

# L'imagerie à très faible flux de photons

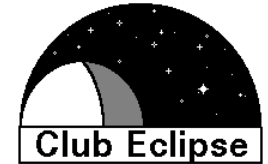
**Thierry Midavaine**

**Club Eclipse**

**RCE 2006**

[thimidav@club-internet.fr](mailto:thimidav@club-internet.fr)





# Plan de la présentation

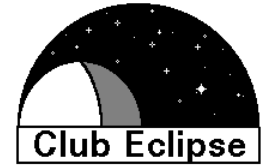
1. Les flux à bas niveau de lumière en astronomie
2. L'œil en référence
3. Les Intensificateurs de Lumière
4. EBCMOS - EBAPS
5. Les cameras vidéos
6. Les EMCCD

# Acronymes

---

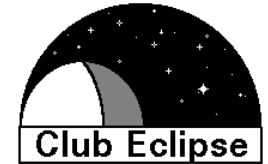
- APS: Active Pixel Sensor
- CCD: Charge Coupled Device ou Dispositif à Transfert de Charges
- Back Illuminated CCD CCD à éclairage face arrière
- CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor EBCCD-EBCMOS-EBAPS Electron Bombarded CCD – CMOS
- EMCCD Electron Multiplied CCD
- IL: Intensificateur de Lumière ou Amplificateur de Brilliance
- I<sup>2</sup> ou II : Intensificateur d'Image ou Image Intensifier
- ICCD Intensified Charge Couple Device, Dispositif à Transfert de Charge Intensifié
- MCP Micro Channel Plate ou Galette de microcanaux
- 1ere gen Tube à lentille electrostatique
- 2nd gen Tube à galette de microcanaux
- 3eme gen Tube à photocathode en GaAs
- 4eme gen Tube sans film de protection ou Tube à photocathode à Transfert d'Electron

# 1. Les flux à bas niveau de lumière en astronomie



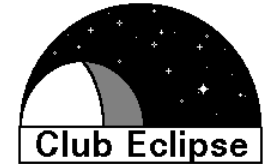






# Les unités photométriques

➤ <b>Energie</b>	Joule J		lm.s	photons
➤ <b>Flux</b>	Watt	$J.s^{-1}$	lumen	photons/s
➤ <b>Intensité</b>		$W.sr^{-1}$	candela	
➤ <b>Luminance</b>		$W.sr^{-1}.m^{-2}$	$cd.m^{-2}$	
➤ <b>Eclairement</b>		$W.m^{-2}$	lux $\equiv$ magnitude V	



# La magnitude en astronomie

- Un rapport 100 entre l'éclairement de deux sources correspond à une différence de 5 magnitudes.
- 1 magnitude correspond à un rapport de
  - ${}^5\sqrt{100} = 2.5119$
- Une étoile de magnitude V 0 délivre un éclairement de  $2.65 \cdot 10^{-6}$  lux
  - ou  $3.92 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$
  - ou  $1.09 \cdot 10^{+11} \text{photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
- Une étoile de magnitude V 20 délivre un éclairement de  $1 \cdot 10^{-8}$  plus faible



# Le signal photonique

- Il est proportionnel au:
  - A la luminance de l'objet pour les objets résolus, sinon à l'éclairement
  - A la transmission de l'atmosphère et de l'optique
  - $1/(F/D)^2$  pour les objets résolus sinon à  $D^2$
  - Au temps de pose
  - A la bande spectrale de réception
  - Au rendement quantique du récepteur
  - Au nombre d'images accumulées

# Le bruit de photon

## ■ Le bruit temporel

- Sur un signal constant la fluctuation RMS d'une image à une autre est égal à la racine carré du nombre de photons collectés

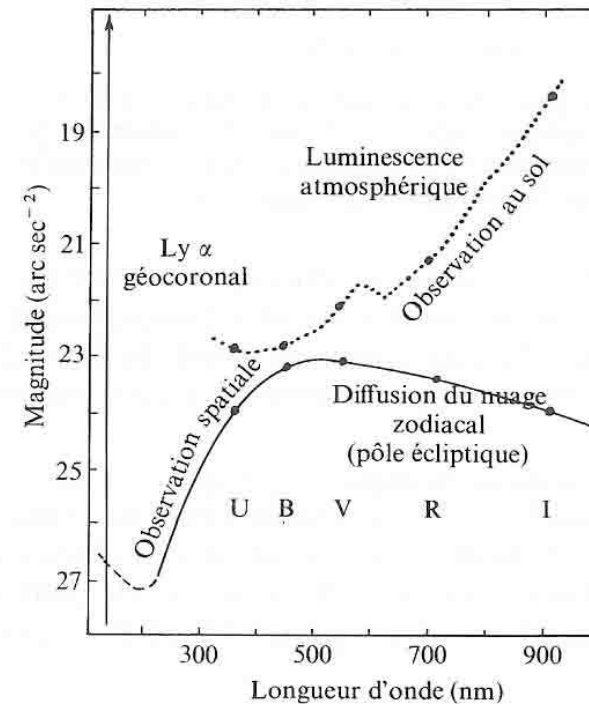
## ■ Le bruit spatial

- Sur un signal constant la fluctuation sur une même image d'un pixel à un autre est égal à la racine carré du nombre de photons collectés

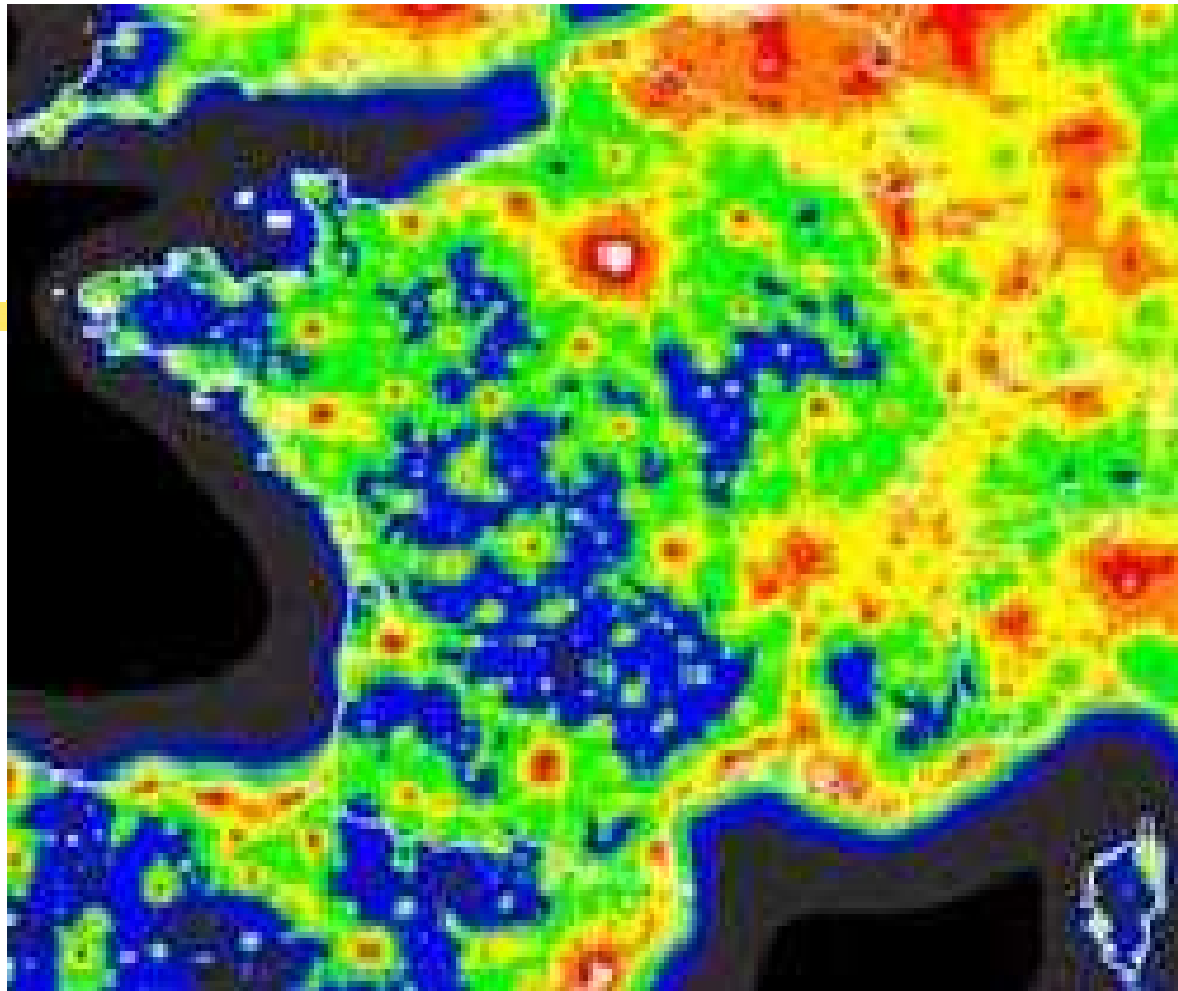
$$\text{Le } S/B = N/\sqrt{N} = \sqrt{N}$$

# La luminance du fond de ciel

- la haute atmosphère
- la lumière Zodiacale
- la Voie Lactée
- le fond intergalactique



- Et la pollution lumineuse...

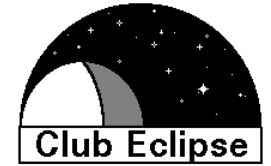


	ph.cm-2.s-1.sr-1		$\mu\text{cd.m-2}$			V mag.as2
Gris	8.61E+05		2.5			
Bleu	9.47E+06	2.84E+07	27.7	83.2		
Vert	2.84E+07	<b>8.61E+07</b>	83.2	<b>252</b>		21.6
Jaune	8.61E+07	2.58E+08	252	756		
Orange	2.58E+08	7.75E+08	756	2268		
Rouge	7.75E+08	2.32E+09	2268	6804		
Blanc	2.32E+09		6804			



# Code des couleurs

	ph.cm-2.s-1.sr-1		μcd.m-2			V mag.as2
Gris	8.61E+05		2.5			
Bleu	9.47E+06	2.84E+07	27.7	83.2		
Vert	2.84E+07	<b>8.61E+07</b>	83.2	<b>252</b>		21.6
Jaune	8.61E+07	2.58E+08	252	756		
Orange	2.58E+08	7.75E+08	756	2268		
Rouge	7.75E+08	2.32E+09	2268	6804		
Blanc	2.32E+09		6804			



## **2 L'Œil en référence**

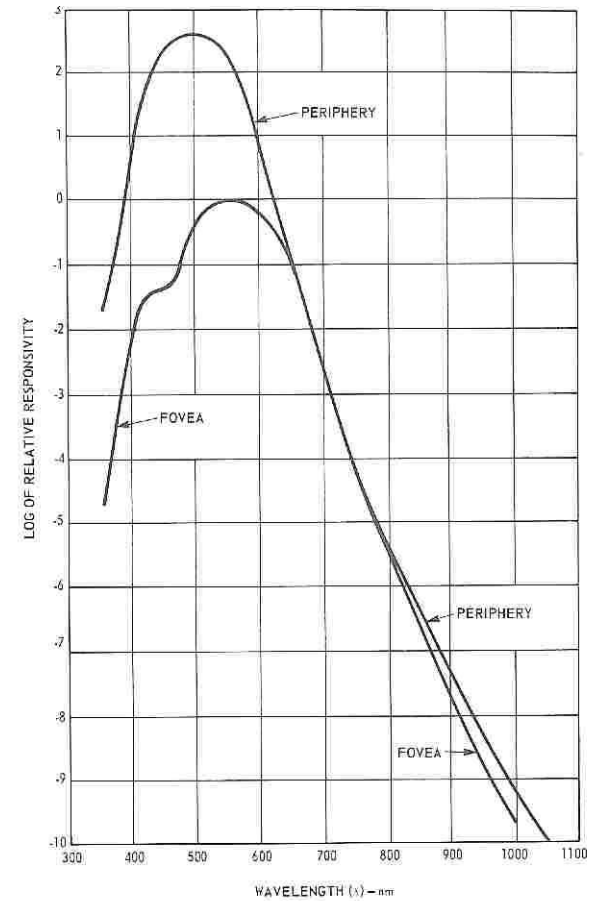
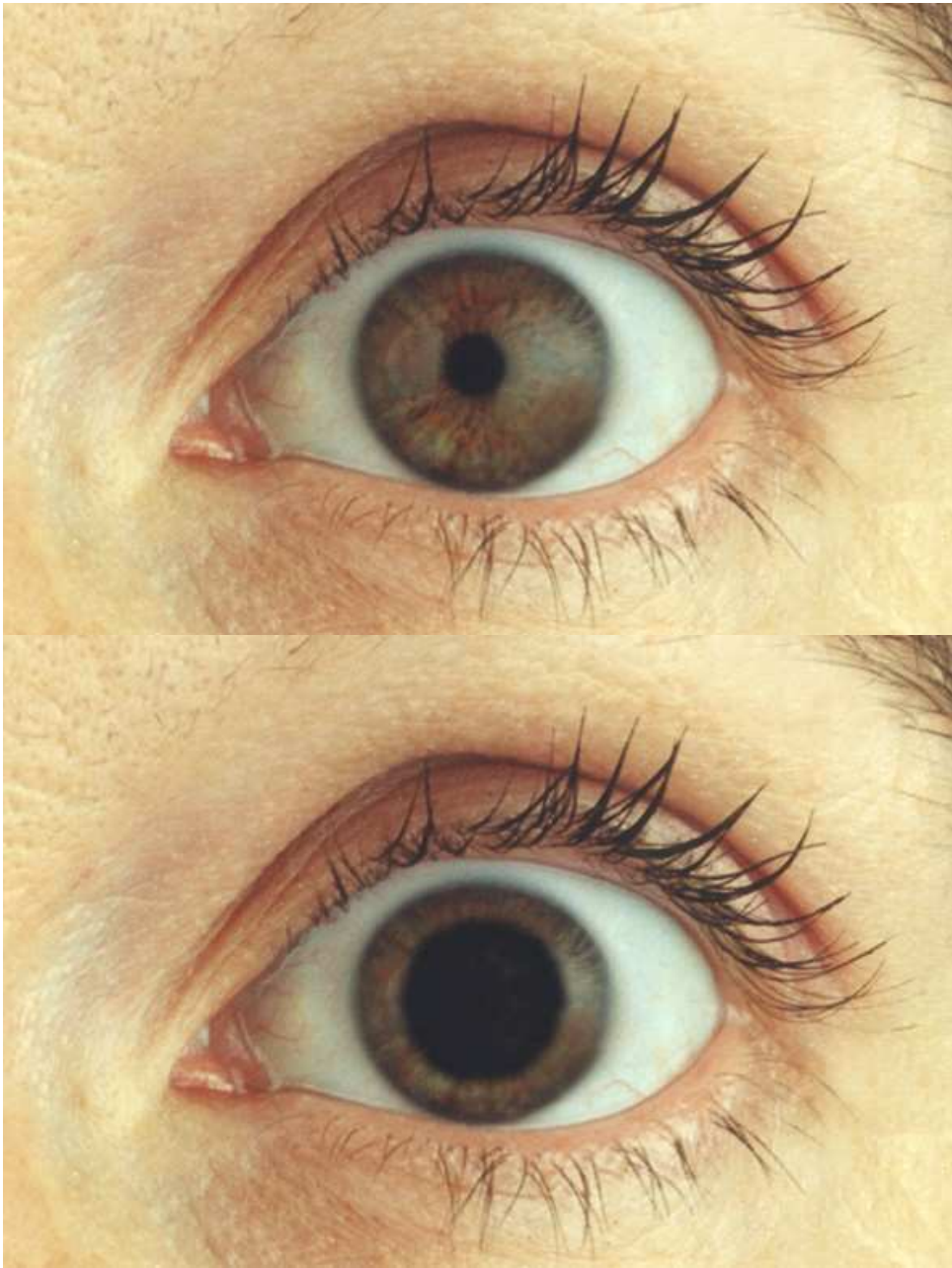
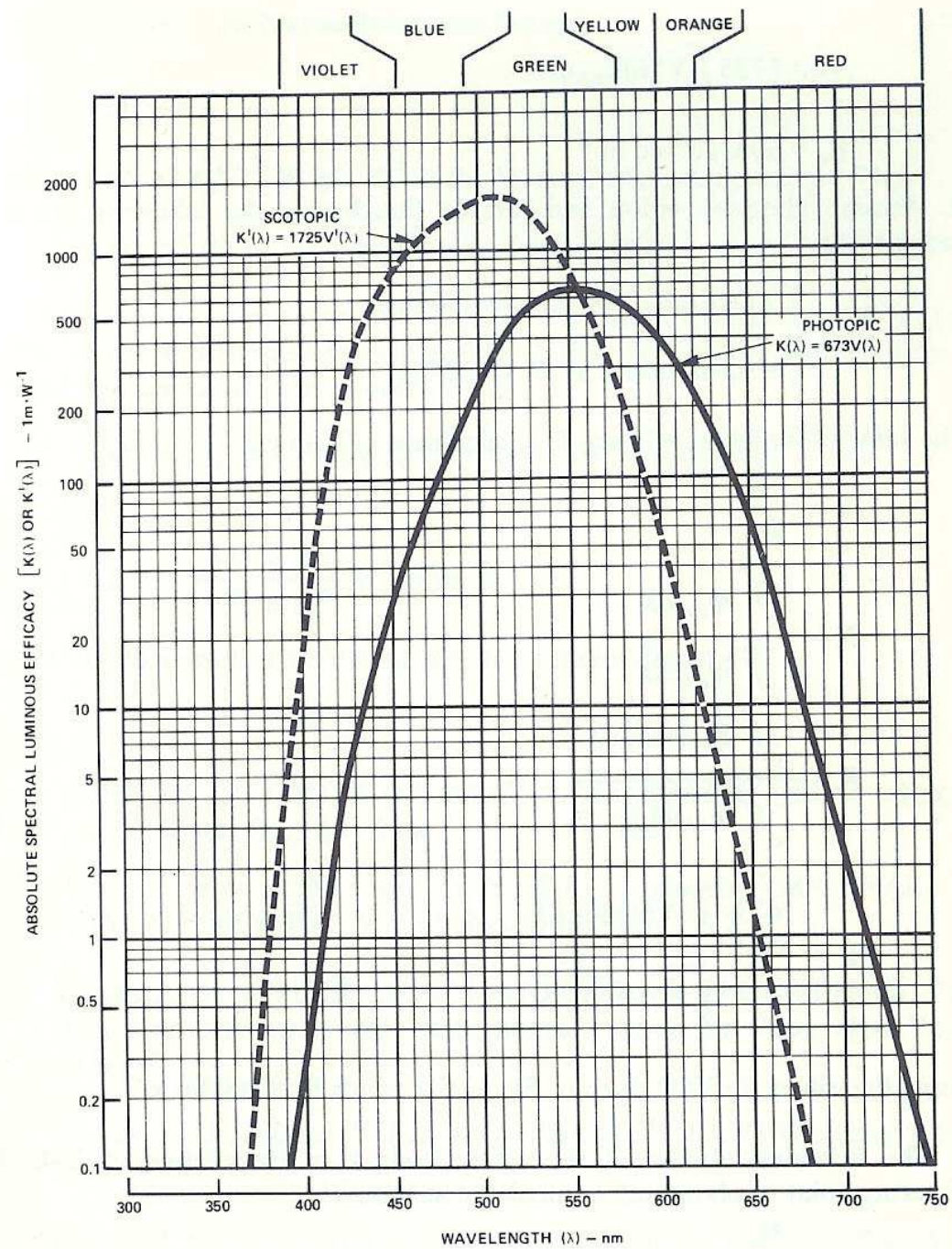


