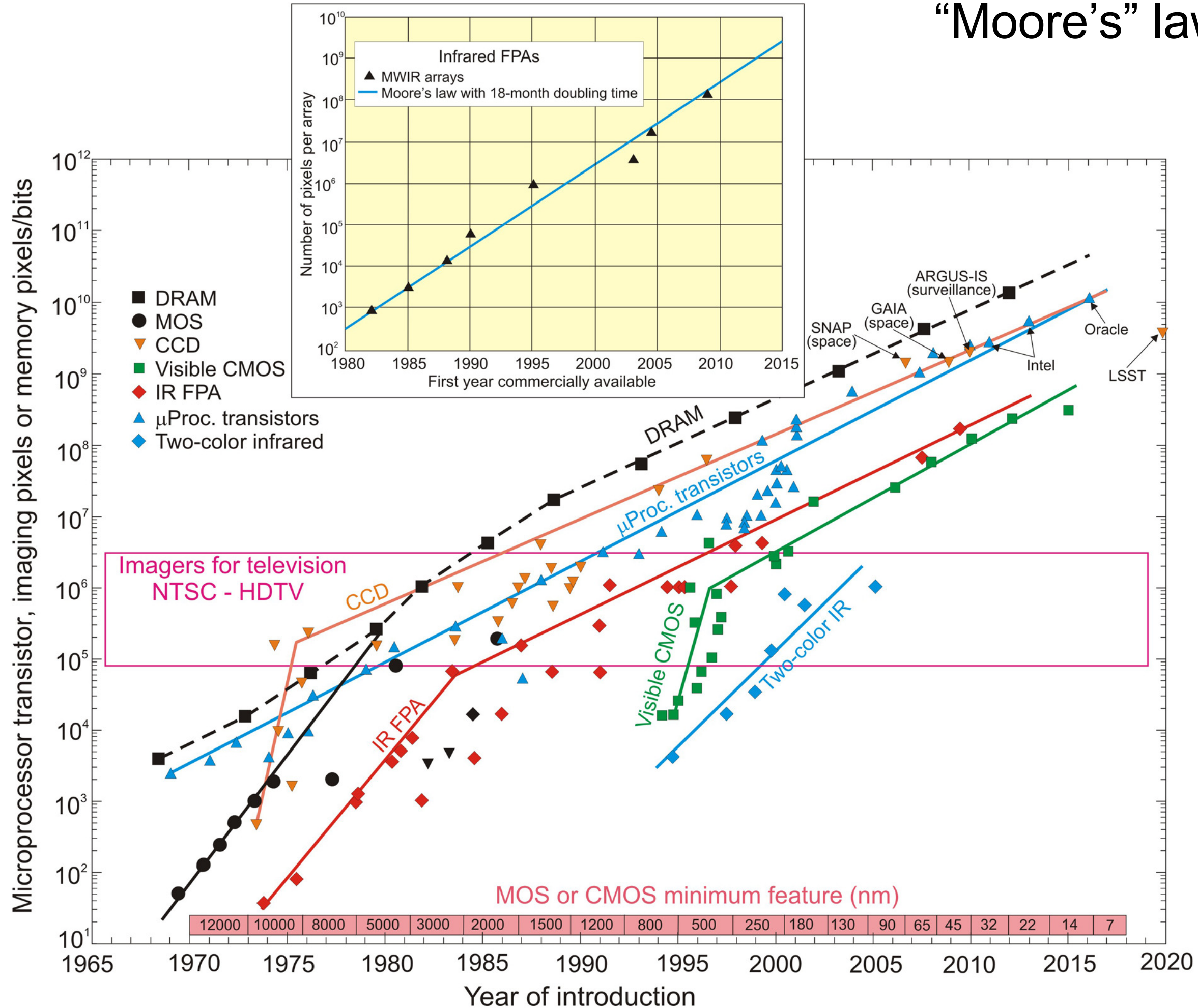


# PanSTARRS – 4 x 1.4 Gigapixel CCD

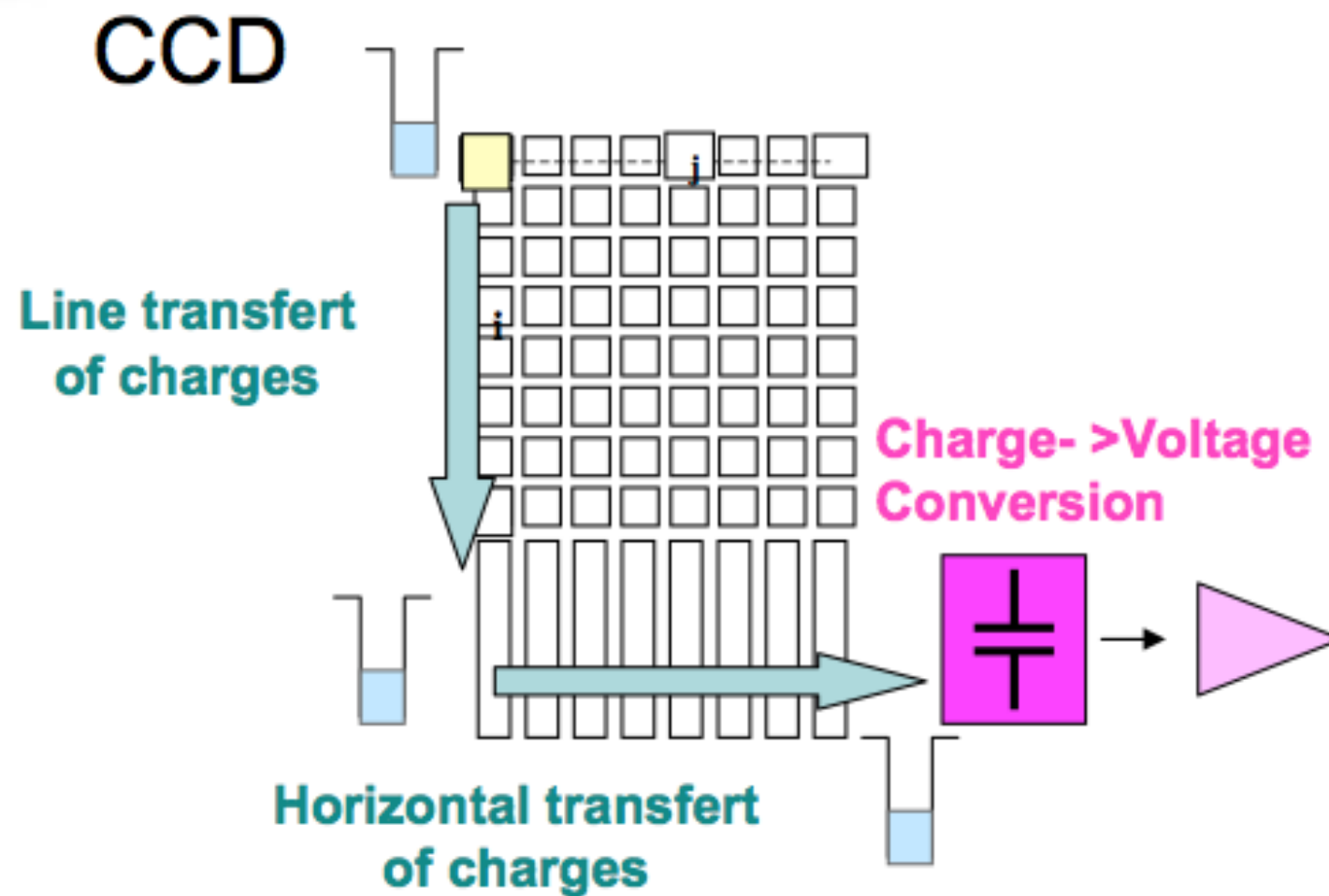


# evolution of imaging array formats compared with DRAM

“Moore’s” law ...

