



Plan de l'exposé

- Rappels
- Processus émissions, cathodes et canons
- Nouvelles sources
- 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 !!

- **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 : $E = 2 \text{ MeV}$

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

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

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

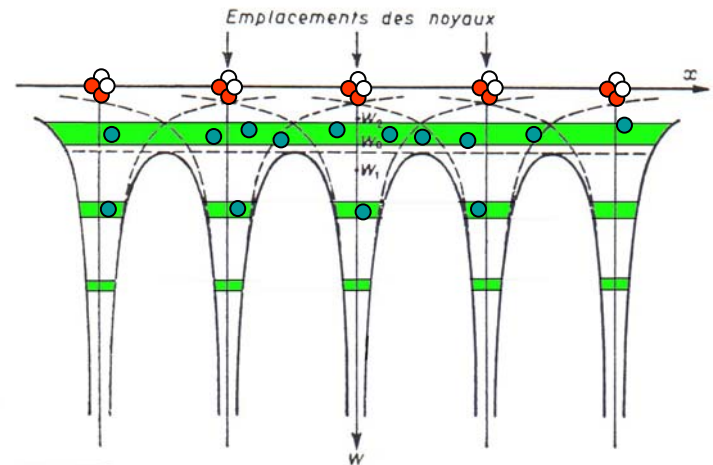
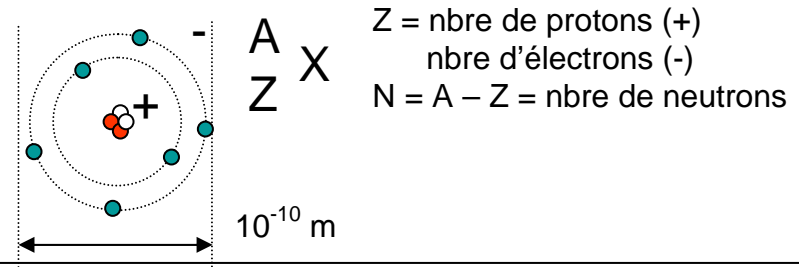
*1 eV = énergie d'un électron sous une ddp de 1 V

**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

modèle planétaire en physique classique

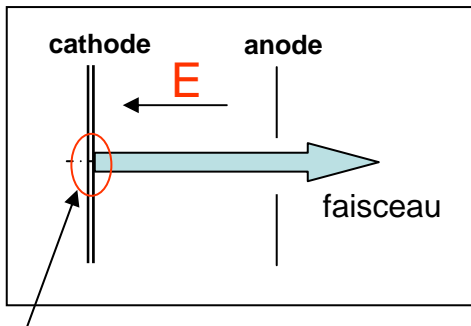


Statistique de Fermi-Dirac

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

Comment fait-on un faisceau d'électrons ?

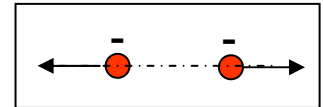
Principe du canon



Émission électrons

Émission d'électrons + accélération avec \vec{E}
→ énergie faisceau du keV au MeV

Faisceau = ensemble d'électrons
→ répulsion coulombienne



→ Quatre principes physiques d'émission

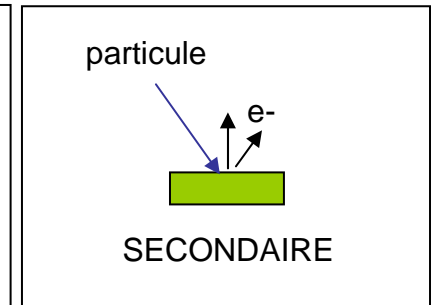
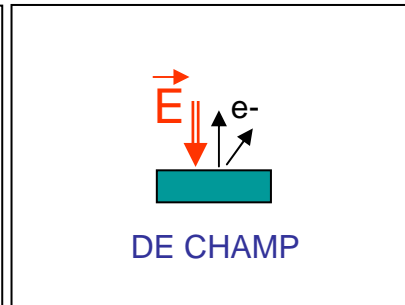
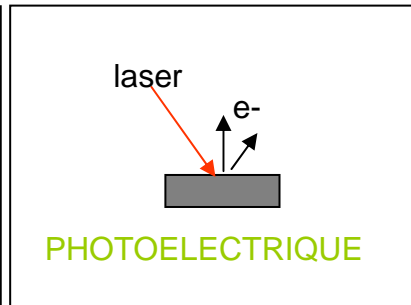
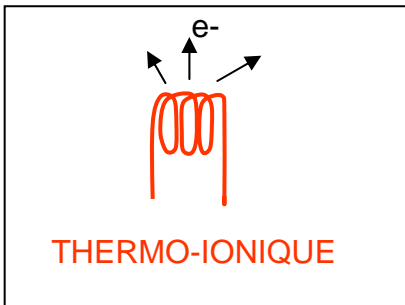
Qualités recherchées

- Faisceau **Intense** : courant élevé
 - Cathode **robuste** : longue durée de vie
 - Faisceau **Brillant** → **1/émittance**
 - Durée impulsion **courte**
- } **Industrie**
- } **Recherche**

Processus d'émission

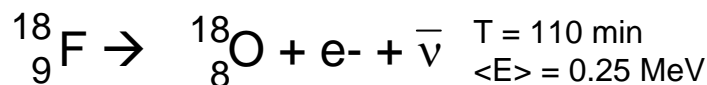
A partir de la matière **stable** :

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

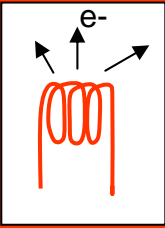


→ Plusieurs processus peuvent avoir lieu en même temps

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



Emission Thermoionique

Loi de Richardson (1902)

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

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

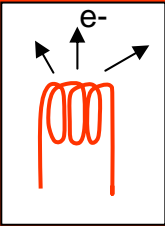
J_s : densité de courant	[A/cm ²]
A ~ constante ~ 120	[A/cm ² /K ²]
T : température	[K]
k : constante de Boltzmann	[eV/K]
W : travail de sortie	[eV]

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

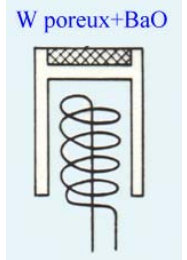
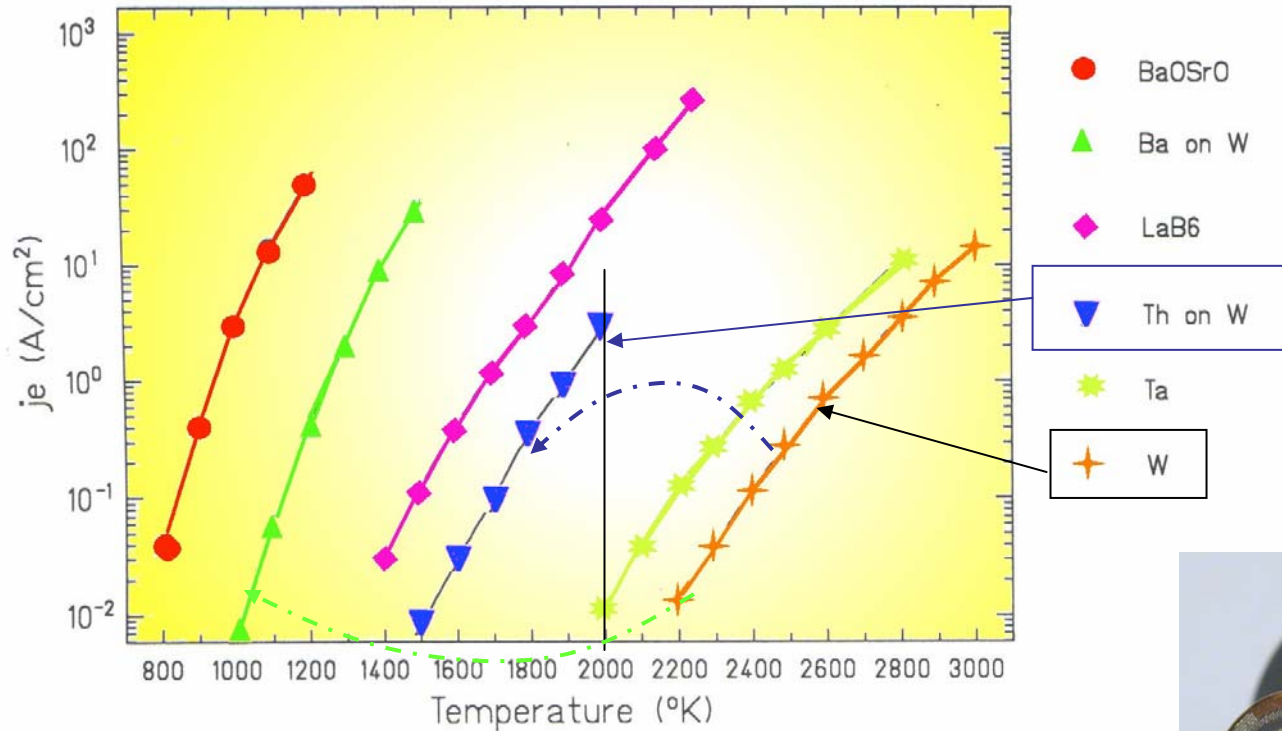
En pratique : matrice en matériau réfractaire + élément chimique qui rend W plus faible (**activation**)