Fig. 5-4 Relative spectral responsivity of the dark-adapted fovea and peripheral retina (Adapted from Griffin et al, Reference 15, with permission).

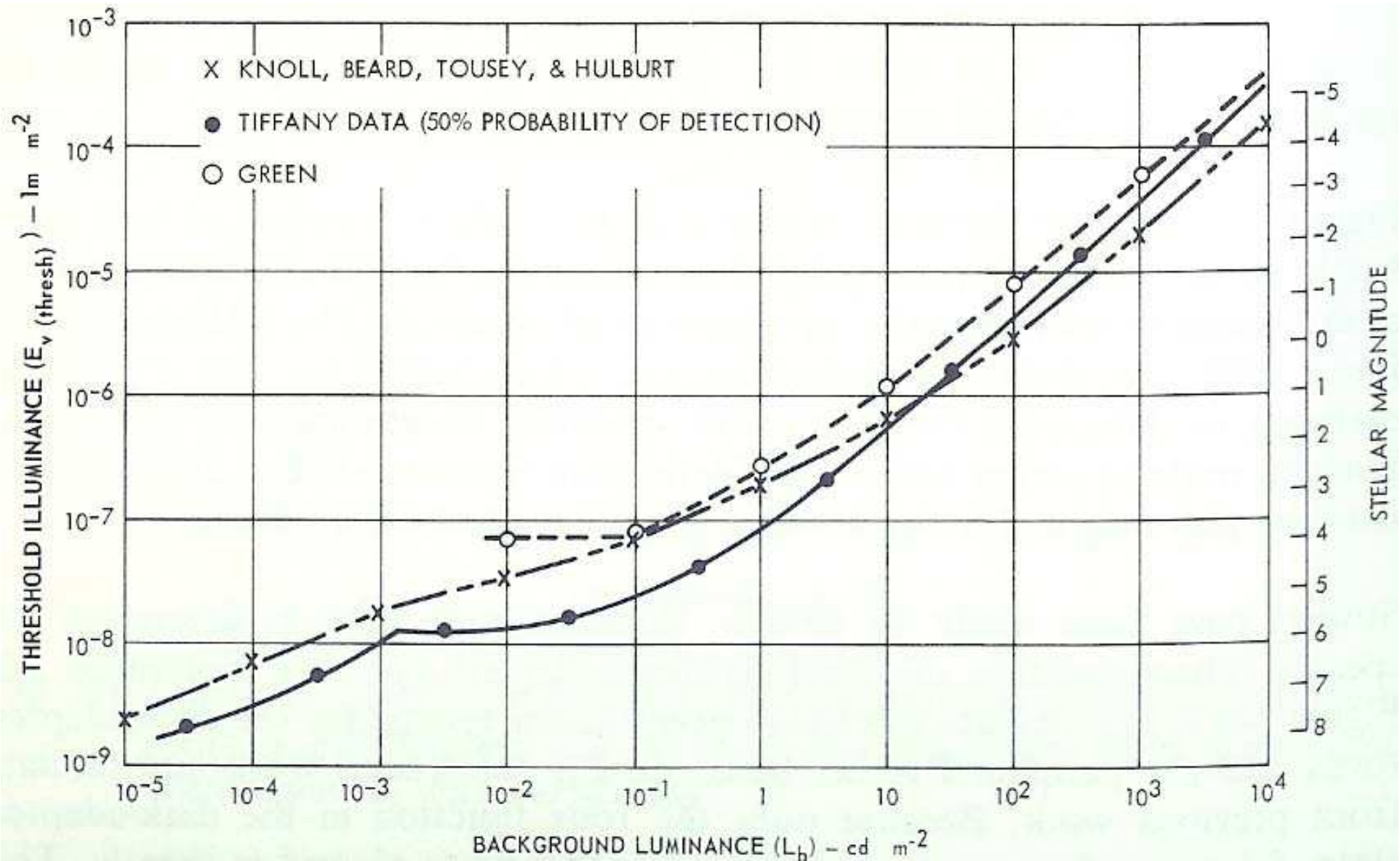
second stimulus that the eye establishes as equivalent. In modern colorimetry, the second stimulus is usually a combination of red, green, and blue light; however, any three monochromatic (single color) colors can be used as primaries providing no two colors can be mixed in any proportion to match the third color.

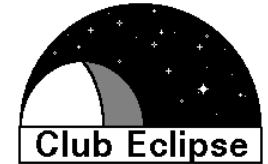




## Temps de réponse de l'oeil

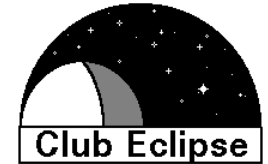
- Sa constante de temps augmente lorsque la luminance diminue ! Elle varie du  $1/100^{\text{ème}}\text{s}$  au  $1/10^{\text{ème}}\text{s}$
- Les cônes ont une réponse de  $5/100^{\text{ème}}\text{s}$
- A très faible niveau de luminance elle peut être de l'ordre de la seconde.
- L'œil a une capacité d'intégration spatiale qui lui assure un seuil de détection pour une Luminance x Étendue constante





## Un œil dilaté dans un fond noir

- 7mm :  $S=3.85 \cdot 10^{-5} \text{m}^2$
- Résolution : de 1' à fort niveau à 10' à faible niveau
- Bande FWHM :  $0.1 \mu\text{m}$
- mag V 0 :  $1.5 \cdot 10^{-13} \text{W}$  ou  $4.2 \cdot 10^5$  photons/s
- mag V 7.8 un ratio de 1320 soit 320photons/s
- ou 32 photons en 100ms pour faire un stimuli dans notre œil !
- Soit une fluctuation RMS de 6 photons



## Evaluation du fond

- Magnitude 20 par arcsec<sup>2</sup> :  $4.2 \cdot 10^5 \times 10^{-8}$   
soit:  $4.2 \cdot 10^{-3}$  photon.s<sup>-1</sup>.as<sup>-2</sup>  
sur 3 ' et 100ms: 14 photons  
Soit une fluctuation RMS de 4

## Le gain d 'antenne

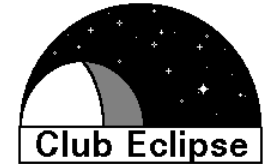
- Avec un télescope de diamètre  $D$  la sensibilité de l 'œil est amplifiée par un facteur de gain proportionnel au rapport des surfaces:

$$G = D^2/d^2$$

- La luminance du fond de ciel est inchangée avec un grossissement équipupillaire

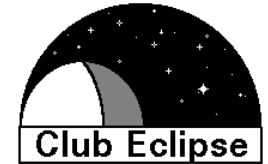
$$g_é = D/d$$

- La luminance varie comme l 'inverse du carré du rapport de  $g/g_é$



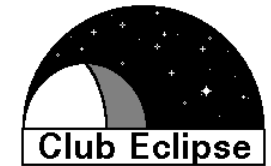
## Gain en magnitude

D	gain	Delta
telescope		mag
0.2	1111	7,6
0.6	10000	10



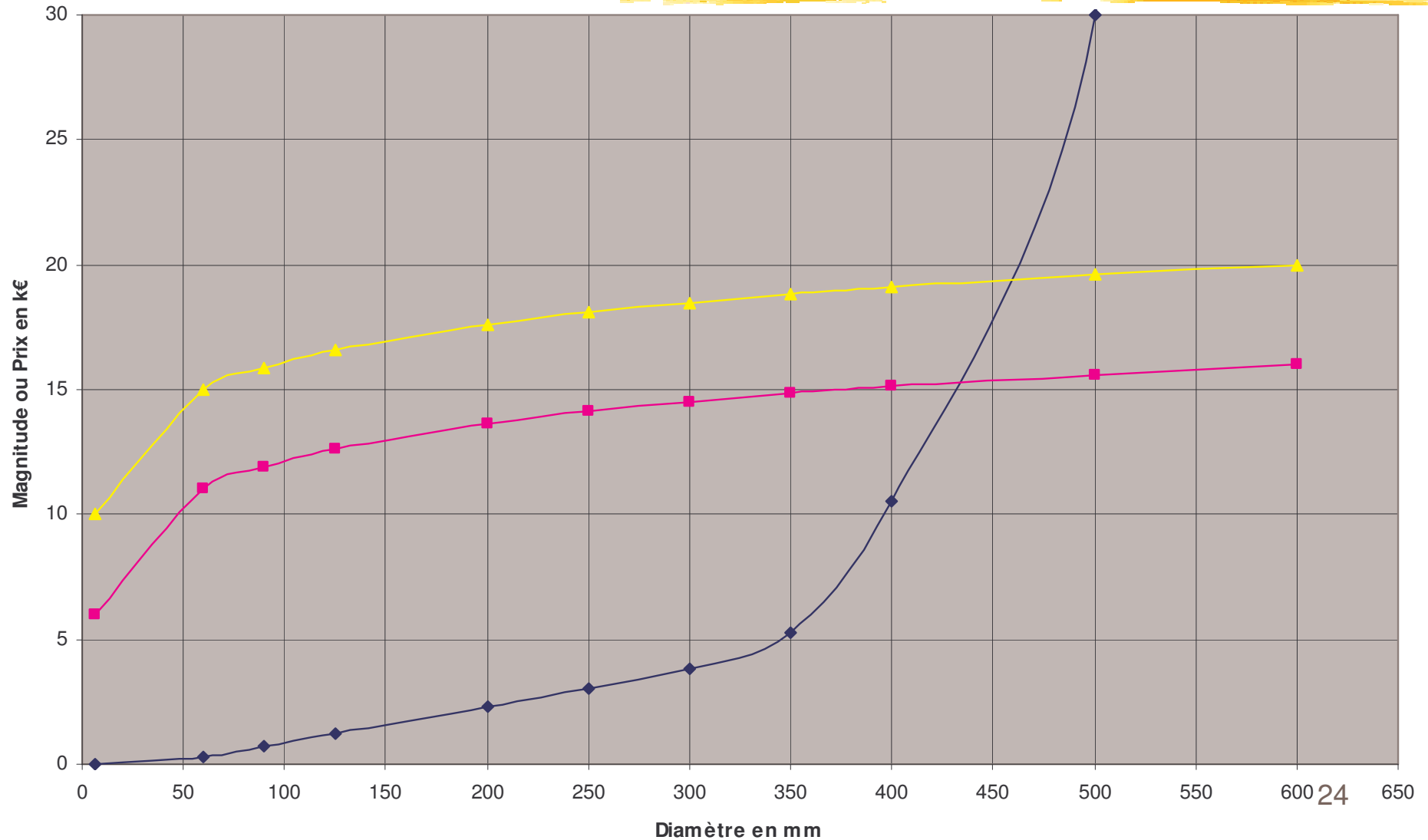
## Choisir un récepteur, une camera

- Quel budget consacrer ?
- Pourquoi faire ?
- Prenons le cas d'un récepteur idéal qui nous donne un gain de 4 magnitudes sur la performance de l'œil :



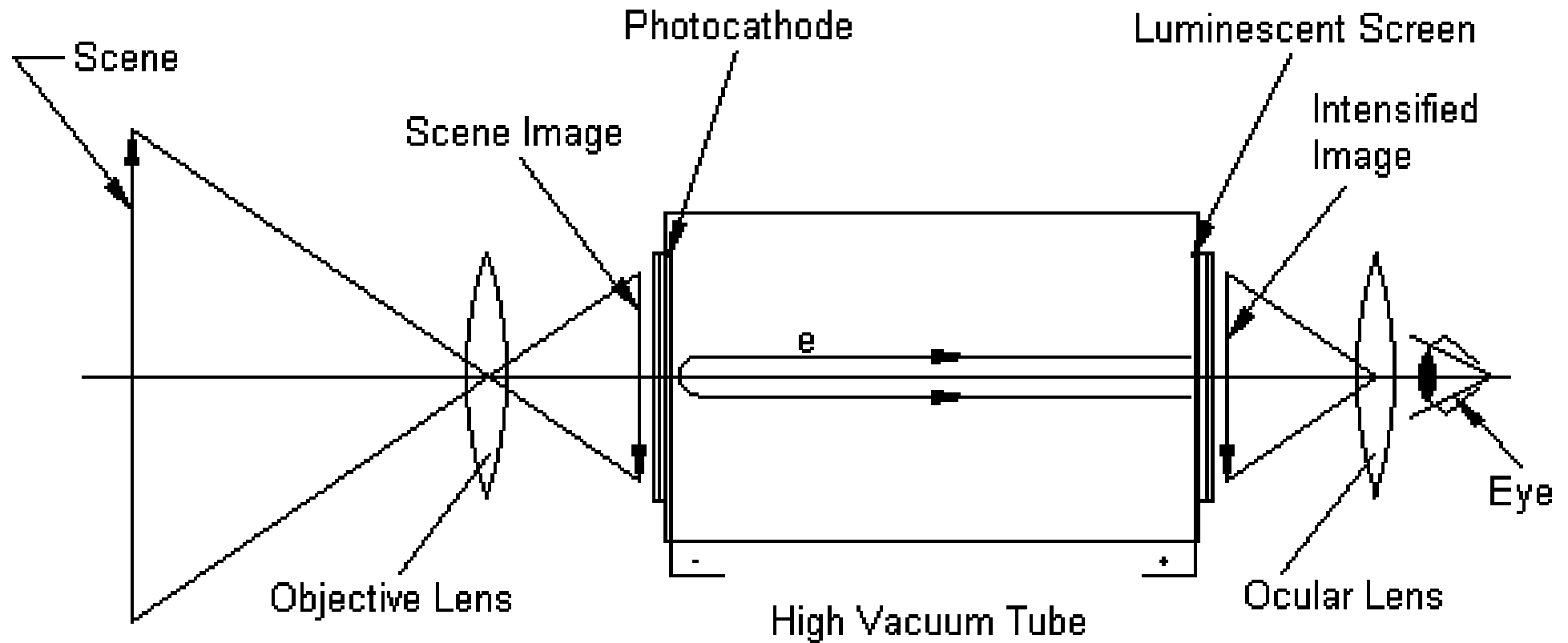
# Magnitude limite CCD, Visuelle, et Prix

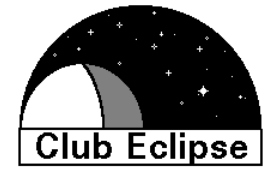
Magnitude et prix en fonction du diamètre