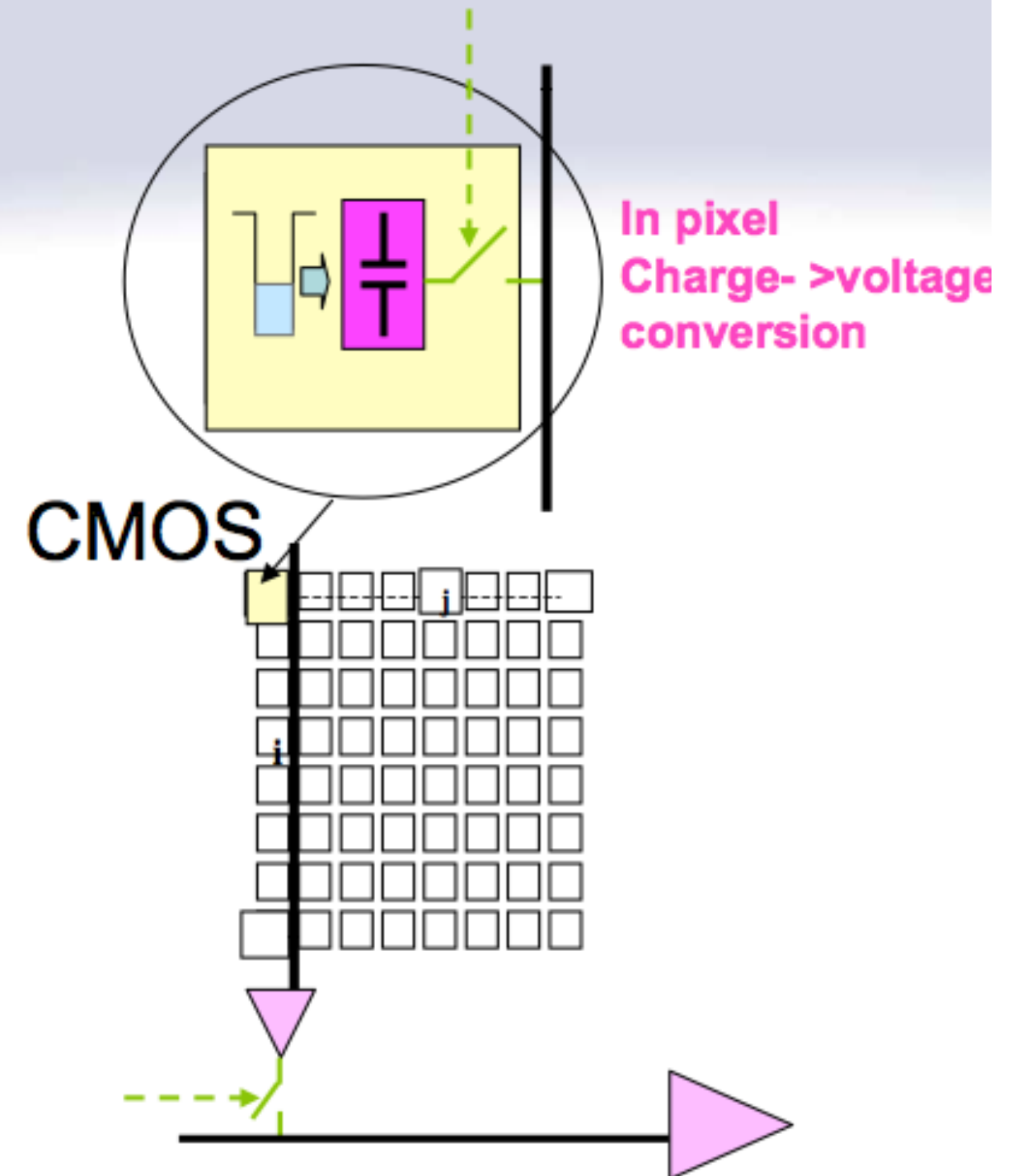


# CCD-CMOS Comparison



Inside CCD, Charges generated in the pixel is moved until the **output stage**, which perform the **Charge->Voltage** conversion

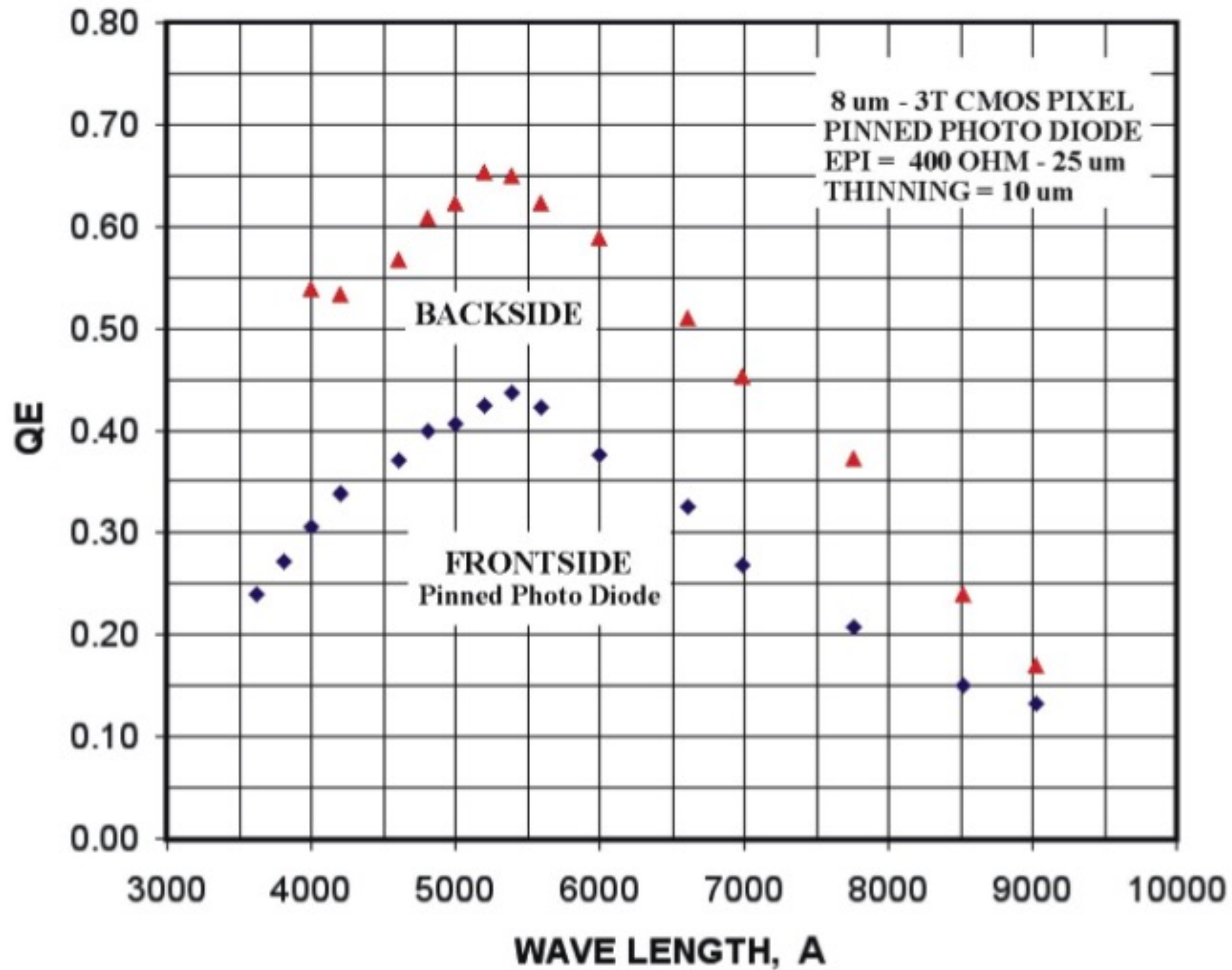
Readout is sequential : all pixels have to be read to acced to pixel (1,1)



Inside CMOS **charge-> voltage conversion is in the pixel**

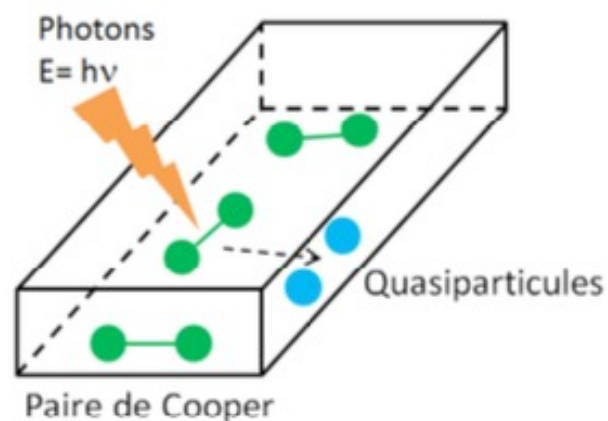
**Switches** are handled to put the selected voltage on the vertical bus

