

Réunion CT2A

Retour d'expérience sur l'emploi des Intensificateurs d'Image en astronomie

Introduction

Thierry Midavaine

thierry.midavaine@saf-astronomie.fr

SAF

Session 2022-2023



Nos rendez-vous 2023 :

- 14 jan : réunion CT2A sur l'eVscope retour d'expériences
- fin janvier : Séminaire ARIEL IAP
- 1^{er} avril : réunion de la Commission des Etoiles Doubles
- 13 mai : réunion 2 CT2A Intensificateurs d'images et applications ProAm avec Jonathan Kobs

- 27 mai : Journée des Commissions de la SAF
- Date à déterminer : Atelier : Occultations Observatoire de Paris
- 1-3 juin : Atelier Fripon VigieCiel au MNHN et Obs de Paris
- 23-25 juin : Journées de la SF2A, Atelier Gemini Pro-Am & Ecole de Photometrie Observatoire de Strasbourg
- 25-26 novembre : Atelier 2 RAPAS dépouillement photométrique et volet spectro

- 2nd semestre 2023 : Réunion CT2A : choisir son instrument, lunettes astronomiques, télescopes

Cours de photométrie sur la magnitude des étoiles et la recherche des photons perdus !

Cycle2

- 29 septembre : histoire des technologies de détection, les 4 détecteurs
- **10 novembre : les photocathodes et les intensificateurs d'images**
- 1^{er} décembre : les CCD Full Frame, Frame Transfert, Interlignes
- 19 janvier : les capteurs CMOS et sCMOS 3T, 4T, 5T,...
- 2 février : Adaptation du capteur à l'instrument et au ciel
- 16 mars : Bilan radiométrique de son instrument et capteur
- 30 mars : Transmissions, réflexions des optiques, miroirs et filtres
- 11 mai : Les technologies Infrarouges et le JWST

En 2023 - 2024 Reprise du cycle 1 et des développements sur des projets.

prochaine réunion CT2A le samedi 13 mai après-midi sur les retours d'expériences sur l'emploi des intensificateurs d'images.

[Retour d'Expérience sur l'emploi des Intensificateurs d'Images | Gemini \(proam-gemini.fr\)](https://proam-gemini.fr)

Le déroulé de la réunion sera le suivant :

14h30 Thierry Midavaine Introduction et Histoire des Intensificateurs d'Images et quelques données de photométrie

15h00 Cyrille Thieullet : retour d'expérience sur l'utilisation de l'OVNI sur Dobson de 600 et le clavius480

15h30 Laurent Bourasseau : retour d'expérience sur l'utilisation de l'OVNI à Saint Veran

16h00 Thierry Legault retour d'expérience complémentaire

16h30 Jonathan Kobs : historique de la société [OVNI Night Vision](https://ovni-night-vision.com) et présentation de la technologie/matériel et les résultats obtenus (en observation visuelle, astrophoto et recherche astronomique).

17h15 Questions et Débats, Actions

18h00 Fin

La réunion se tiendra à l'Observatoire de Paris 77 avenue Denfert Rochereau, en salle Danjon et sera retransmise sur Zoom à 14h30, dont voici le lien d'inscription.

vous êtes invité à une réunion Zoom.

Quand : 13 mai 2023 14:30 Paris

https://us02web.zoom.us/meeting/register/tZlvcOytqzMjHdfwXgHFiwoaqTQX28Ays2_e

1. Introduction, le besoin

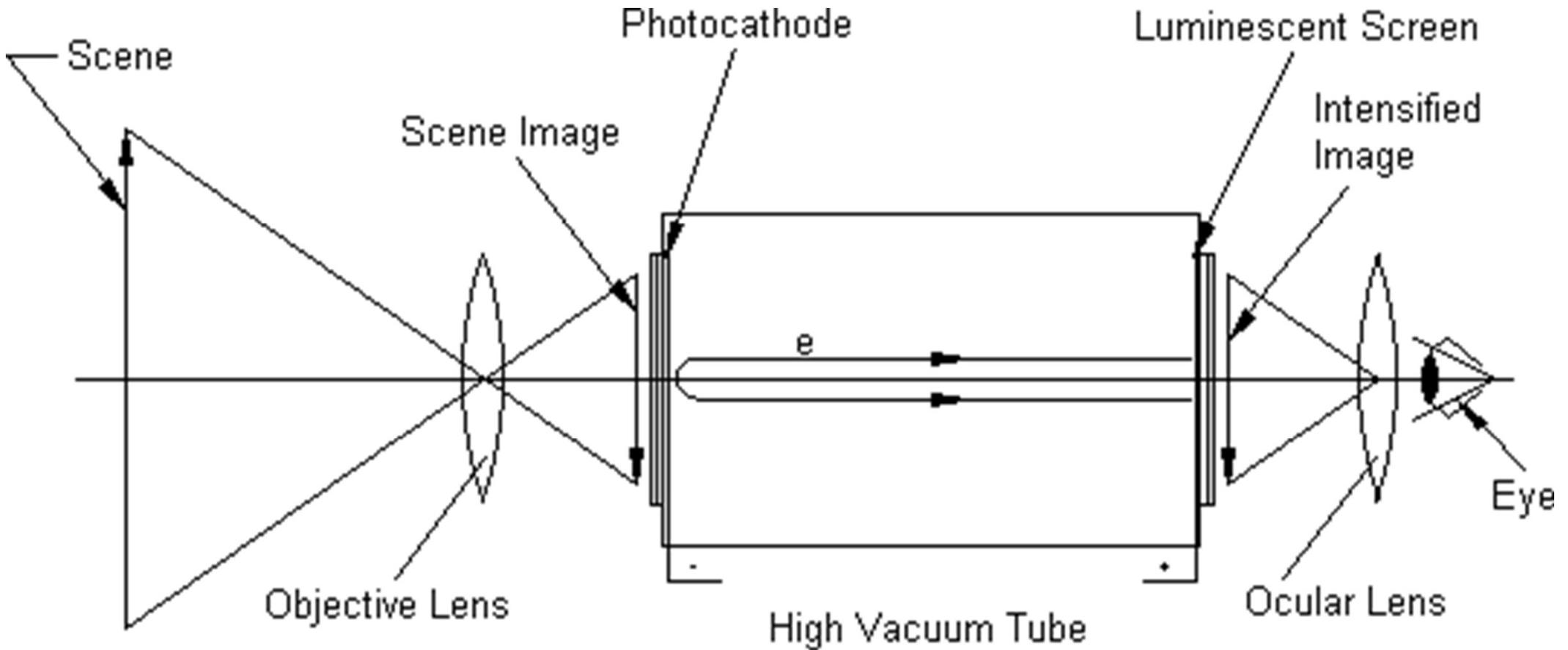
- Combler le déficit de vision de nuit des êtres humains
- Assurer une mission de nuit :
- Atteindre une portée qui est une fonction :
 - des conditions d'éclairement
 - des signatures des cibles et des fonds
 - des conditions de propagations
- Atteindre les limites de détection
 - en comptage de photons,
 - en résolution spatiale
 - et en résolution temporelle

Remerciements

- DGA/DE/CEAT
- Hamamatsu
- Harder Digital
- Intevac
- ISL
- ITT
- Litton
- Obzerv
- Newcon
- Photonic Sciences
- Photonis
- Proxitronics
- Thales Angénieux
- Thales Optronique



Le principe de la jumelle à intensification de lumière



Les avantages de la vision bas niveau de lumière par intensification de lumière



Image BNL IL



Image IR thermique

- Vision dans le spectre visible ou proche IR
 - Perception naturelle
 - Contraste des réflexions des objets de la scène comme de jour
 - Reconnaissance des visages
 - Vision à travers le verre
- Équipements les moins onéreux en acquisition et coût de possession. Technologies IL et optique en verre.
- Très faible latence et faibles masses, volumes et consommations difficiles à battre pour des équipements de vision nocturne.

2. Les composants constituants et les types de tubes

2.1 Les photocathodes

2.2 L'amplificateur

2.3 L'écran

2.4 L'alimentation

De base le tube intensificateur d'image est conçu pour être couplé à l'œil.

Les besoins en vidéo numérique ont conduit à développer les ICCD avec un couplage du tube à une matrice CCD ou à réaliser des ICMOS avec un couplage à une matrice CMOS.

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

Les photocathodes



CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES																	
1 1,00794 H Hydrogène	2 4,0026 He Hélium																
3 6,941 Li Lithium	4 9,01218 Be Béryllium																
11 22,9898 Na Sodium	12 24,305 Mg Magnésium																
19 39,0983 K Potassium	20 40,078 Ca Calcium																
37 85,4678 Rb Rubidium	38 87,62 Sr Strontium																
55 132,905 Cs Césium	56 137,327 Ba Baryum																
87 (223) Fr Francium	88 (226) Ra Radium																
		13 10,811 B Bore	14 12,0107 C Carbone	15 14,0067 N Azote	16 15,9994 O Oxygène	17 18,9984 F Fluor	18 20,1797 Ne Neon										
		31 26,9815 Al Aluminium	32 28,0855 Si Silicium	33 30,9738 P Phosphore	34 32,065 S Soufre	35 35,453 Cl Chlore	36 39,948 Ar Argon										
		49 114,818 In Indium	50 118,71 Sn Étain	51 121,76 Sb Antimoine	52 127,6 Te Tellure	53 126,905 I Iode	54 131,293 Xe Xénon										
		81 204,383 Tl Thallium	82 207,2 Pb Plomb	83 208,98 Bi Bismuth	84 (209) Po Polonium	85 (210) At Astate	86 (222) Rn Radon										
		104 (266) Rf Rutherfordium	105 (268) Db Dubnium	106 (269) Sg Seaborgium	107 (270) Bh Bohrium	108 (269) Hs Hassium	109 (278) Mt Meitnerium	110 (279) Ds Darmstadtium	111 (281) Rg Roentgenium	112 (285) Cn Copernicium	113 (284) Uut Ununtrium	114 (289) Fl Flerovium	115 (288) Uup Ununpentium	116 (293) Lv Livermorium	117 (294) Uus Ununseptium	118 (294) Uuo Ununoctium	
		57 138,906 La Lanthane	58 140,116 Ce Cérium	59 140,908 Pr Praseodyme	60 144,242 Nd Néodyme	61 (145) Pm Prométhium	62 150,36 Sm Samarium	63 151,964 Eu Europium	64 157,25 Gd Gadolinium	65 158,925 Tb Terbium	66 162,5 Dy Dysprosium	67 164,930 Ho Holmium	68 167,259 Er Erbium	69 168,934 Tm Thulium	70 173,054 Yb Ytterbium	71 174,967 Lu Lutécium	
		89 (227) Ac Actinium	90 232,038 Th Thorium	91 231,036 Pa Protactinium	92 238,029 U Uranium	93 (237) Np Neptunium	94 (244) Pu Plutonium	95 (243) Am Americium	96 (247) Cm Curium	97 (247) Bk Berkélium	98 (251) Cf Californium	99 (252) Es Einsteinium	100 (257) Fm Fermium	101 (258) Md Mendelevium	102 (259) No Nobelium	103 (262) Lr Lawrencium	

Effet photo électrique externe ou effet photoémissif expliqué en 1905 qui donnera le premier prix Nobel à Albert Einstein

L'énergie du Photon absorbée par la photocathode libère et éjecte un électron si l'énergie du photon est suffisante. Elle est constituée par un matériau donneur d'électrons libérés par l'absorption de lumière et constitue un traitement de surface sur un substrat en verre.