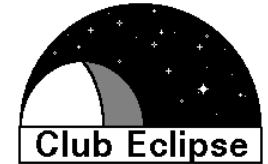




### 3 Les intensificateurs de lumières

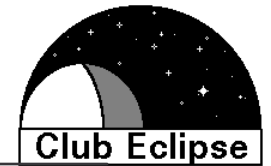






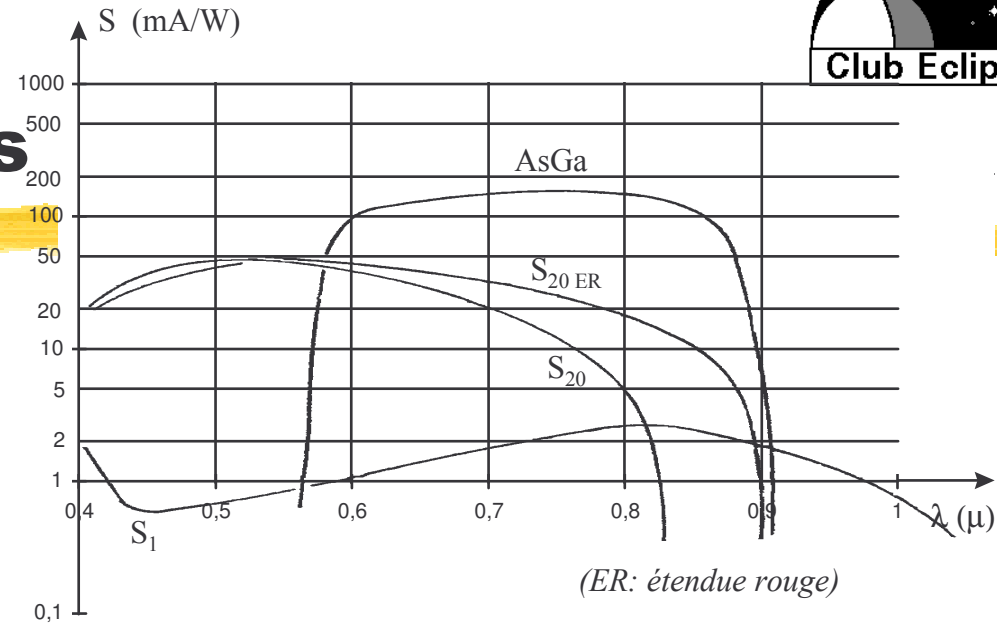
# Les composants constitutants et les types de tubes

- Les photocathodes
- L'amplificateur
- L'écran
- L'alimentation

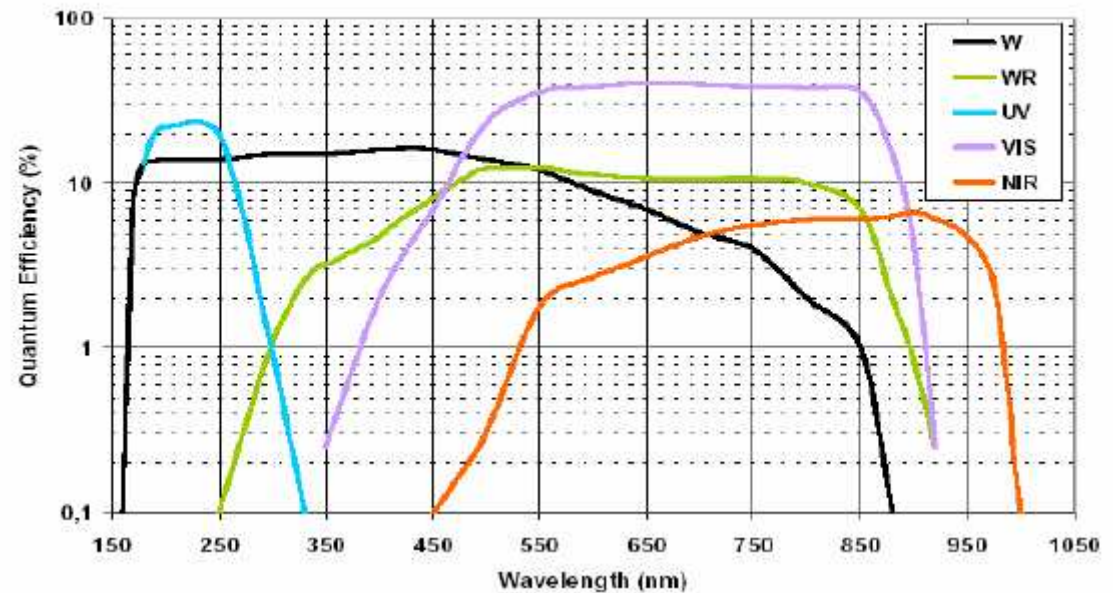


# Les photocathodes

Photocathode Type	Spectral Response
Multialkali	Up to 900 nm
Extended red multialkali	Up to 950 nm
Bialkali	Up to 650 nm
Cs-Te	Up to 320 nm
Ag-O-Cs	Up to 1200 nm
GaAs (Cs)	Up to 920 nm
GaAsP (Cs)	Up to 720 nm



## Photocathodes



# Photocathodes

paramètres	unité	2nde gen	3eme gen
➤ Sensibilité visuelle	$\mu\text{A/lm}$	300-700	1200-2500
➤ Domaine spectral	$\mu\text{m}$	0,45-0,85	0,57-0,87
➤ Sensibilité $f(\lambda)$	$\text{mA/W}$	50	175
➤ Rendement quantique		5%-10%	20%-40%

# Rendement quantique des photocathodes

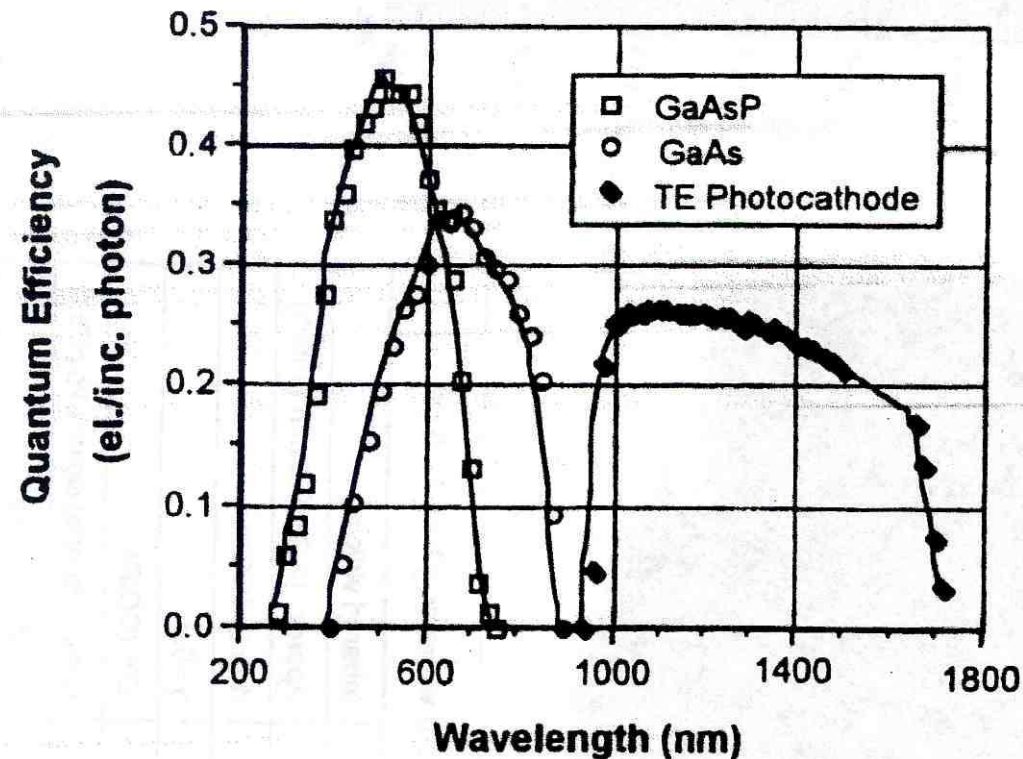
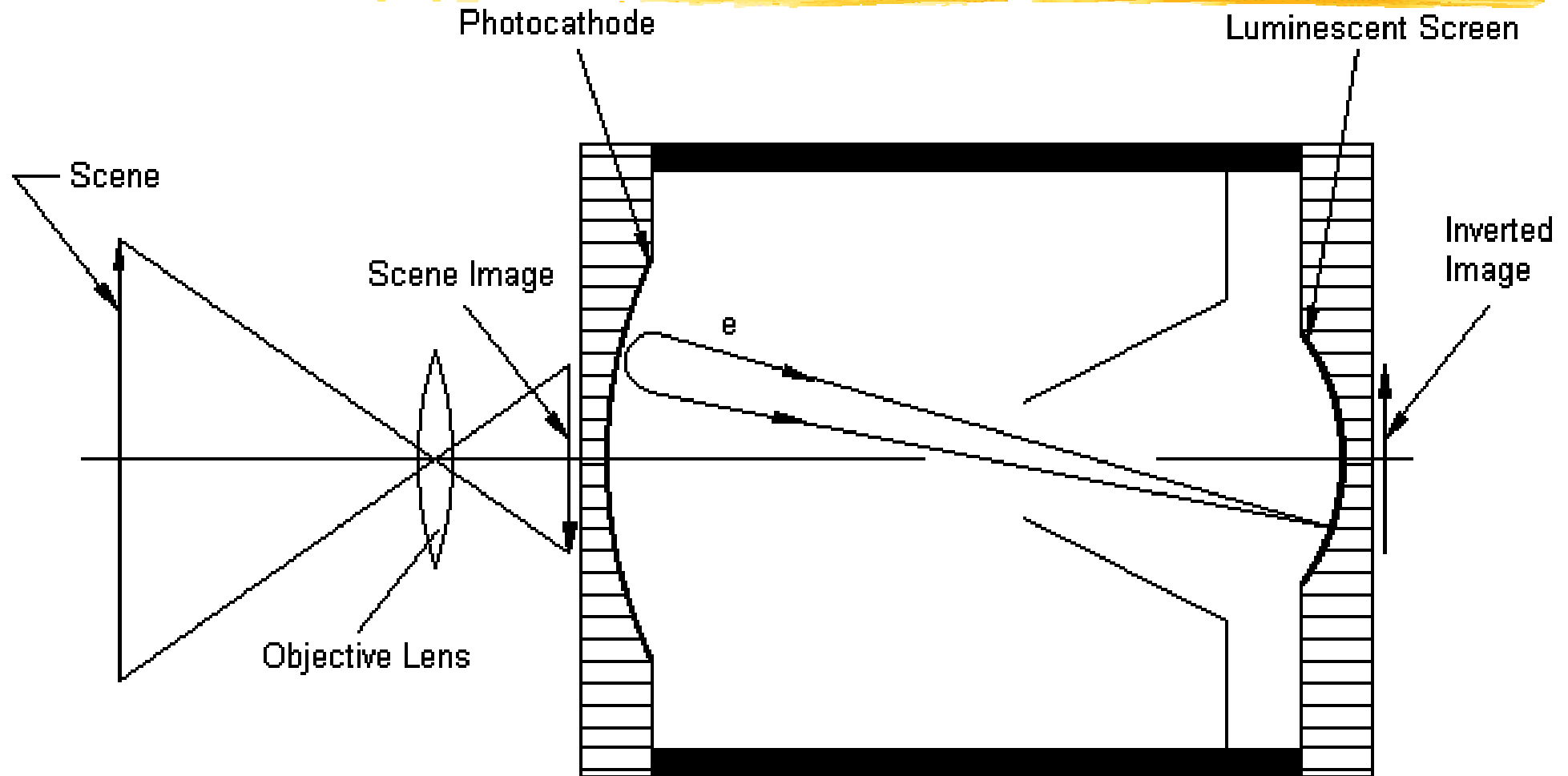


FIGURE 1.2 GaAs, GaAsP, and TE PHOTOCATHODE TYPICAL SPECTRAL RESPONSE

# Amplification par accélération des photoélectrons



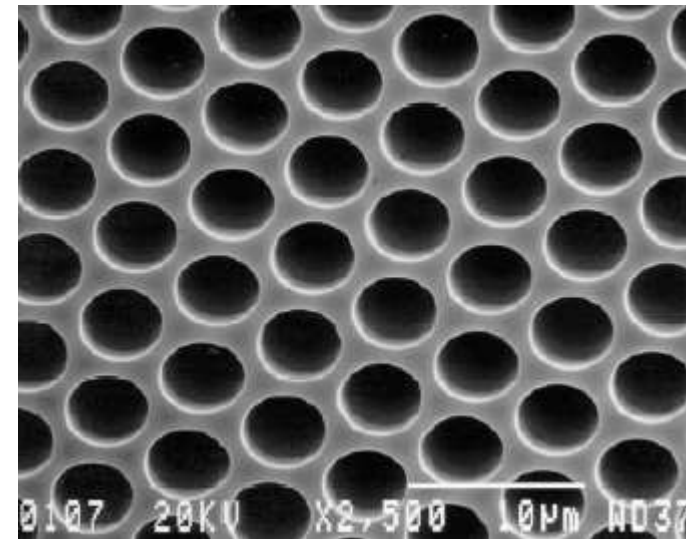
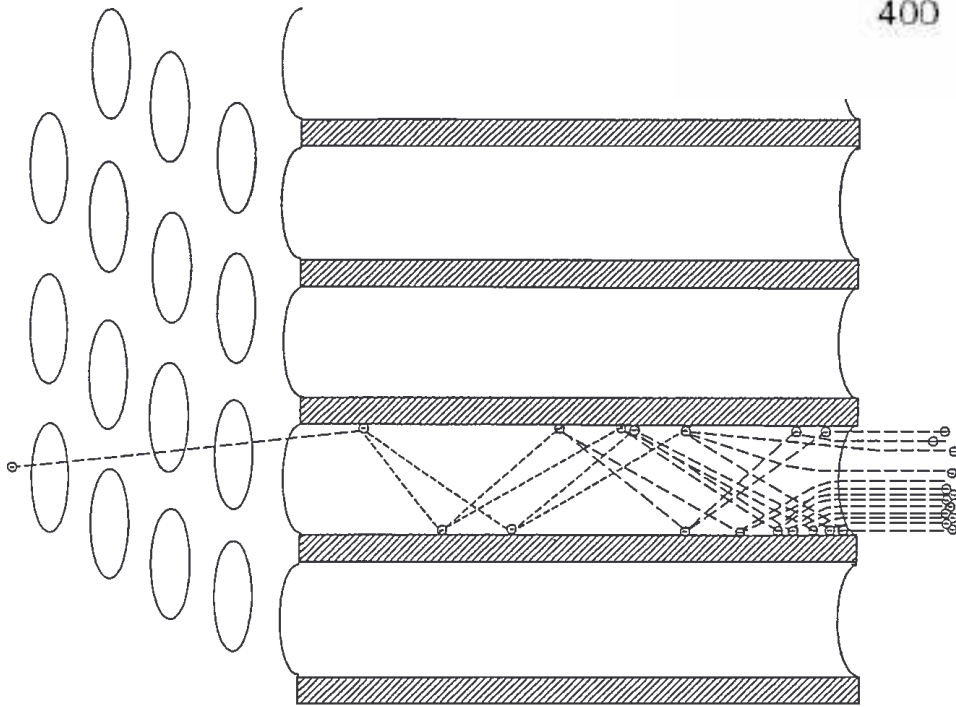
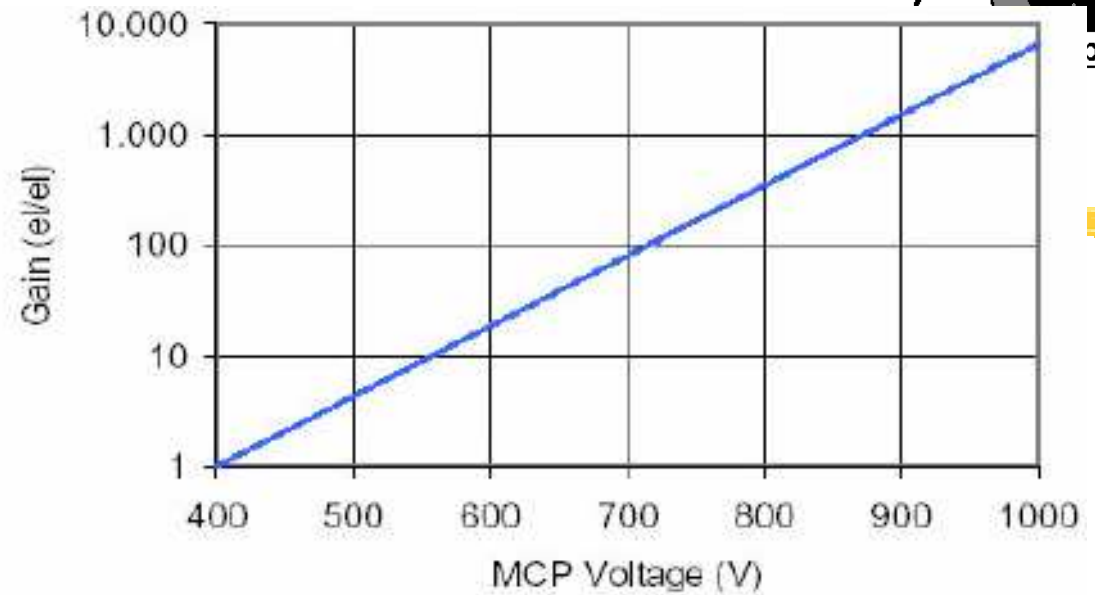
# La galette de microcanaux



