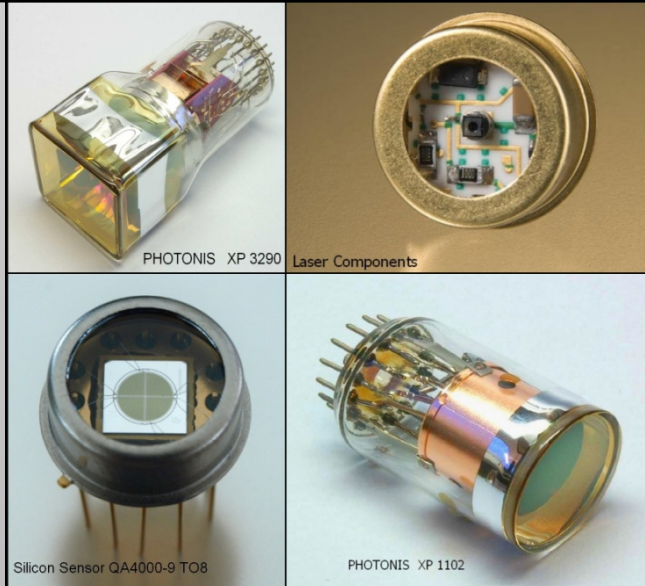


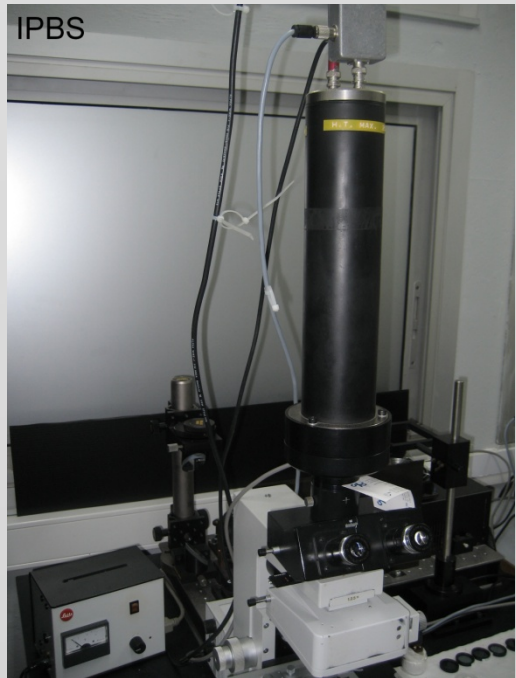
# Une comparaison de 2 modèles de photodétecteurs :

Les photomultiplicateurs (PMT) opposés aux photodiodes à avalanche (APD)



- Introduction : Les enjeux instrumentaux
- La photoémission : les états énergétiques
- La photocathode (nature et modèle métallique)
- Le photomultiplicateur
- Principe de la photodiode à avalanche
- Aspect semi-conducteur, photocathode et photodiode APD
- Rendement quantique
- Mises en œuvre des photodiodes et des photomultiplicateurs
- Bilan des performances : réponse impulsionnelle, spectre de détection, volume, bruit, coût
- Conclusion

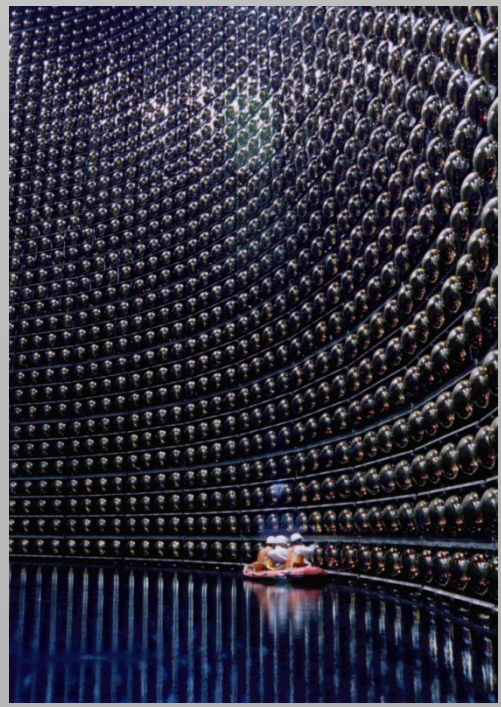
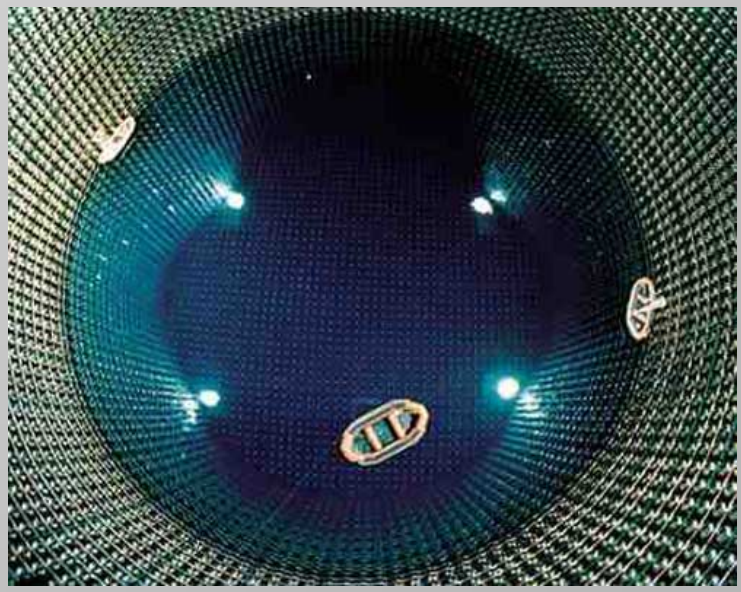
# Introduction : les applications



Spectroscopie : FRAP



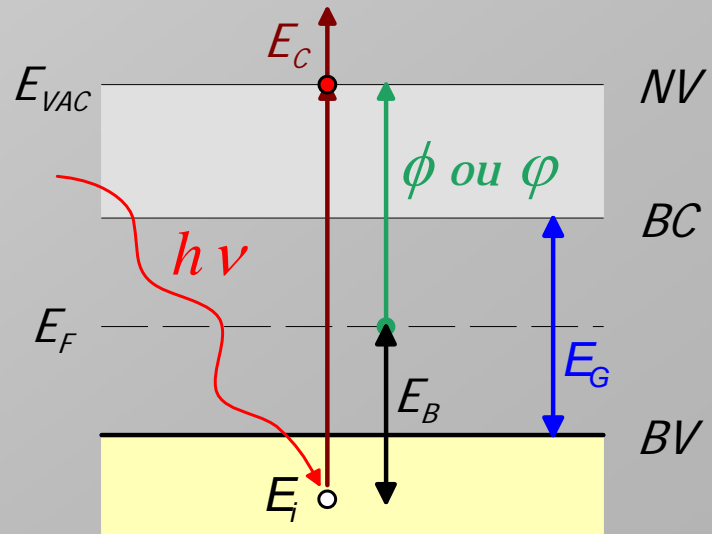
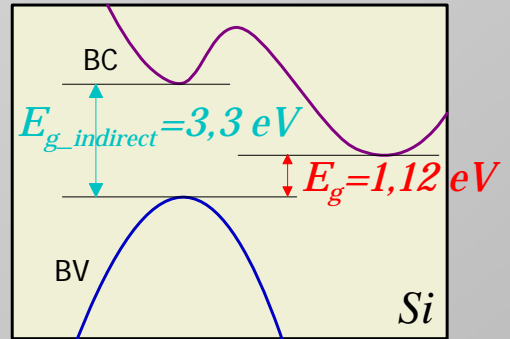
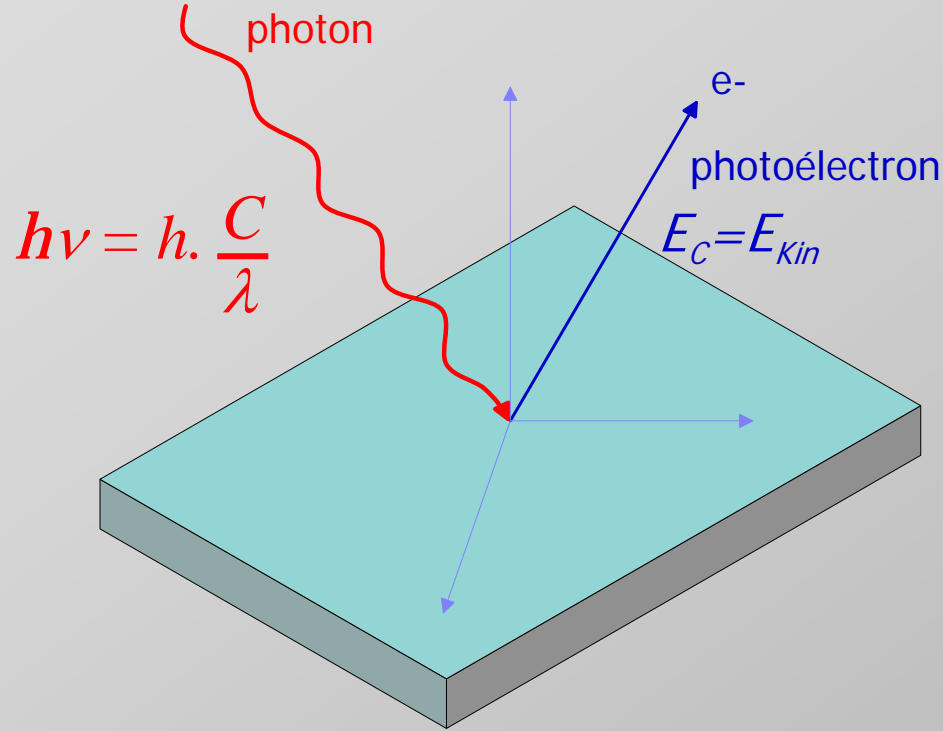
- Photodétecteurs pour différentes applications :
- Astrophysique
  - Spectroscopie
  - Analyse de gaz, de plasmas
  - Gamma caméra pour scintigraphies, caméra TEP