Alliages à base de matériaux Alcalins Na, K, Rb, Cs

Semiconducteur AsGa, ou encore jonction polarisée entre 2 matériaux

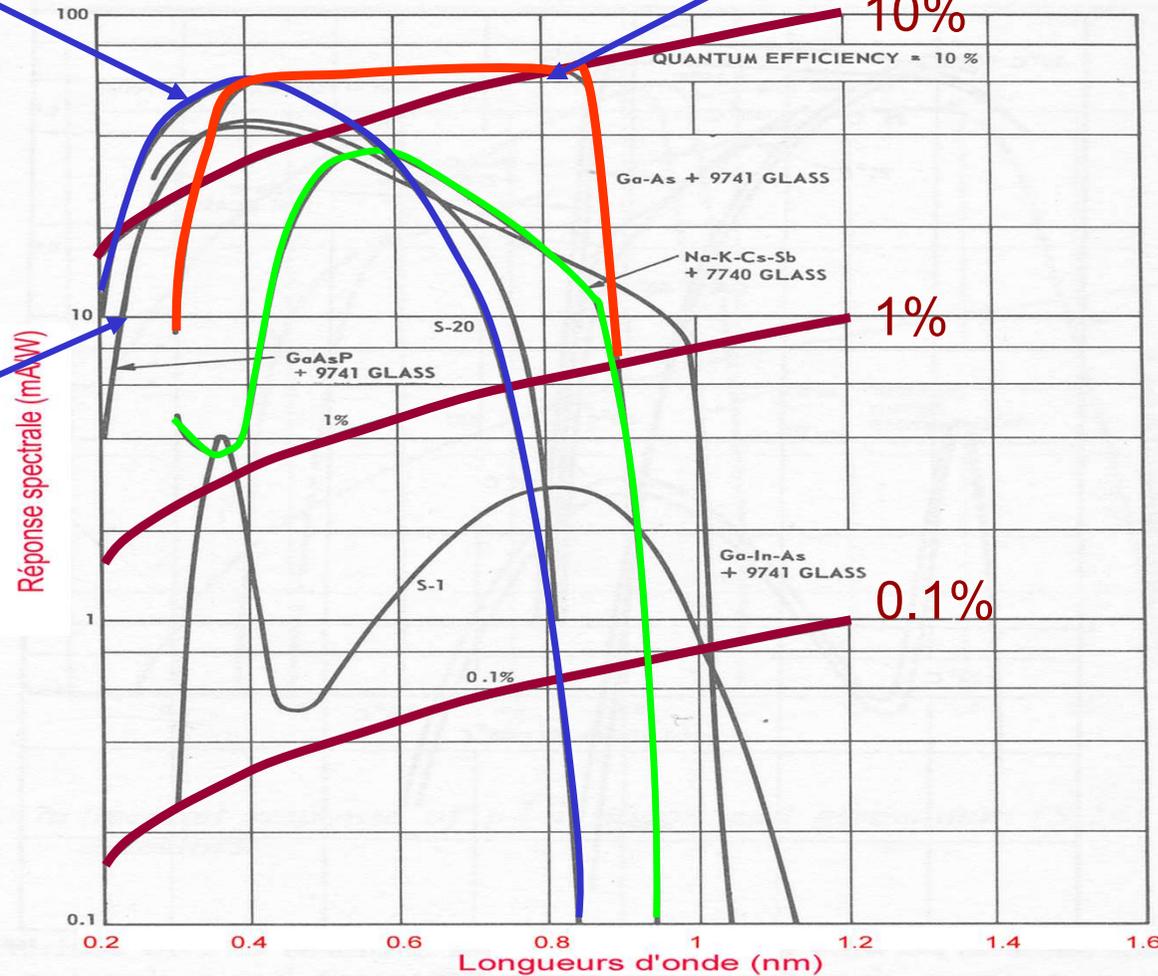
Les photocathodes

1^{ère} génération
Cascade de 3 tubes

3^{ème} génération (AsGa)

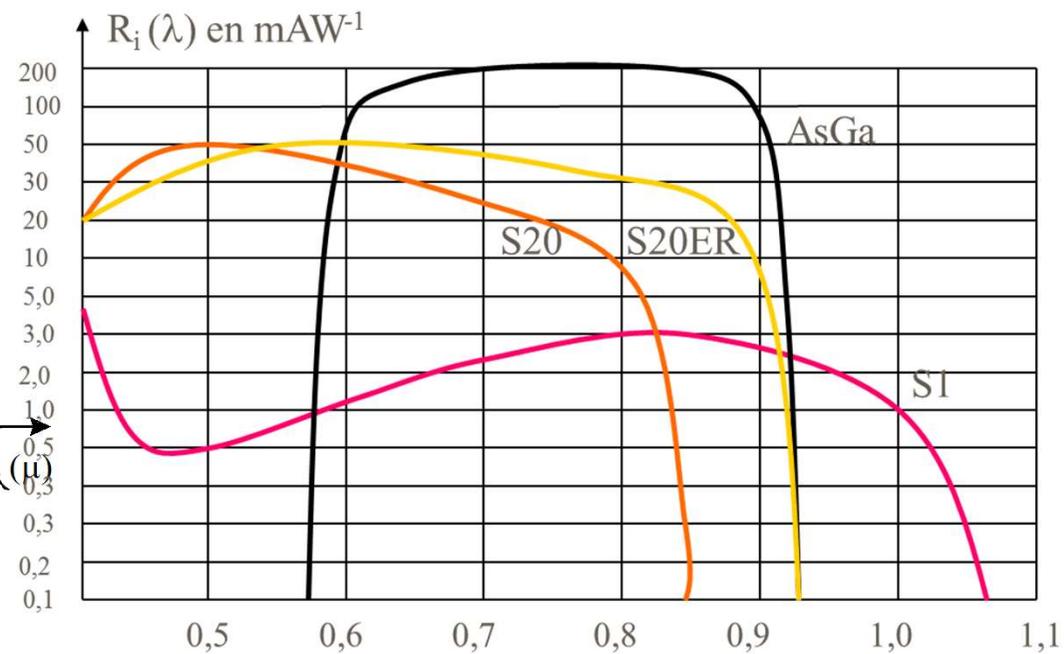
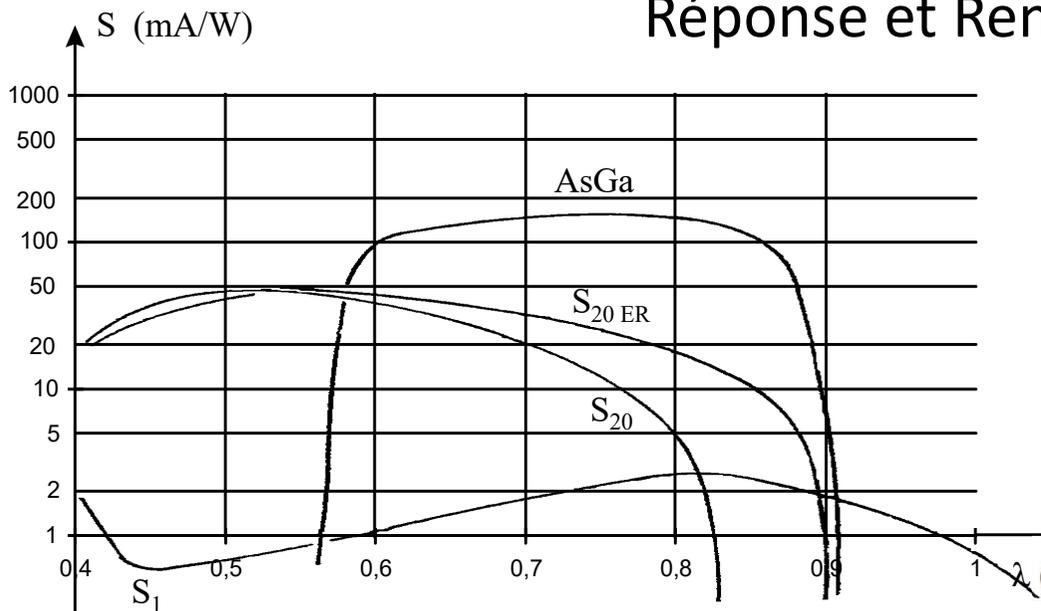
Efficacité quantique :
10%

2^{ème} génération



Réponses spectrales

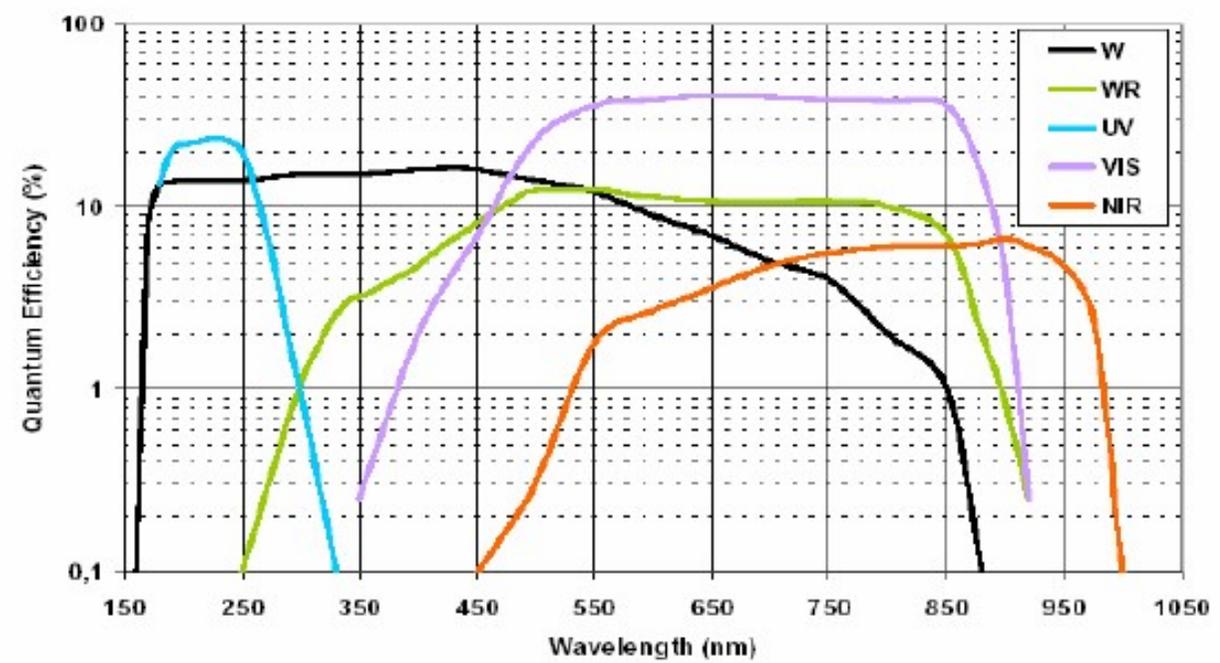
Réponse et Rendement Quantique des photocathodes



