

H. Monard - LAL

Ecole Accélérateur IN2P3  
Février 2014-Bénodet



*Les Sources d'électrons*

# Plan de l'exposé

- Rappels
- canon à électrons
- Processus émissions
- conclusions



A la recherche de la source idéale

# Qu'est-ce qu'un électron ?

- **Une particule chargée** (1897)

$$q = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9.01 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$E_0 = 0.511 \text{ MeV}^*$$

$$E = mc^2$$

Masse très faible !

La plus « légère » des particules (avec e+)

- **Sensible au champ électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{B}$**

$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

accélération

rotation

Rapidement relativiste  
et trajectoires hélicoïdales

## Paramètres relativistes

$\beta = v/c^{**}$  vaut rapidement  $\sim 1$

$\gamma = E/E_0 + 1 \sim E/E_0 \sim 2 E$  Energie en MeV

Exemple :  $E = 2 \text{ MeV}$

$$\gamma = 2/0.5 + 1 = 5$$

$$\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2} = 0.9797$$

$$v = 2.94 \times 10^8 \text{ m/s}$$

\*1 eV = énergie d'un électron sous une ddp de 1 V

\*\*c =  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

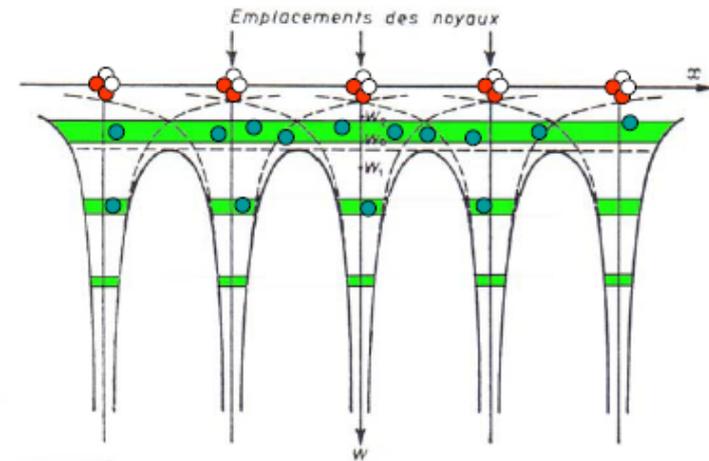
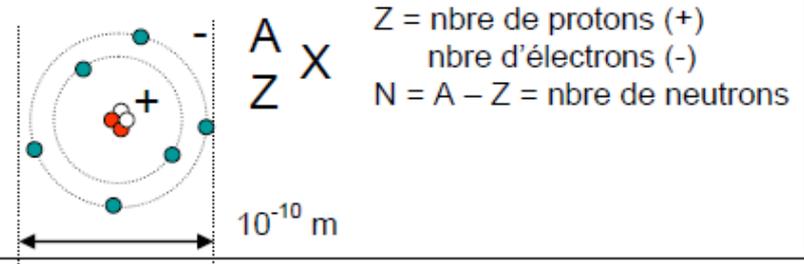
# Où se trouvent les électrons ?

- Matière = atomes = noyau (protons+neutrons) + électrons
- Les électrons sont **liés** au noyau par interaction EM et sont placés sur certaines orbites (énergies particulières discrètes)  
(modèle classique)
- Matière solide = ensemble d'atomes **conducteur** = électrons de valence mis en commun et réseau d'ions
- Il faut **perturber** la matière pour lui ôter ses électrons



Travail de sortie W

modèle planétaire en physique classique

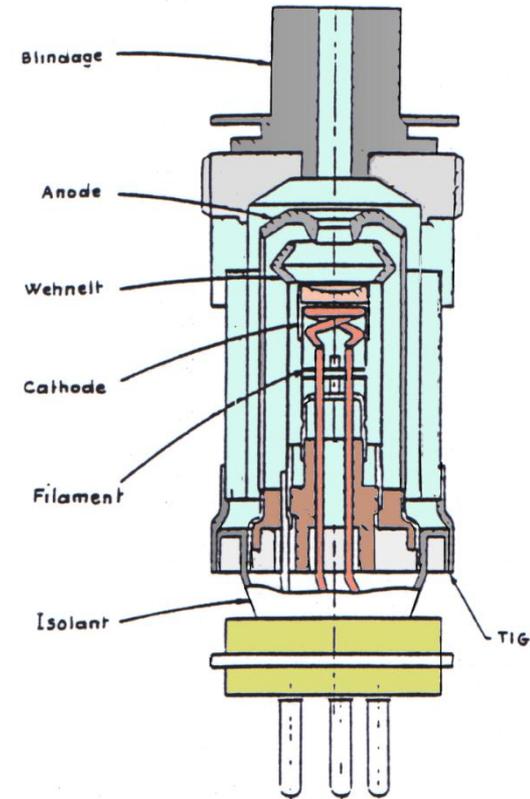
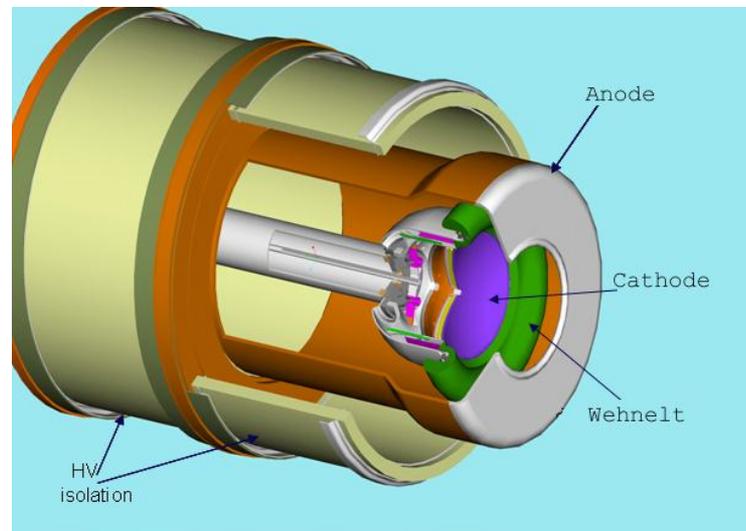
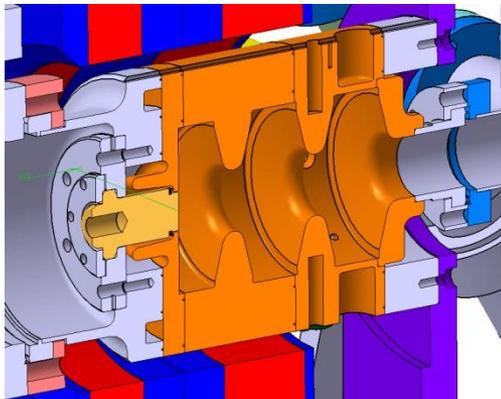


Statistique de Fermi-Dirac

Densité électrons  $\sim 10^{23}/\text{cm}^3$

# Comment fait-on Un faisceau d'électrons ?

De quoi est constitué un canon à électrons ?



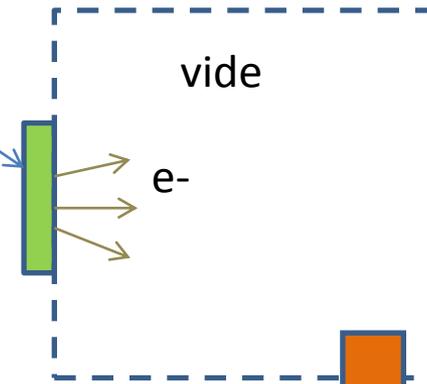
# Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

Zone vide d'air (P  $10^{-6}$  à  $10^{-10}$  mbar ) + cathode + champ électrique E (keV au MeV)

- Cathode : émetteur électrons



Nous verrons :  
Trois principes physiques  
d'émission des électrons  
(matériau solide)



pompage

# Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

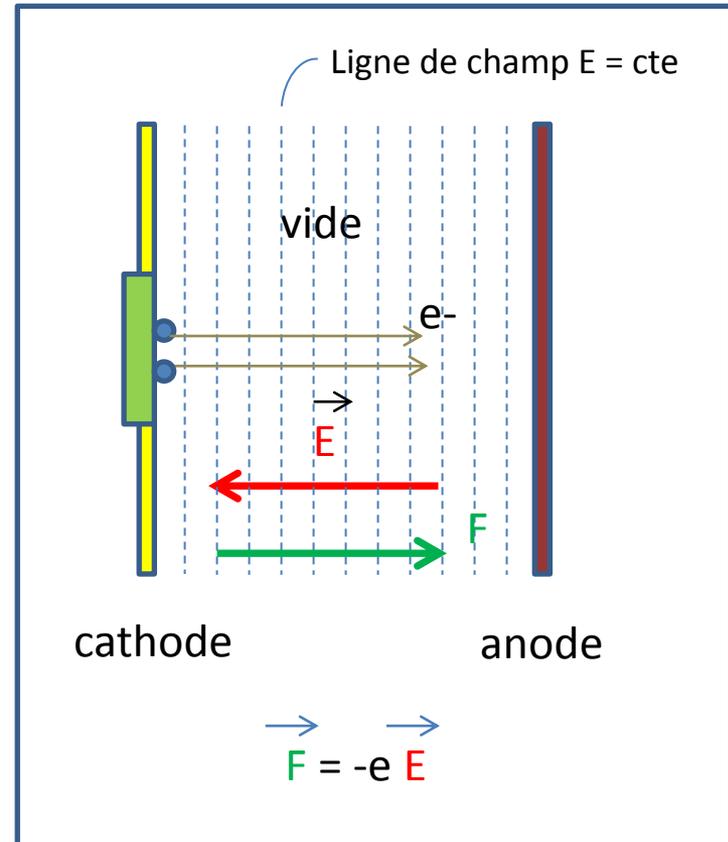
Comment fait-on un canon à électrons ?

- Cathode : émetteur électrons
- Créer un champ électrique  $\vec{E}$

Le champ E accélère les électrons  
(augmente leur vitesse)

o le plus simple : anode  
plaques // chargées

o plus complexe : cavité RF  
canon RF : cavité résonante EM  
(mode TM 010)

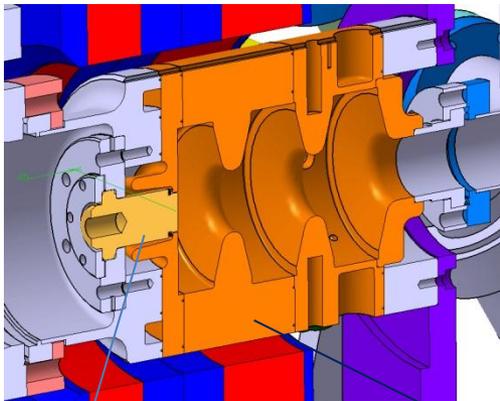


$$E \text{ [V/m]} = V / d$$

# Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

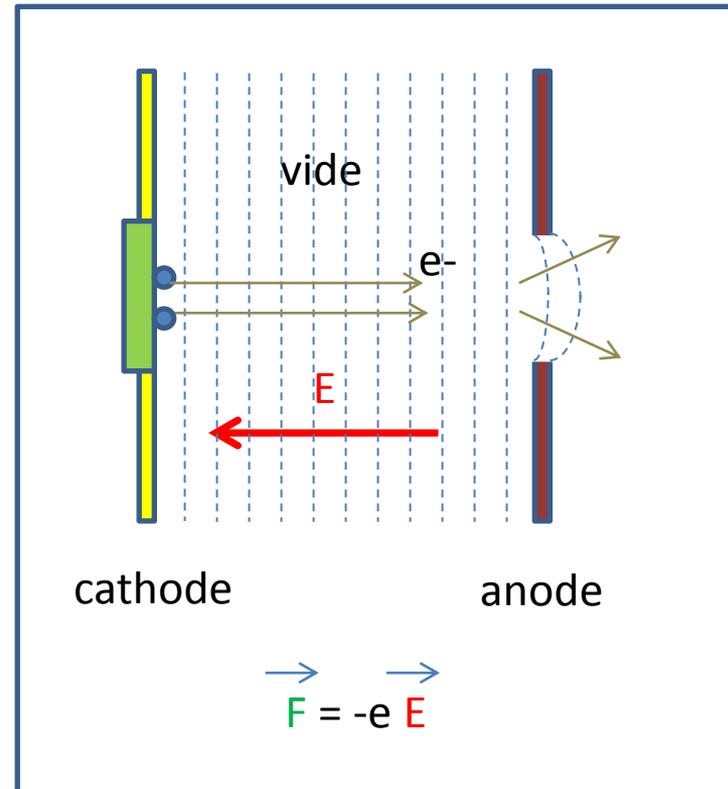
Comment fait-on un canon à électrons ?

- Cathode : émetteur électrons
- Créer un champ électrique E (anode)
- Faire un trou !



Canon RF

cathode



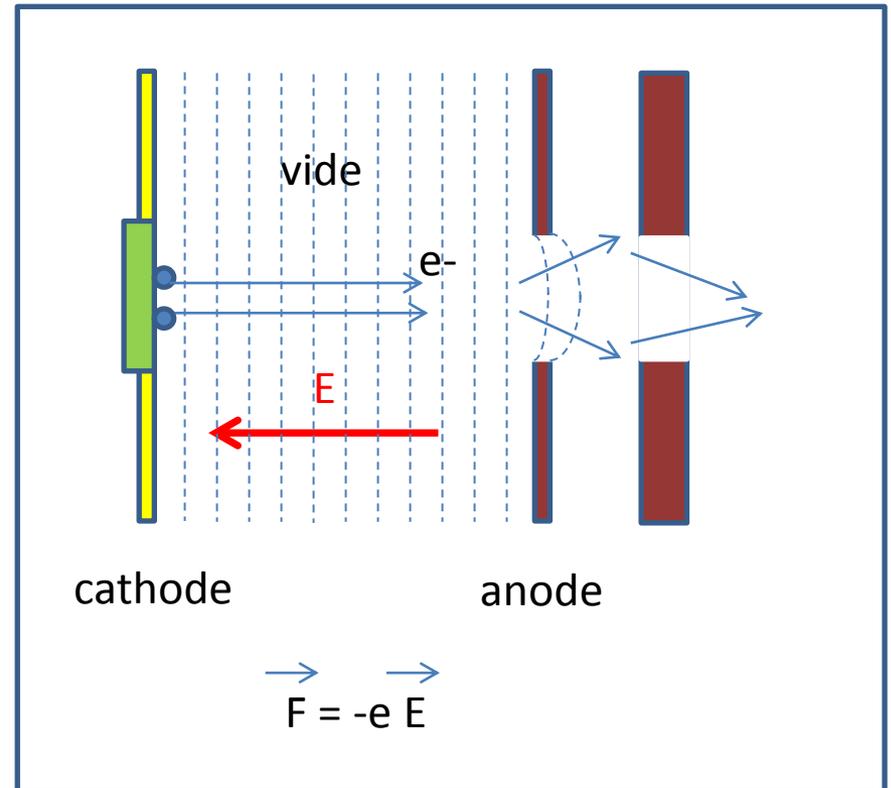
# Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

Comment fait-on un canon à électrons ?