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 $J_s \sim \mathbf{0.005}$ A/cm²
Tungsten W+Th $T = 2000$ K, $W = 3.2$ eV $J_s \sim \mathbf{4}$ A/cm²



Cathodes Thermoioniques

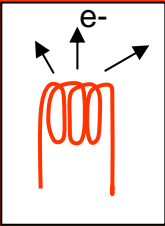


$\text{Cs} = 1.94 \text{ eV}$
 $\text{W} = 4.53$
 $\text{BaO} = 1.57$
 $\text{LaB}_6 = 2.66$

Diminution de W et de $T^\circ\text{K}$ de travail

→ Durée de vie augmentée

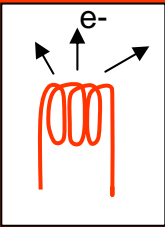




Cathodes Thermoioniques

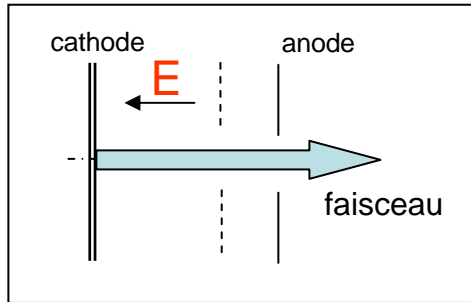
Composé	Matrice	Température (K)	Travail Sortie (eV)	Durée Vie (h)
ThO ₂ W ₂ C fritté	W ₂ C	2200	2.7	10000 (3-4 ans)
BaO + SrO Dispenser L	W	1400	2.0	50000 (15 ans TV)
(BaO,CaO) ₃ +Al ₂ O ₃ W imprégné	W	1300	2.0	50000 (klystron)
LaB ₆	Ta	1700	2.8	1000

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



Canons Thermoioniques

Principe du canon

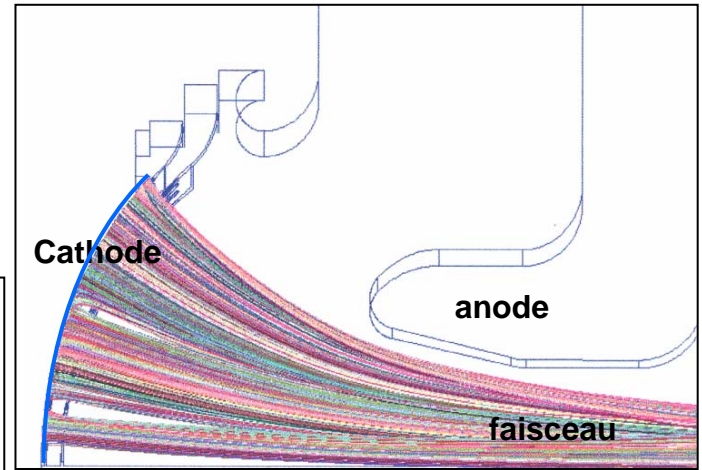


V : 10 à 1000 kV

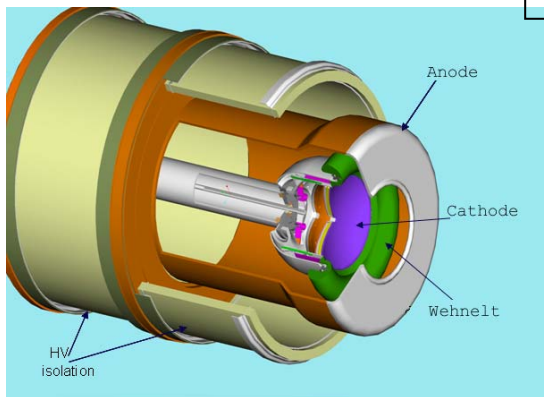
Child-Langmuir

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

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

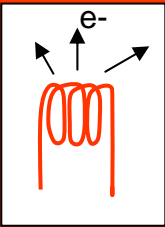


Les cathodes sont généralement sphériques
Canons géométrie de Pierce



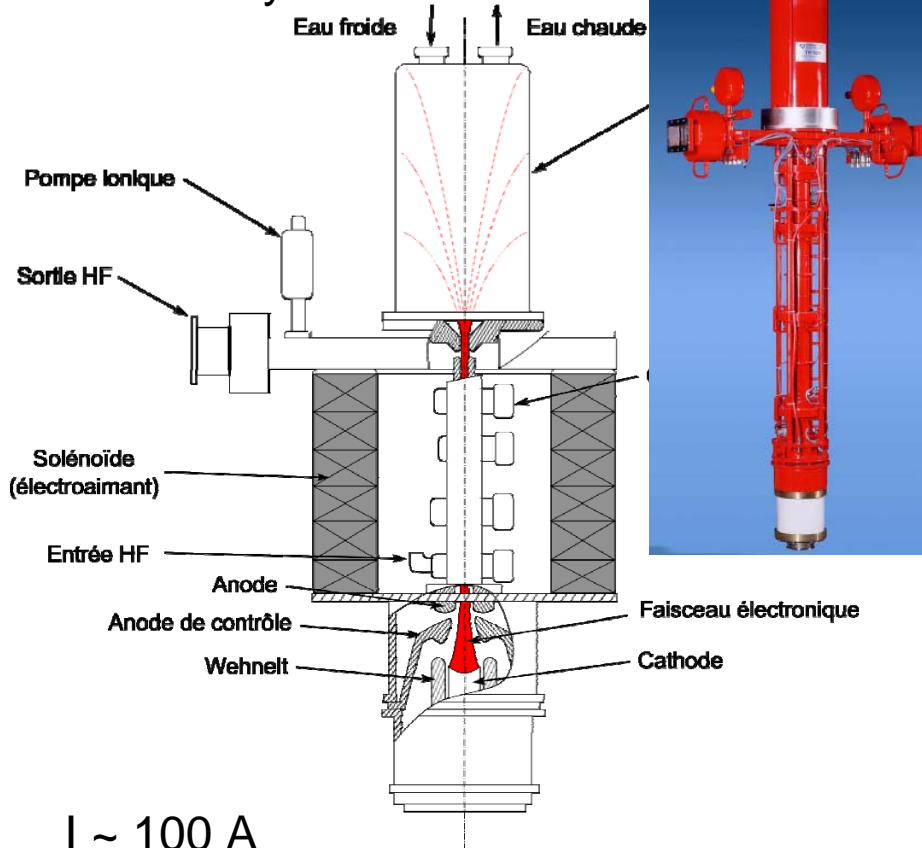
Le plus d'applications industrie + recherche