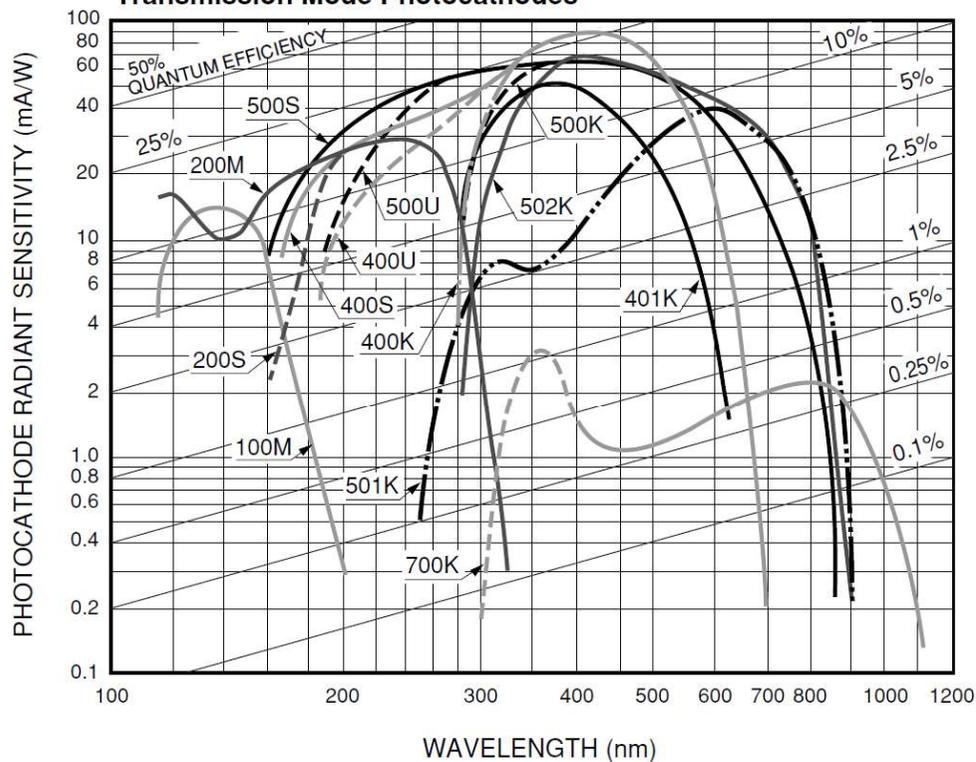
Photocathode Type Spectral Response *tendue rouge*)

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



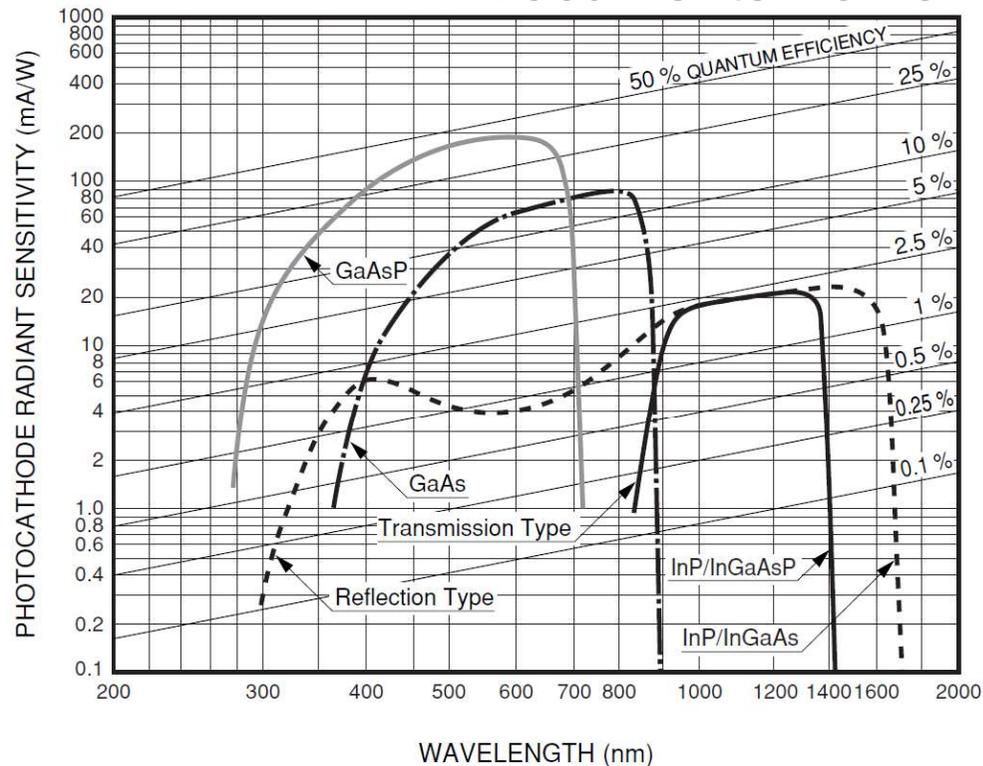
Transmission Mode Photocathodes



THBV3_0402Eb

Figure 4-2 (b): Typical spectral response characteristics of transmission mode photocathodes

Documents Hamamat



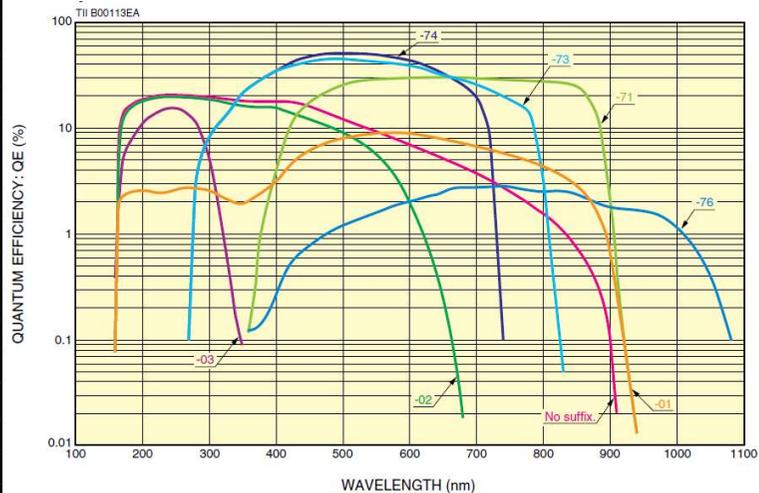
THBV3_0403EA

Figure 4-3: Typical spectral response characteristics of semiconductor crystal photocathodes

Transmission mode photocathodes

Curve Code (S number)	Photocathode Material	Window Material	Luminous Sensitivity (Typ.) (μA/lm)	Spectral Response				
				Spectral Range (nm)	Peak Wavelength			
					Radiant Sensitivity (mA/W)	(nm)	Quantum Efficiency (%)	(nm)
150M	Cs-I	MgF ₂	—	115 to 200	25.5	135	26	125
250S	Cs-Te	Quartz	—	160 to 320	62	240	37	210
250M	Cs-Te	MgF ₂	—	115 to 320	63	220	35	220
350K (S-4)	Sb-Cs	Borosilicate	40	300 to 650	48	400	15	350
350U (S-5)	Sb-Cs	UV	40	185 to 650	48	340	20	280
351U (Extd S-5)	Sb-Cs	UV	70	185 to 750	70	410	25	280
452U	Bialkali	UV	120	185 to 750	90	420	30	260
456U	Low dark bialkali	UV	60	185 to 680	60	400	19	300
552U	Multialkali	UV	200	185 to 900	68	400	26	260
555U	Multialkali	UV	525	185 to 900	90	450	30	260
650U	GaAs(Cs)	UV	550	185 to 930	62	300 to 800	23	300
650S	GaAs(Cs)	Quartz	550	160 to 930	62	300 to 800	23	300
851K	InGaAs(Cs)	Borosilicate	150	300 to 1040	50	400	16	370
—	InP/InGaAsP(Cs)	Borosilicate	—	300 to 1400	10	1250	1.0	1000 to 1200
—	InP/InGaAs(Cs)	Borosilicate	—	300 to 1700	10	1550	1.0	1000 to 1200

Table 4-1: Quick reference for typical spectral response characteristics (1)

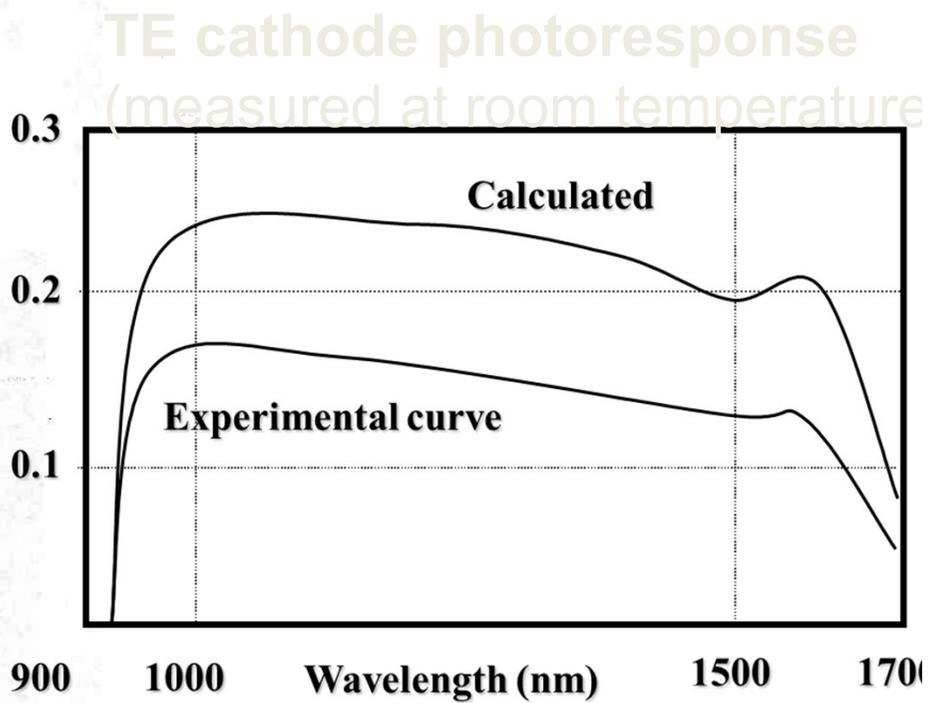
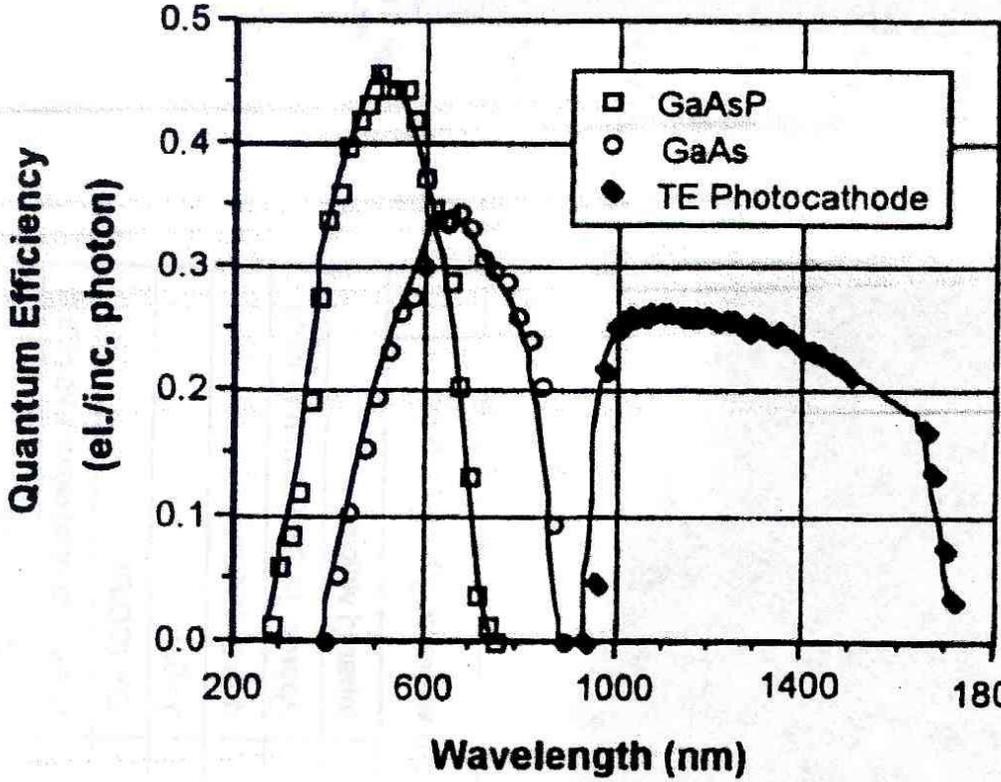


Suffix	Photo Cathode	Input Window
-71	GaAs	Borosilicate Glas
-73	Extended Red GaAsP	Borosilicate Glas
-74	GaAsP	Borosilicate Glas
-76	InGaAs	Borosilicate Glas
Non	Multialkali	Synthetic Silica
-01	Extended Red Multialkali	Synthetic Silica
-02	Bialkali	Synthetic Silica
-03	Cs-Te	Synthetic Silica

The sensitivity at short wavelengths change with typical transmittance of window materials. Please refer to figure 4 (P6).