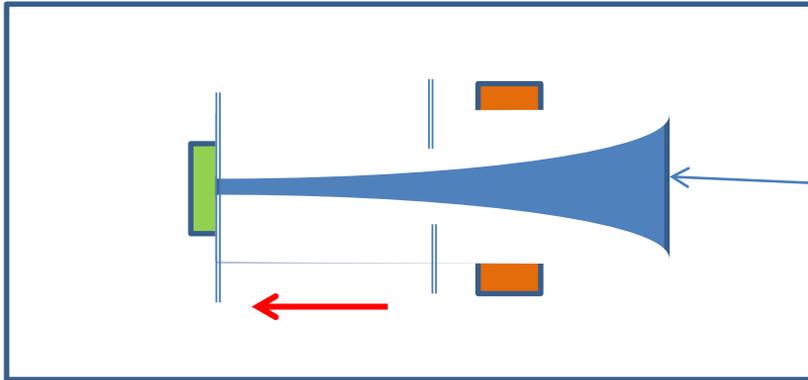
- Cathode : émetteur électrons
- Créer un champ électrique  $E$
- Faire un trou !
  - o déformation lignes de champ
  - o défocalisation du faisceau
  - o focalisation nécessaire

- Focaliser

- o électrostatique (Einzel)  
( énergie  $\sim \text{keV}$ )
- o magnétique (solénoïde, quadrupôle)  
( énergie  $\sim \text{MeV}$ )



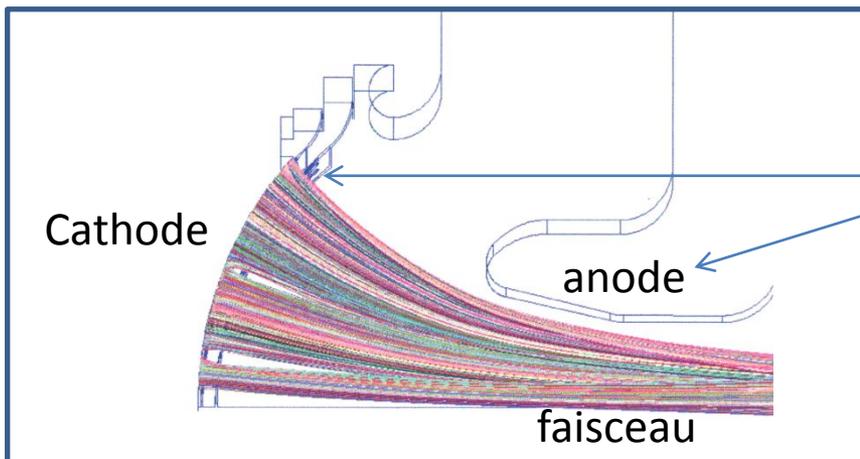
# Comment fait-on Un faisceau d'électrons ?



Caractérisation :

- Courant (moyen) : Nbre e-/s
- Taille et divergence = émittance
- Brillance = courant/émittance

Problème : les électrons se repoussent ! : divergence du faisceau



Modification géométrie plaques //  
en géométrie plus complexe :

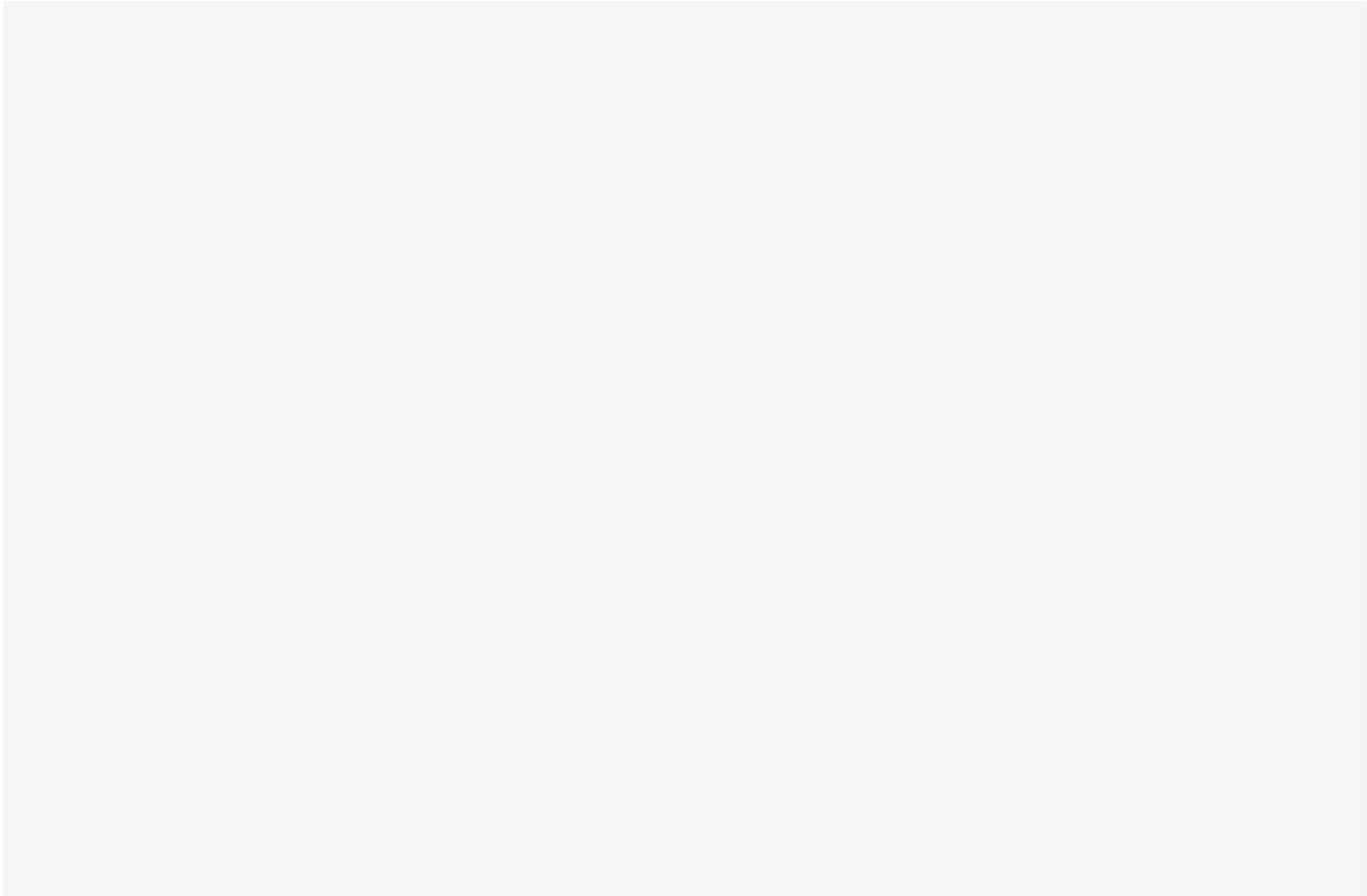
Modifie ligne de champ E

→ Géométrie de Pierce (1954)

JR Pierce

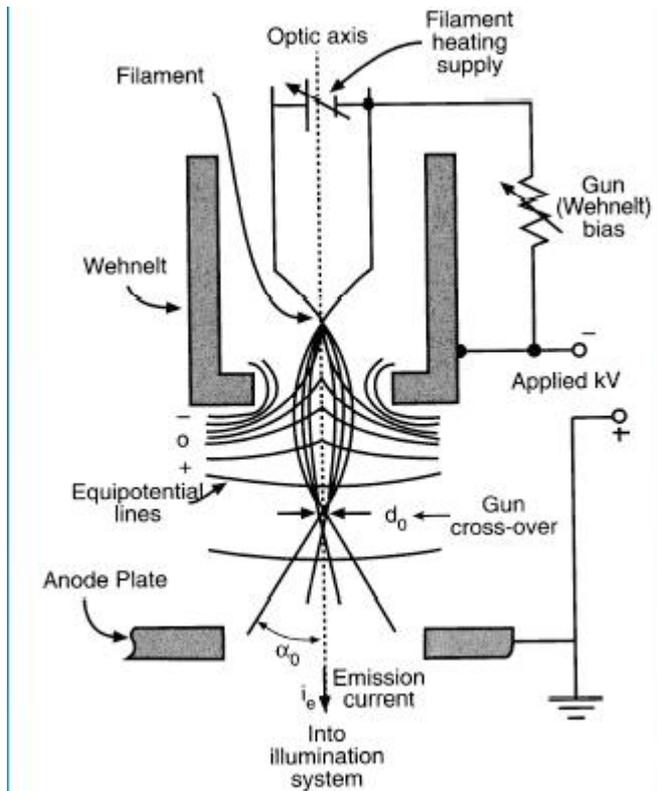


# Exemple Faisceau électrons

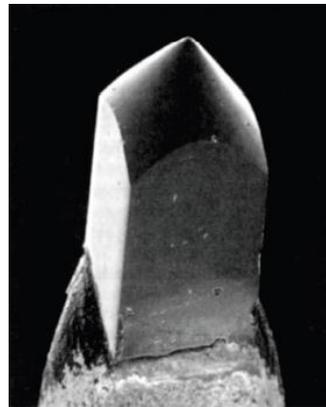


Tube de Crookes (1870)

# Exemple canon



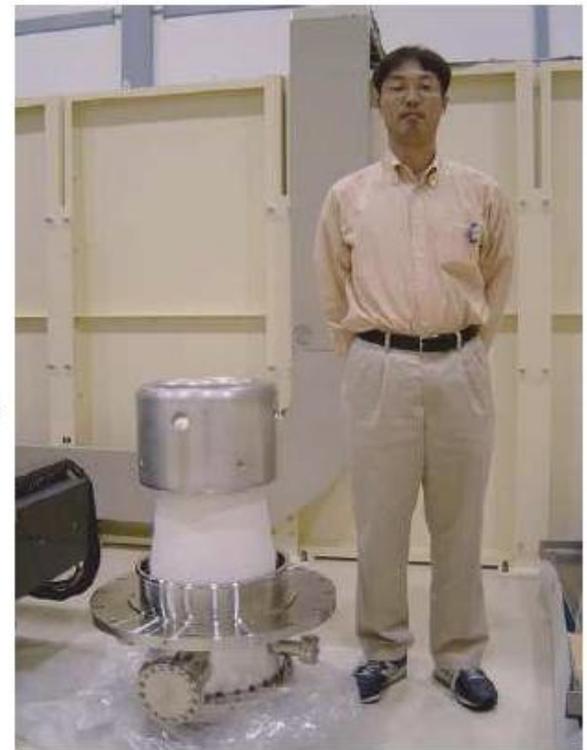
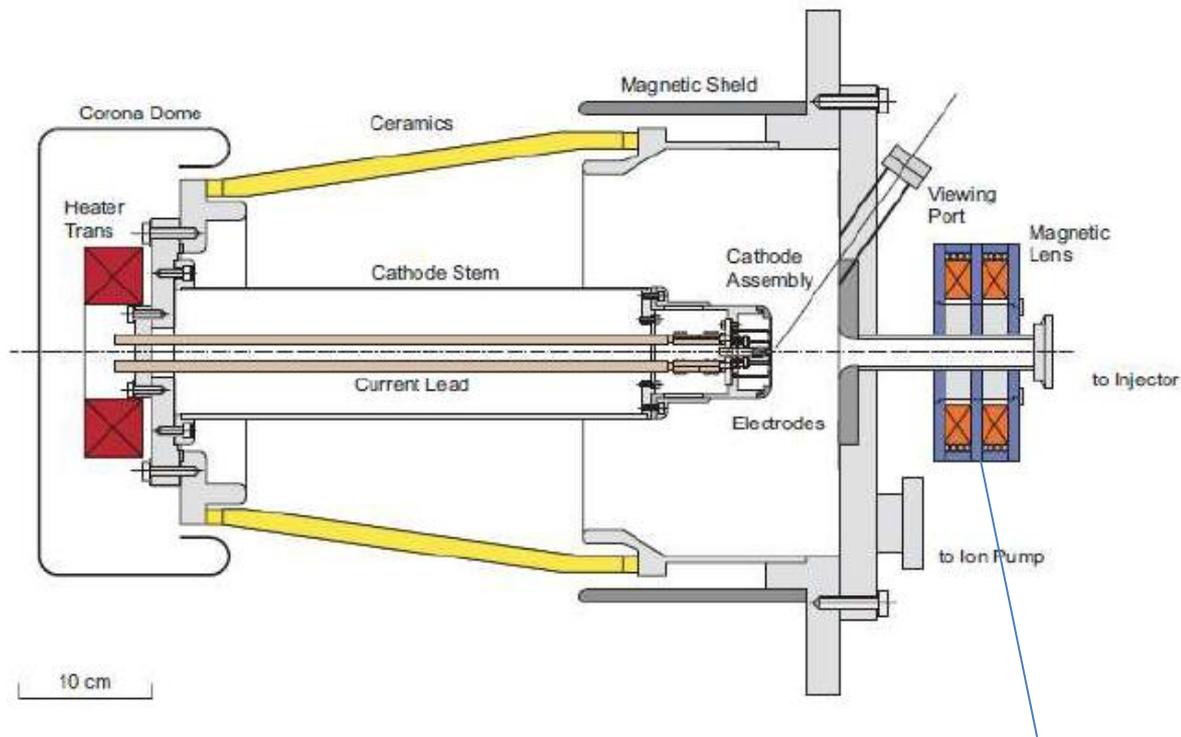
W (tungstène)



LaB<sub>6</sub>



# Exemple canon



focalisation

Image : T Shintake

# Qualités du faisceau recherchées

## Qualités recherchées

- Faisceau **Intense** : courant élevé
  - Cathode **robuste** : longue durée de vie
  - Faisceau **Brillant** :  $> 10^{13} \text{ A}/(\text{m.rad})^2$
  - Durée **impulsion courte**
- Industrie** (grouped with Intense and robuste)
- Recherche** (grouped with Brillant and impulsion courte)
- $> 100 \text{ mA}$  (linked to Intense)
- $> 1 \text{ mois}$  (linked to robuste)
- $< 1 \text{ ns}$  (linked to impulsion courte)

## Recherche

- Injecteurs grands accélérateurs
- Soudure cavité supraconductrice
- Source RX
- MEB (Microscope Electronique)
- ...

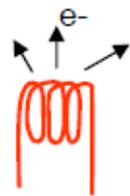
## Industrie

- Soudure
- Évaporation métaux
- Production RX : contrôle non destructifs
- Stérilisation matériel médical
- Traitement de surface matériaux
- Polymérisation (protection câbles)
- Écrans TV, oscillo (disparaissent)
- ...

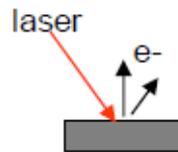
# Processus d'émission

A partir de la matière **stable** :

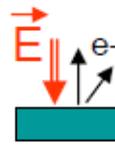
- Si on **chauffe** suffisamment      émission **THERMO-IONIQUE**
- Si on **éclaire** suffisamment      émission **PHOTOELECTRIQUE**
- Si on applique un fort **champ électrique**      émission **DE CHAMP**
- autres : émissions ferroélectrique, plasma, ...