→ Robustesse + durée de vie

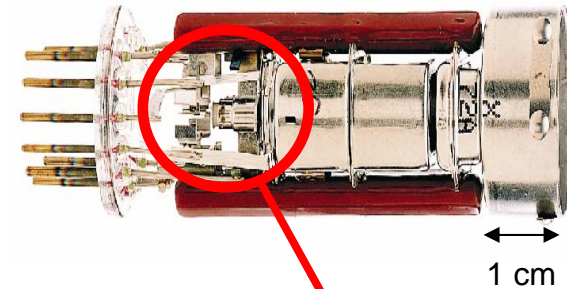


Canons Thermoioniques

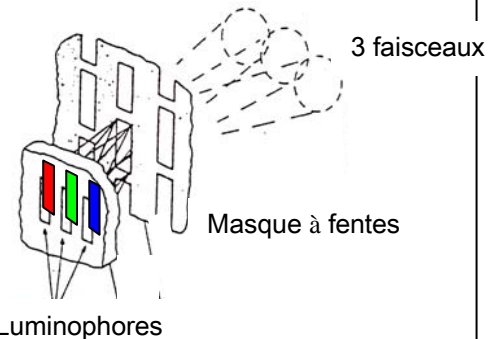
Schéma klystron

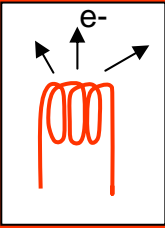


Canon électrons écran TV

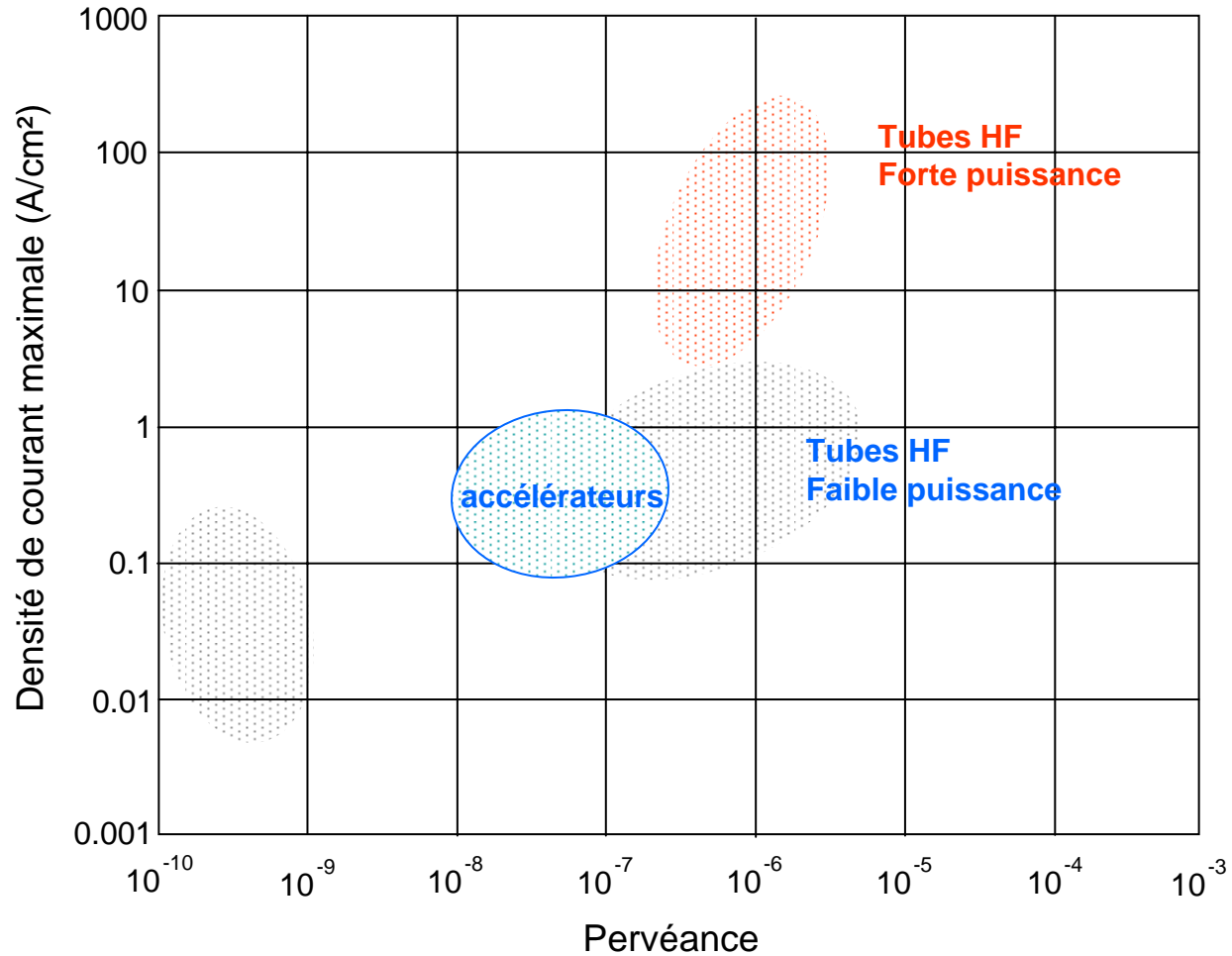


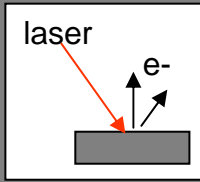
Cathode $I \sim \text{mA}$





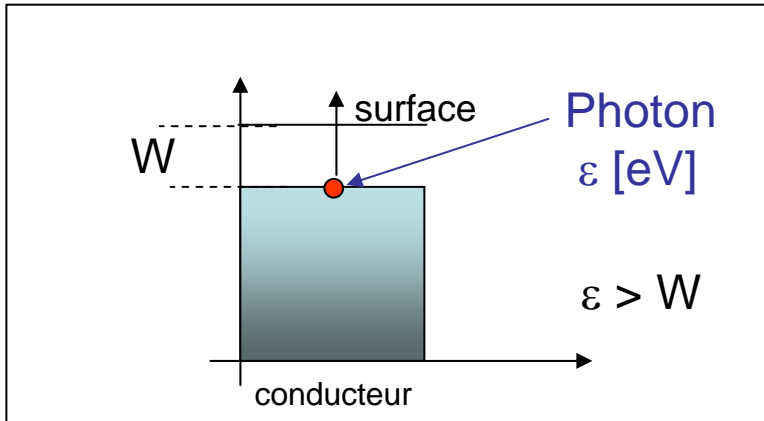
Canons Thermoioniques





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

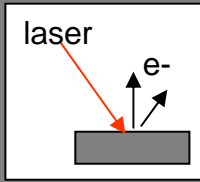
Loi de Fowler-Dubridge

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

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 : éclairement	[W/cm ²]
$F(x)$: fonction de Fowler	



Cathodes Photoélectriques

Rendement photoélectrique

$$\eta = \frac{N_e}{N_{ph}}$$

Q [C]

E [J]

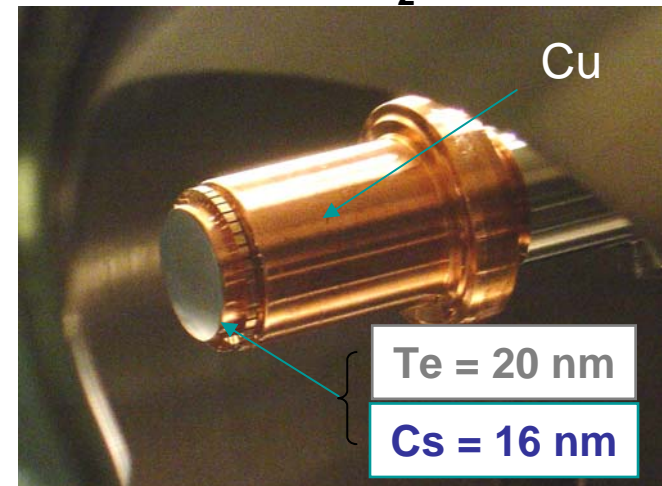
Métaux : - mauvais rendement $\ll 1\%$
+ bonne résistance

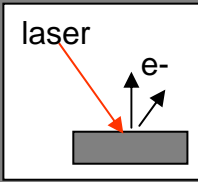
Semi-conducteur : + rendement \sim qlq %
- sensibilité vide

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 ₂ CsSb	10.0×10^{-2}	16×10^{-2}	3×10^{-2}
Cs ₂ Te	8.0×10^{-2}		

