

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

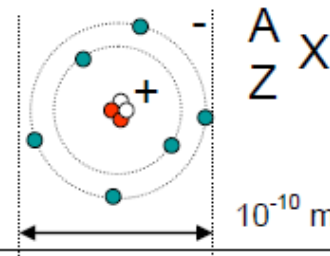
Où se trouvent les électrons ?

- 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

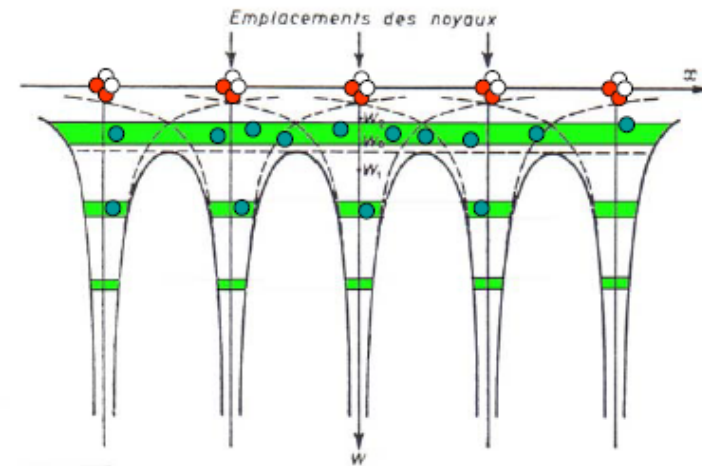


Travail de sortie W

modèle planétaire en physique classique



Z = nbre de protons (+)
nbre d'électrons (-)
N = A - Z = nbre de neutrons

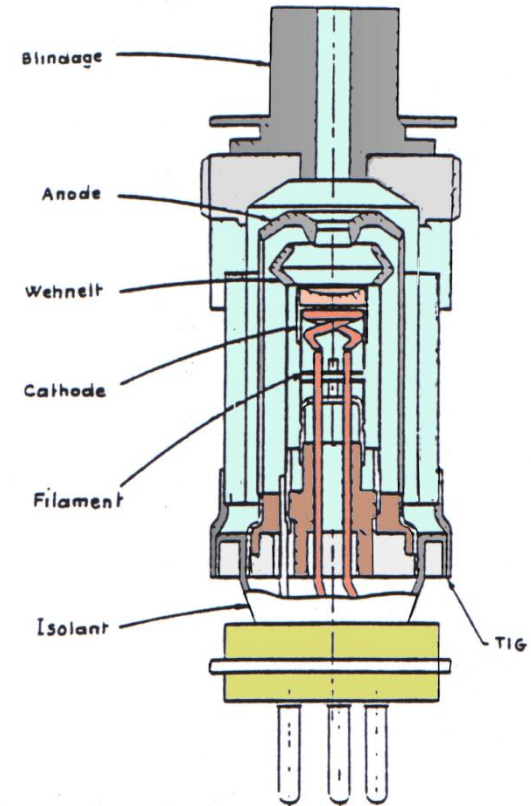
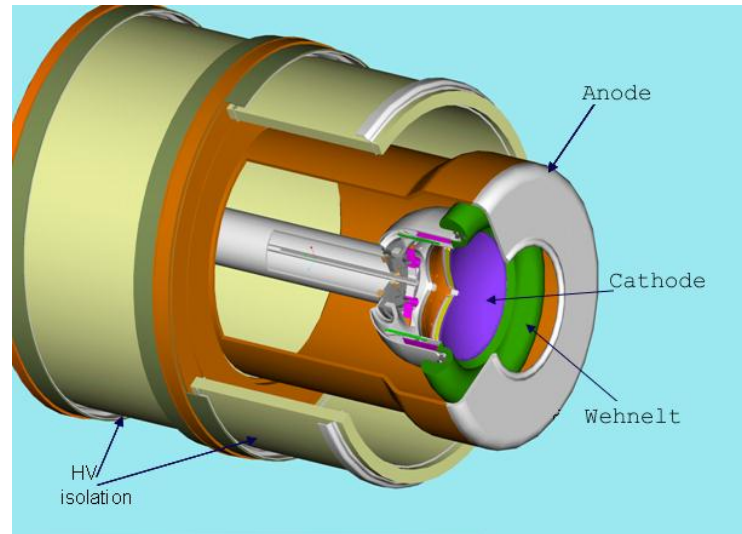
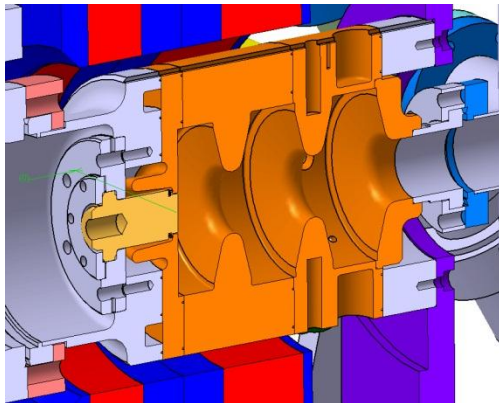


Statistique de Fermi-Dirac

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

Comment fait-on Un faisceau d'électrons ?

De quoi est constitué un canon à électrons ?



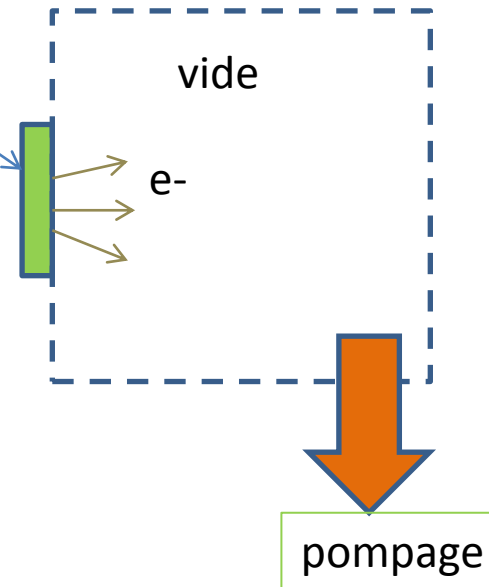
Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

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)



Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

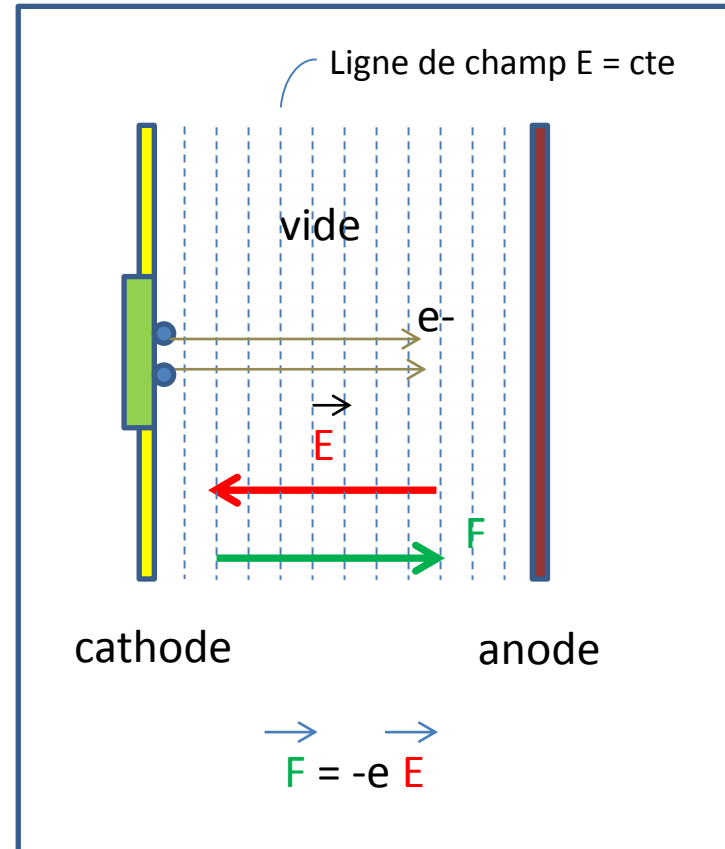
Comment fait-on un canon à électrons ?

- 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)



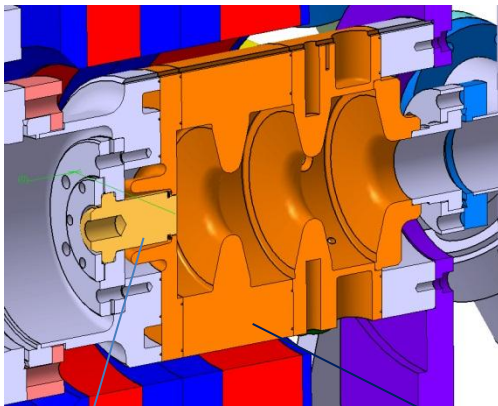
$$E \text{ [V/m]} = V / d$$

Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

Comment fait-on un canon à électrons ?

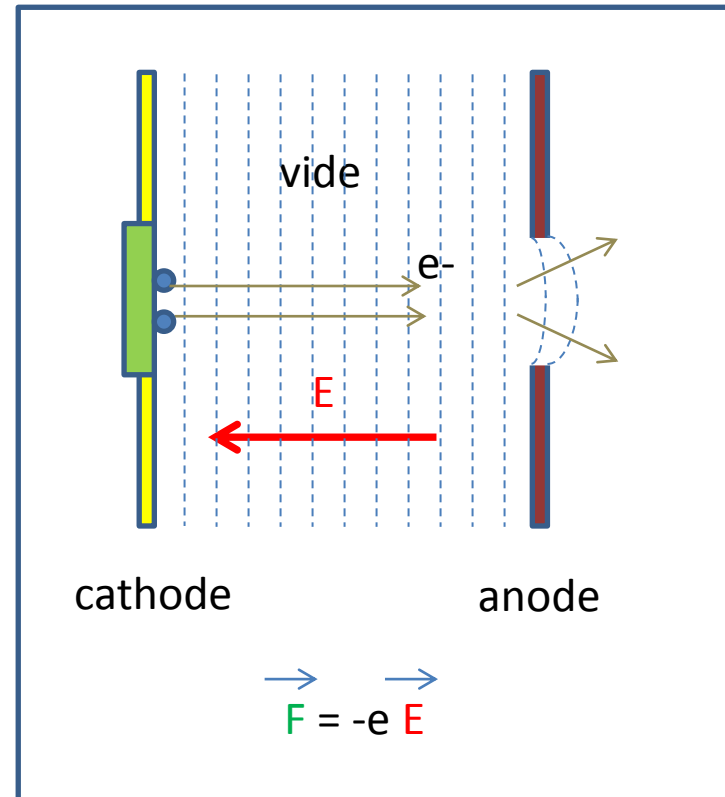
- Cathode : émetteur électrons
- Créer un champ électrique E (anode)

- Faire un trou !



cathode

Canon RF



cathode

anode

$$\vec{F} = -e \vec{E}$$

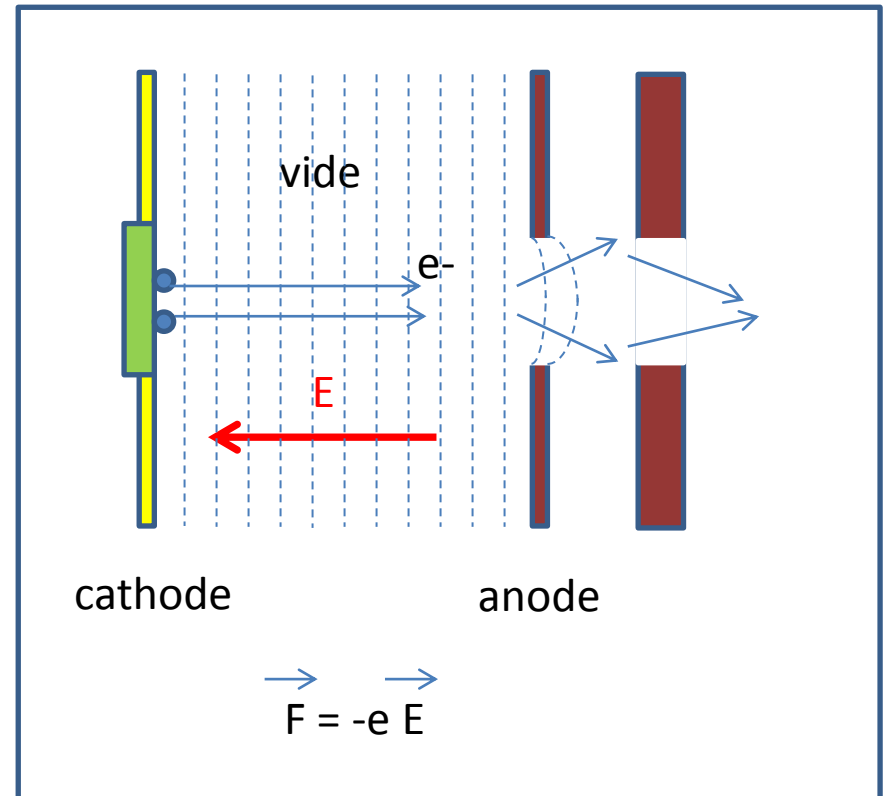
Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

Comment fait-on un canon à électrons ?