KAMIOKANDE : 11 129 PMT (R3600-02 20" Gain= $10^7$ )

# La photoémission

*Interaction rayonnement matière*



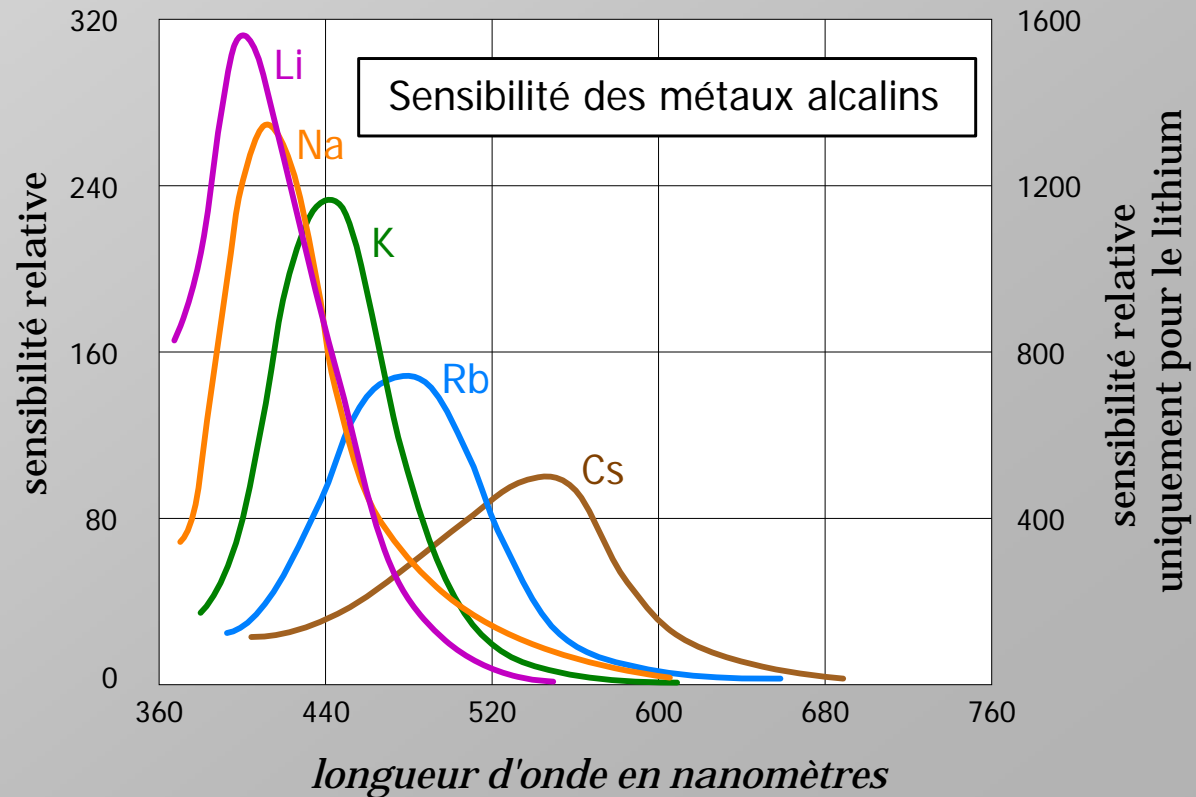
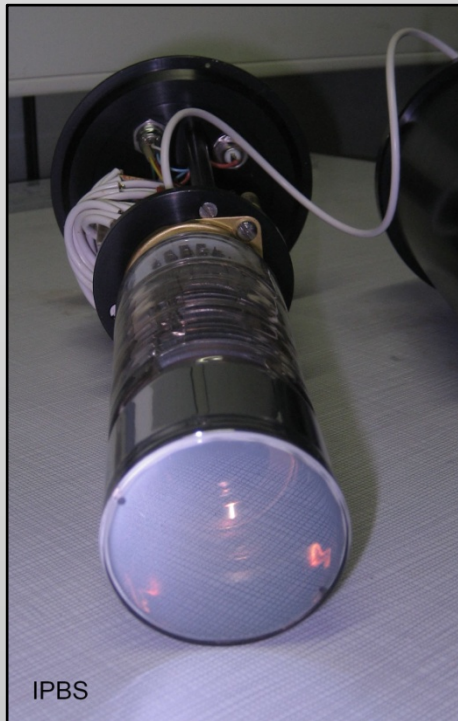
$$E_C = \frac{h\nu}{q} - E_B - \varphi \quad [eV]$$



# La photocathode (modèle métallique)

Travaux de sortie pour différents métaux alcalins :

