

Les Récepteurs Bas Niveau de Lumière



Thierry Midavaine

Club Eclipse

WETO 2006

Plan de la présentation



- Les flux à bas niveau de lumière et l'oeil
- Les Intensificateurs de Lumière
- EBCMOS - EBAPS
- Les cameras vidéos
- Les CCD BNL, L3CCD, EMCCD

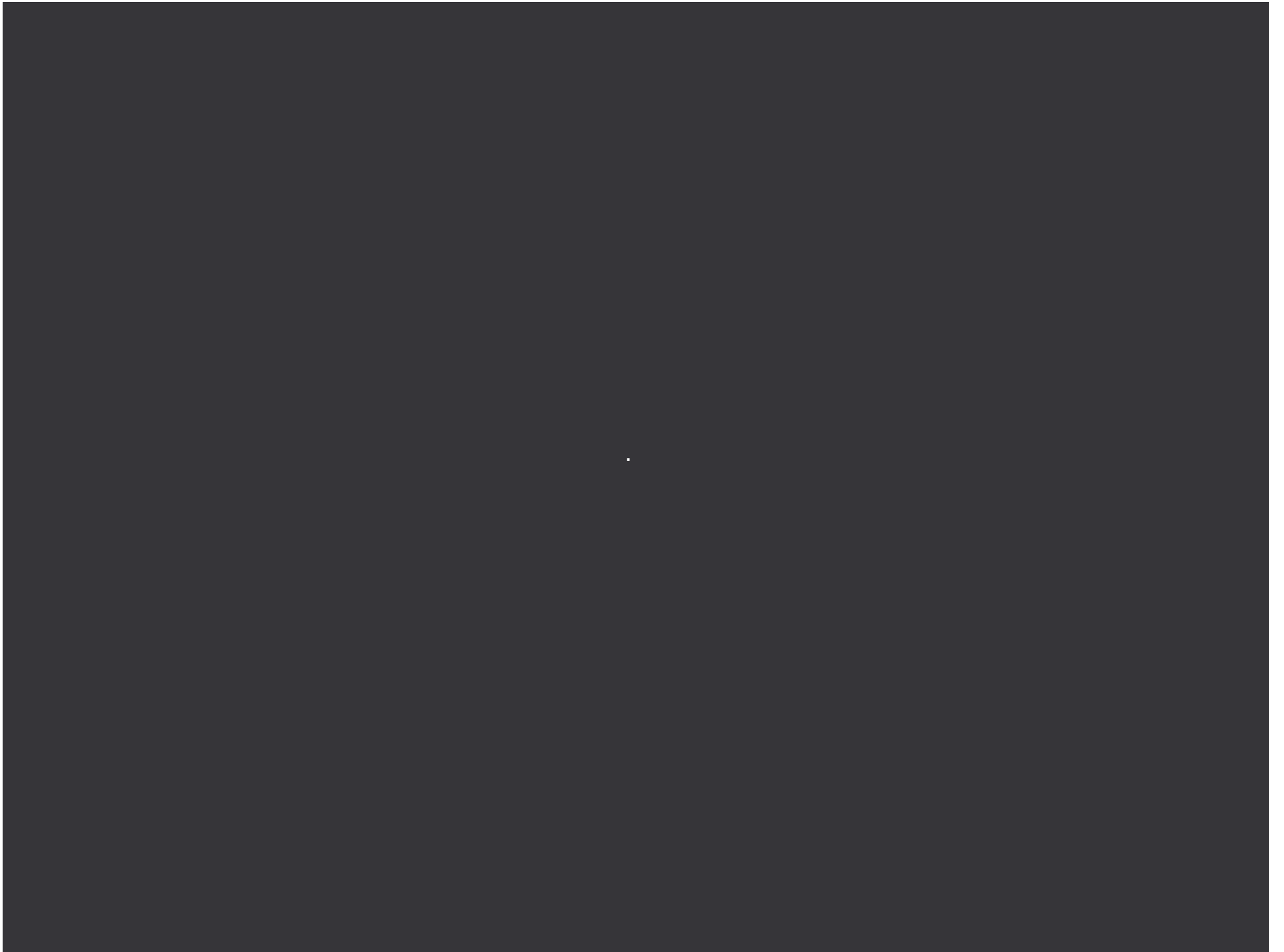
Acronymes



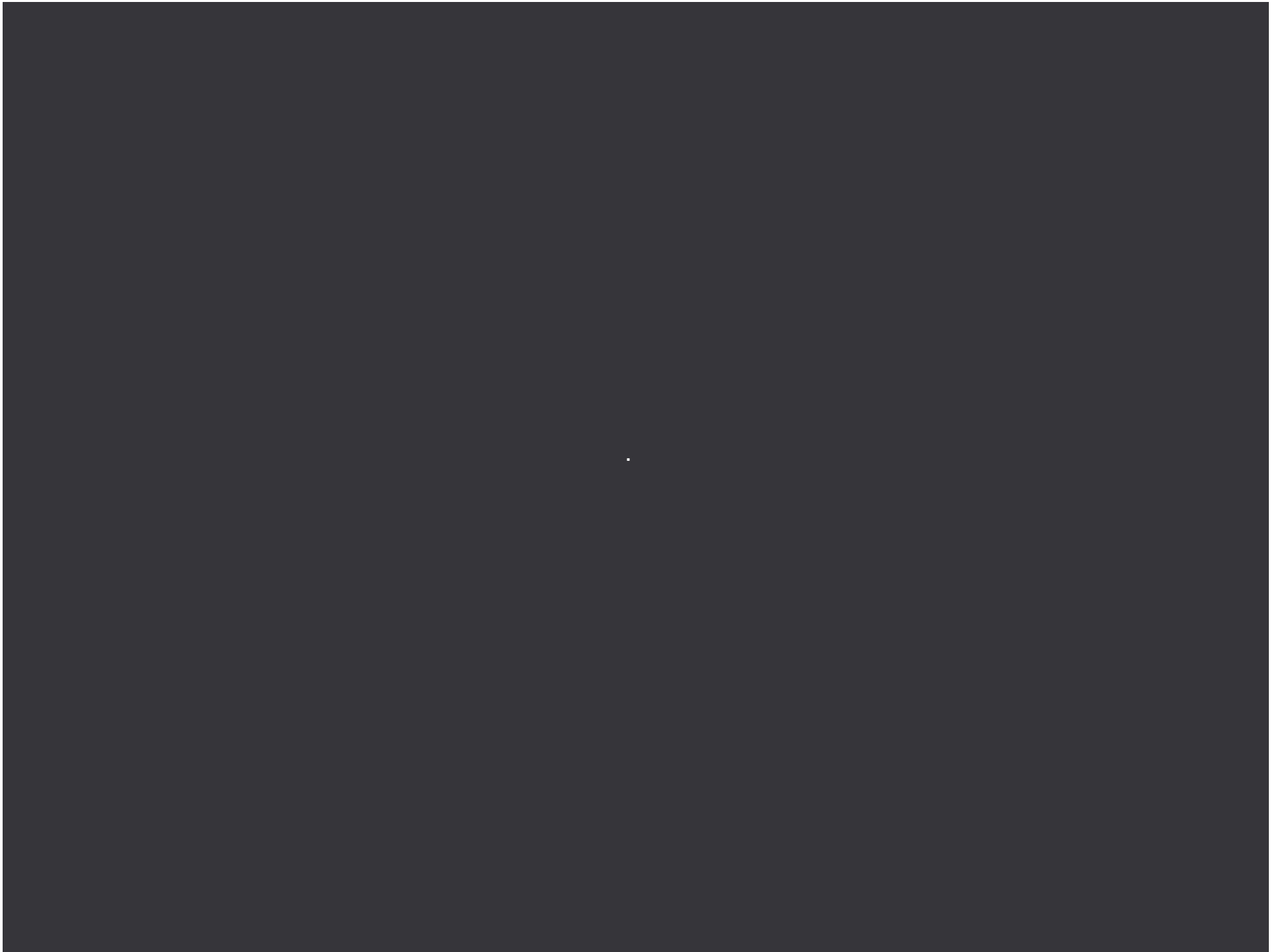
- ⌘ I² ou II : Intensificateur d'Image ou Image Intensifier
- ⌘ IL: Intensificateur de Lumière
- ⌘ ICCD Intensified Charge Couple Device, Dispositif à Transfert de Charge Intensifié
- ⌘ EBCCD-EBCMOS-EBAPS Electron Bombarded CCD – CMOS
- ⌘ EMCCD Electron Multiplied CCD
- ⌘ CMOS Complementary Metal Oxyde Semiconductor
- ⌘ APS Active Pixel Sensor
- ⌘ Amplificateur de Brilliance
- ⌘ MCP Micro Channel Plate ou Galette de microcanaux
- ⌘ 1ere gen Tube à lentille électrostatique
- ⌘ 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 et l'oeil









Les unités photométriques

➤ Energie	Joule J		lm.s	photons
➤ Flux	Watt	$J.s^{-1}$	lumen	photons/s
➤ Intensité		$W.sr^{-1}$	candela	
➤ Luminance		$W.sr^{-1}.m^{-2}$	$cd.m^{-2}$	
➤ Eclairement		$W.m^{-2}$	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 $1.09 \cdot 10^{+11} \text{photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