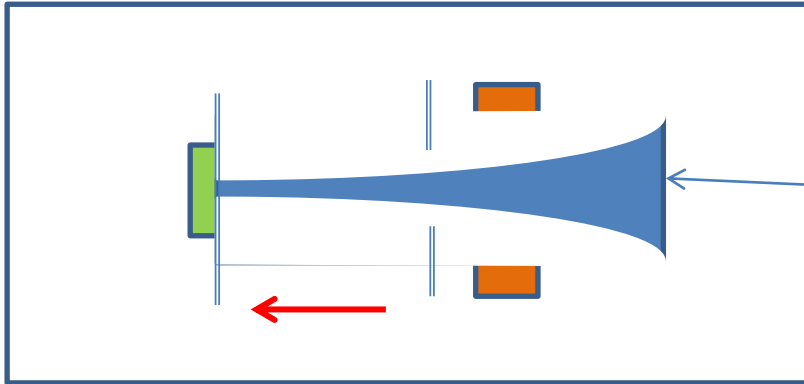
- Cathode : émetteur électrons
- Créer un champ électrique E
- Faire un trou !
 - o déformation lignes de champ
 - o défocalisation du faisceau
 - o focalisation nécessaire

- Focaliser

- o électrostatique (Einzel)
(énergie \sim keV)
- o magnétique (solénoïde, quadrupôle)
(énergie \sim MeV)



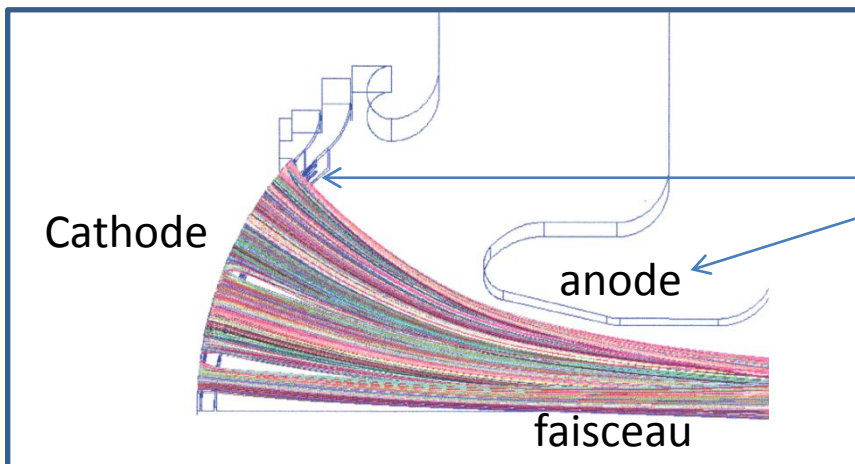
Comment fait-on Un faisceau d'électrons ?



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 :

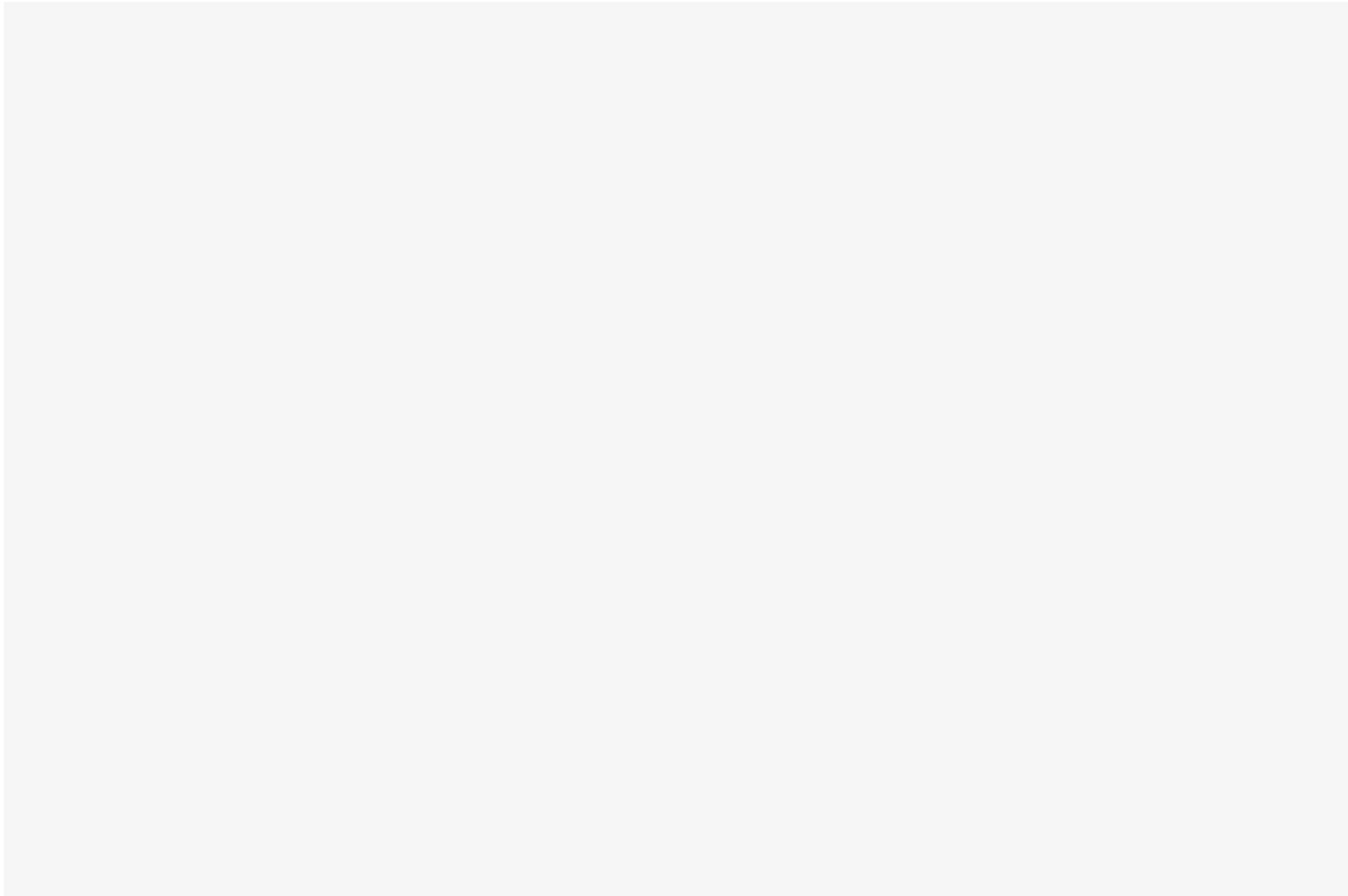
Modifie ligne de champ E

→ Géométrie de Pierce (1954)

JR Pierce

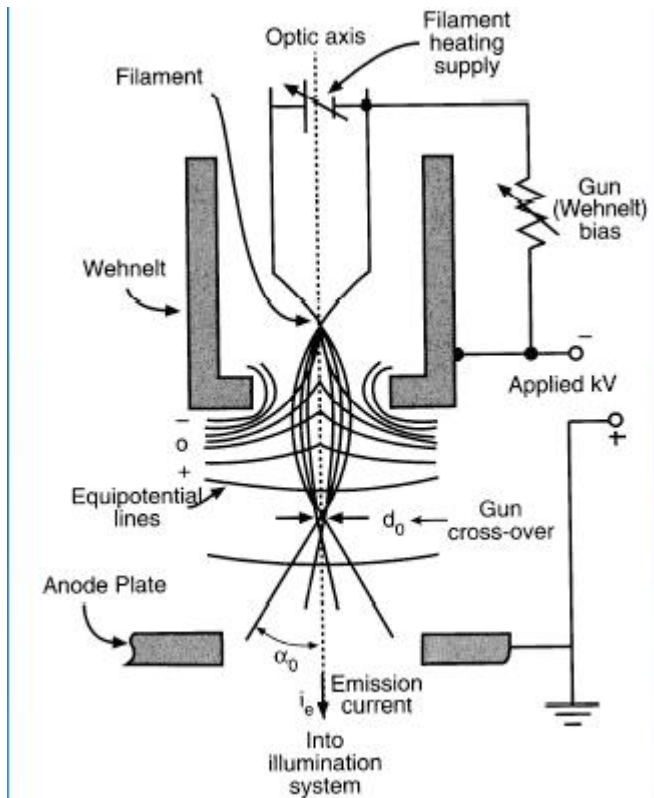


Exemple Faisceau électrons

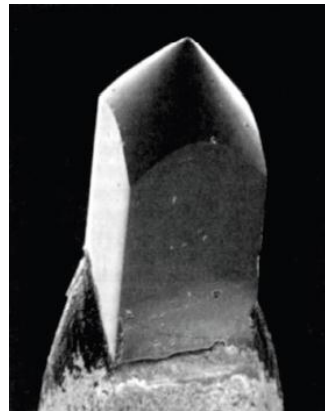


Tube de Crookes (1870)

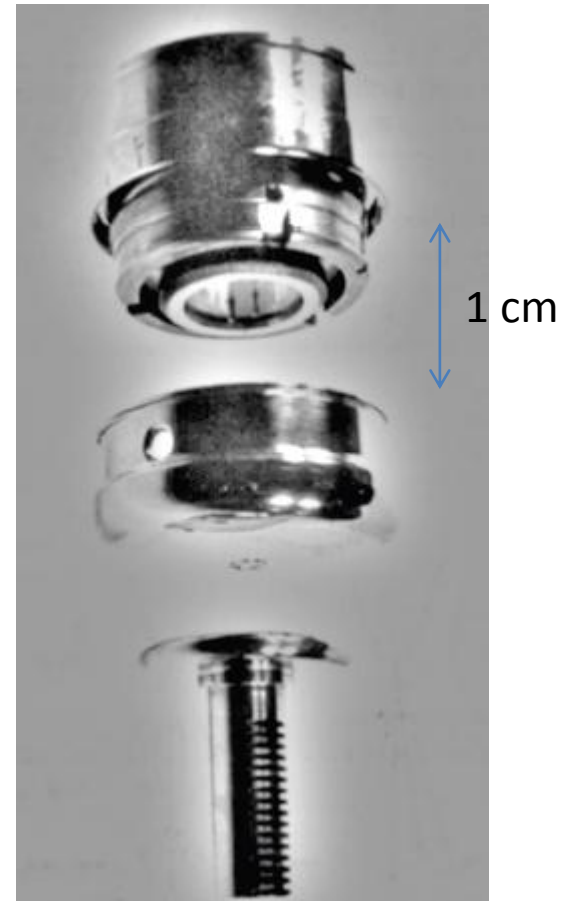
Exemple canon



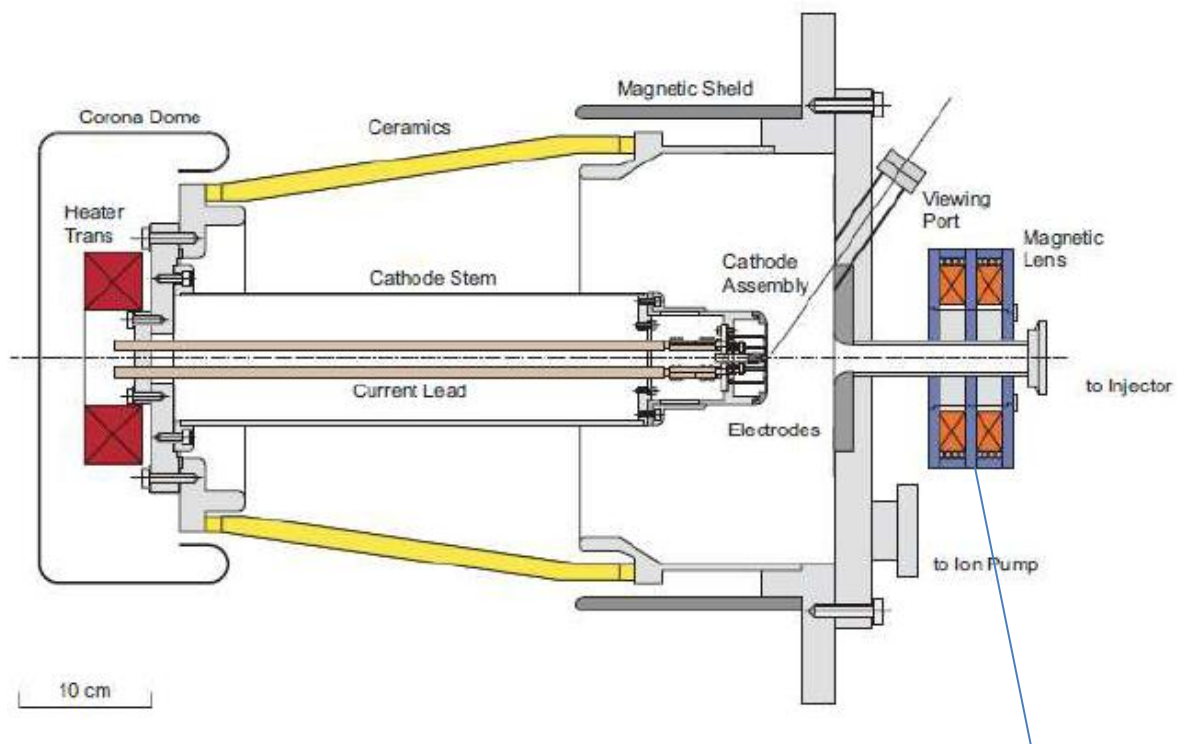
W (tungstène)



LaB₆



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)
- ...

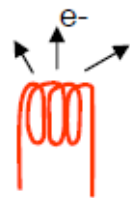
Industrie

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

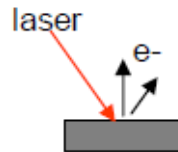
Processus d'émission

A partir de la matière **stable** :

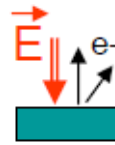
- Si on **chauffe** suffisamment émission **THERMO-IONIQUE**
- Si on **éclaire** suffisamment émission **PHOTOELECTRIQUE**
- Si on applique un fort **champ électrique** émission **DE CHAMP**
- autres : émissions ferroélectrique, plasma, ...