ose



Amplification par multiplication d'électrons

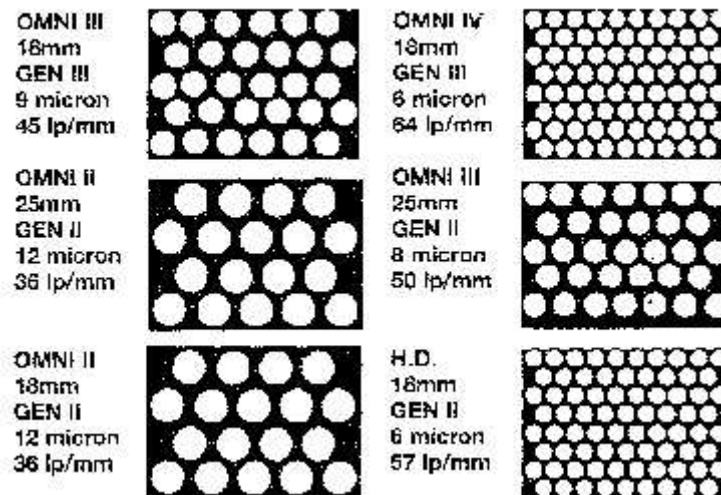




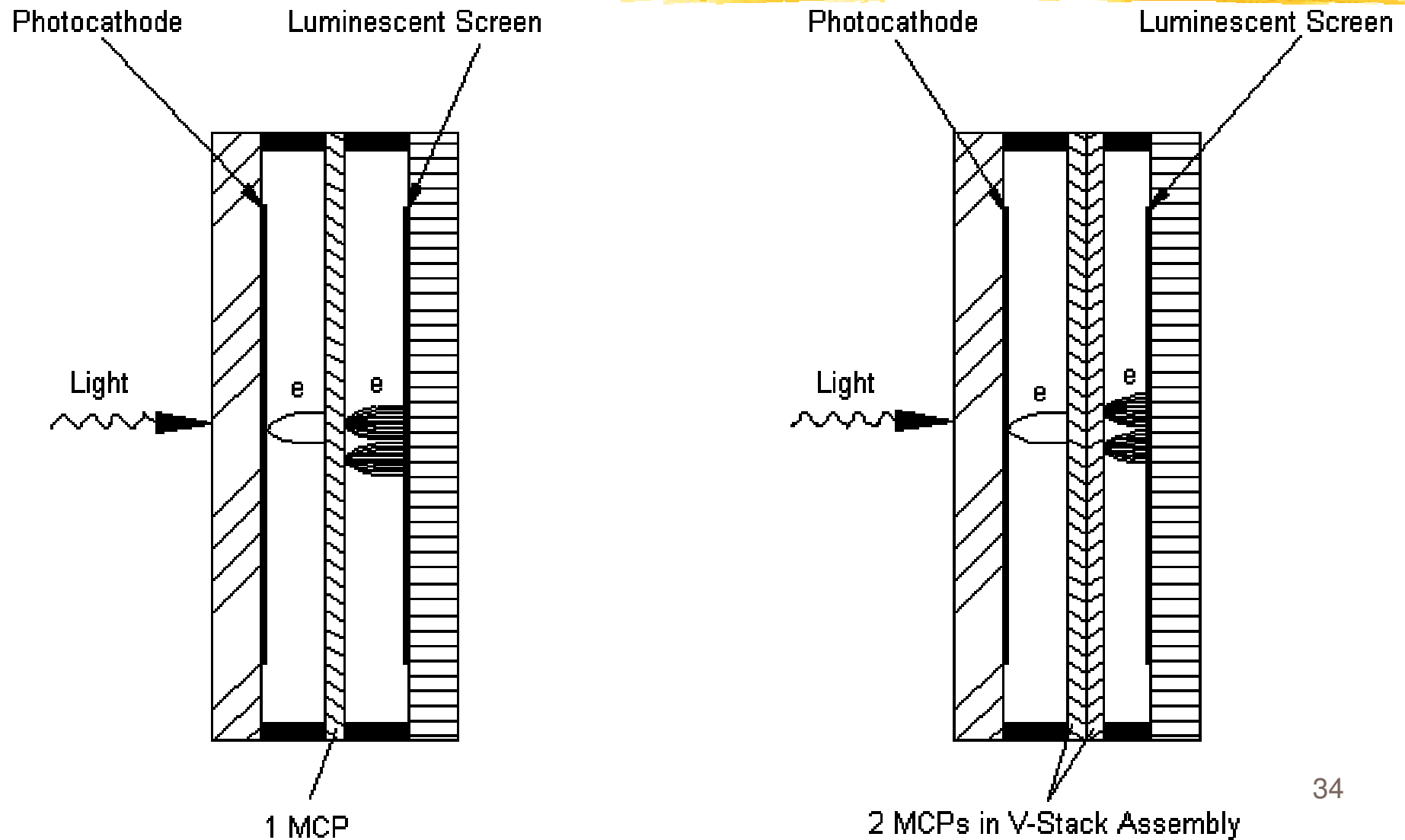
# Galette de micro-canaux

- 30 ans de progrès sur les micro-canaux
- Canaux de 6 $\mu$ m donne une capacité à 64pl/mm

Improved Micro-Channel Plate Pore Size



# La double focalisation de proximié



# L'écran

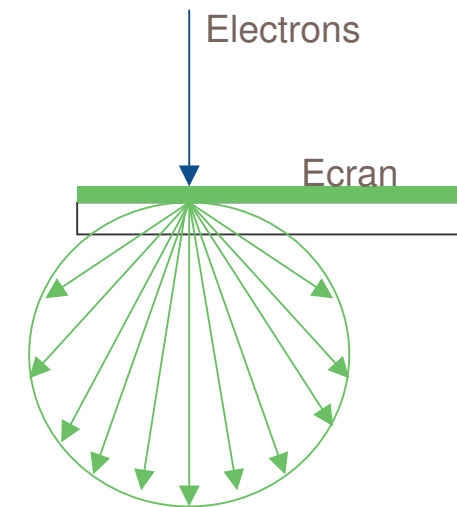
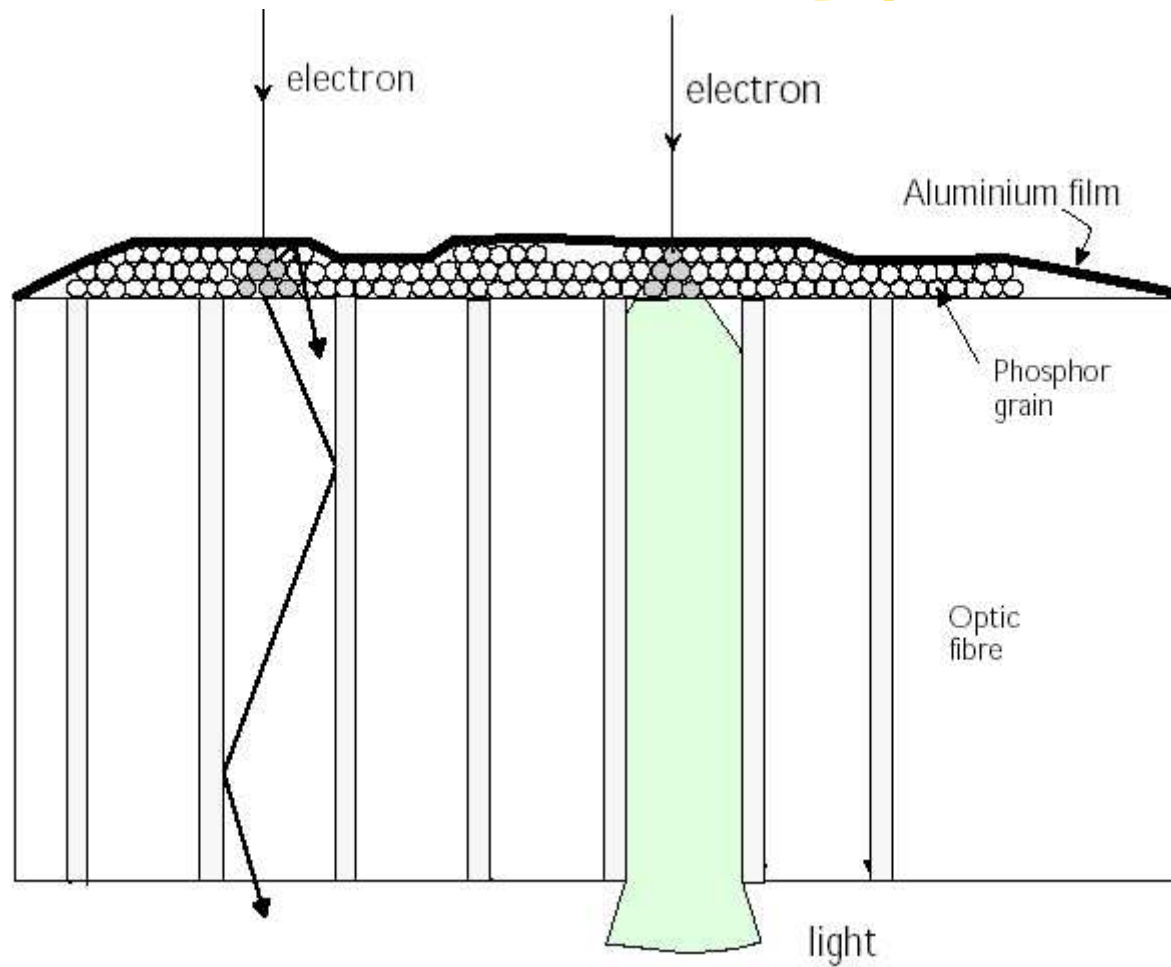
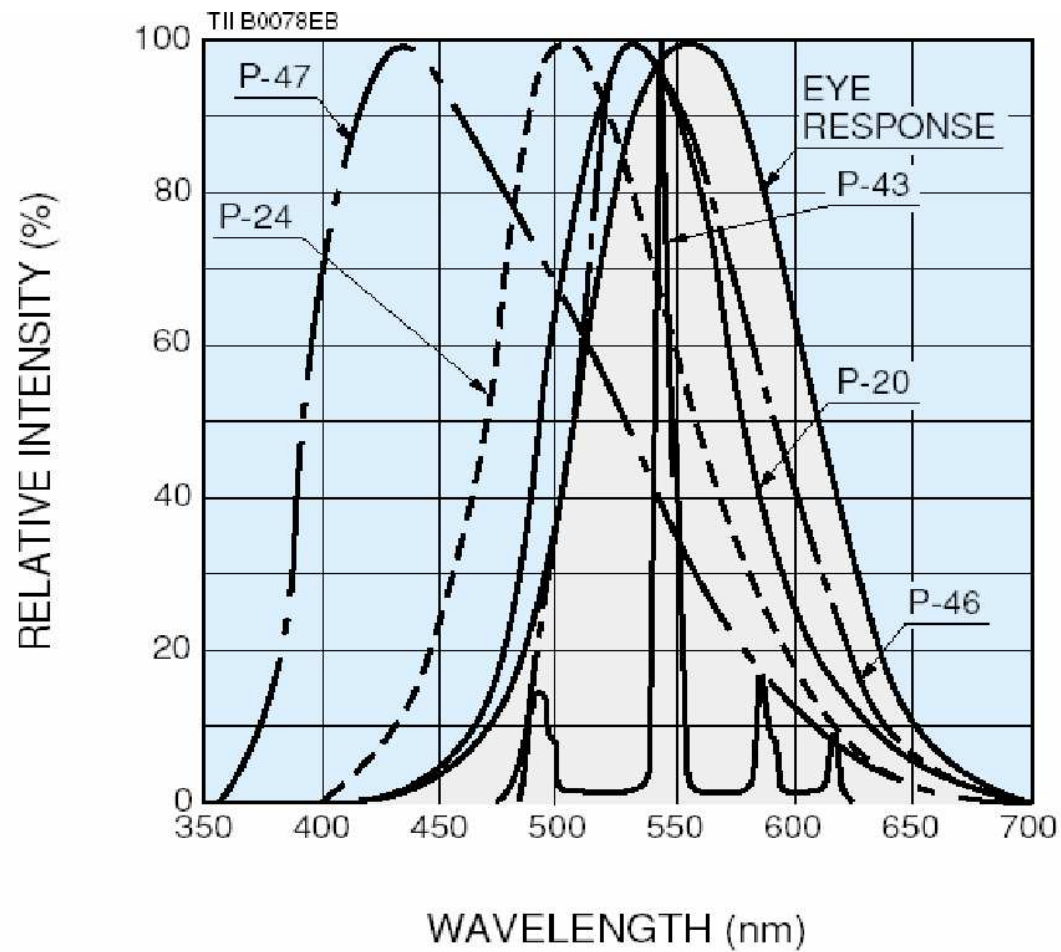


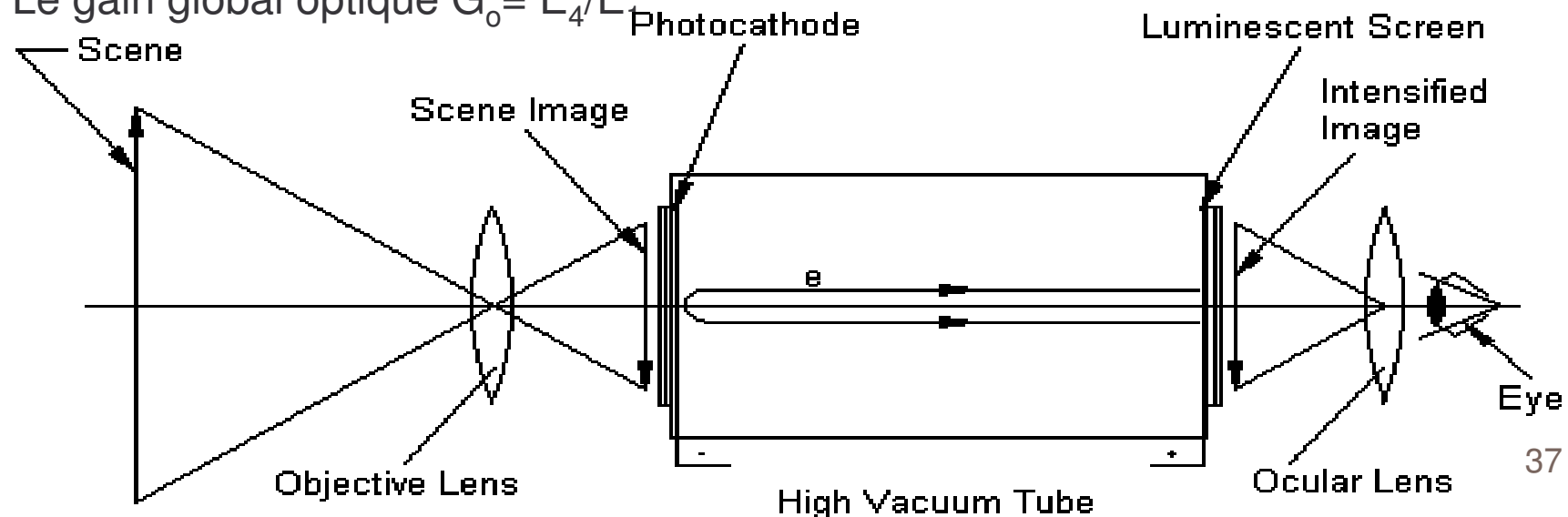
Diagramme de rayonnement

# Ecran, réponse du phosphore



# Les grandeurs photométriques avec un tube intégré dans un instrument:

- En entrée pupille nous avons un éclairement  $E_1$
- L'image projetée par l'optique de diamètre  $D_1$  et de focale  $f_1$  sur la photocathode se caractérise par un éclairement  $E_2$
- Le signal en entrée se caractérise par un éclairement  $E_2$  en lux ou en  $W/m^2$  ou encore en photons/s/m<sup>2</sup>
- Le signal en sortie de tube se caractérise par une Luminance  $L_3$ . L'écran rayonne dans  $2\pi$  sr avec un diagramme en  $\cos\theta$
- En sortie d'oculaire de diamètre  $D_2$  de focale  $f_2$  le signal se caractérise par un éclairement  $E_4$
- Le gain global optique  $G_o = E_4/E_1$



# Performances globales du tube

- Rapport signal sur bruit (sans dimension)
  - Défini sur un éclairement
  - Eclairement équivalent au Bruit
  - Capacité au comptage de photon
- Résolution / FTM
  - Paire de ligne par mm (lp/mm) avec une atténuation d'amplitude
- Sensibilité de la photocathode
  - ( $\mu\text{A}/\text{lm}$  ou  $\text{mA}/\text{W}$ )
  - Rendement quantique en fonction de la longueur d'onde
- Qualité image
- Gain
- Luminance d'écran
- Durée de vie
  - MTTF (Mean Time To Failure) en heures