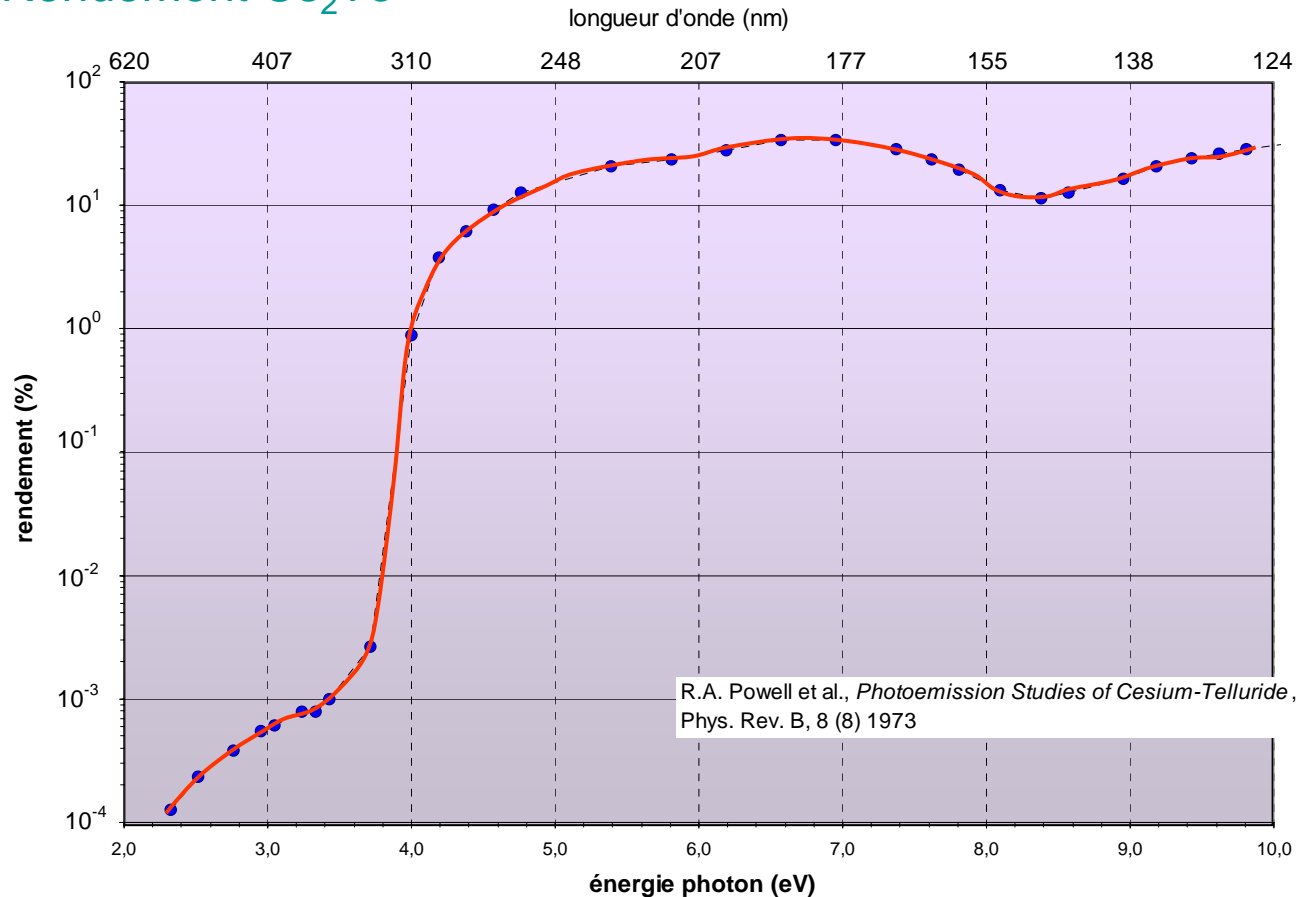
Photocathode **Cs₂Te** - ELYSE





Cathodes Photoélectriques

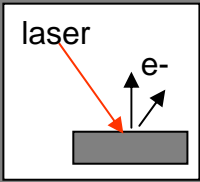
Rendement Cs₂Te



Rendement chute à l'utilisation :
- Pollution
- bombardement

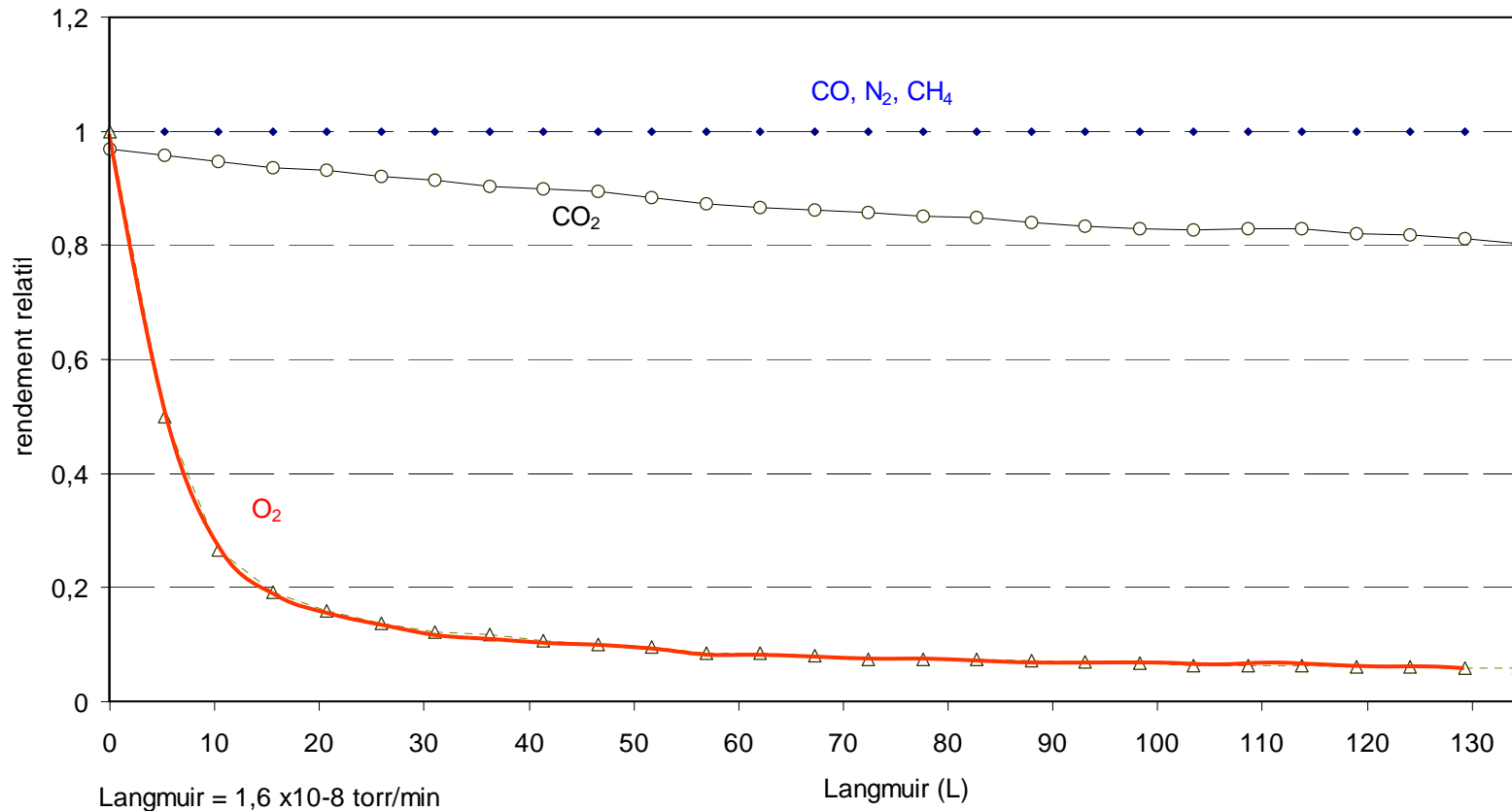
Durée de vie :
mois... année

Dépend de l'utilisation

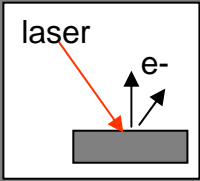


Cathodes Photoélectriques

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

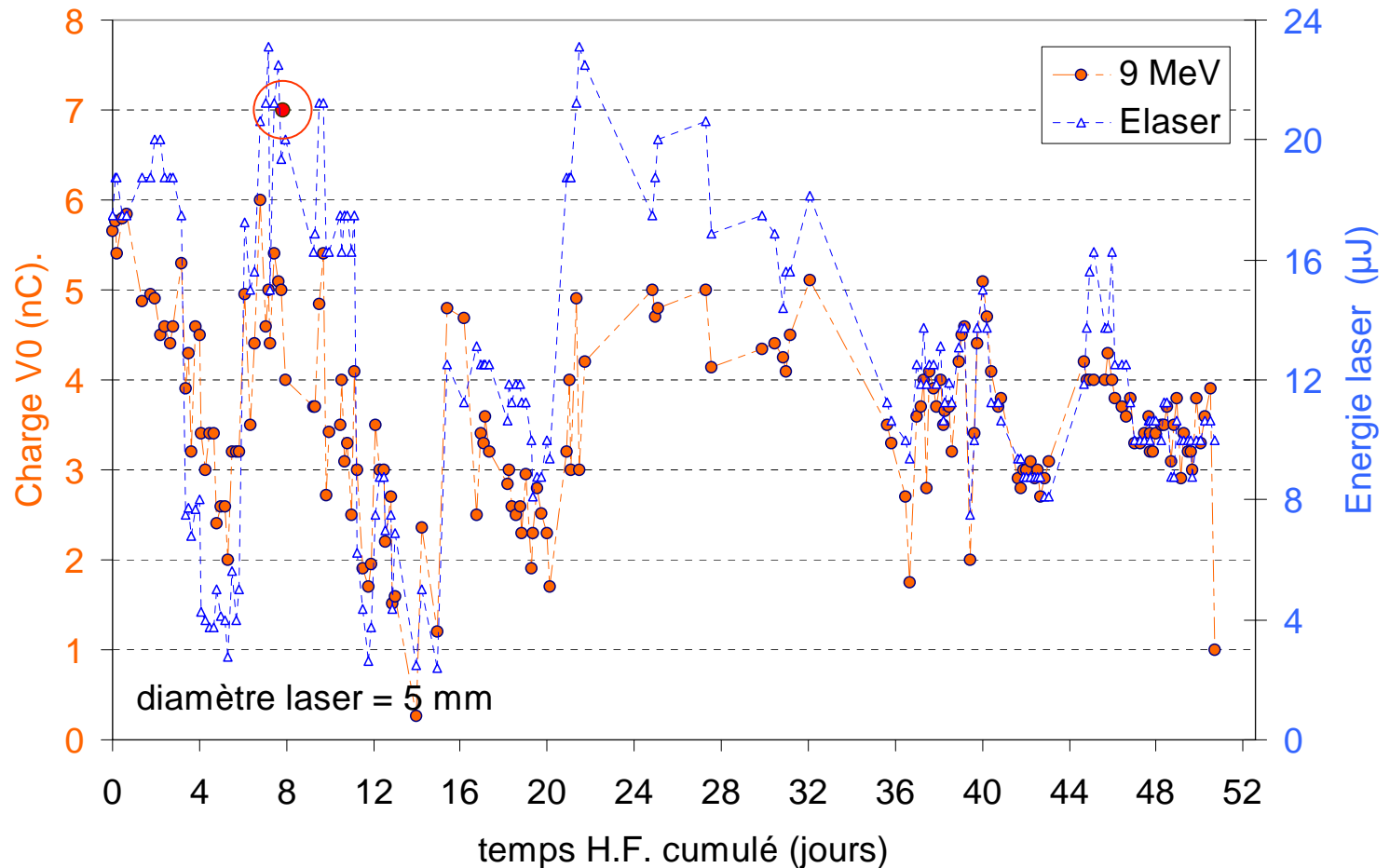