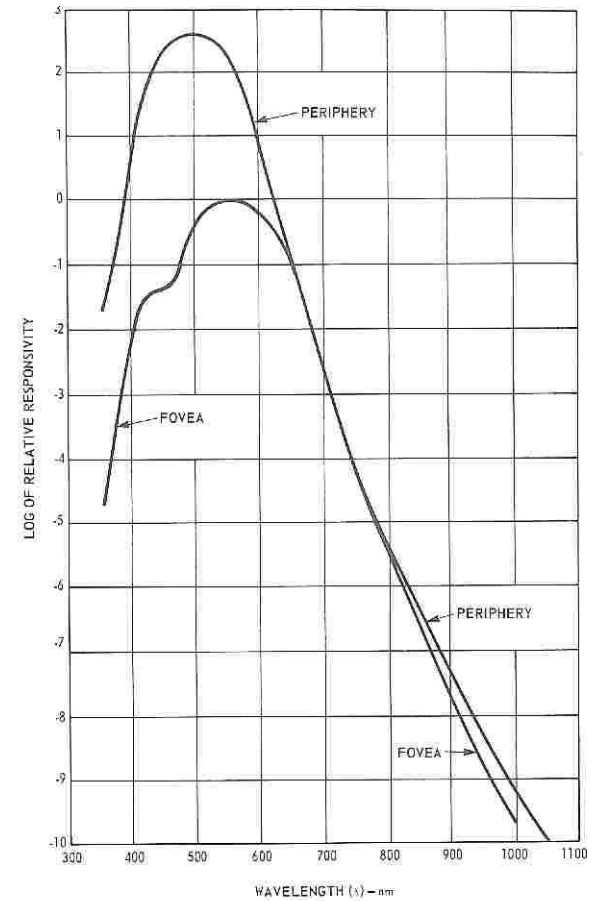
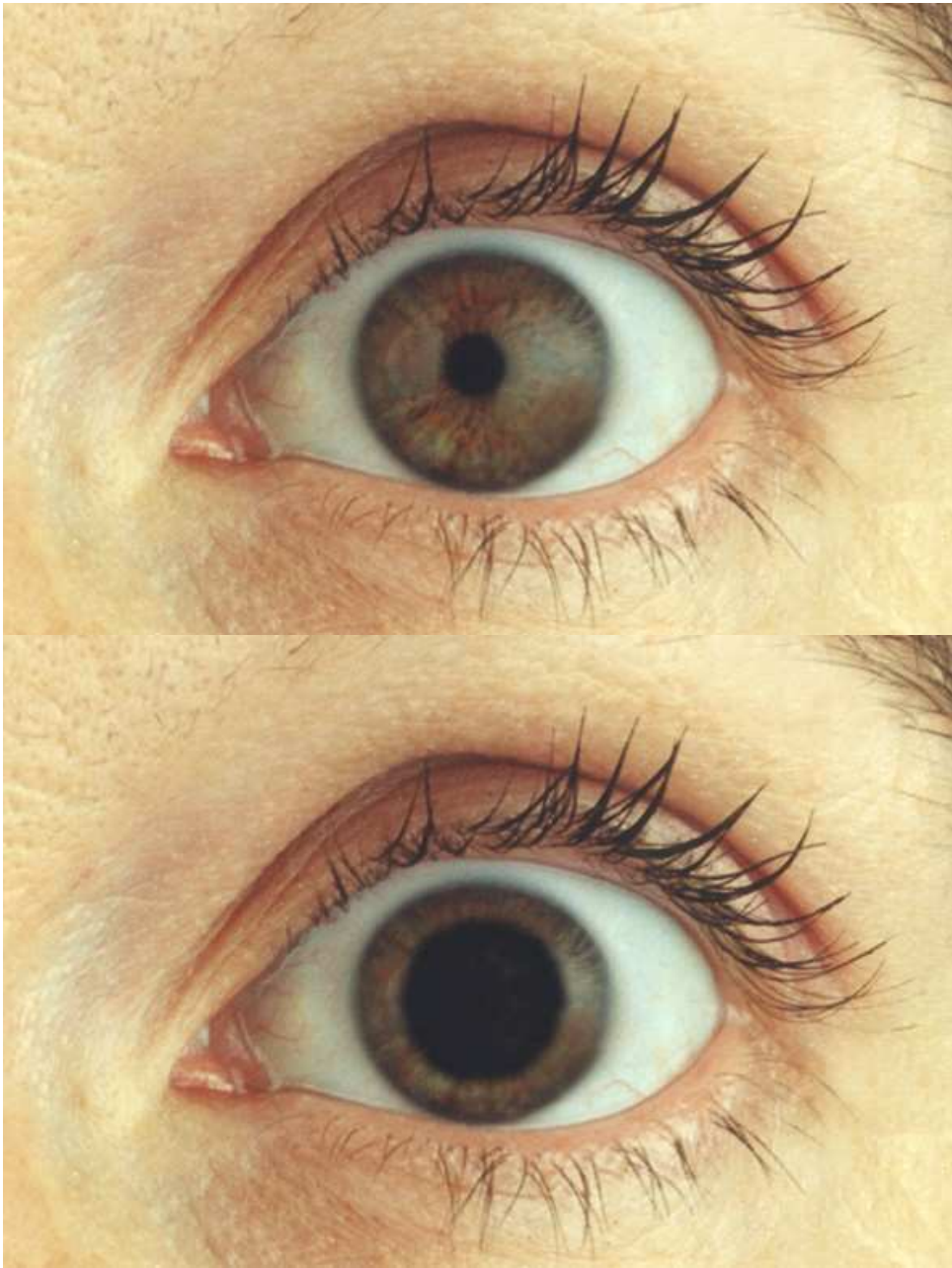
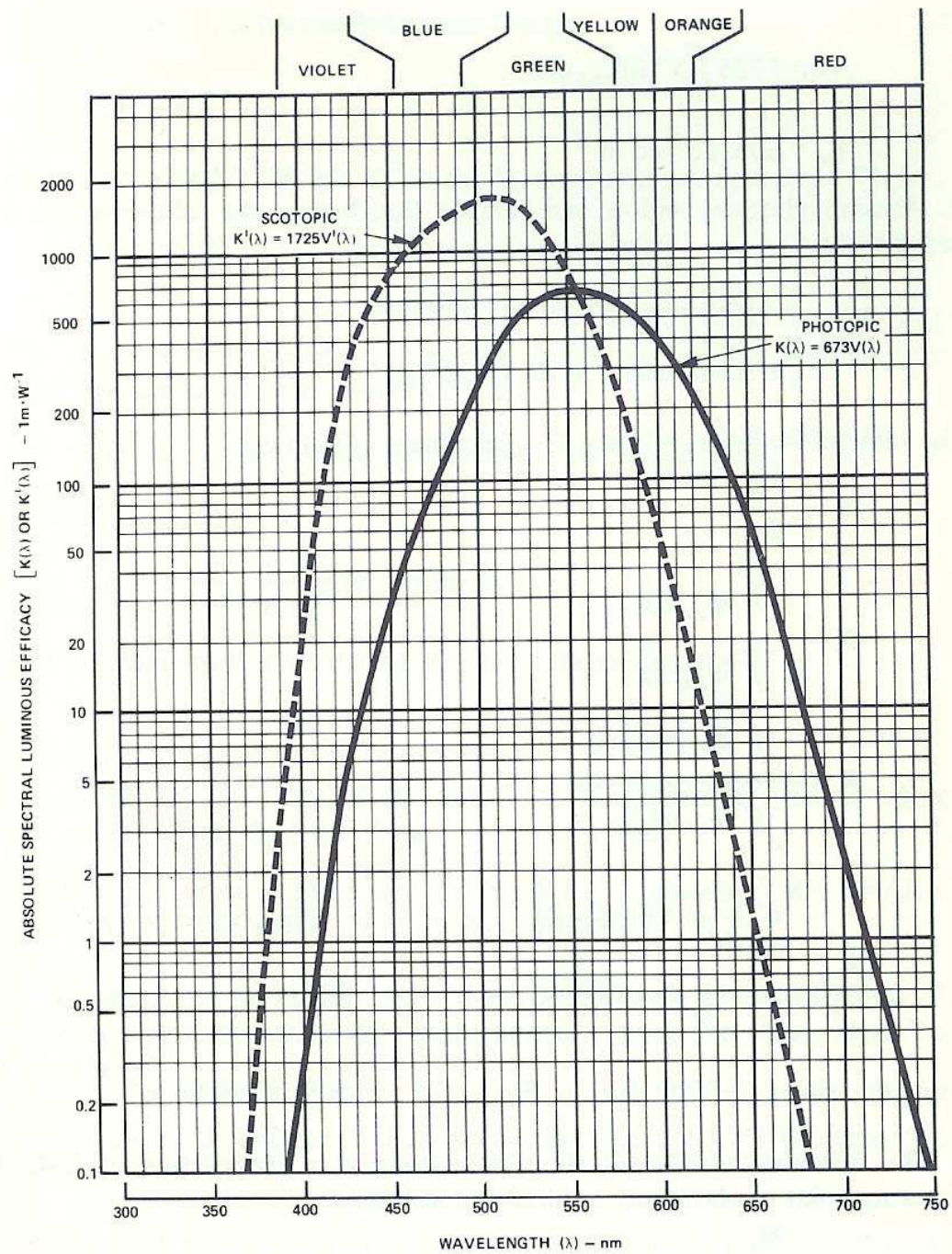


Fig. 5-4 Relative spectral responsivity of the dark-adapted fovea and peripheral retina (Adapted from Griffin et al, Reference 15, with permission).

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.

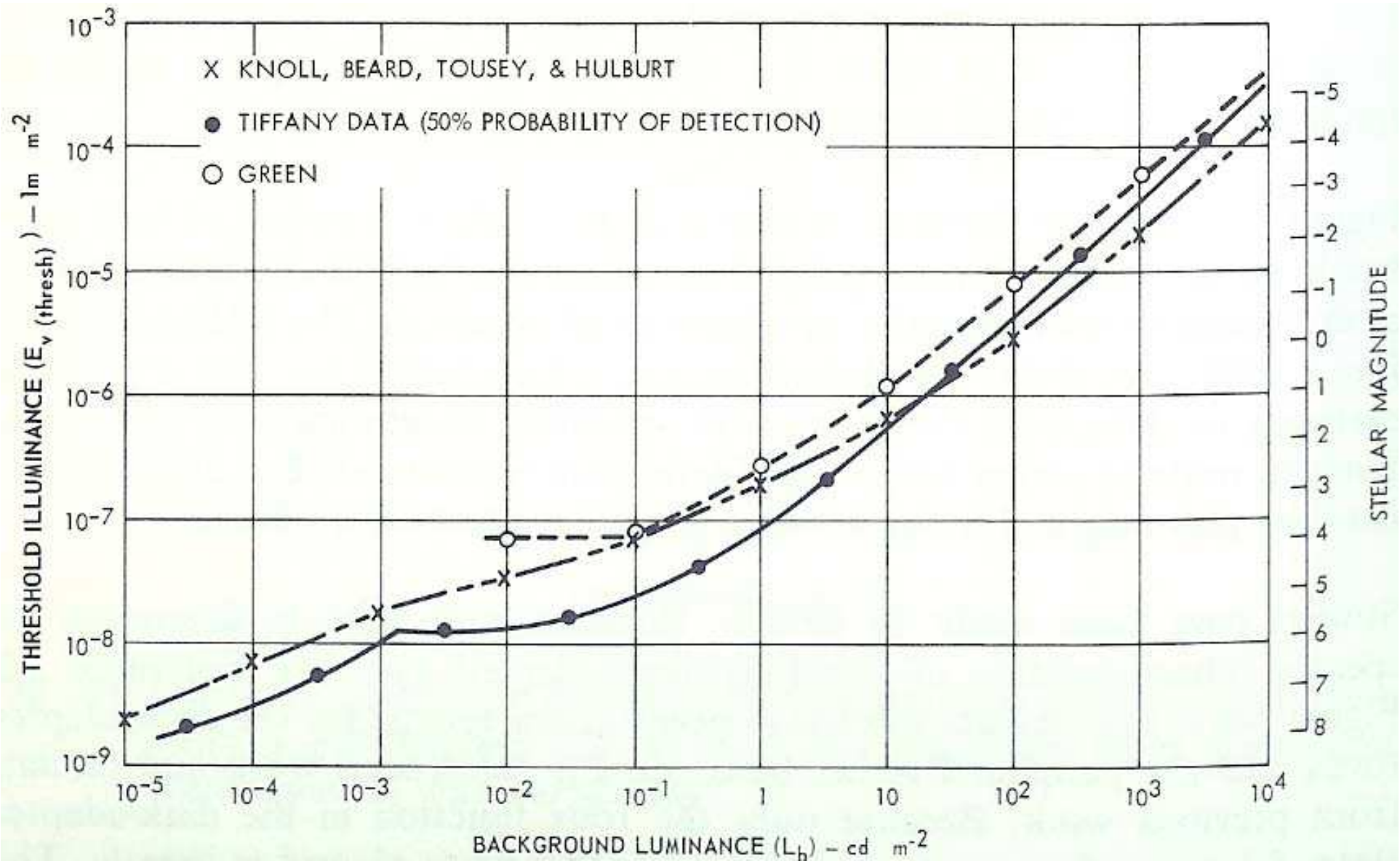


Temps de réponse de l'oeil

- 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 Etendue 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 320 photons/s
- ou 32 photons en 100ms !



La magnitude 12 sur un télescope de 200mm

200mm de pupille donne un gain de 1000 soit +7,5 magnitudes

$E_{12} = 4.2E-11$ lux Flux de $1.3E-12$ lm sur une tache de $10\mu\text{m}$ par $10\mu\text{m}$
=> 13mlux

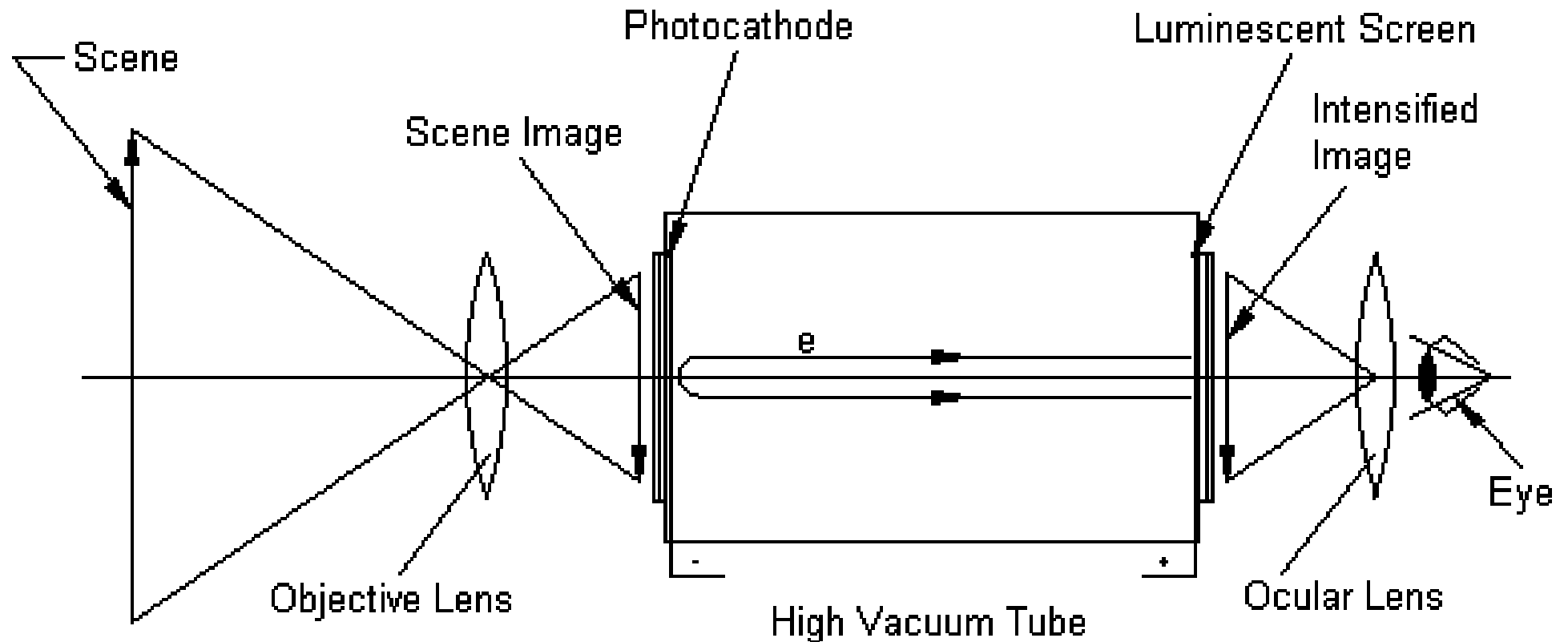
En photons pour l'œil ($0,1\mu\text{m}$ de bande équivalente): 5000 photons/s

Pour une camera CCD ($0,5\mu\text{m}$ de bande équivalente): 25000 photons/s

Avec un rendement quantique de 40% et des trames de 20ms => 200 photo-électrons/trame

A comparer à la somme quadratique des bruits de la camera.