# CMOS (APS) – efficacité quantique

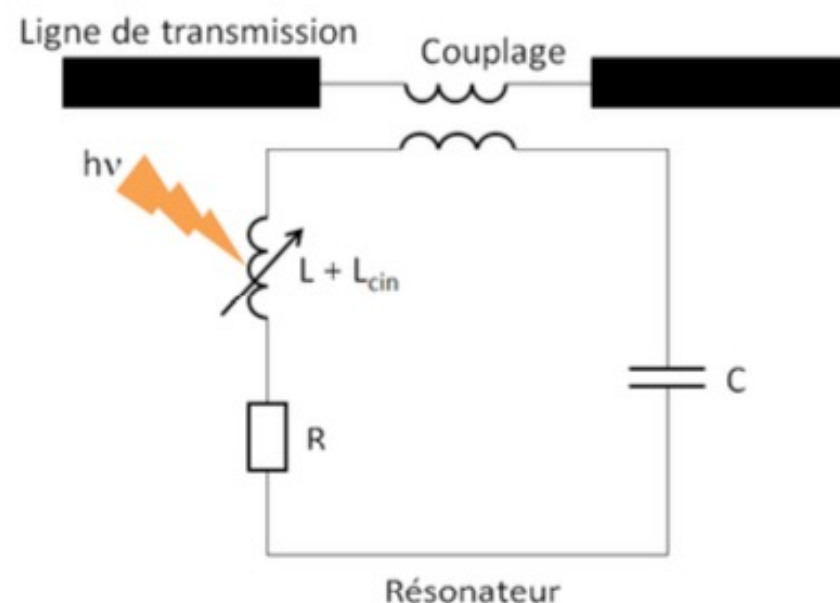


# Détecteurs à inductance cinétique (KIDS / MKIDS)

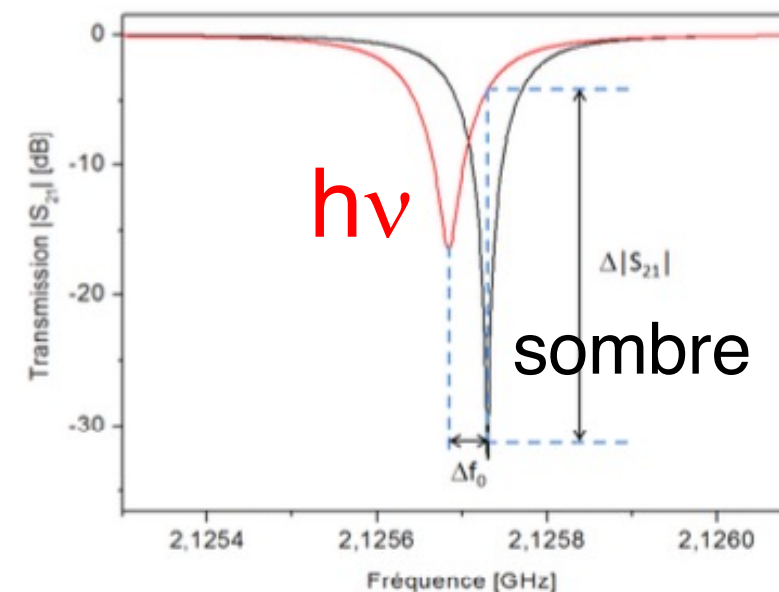
supraconducteur



Les photons brisent des paires de Cooper dans un supraconducteur créant des quasiparticules.



La partie inductive du résonateur lithographié dans le matériau supraconducteur augmente



Cela se traduit par un décalage de la fréquence de résonance par rapport à sa position initiale  $f_0$ .

**potentiel** : au delà de la distribution de l'intensité dans le plan focal, mesurer le temps d'arrivée du photon (détection ultra-rapide  $\sim 6$  ordres de magnitude plus rapide que les CCD), de son énergie (spectroscopie non dispersive  $\rightarrow$  IFU !), et sans bruit de lecture ou courant d'obscurité



# L'information transportée par les photons

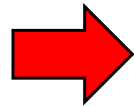
- temps d'arrivée
- angle d'incidence du photon
- longueur d'onde
- polarisation
- phase

Dans la bande visible, les quantités directement mesurées des photons incidents sont (jusqu'à présent, cad CCD)

- intensité
- temps d'arrivée

# Systemes d'observation pour le domaine visible

- le rôle de l'observation en astrophysique
- telescopes
  - systèmes optiques (réfracteurs, réflecteurs)
  - montures
  - optique active
  - optique adaptative
- instrumentation focale
  - les détecteurs pour le domaine visible
    - photométrie
    - imagerie
    - spectroscopie
- caractéristiques du système d'observation



# Photométrie

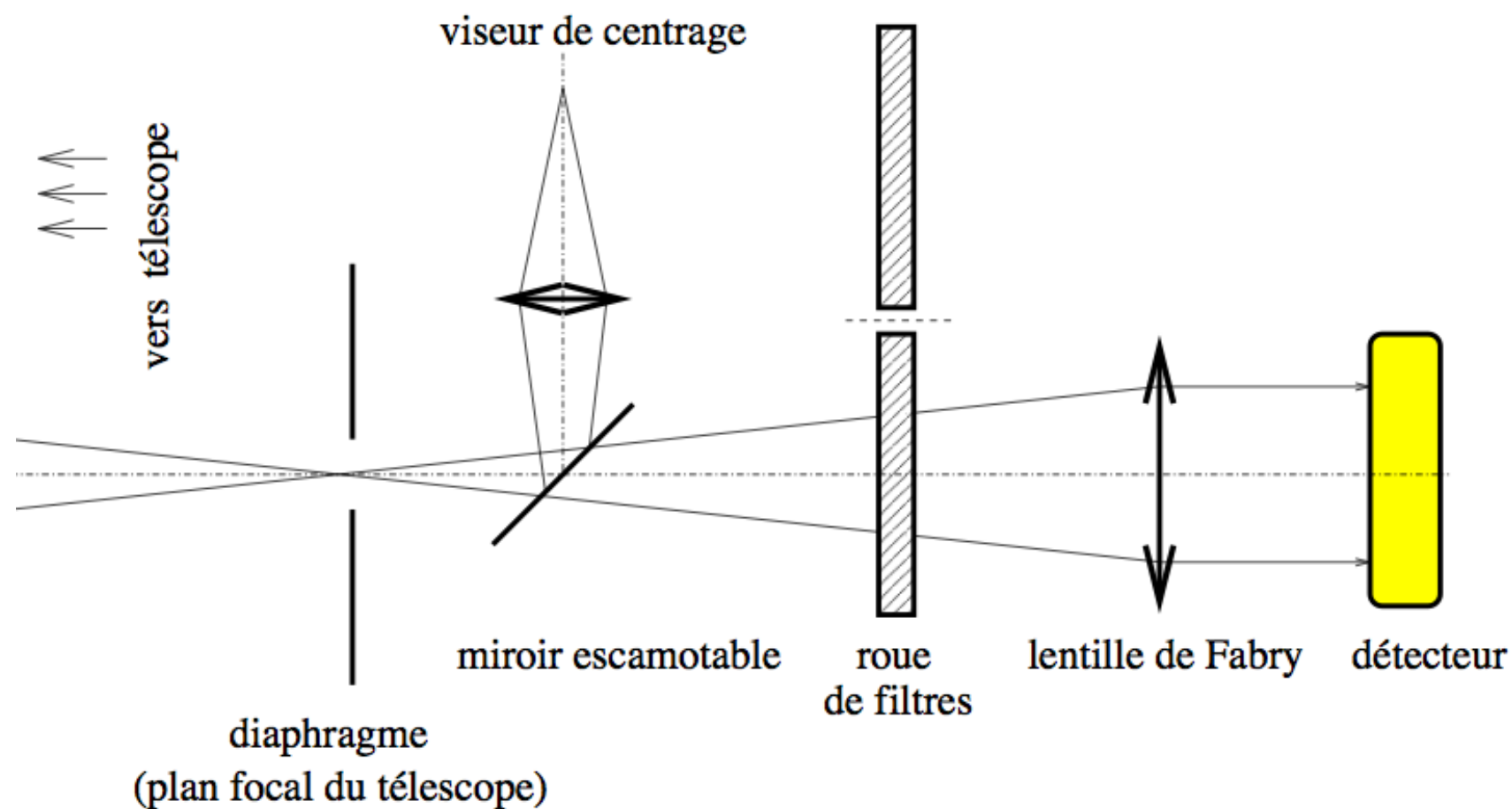
objectif :

mesurer le flux d'une region bien definie du ciel  
dans une bande passante spectrale (filtres)

exemples :

- estimation de la temperature effective (2 filtres)
- classification spectrale (3 filtres)
- variabilité (courbe de lumière : pulsation, rotation, occultation, transit - 1 filtre)

# Photomètre photoélectrique



- + simple
- 1 pixel ...
- pas de resolution spatiale
- contribution du fond du ciel
- mesure du fond du ciel indispensable

- l'objet est decoupé mécaniquement par le diaphragme
- filtre dans faisceau défocalisé ( $\Rightarrow$  insensible aux variations locales de densité)
- la lentille de Fabry forme l'image de la pupille du telescope sur le detecteur ( $\Rightarrow$  insensible aux variations locales du rendement du détecteur)

montage optique de Ch. Fabry : forme l'image du miroir du télescope sur la photocathode (toujours la même partie est utilisée  $\rightarrow$  stabilité)

# Photometrie : les anciens

Les anciens répartissaient les étoiles en 6 grandeurs :

- grandeur 1, les plus brillantes,
- grandeur 2 un peu moins brillantes,
- 
- 
- 
- grandeur 6, à peine visibles à l'oeil.