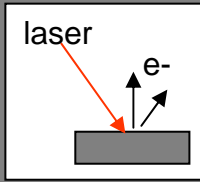
Cathodes Photoélectriques

18 mars 2003

Durée de vie Cs₂Te n°1

20 juin 2005

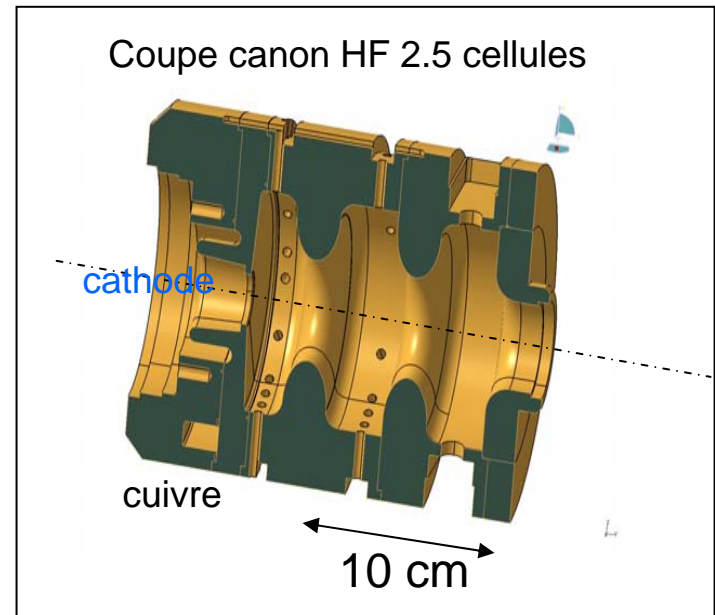
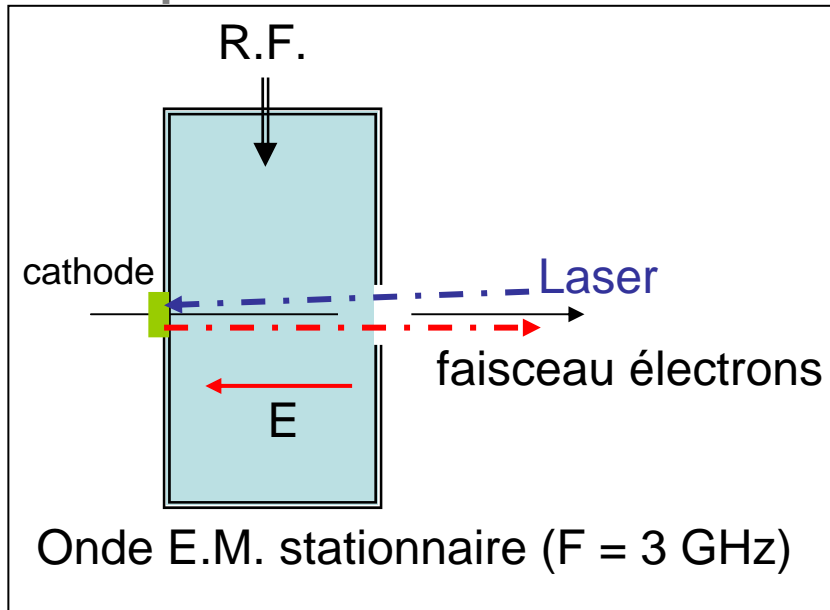




Canons Photoélectriques

canon HF

Principe canon HF



Design par simulation

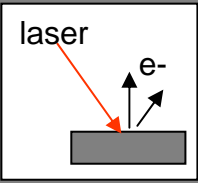
Avantages :

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

Faible dispersion énergie < **1%**

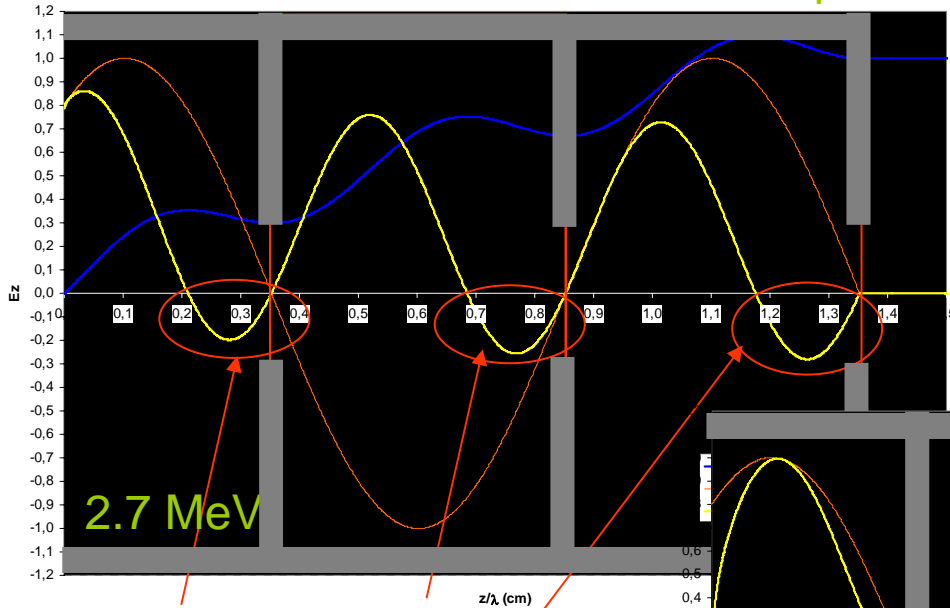
Possibilité électrons **polarisés** (AsGa)