THERMO-IONIQUE



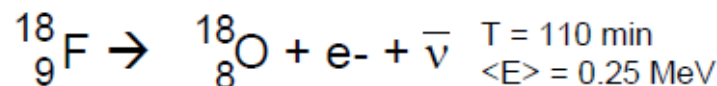
PHOTOELECTRIQUE



DE CHAMP

→ Plusieurs processus peuvent avoir lieu en même temps

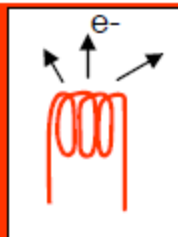
Si la matière est **instable** naturellement : radioactivité β^- ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^- + \bar{\nu}$



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 ²]
A ~ constante ~ 120	[A/cm ² /K ²]
T : température	[K]
k : constante de Boltzmann	[eV/K]
W : travail de sortie	[eV]

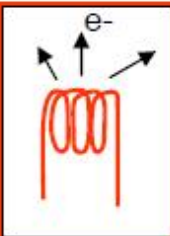
Pour **augmenter** J_s : $T \uparrow$ $W \downarrow$

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

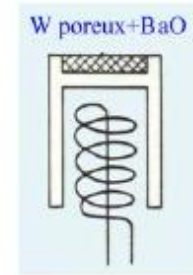
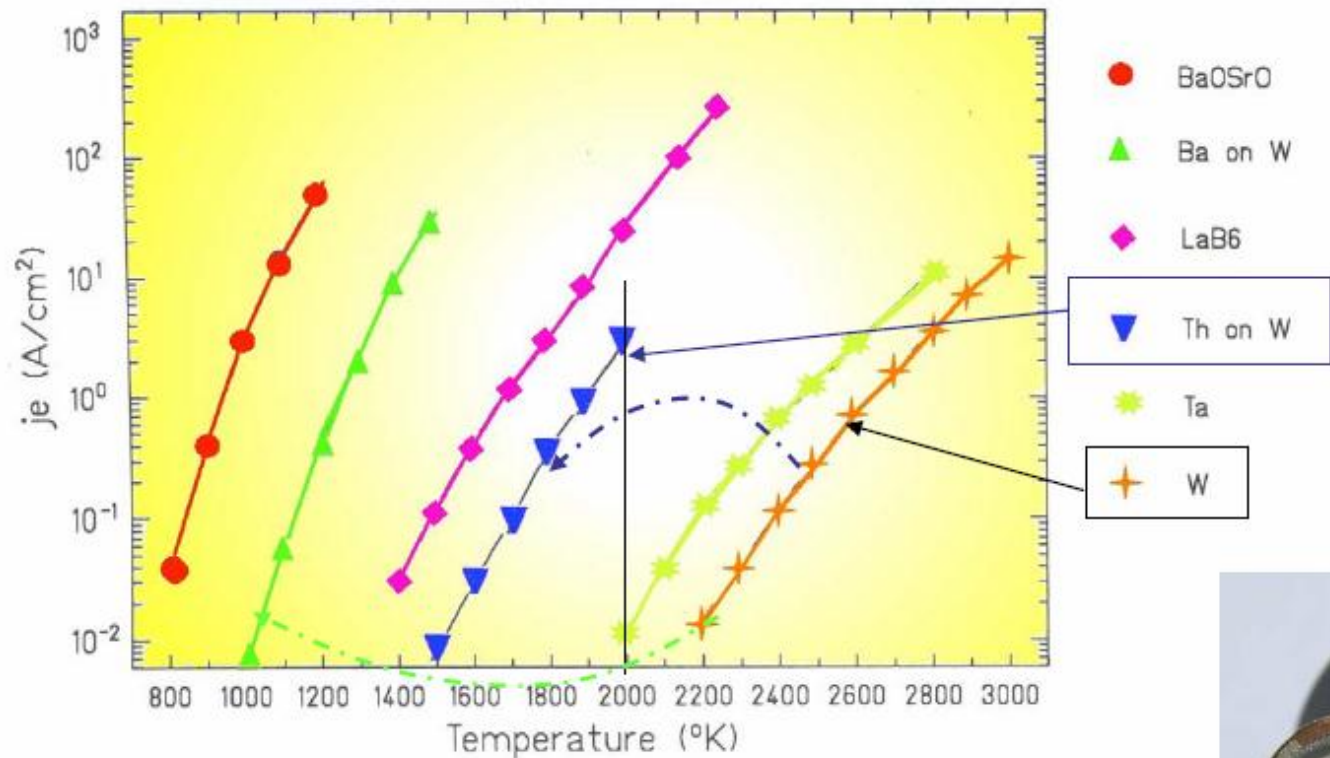
En pratique : matrice en matériau réfractaire + élément chimique qui rend W plus faible (**activation**)

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/cm²
Tungsten W+Th $T = 2000$ K, $W = 3.2$ eV $J_s \sim 4$ A/cm²



Cathodes Thermoioniques

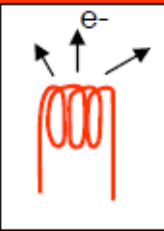


$\phi_s = 1.94 \text{ eV}$
 $\phi_W = 4.53$
 $\phi_{BaO} = 1.57$
 $\phi_{LaB_6} = 2.66$

Diminution de ϕ et de $T^\circ K$ de travail

Durée de vie augmentée

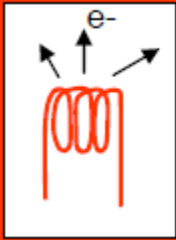




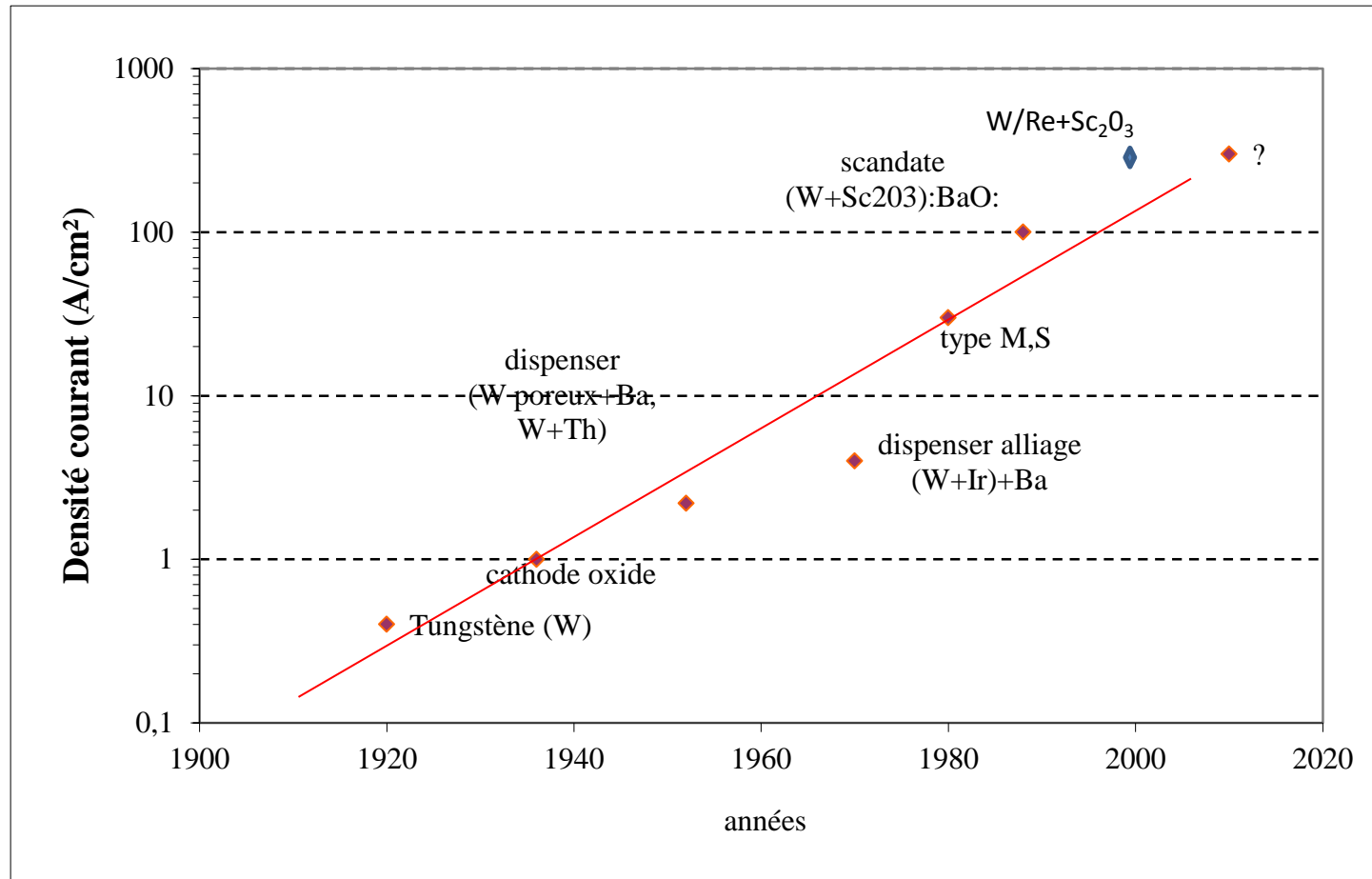
Cathodes Thermoioniques

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

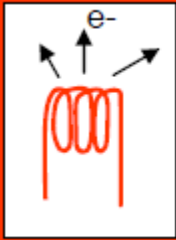
Température de travail pas trop élevée : dégazage, dégradation
Bonne durée de vie > 10000 h
Si vide est mauvais $P > 10^{-5}$ mbar : cathode métallique



Cathodes Thermoioniques



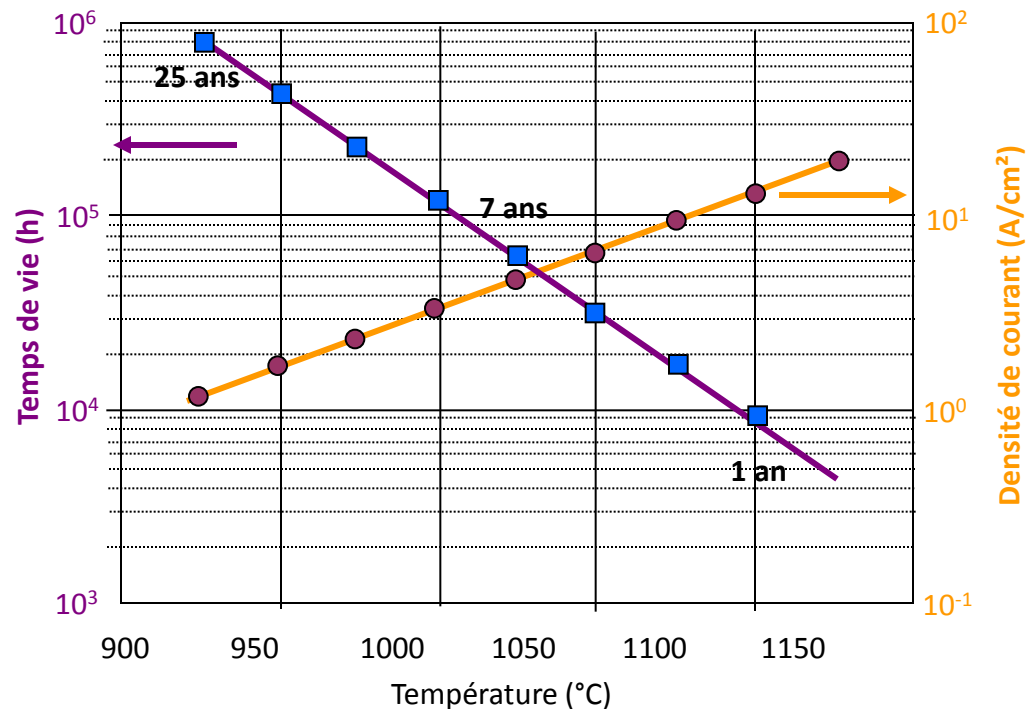
Densité de courant maximale atteinte en fonction des années



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

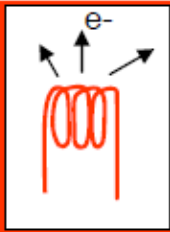
La durée de vie d'un appareil utilisant une source thermoionique d'électrons est généralement la durée de vide de la cathode

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

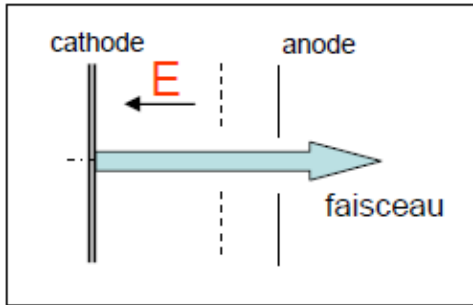


La source se tarie !