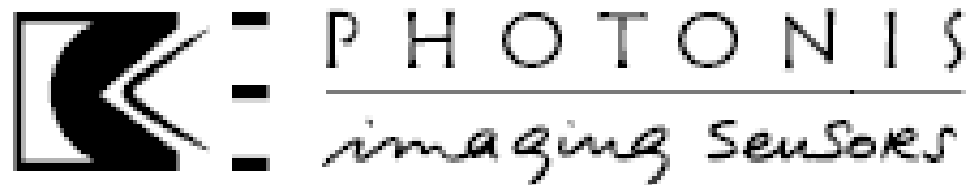


# Gamme de produits Photonis

	PROXIMITY TUBES				INVERTER TUBES		
Family	<b>XX1410</b> Gen.II +	<b>XX1610</b> SuperGen <sup>®</sup>	<b>XX1660</b> HP SuperGen <sup>®</sup>	<b>XX1860</b> HyperGen <sup>®</sup>	<b>XX1330</b>	<b>XX1380</b>	<b>XX2050</b>
In/Out	18 mm				50 / 40	20 / 30	25 mm
SNR <sub>108μlx</sub>	12	15.5	18	20	12	12	12
$\Sigma_k$ (μA/lm)	300	500	600	700	250	240	260
Resolution (lp/mm)	30	40	45	60	18	45	32
Phosphor	P22 or P43 (cadmium free)				P22 (cadmium free)		
Inversion	by means of optic fibre				Electrostatically		
	HALO FREE				N/A		



## Data sheet d'un tube :



**XX1866H/Q54**

image intensifier tubes

XX1860 family

product specification

HyperGen<sup>®</sup>, double proximity, 18 mm tube  
with glass input and straight f.o. output



## product specification

### HyperGen<sup>®</sup>, double proximity, 18 mm tube with glass input and straight f.o. output

#### Description

##### { Input

Photocathode : S25  
Input window\* : AVG glass

##### { Output

Screen phosphor : P43  
Output window : straight f.o.  
Output radius : 18 mm

##### { General

Magnification : 1  
Image inversion : no  
Optical length : 14.4 mm  
Mass : max. 100 g  
Power supply ① : standard  
Connections : contacts

\*AVG : anti veiling glare

#### Optical characteristics

##### Photocathode sensitivity

white light : min : 650  $\mu$ A/lm  
at 830 nm : min : 48 mA/W

Luminance gain at 50  $\mu$ lx : min : 7600 max : 11000  $\text{cd/m}^2/\text{lx}$   
min : 23900 max : 35000  $\text{lm/lm}$

Scr. luminance control level : min : 3 max : 7  $\text{cd/m}^2$

E.B.I. ② : max : 0.25  $\mu$ lx

Resolution min : 60 lp/mm

MTF : 2.5 lp/mm : min : 90 %

7.5 lp/mm : min : 70 %

15 lp/mm : min : 45 %

25 lp/mm : min : 25 %

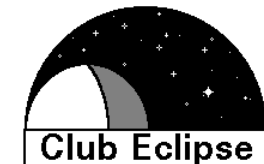
30 lp/mm : min : 17 %

Signal to noise ratio at 100  $\mu$ lx ③ : min : 18.5

Image alignment ④ : max : 0.5 mm

Screen lum. uniformity (wh. light) : max : 3 / 1

Useful input and output diameter : min : 17.5 mm



## Applications

*This compact tube assembly is fully compatible with high-grade 3rd generation types and is designed to be incorporated in superior-quality night vision devices.*

*The XX1860 tube family incorporates the latest and most advanced HyperGen® technology.*

## Reference

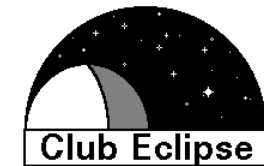
This specification must be read in conjunction with the XX1860 tube family basic specification.

HyperGen® is a registered trade mark of PHOTONIS SAS.

maximum number of spots in zone (contrast over 30 %)		zone diameter (mm)		
		zone 1	zone 2	zone 3
		5.6	5.6 to 14.7	14.7 to edge
spot diam. (µm)	Over 380	0	0	0
	300 to 380	0	0	0
	230 to 300	0	1	1
	150 to 230	0	2	2
	75 to 150	1	3	3
	0 to 75	not specified	not specified	not specified

## Electrical characteristics

Operating supply voltage :	typ : 2.7	min : 2 V	max : 3.5 V
Limiting instant. supply voltage :	min : -3.7	max : 3.7 V	
Supply current at ambient temp.:		max : 18 mA	

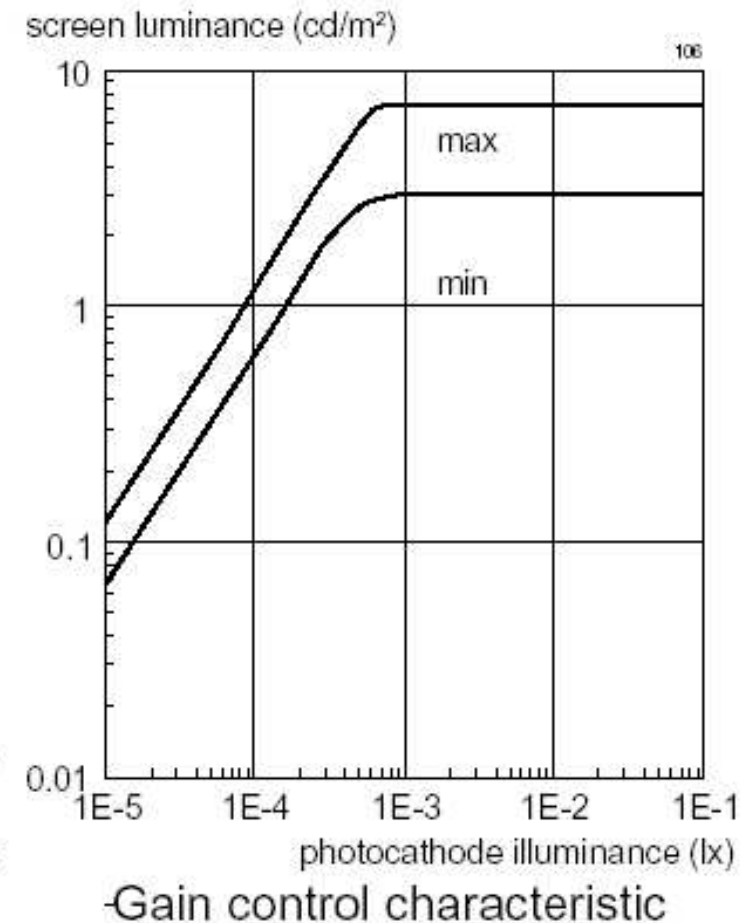


## Environmental characteristics

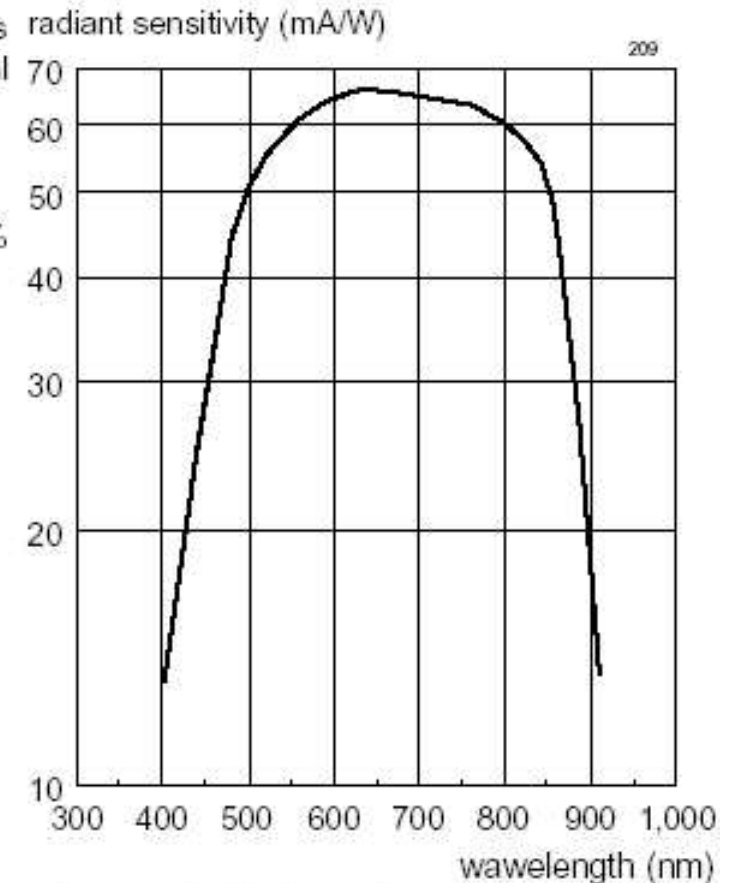
Spot photocathode illuminance ⑤ :	max :	$5 \times 10^4$	lx
Mean time to failure ⑥ :	min :	10000	h
Force on bearing surface :	max :	200	N
Shock acceleration ⑦ :	max :	5000	m/s <sup>2</sup>
Vibration amplitude ⑧ :	max :	2.54	mm
Temperature			
in operation :	min :	-52	max : +52 °C
storage for : 4 hours :	min :	-56	max : +65 °C
long term :	min :	-35	max : +35 °C
Humidity conditions ⑨ :	45°C,	95%,	6 hours

## Notes

- ① The power supply unit incorporates an automatic screen luminance control (ABC) and bright source protection.
- ② E.B.I. : Equivalent background illumination, measured after a 2 minutes stabilisation in the dark with the supply voltage applied.
- ③ S/N ratio over a  $\varnothing$  0.2 mm area. Equivalent bandwidth of 10 Hz.



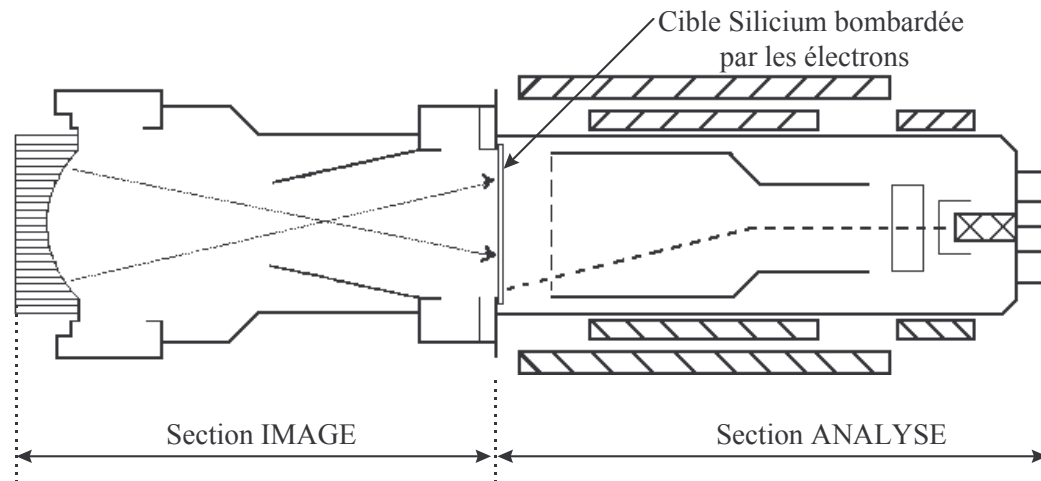
- ④ Image alignment : twice the deviation between the optical and mechanical axis measured on the output window. The mechanical axis is defined by the external diameter of the assembly.
- ⑤ On 1 mm<sup>2</sup> of photocathode for 1 minute, in operation.
- ⑥ MTF measured at 20°C and 100 μlx. End of life : S/N ≤ 9 or luminance gain ≤ 45% of the minimum value.
- ⑦ Six 2 ms half sine impacts parallel and perpendicular to the axis.
- ⑧ Ten cycles from 5 to 55 Hz parallel and perpendicular to the axis.
- ⑨ Power off. Measured after 6 h at 45°C and 15 % maximum humidity.



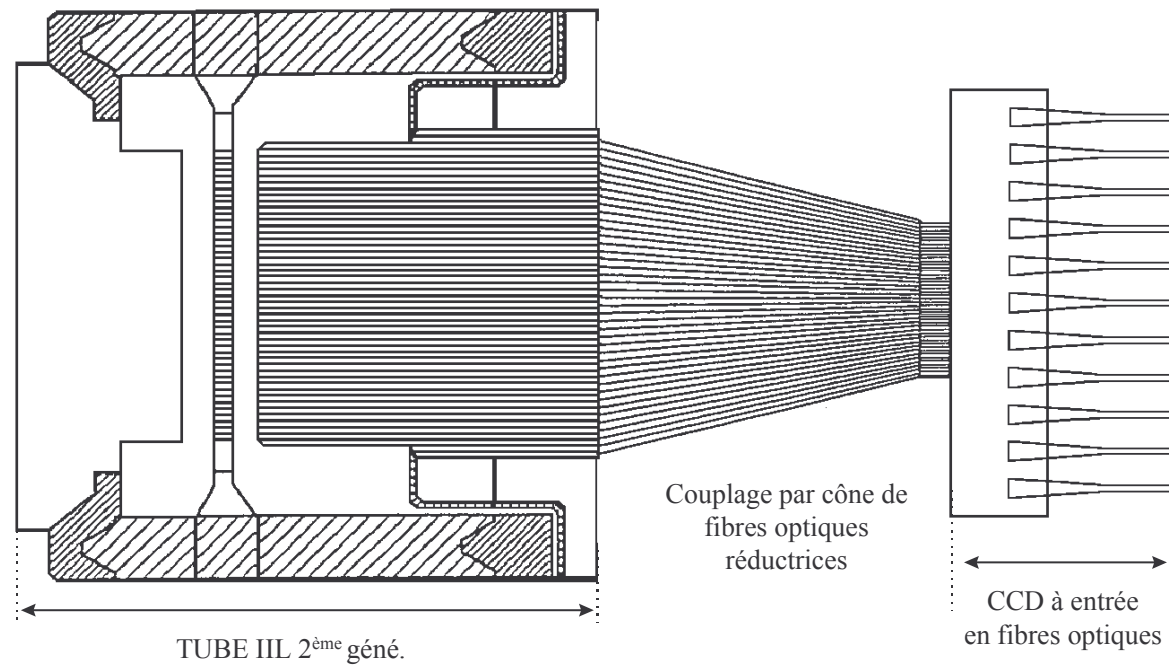
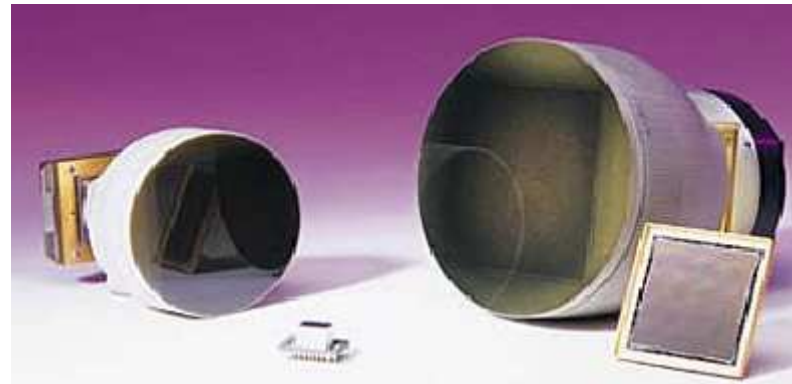
Typical photocathode sensitivity

# Caméra intensifiée

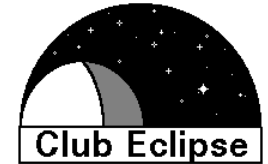
## Tube vidicon intensifié



# CCD intensifié



# Couplage en sortie des tubes AREA ARRAYS WITH FIBER OPTIC FACE PLATE

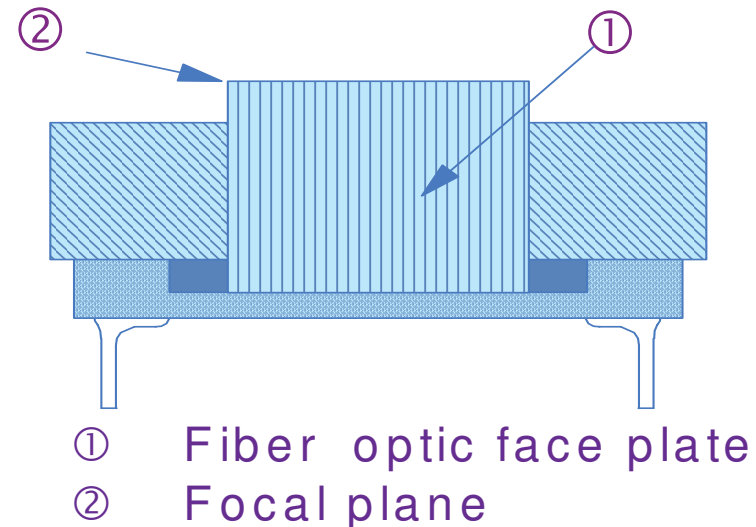
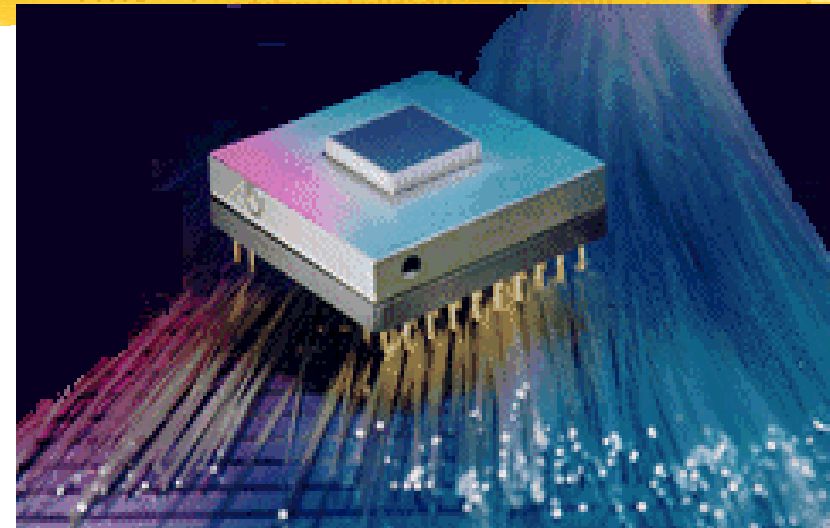