THERMO-IONIQUE



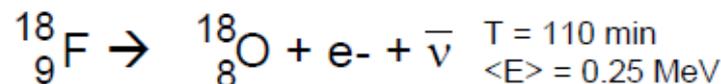
PHOTOELECTRIQUE



DE CHAMP

→ Plusieurs processus peuvent avoir lieu en même temps

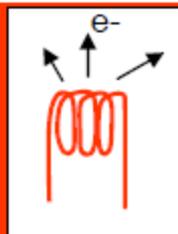
Si la matière est **instable** naturellement : radioactivité  $\beta^-$        ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^- + \bar{\nu}$



Spectre en énergie de l'électron et continu  
Temps émission 30 s à 30 ans

**Sources  
THERMOIONIQUES**





# Emission Thermoionique

Loi de Richardson (1902)

$$J_s = A T^2 e^{-W/(kT)}$$

$J_s$ : densité de courant	[A/cm <sup>2</sup> ]
$A$ ~ constante ~ 120	[A/cm <sup>2</sup> /K <sup>2</sup> ]
$T$ : température	[K]
$k$ : constante de Boltzmann	[eV/K]
$W$ : travail de sortie	[eV]

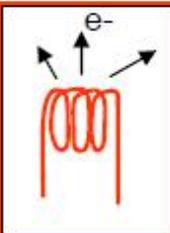
Pour **augmenter**  $J_s$  :  $T \uparrow$   $W \downarrow$

Matériau avec  $T_{\text{fusion}}$  élevée et  $W$  faible : **corps pur n'existe pas !**

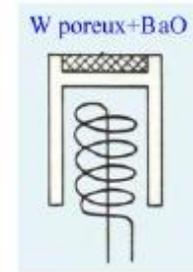
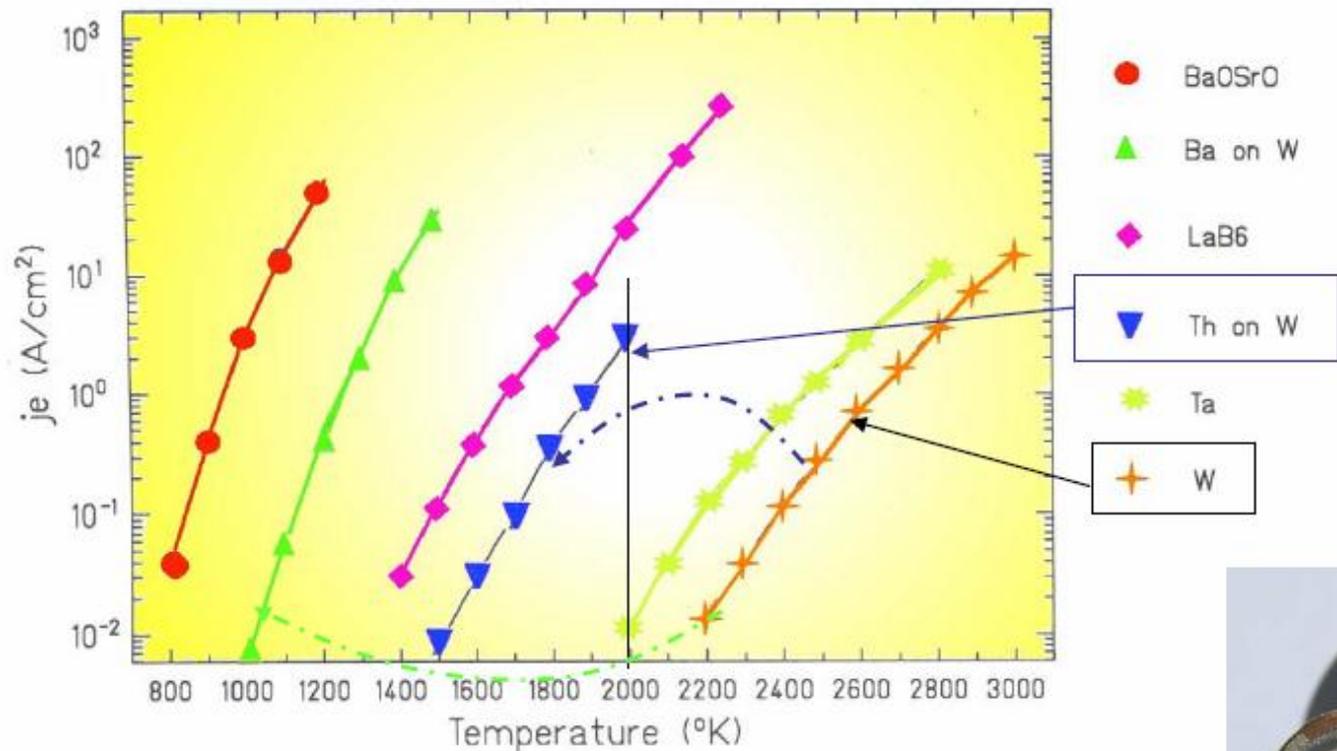
En pratique : matrice en matériau réfractaire + élément chimique qui rend  $W$  plus faible (**activation**)

En unité pratique :  $J_s \sim 120 T^2 e^{-11600 W/T}$        $T$  [K],  $W$  [eV]

Exemples : pour Tungsten pur  $T = 2000$  K,  $W = 4.5$  eV  $J_s \sim 0.005$  A/cm<sup>2</sup>  
Tungsten W+Th  $T = 2000$  K,  $W = 3.2$  eV  $J_s \sim 4$  A/cm<sup>2</sup>



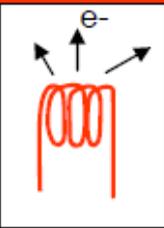
# Cathodes Thermoioniques



$\phi_s = 1.94 \text{ eV}$   
 $\phi_W = 4.53$   
 $\phi_{BaO} = 1.57$   
 $\phi_{LaB_6} = 2.66$

Diminution de  $\phi$  et de  $T^\circ K$  de travail → Durée de vie augmentée

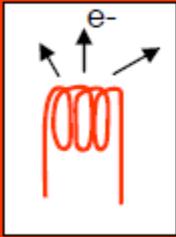




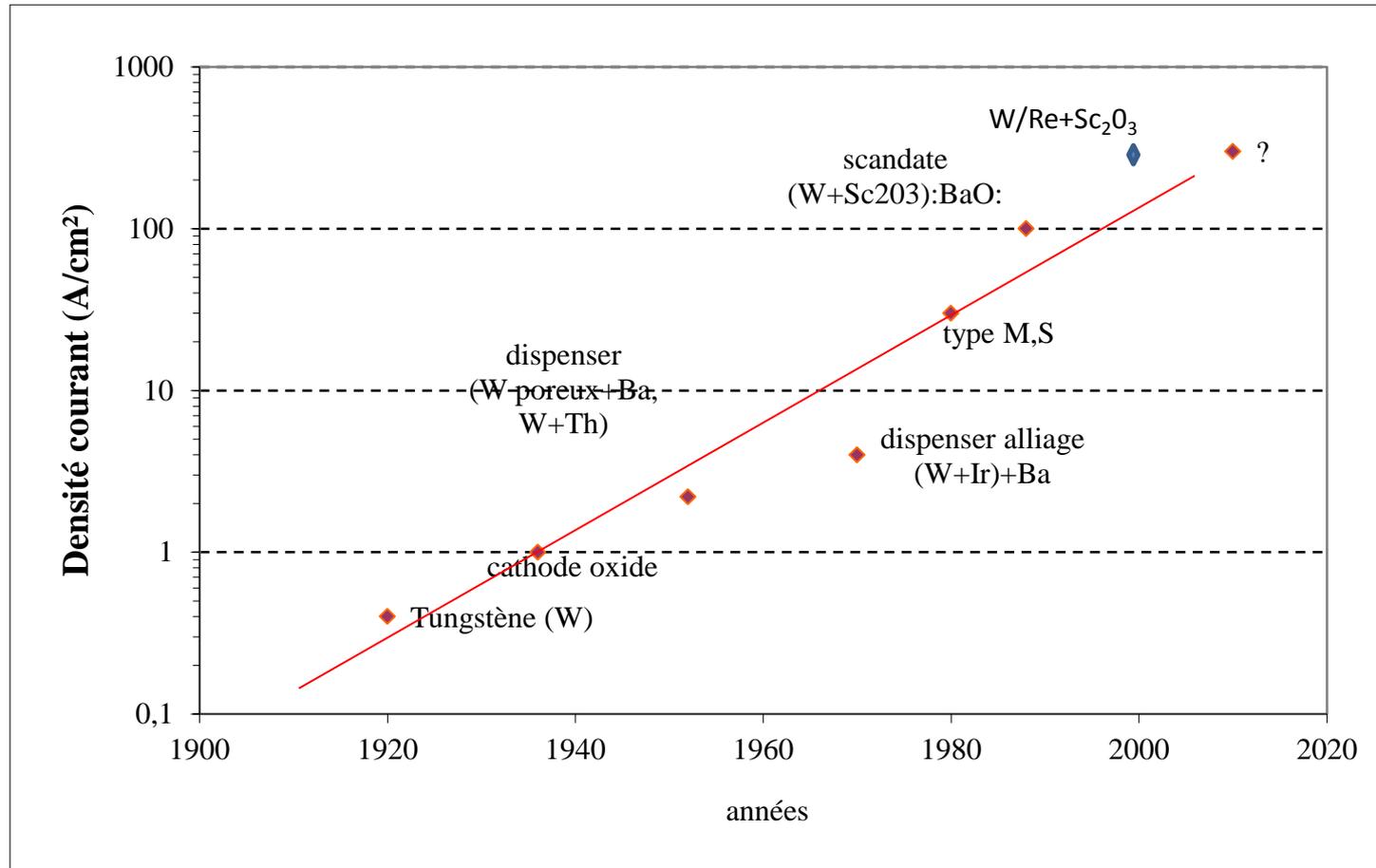
# Cathodes Thermoioniques

Composé	Matrice	Température (K)	Travail Sortie (eV)	Durée Vie (h)
ThO <sub>2</sub> W <sub>2</sub> C fritté	W <sub>2</sub> C	2200	2.7	10000 (3-4 ans)
BaO + SrO Dispenser L	W	1400	2.0	50000 (15 ans TV)
(BaO,CaO) <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> W imprégné	W	1300	2.0	50000 (klystron)
LaB <sub>6</sub>	Ta	1700	2.8	1000

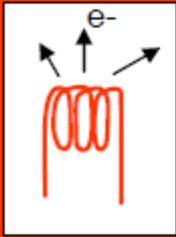
Température de travail pas trop élevée : dégazage, dégradation  
Bonne durée de vie > 10000 h  
Si vide est mauvais  $P > 10^{-5}$  mbar : cathode métallique



# Cathodes Thermoioniques



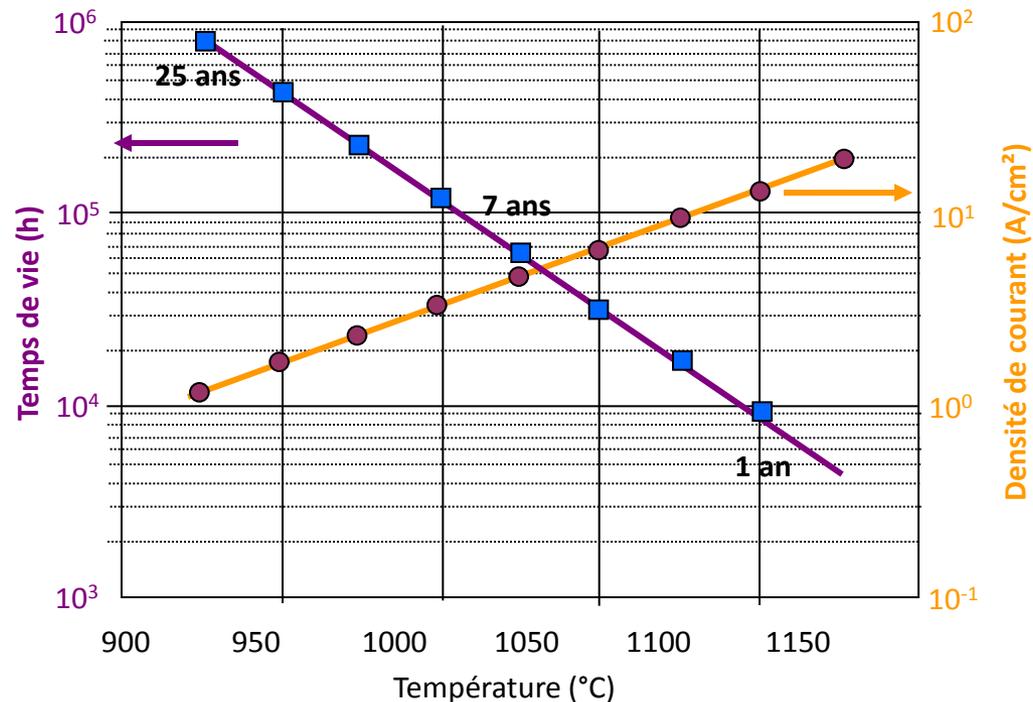
Densité de courant maximale atteinte en fonction des années



# Cathodes Thermoioniques

Durée de vie d'une cathode de type M

Matrice de  $[W \text{ poreux}] + 5BaO : 3CaO : 2Al_2O_3$



Durée de vie = temps ou bout duquel on observe une baisse de 10% du courant

# Durée de vie

La limitation de la durée de vie est due à

- La haute température : stress thermique pour la matrice et pour la couche d'activation (évaporation)
- La pollution de surface : l'activation se transforme en contamination à cause du vide résiduel
- bombardement éventuel de la surface de la cathode

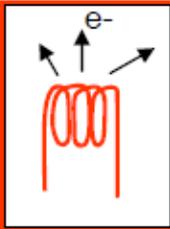
La durée de vie d'un appareil utilisant une source thermoionique d'électrons est généralement la durée de vide de la cathode

Le nombre d'électrons est **infini** (très grand) : le tarissement n'est pas du au nombre fini d'électrons mais aux conditions d'extraction qui changent

Une cathode n'est pas un réservoir infini, mais **fini** d'électrons qui se vide Plus ou moins rapidement suivant l'intensité et la fréquence d'utilisation

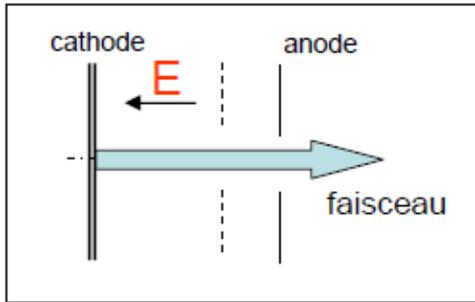


La source se tarie !