Photo-injecteurs



Canons Photoélectriques

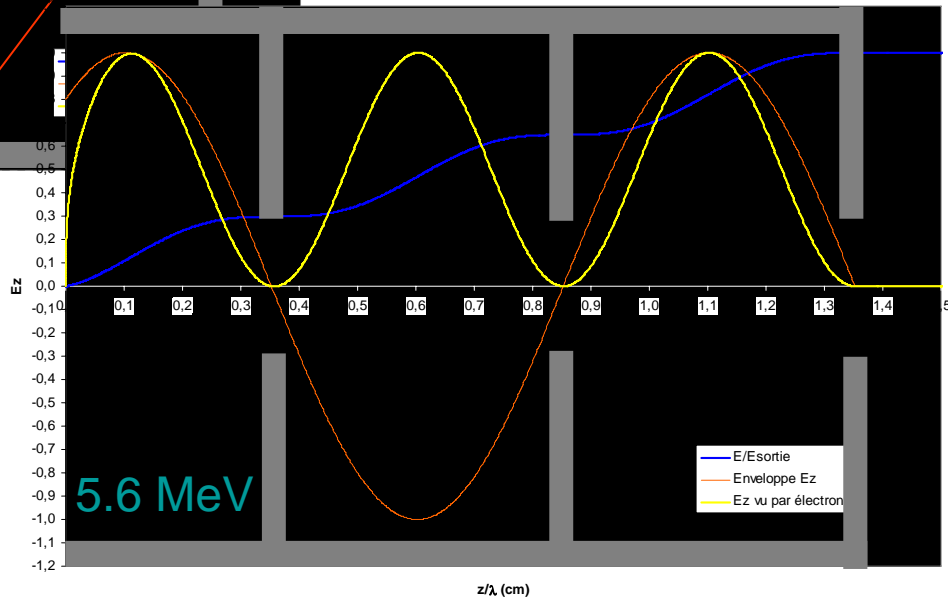
mauvaise phase



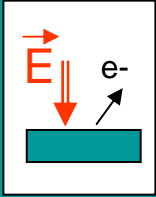
Champ E décélérateur

Optimisation énergie sortie
 Canon 2.5 cellules
 $E(z,t) = E_0 \cos(kz) \sin(\omega t + \phi)$

$E_{zmax} = 80 \text{ MV/m}$ bonne phase



énergie
 enveloppe E_z
 E vu par électron



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 : $E \uparrow$ $W \downarrow$

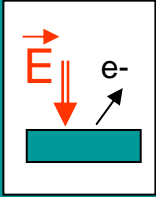
J_s : densité de courant	[A/cm ²]
k_1, k_2 ~ constante	
E : champ électrique	[V/m]
W : travail de sortie	[eV]

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

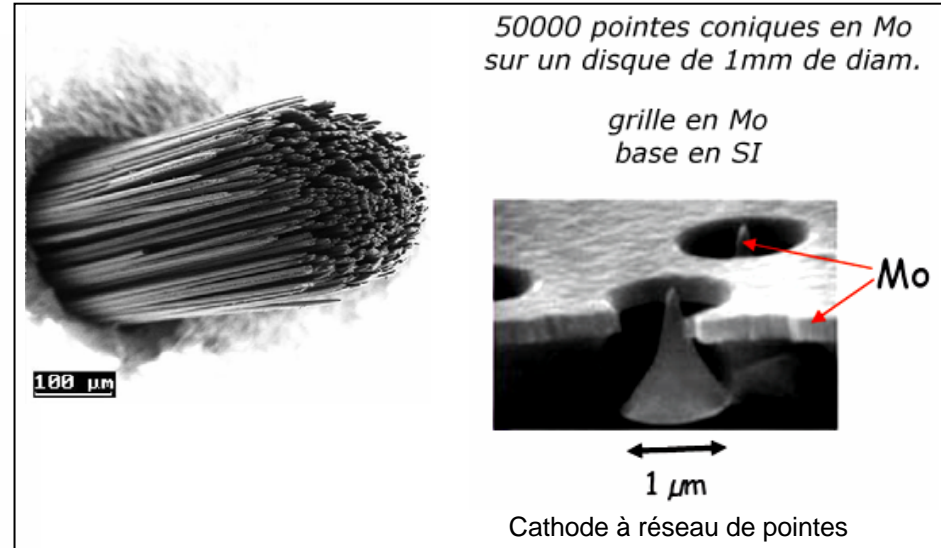
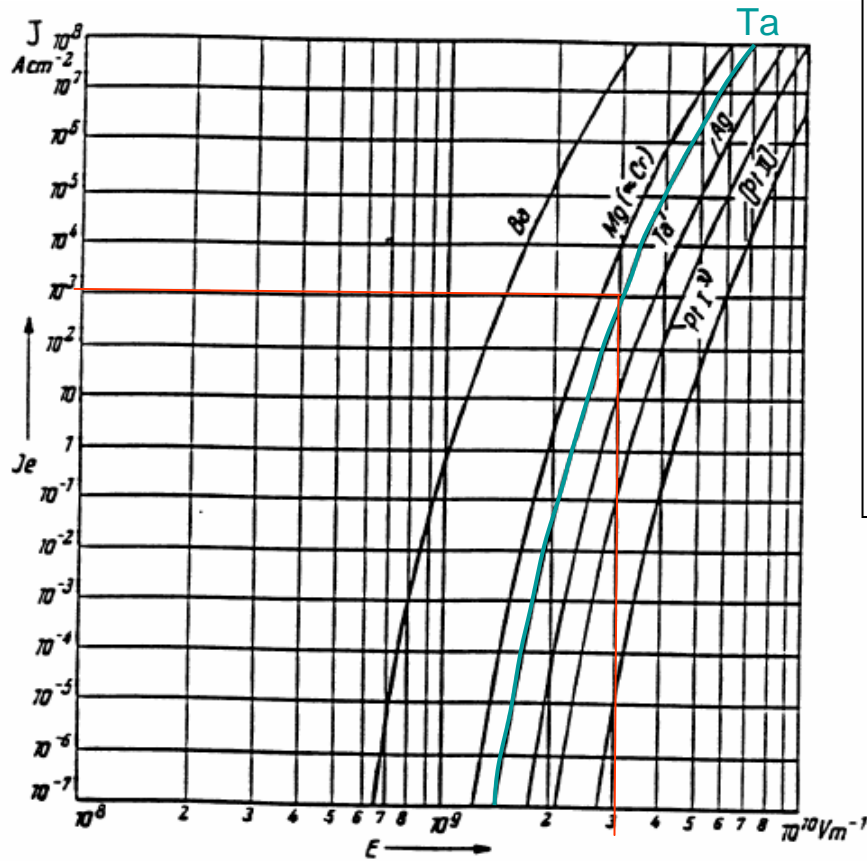
Augmenter E : effet de pointe renforcement du champ électrique local
 $E \sim \beta E$ $\beta \nearrow 10 \text{ à } 100$