NOTE: For Gen II, gate operation types may have slightly lower sensitivity in the ultraviolet region.

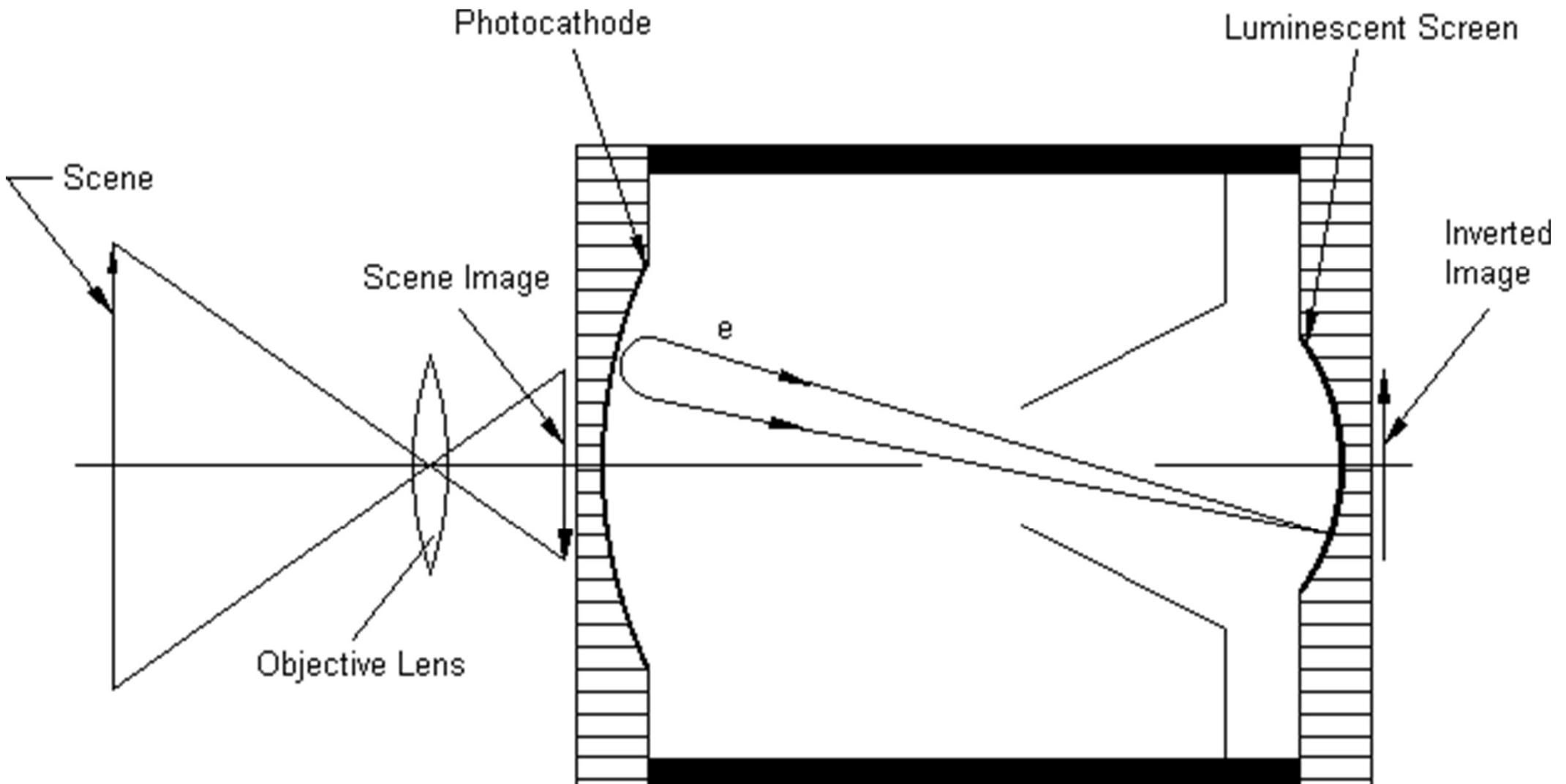
Rendement quantique des photocathodes SWIR



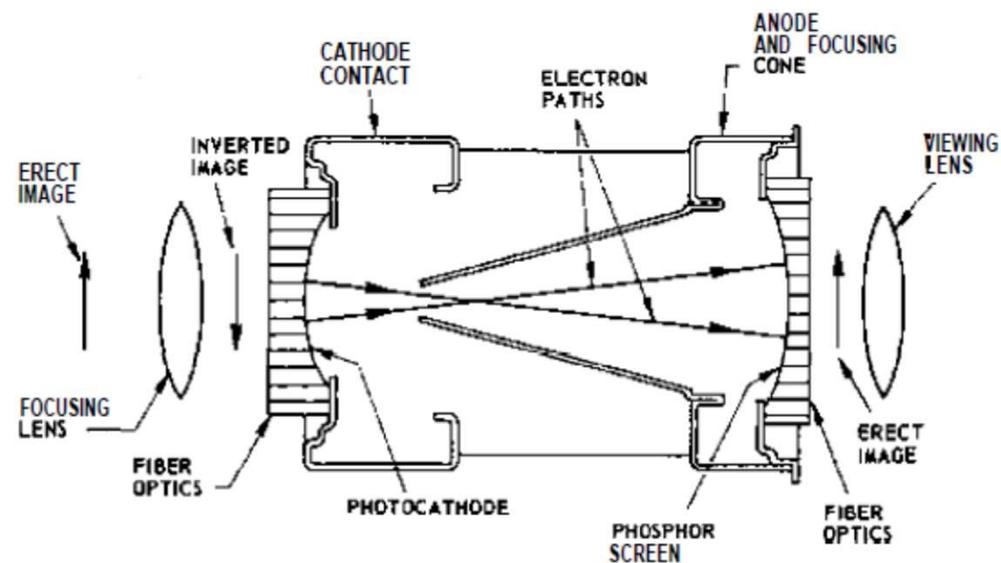
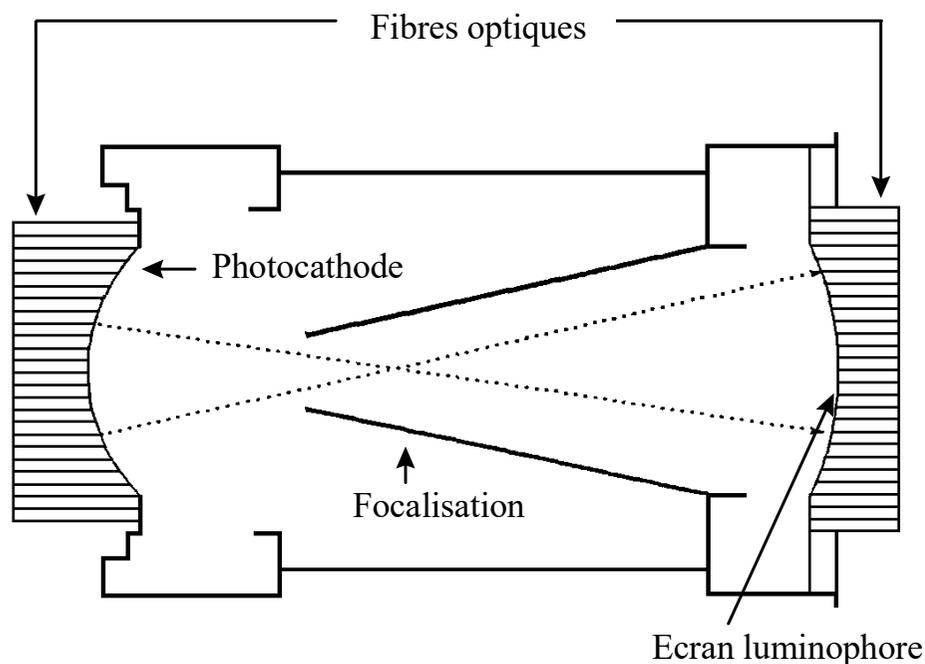
GaAs, GaAsP, and TE PHOTOCATHODE TYPICAL SPECTRAL RESPONSE

Documents Intevac

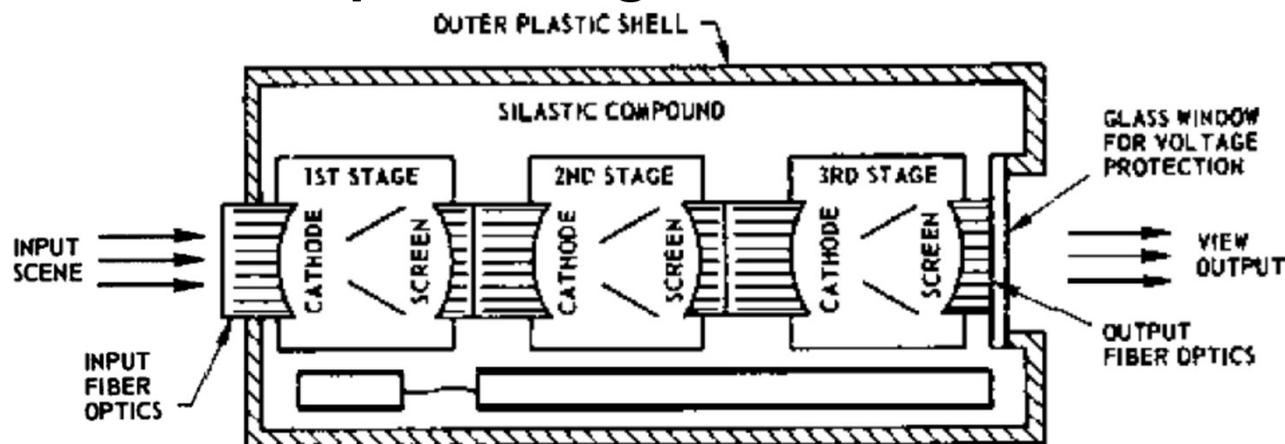
2.2 Amplification par accélération des photoélectrons