# Canons Thermoioniques

## Principe du canon

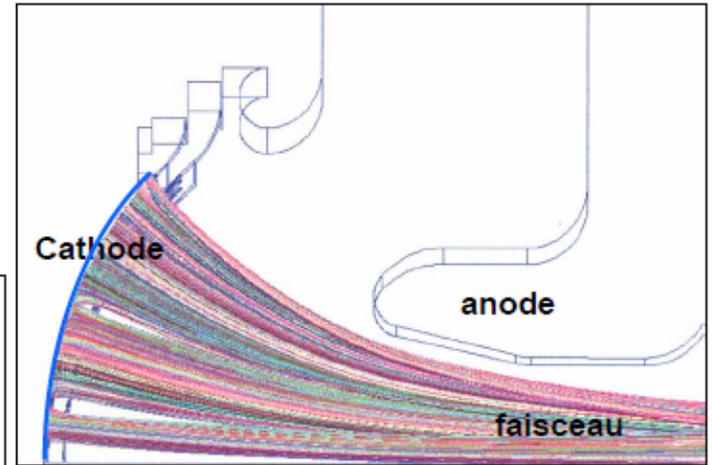


V : 10 à 1000 kV

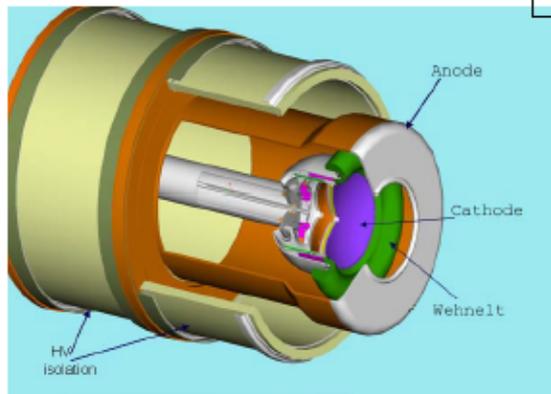
Child-Langmuir

$$I = P V^{3/2}$$

I : courant [A]  
V : tension [V]  
P : pervéance [ $A/V^{3/2}$ ]  
P=géométrie



Les cathodes sont généralement sphériques  
**Canons géométrie de Pierce**

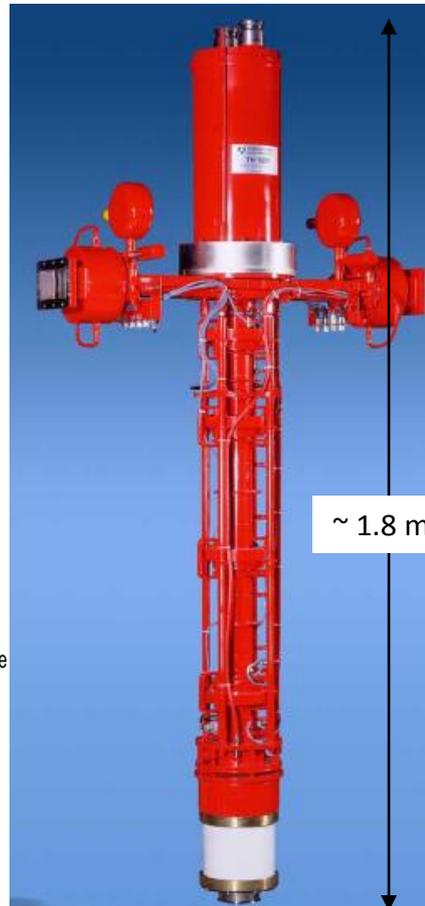
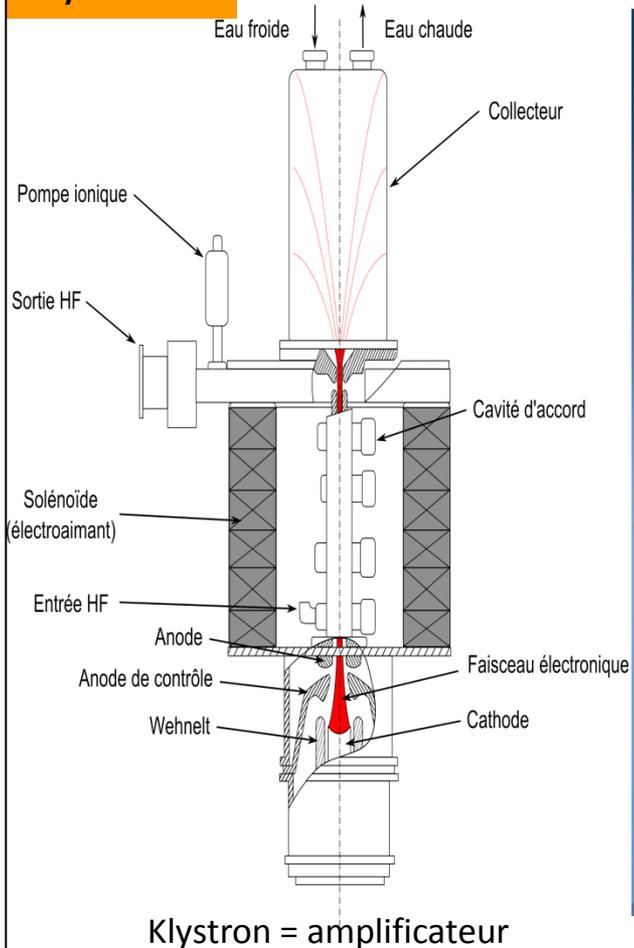


Le plus d'applications industrie + recherche

→ Robustesse + durée de vie

# Applications

## klystrons



PV reception 30 nov 1993 - TH2040E n° 24132

			1
Vf	V	tension chauffage	39
$\Delta Vf/Vf$	%		
If	A	courant chauffage	15,5
Pf	W	Puissance chauffage	604,5
$\Delta Pf/Pf$	%		
Vk cr	kV	tension faisceau	232
Ik cr	A	courant faisceau	238
Va	kV	tension anode	
la	mA	courant anode	
Z	Ohm	impédance faisceau	975
$\mu P$		micropervéance	2,13
fr	Hz	fréquence répétition	150
Pct	kW	puissance moyenne corps	1
lct	mA	courant corps	
<b>Ps moy</b>	<b>kW</b>	<b>puissance moyenne RF sortie</b>	<b>11,3</b>
tp V	$\mu S$	largeur Vk à 75%	3,7
tp F	$\mu S$	largeur RF à -3dB	3
Fo	MHz	fréquence RF	2998,5
Pecr	W	puissance crête RF entrée	130
<b>Pscr</b>	<b>MW</b>	<b>puissance crête RF sortie</b>	<b>25,1</b>
$\Delta Pscr$	dB	bande passante	
<b>G</b>	<b>dB</b>	<b>gain</b>	<b>52,9</b>
Rdt	%	rendement	45,5%
Ifoc1	A	courant foc1	
Ifoc2	A	courant foc2	
Ifoc3	A	courant foc3	
<b>Ifoc</b>	<b>A</b>	<b>courant foc unique</b>	<b>17,5</b>
<b>Ipi</b>	<b><math>\mu A</math></b>	<b>courant pompe ionique</b>	<b>&lt;1</b>

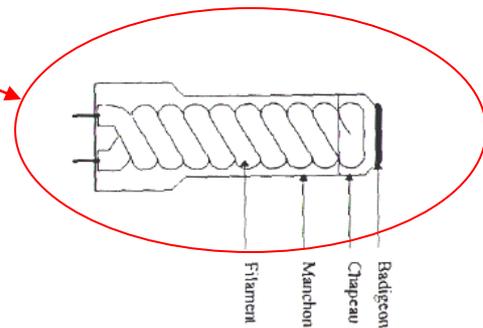
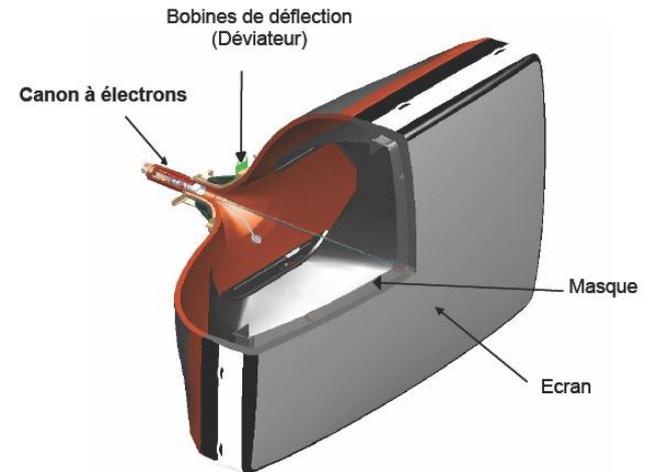
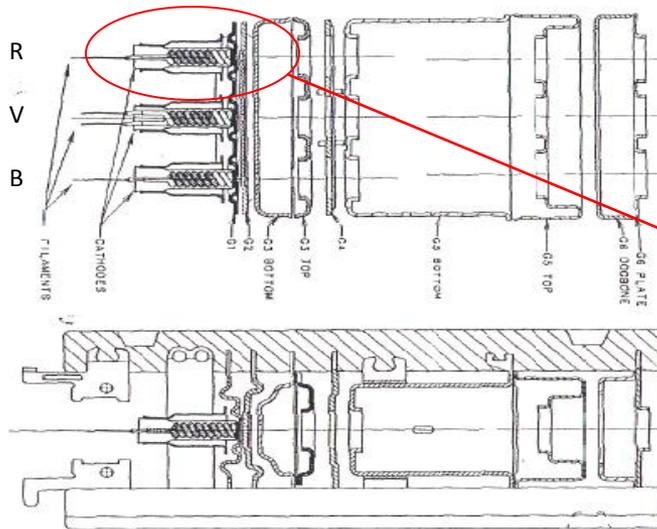
Cathode type M

Durée vie klystron = durée vie cathode

Garantie constructeur ~ 5000 h

# Applications

## Canon électrons écran TV



Cathode  $I \sim \text{mA}$

$T \sim 1000 \text{ K}$

Cathode à oxydes

# Applications

Canon pour LINAC

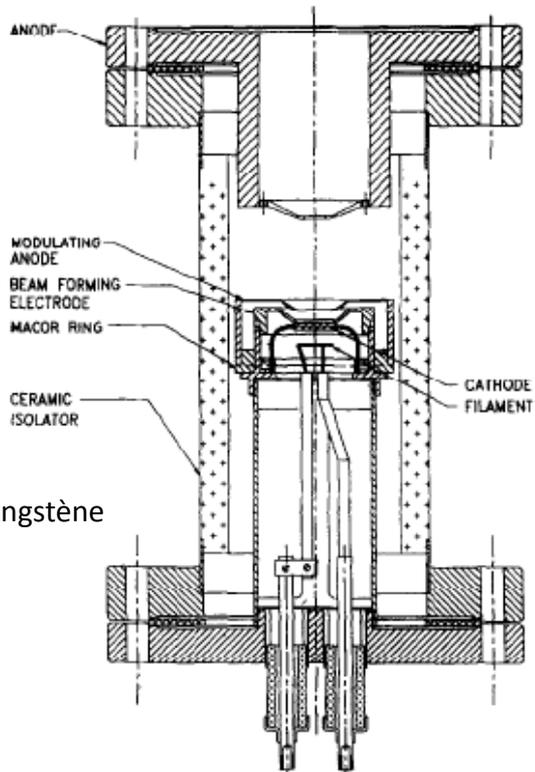
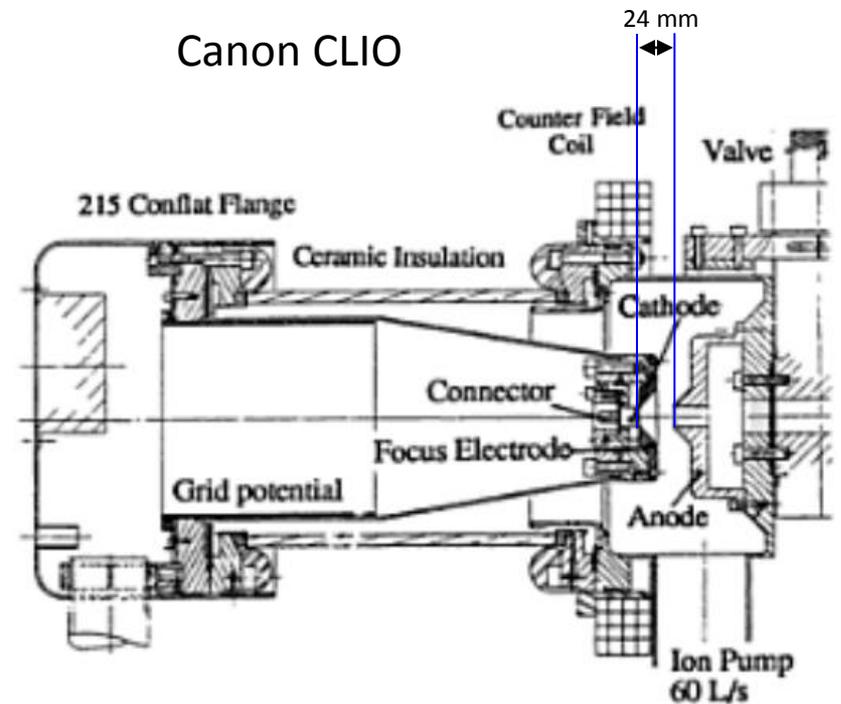


Fig. 1. Electron gun structure and assembly.

$I = 120 \text{ mA}$   $t = 2.6 \mu\text{s}$   $F = 1 \text{ Hz}$   $E = 40 \text{ keV}$

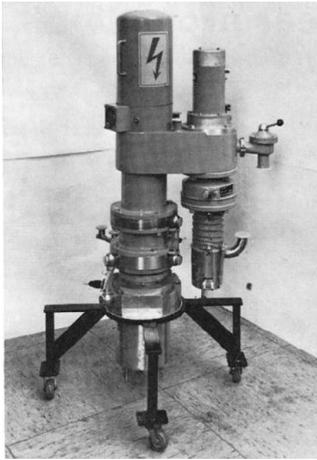


Cathode dispenser – canon Pierce

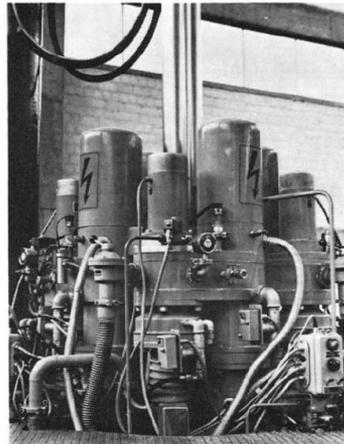
$I = 1 \text{ A}$   $t = 1 \text{ ns}$   $F = 500 \text{ MHz}$   $E = 90 \text{ keV}$

# Applications

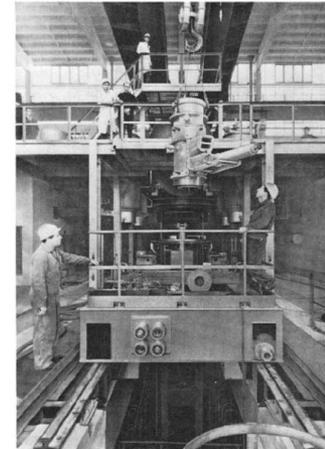
## Canon pour fusion métaux



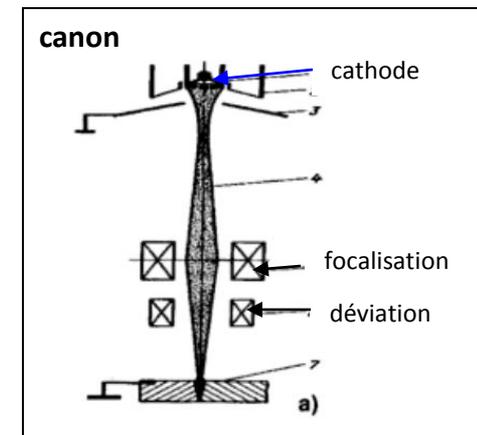
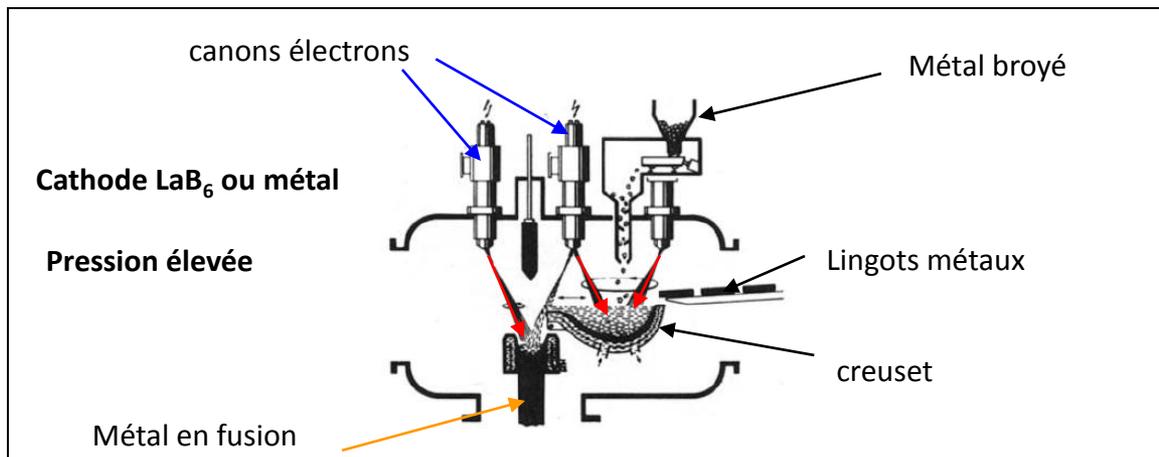
200 kW - 20 kV



4x140 kW - 20 kV

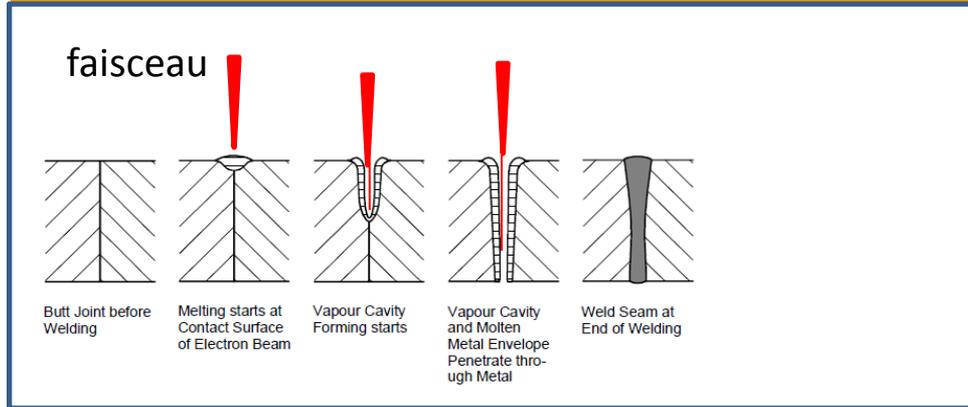


1.7 MW



# Applications

## Soudure par faisceau d'électron (electron beam welding)



$$P \sim 1\text{MW}/\text{cm}^2$$

Epaisseur soudée : 0,02 à 100 mm

Utilisé :

- Aéronautique
- Centrale nucléaire
- Médical
- Industrie auto
- Composants pour le vide
- ...