Canons Thermoioniques

Principe du canon

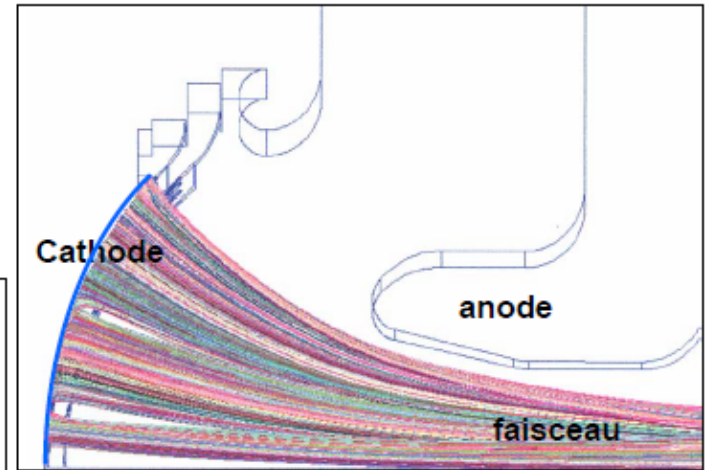


V : 10 à 1000 kV

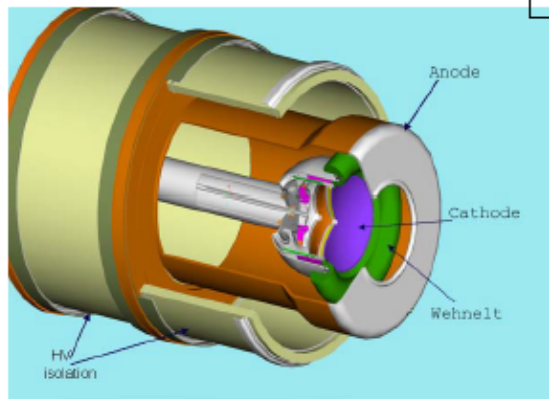
Child-Langmuir

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

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



Les cathodes sont généralement sphériques
Canons géométrie de Pierce

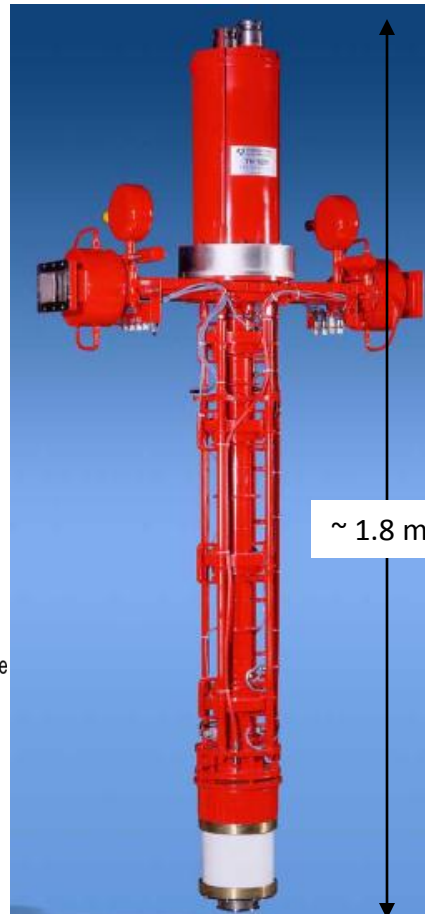
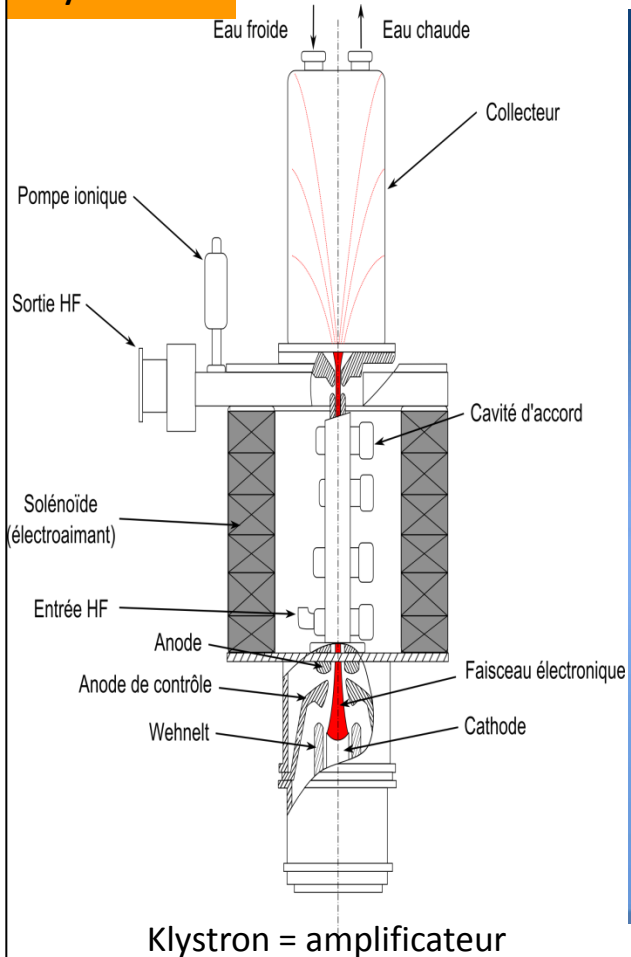


Le plus d'applications industrie + recherche

→ Robustesse + durée de vie

Applications

klystrons



PV reception 30 nov 1993 - TH2040E n° 24132

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
μP		micropervéance	2,13
fr	Hz	fréquence répétition	150
Pct	kW	puissance moyenne corps	1
lct	mA	courant corps	
Ps moy	kW	puissance moyenne RF sortie	11,3
tp V	μS	largeur Vk à 75%	3,7
tp F	μS	largeur RF à -3dB	3
Fo	MHz	fréquence RF	2998,5
Pecr	W	puissance crête RF entrée	130
Pscr	MW	puissance crête RF sortie	25,1
$\Delta Pscr$	dB	bande passante	
G	dB	gain	52,9
Rdt	%	rendement	45,5%
Ifoc1	A	courant foc1	
Ifoc2	A	courant foc2	
Ifoc3	A	courant foc3	
Ifoc	A	courant foc unique	17,5
Ipi	μA	courant pompe ionique	<1

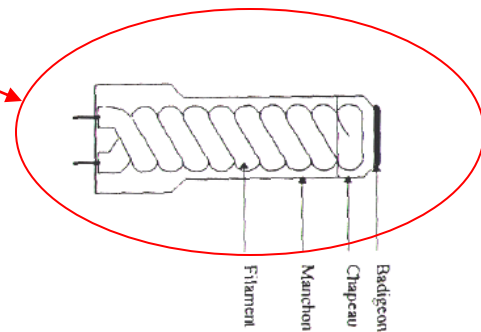
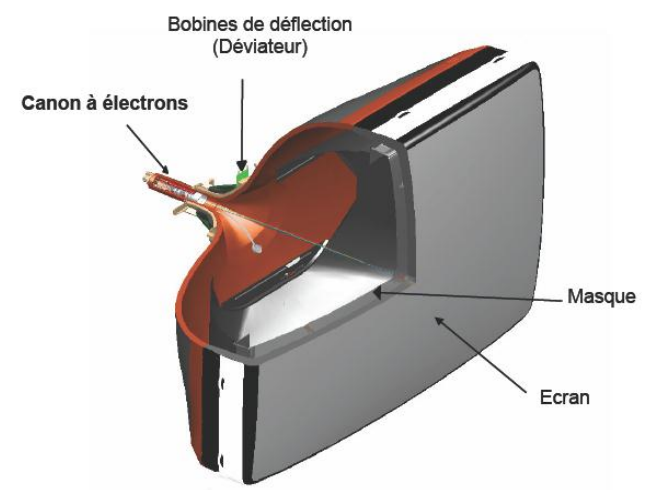
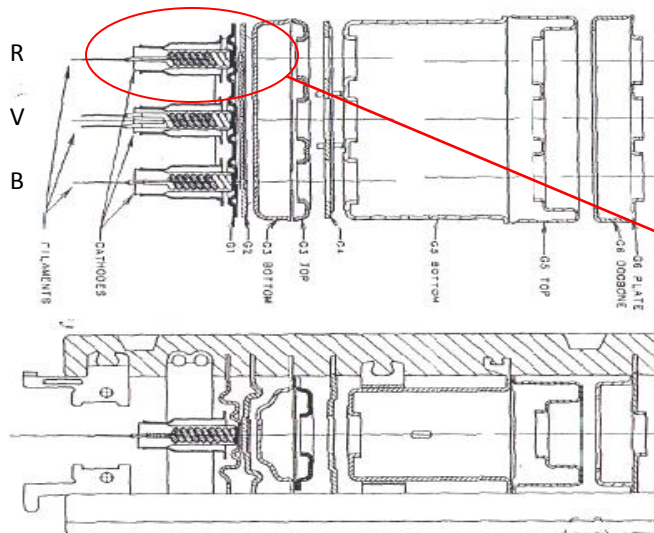
Cathode type M

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

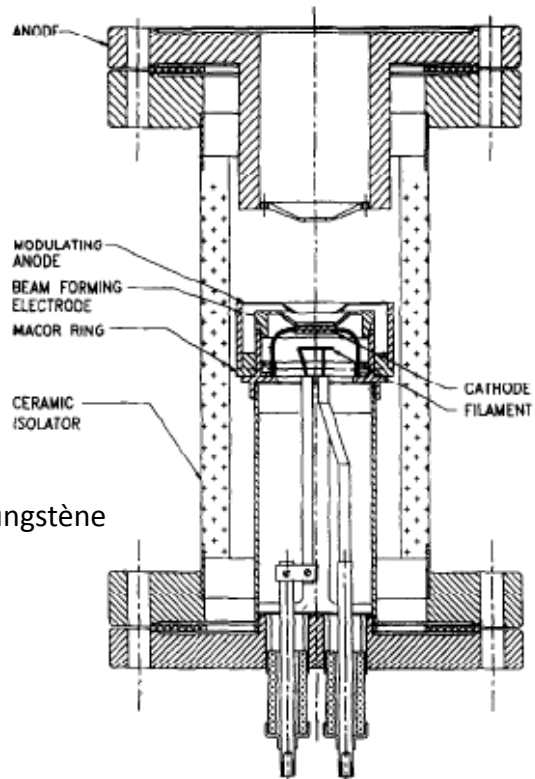
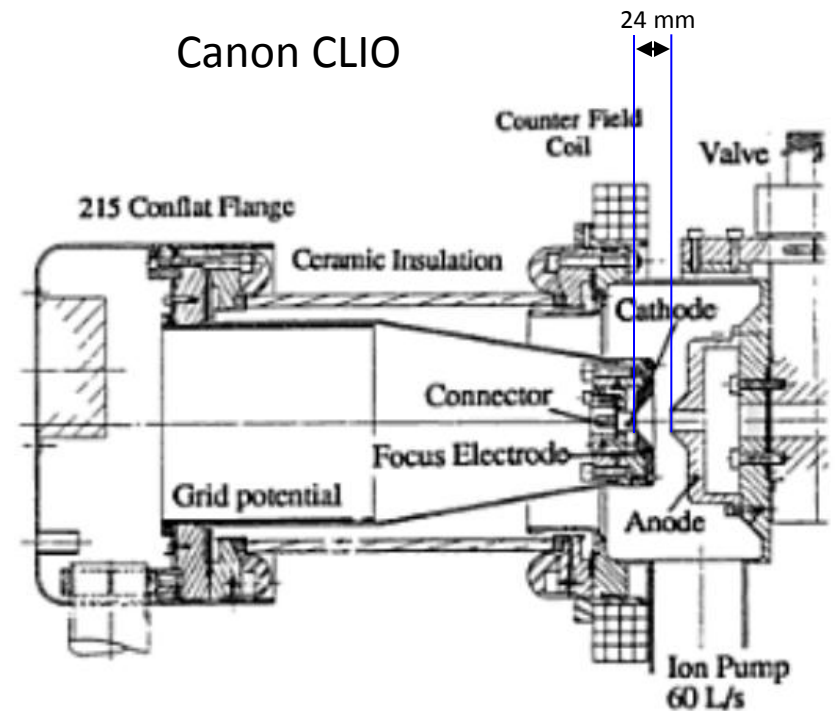


Fig. 1. Electron gun structure and assembly.

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

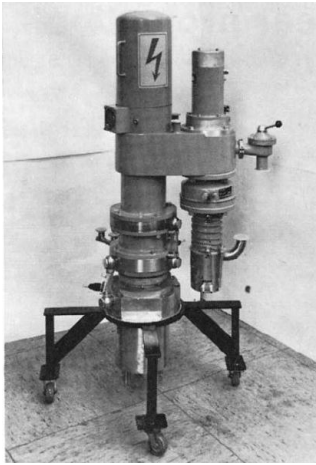


Cathode dispenser – canon Pierce

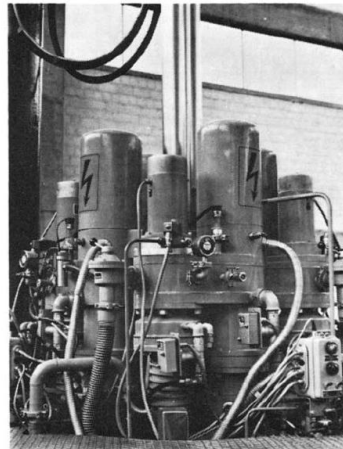
$I = 1 \text{ A}$ $t = 1 \text{ ns}$ $F = 500 \text{ MHz}$ $E = 90 \text{ keV}$

Applications

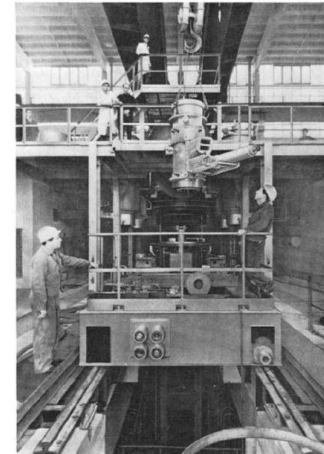
Canon pour fusion métaux



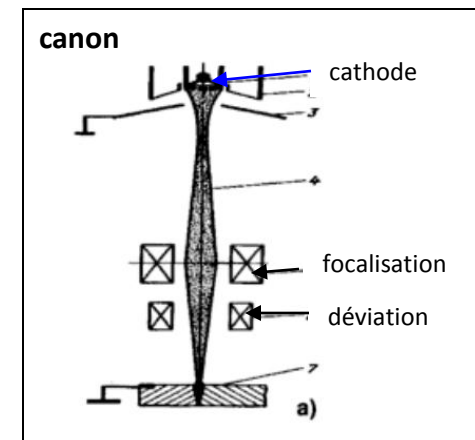
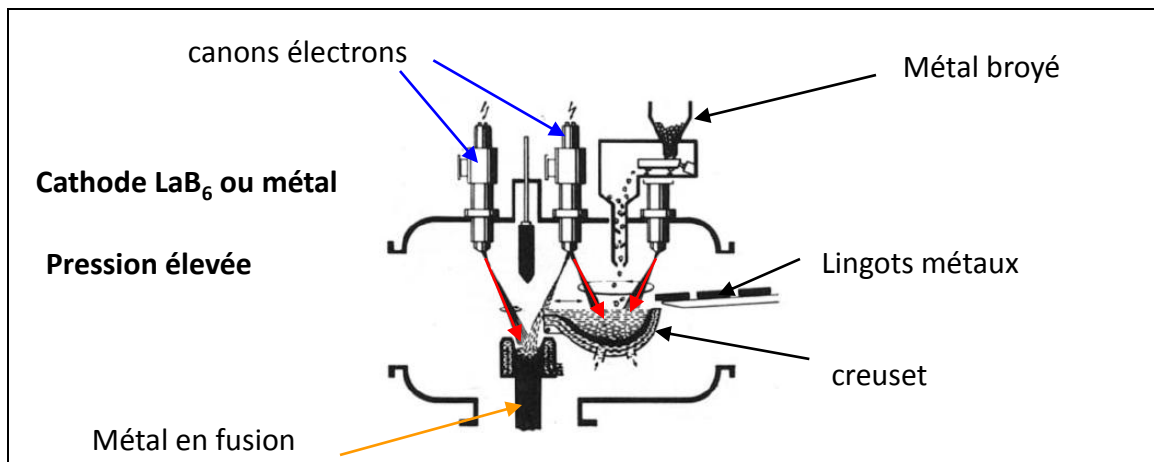
200 kW - 20 kV