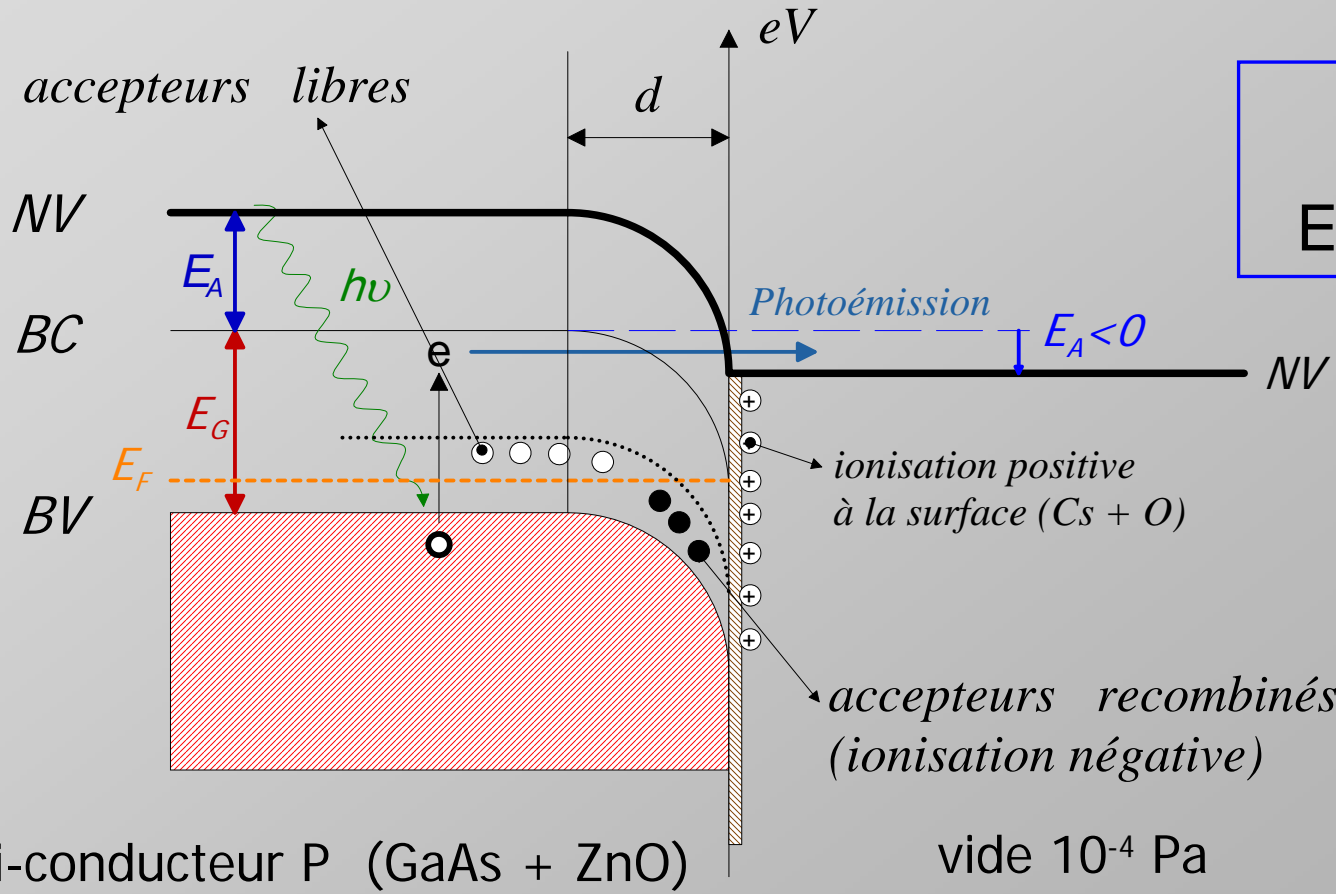
Métal	Lithium	Sodium	Potassium	Rubidium	Césium
Symbole	Li	Na	K	Rb	Cs
eV	2,3	2,3	2,2	2,1	1,8



# La photocathode à semi-conducteur

E. U. Condon (1938) : utilisation de semi-conducteur de type P pour la photocathode

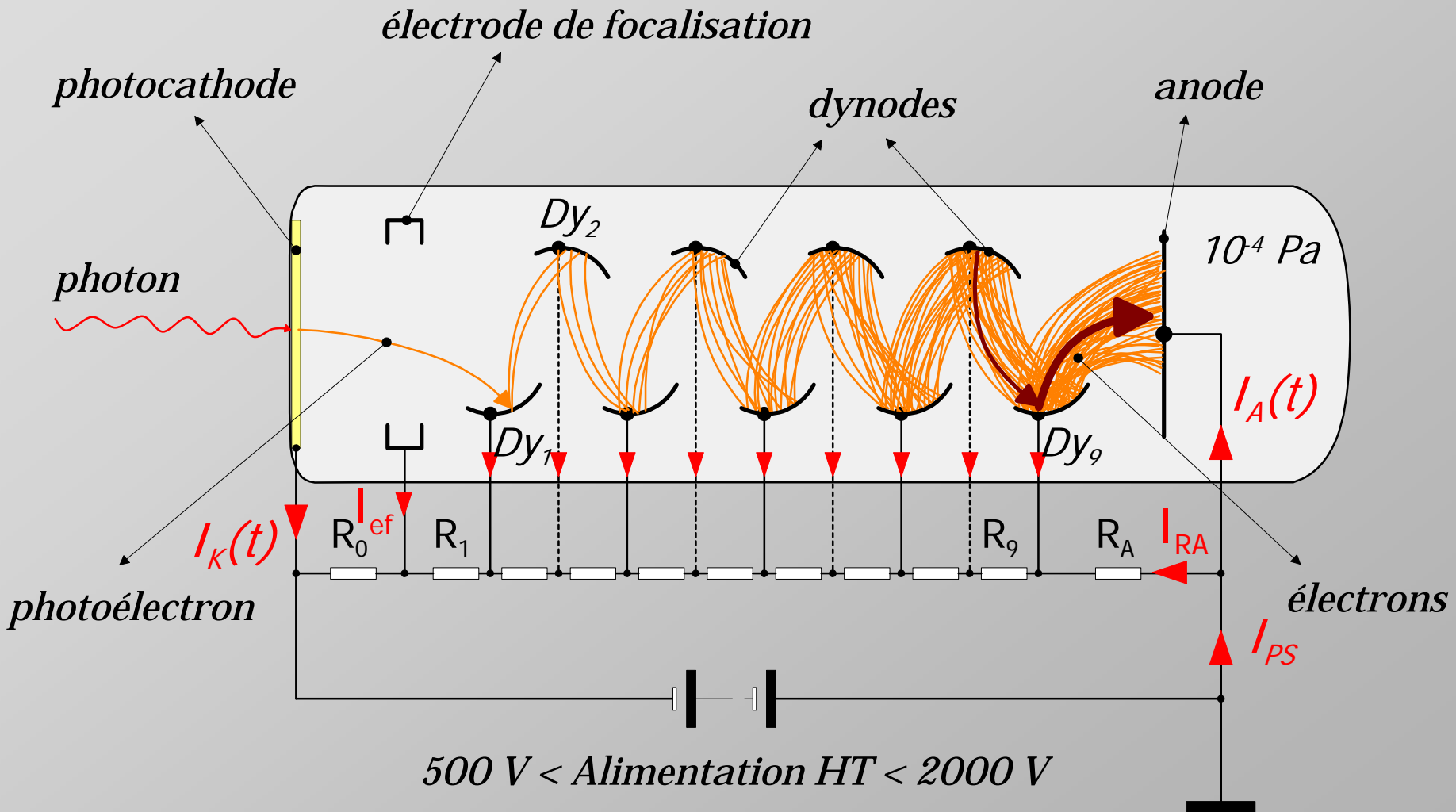
W. E. Spicer (1965) : modèle théorique de l'affinité électronique négative (NEA)



Principe :