Avantages :

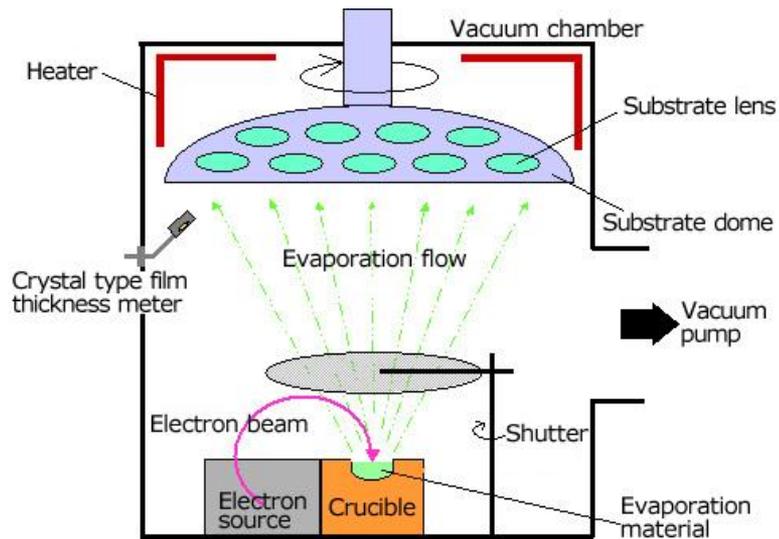
- grandes épaisseurs
- Retrait minimal
- Grande précision
- Grande vitesse de soudure

Métaux

- réfractaires
- Faiblement allié
- À grande conductibilité thermique (Cu, Al)

# Applications

Evaporation par faisceau d'électron (EBPVD Electron beam physical vapor deposition)



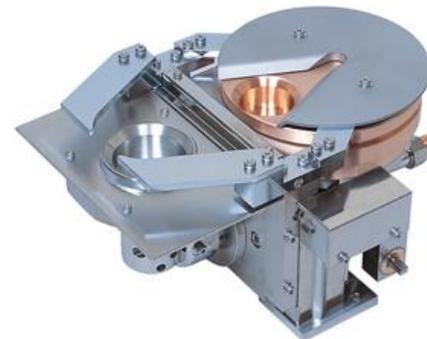
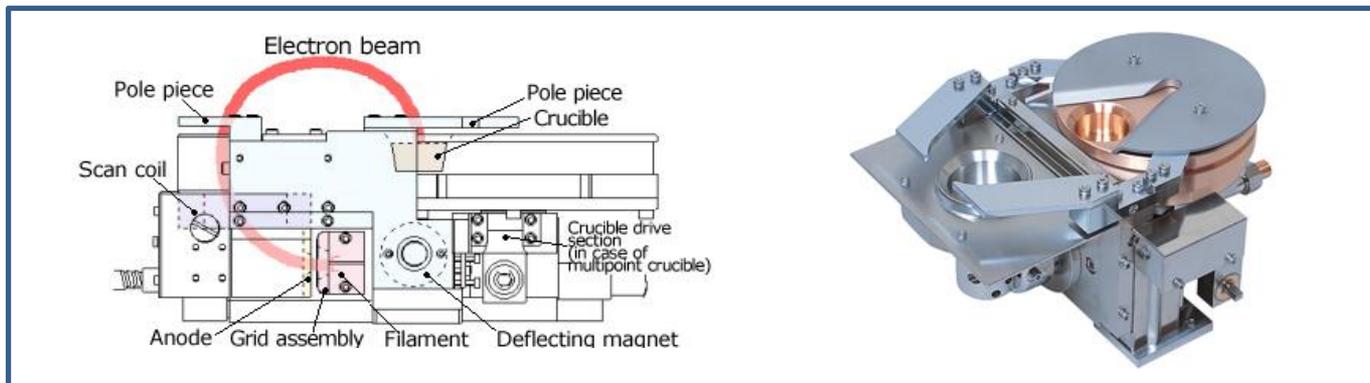
$P \sim 10 \text{ à } 100 \text{ kW}$

$E \sim 30 \text{ kV}$  courant  $\sim 1 \text{ A}$

$V_{\text{evap}} \sim 1 \text{ nm/min à } 1 \mu\text{m/min}$

Utilisé dans

- Electronique
- aéronautique
- Traitement surface miroir
- Couche protection chimique



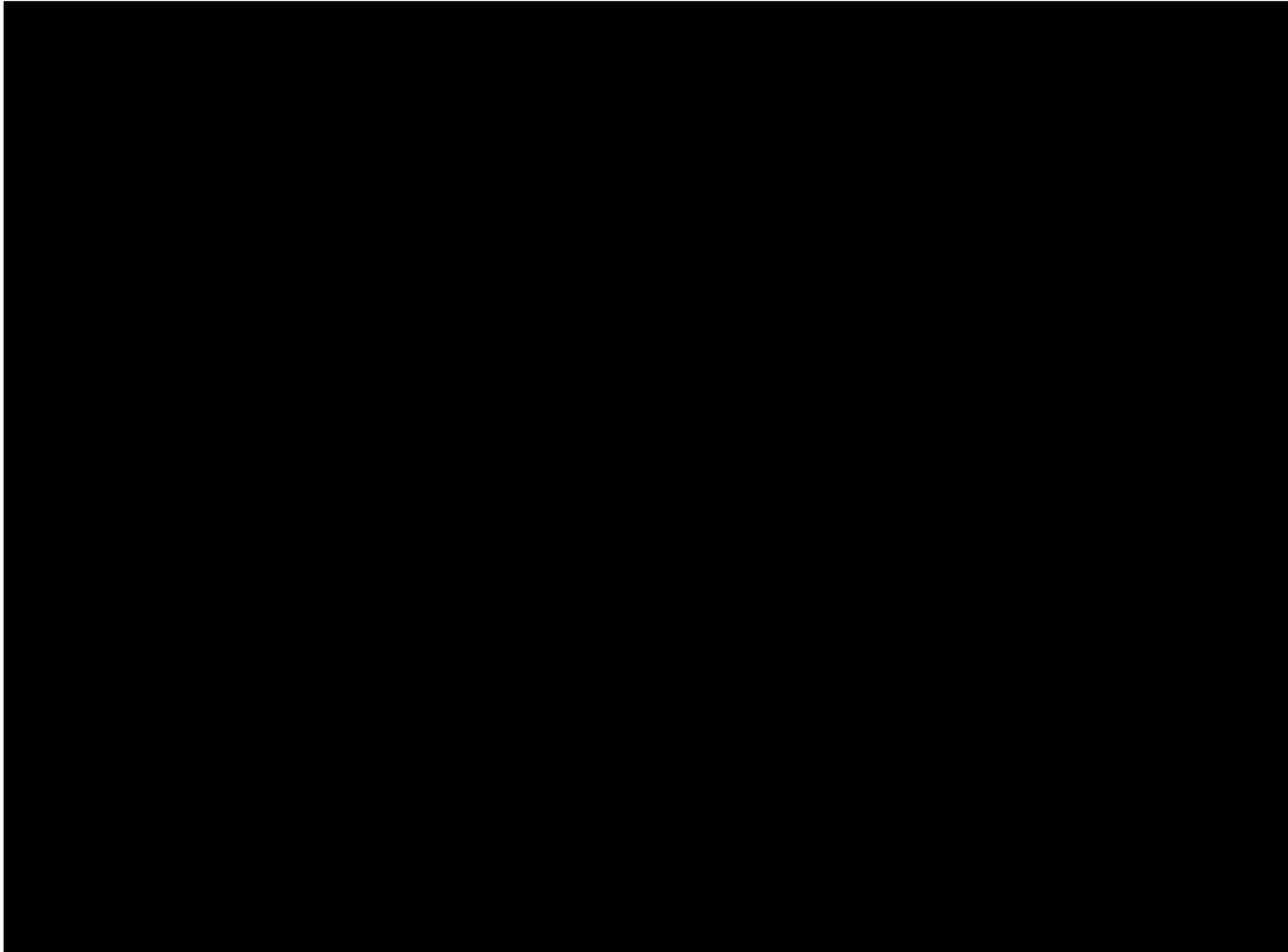
\* Métaux, alliages  
TiC, TiBr, ZrBr

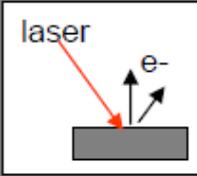
\* Co-évaporations

**LES SOURCES  
PHOTOELECTRIQUES**



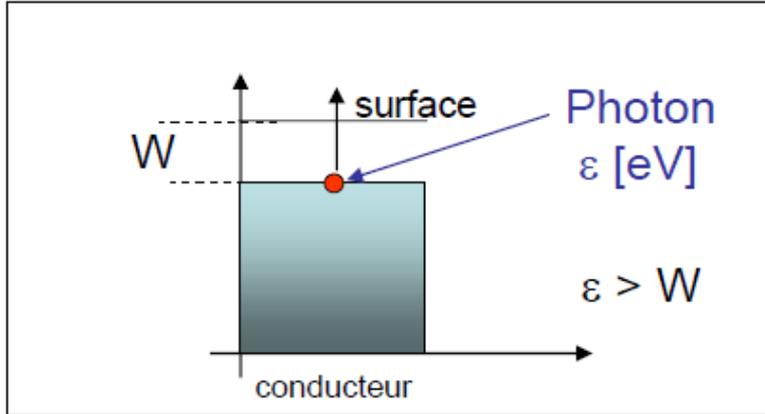
# Effet photoélectrique





# Emission Photoélectrique

Principe **photoémission** : interaction photon-électron



- Utilisation d'un **laser** (grand flux de photons)
- effet à **seuil** : longueur d'onde minimale
- Photoémission est instantanée

$$\lambda \text{ [nm]} = \frac{1240}{\varepsilon \text{ [eV]}}$$

$$800 \text{ nm} = 1.55 \text{ eV}$$

$$532 \text{ nm} = 2.33 \text{ eV}$$

$$266 \text{ nm} = 4.66 \text{ eV}$$

Modèle à trois étapes

Loi de Fowler-Dubridge

$$J_s = A T^2 I (1-R) F(x)$$

Pour augmenter  $J_s$  :  $T \uparrow$   $I \uparrow$   $R \downarrow$

Effet **photoélectrique thermo-assisté**

$J_s$ : densité de courant	[A/cm <sup>2</sup> ]
$A$ ~ constante	[A/W/K <sup>2</sup> ]
$T$ : température	[K]
$R$ : coefficient de réflexion	
$I$ : éclairement	[W/cm <sup>2</sup> ]
$F(x)$ : fonction de Fowler	

Travail de sortie  $W$

Effet photoélectrique : Einstein 1905, Fowler 1931

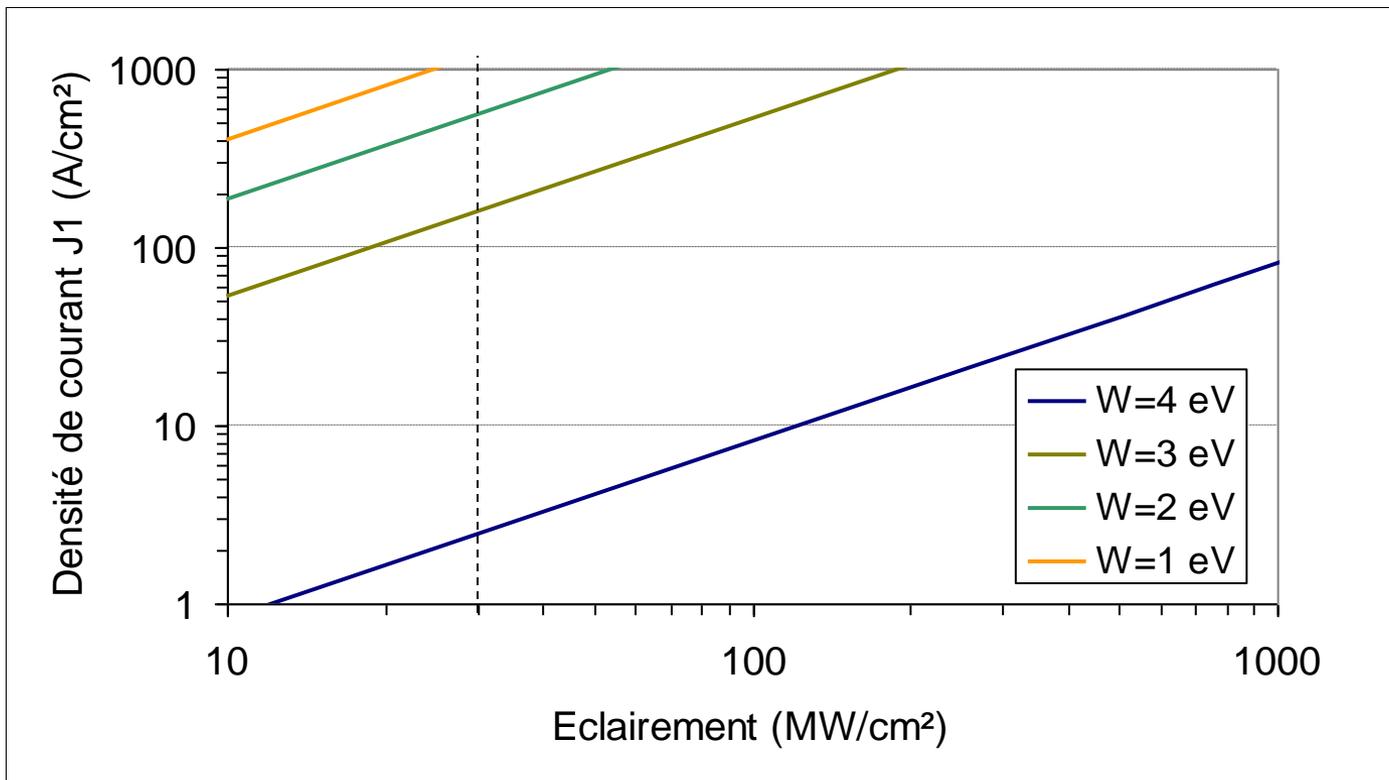
# Influence du travail de sortie

$$J_1 = A a_1 T^2 I (1-R) F(x_1) [e/\hbar\omega]$$

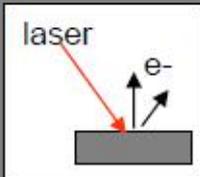
$$\lambda = 300 \text{ nm}$$
$$\varepsilon = 4.13 \text{ eV}$$

$$x = (h\nu - W)/kT$$

$$W \downarrow \quad x \uparrow \quad F(x) \uparrow$$



→ Intérêt d'utiliser un matériau à faible travail de sortie



# Cathodes Photoélectriques

Rendement photoélectrique

$$\eta = \frac{Ne}{Nph}$$

Q [C]