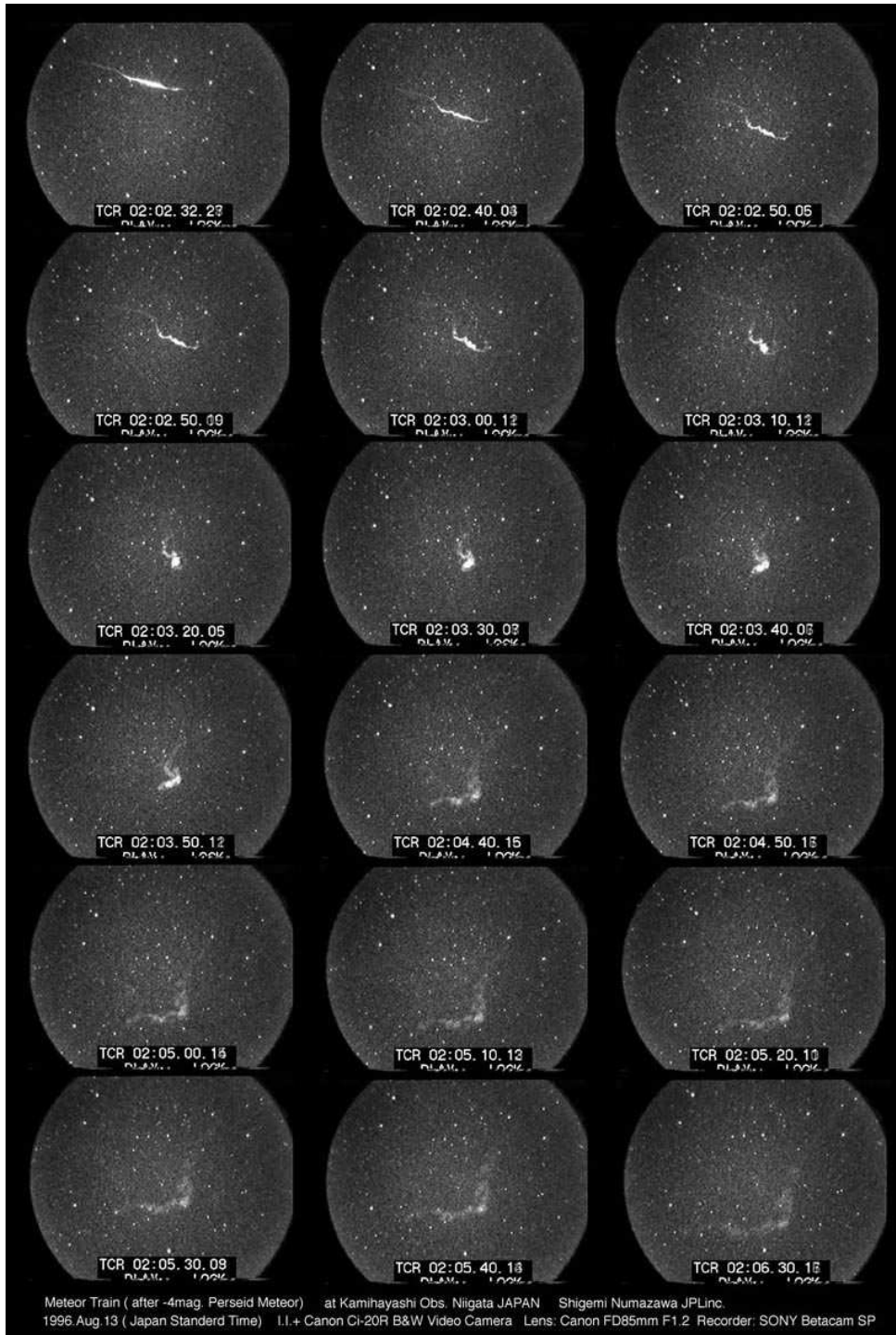
## ■ APPLICATIONS

- Coupling to image intensifier
- Laser imaging
- Scintillator coating by the customer

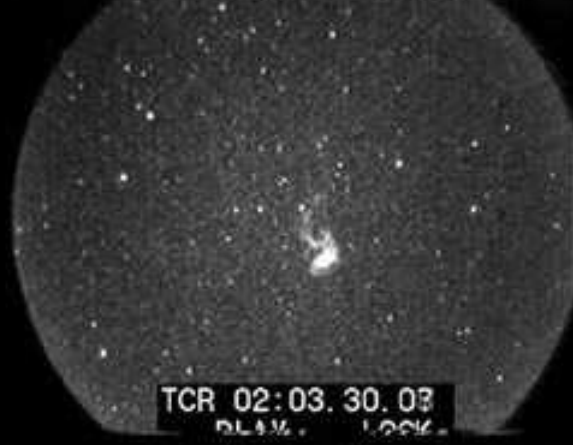
## ■ MAIN FEATURES

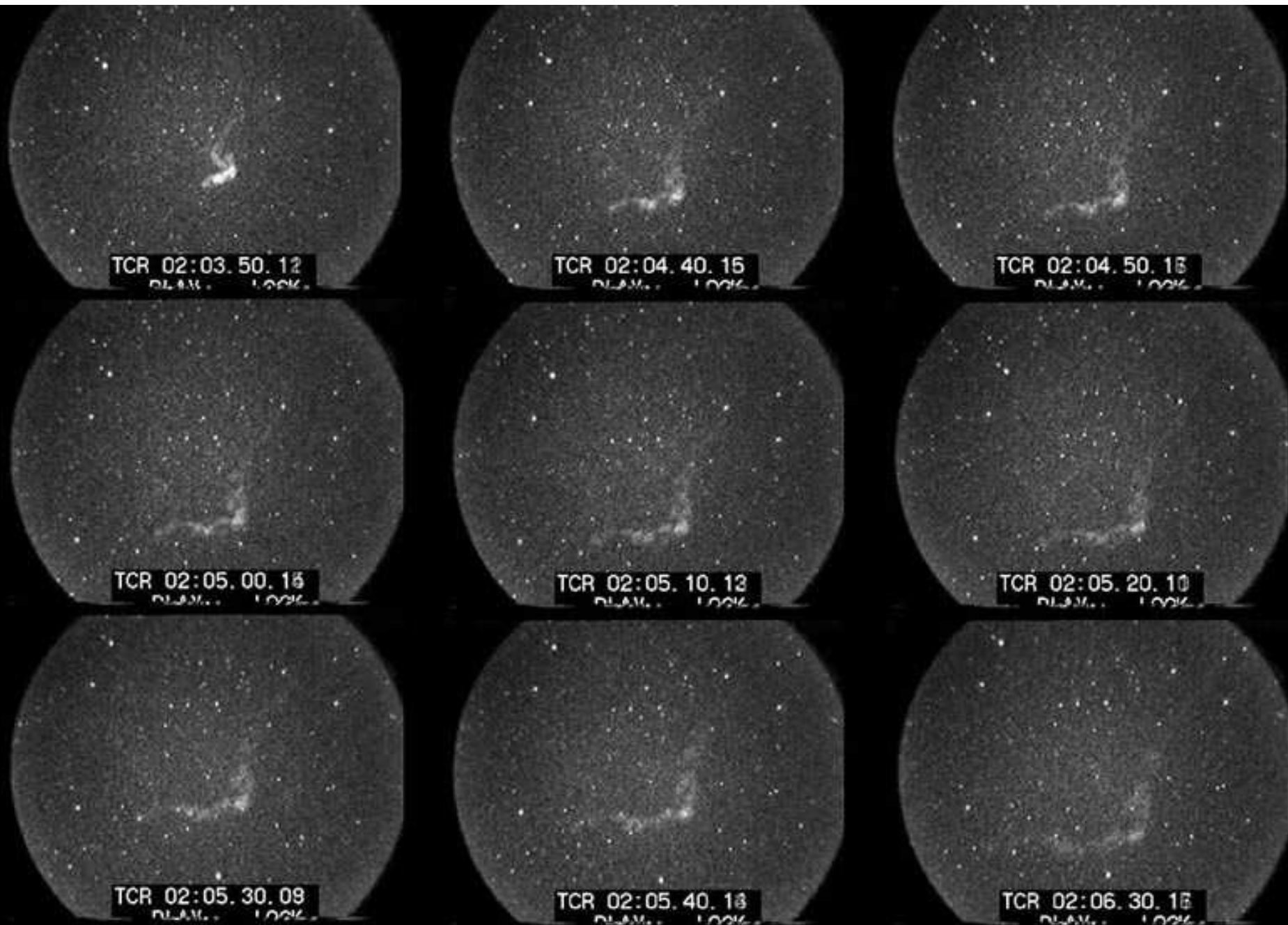
- 5  $\mu\text{m}$  fibers with extra mural absorption
- 1/1 ratio or tapers (demagnifying fibers)
- Applicable to any TCS area array.





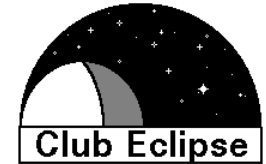




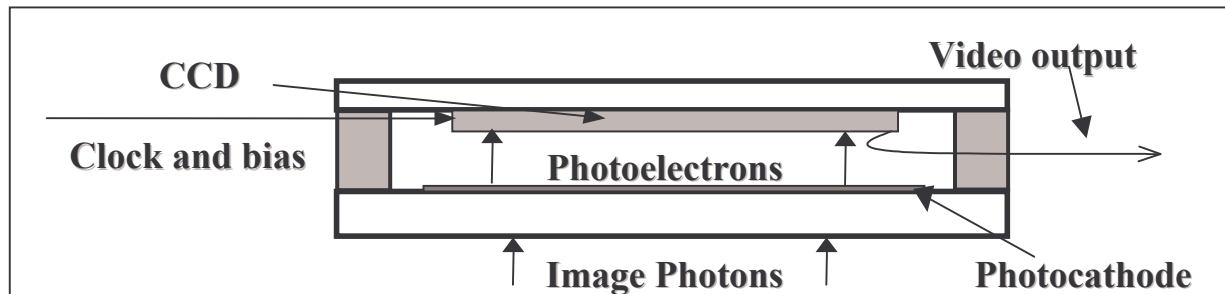


Meteor Train ( after -4mag. Perseid Meteor) at Kamihayashi Obs. Niigata JAPAN Shigemi Numazawa JPLinc.  
1996.Aug.13 ( Japan Standard Time) I.I.+ Canon Ci-20R B&W Video Camera Lens: Canon FD85mm F1.2 Recorder: SONY Betacam SP

## 4. Les EBCCD et EBCMOS



### ■ Advantage of EB-CCD Technology:

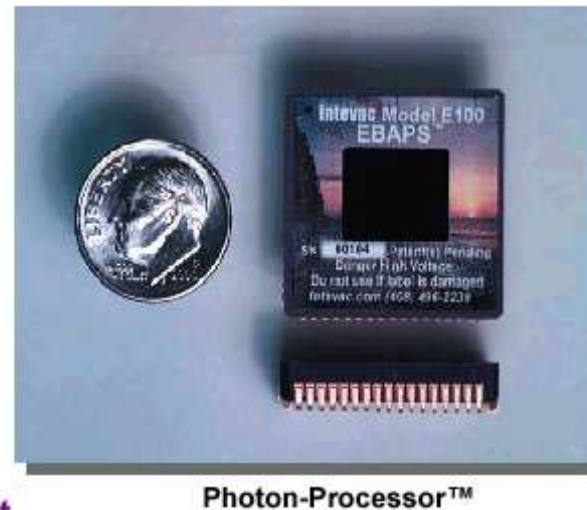
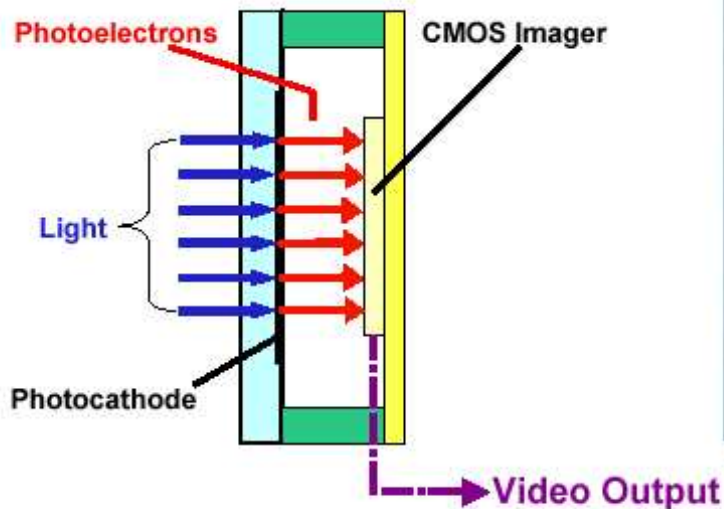


**Allows a very high gain by multiplication of the electrons generated by the TEP photocathode**

# EBCMOS Intevac



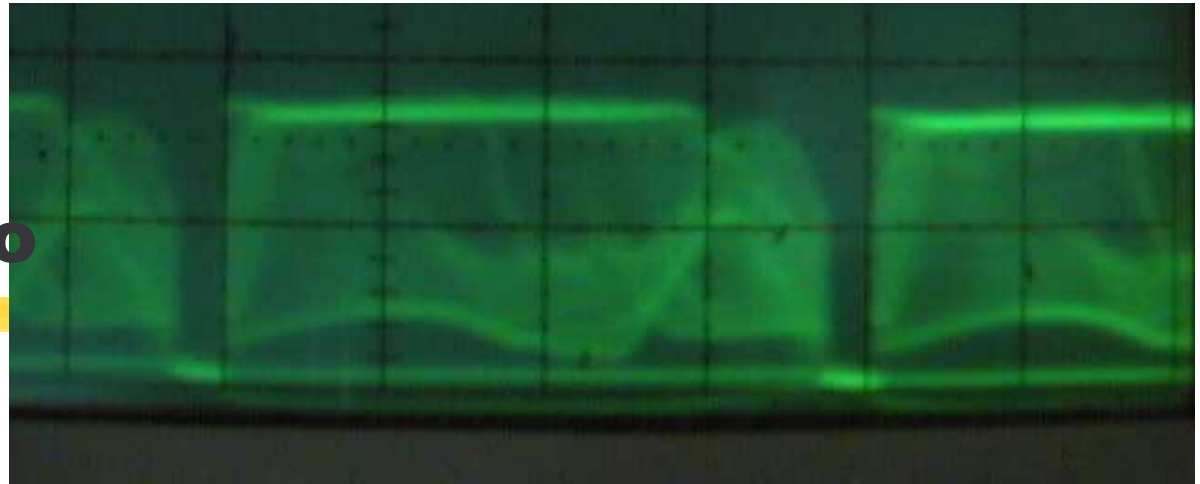
## Photon-Processor™ Extreme Low Light Level Digital Video Imager