Aujourd'hui on mesure l'éclat des étoiles dans une échelle logarithmique :

**la magnitude.**

Echelle raccordée à l'échelle des anciens = loi de Pogson

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log ( f_1 / f_2 )$$

# Photometrie : magnitude apparente (mesurée)

deux étoiles avec flux lumineux  $f_1$  et  $f_2$

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log ( f_1 / f_2 ) \quad \text{ou} \quad f_1 / f_2 = 10^{-0.4(m_1 - m_2)}$$

augmentation de la luminosité d'un facteur 10

=> soustraction de 2.5 magnitudes

le flux lumineux  $f$  est lié à la magnitude apparente  $m$  par

$$f \approx 2 \cdot 10^{-8} \cdot 2.5^{-m} \text{ [Wm}^{-2}\text{]}$$

# Systemes photométriques

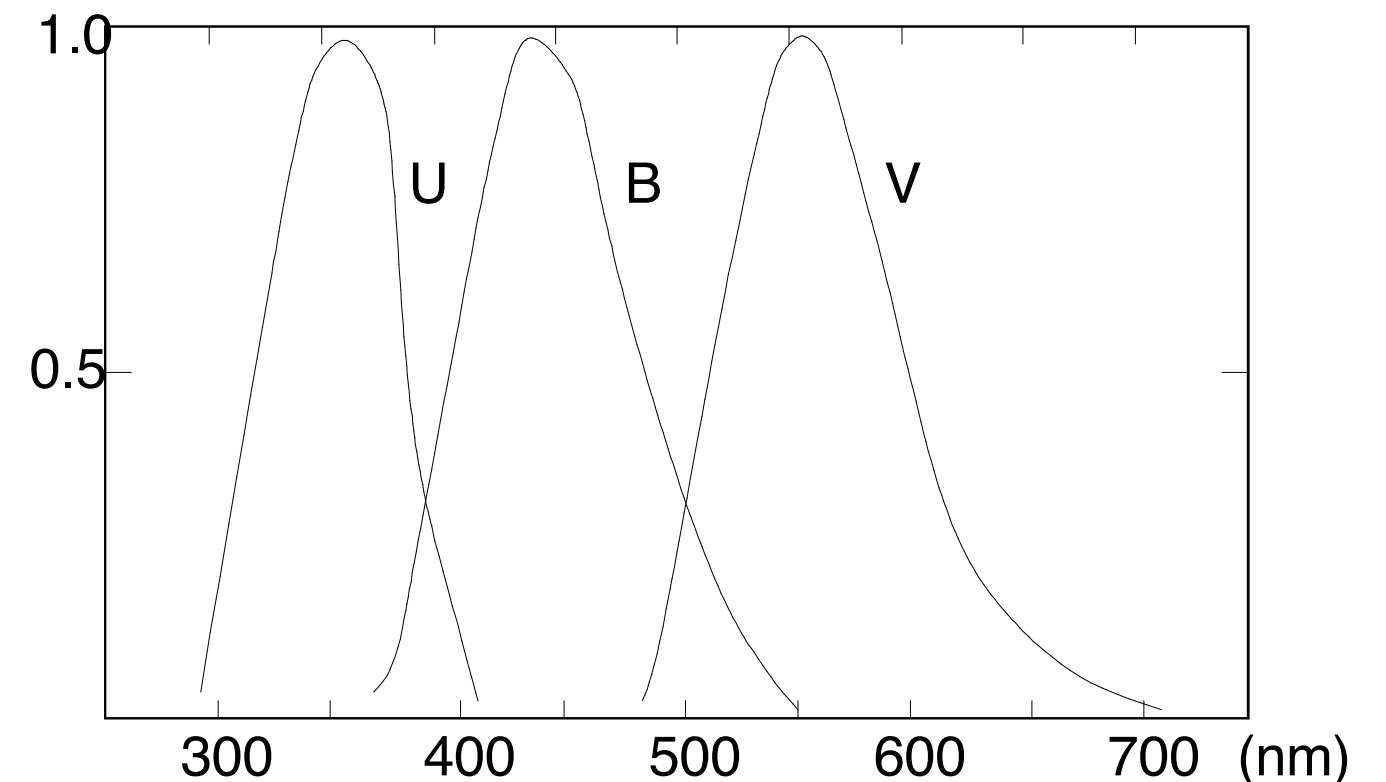
On mesure le rayonnement dans des bandes spectrales au moyen de **filtres**.

Un ensemble de filtres choisis forme un **systeme photométrique**.

Il existe de nombreux systemes photométriques

Caractéristique des filtres :

- **centre de la bande passante**,
- **largeur** de la bande  
(largeur à mi-hauteur 90% du flux).



Le plus simple et plus répandu est  
le **systeme UB**

- l'ultraviolet (*U*), le bleu (*B*) et le visible (*V*).

Et extension à l'infrarouge : **IJKLMNOP**

# Magnitudes : système UBV

La magnitude d'un objet dépend du domaine de longueur d'onde observé : visible, bleu, ultraviolet, infrarouge, radio...

Observation des étoiles en plusieurs couleurs :

magnitudes  $m_U$ ,  $m_B$ ,  $m_V$

$$\begin{aligned}\lambda_U &\approx 3650 \text{ \AA} \\ \lambda_B &\approx 4400 \text{ \AA} \\ \lambda_V &\approx 5480 \text{ \AA}\end{aligned}$$

Pour un même objet, la différence de magnitude correspond à mesurer le rapport des intensités en deux couleurs

$$m_B - m_V = -2,5 \log_{10} \left( \frac{E_B}{E_V} \right)$$

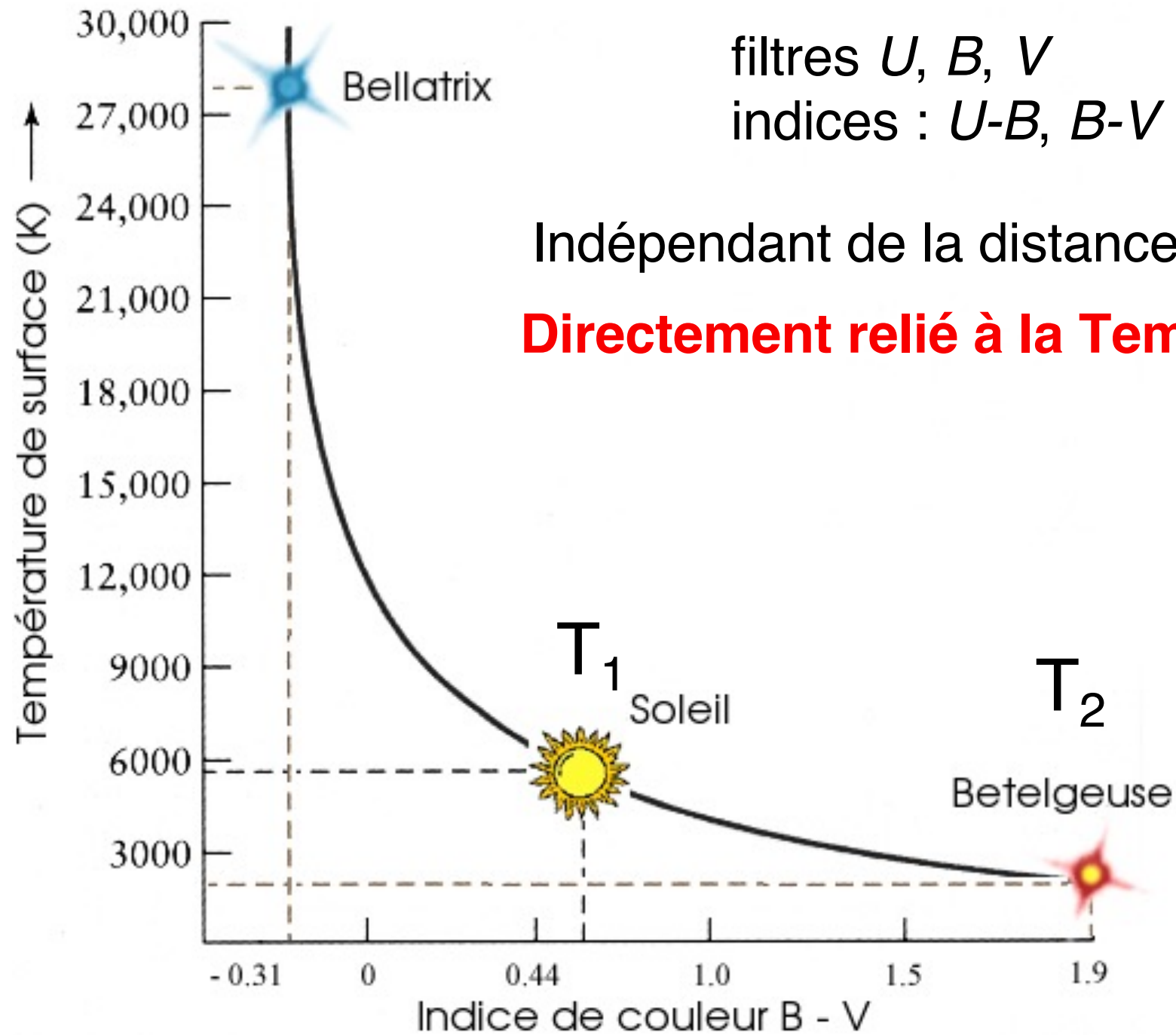
C'est un indice de couleurs : B-V ou U-B, I-R etc