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

Thermoémission et Thermoémission de champ



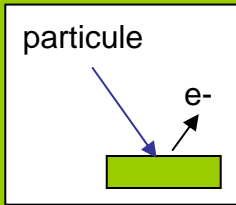
Cathodes émission de champ



Haute intensité, fragilité

Difficulté fabrication cathode + coût

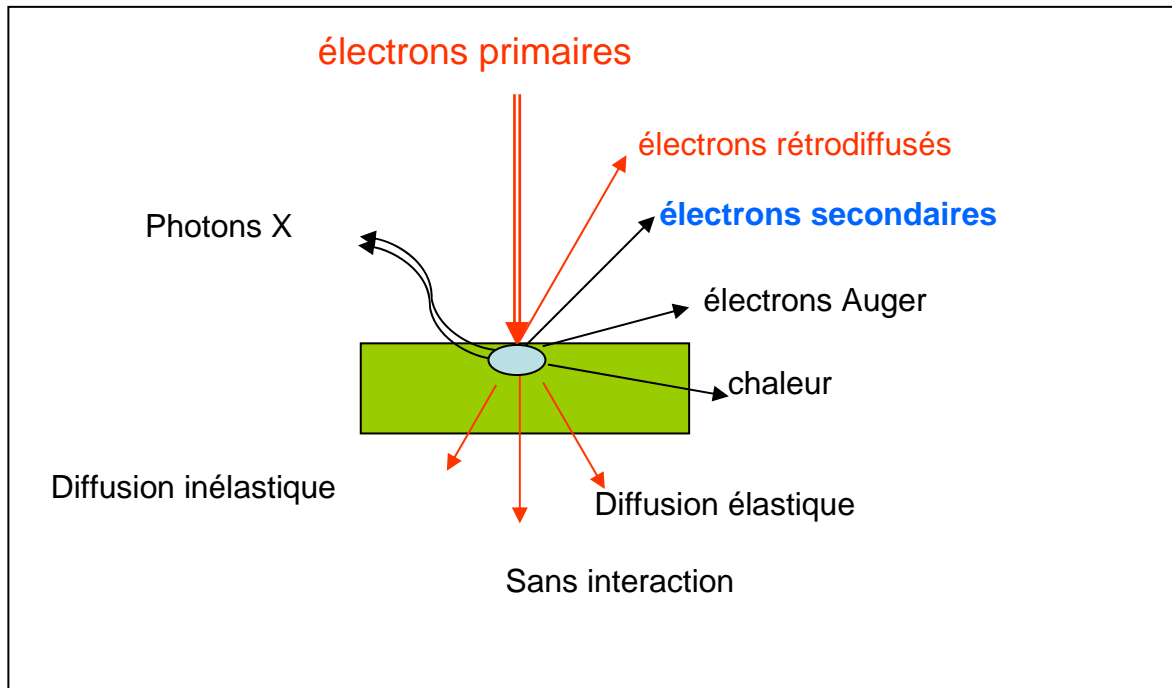
- Microscopie électronique
- écrans plats



Emission secondaire

Emission d'électrons par une surface soumise au bombardement d'une particule

Interaction faisceau-matière

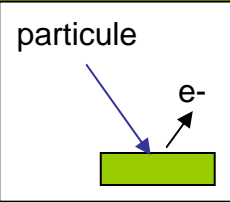


Taux d'émission

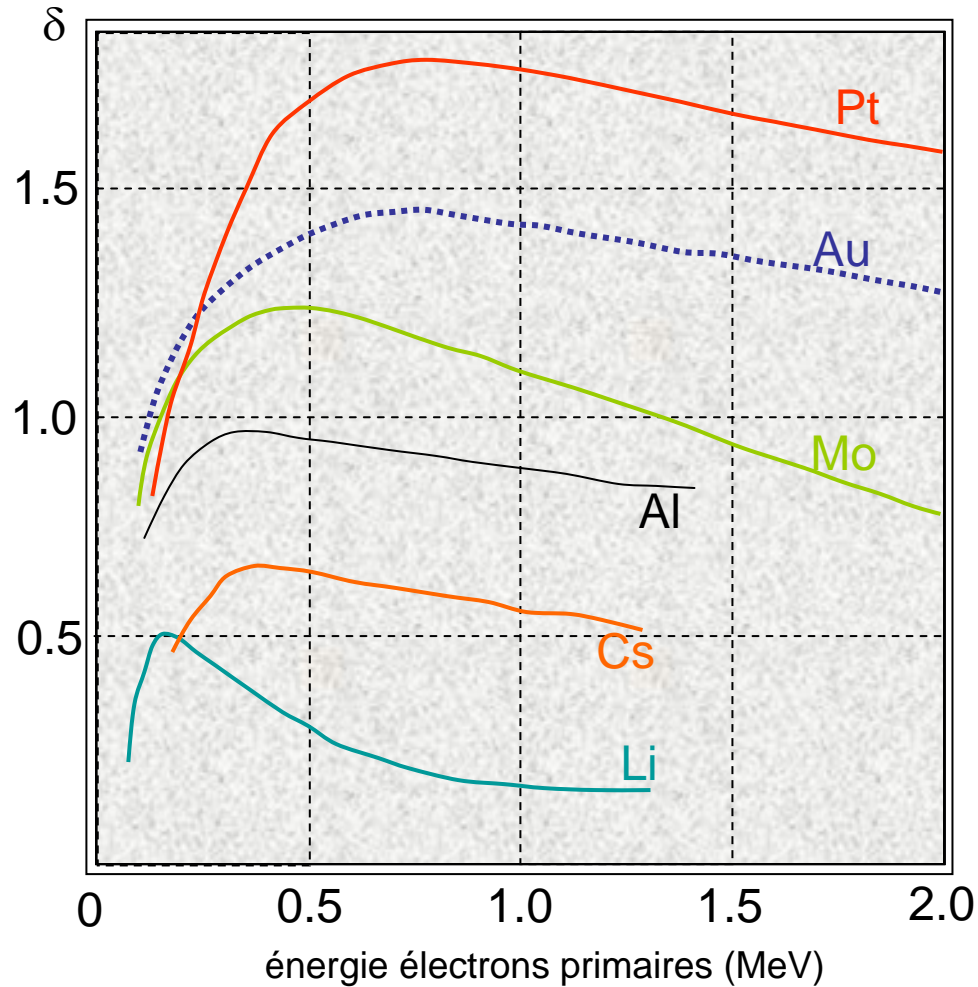
$$\delta = \frac{N_{ep}}{N_{es}}$$

$\delta = f(E_p, \text{matériau})$

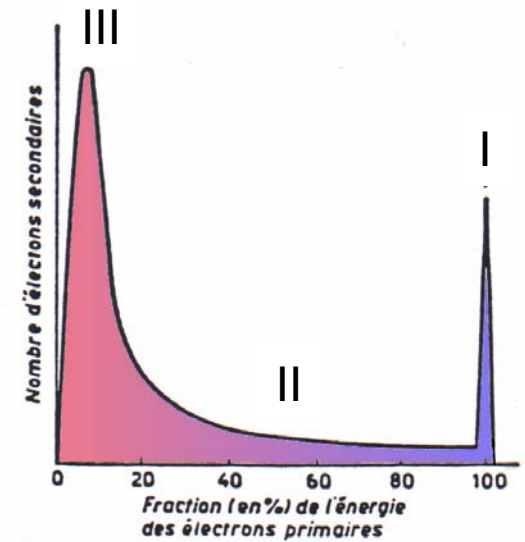
$\delta \sim 0.1 \text{ à } 10$



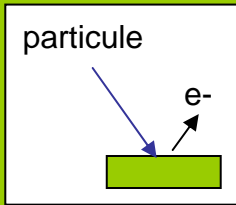
Emission secondaire



Énergie des secondaires

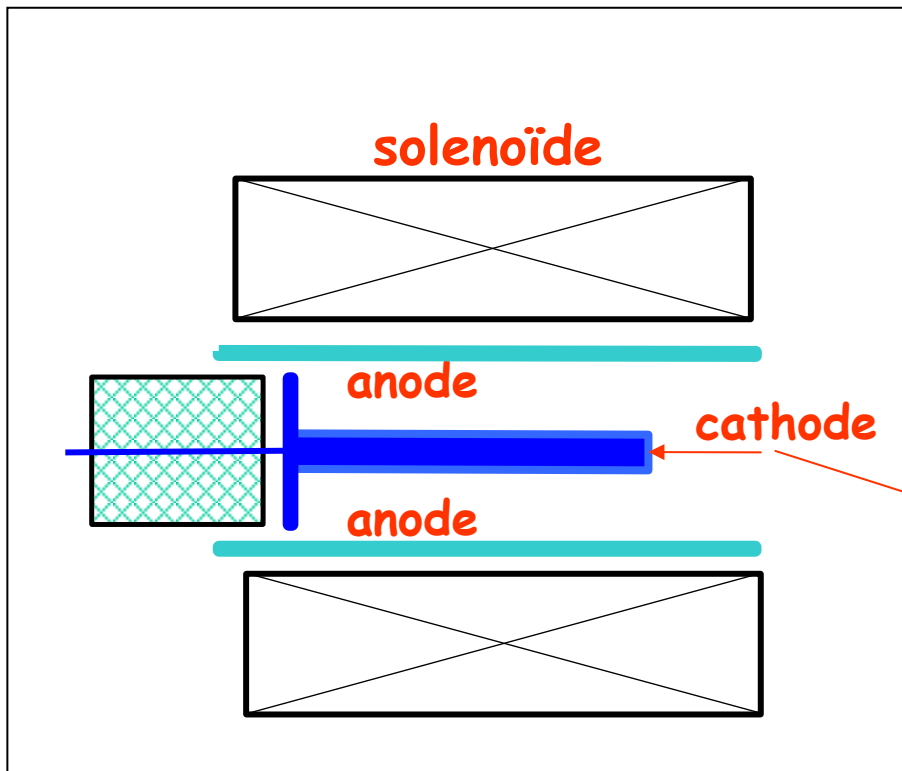


- I : primaires
- II : primaire rétrodiffusés
- III : secondaires



Emission secondaire

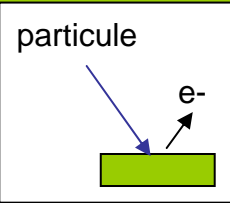
Secondary Emission Magnetron Injection Gun (SEMIG)