2 Les intensificateurs de lumières





Les composants constitutants et les types de tubes



2.1 Les photocathodes

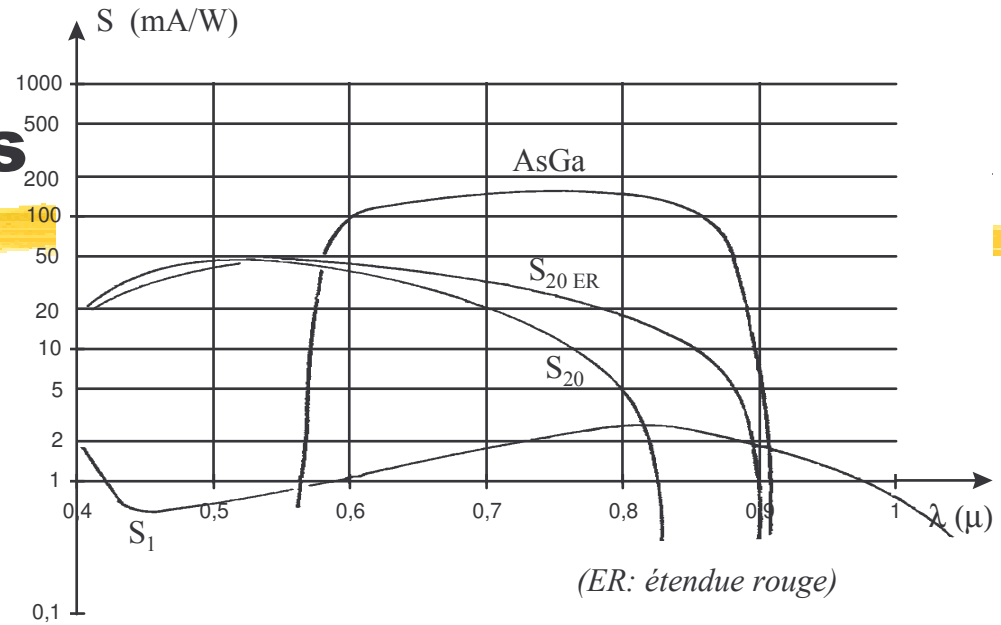
2.2 L'amplificateur

2.3 L'écran

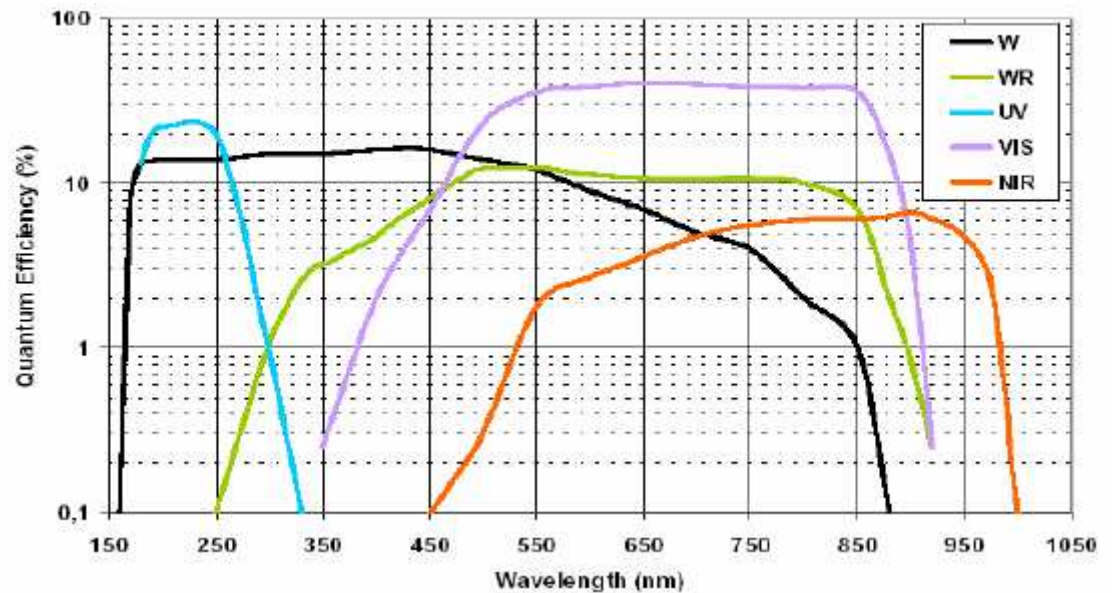
2.4 L'alimentation

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	μm		
➤ Sensibilité $f(\lambda)$	mA/W		
➤ Rendement quantique		5%-10%	20%-40%

Rendement quantique des photocathodes

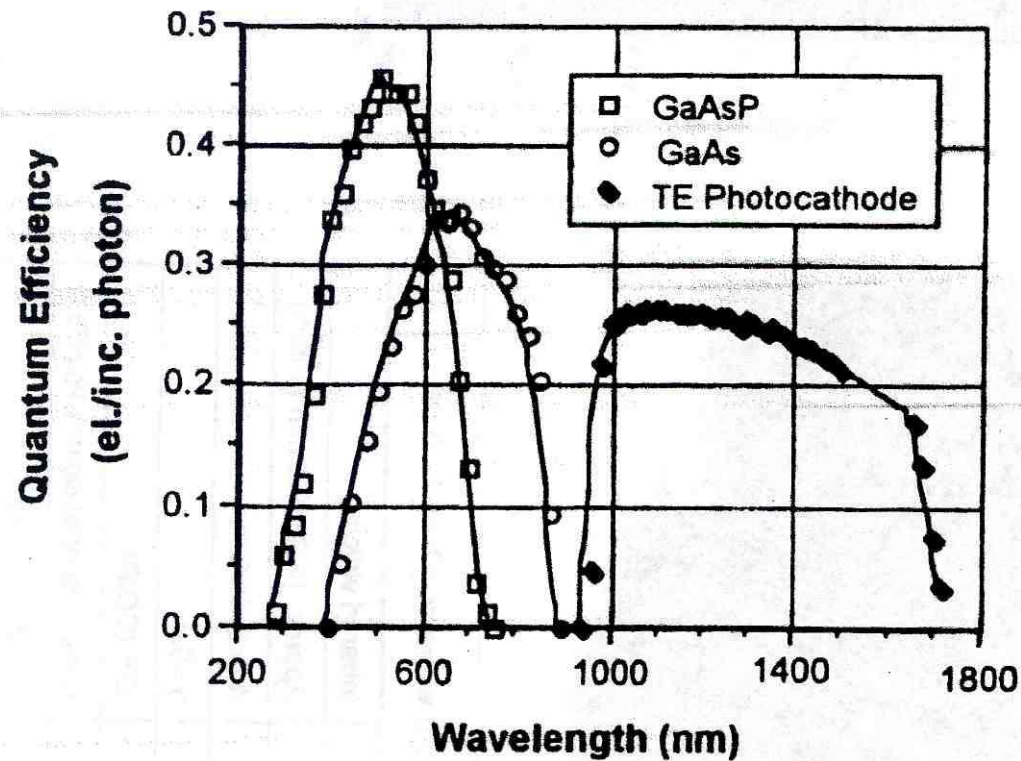
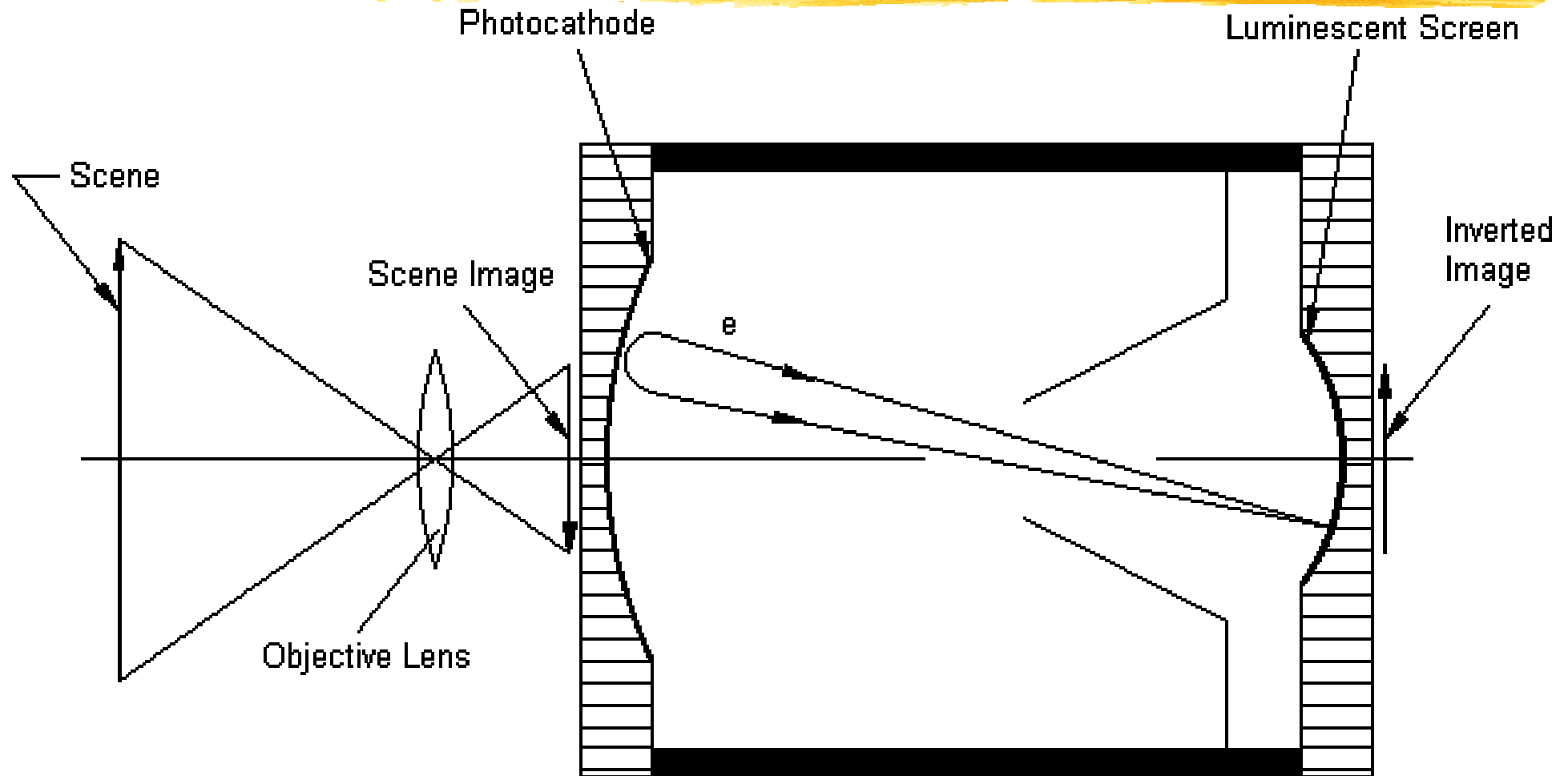
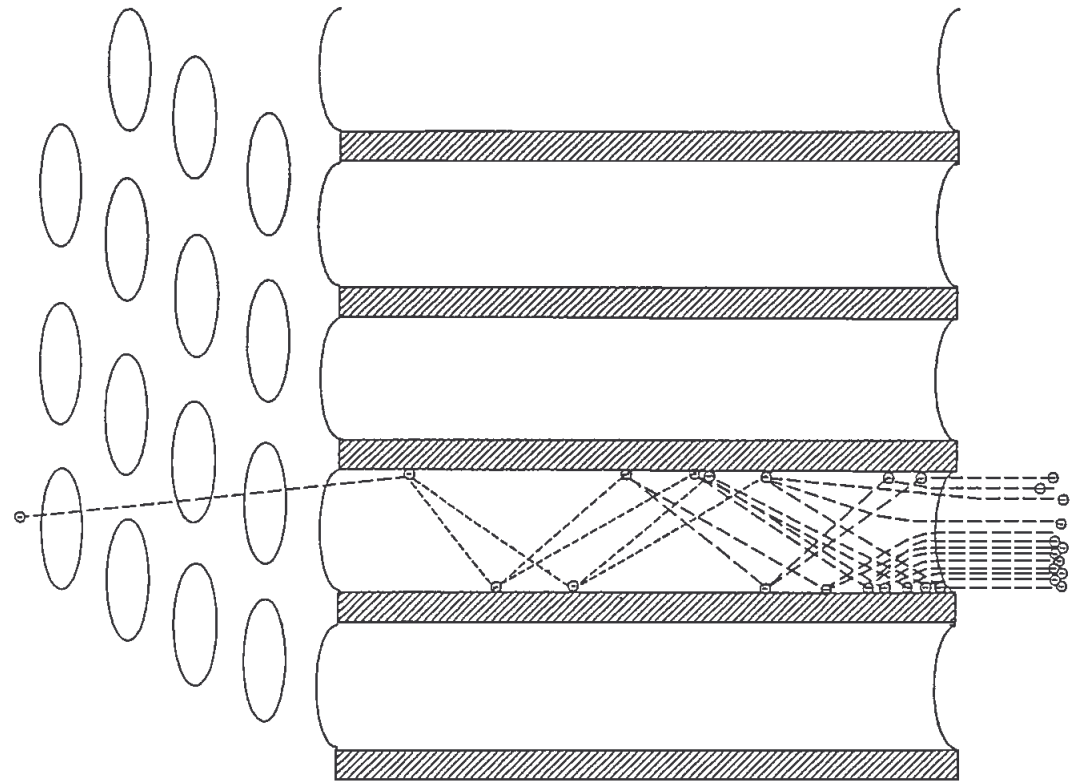
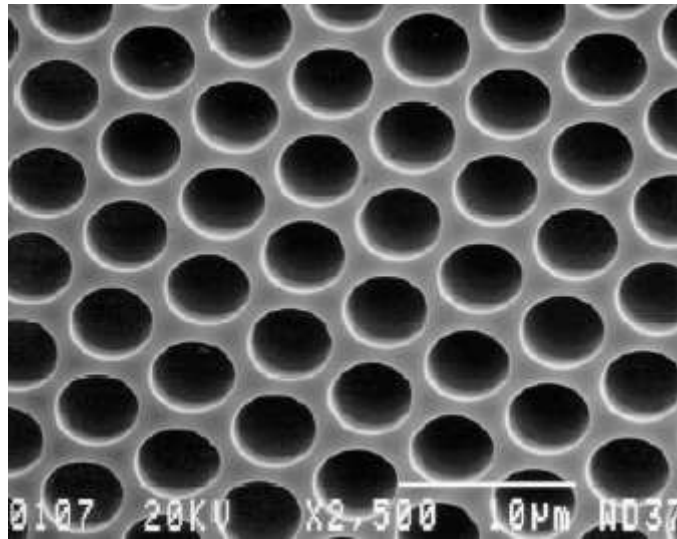