Les intensificateurs d'images de 1ere gen

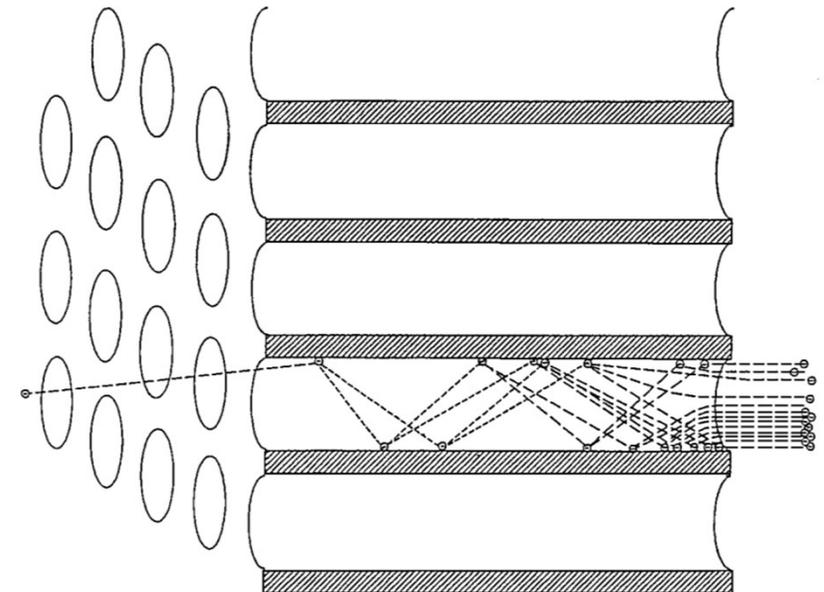
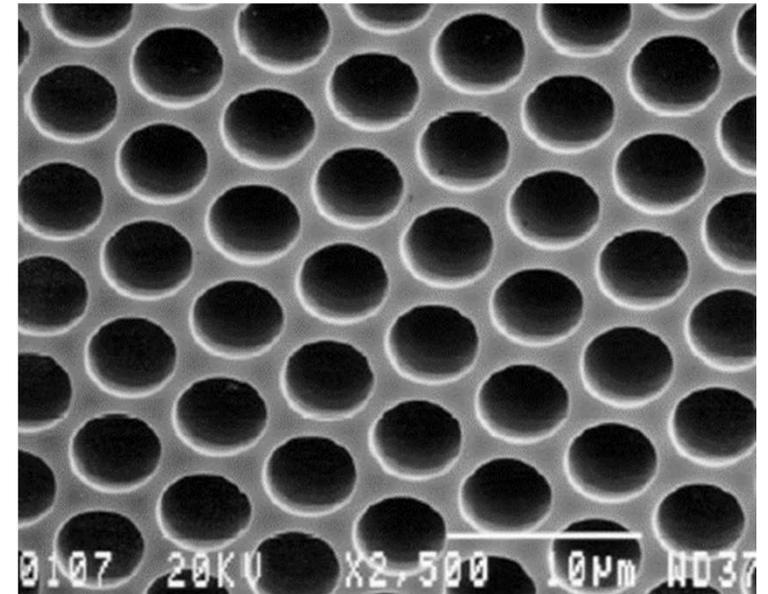
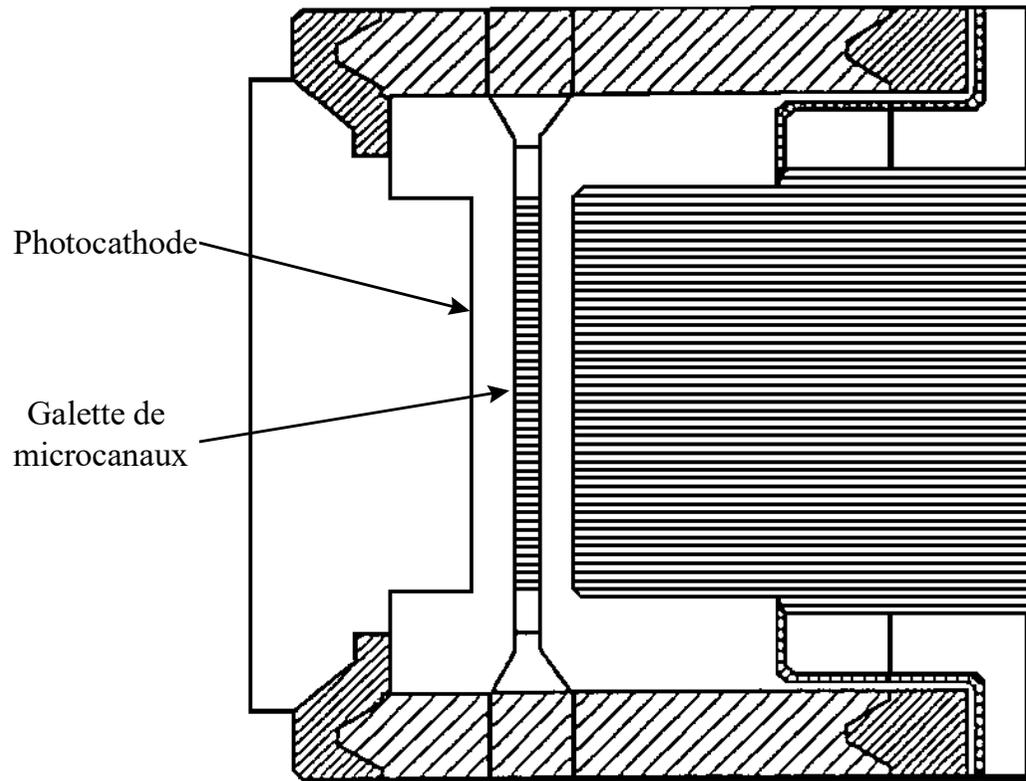


- **Les tubes Intensificateurs de première génération**



Le tube à trois étage

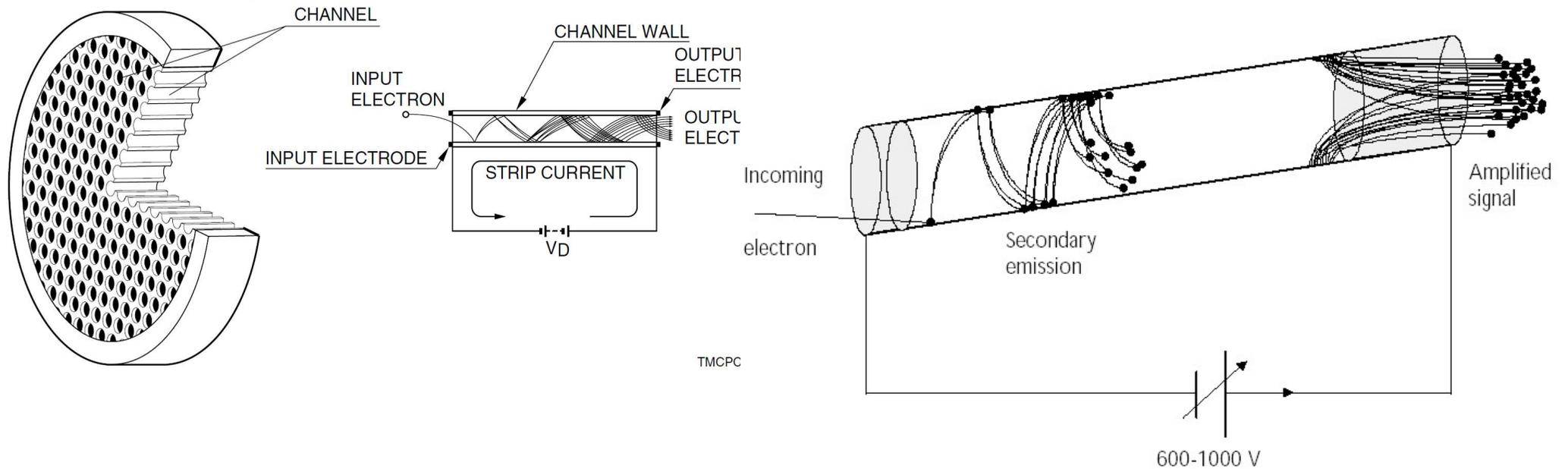
2eme gen : les tubes à double focalisation de proximité



- **Les tubes Intensificateurs de deuxième génération**

Gain de la galette de micro canaux

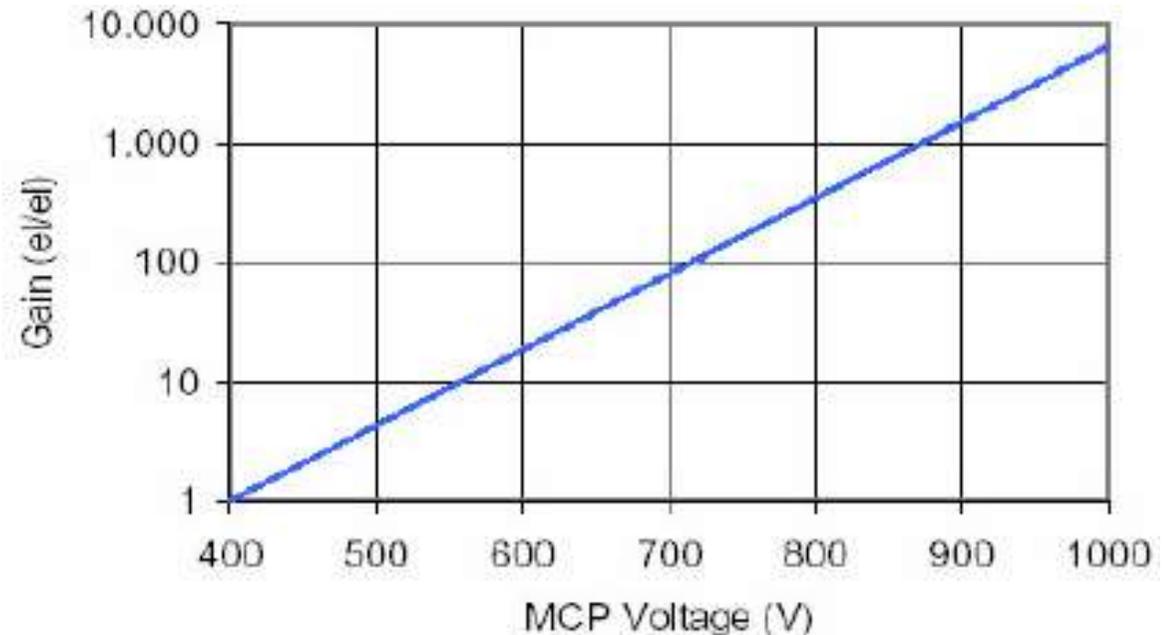
MCP Structure and Operation



Multiplication des électrons par le bombardement électronique et émission secondaire d'un matériau résistif : du verre.