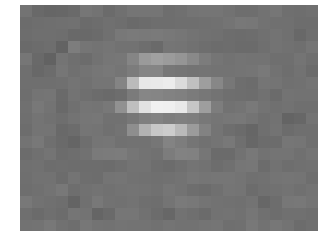
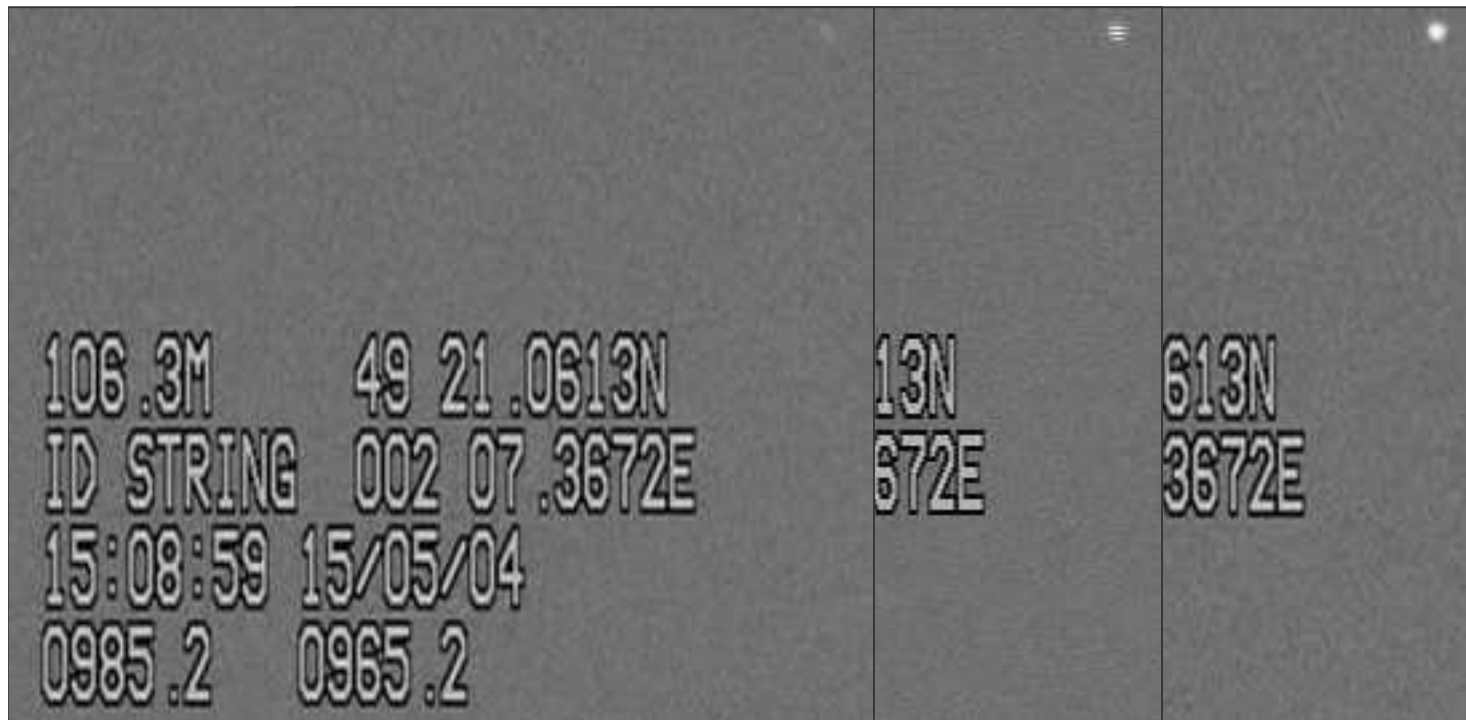
### Uses Electron Bombardment Active Pixel Sensor (EBAPS™) Technology

- Low Cost
- Patented Technology
- Camera Electronics On-chip
- Day/Night Operation
- SXGA (1024 X 1280) Resolution
- Low Power <600 Mw @ 3 VDC

## 5. Camera vidéo

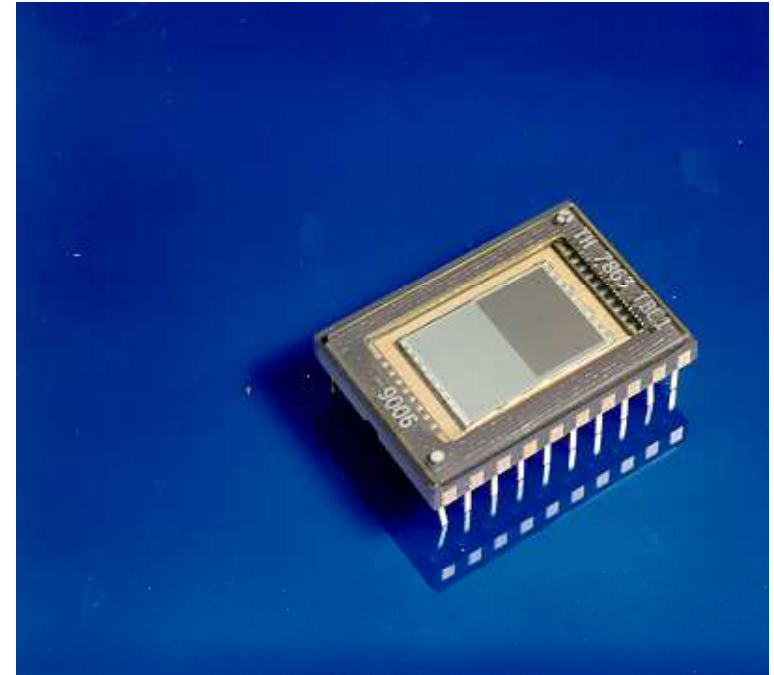


- CCIR
- Entrelacement 2:1 des lignes des demies trames impaires et paires à 50Hz, soit 25Hz pour une trame complète.



# CCD et le temps

- **CCD à transfert de trame**
  1. Temps d'exposition sur la zone sensible
  2. Puis transfert sur la zone mémoire (le transfert agit comme un obturateur électronique de réponse ms)
  3. Puis lecture de la zone mémoire tandis que l'exposition suivante est intégrée sur la zone sensible



# CCD interligne ou CMOS et le temps

## ➤ Plans focaux CCD interligne ou matrice CMOS

### ➤ Mode Snap shot

1. Temps d'exposition
2. Puis transfert de chaque pixel à sa mémoire adjacente
3. Puis lecture des mémoires tandis que l'on réalise l'exposition de la trame suivante.

### ➤ Mode balayage progressif

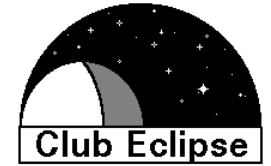
- Les lignes successives sont exposées puis lues pour reproduire le balayage des tubes vidicons et des tubes à rayon cathodique.
- La trame est construite ligne par ligne. Ainsi la période d'exposition n'est pas synchrone sur toute la trame et glisse de haut en bas dans le champ de la trame.

## Watec 902H ou 902HS

- CCD interligne à micro-lentilles Sony (429ALL EX View super HAD)
- Sensibilité réelle de 2mlux au lieu de 0.15mlux annoncé
- L'exposition de la Watec 902HS peut être contrôlée manuellement.
- Consommation 2W sous 12V.
- CCIR, 2:1 entrelacé



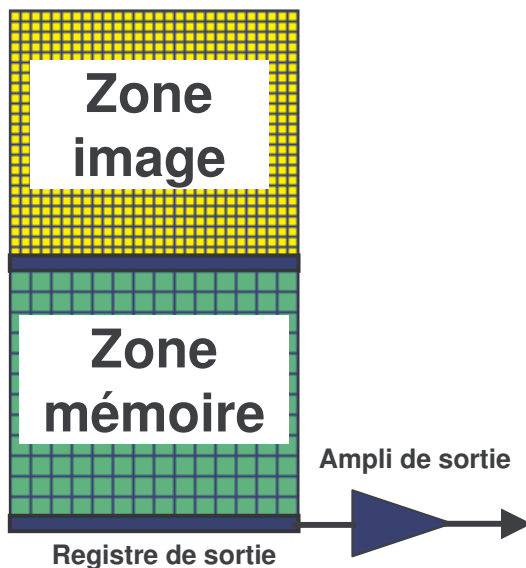




## **6. Electron Multiplied CCD**

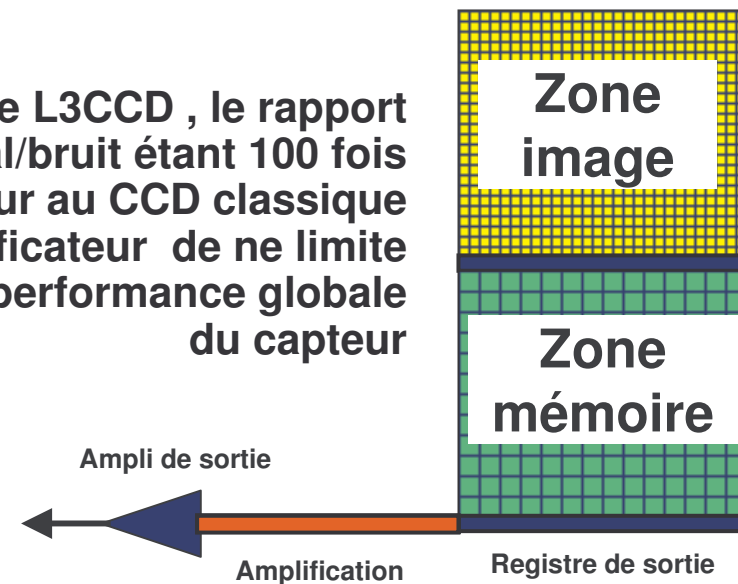
# Comparaison entre les CCD et les L3CCD

## CCD Classique



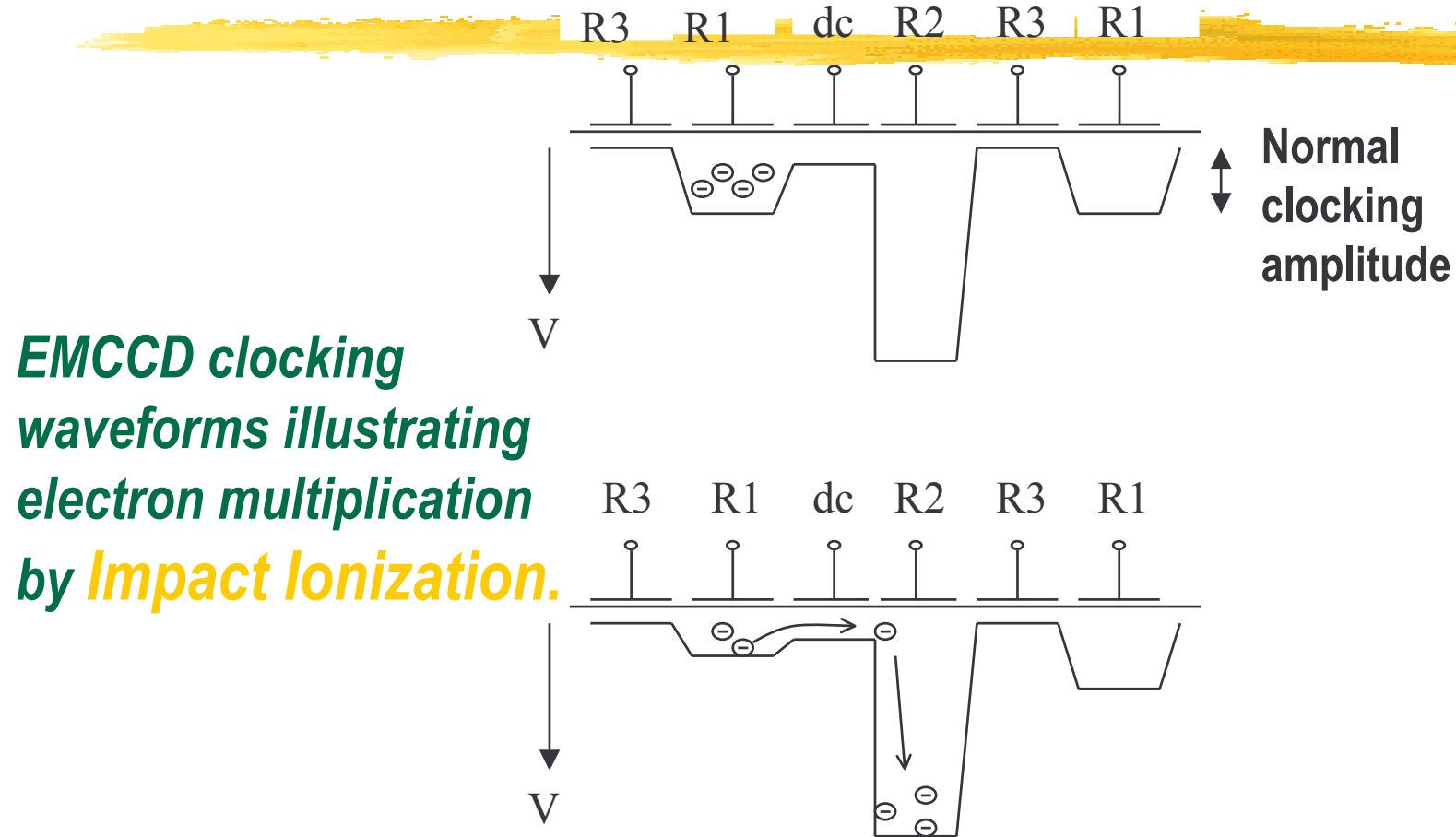
- Pour le L3CCD , le rapport signal/bruit étant 100 fois supérieur au CCD classique l'amplificateur de ne limite pas la performance globale du capteur

## L3CCD



- Pour un CCD , la performance dépend principalement de la bande passante et du niveau de bruit généré par l'amplificateur de sortie à bas niveau

Transfer direction →



**EMCCD clocking waveforms illustrating electron multiplication by *Impact Ionization*.**

**Electron multiplication by *Impact Ionization* in high electric field**

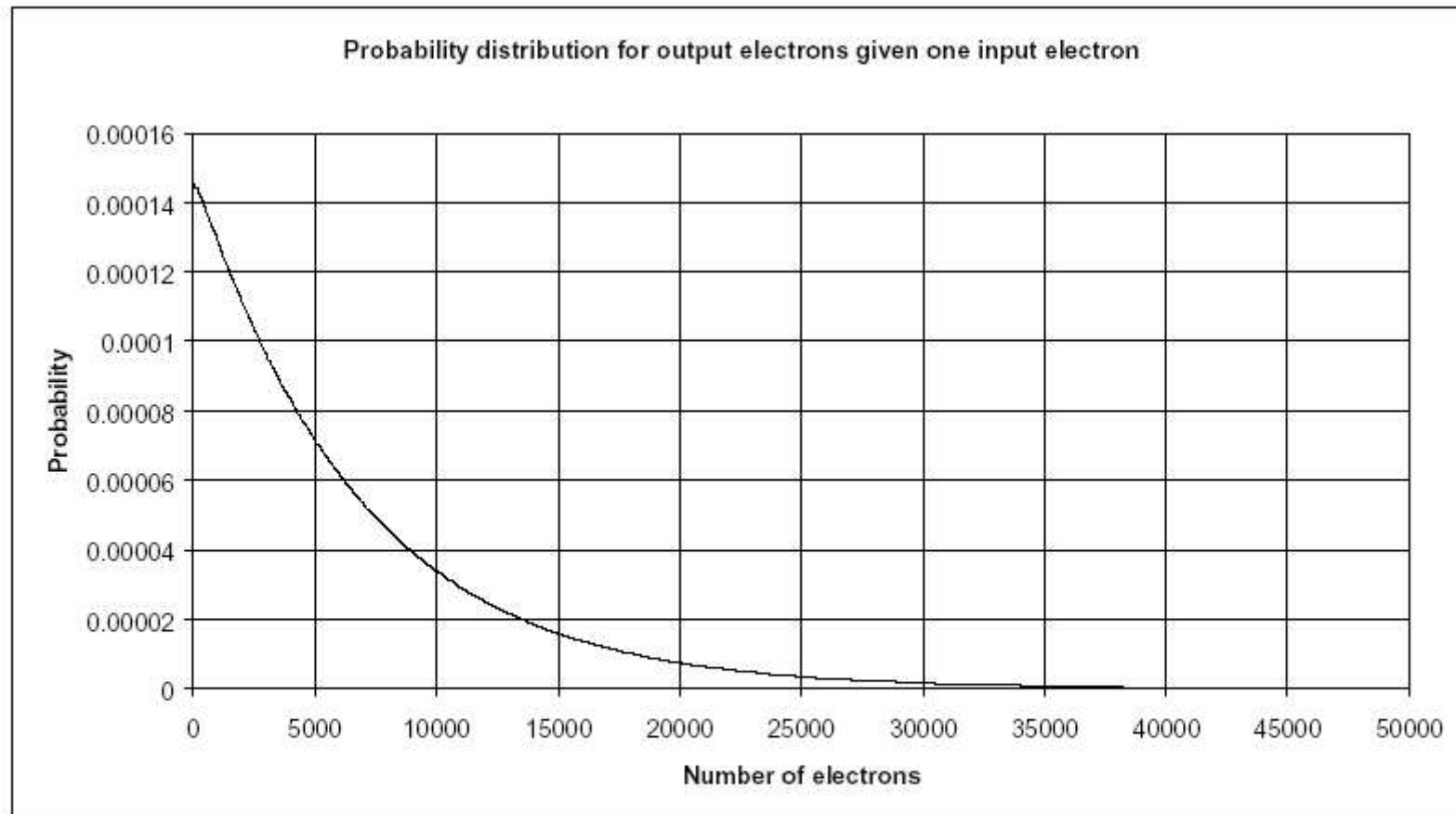
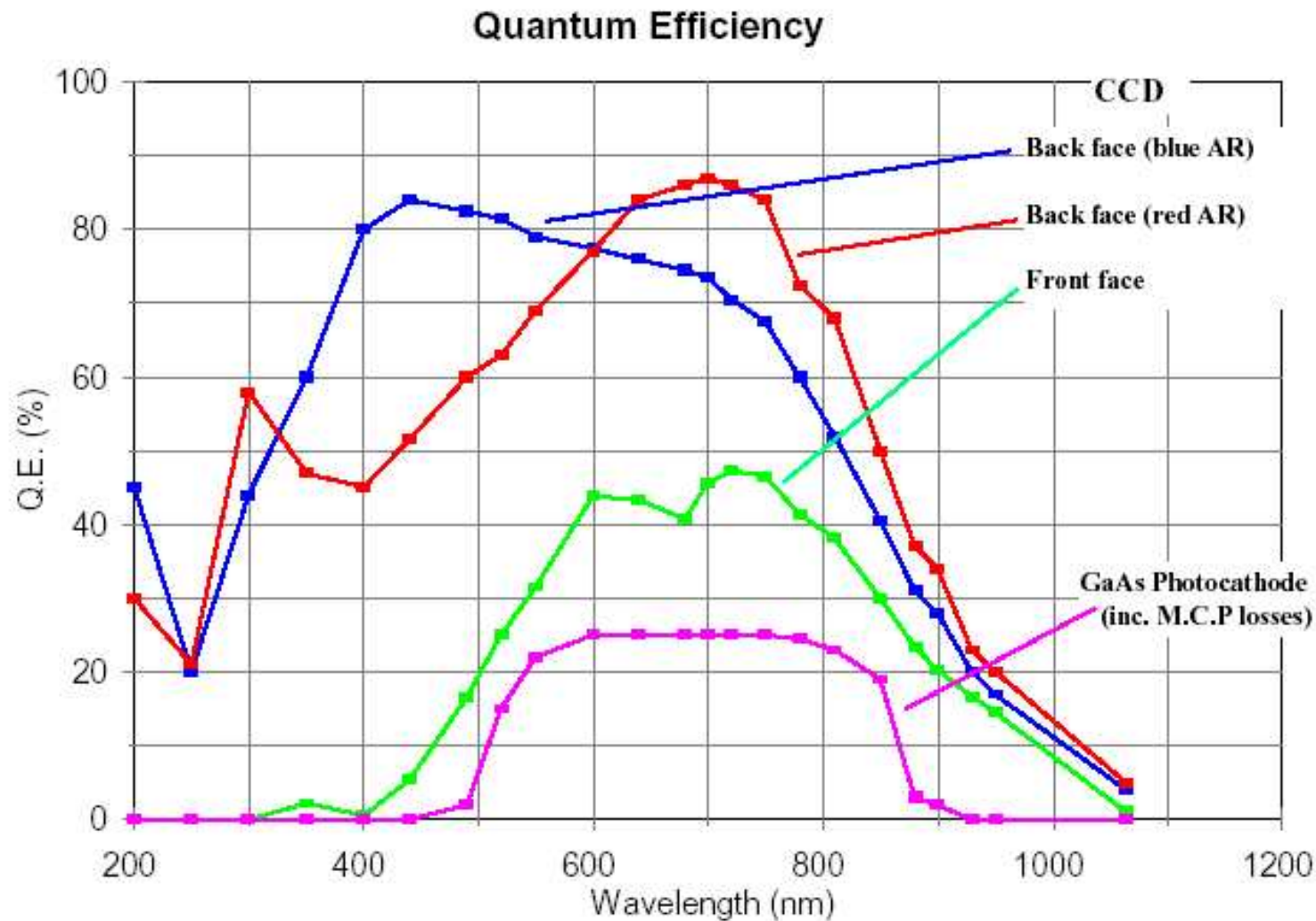
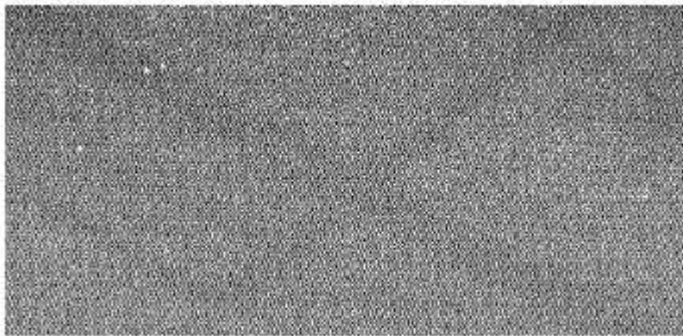
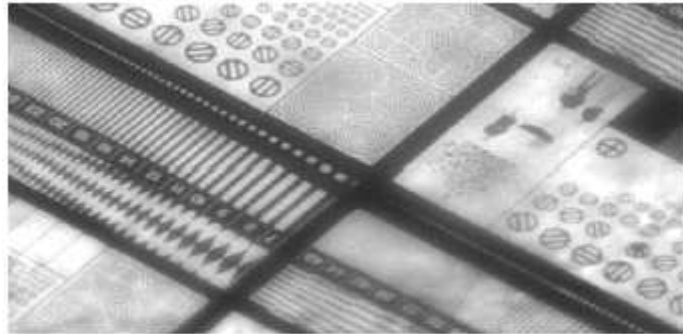