4x140 kW - 20 kV

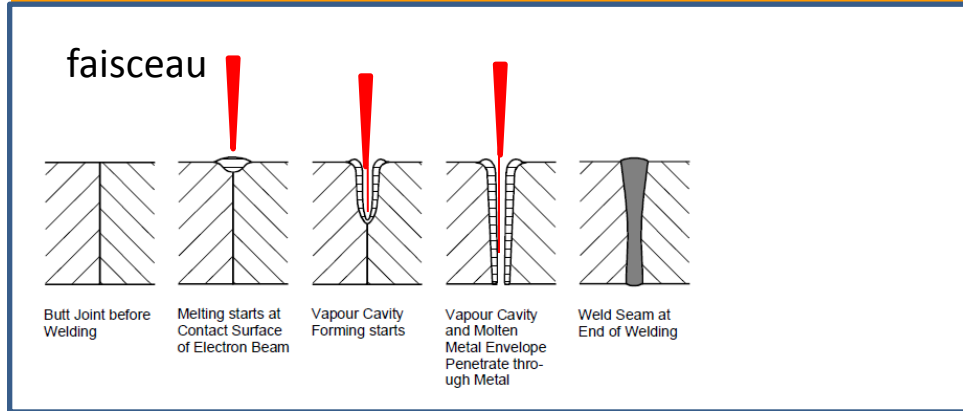


1.7 MW



Applications

Soudure par faisceau d'électron (electron beam welding)

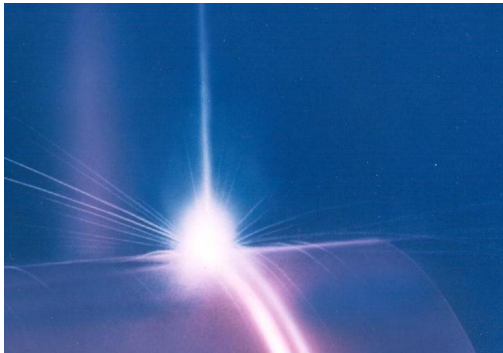


$P \sim 1\text{MW}/\text{cm}^2$

Epaisseur soudée : 0,02 à 100 mm

Utilisé :

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



Avantages :

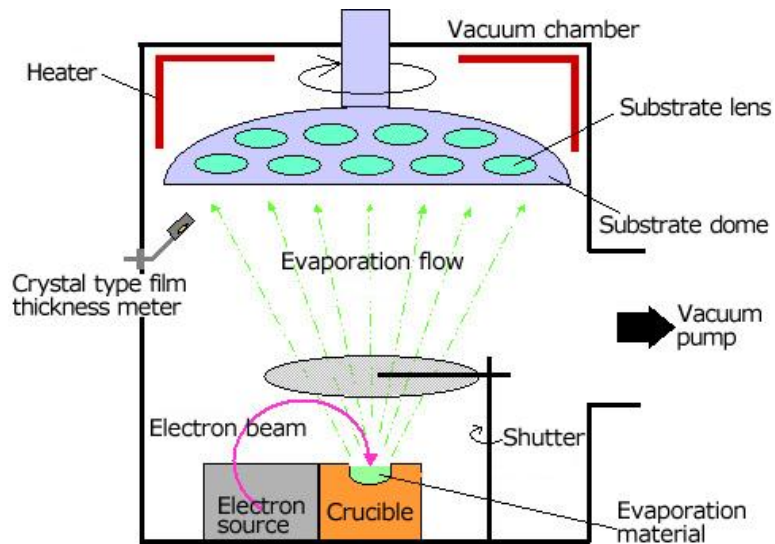
- grandes épaisseurs
- Retrait minimal
- Grande précision
- Grande vitesse de soudure

Métaux

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

Applications

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



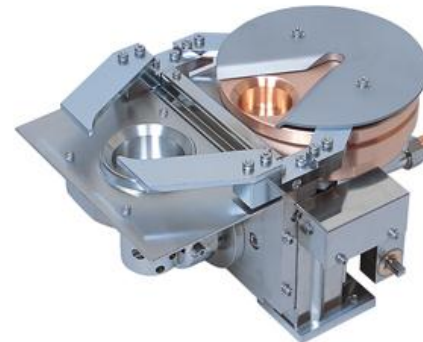
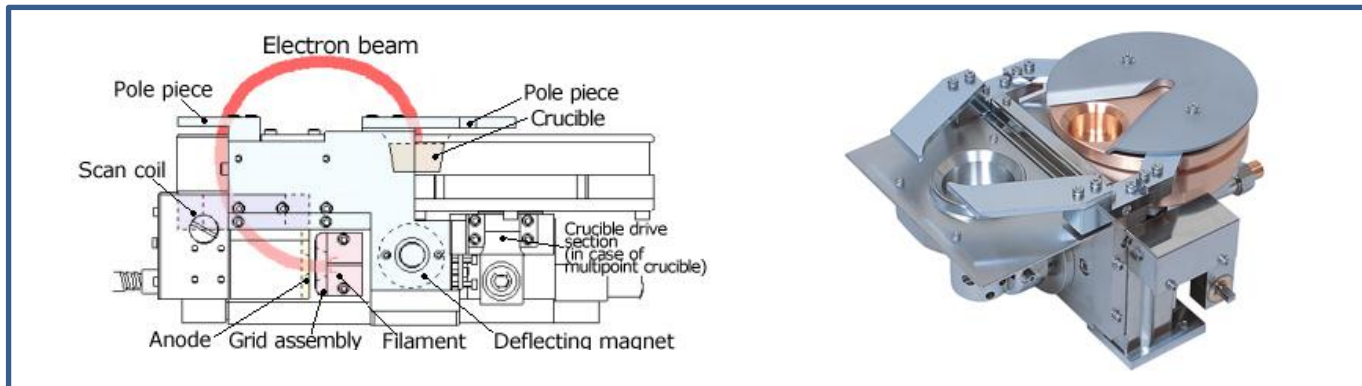
$P \sim 10 \text{ à } 100 \text{ kW}$

$E \sim 30 \text{ kV}$ 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



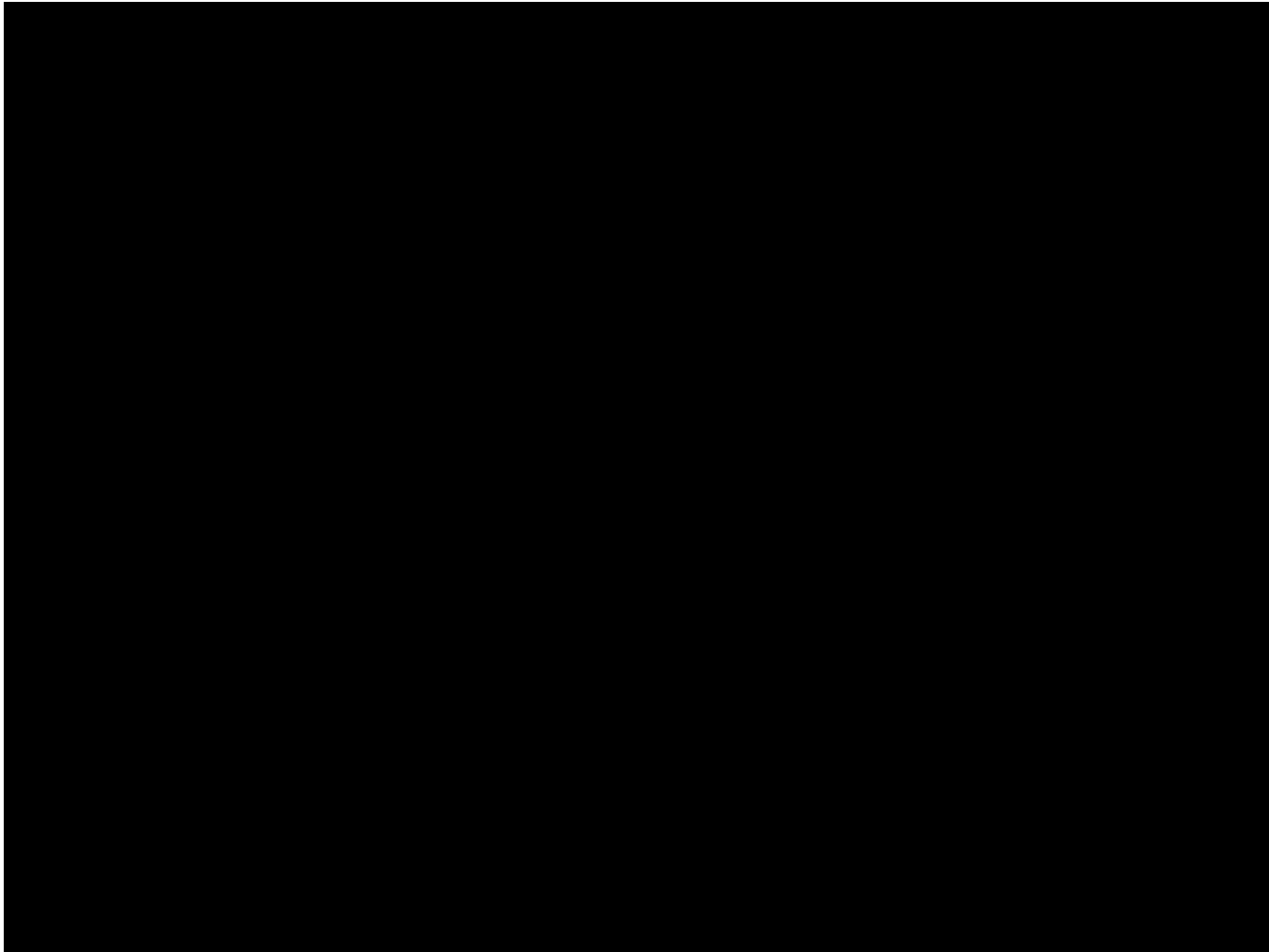
* Métaux, alliages
TiC, TiBr, ZrBr

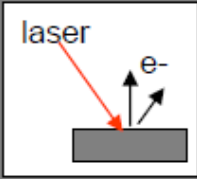
* Co-évaporations

**LES SOURCES
PHOTOELECTRIQUES**



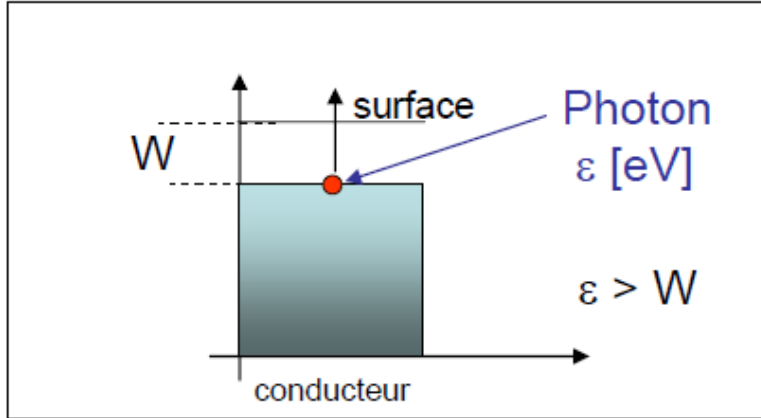
Effet photoélectrique





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 ²]
A ~ constante	[A/W/K ²]
T : température	[K]
R : coefficient de réflexion	
I : éclaircissement	[W/cm ²]
$F(x)$: fonction de Fowler	