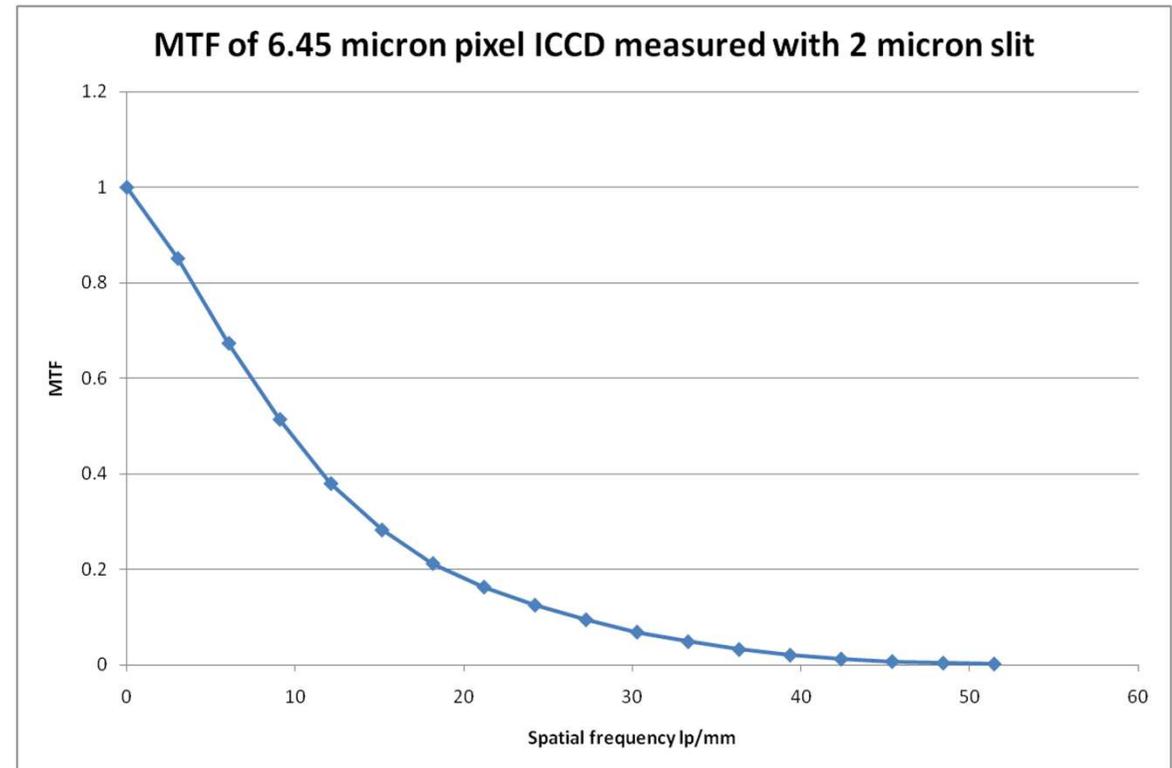
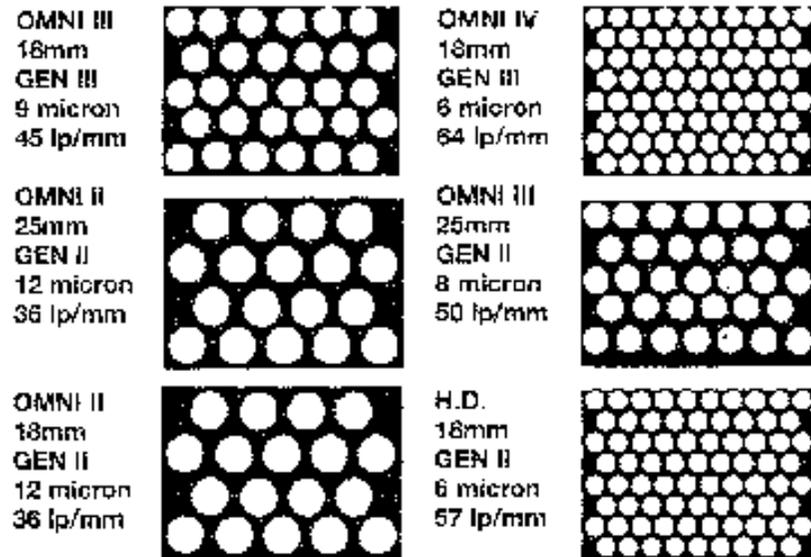
La Galette est caractérisée par :

- son épaisseur,
- le diamètre des canaux
- et le pas des canaux



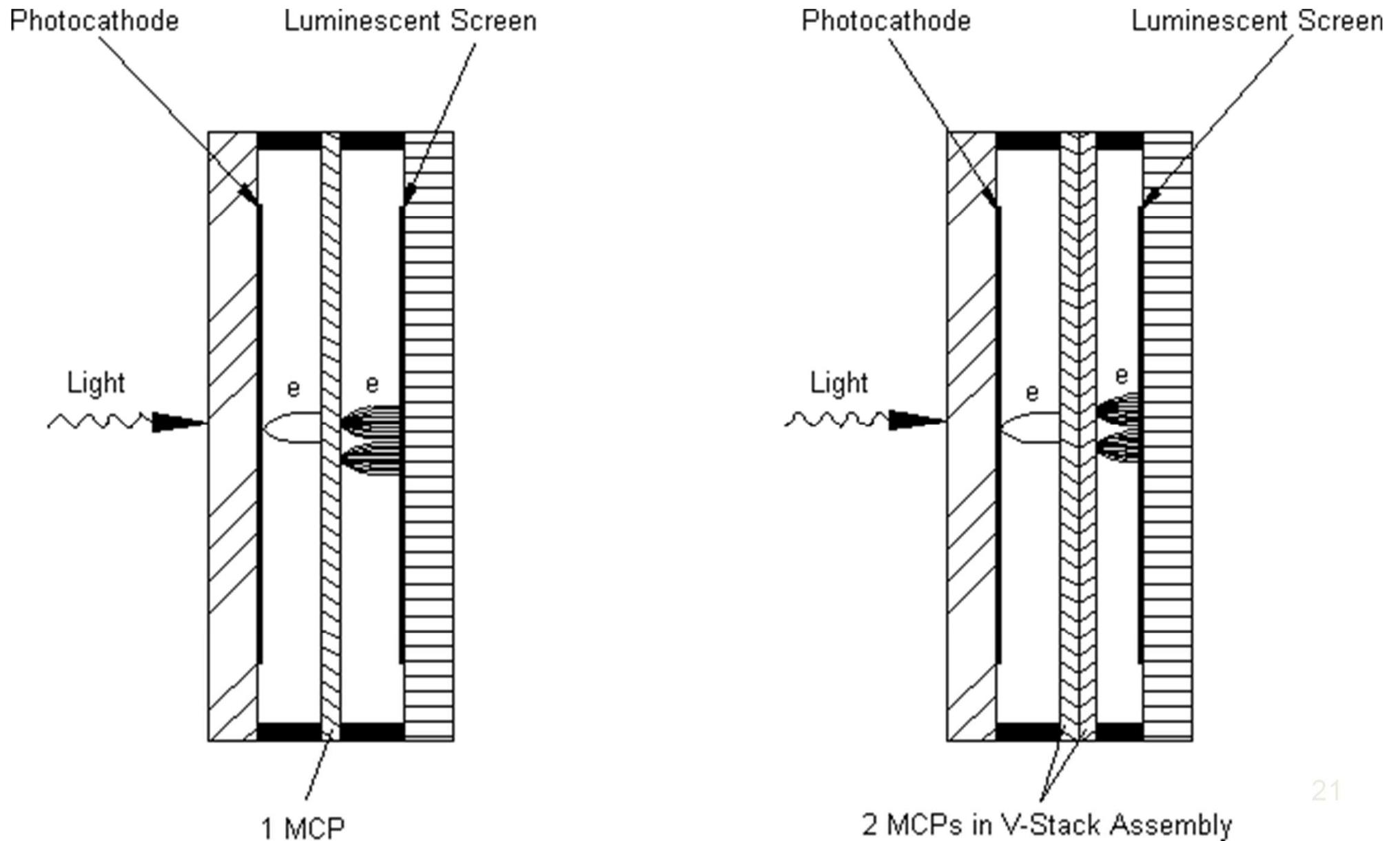
Résolution et diamètre des MCP

Improved Micro-Channel Plate Pore Size



- 30 ans de progrès sur les micro-canaux
- Canaux de 6 μ m donne une capacité à 64lp/mm
- 72lp/mm et 90lp/mm sont l'état de l'art de la fin des années 2000
- En 2011 des MCP à 5 μ m et 3 μ m sont proposés

La double focalisation de proximité



2.3 L'écran

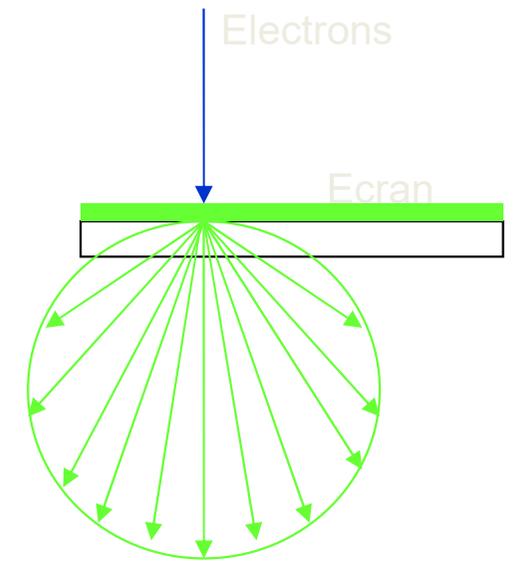
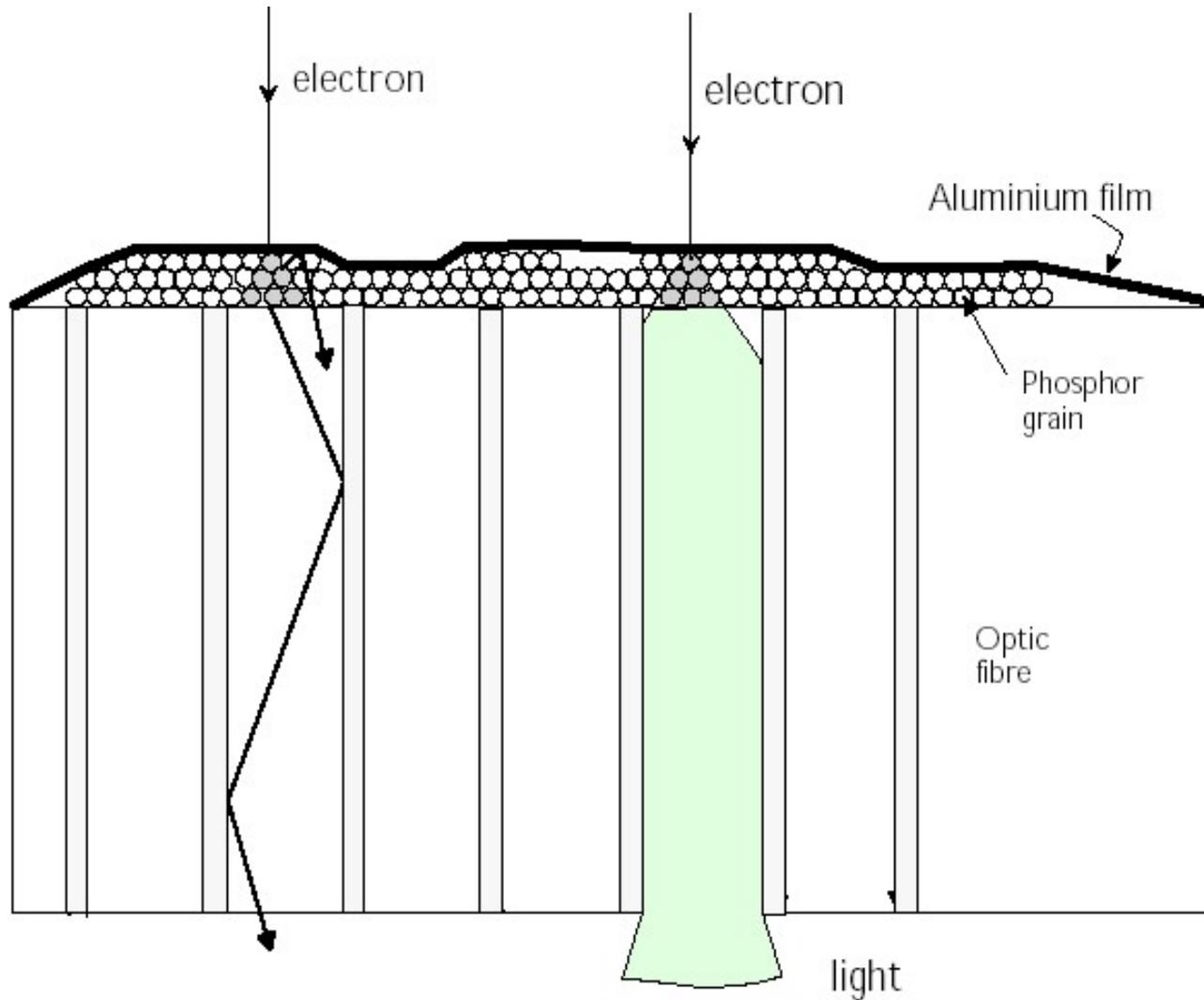
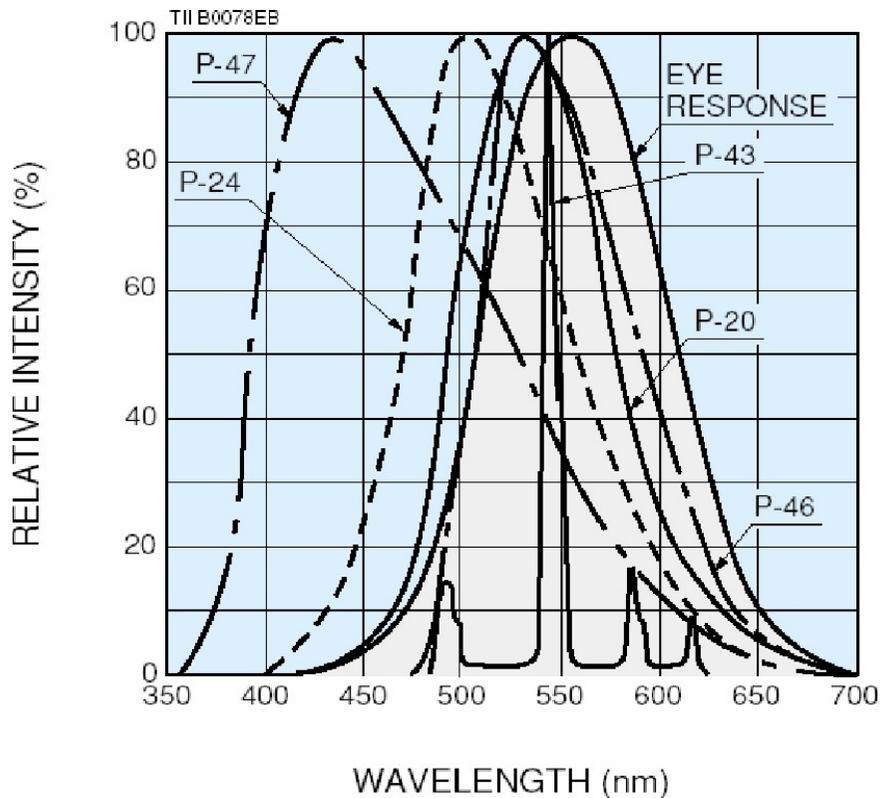