L'indice B-V est un repère de température



# Indice de Couleurs

Couleur de l'étoile donnée par l'indice de couleur :



$$T_1 > T_2$$

$$\frac{E_{B_1}}{E_{V_1}} > \frac{E_{B_2}}{E_{V_2}}$$

$$m_{B_1} - m_{V_1} < m_{B_2} - m_{V_2}$$

En passant en magnitude, l'inégalité s'inverse :

$$B_1 - V_1 < B_2 - V_2$$

# Caracteristiques des Filtres

Flux energetique reçu sur terre :

$$f = \int_0^{\infty} f_0(\lambda) T(\lambda) R(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

- ou
- $f_0(\lambda)$  = Flux incident à l'exterieur de l'atmosphere
  - $T(\lambda)$  = Transmission à travers l'atmosphere
  - $R(\lambda)$  = Efficacité du detecteur (& telescope)
  - $S(\lambda)$  = fonction de transmission du filtre

Deux familles de filtres:

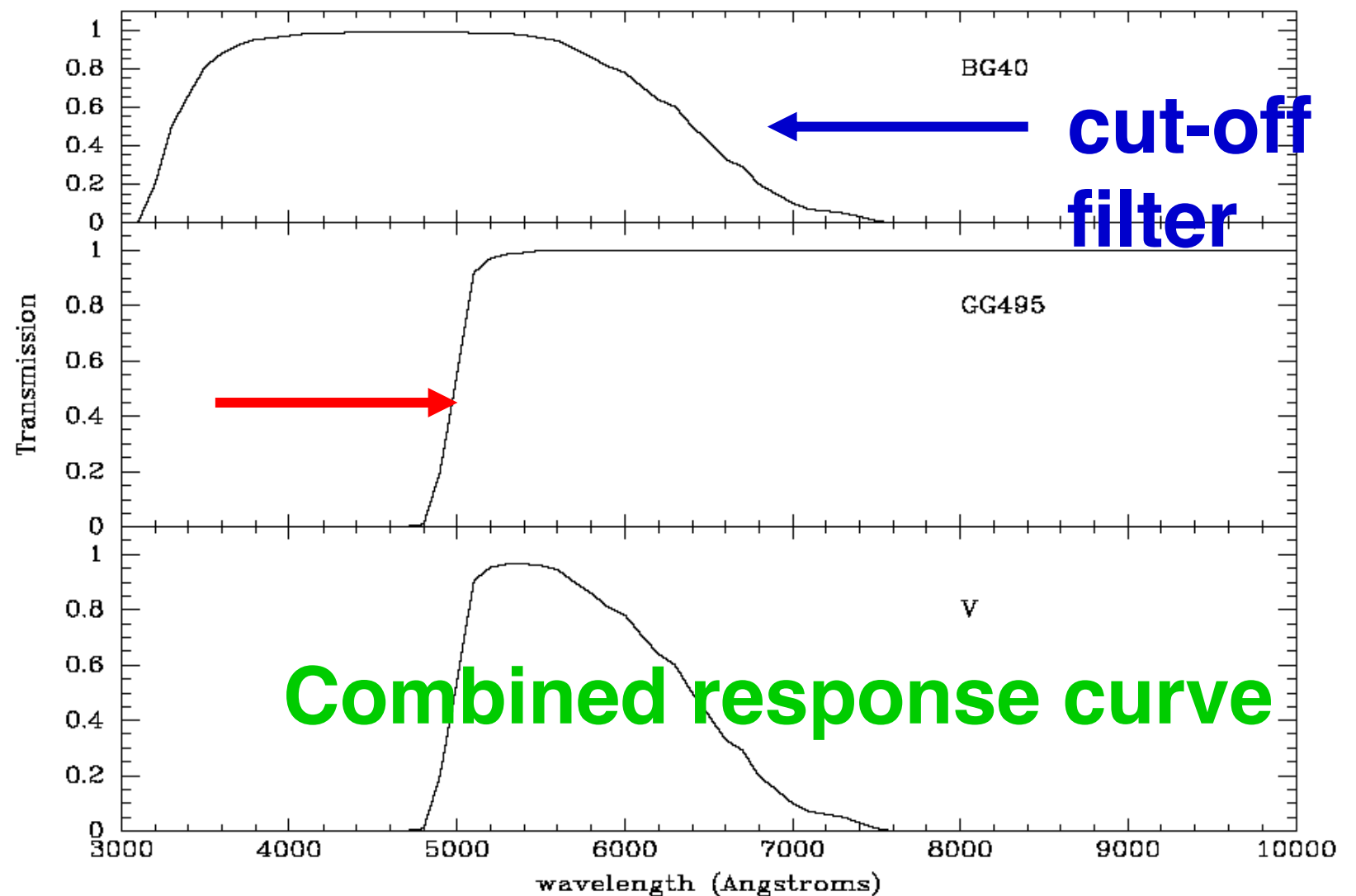
- Verre coloré : bande spectrale large
- interference: bande spectrale étroite

# filtre large bande

souvent une combinaison de deux filtres de verres (Schott) colorés, un pour couper les photons de grande longueur d'ondes (le filtre de limite), un autre pour couper les courtes longueur



**cut-on filter**



# Filtre d'interference (bande étroite)

Interference filters use light coming from multiple reflections off a thin glass layer.

If the **optical path difference** between successive rays are **integral multiples** of a wavelength, the constructive interference will produce a strong output.