$$E_G + E_A < E_G$$

# Structure d'un photomultiplicateur



# La photodiode à avalanche

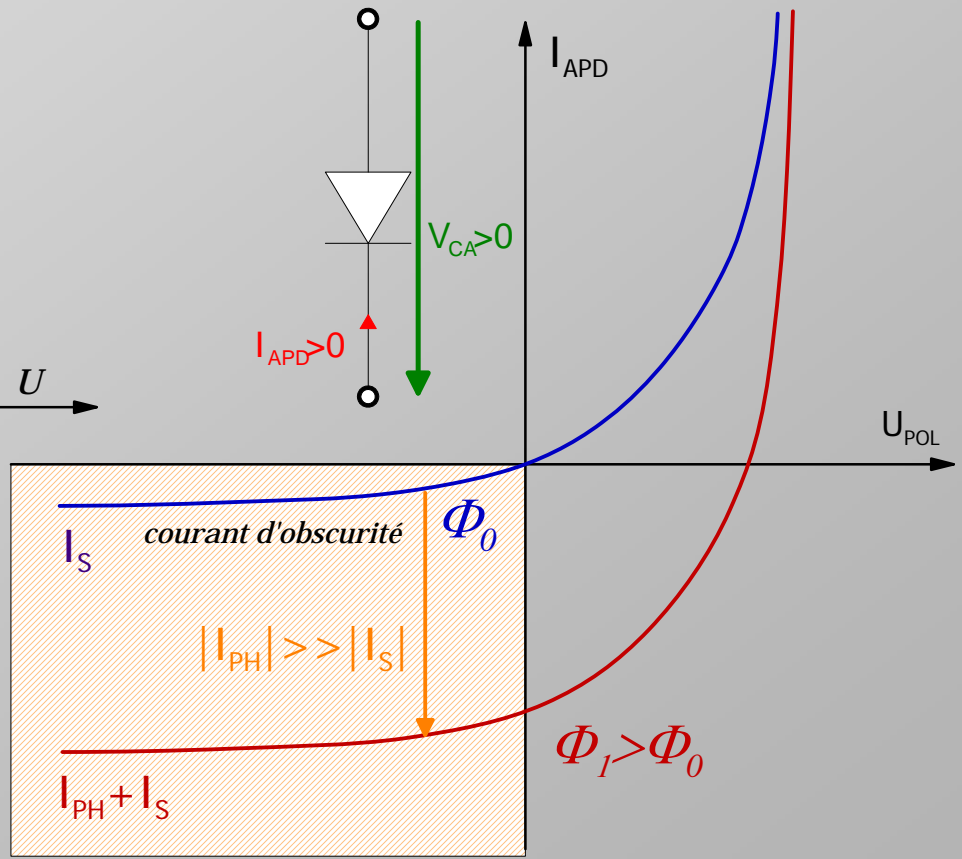
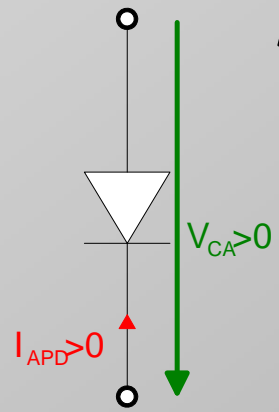
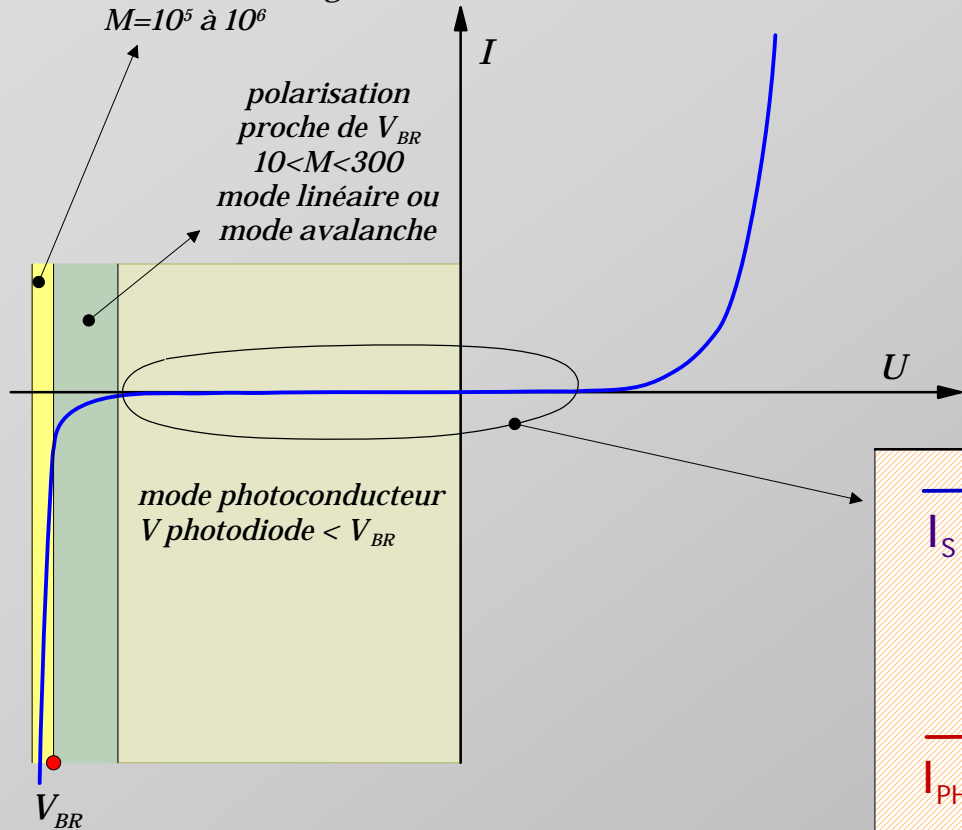
$$I_{PH} = \frac{q}{h\nu} P_o \left(1 - e^{-\alpha(\lambda)x}\right) \underbrace{(1 - R_{Si})}_{\sim 70\%}$$

avec  $R_{Si} = \left(\frac{n_{Si} - 1}{n_{Si} + 1}\right)^2$  et  $3 \leq n_{SC} \leq 5$

polarisation en mode Geiger  
 $M = 10^5$  à  $10^6$

polarisation proche de  $V_{BR}$   
 $10 < M < 300$   
mode linéaire ou mode avalanche

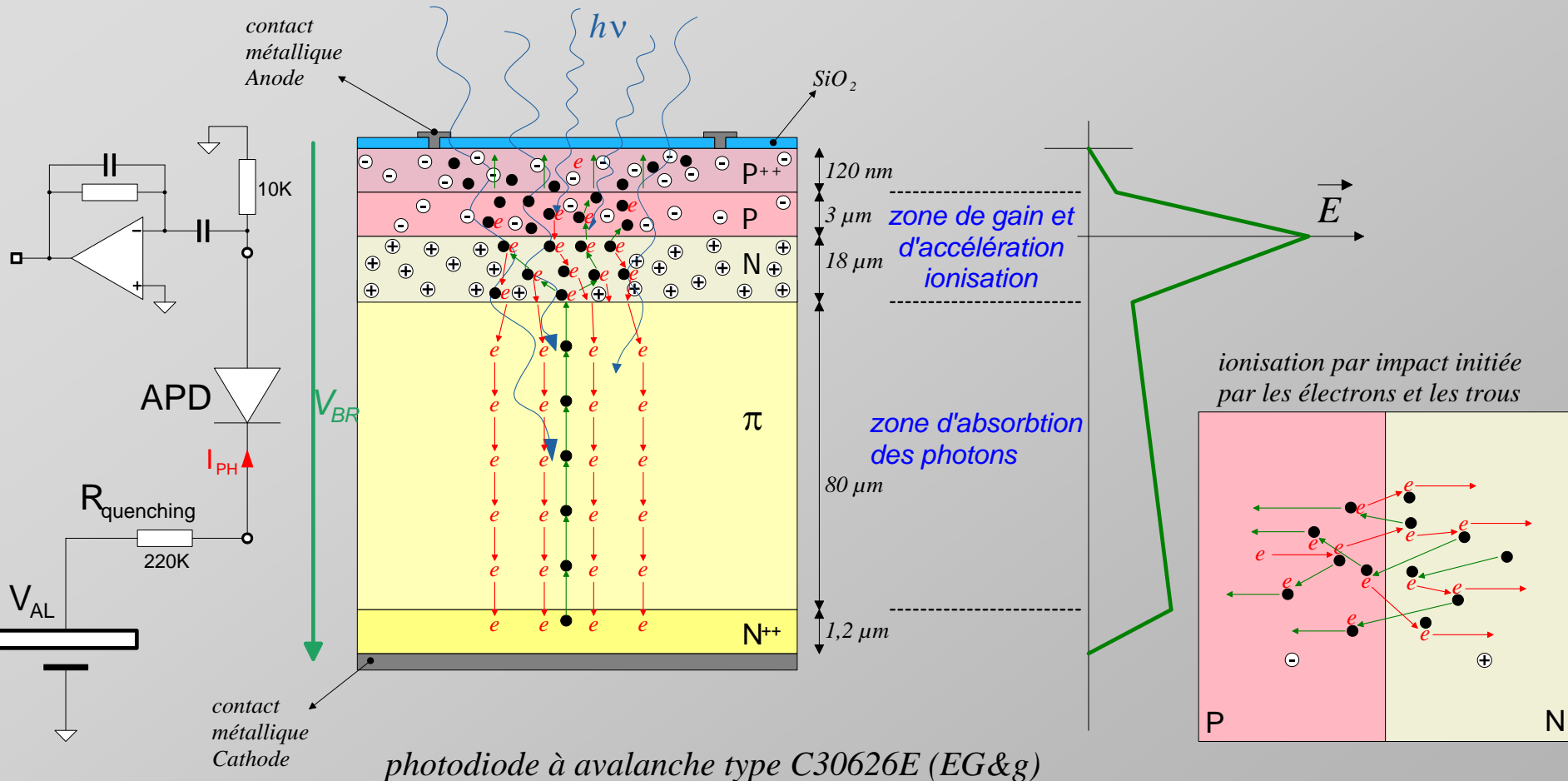
mode photoconducteur  
 $V_{photodiode} < V_{BR}$