Diagramme de rayonnement Lambertien

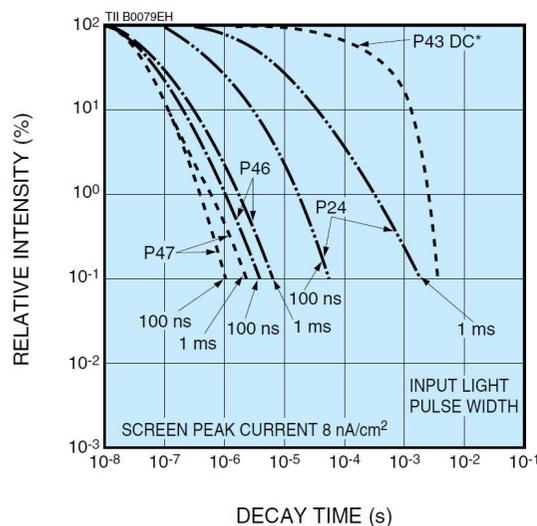
Ecran, réponse du phosphore



Couche de phosphore ou luminophore cathodoluminescent –conversion d'un électron accéléré en photons.

Caractérisé par :

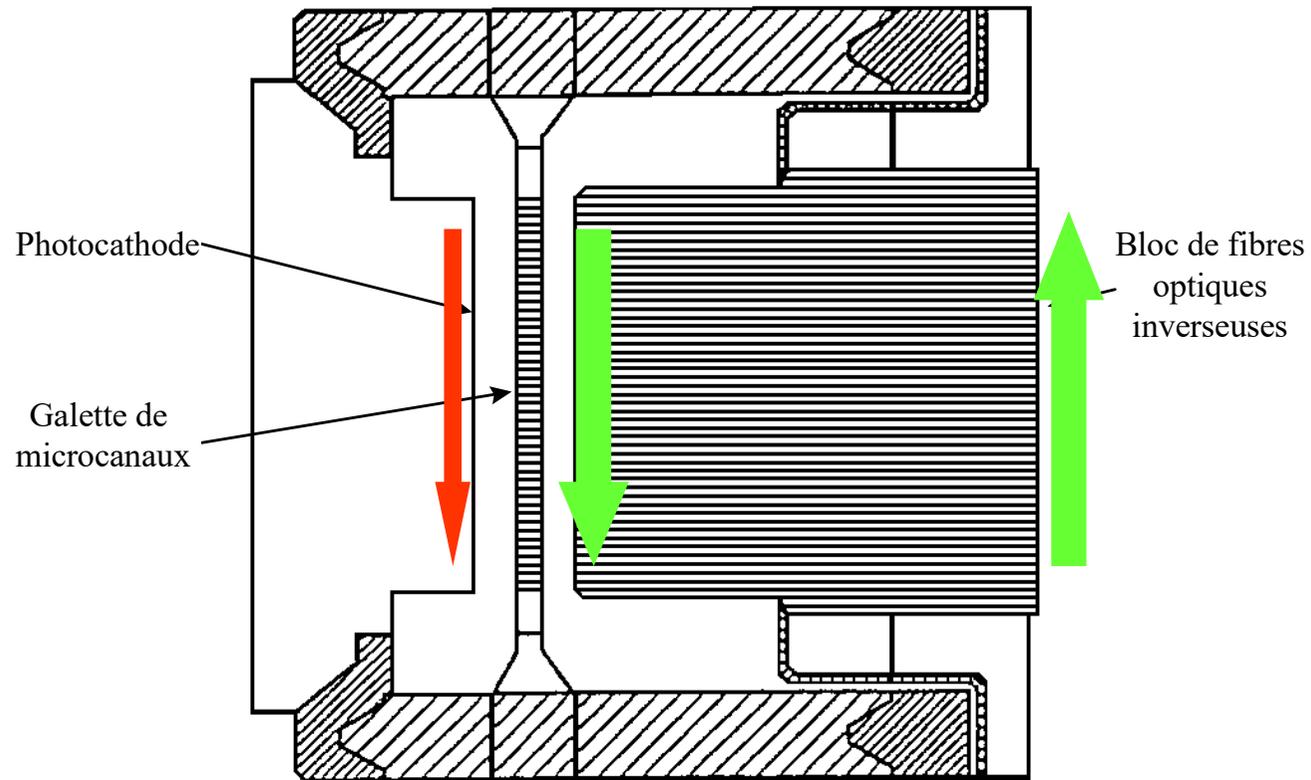
- la colorimétrie de l'écran de sortie (spectre d'émission)
- La rémanence ou constante de temps
- La granulométrie



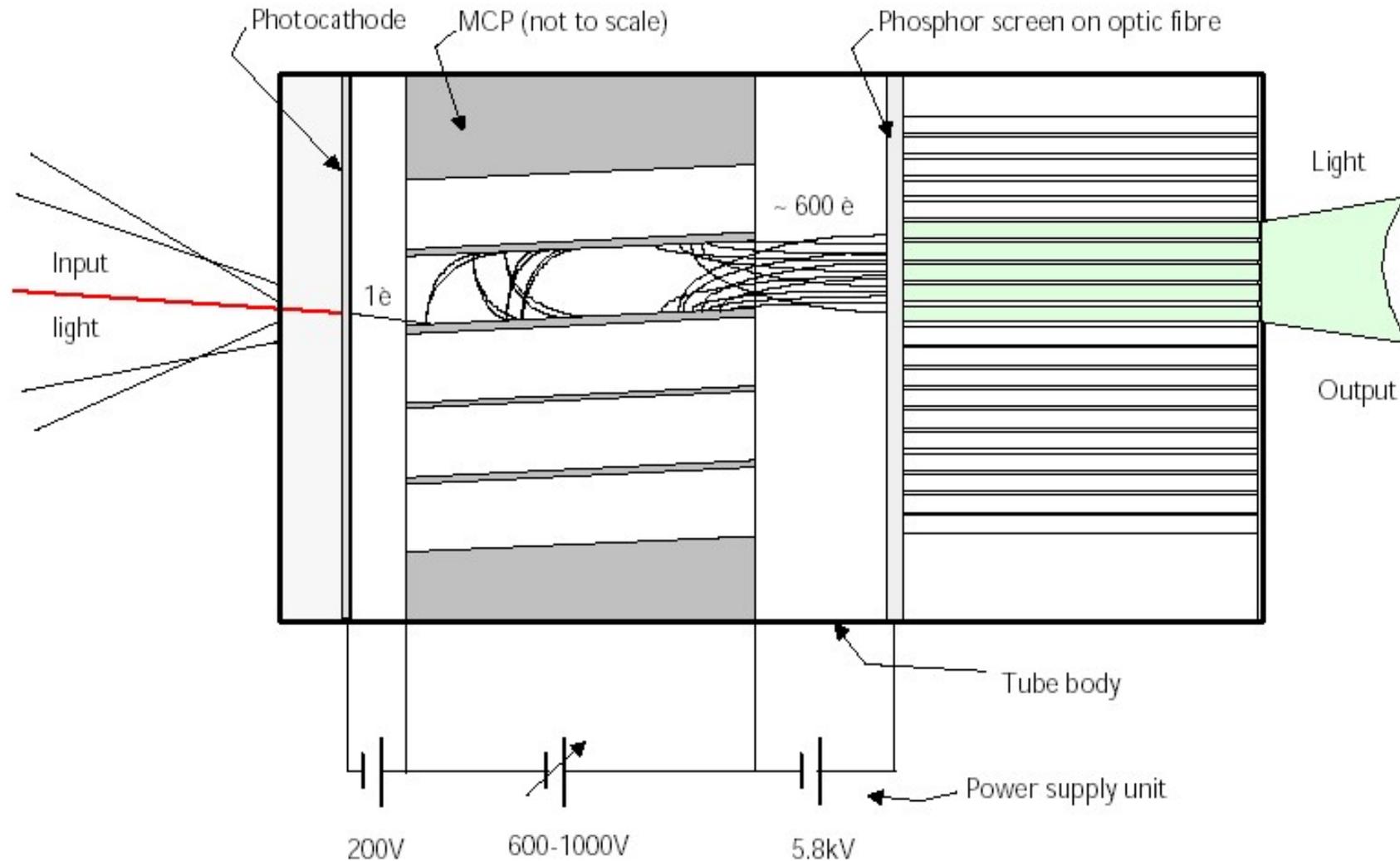
Documents Hamamatsu

* Decay time obtained following to the continuous input light removal.