FIGURE 1.2 GaAs, GaAsP, and TE PHOTOCATHODE TYPICAL SPECTRAL RESPONSE

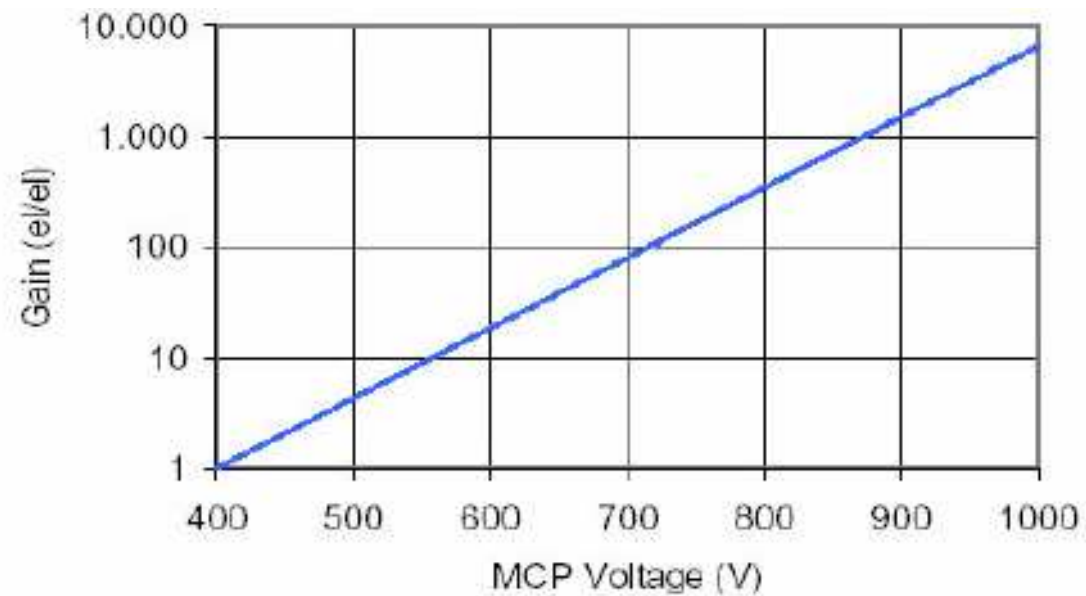
Amplification par accélération des photoélectrons



La galette de microcanaux



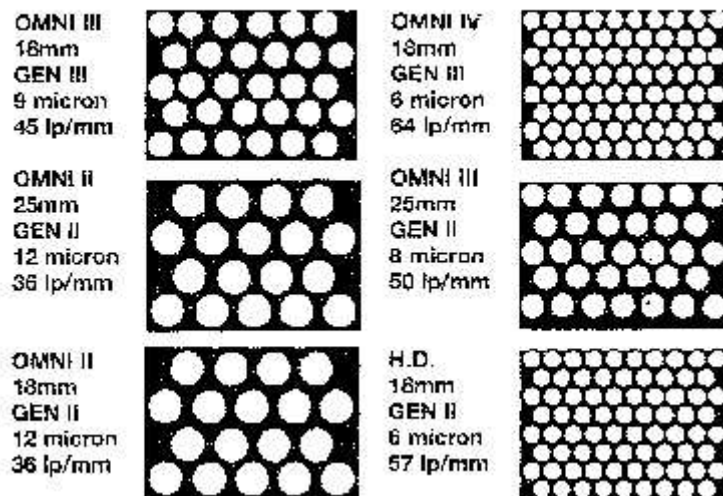
Gain de la galette de micro canaux



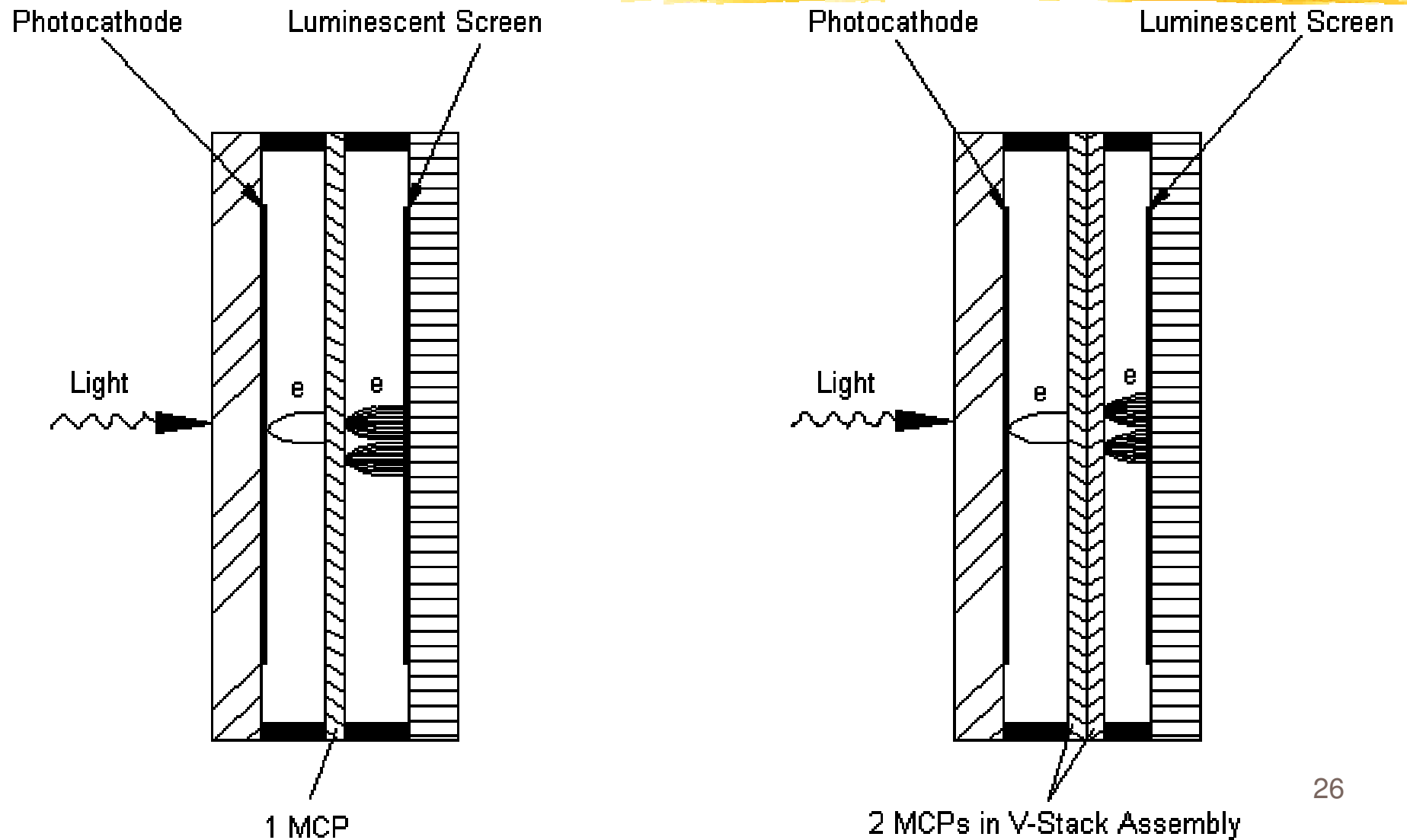
Galette de micro-canaux

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

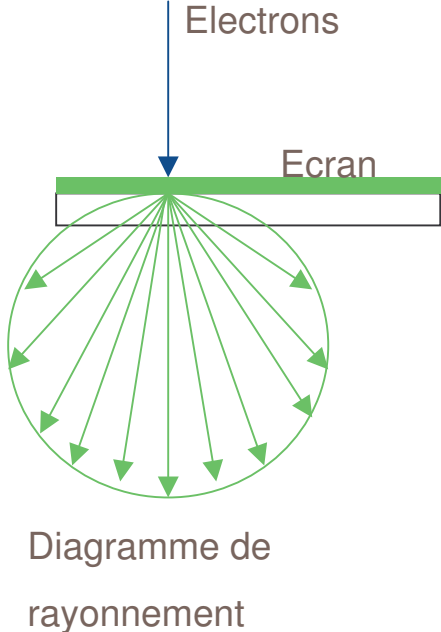
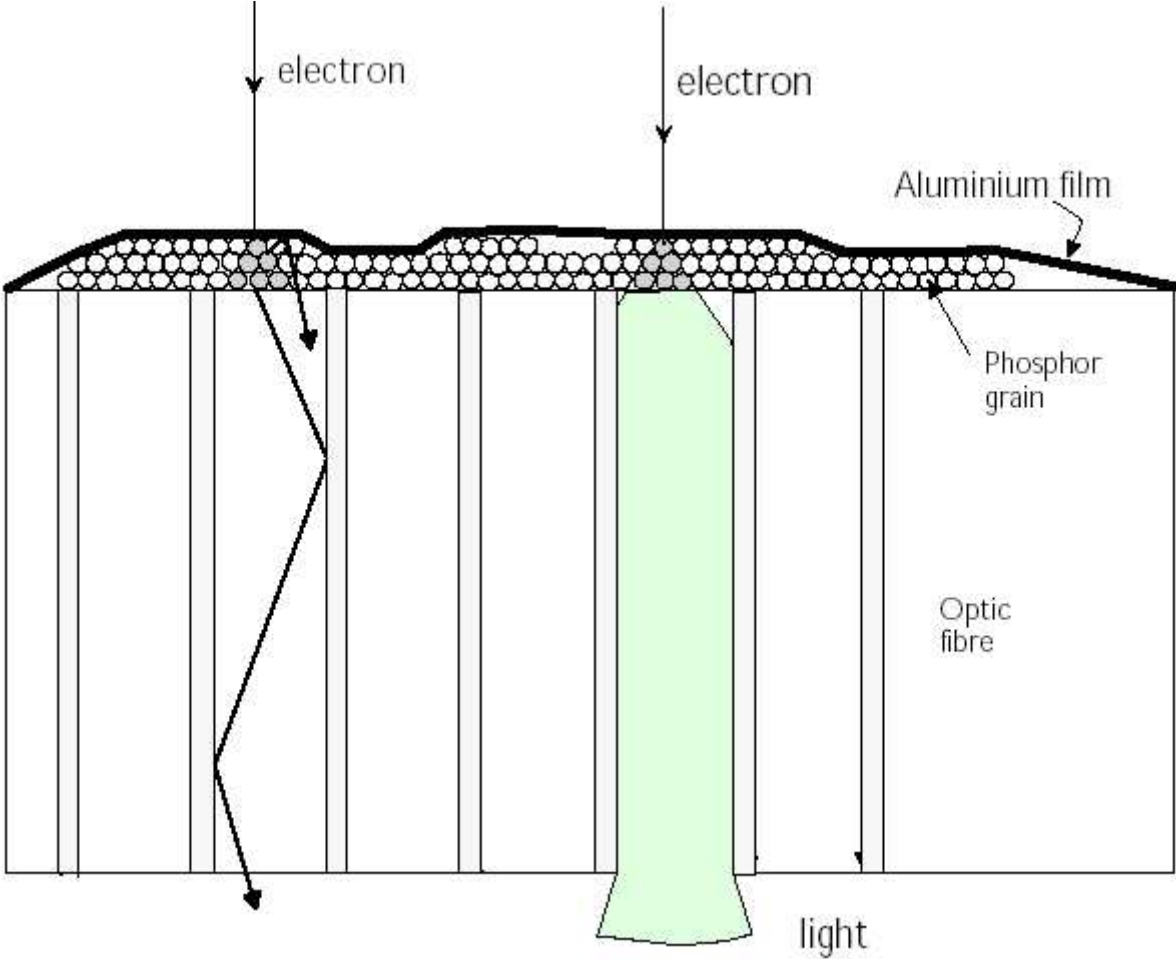
Improved Micro-Channel Plate Pore Size