E [J]

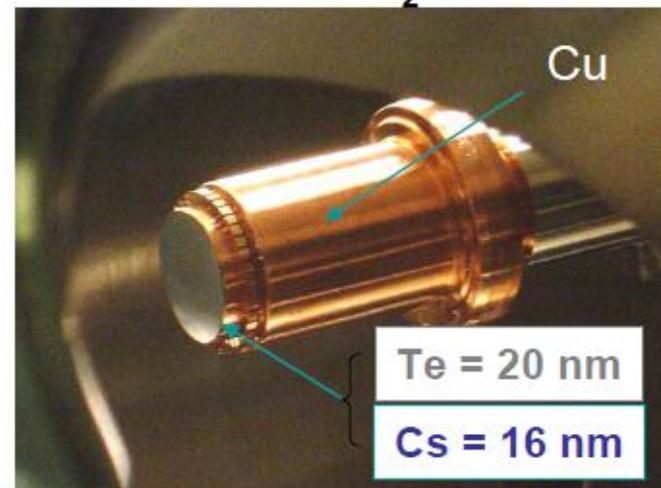
**Métaux** : - mauvais rendement  $\ll 1\%$   
+ bonne résistance

**Semi-conducteur** : + rendement  $\sim$  qlq %  
- sensibilité vide

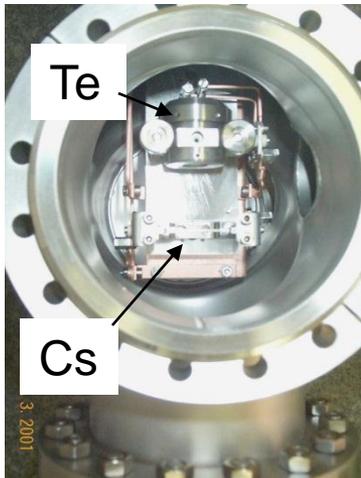
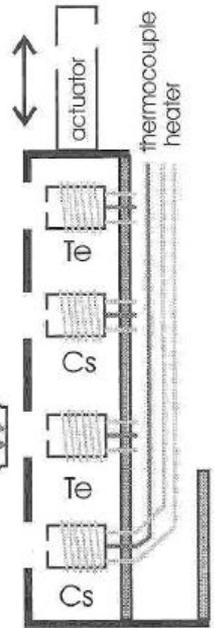
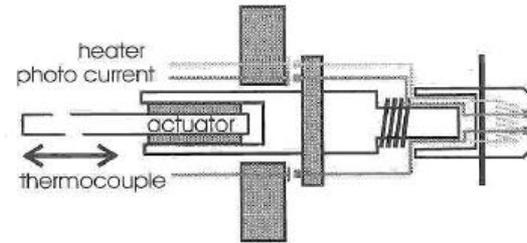
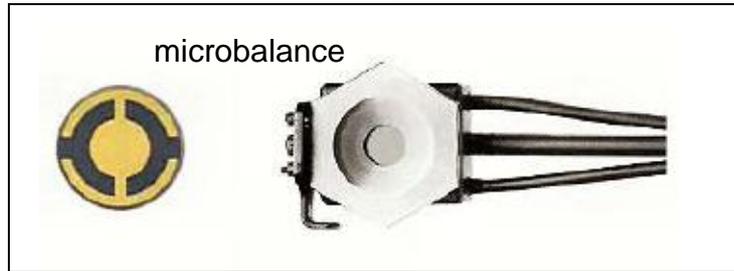
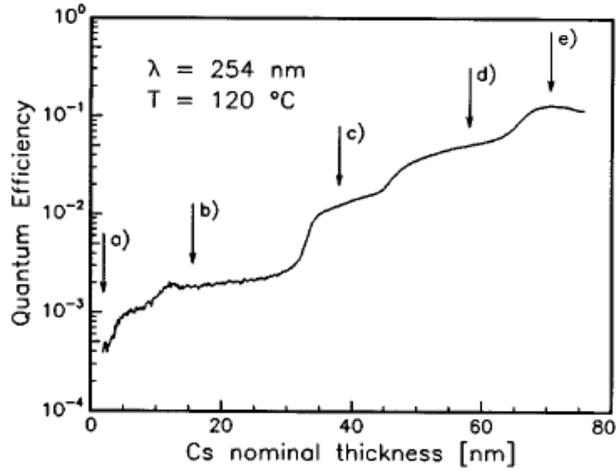
Conducteur : W travail de sortie  
ou semi-conducteur : AE+BI

Matériau	266 nm	355 nm	532 nm
Cu	$2.2 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-9}$	
Mg	$5.0 \times 10^{-5}$		
Ta	$3.0 \times 10^{-5}$		
$K_2CsSb$	$10.0 \times 10^{-2}$	$16 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-2}$
$Cs_2Te$	$8.0 \times 10^{-2}$		

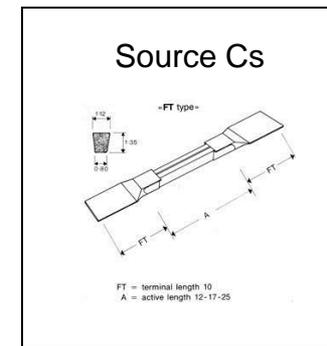
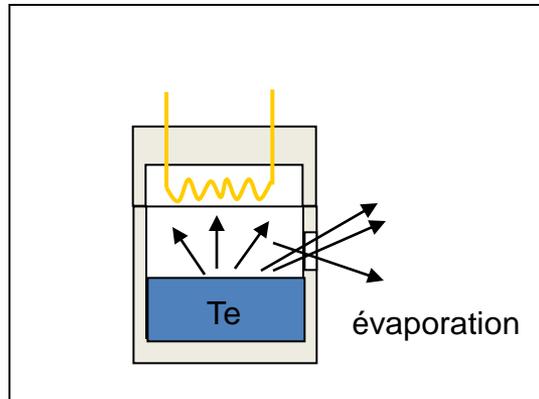
Photocathode **Cs<sub>2</sub>Te** - ELYSE



# Fabrication



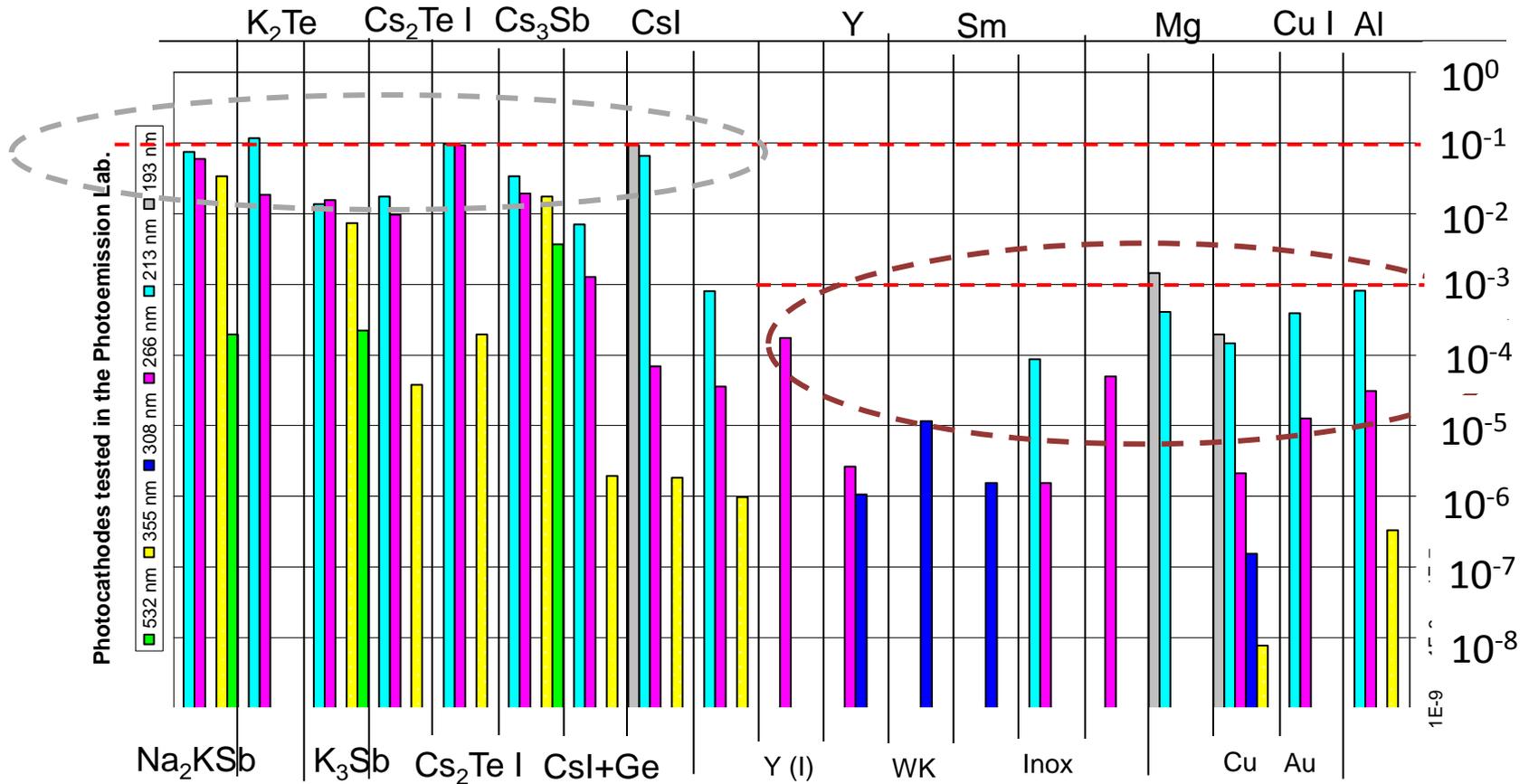
ELYSE - LCP



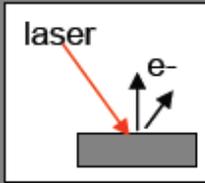
# Semiconducteur

# Métal

## Rendement quantique

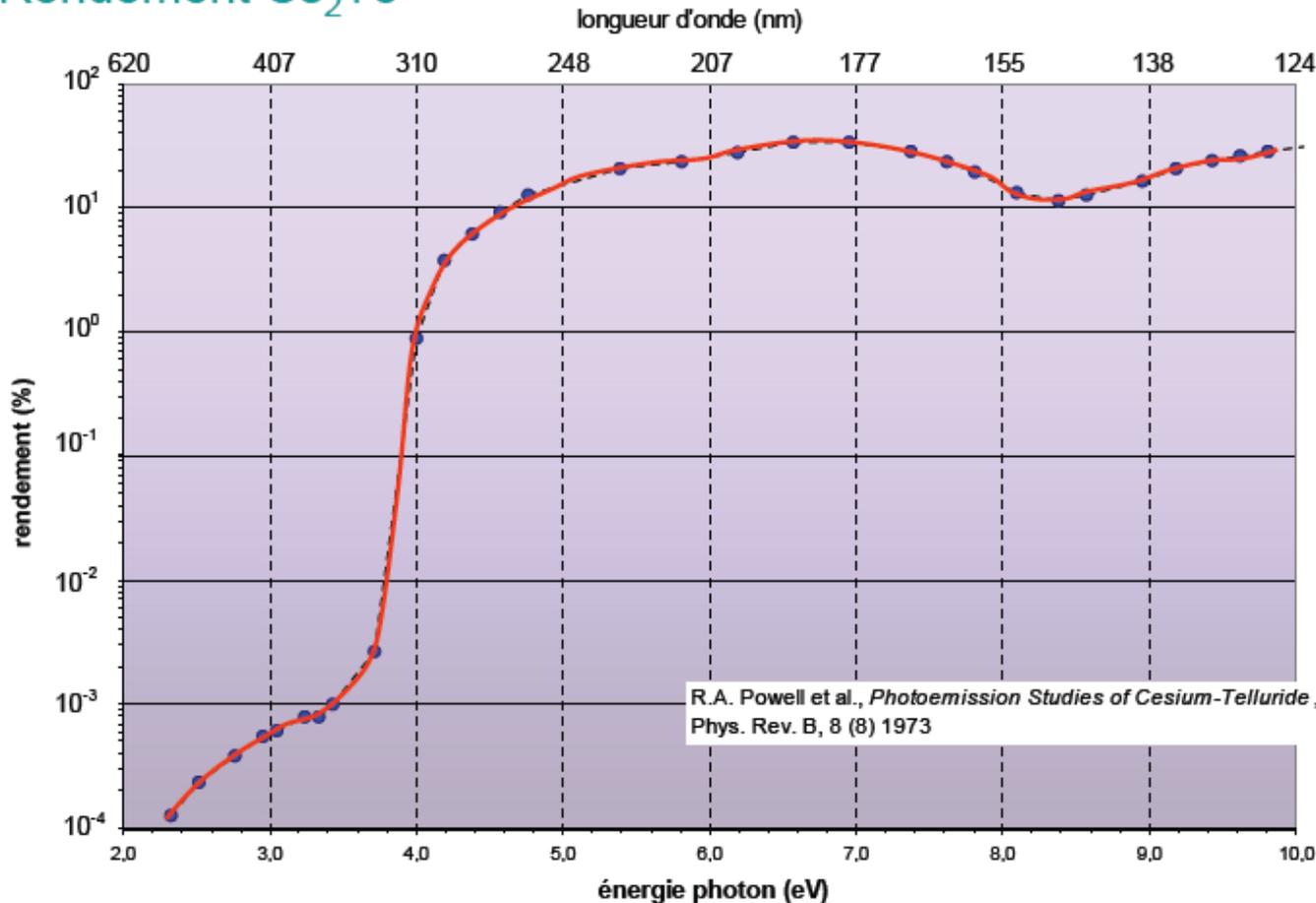


Données du CERN/CTF (G. Suberlucq)



# Cathodes Photoélectriques

## Rendement Cs<sub>2</sub>Te

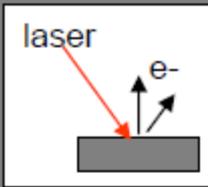


Rendement chute à l'utilisation :