Travail de sortie W

Effet photoélectrique : Einstein 1905, Fowler 1931

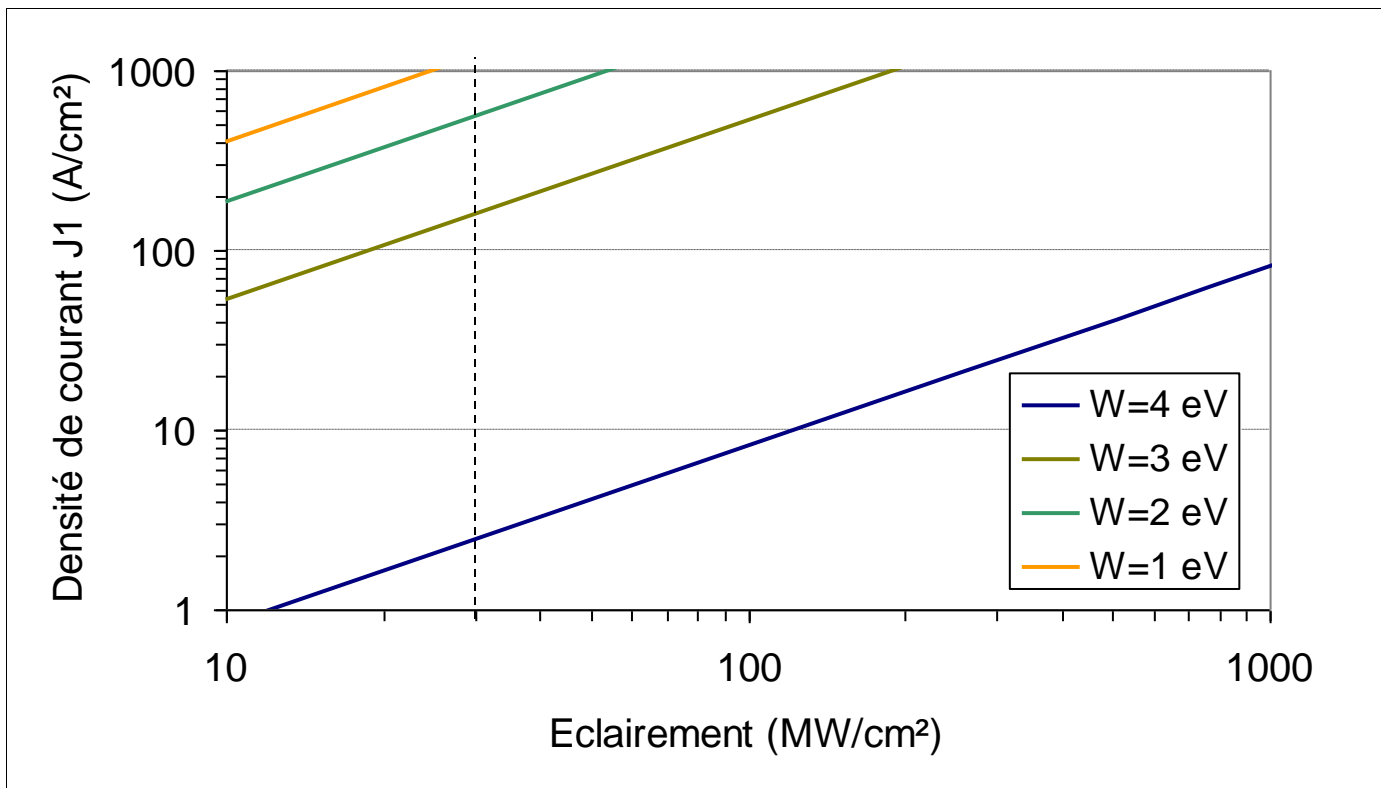
Influence du travail de sortie

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

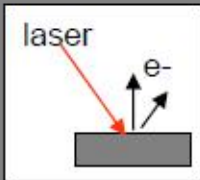
$$\lambda = 300 \text{ nm}$$
$$\varepsilon = 4.13 \text{ eV}$$

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

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



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



Cathodes Photoélectriques

Rendement photoélectrique

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

Q [C]

E [J]

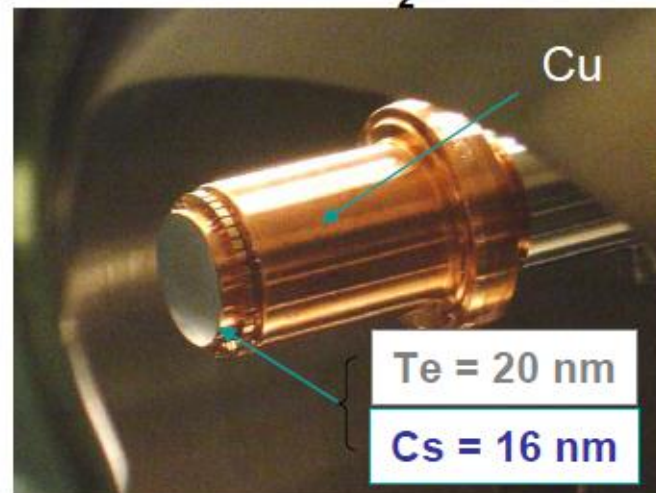
Métaux : - mauvais rendement $\ll 1\%$
+ bonne résistance

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

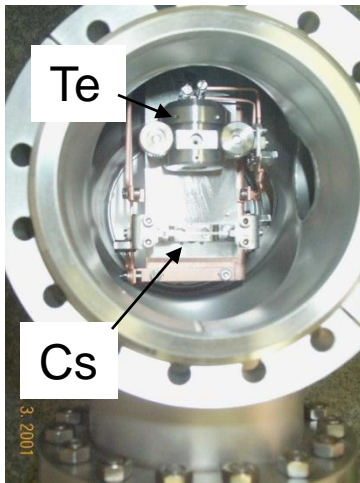
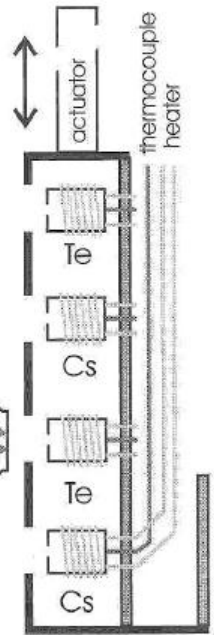
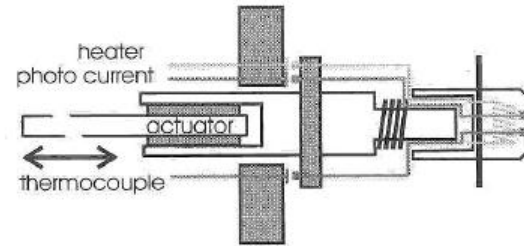
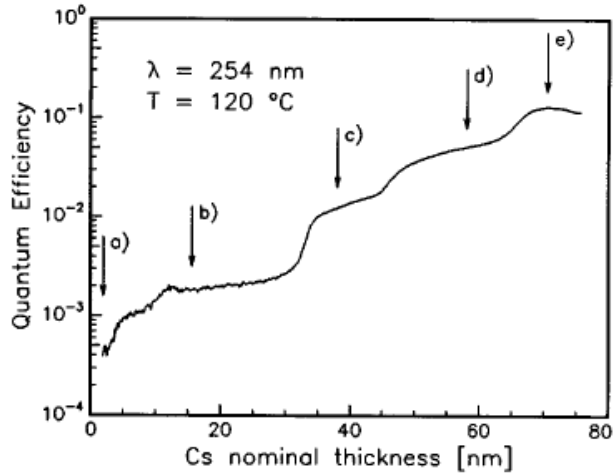
Conducteur : W travail de sortie
ou semi-conducteur : AE+BI

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

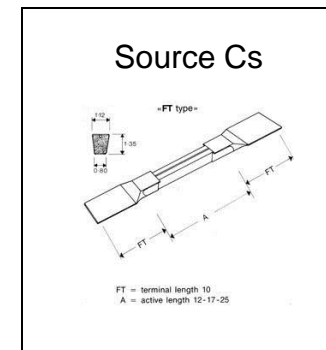
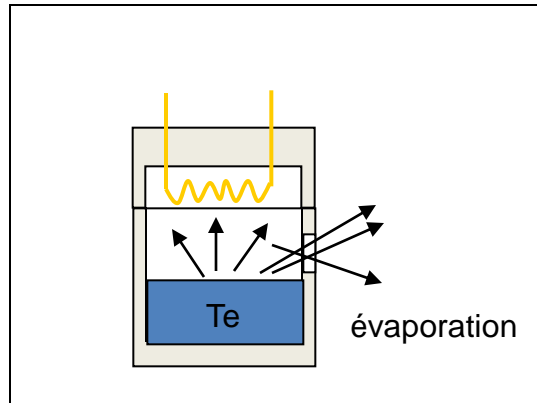
Photocathode **Cs₂Te** - ELYSE



Fabrication



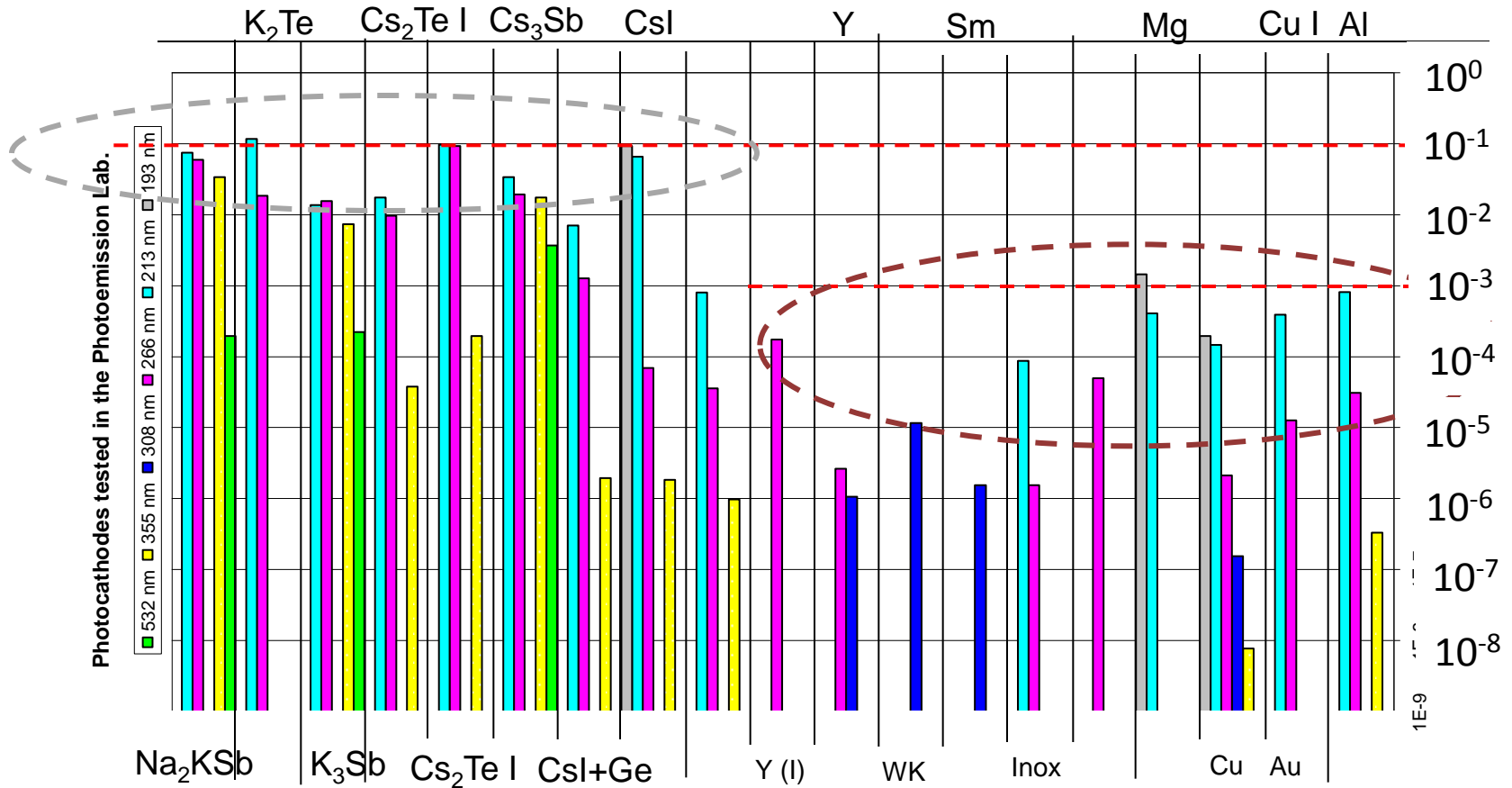
ELYSE - LCP



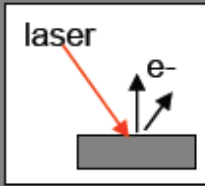
Semiconducteur

Métal

Rendement quantique

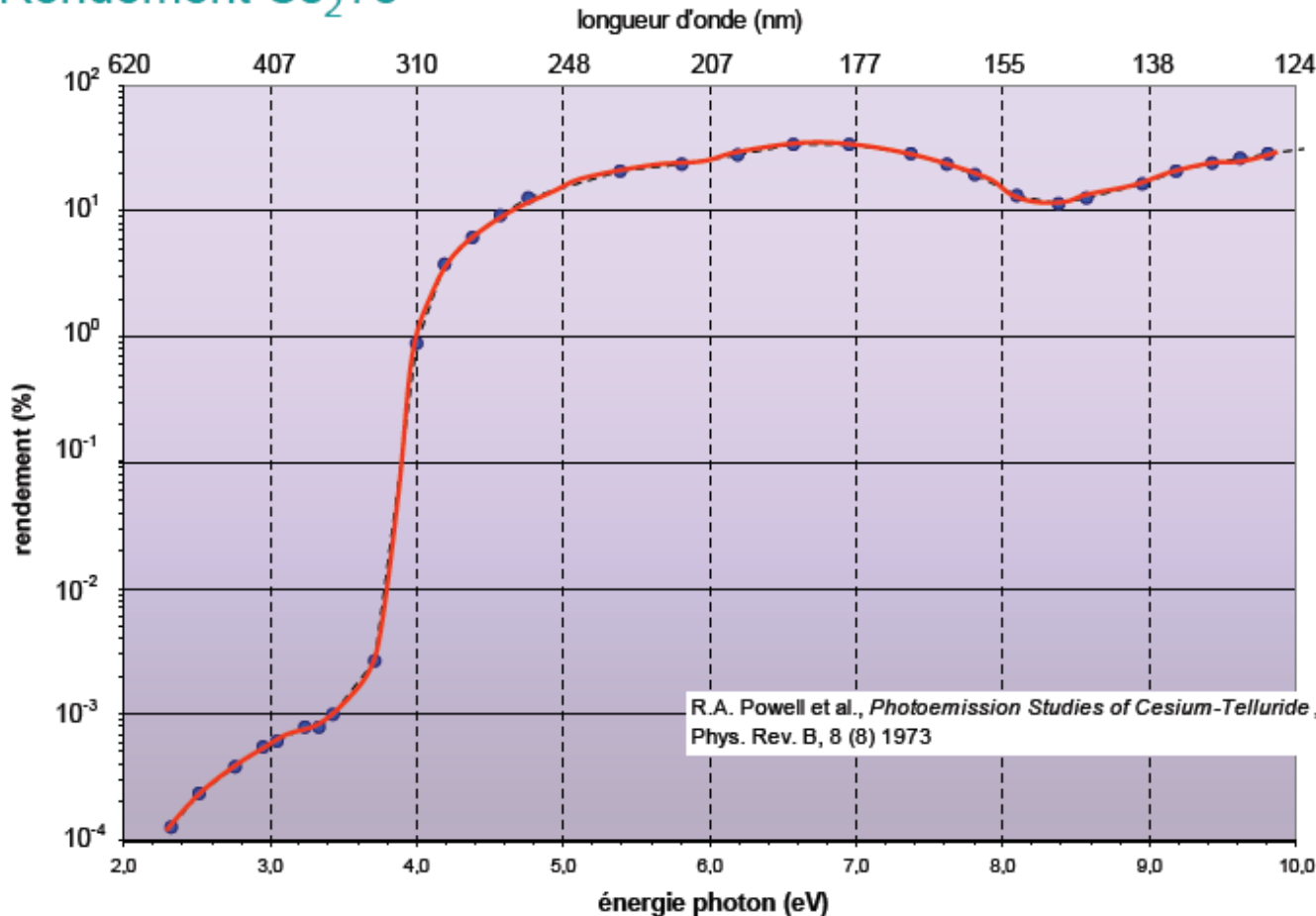


Données du CERN/CTF (G. Suberlucq)