$$I_{APD\_geiger} = M \cdot I_{APD} \qquad I_{APD} = I_S \left( e^{\frac{qV_{bias}}{kT}} - 1 \right) - I_{PH} \quad \text{avec } I_S \approx 10^{-14} \text{ A}$$



# Principe d'une photodiode, structures internes



$$M = \frac{1}{1 - \left( \frac{V_{APD}}{V_{BR}} \right)^m} \quad \text{avec } 3 \leq m \leq 6$$

# Le rendement quantique (Photocathode)

Rendement quantique du PMT :  $\eta = \frac{n_k}{n_p}$

- $\eta$  : rendement quantique en %
- $n_k$  : nombre de photoélectrons
- $n_p$  : nombre de photons incidents

Rendement quantique de la photodiode :

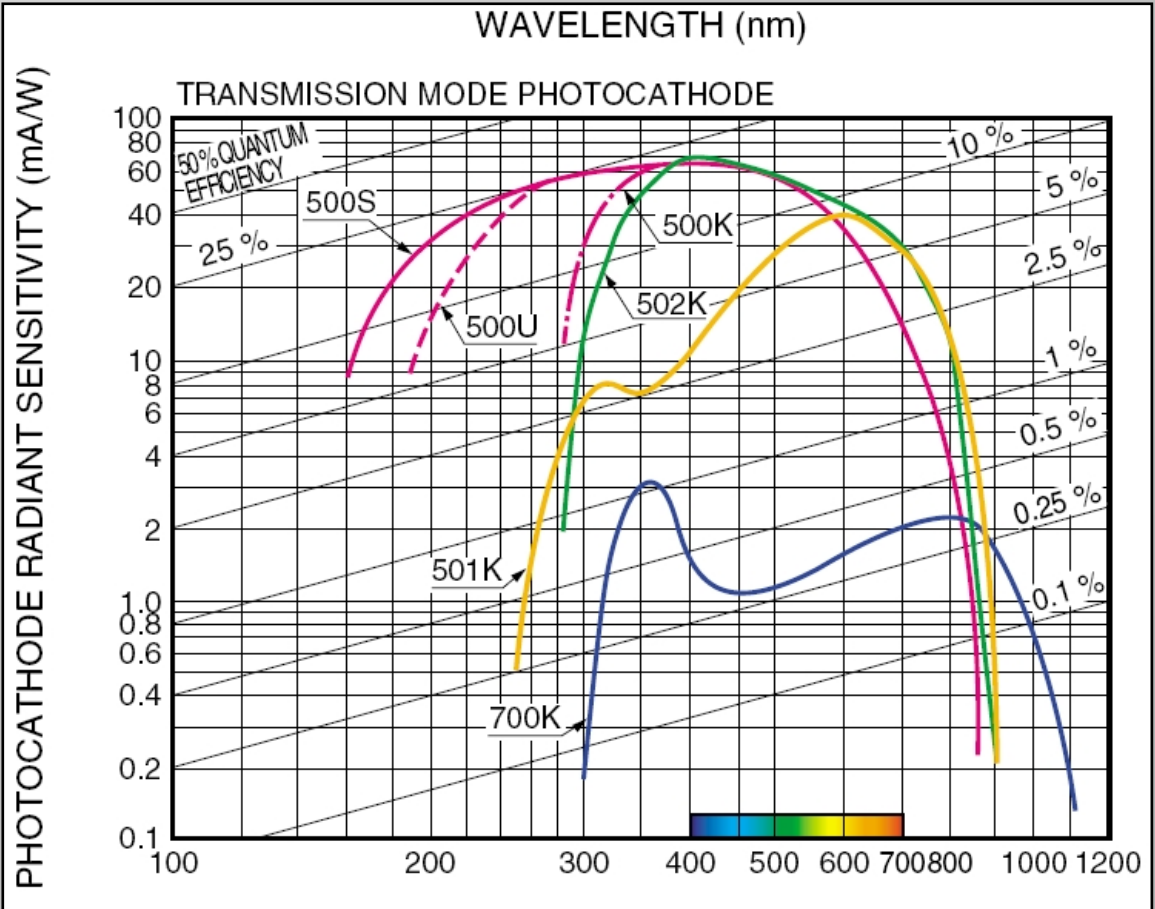
$$\eta = (1 - R_{Si}) (1 - e^{-\alpha(\lambda)x}) \quad [\%]$$

$$I_{APD} = \eta \frac{q}{h\nu} P_0 \text{ avec } P_0 = \phi h\nu$$

Sensibilité radiante exprimée en A/W :

$$\sigma = \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot \eta \cdot q \quad [A \cdot W^{-1}]$$

$$\eta = 1240 \times \frac{\sigma}{\lambda [nm]}$$



# L'émission secondaire et le gain du PMT (dynodes)

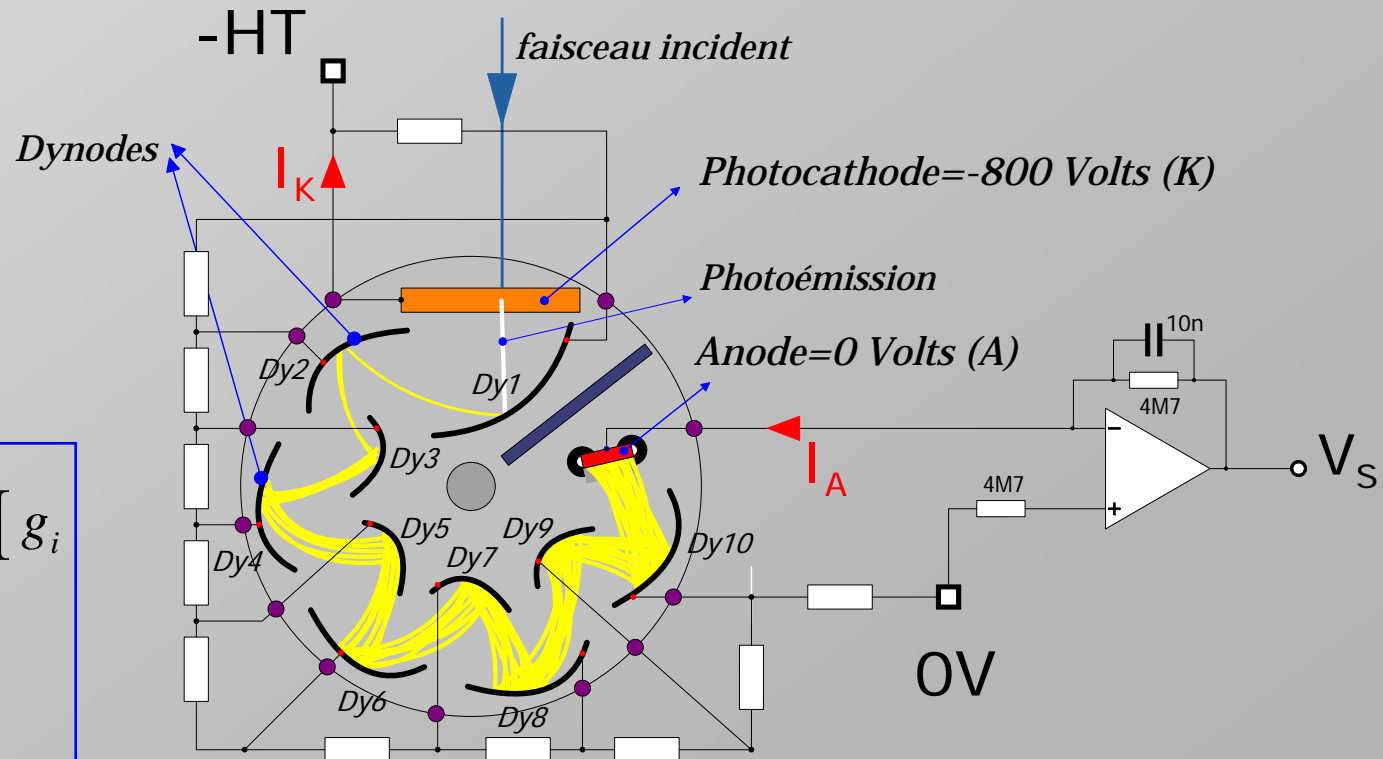
Matériaux : AgMg, CuBe, SbCs<sub>3</sub> et formes oxydées MgO, BeO et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