- Pollution
- bombardement

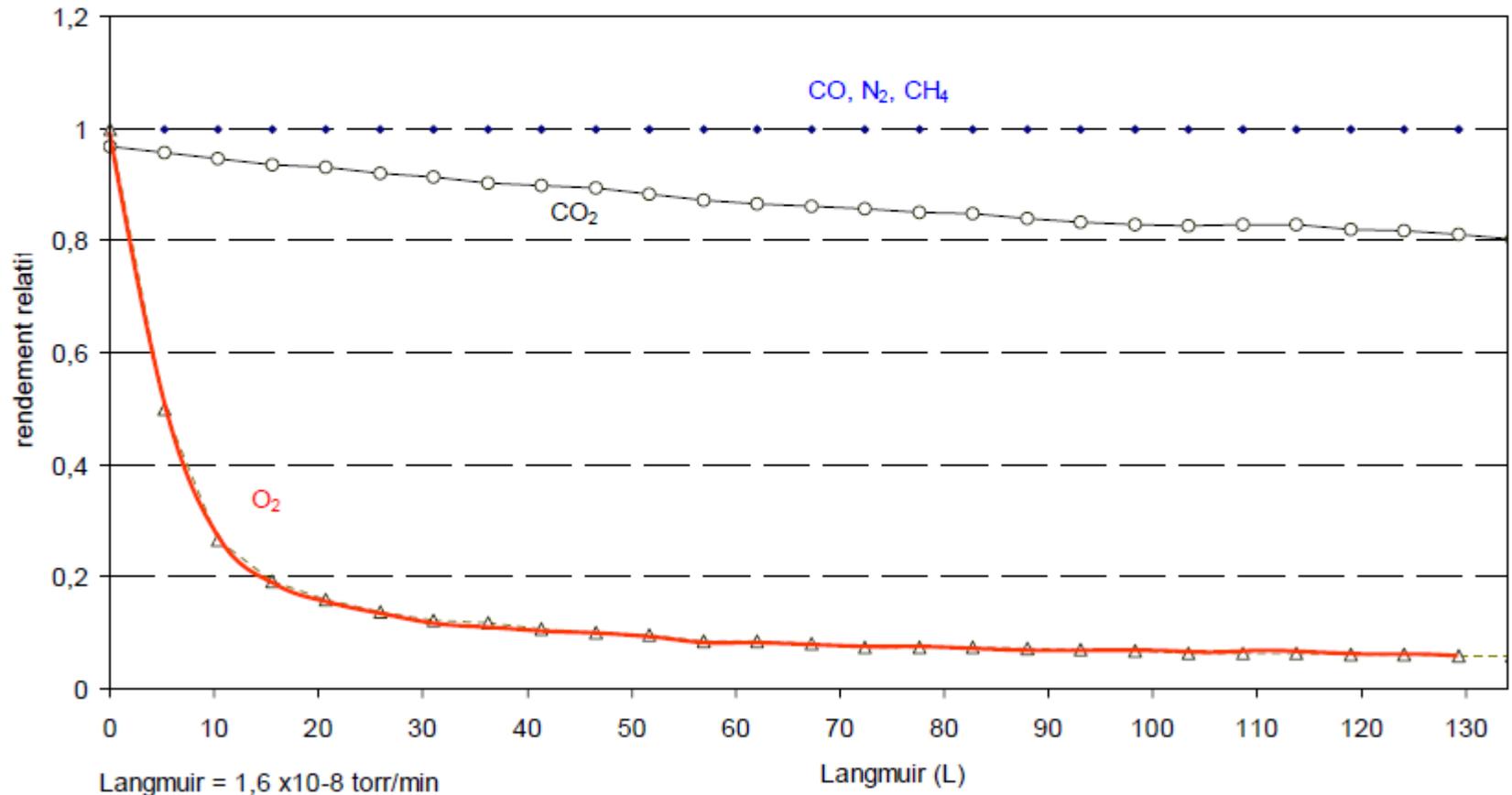
Durée de vie :  
mois... année

Dépend de l'utilisation



# Cathodes Photoélectriques

Pollution de Cs<sub>2</sub>Te par différents gaz



F. Sabary et al., Auger and X-ray photoemission study on Cs<sub>2</sub>Te photocathodes, J. Appl. Phys. 80 (5) 1996

# Durée de vie

La limitation de la durée de vie est due à

→ La **pollution de surface** : l'activation se transforme en contamination à cause du vide résiduel

→ **bombardement éventuel de la surface de la cathode**

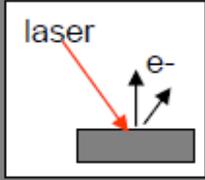
La durée de vie d'une photocathode dépend de son utilisation :

Le nombre d'électrons est **infini** (très grand) : le tarissement n'est pas du au nombre fini d'électrons mais aux **conditions d'extraction favorables qui se dégradent**

Une cathode n'est pas un réservoir infini, mais **fini** d'électrons qui se vide Plus ou moins rapidement suivant l'intensité et la fréquence d'utilisation



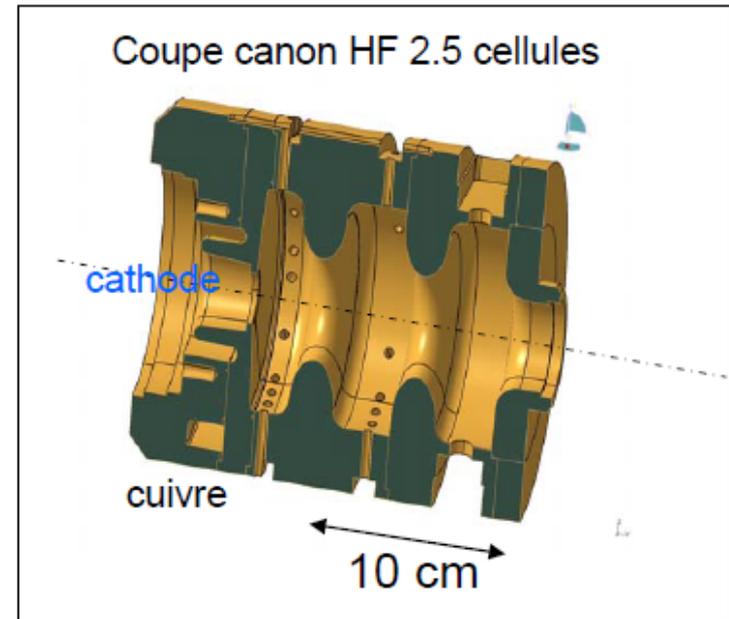
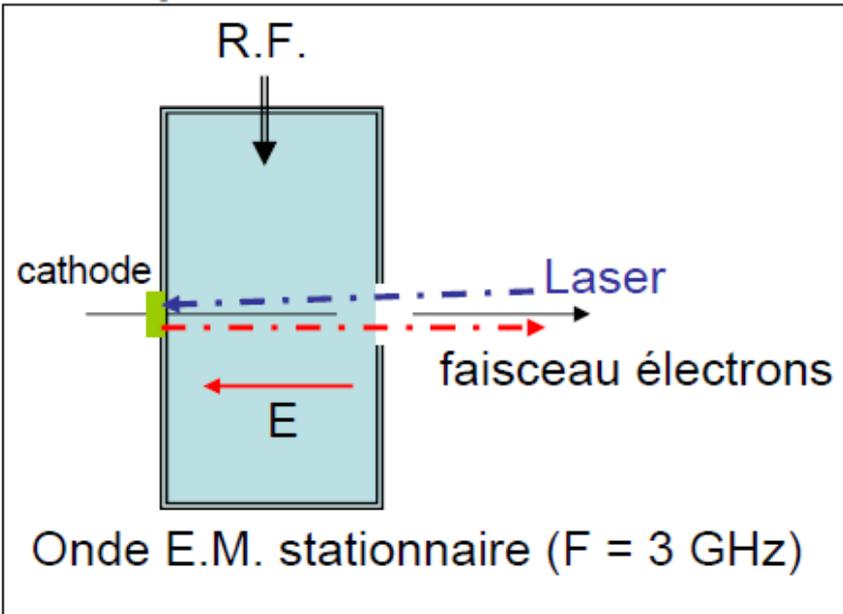
La source se tarie !



# Canons Photoélectriques

canon HF

## Principe canon HF



Design par simulation

## Avantages :

Impulsion laser courte : faisceau électrons courts (**ps**)

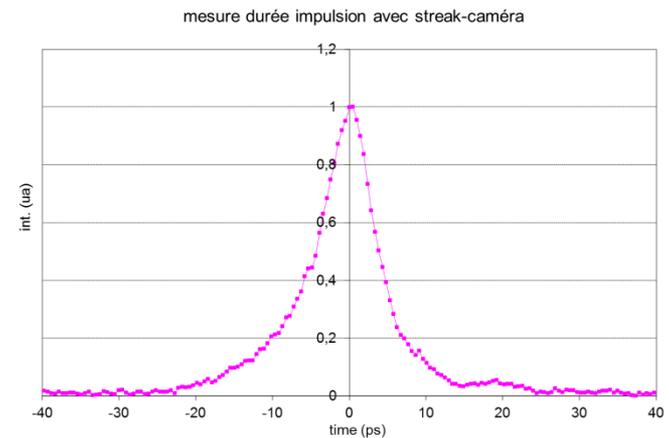
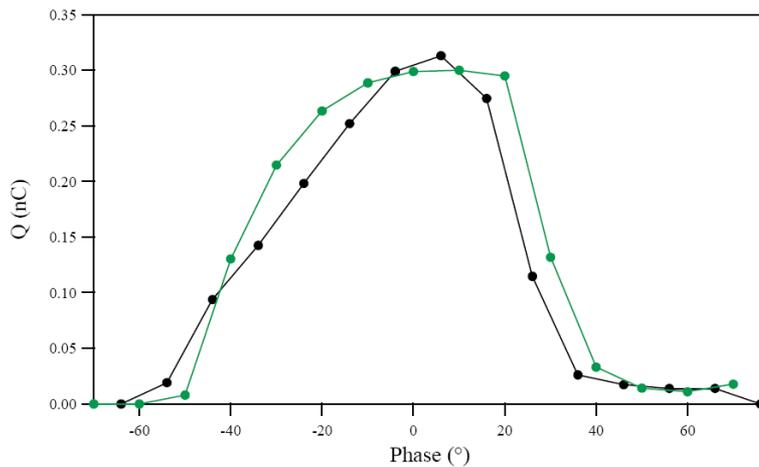
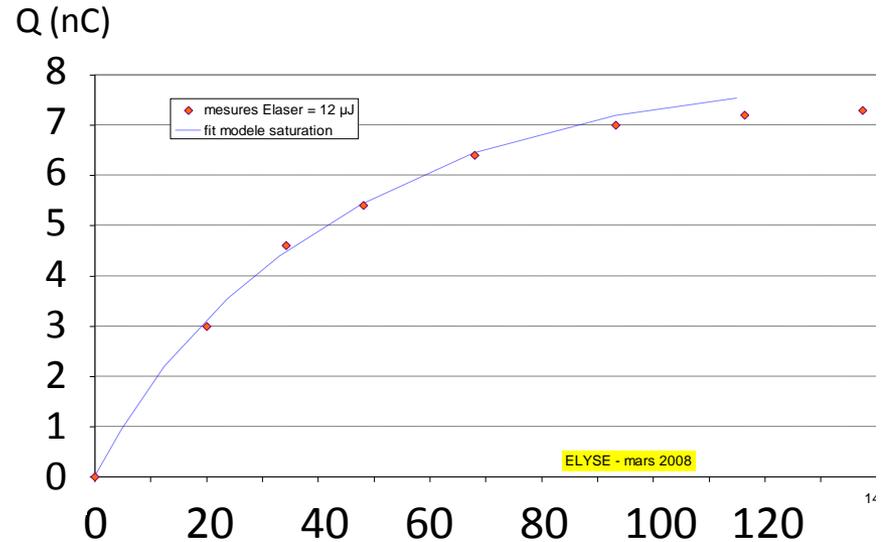
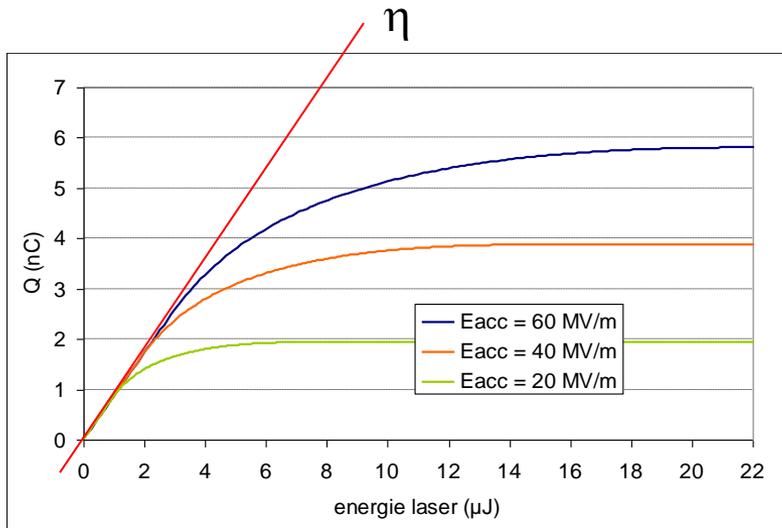
Faible dispersion énergie < **1%**

Fort gradient accélérateur : 100MV/m

**Photo-injecteurs**

$$E(z,t) = E_0 \cos(kz) \sin(\omega t + \phi)$$

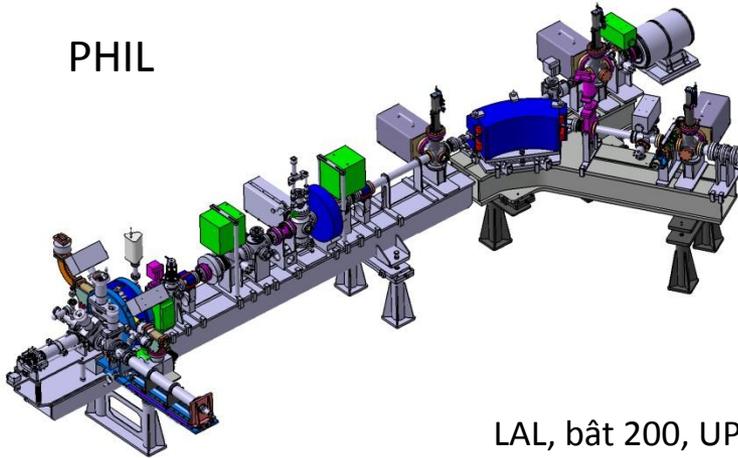
# Canon RF : mesures



Mesure durée 1 seule impulsion

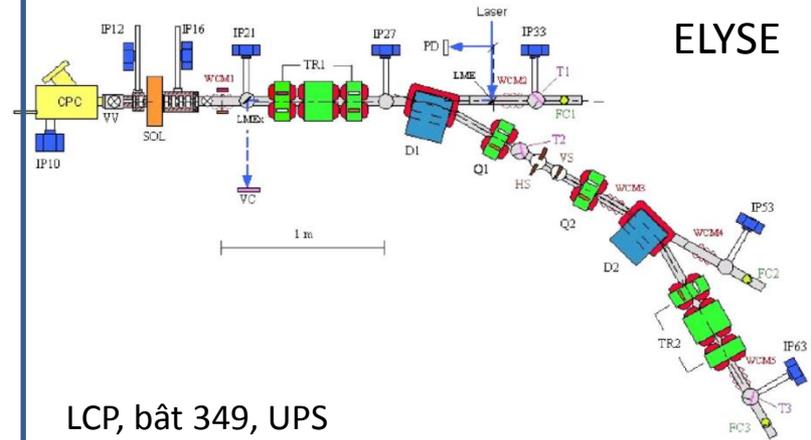
# Exemples Photoinjecteurs

PHIL



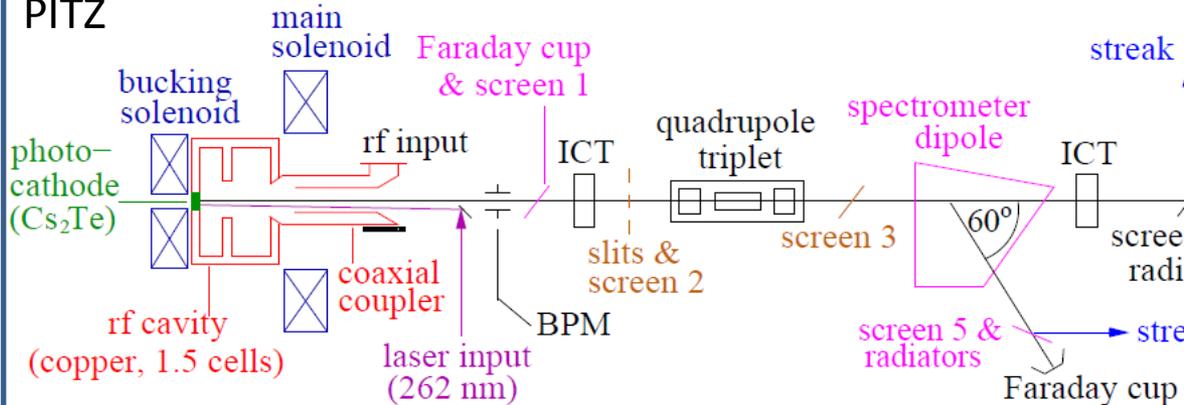
LAL, bât 200, UPS

ELYSE



LCP, bât 349, UPS

PITZ

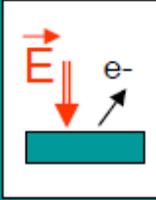


## Photo-injecteurs :

- CLIC/CERN 3 GHz
- PHIL 3 GHz
- ELYSE 3GHz
- ThomX 3 GHz
- PITZ(XFEL) 1.3 GHz
- ...