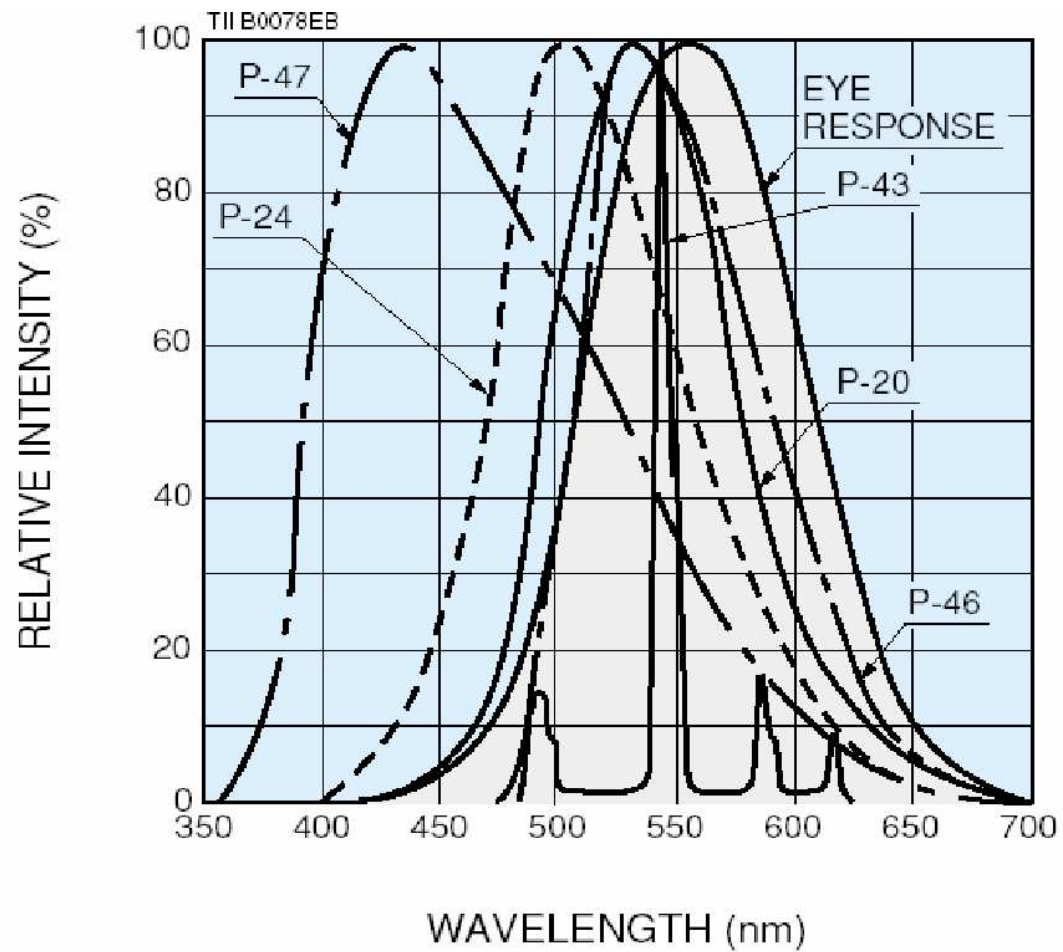
La double focalisation de proximié



L'écran



Ecran, réponse du phosphore



Les grandeurs utilisées dans les jumelles

- ⌘ L'objet observé : deux cas
 - ☒ objet étendu, caractérisé par une Luminance L_0
 - ☒ objet ponctuel non résolu, caractérisé par une Intensité I_0
- ⌘ 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/m²
- ⌘ Le signal en sortie de tube se caractérise par une Luminance L_3 .
L'écran rayonne dans 2π 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_2
- ⌘ Le gain global optique $G_0 = E_2/E_1$

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 mA/W)
- ⊞ Rendement quantique en fonction de la longueur d'onde

⌘ Qualité image

⌘ Gain

⌘ Luminance d'écran

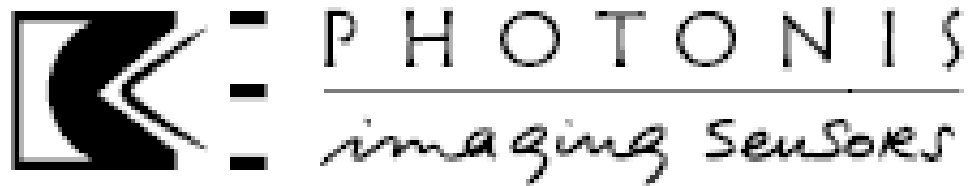
⌘ Durée de vie

- ⊞ MTTF (Mean Time To Failure) en heures

Gamme de produits Photonis

	PROXIMITY TUBES				INVERTER TUBES		
Family	XX1410 Gen.II +	XX1610 SuperGen [®]	XX1660 HP SuperGen [®]	XX1860 HyperGen [®]	XX1330	XX1380	XX2050
In/Out	18 mm				50 / 40	20 / 30	25 mm
SNR _{108μlx}	12	15.5	18	20	12	12	12
Σ_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[®], double proximity, 18 mm tube
with glass input and straight f.o. output

product specification

HyperGen[®], 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 μ A/lm
at 830 nm : min : 48 mA/W

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

Scr. luminance control level : min : 3 max : 7 cd/m^2

E.B.I. ② : max : 0.25 μ 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 μ 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

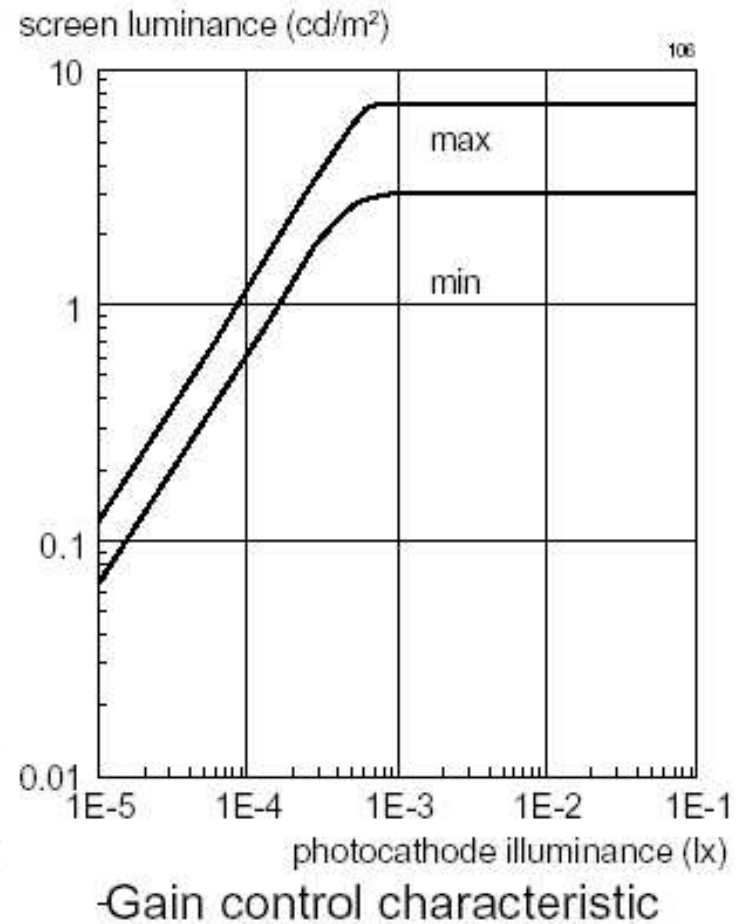
Operating supply voltage :	typ : 2.7	min : 2 V	max : 3.5 V
Limiting instant. supply voltage :	min : -3.7	max : 3.7 V	
Supply current at ambient temp.:		max : 18 mA	

Environmental characteristics

Spot photocathode illuminance ⑤ :	max :	5×10^4	lx
Mean time to failure ⑥ :	min :	10000	h
Force on bearing surface :	max :	200	N
Shock acceleration ⑦ :	max :	5000	m/s ²
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 mm² 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.

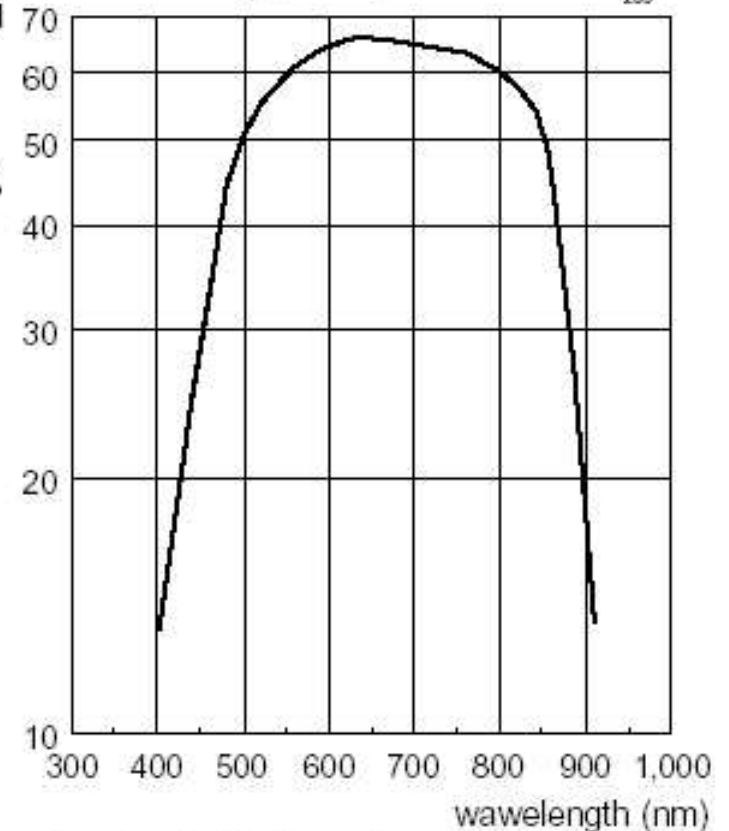
⑦ Six 2 ms half sine impacts parallel and perpendicular to the axis.