$$\delta_i = \frac{N_S}{N_E} \quad \begin{cases} N_S : \text{nombre d'électrons produits par l'émission secondaire} \\ N_E : \text{nombre d'électrons incidents appliqués à une dynode} \end{cases}$$

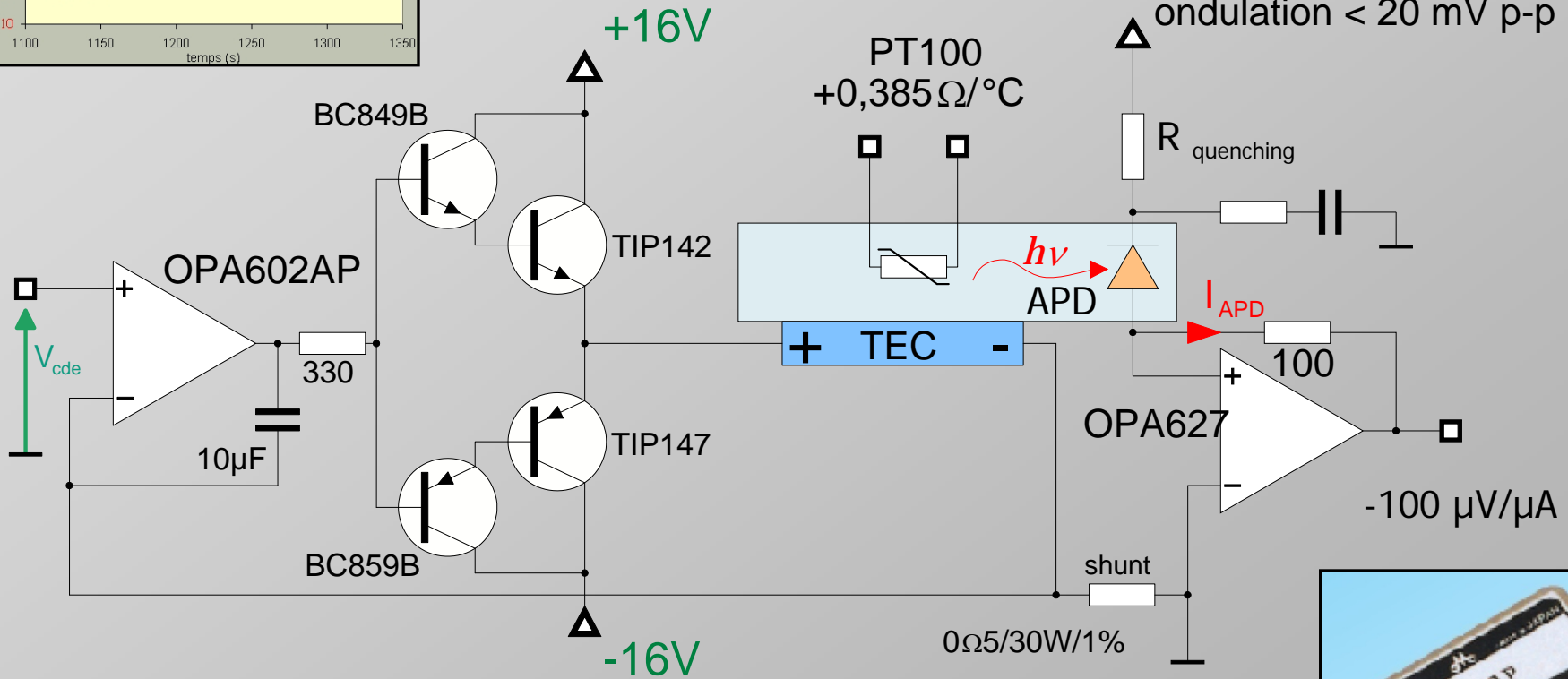
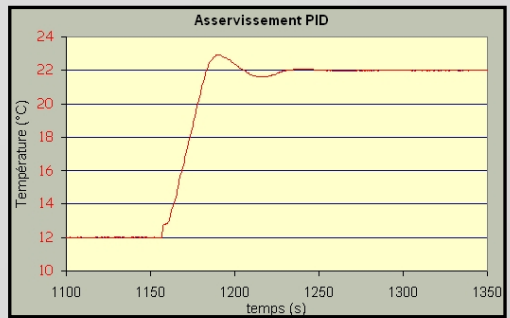
$$\delta_i \rightarrow G = \frac{I_A}{I_K}$$

$$G = \eta_p \prod_{i=1}^N \eta_i \delta_i = \eta_p \prod_{i=1}^N g_i$$

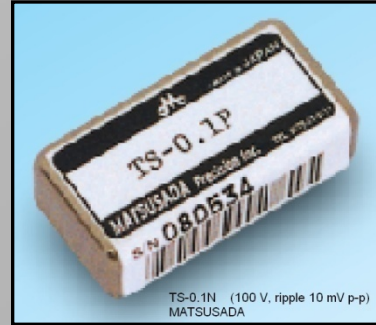
$$\approx \eta_p \prod_{i=1}^N \delta_i$$