**LES SOURCES  
A EMISSION DE CHAMP**





# Emission de Champ

Application d'un champ électrique intense ( $E > 1 \text{ GV/m}$ ) **pertube** la matière : électrons **peuvent sortir** de la matière (effet tunnel)

$$J_s = k_1 \frac{E^2}{W} e^{(k_2 \frac{W^{3/2}}{E})}$$

Pour augmenter  $J_s$  :  $E \uparrow$   $W \downarrow$

$J_s$  : densité de courant [A/cm<sup>2</sup>]  
 $k_1, k_2 \sim$  constante  
 $E$  : champ électrique [V/m]  
 $W$  : travail de sortie [eV]

Matériau avec  $W$  faible : meilleur photoémetteur = meilleure émission de champ

Augmenter  $E$  : effet de pointe renforcement du champ électrique local

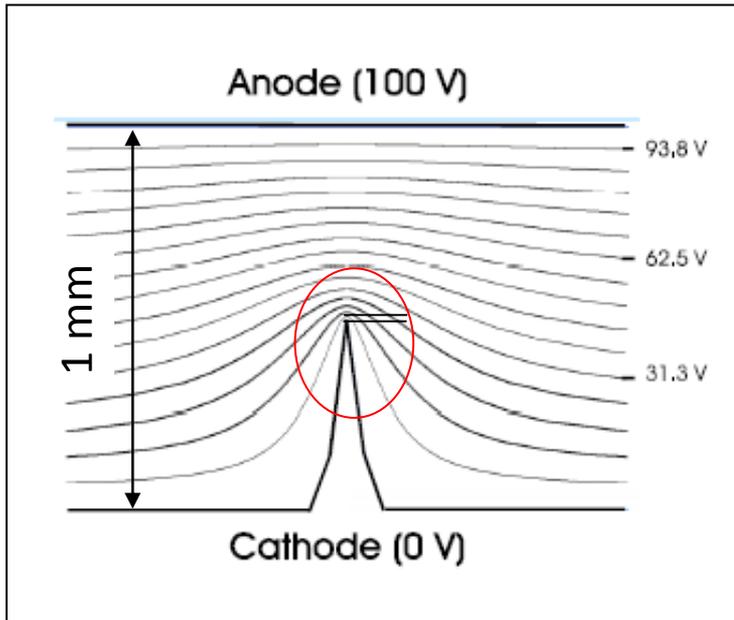
$$E \sim \beta E \quad \beta \nearrow 10 \text{ à } 100$$

$E \sim 1 \text{ GV/m}$  : Effet Schottky  $W = W - dW$

Thermoémission et Thermoémission de champ

# Effet de pointe

Effet de pointe : renforcement du champ par un facteur noté  $\beta$



Resserrement des lignes de potentiel au niveau de la pointe

$$V = 100 \text{ V sur } d = 1 \text{ mm}$$

$$E_m = 0.1 \text{ MV/m}$$

$$dV = 6 \text{ V sur } 0.001 \text{ mm}$$

$$E_{loc} = 6 \text{ MV/m}$$

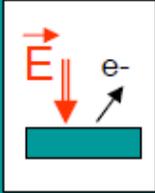
$$E_{loc} / E_m = \beta = 60$$

On remplace  $E$  par  $\beta E$

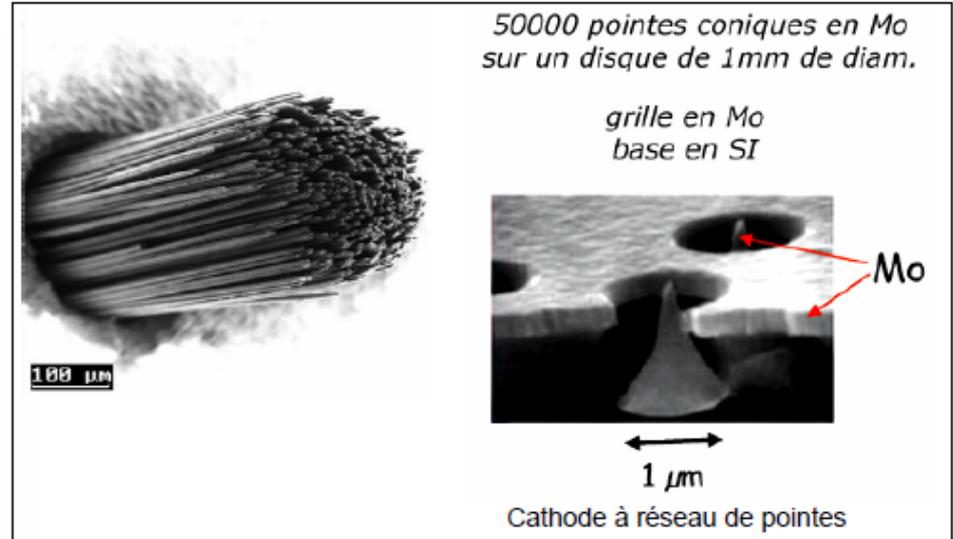
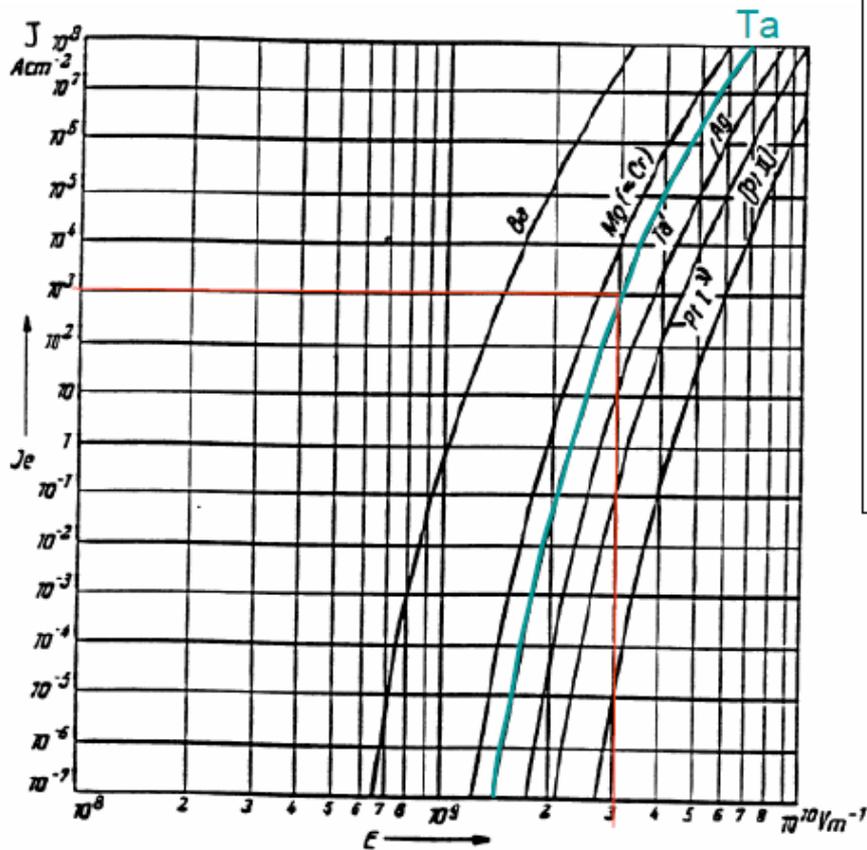
$\beta$  dépend de la géométrie

$\beta \sim 100$  à  $10000$

Pour renforcer l'émission de champ : fabriquer des pointes



# Cathodes émission de champ



Haute intensité, fragilité

Difficulté fabrication cathode + coût

Surface émission petite

→ Microscopie électronique

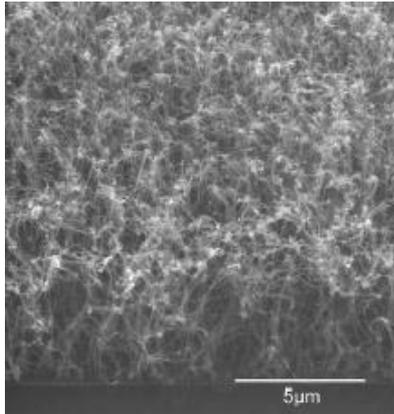
→ écrans plats

Nanotubes de carbones : 1 -10 nm diamètre, longueur ~ μm

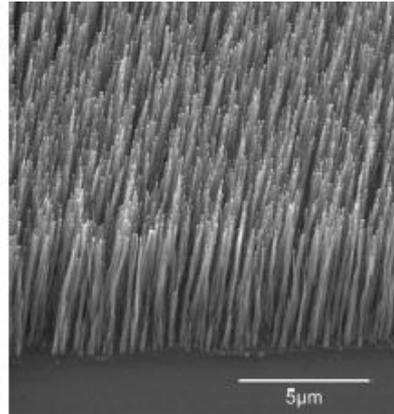
Facteur β énorme ~ 1000 , champ E appliqué plus faible

# Emission de champ

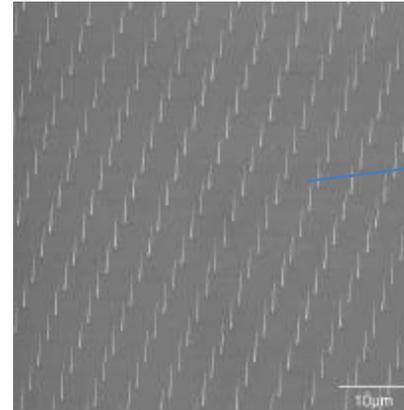
Différentes technique de fabrication nanotube carbone :



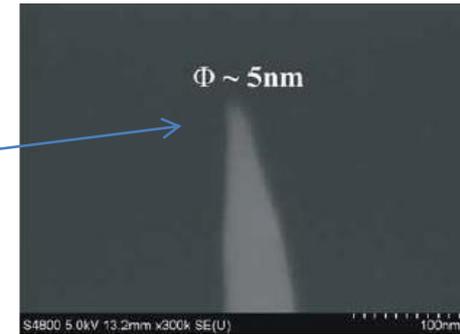
Nanotubes anarchiques



Nanotubes alignés



Nanotube en réseau



Pointe un seul tube

Emission d'un réseau :  
Taille  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$   
Hauteur nanotube =  $8\mu\text{m}$   
Espacement =  $5\mu\text{m}$

Courant émis  $\sim \text{mA}$  et  $j \sim 1\text{A}/\text{cm}^2$



Développement écrans ultra-plats  $\sim 5\text{mm}$

# Conclusions

## *Qualités recherchées*

- Faisceau **Intense** : courant élevé
  - Cathode **robuste** : longue durée de vie
  - Faisceau **Brillant**
  - Durée **impulsion courte**
- } **Industrie**
- } **Recherche**

Sources électrons les plus utilisées : canons **thermoioniques**

Quantité applications des faisceaux d'électrons, industrie et recherche

Le choix de la source dépend de l'application envisagée

# Historique subjectif

- 1832 M. Faraday : soupçonne existence porteurs charge négative
- 1858 J. Plucker : étude rayons cathodiques
- 1864 JC. Maxwell : théorie électromagnétique
- 1878 Crooks faire fondre le métal avec rayons cathodiques
- 1881 T. Edison : découverte effet thermoélectronique
- 1887 H. Hertz : découvre l'effet photoélectrique
- 1895 J. Perrin travaux sur rayons cathodiques
- 1897 JJ. Thompson prouve existence électrons et mesure  $q/m$
- 1897 RW. Wood : découvre effet émission de champ. Premier oscilloscope !
- 1902 O Richardson : loi thermoémission
- 1904 A Wehnelt : découvre activation surface
- 1905 R. Millikan : mesure de la charge d'un électron
- 1905 A Einstein : article interprétation effet photoélectrique
- 1913 Child : loi de Child-Langmuir
- 1914 Schottky : découvre effet Schottky
- 1925 : première accélération 200 keV d'électrons
- 1928 Fowler Nordheim : loi du même nom
- 1937 EW. Muller : invente microscope électronique (émission de champ)
- 1949 Synchrotron à 320 MeV électrons
- 1950 Lemmens ; invente cathode L
- 1960 ; invention du laser
- 1972 électrons de 20 GeV au SLAC
- 1980 : premier laser picoseconde
- 1984 : invention canon RF, premier faisceau électrons picoseconde
- 1990 : premier laser femtoseconde
- 1993 : première démonstration accélération laser-plasma
- 1995 : apparition photocathode CsTe
- 2004 : démonstration accélération laser-plasma régime dit « de la bulle »

# Références

## Articles Historiques

- Richardson O W 1912 *Phil. Mag.* **23** 594
- Wehnelt A 1904 *Ann. Phys., Lpz.* **14** 425
- Fowler R H and Nordheim L W 1928 *Proc. R. Soc. A* **119** 173
  
- GA Boutry, *Acta. Elec.*, 16 (1973) p 127, "Brève histoire de la photoémission"

## Références sources en général

- Fundamental physics of vacuum electron sources, S, Yamamoto, *Rep. Prog. Phys.*, 69 (2006) 181-232
- Thèse E. Minoux (2006), Ecole Polytechnique

## Livres

- The physics of high brightness beam, J. Rosenzweig, L. Serafini, 2<sup>nd</sup> ICFA AAW
- Intense electron and Ion beams, SI Molokovsky, AD Sushkov (Springer)
- Electron beams & microwave vacuum electronics, SE Timsring, (Wiley) 2007