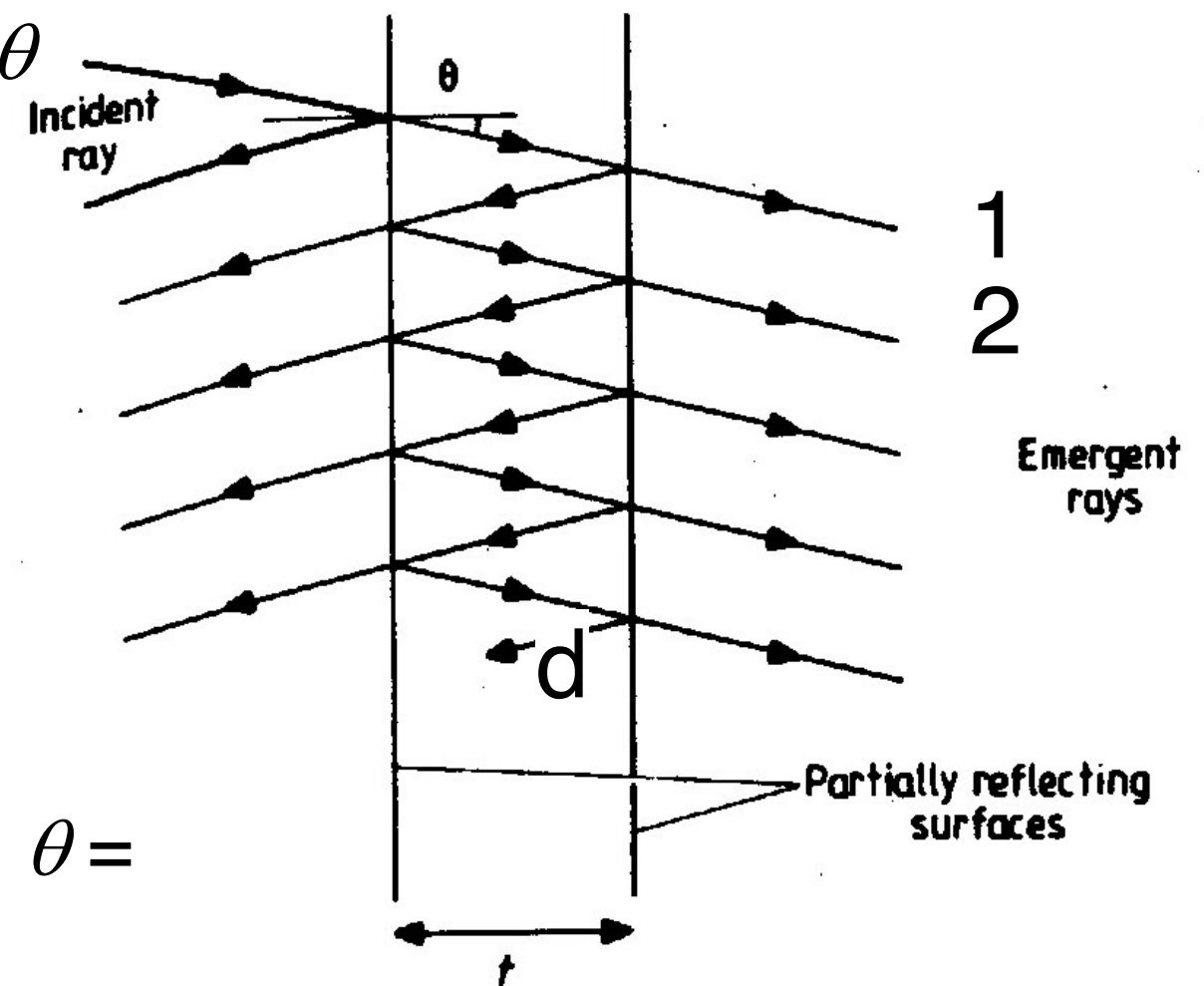
Path difference between rays 1&2:  $2d/\cos\theta$

Optical path difference between rays 1&2:  $2nd/\cos\theta$ ,  $n = \text{refractive index of glass}$

Constructive interference occurs when:

$2nd/\cos\theta = m\lambda$ , where  $m = \pm 1, \pm 2, \dots$

If the filter is used at normal incidence, i.e.  $\theta = 0$ , then we have  $\lambda_m = 2nd/m$



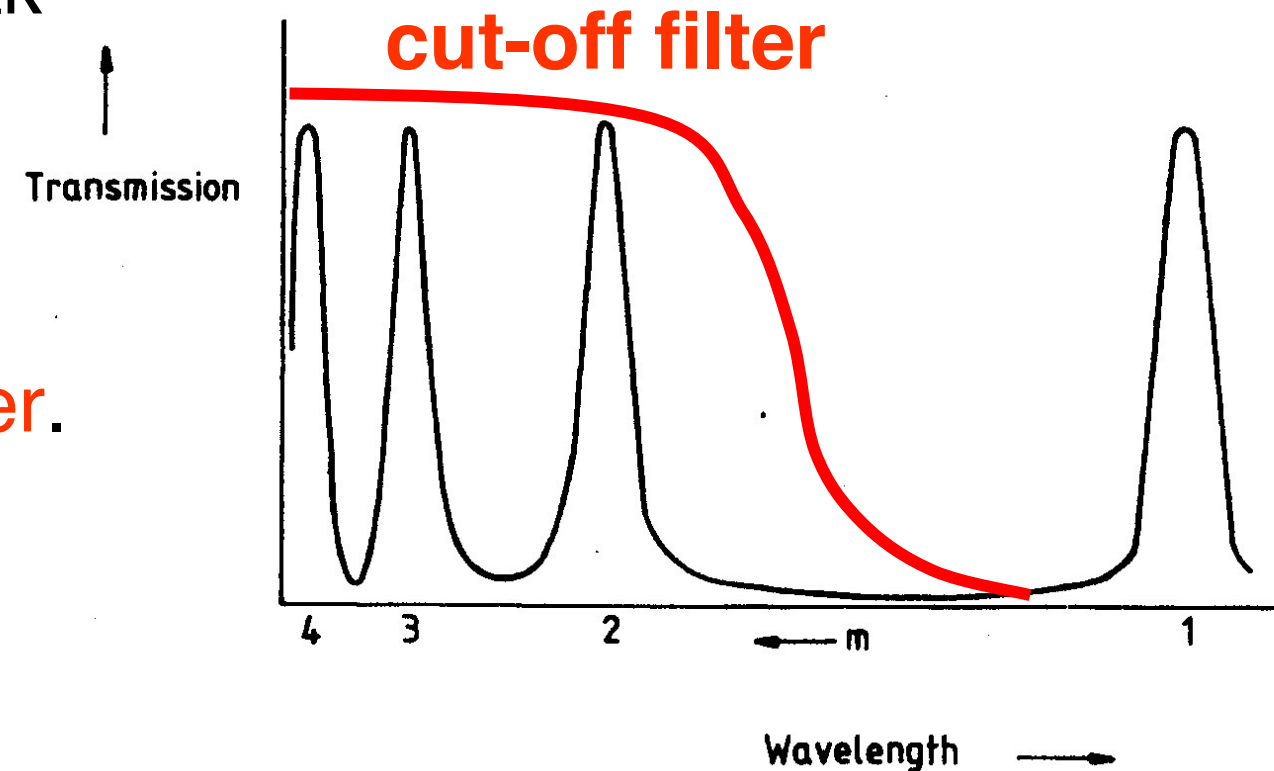
# Filtre d'interference (bande étroite)

Usually, used for wavelength  $\lambda_m$  where  $m = 1$  to get transmission peak that is well separated from other peaks.

Use in combination with a **cut-off filter**.

Used for **imaging of a particular emission line** from an atom (e.g. H $\alpha$  6563Å, [O III] 5007Å)

Can be used for imaging of a **red-shifted** emission line by rotating the filter (thus changing  $\theta$ )



Courtesy: Robert C. Smith,  
Observational Astrophysics

# Photométrie CCD

filtre dans le faisceau devant le CCD

+ mesure simultanée objet-ciel

+ résolution spatiale

+ grand "throughput"

- mesure de filtres séquentielle

- étalonnage complexe

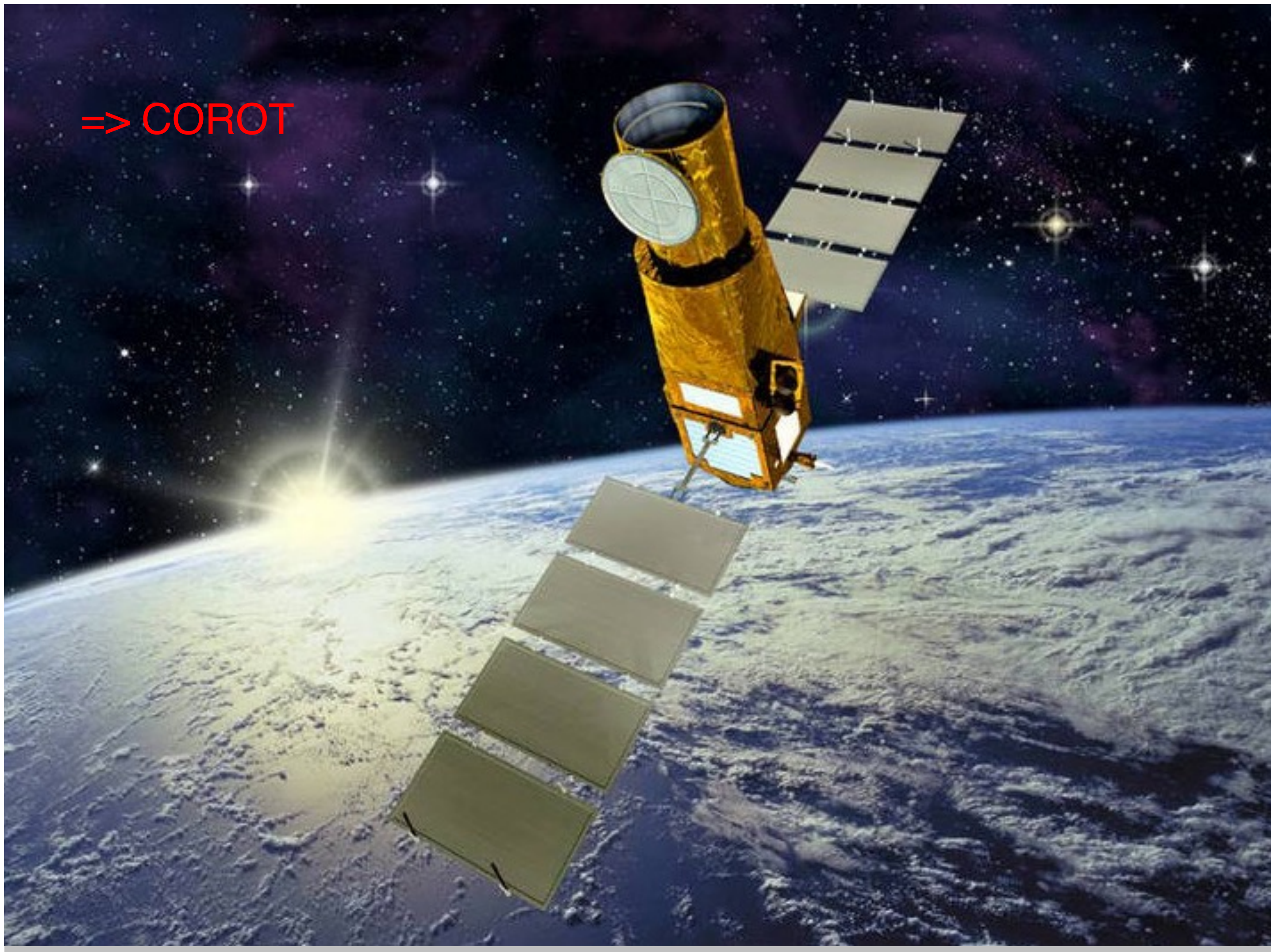
- résolution temporelle modeste (dep du type de la matrice)