Cathodes Photoélectriques

Rendement Cs₂Te

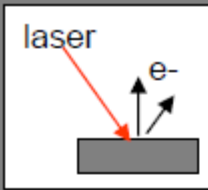


Rendement chute
à l'utilisation :

- Pollution
- bombardement

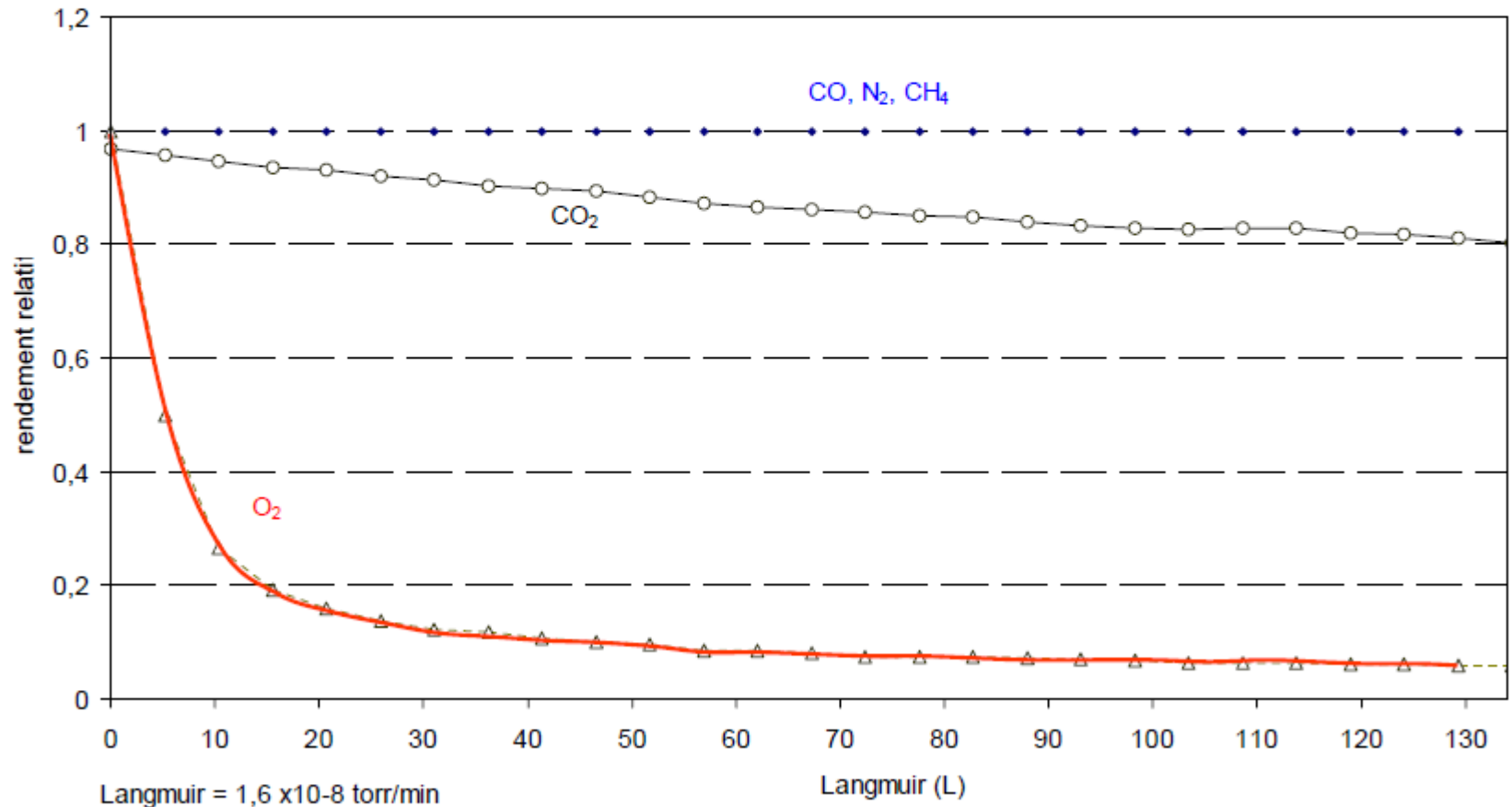
Durée de vie :
mois... année

Dépend de l'utilisation



Cathodes Photoélectriques

Pollution de Cs₂Te par différents gaz



F. Sabary et al., Auger and X-ray photoemission study on Cs₂Te 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**

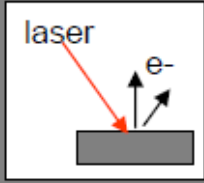
La durée de vie d'une photocathode dépend de son utilisation :

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



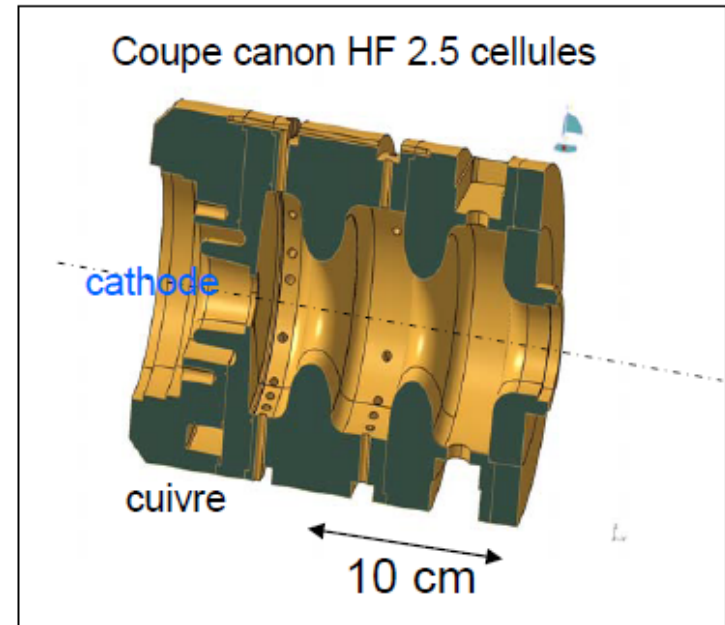
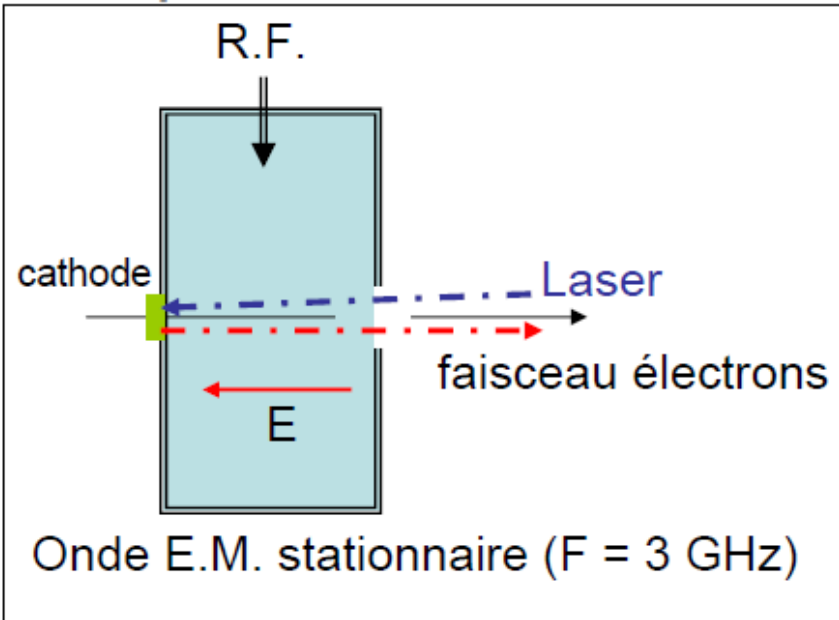
La source se tarie !



Canons Photoélectriques

canon HF

Principe canon HF



Design par simulation

Avantages :

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

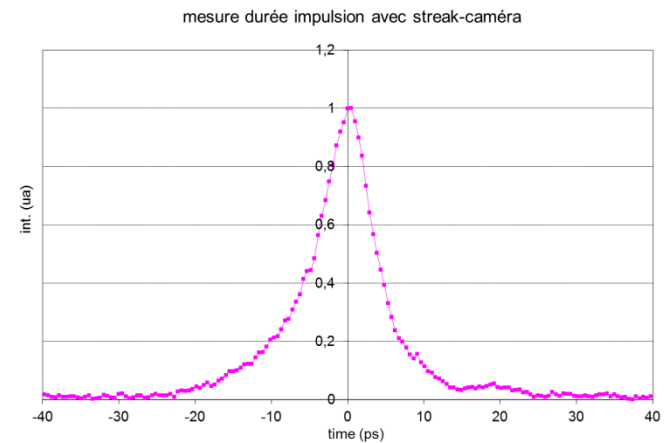
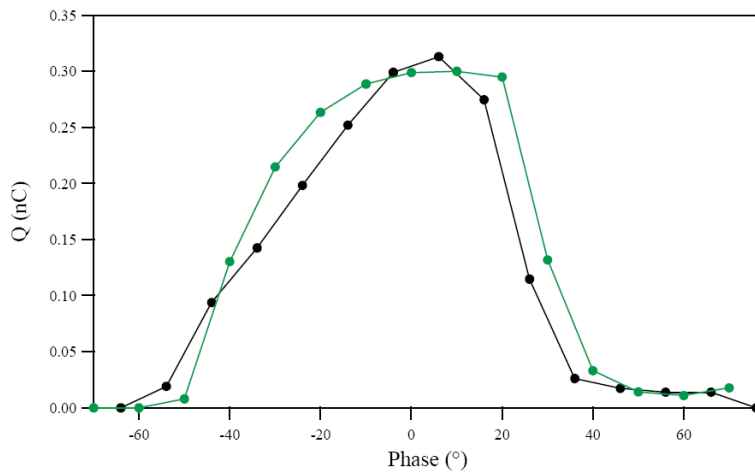
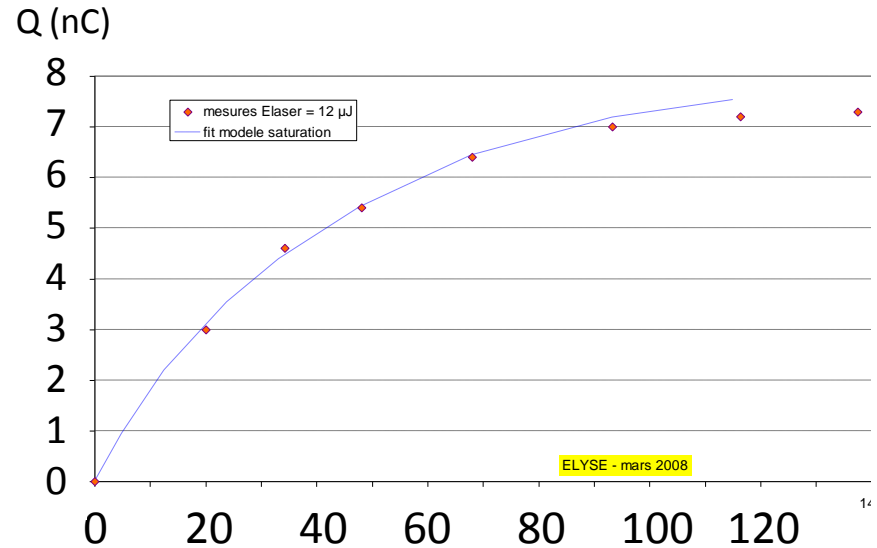
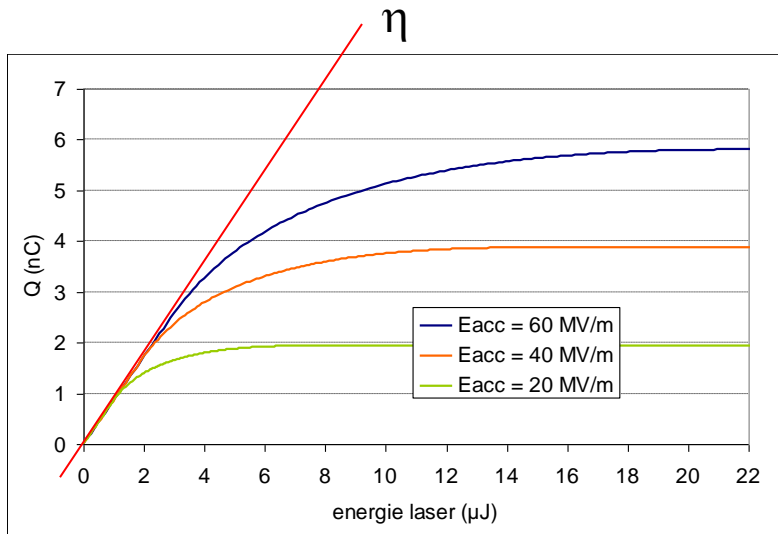
Faible dispersion énergie < **1%**