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.

radiant sensitivity (mA/W)

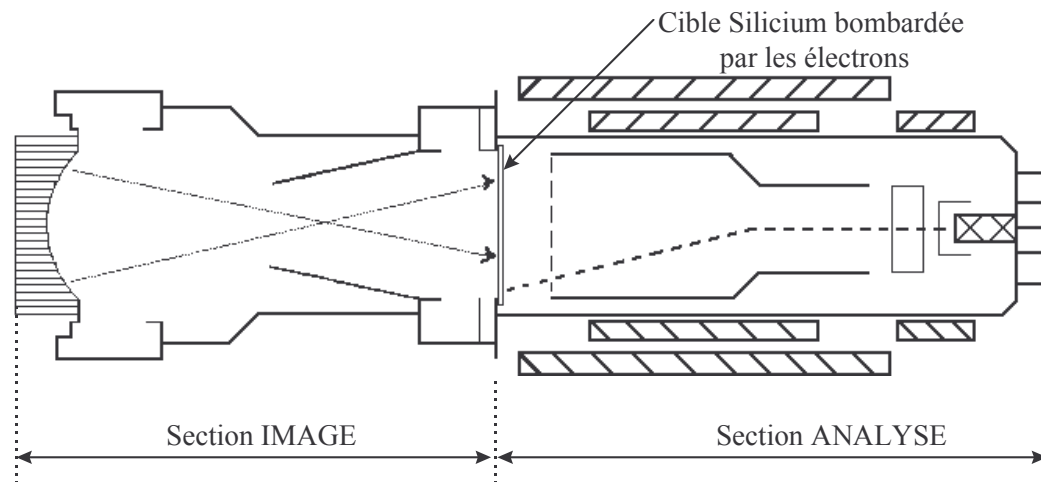
209



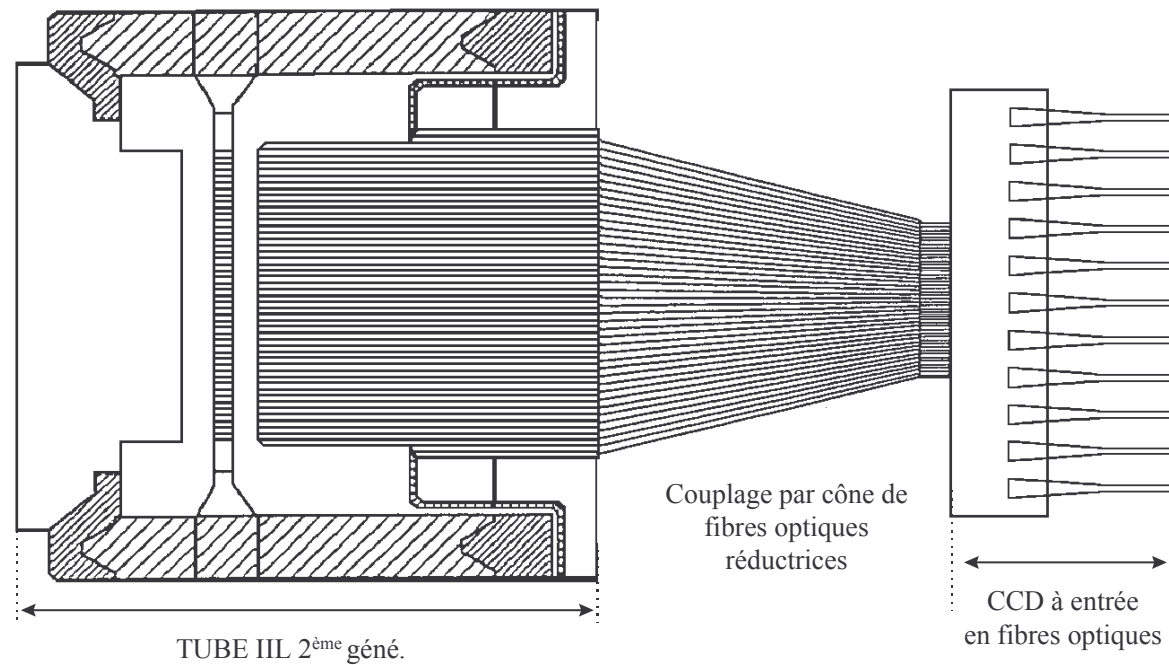
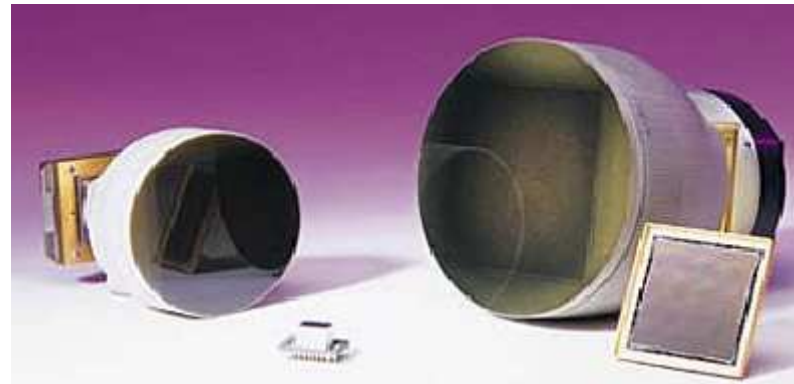
Typical photocathode sensitivity

Caméra intensifiée

Tube vidicon intensifié



CCD intensifié



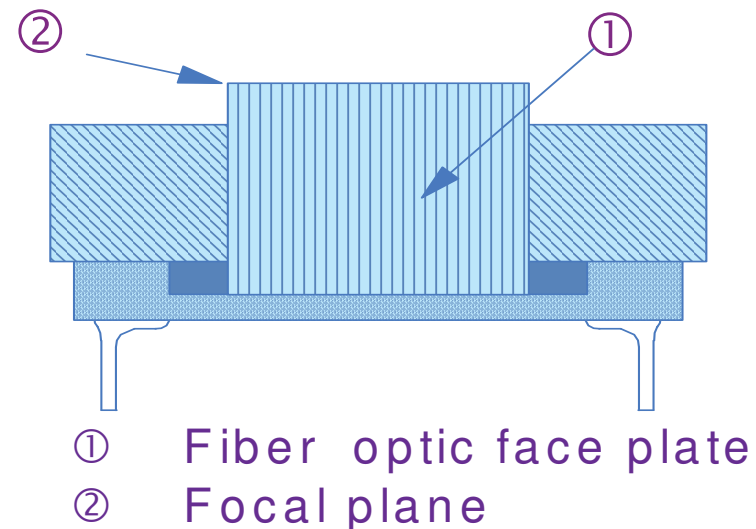
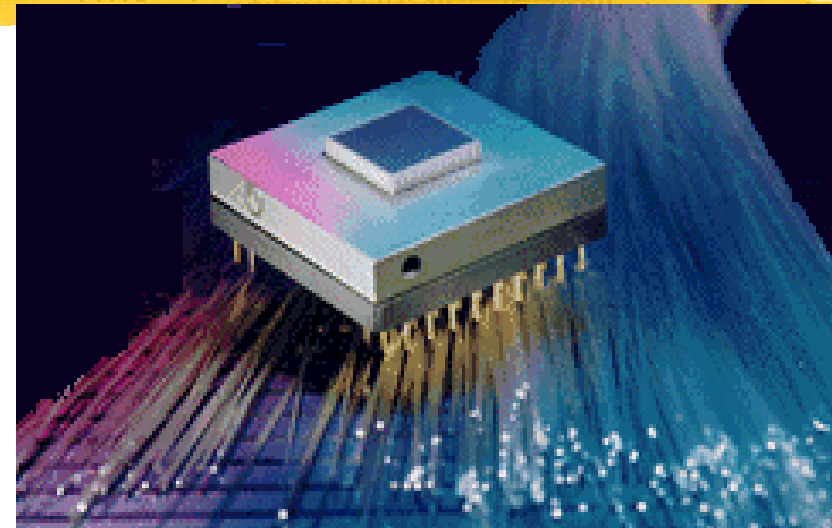
Couplage en sortie des tubes AREA ARRAYS WITH FIBER OPTIC FACE PLATE

⌘ APPLICATIONS

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

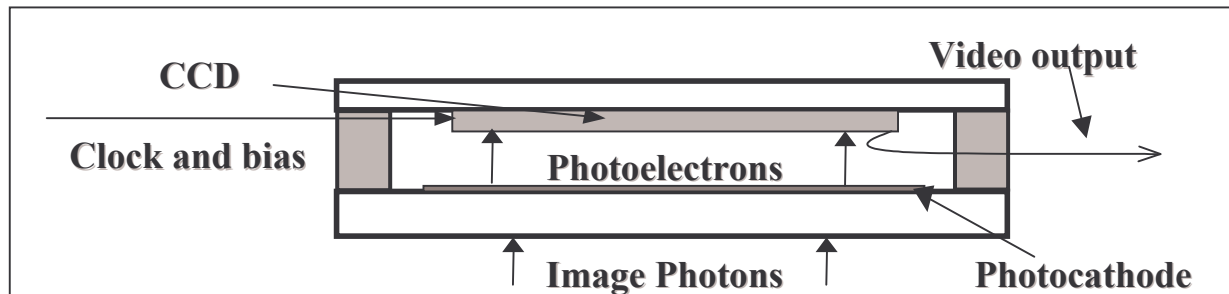
⌘ MAIN FEATURES

- ☒ 5 μm fibers with extra mural absorption
- ☒ 1/1 ratio or tapers (demagnifying fibers)
- ☒ Applicable to any TCS area array.



Les EBCCD

⌘ Advantage of EB-CCD Technology:

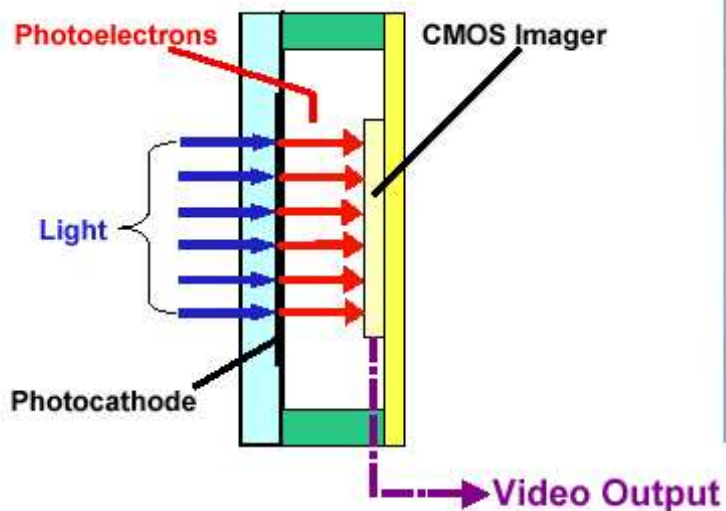


Allows a very high gain by multiplication of the electrons generated by the TEP photocathode

EBCMOS Intevac



Photon-Processor™ Extreme Low Light Level Digital Video Imager

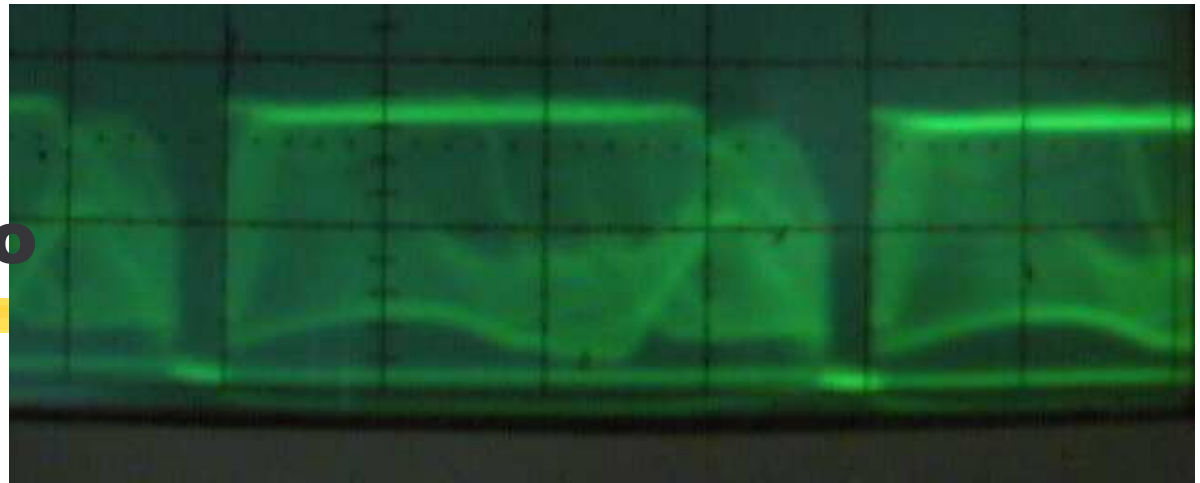


Photon-Processor™

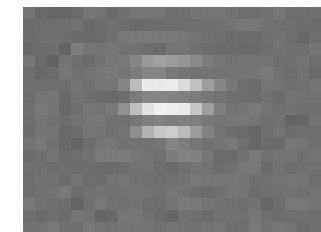
Uses Electron Bombardment Active Pixel Sensor (EBAPS™) Technology

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

3. Camera vidéo

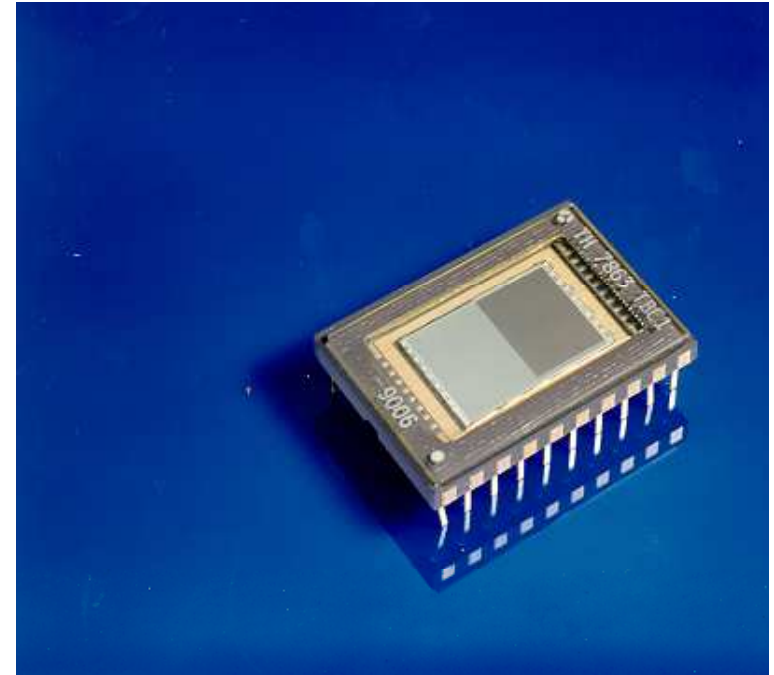


- CCIR
- Entrelacement 2:1 des lignes des demies trames impaires et paires à 50Hz, soit 25Hz pour une trame complète.