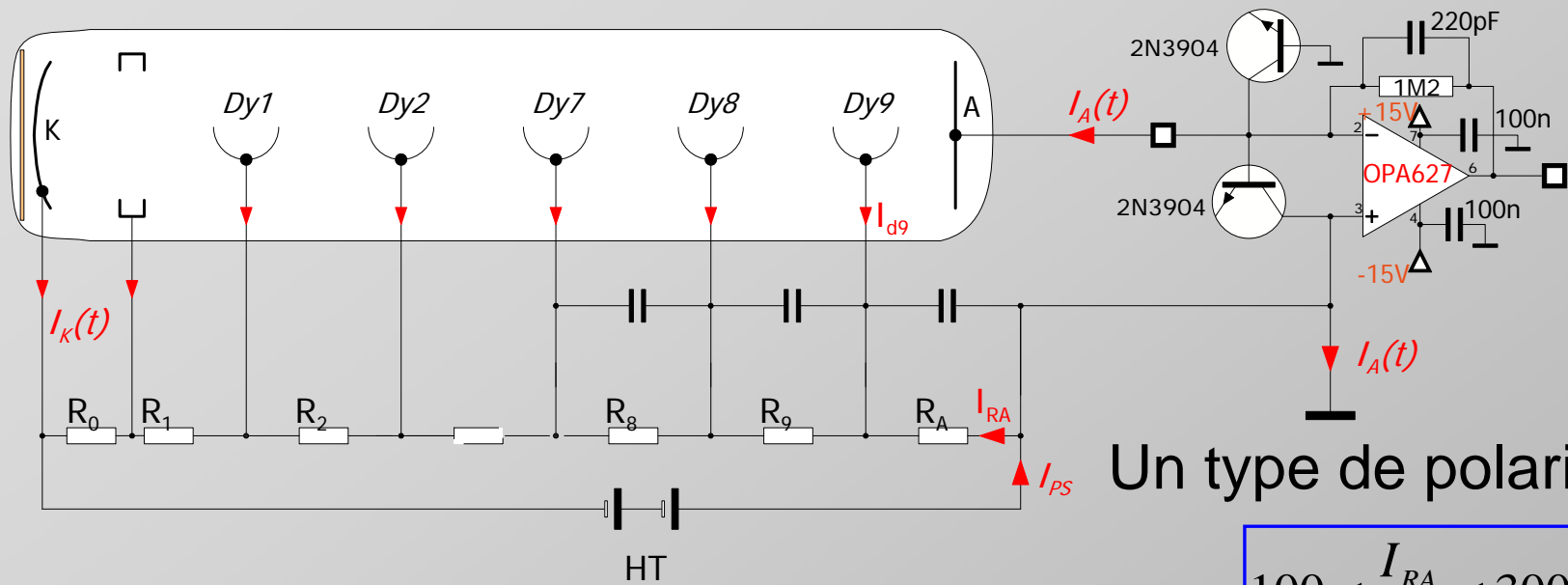
# Mise en œuvre d'une photodiode APD



Alimentation continue MATSUSADA de 50 V à 300 V pour 1 mA max (dimension en mm : 30,2 x 15,2 x 8,5)



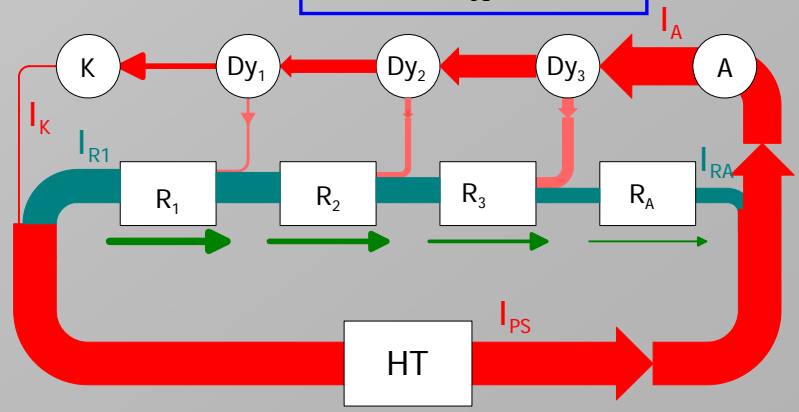
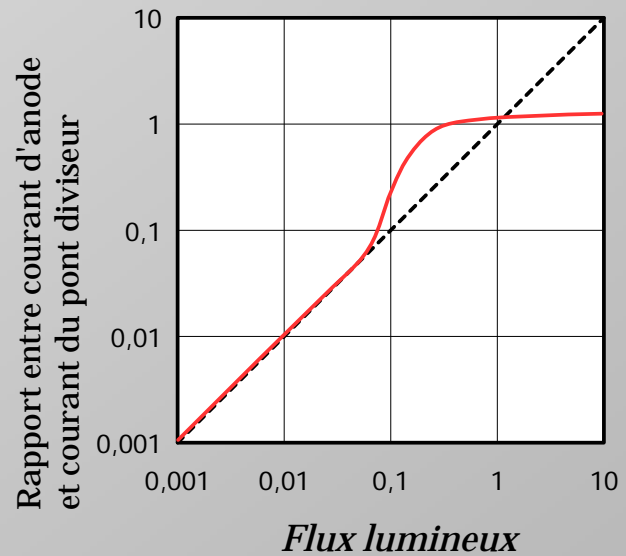
# La polarisation d'un photomultiplicateur



Un type de polarisation

$$100 < \frac{I_{RA}}{I_A} < 300$$

Linéarité



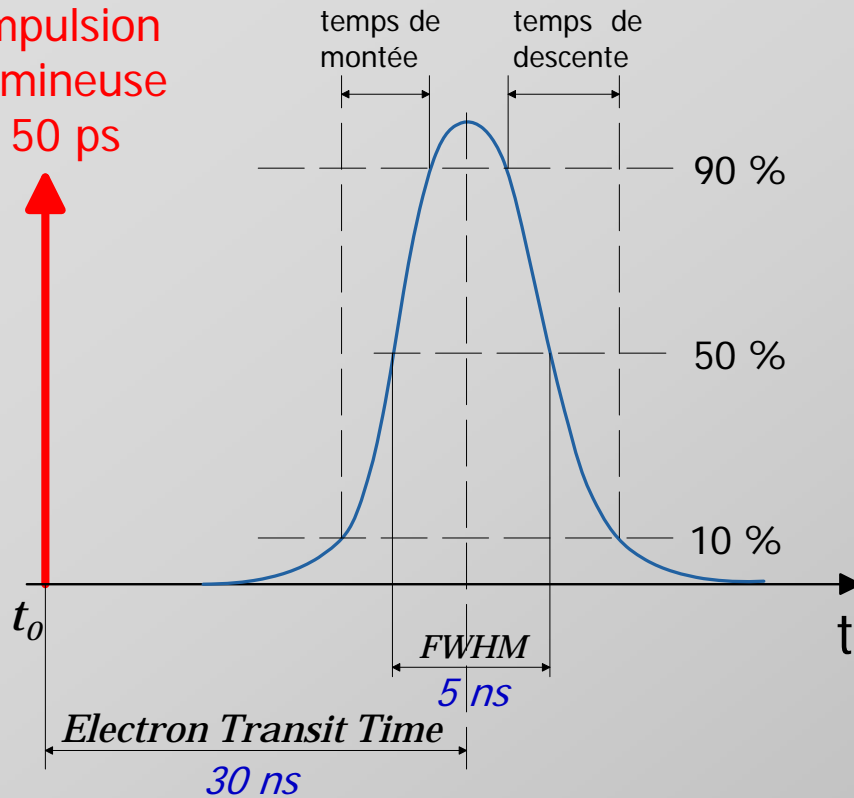
Courants et tensions pour un PMT à 3 dynodes





# Réponse impulsionnelle

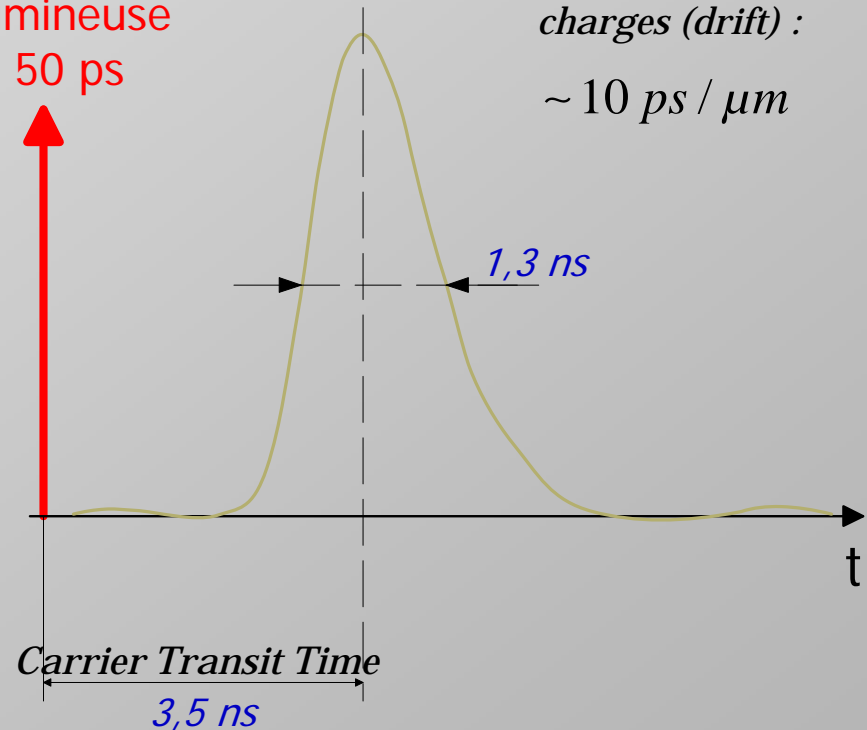
Impulsion lumineuse  
< 50 ps



Réponse impulsionnelle du PMT

BURLES INDUSTRIES, Inc., Photomultipliers Handbook.  
Supersedes PMT-62, 8-80. Printed in U.S.A./10-1989, TP136.