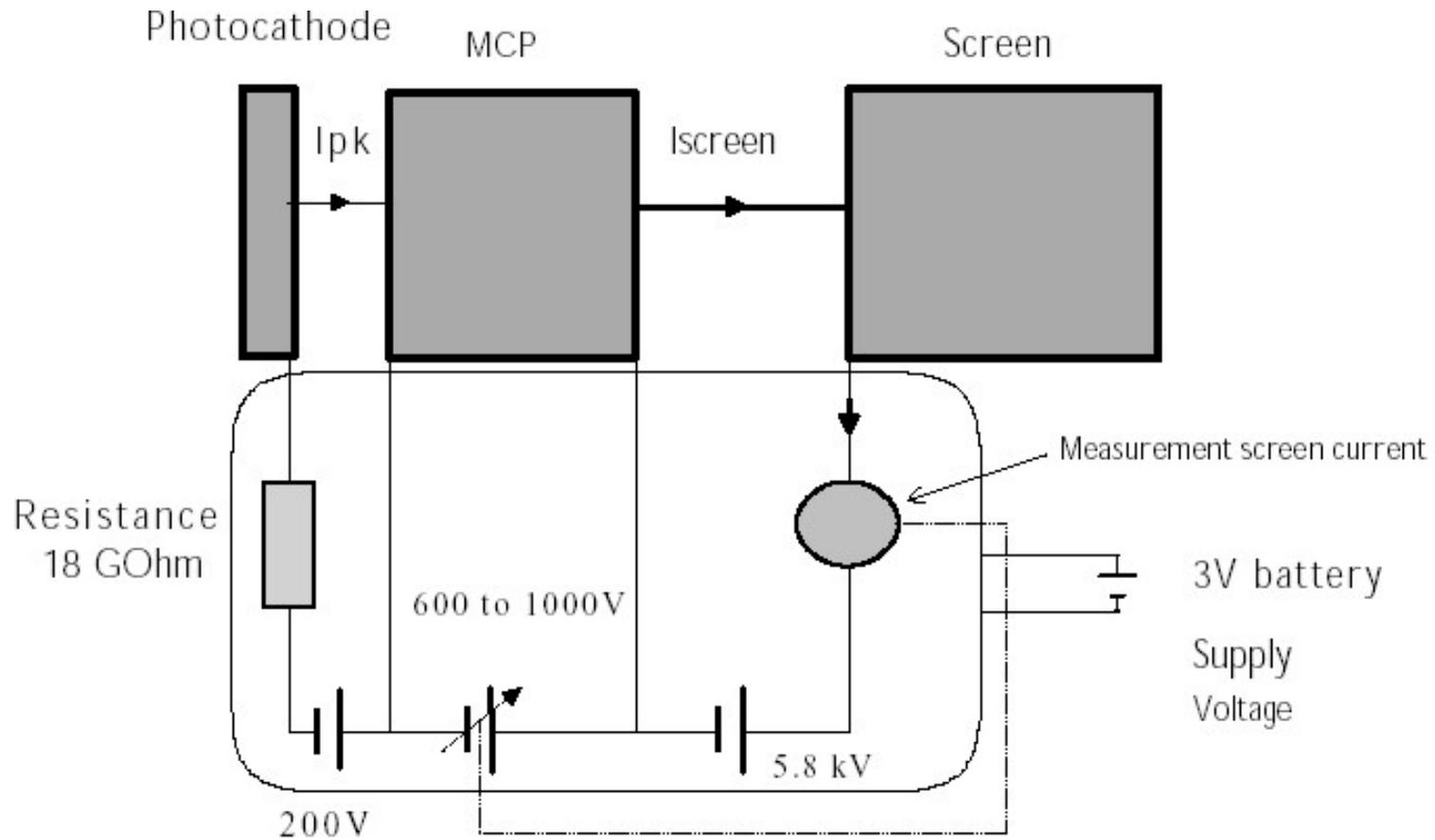
Tubes à double focalisation de proximité et fibres inverseuses



2.4 Alimentation du tube



Alimentation



3. Les tubes et leur performances

- Les grandeurs utilisées
- Les performances des tubes
- Lecture des data sheets
- Les industriels

Le bruit de photon

- Le bruit temporel
 - Sur un signal constant, la fluctuation RMS d'une image à une autre est égale 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

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

Les sources de bruit dans le détecteur

- La fluctuation du courant d'obscurité
- La facteur de bruit d'amplification F
- Le bruit spatial

Le bruit est caractérisé par :

L'EBI L'éclairement équivalent au bruit

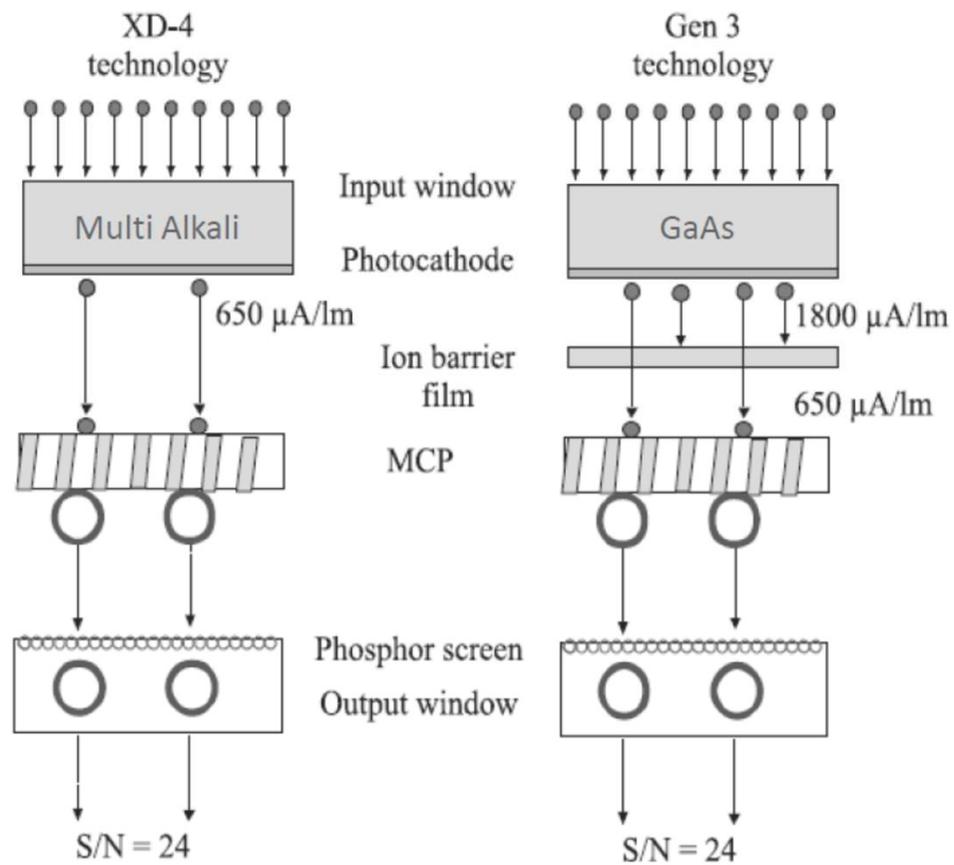
Le paramètre SNR d'un tube est mesuré à $108\mu\text{lux}$ sur un spot de $200\mu\text{m}$ incident sur la photocathode dans une bande passante de 10Hz bande de l'œil

Comparaisons entre les générations de tubes

Quelques paramètres sont utilisés pour comparer les tubes entre eux :

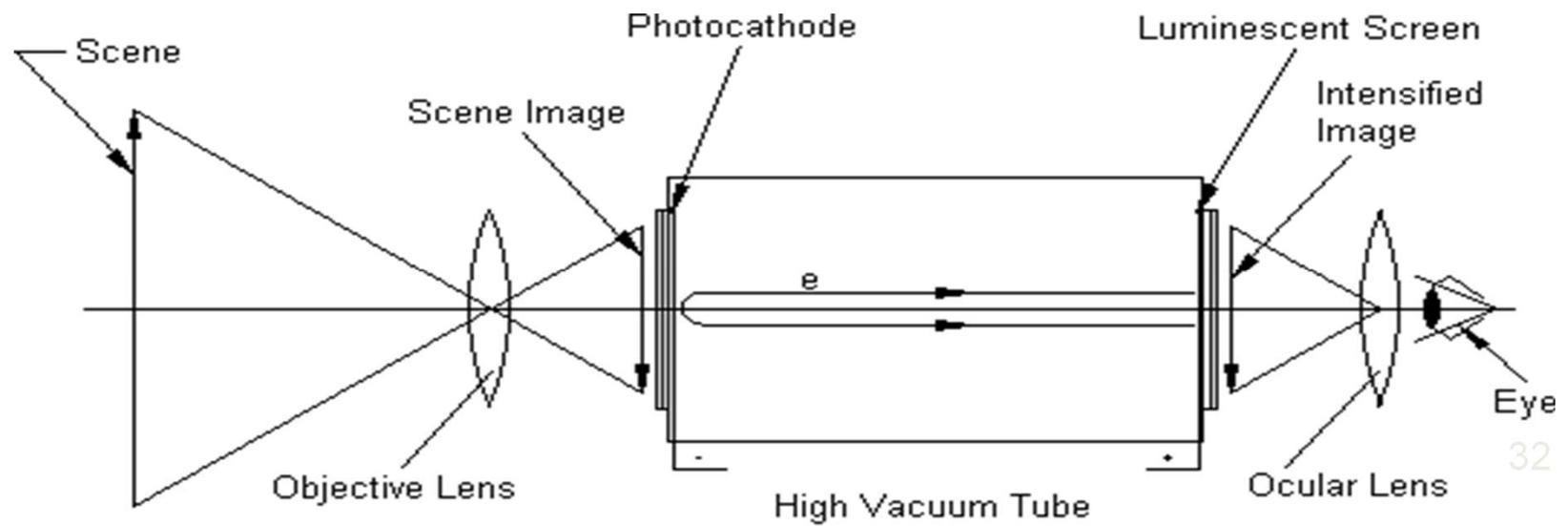
- Le domaine spectral (domaine ou la photocathode a une réponse)
- La sensibilité visuelle : le courant en Ampère généré par la photocathode pour un flux incident en lumen (donc caractérisé dans la bande spectrale de l'œil)
- La sensibilité spectrale : le courant généré pour un flux incident en W pour une longueur d'onde donnée
- Le rendement quantique : la probabilité de conversion d'un photon incident en électron libre
- Le rapport signal à bruit pour un éclairement incident voisin de $108\mu\text{lX}$

➤ paramètres	unité	2 ^{nde} gen	2 ^{nde} gen+	3 ^{eme} gen	4 ^{eme} gen
➤ Domaine spectral	μm	0,45-0,85		0,57-0,87	
➤ Sensibilité visuelle	$\mu\text{A/lm}$	300-700	700-1000	1200-2500	>2500
➤ Sensibilité $f(\lambda)$	mA/W	50		175	
➤ Rendement quantique		5%-10%		20%-40%	
➤ SNR $108\mu\text{lX}$					



Les grandeurs photométriques avec un tube intégré dans une lunette:

- La scène reçoit un éclairement E_1 ,
- En entrée pupille nous avons un éclairement E_2 provenant soit des étoiles sources ponctuelles soit d'objets étendus
- L'image projetée par l'optique de diamètre D_1 et de focale f_1 sur la photocathode se caractérise par un éclairement E_3
- Le signal en entrée se caractérise par un éclairement E_3 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 $\cos\theta$. Le gain du tube est de $G_t=L_3/E_3$
- 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 $G_o= E_4/E_2$



Bibliographie

- [1] Electro-Optics Handbook RCA – Burle 1974
- [2] Image Intensifiers II_TII0007E Hamamatsu,
- [3] Photomultiplier Tubes : Basics and Applications Edition 3a Hamamatsu
- [4] The Infrared Handbook, Wolfe Zissis, Erim
- [5] The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook Volume 1 – 8 Erim & SPIE Optical Engineering Press
- [6] Imagerie à bas niveau de lumière, fondamentaux et perspectives. Thierry Midavaine, Les Techniques de l'Ingénieur (ref. E6570).