Fort gradient accélérateur : 100MV/m

Photo-injecteurs

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

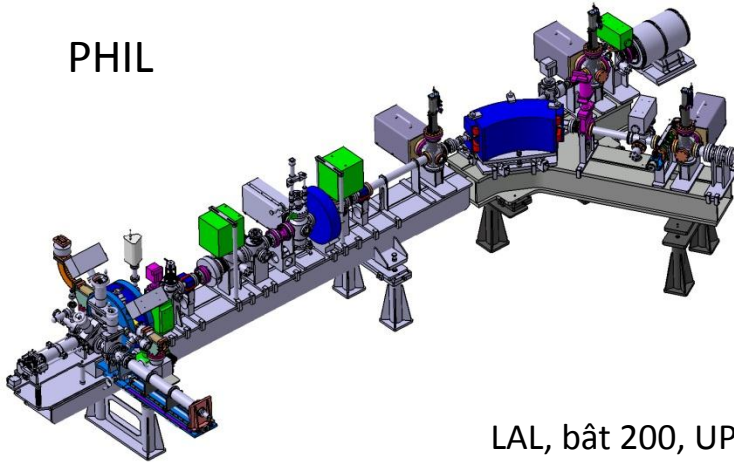
Canon RF : mesures



Mesure durée 1 seule impulsion

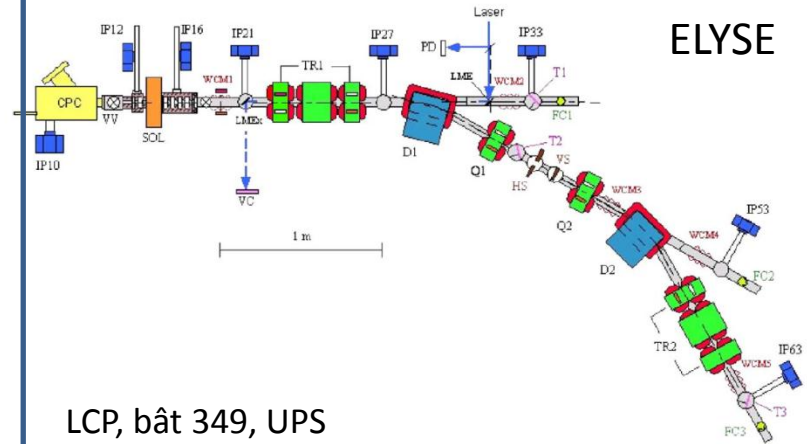
Exemples Photoinjecteurs

PHIL



LAL, bât 200, UPS

ELYSE



LCP, bât 349, UPS

PITZ

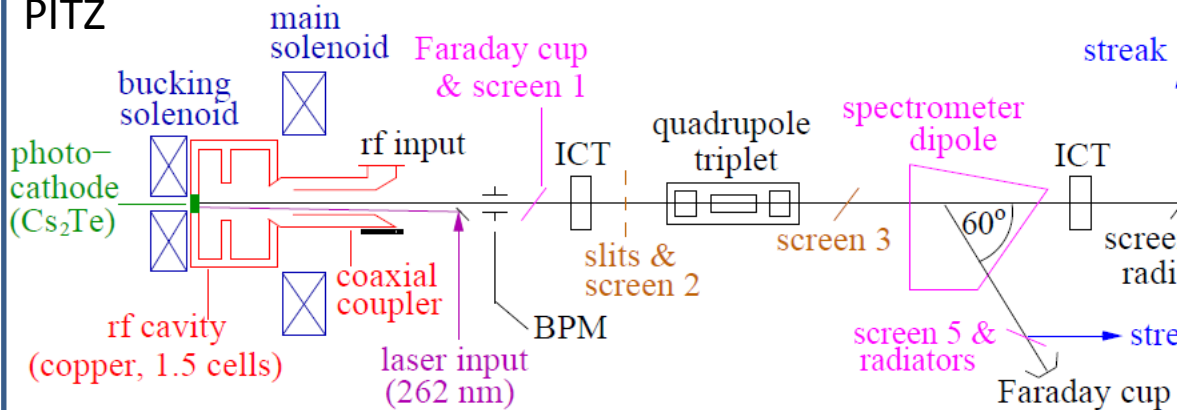
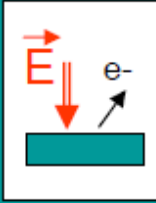


Photo-injecteurs :

- 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/cm²]
 $k_1, k_2 \sim$ 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

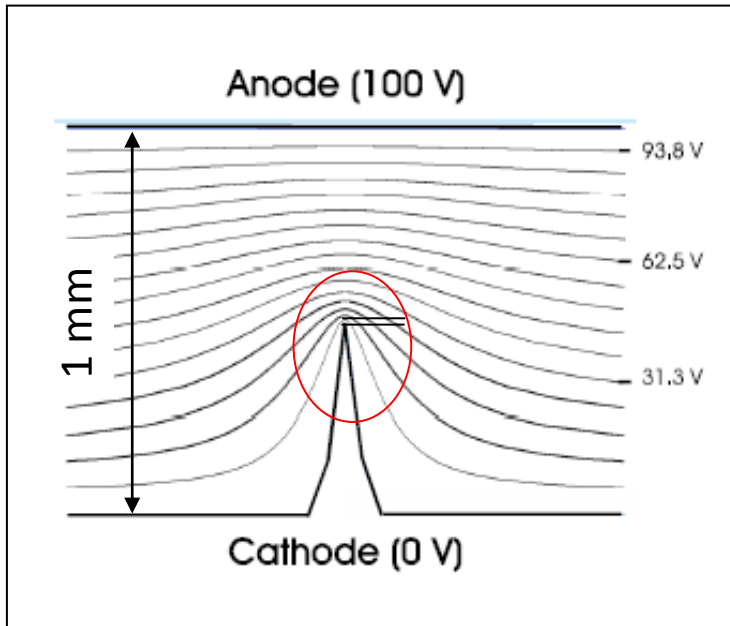
$$E \sim \beta E \quad \beta \nearrow 10 \text{ à } 100$$

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

Thermoémission et Thermoémission de champ

Effet de pointe

Effet de pointe : renforcement du champ par un facteur noté β



Resserrement des lignes de potentiel au niveau de la pointe

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

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

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

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

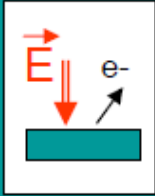
$$E_{loc} / E_m = \beta = 60$$

On remplace E par βE

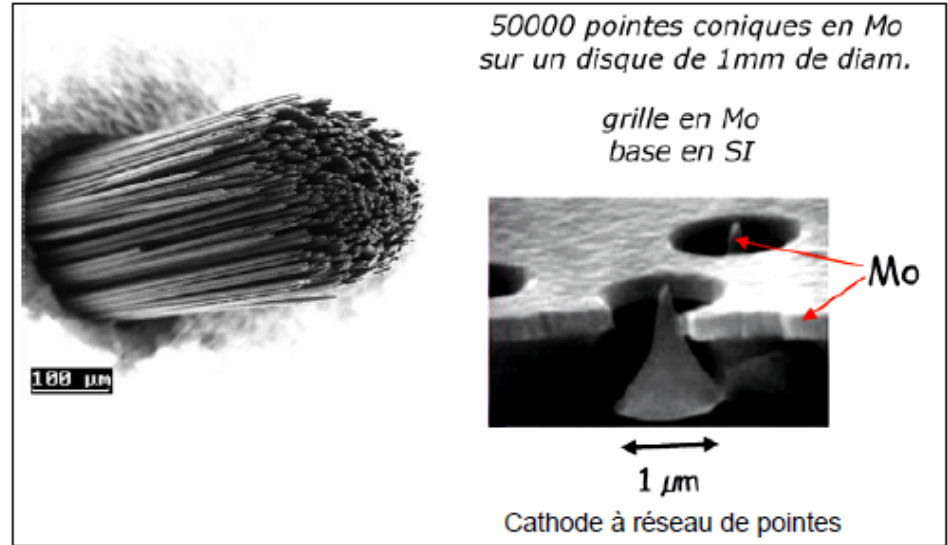
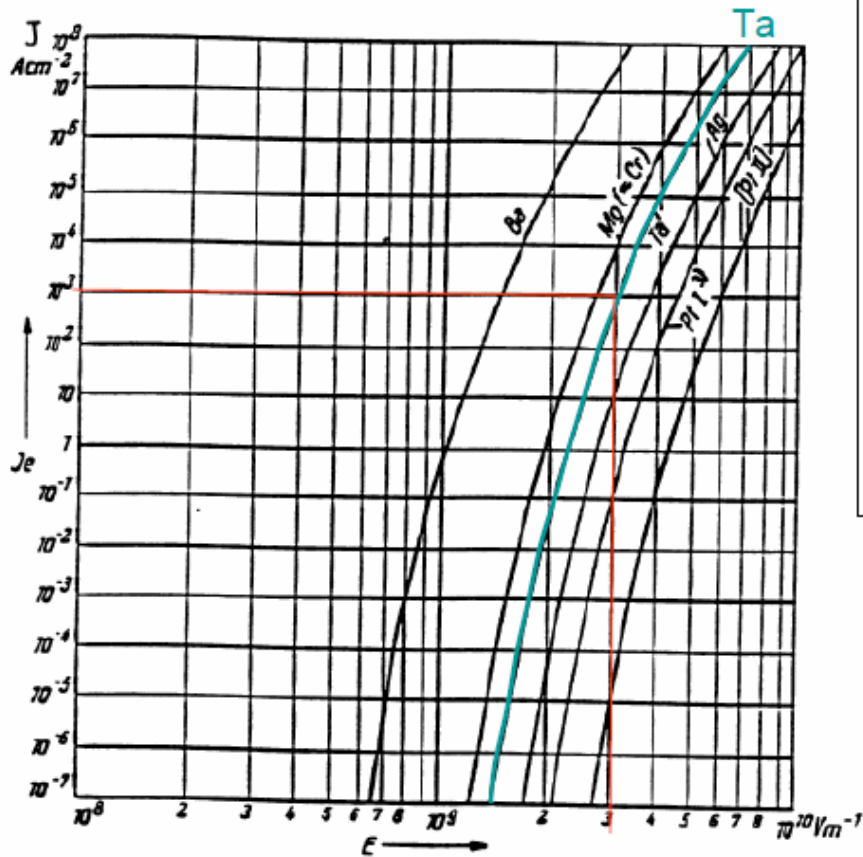
β dépend de la géométrie

$\beta \sim 100$ 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

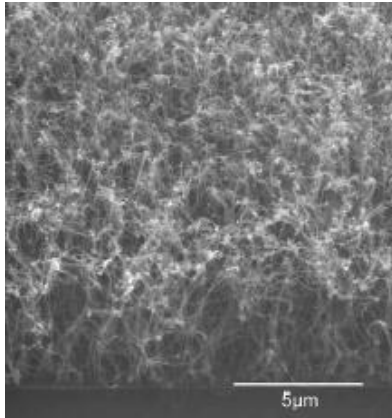
→ écrans plats

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

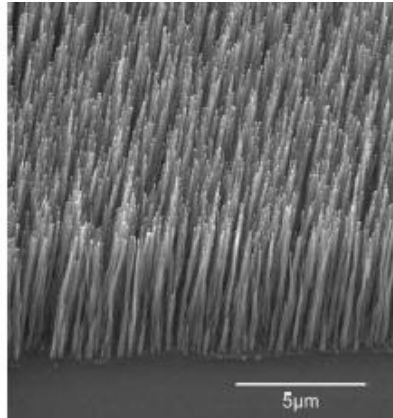
Facteur β énorme ~ 1000 , champ E appliqué plus faible

Emission de champ

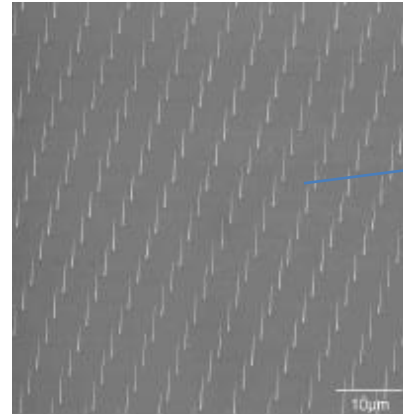
Différentes technique de fabrication nanotube carbone :



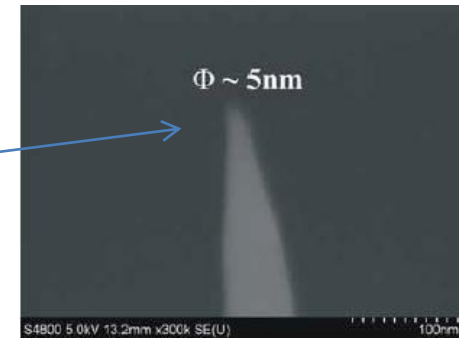
Nanotubes anarchiques



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, 2nd ICFA AAW
- Intense electron and Ion beams, SI Molokovsky, AD Sushkov (Springer)
- Electron beams & microwave vacuum electronics, SE Timsring, (Wiley) 2007