Impulsion lumineuse  
< 50 ps



Temps de transit des charges (drift) :  
~ 10 ps / μm

Réponse impulsionnelle d'une photodiode APD

Shushakov D., Shubin V., Sitarsky K., Levin E.,  
Shelegeda E., Vinogradov S., New Approach  
to Solid State Photomultipliers.

Carrier transit time (zone déplétée) :

$$t_d = \frac{l}{v_m} = \frac{l}{\mu_m E_m} = \frac{l^2}{\mu_m V_{bias}}$$

# Comparatif (partie 1)

	PMT	Photodiode APD
Spectre de détection	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 120 nm à 1100 nm (photocathode semi-transparente à détection frontale)</li> <li>▪ 300 nm à 1,7 <math>\mu\text{m}</math> (modèle proche infrarouge R5509-73 ou modèle à détection latérale avec photocathode opaque)</li> </ul>	<p>250 nm à 1300 nm            250 nm &lt; APD Si &lt; 800 nm            700 nm &lt; APD InGaAs &lt; 1300 nm</p>
Longueur d'onde pour la sensibilité maximale	155 nm < $\lambda$ < 440 nm	380 nm < $\lambda$ < 980 nm
Efficacité quantique UV	20 %	10 %
Efficacité quantique bleu	30 %	45 %
Efficacité quantique vert-jaune	30 %	70 %
Efficacité quantique rouge	10 %	85 %
Surface de détection	De 1 cm <sup>2</sup> à des tubes de 2000 cm <sup>2</sup> (500 mm de diamètre) (expérience KAMIOKANDE PMT de 20" R3600-02)	0,01 mm <sup>2</sup> < S < 10 mm <sup>2</sup> 100 $\mu\text{m}$ < diamètre < 2,5 mm
Sensibilité aux champs magnétiques	Sensibilité élevée La photocathode doit être blindée	La photodiode est insensible
Alimentation continue	-800 V < V <sub>cathode</sub> < -2500 V	60 V < V <sub>BR</sub> < 350 V ( <b>influence le gain</b> )
Coût	100 € < Prix < 1800 €	100 € < Prix < 500 €
Temps de transit d'un photoélectron ou carrier transit time (temps de réponse)	5 ns < transit time < 100 ns	150 ps < CTT < 6 ns
Temps de montée (entre 10% et 90%)	Les plus rapides : 2 ns Les plus lents : 10 ns	Les plus rapides : 100 ps Les plus lentes : 3 ns

# Comparatif (partie 2)

FWHM étalement (Transit Time Spread) Réponse impulsionnelle	500 ps < FWHM < 30 ns Full Width at Half Maximum	80 ps < FWHM < 3 ns Full Width at Half Maximum
Réponse en courant (sensibilité radiante A.W <sup>-1</sup> )	10 mA/W à 300 mA/W	5 à 70 A/W
Courant d'obscurité	10 pA < dark current < 600 nA	30 pA < dark current < 80 nA $V_{bias} < V_{BR}$
Bande passante	Bandwidth : 30 MHz < B < 300 MHz	Cut off frequency : 100 MHz < B < 3 GHz
Courant maximal collecté (anode pour PMT)	Mode continu 50 nA < I <sub>Anode</sub> < 100 µA 50 fA < I <sub>Cathode</sub> < 100 pA	Mode continu pour V <sub>BR</sub> 2 µA < I <sub>PH</sub> ou I <sub>R</sub> < 250 µA 30 < M < 200
Bruit NEP (noise equivalent power ou DSP)		$3 \times 10^{-13} < NEP (W/Hz^{1/2}) < 10^{-14}$
Bruit en courant	$120 \text{ pA}/\text{Hz}^{1/2} < \text{DSP I} < 10 \text{ nA}/\text{Hz}^{1/2}$ PMT : $G \cdot (2 \cdot q \cdot I_{Cathode})^{1/2}$	$200 \text{ fA}/\text{Hz}^{1/2} < \text{DSP I} < 50 \text{ nA}/\text{Hz}^{1/2}$ APD : $i^2 = 2q(I_S + (I_{PH} + I_{BK}))M^2 \cdot F$
Gain	10 <sup>4</sup> à 10 <sup>7</sup>	20 < M < 300 (mode normal) 10 <sup>4</sup> < M < 10 <sup>6</sup> (mode geiger)
Coût du photodétecteur	200 € < Prix < 4000 €	200 € < Prix < 1000 €
Régulation thermique	-10 °C pour réduire le bruit thermoïonique de la photocathode	-20 °C recommandé ( <b>influence le gain</b> ) La régulation devra être précise

# Conclusion (bilan des caractéristiques PMT et APD)

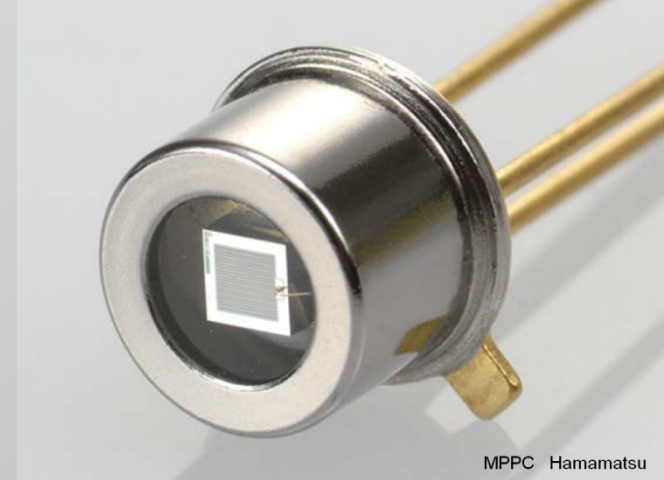
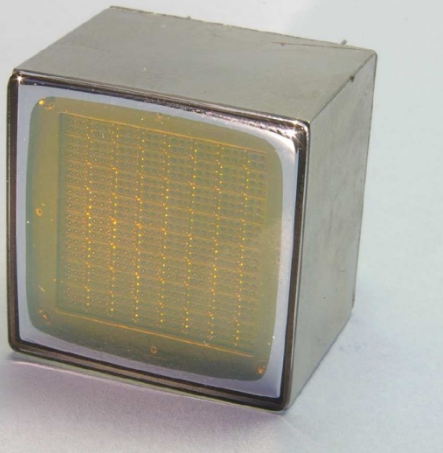
## PMT

- Adapté à un spectre de détection entre 200 nm et 800 nm (rendement quantique maximal)
- Surface de détection inégalée
- Sensible aux champs magnétiques et à la température
- Adapté au comptage de photons
- Gain élevé  $\sim 10^5$  à  $10^8$
- Rapport signal sur bruit satisfaisant
- Vieillessement acceptable
- Conditionnement volumineux
- Alimentations HT (800 V à 2,5 kV)
- Coût d'une mise en œuvre élevé
- Utilisé en astrophysique

## Photodiode à avalanche

- Adapté à un spectre de détection du visible au proche infrarouge (QE max.)
- Surface de détection adaptée à des détecteurs à confinement réduit
- Insensible aux champs magnétiques
- Sensibilité radiante élevée
- Gain moyen hors avalanche (50~200)
- Rapport signal sur bruit excellent
- Gain dépendant de la température et de la tension de polarisation
- Alimentation précise jusqu'à 250 V
- asservissement de la température
- Coût et volume réduits
- Photodétecteur rapide





Merci de votre attention