Figure 1: The probability distribution for the signal output from a multiplication register of 591 stages with a mean gain per stage of 1.015. The mean overall gain for the entire multiplication register is then 6670.

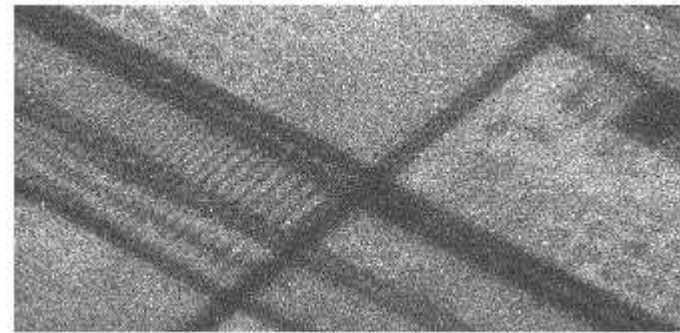
# Comparaison des rendements quantiques spectraux



# Image d'une mire à faible qty de photons/ pixel



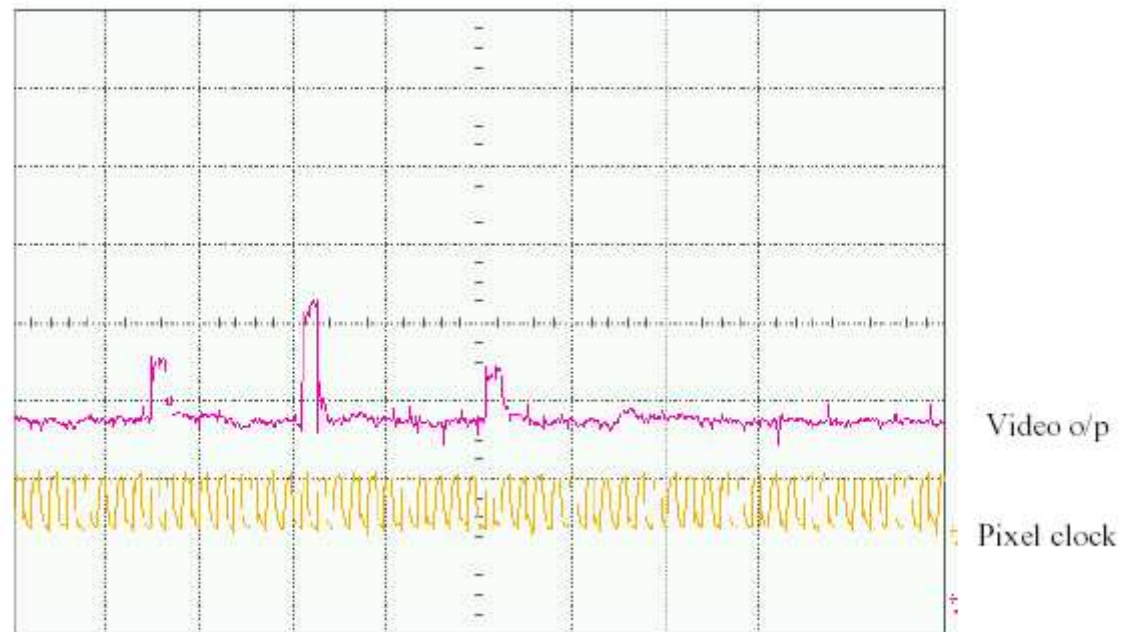
1,5 photons par pixel

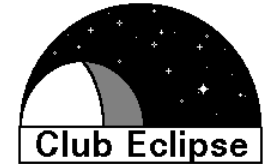


20 photons par pixel

# Signal video: le comptage de photon

Signal 0.05 electrons/pixel





# EMCCD chip

## ■ E2V Technologies

- | 97 series – 512 x 512 FT, 16um pixels
- | 60 series – 128 x 128 FT, 24um pixels
- | 65 series – 576 x 288 FT, 20 x 30 um pixels
- | 207 series – 1600 x 200 & 1600 x 400, 16 um pixels (Andor exclusive)

## ■ Texas Instruments

- | 285 sensor: 1004 x 1002 FT, 8 um pixels
- | 246 sensors: 658 x 496 IT, 10 um pixels, B&W
- | 247 sensors: 658 x 496 IT, 10 um pixels, Color

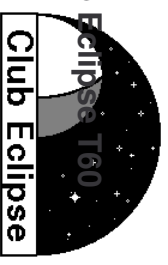




# ■ Caméra développée par :

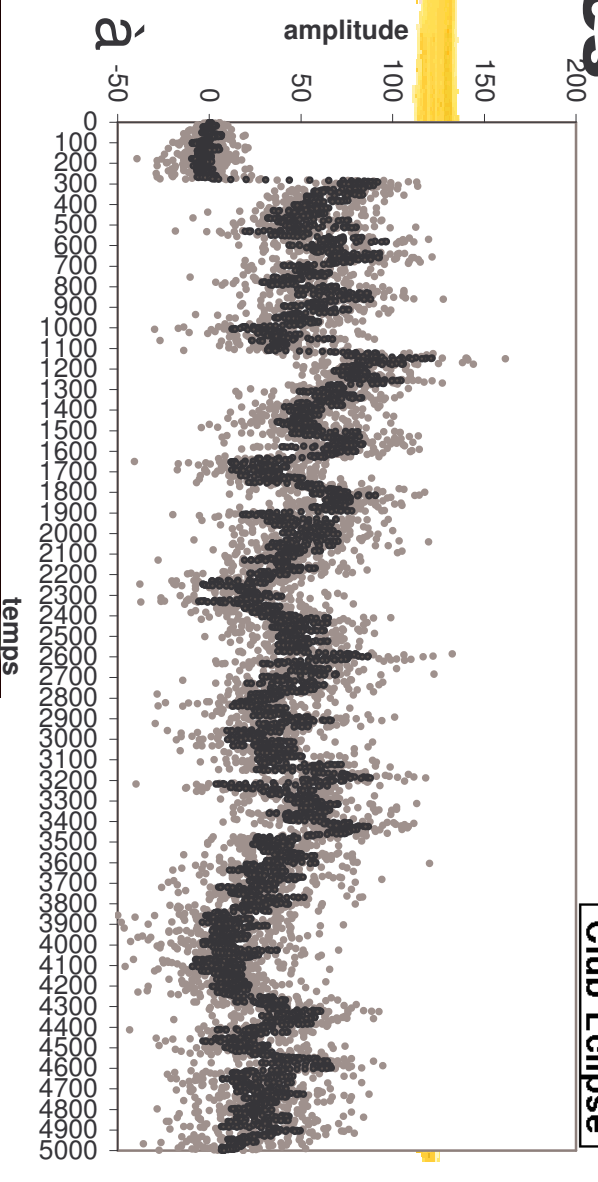
- Domaine spectrale de 400 nm à 1µm
- Taille du détecteur : 576 x 288 pixels
- Pixels : 20 µm x 30 µm
- Temps d'intégration : 19ms
- Vitesse de lecture ligne : 1420 l/s
- Registre amplificateur de 591 cellules
- Contrôle d'amplification manuel
- Bruit de fond inférieur à 1 électron pour des vitesses de lecture de l'ordre du Méga pixels / seconde
- Dynamique de fonctionnement de 8 décades
  - de la nuit étoilée :  $<10^{-3}$  Lux
  - au plein soleil :  $10^5$  Lux





# E2V Technologies L3CCD

- ▶ CCD intégrant un amplificateur à avalanche
- ▶ Sensibilité: 0.1 mlux à 0.01mlux



# Les signaux parasites

Ils sont différents sur chaque pixel :

- Fixe (offset)
  - La composante continue ou offset. Elle est fixe sur chaque image (elle est différente pour chaque pixel)
- Proportionnel au temps de pose (dark)
  - Le courant d'obscurité. Il est divisé par 2 en refroidissant de 7°C.
- Proportionnel à l'exposition = Éclairement x temps de pose (flat ou PLU)
  - La non-uniformité de la sensibilité des pixels

Tous ces signaux parasites sont à traiter

# Le bruit

---

## ■ Le bruit temporel

- Sur un signal constant la fluctuation d'une image à une autre

## ■ Le bruit spatial

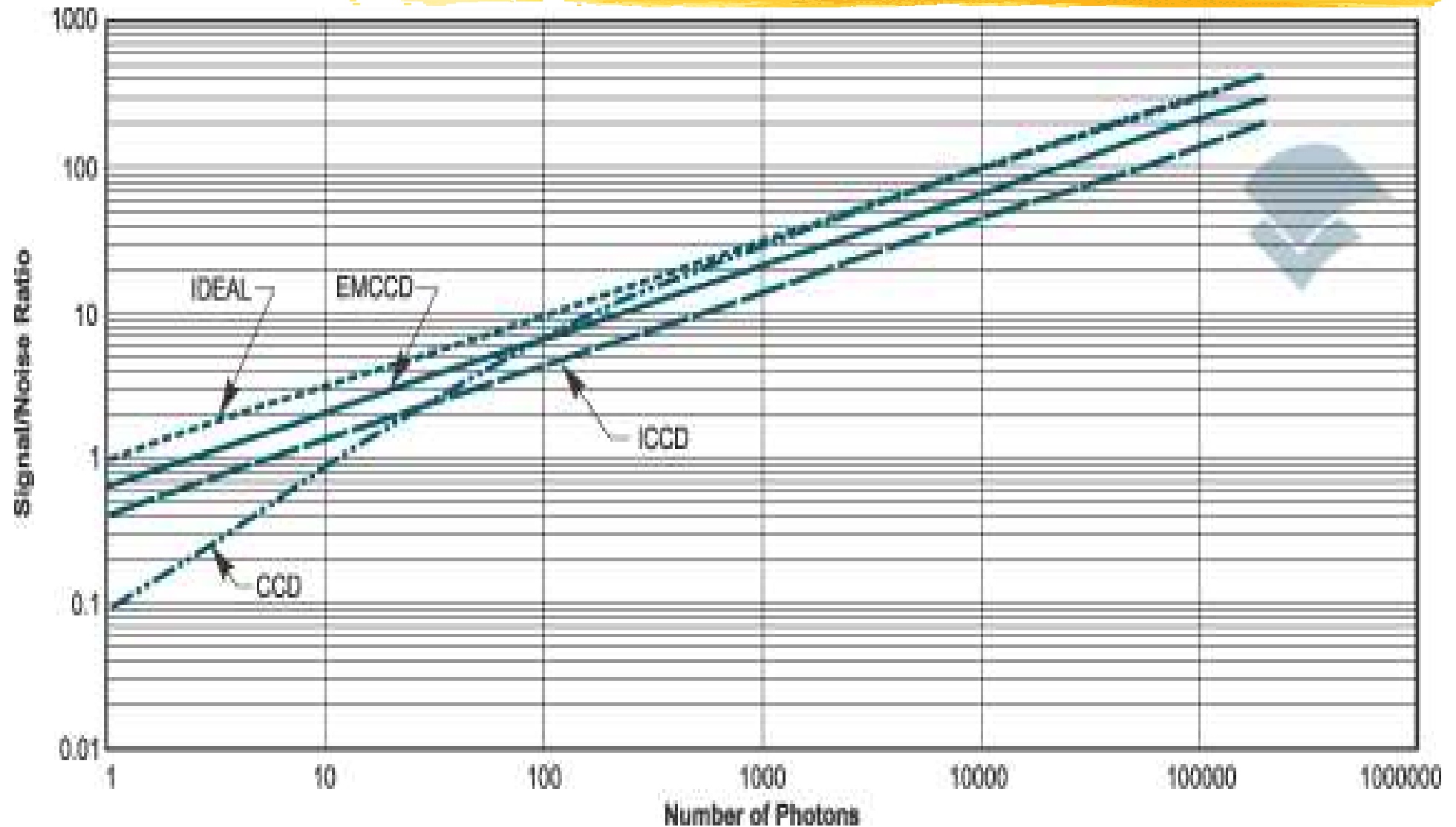
- Sur un signal constant la fluctuation sur une même image d'un pixel à un autre



# Comparaison CCD, EMCCD, ICCD

	Ideal	CCD	EMCCD	ICCD
Quantum Efficiency ( $D_{QE}$ )	100%	93%	93%	50%
Readout Noise	0	10	60	20
Gain	1	1	1,000	1,000
Spurious Noise	0	0.05	0.05	0
Dark Noise	0	0.001	0.001	0.001
Noise Factor	1	1	1.41	1.6

# Comparaison CCD, EMCCD, ICCD



# Les cameras EMCCD



- | E2V technologies
- | Photonic Science: CoolView EM/1000
- | Princeton Instrument: Photon max
- | E2V technologies : L3C95
- Andor
- Hamamatsu
- ...

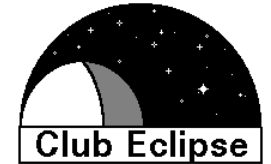


# Andor Luca<sup>EM</sup>



- Pixels 10 $\mu$ m
- EMCCD interligne 658 x 496
- Cadence de lecture 12,5Mpixel/s
- 30 trames/s
- Cadence plus haute en mode binning ou fenêtre
- USB2.0
- Pose min qq ms trigger interne ou externe
- 7500€





## Remerciements:

---

- Cinzano
- Photonis
- Hamamatsu
- Intevac
- E2V
- Andor