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

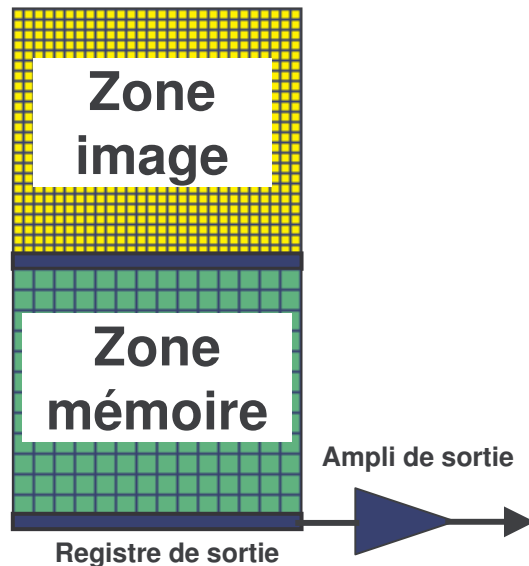


Electron Multiplied CCD

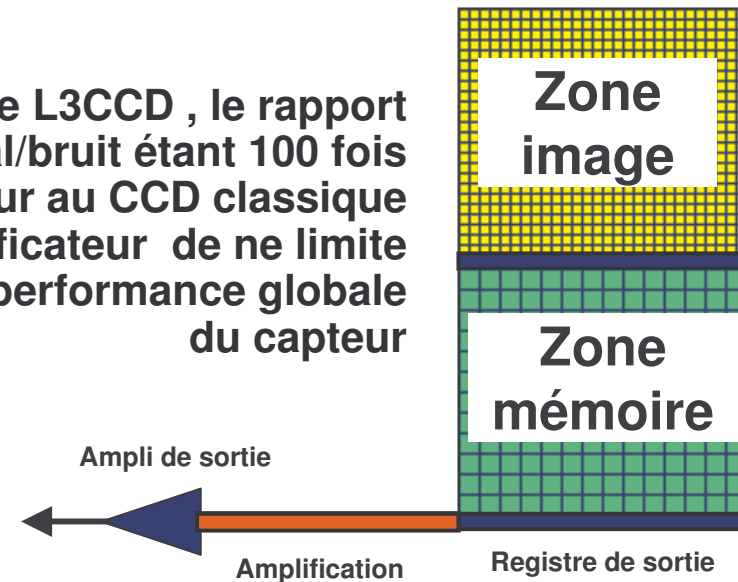


Comparaison entre les CCD et les L3CCD

CCD Classique



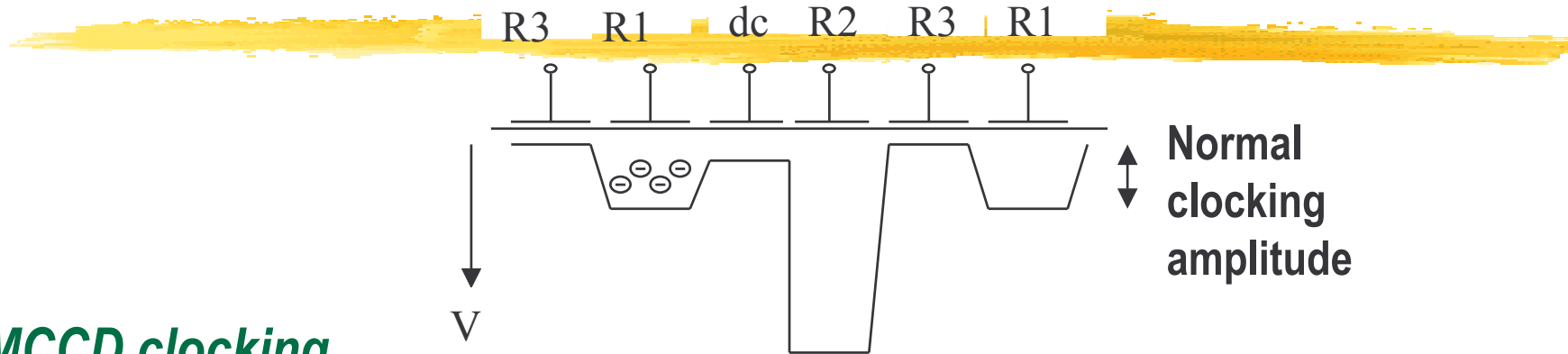
L3CCD



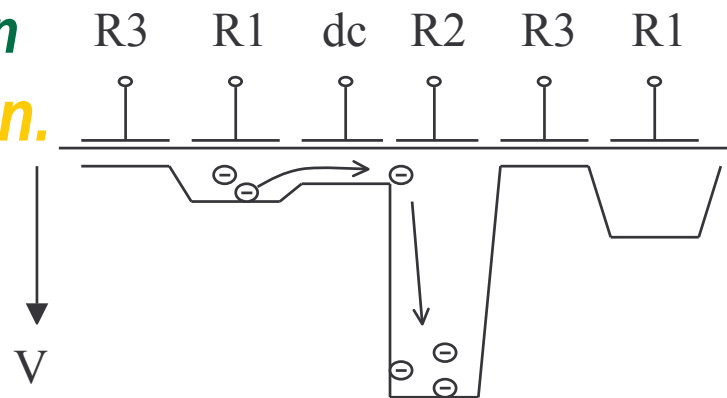
⌘ Pour le L3CCD , le rapport signal/bruit étant 100 fois supérieur au CCD classique l'amplificateur de ne limite pas la performance globale du capteur

⌘ 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

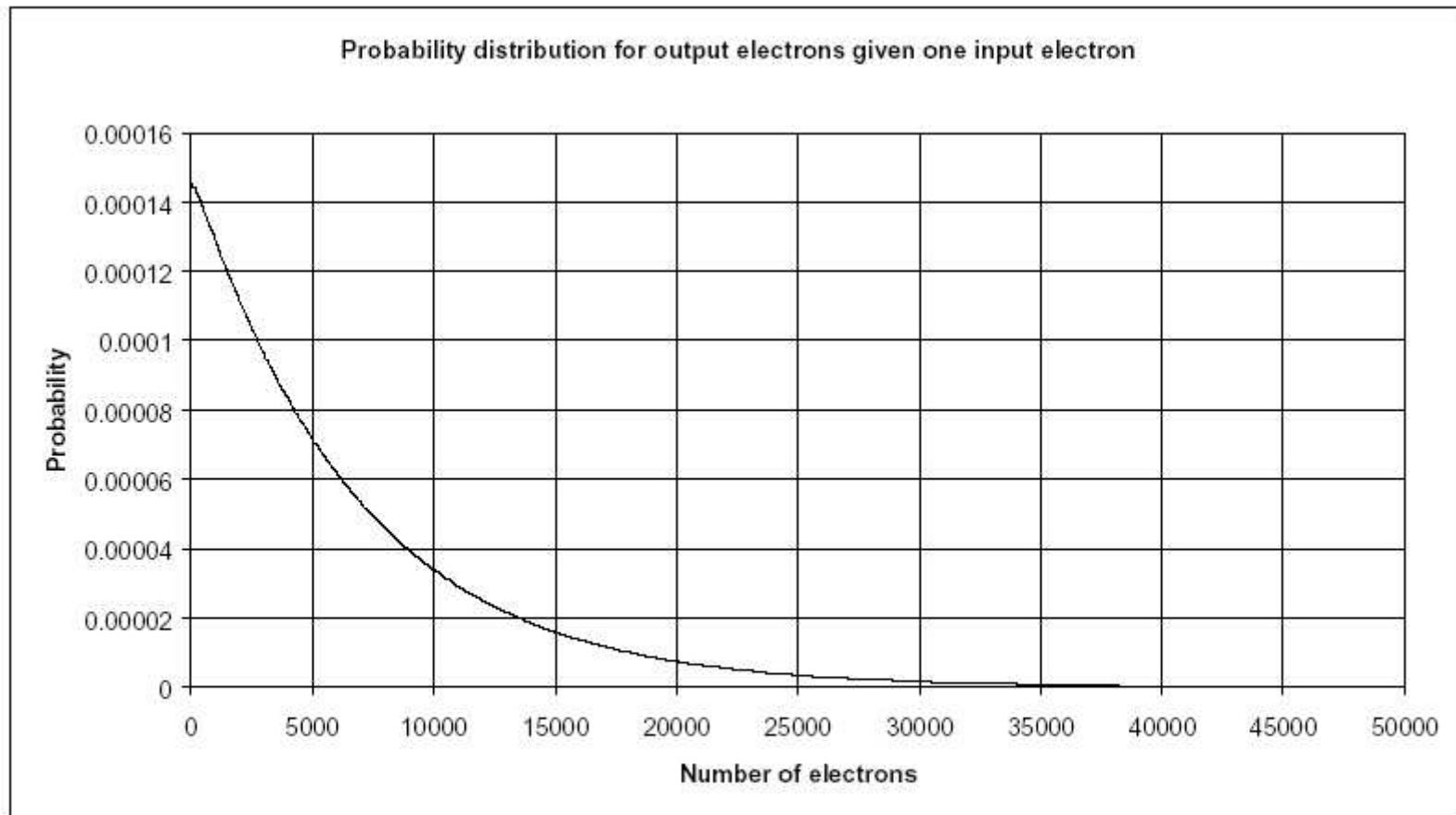
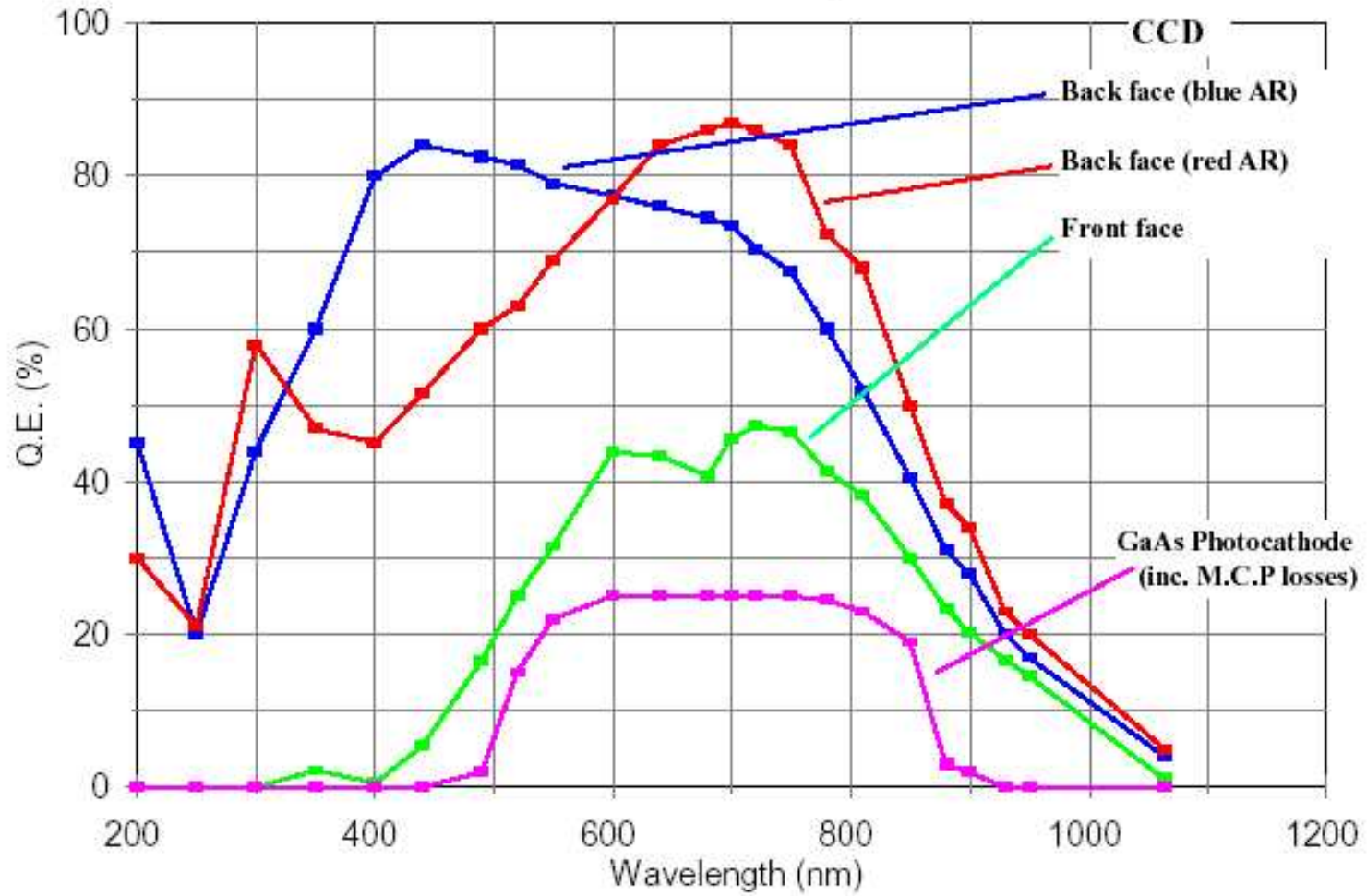
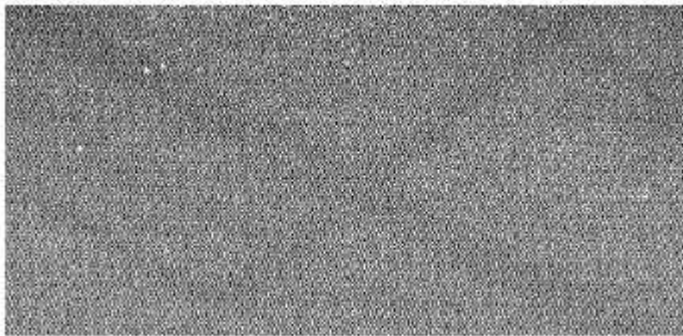
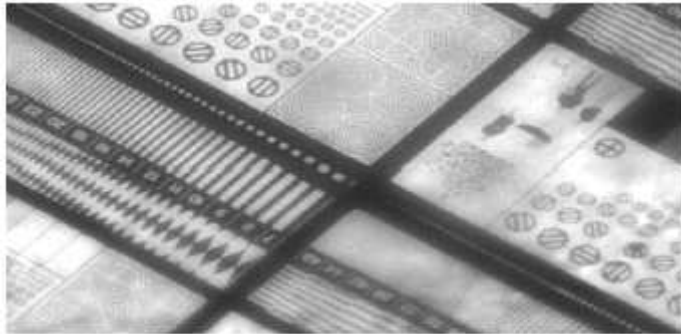