# Photométrie CCD

la photométrie avec des données issues d'imagerie CCD:

1. Faire des images à travers différents filtres
2. Faire des image d'un champ stellaire standard à proximité - avec les mêmes filtres et a différents masses d'air
3. Réduire les images CCD avec un bias, dark, et flat
4. Deduire le taux de comptage de l'objet (PSF fitting photometry)
5. Corriger pour l'extinction atmosphérique et pour l'extinction interstellaire
6. Convertir -> photométrie filtre standard (équations de transformation)

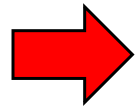
=> COROT





# Systemes d'observation pour le domaine visible

- le rôle de l'observation en astrophysique
- telescopes
  - systèmes optiques (réfracteurs, réflecteurs)
  - montures
  - optique active
  - optique adaptative
- instrumentation focale
  - les détecteurs pour le domaine visible
    - photométrie
    - imagerie (très abrégé ici - voir TP CCD)
    - spectroscopie
- caractéristiques du système d'observation



# Bias, Dark, Flat : Principe du prétraitement d'une image CCD

**I** = **B + T + L** valeur sur un pixel de l'image brute

**B bias** (ou offset) = constante pour ce pixel; apparaît sur toutes les images, quelque soit le temps de pose et la lumière reçue.

*placer la caméra dans l'obscurité, pose de temps d'intégration le plus court possible.*

**T thermique** : proportionnelle au temps de pose; apparaît sur toutes les images, quelle que soit la lumière reçue. Le thermique augmente d'autant moins vite que la caméra est mieux refroidie (d'où son nom).

**D dark** (ou noir) : **D = B + T**

*placer la caméra dans l'obscurité, pose avec un temps d'intégration exactement semblable à l'image brute qu'il faudra prétraiter.*

**L contribution lumineuse** : **L = E \* R** (éclairage incident E, réponse R)

*R pose sur un champ uniforme (image sur le ciel crépusculaire typiquement) de façon à ce que E ne dépende pas du pixel et soit considéré comme une constante c =>*

**flat** (ou PLU plage de lumière uniforme) **f = c \* R**

**F image brute d'un flat** : **F = B + T' + c \* R = f + D' => f = F - D'**

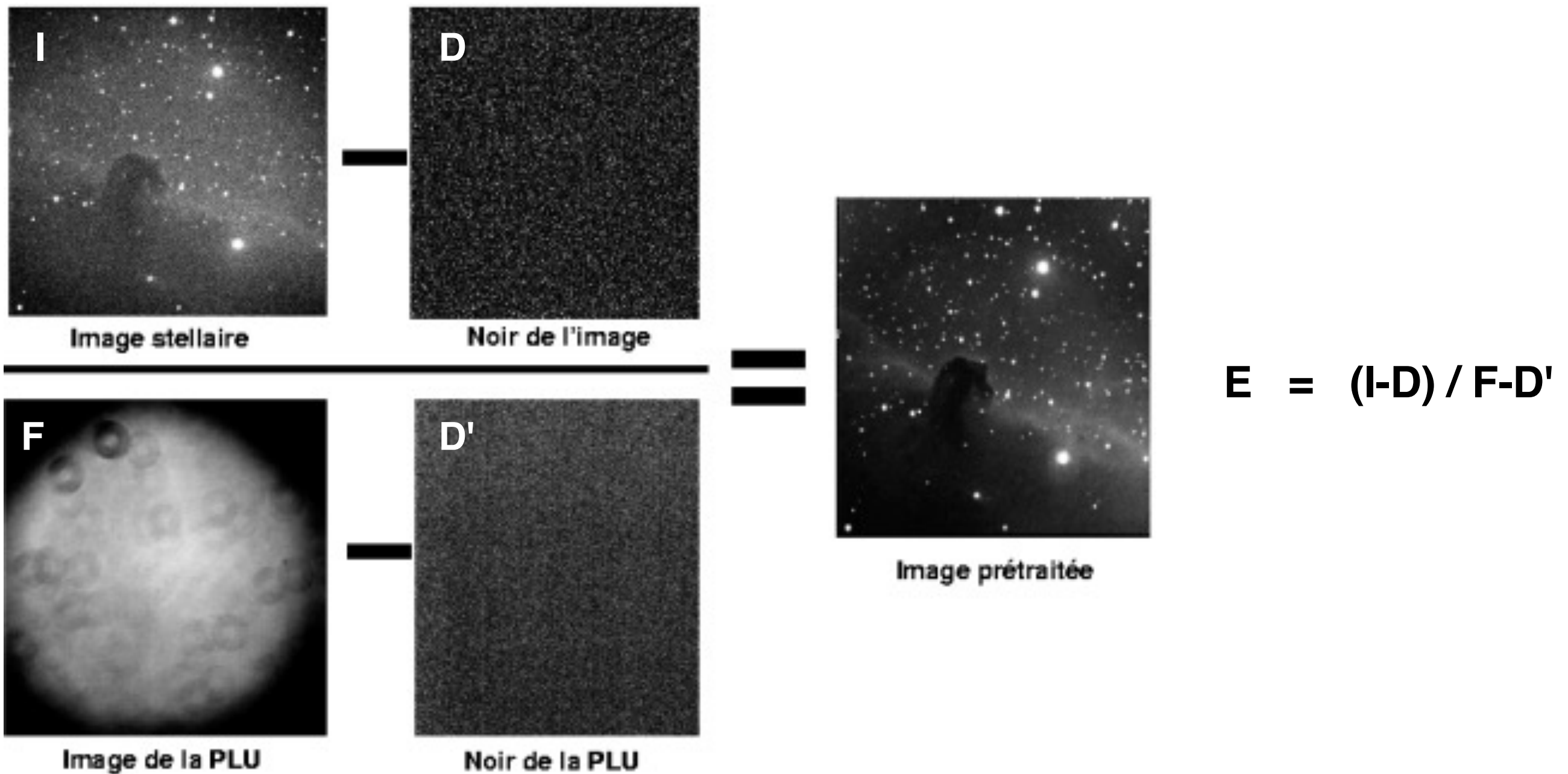
**E = (I - D) / F - D'**

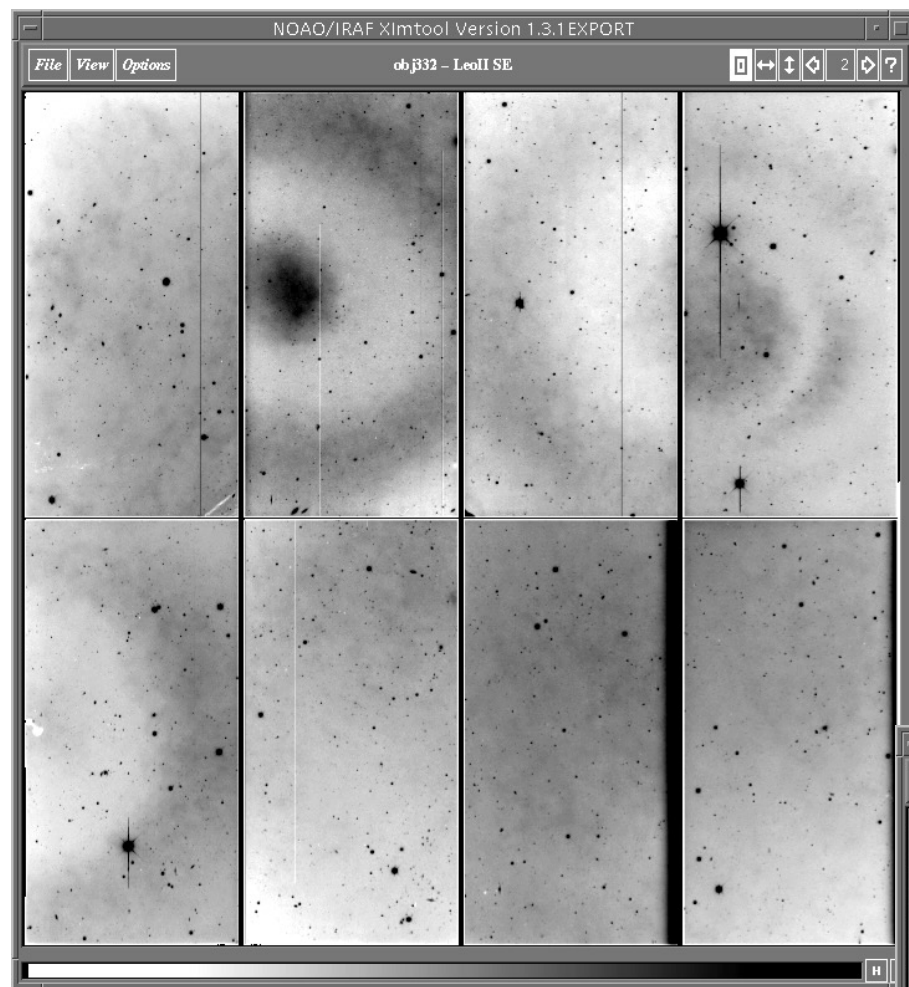
# Bias, Dark, Flat : Principe du prétraitement d'une image CCD

**I** = **B + T + L** valeur sur un pixel de l'image brute

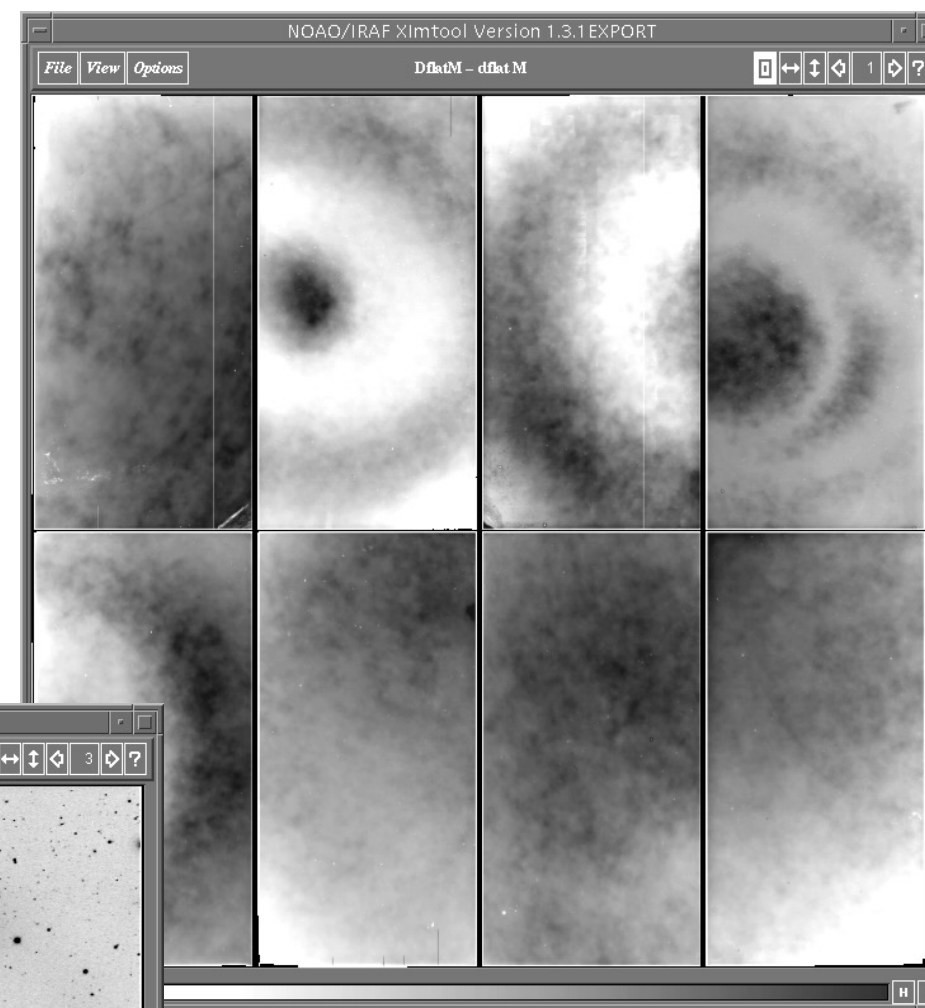
**D** dark (ou noir) : **D = B + T**

**F** image brute d'un flat : **F = B + T' + c\*R = f + D' ⇒ f = F - D'**

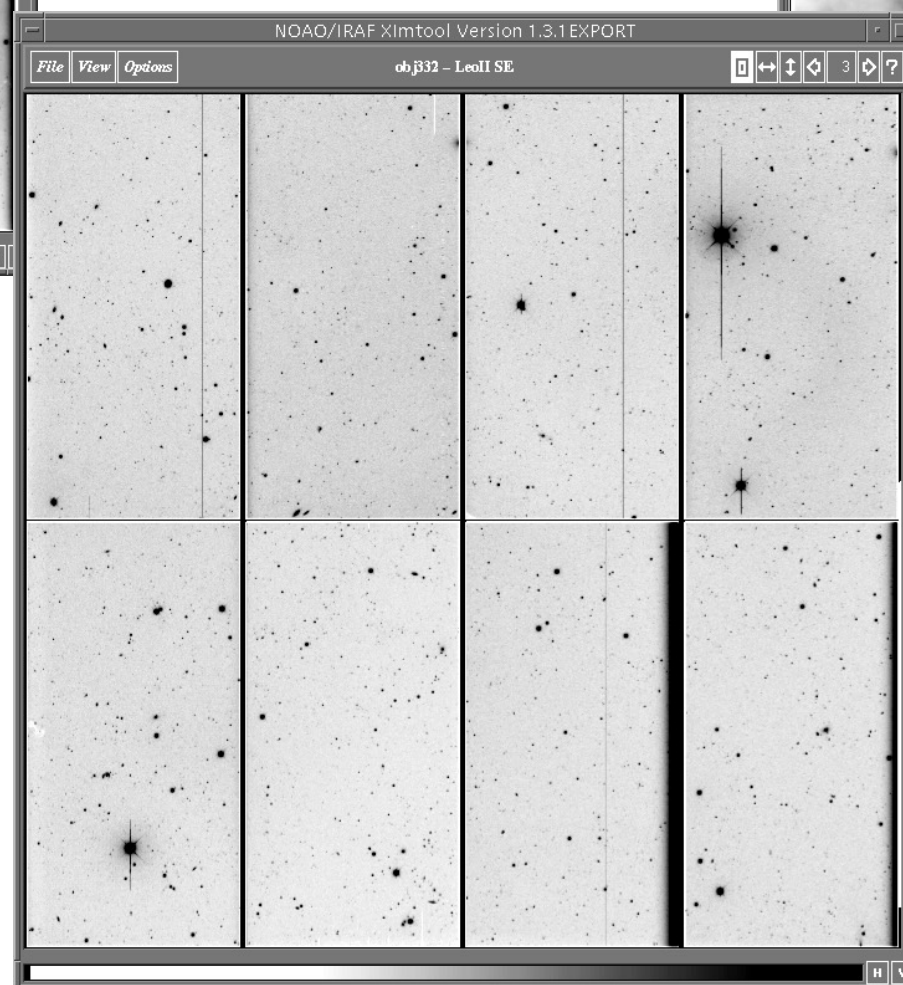




Before flatfielding



Flatfields



After flatfielding