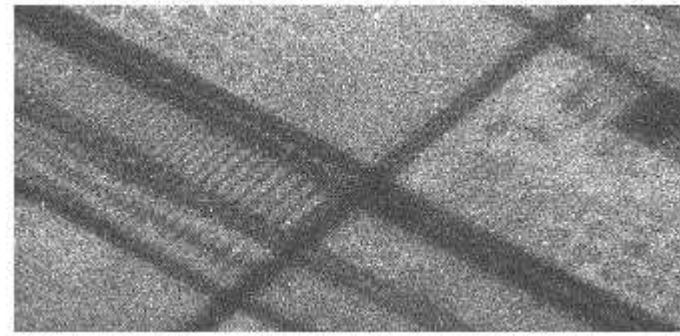
Figure 1: The probability distribution for the signal output from a multiplication register of 591 stages with a mean gain per stage of 1.015. The mean overall gain for the entire multiplication register is then 6670.

Quantum Efficiency



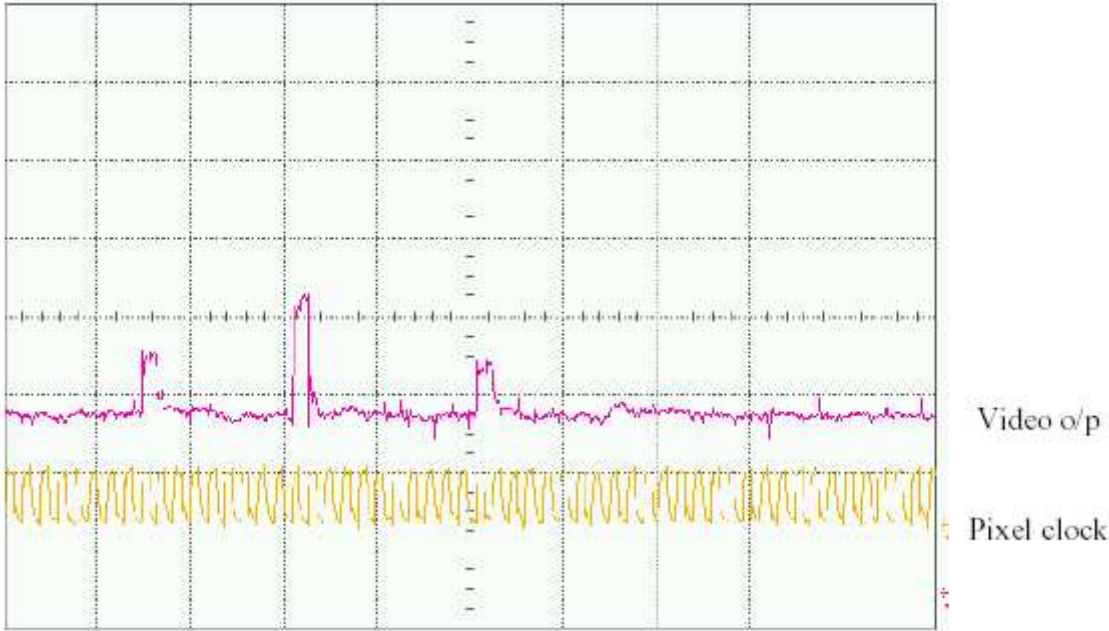


1,5 photons par pixel



20 photons par pixel

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)

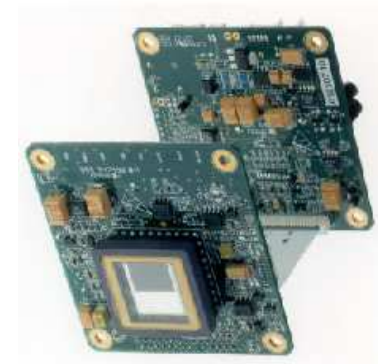
⌘ Texas Instruments

- ☒ 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 :

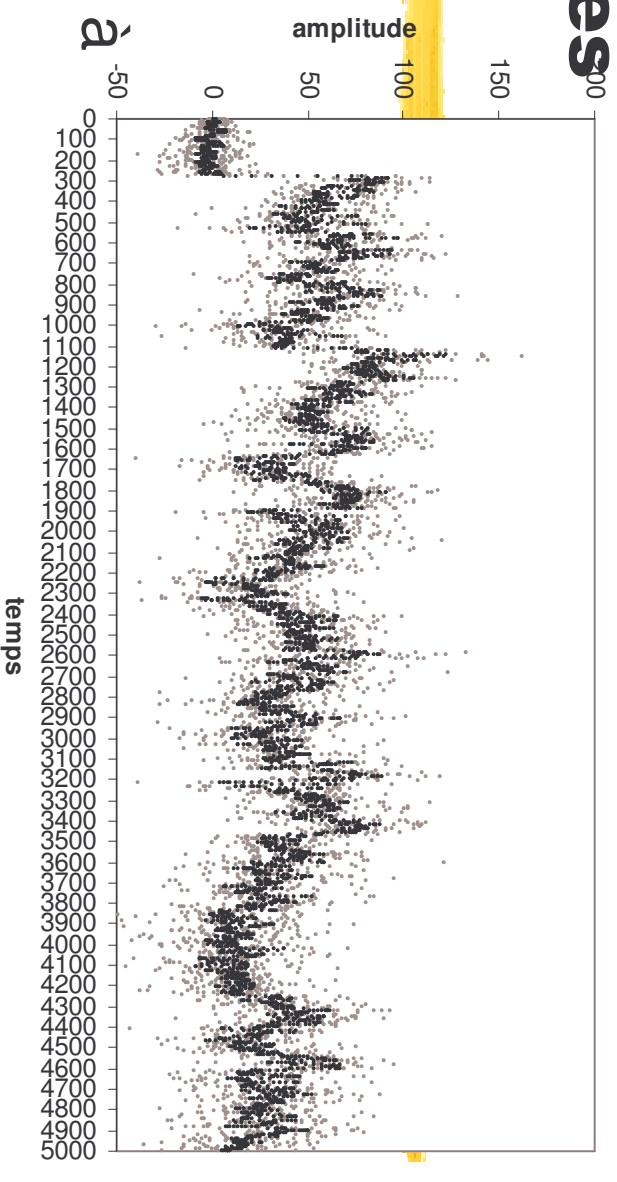


- ⊞ Domaine spectrale de 400 nm à 1 μm
- ⊞ Taille du détecteur : 576 x 288 pixels
- ⊞ Pixels : 20 μm x 30 μm
- ⊞ Temps d'intégration : 19ms
- ⊞ Vitesse de lecture ligne : 1420 l/s
- ⊞ Registre amplificateur de 591 cellules
- ⊞ Contrôle d'amplification manuel
- ⊞ Bruit de fond inférieur à 1 électron pour 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 0.01 mlux

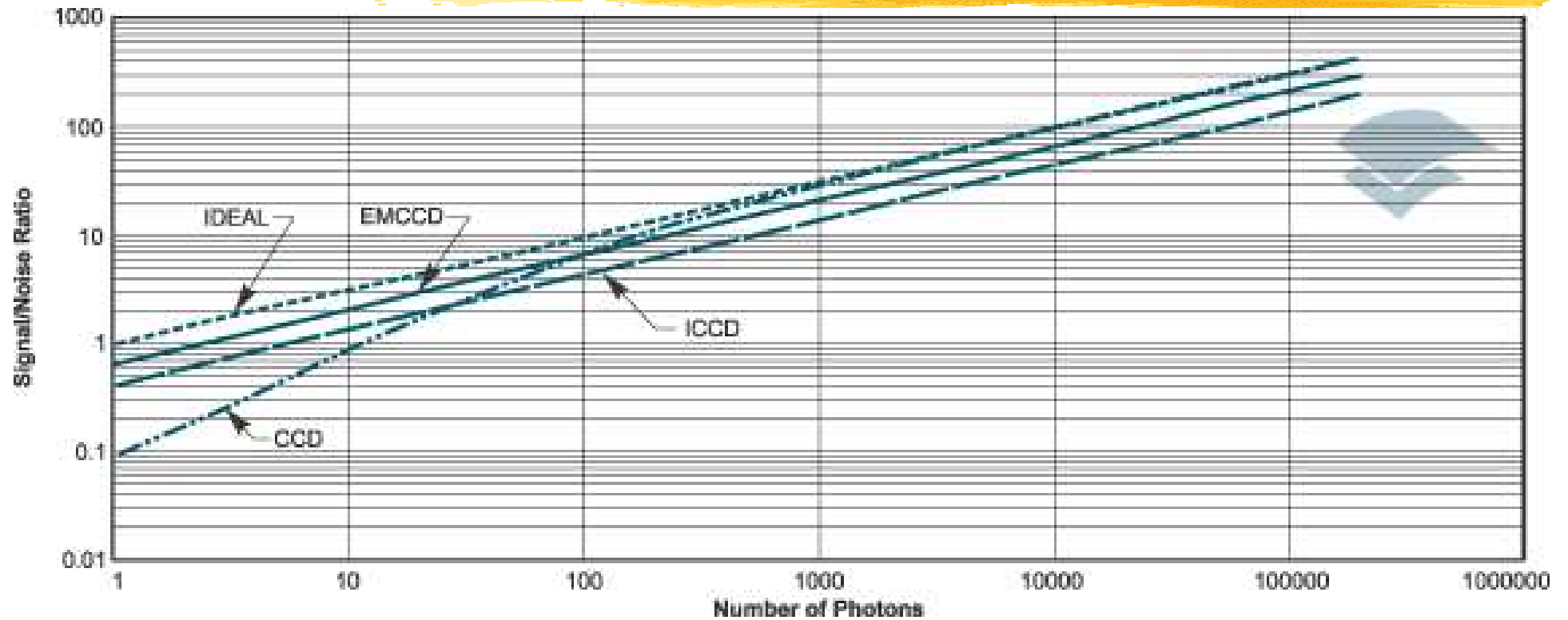


Comparaison CCD, EMCCD, ICCD



	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
- ⌘ ...



Andor Luca^{EM}



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