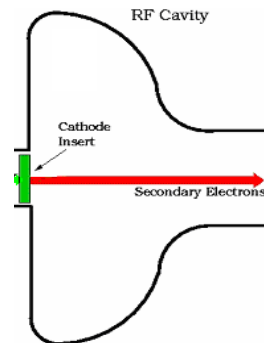
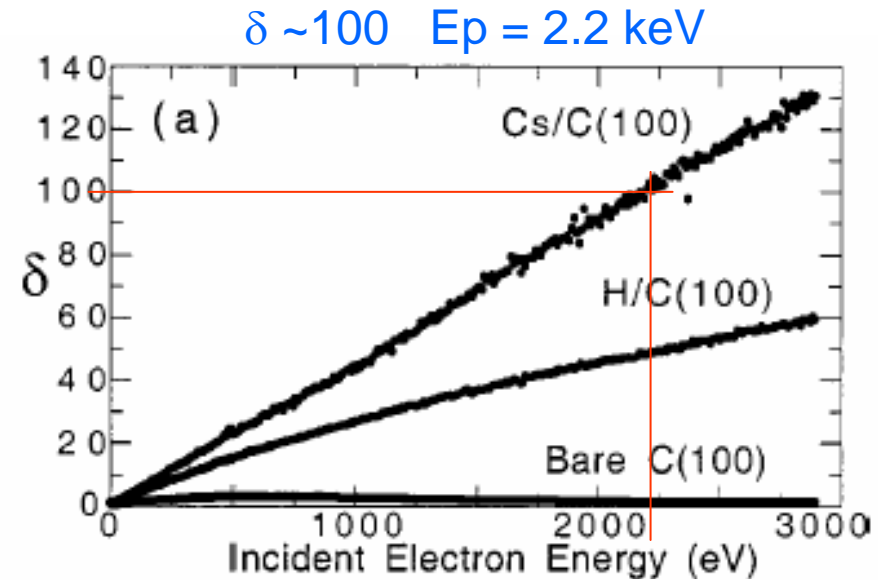
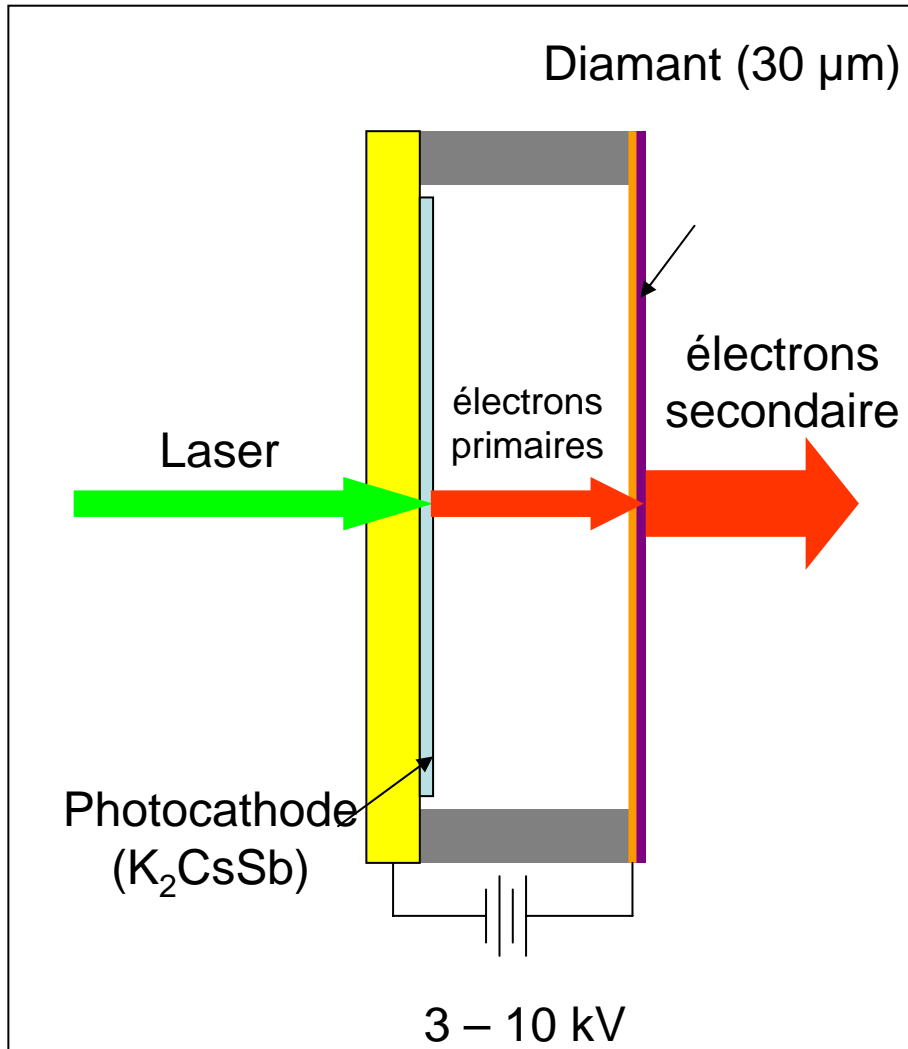
$I \sim 40 \text{ A}$



Pièces du canon



Emission secondaire



J. Smedley et al. Brookhaven

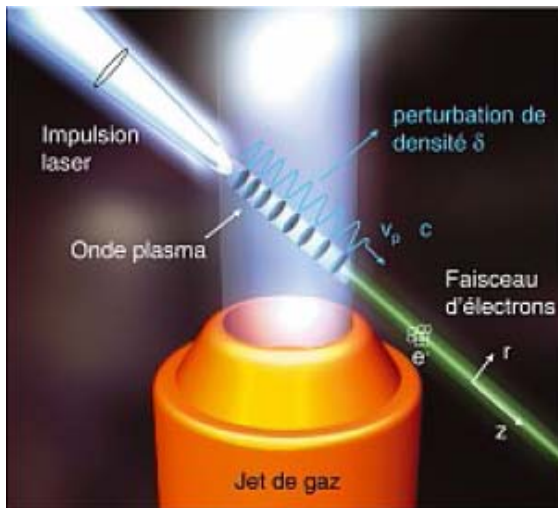
Nouvelles sources d'électrons

Limitation du gradient accélérateur dans les cavités

—→ Accélérateur de plus en plus grands (recherche)

—→ Utilisation des **plasmas** (milieu ionisé) [1980 et 1990]

Source plasma : focalisation d'un laser puissance crête **TW** (durée fs) !



- + énorme gradient accélérateur \sim GV/m
- 100 MeV en 1 mm
- + durée impulsion ultra-courte \sim 10 fs
- maîtrise dispersion énergétique
- faible charge
- fiabilité

Nanotubes de carbones : 1 -10 nm diamètre, longueur \sim μ m
Facteur β énorme \sim 1000 , champ E appliqué plus faible

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

Accélérateurs électrons industriels

Gamme énergie	Basse	Moyenne	Haute	Haute
Energies	10 à 300 keV	300 keV à 1 MeV	0.1 MeV à 10 MeV	1 à 16 MeV
Courant	10 à 2000 mA	25 à 300 mA	10 à 500 mA	
Puissance	1 à 100 kW	5 à 300 kW	5 à 700 kW	
Prix	0.5 à 2 M\$	0.5 à 2 M\$	1 à 8 M\$	0.3 à 2 M\$
Applications	Soudure métaux, découpage, perçage, vaporisation ...	Traitement des polymères, des plastiques, isolant pour câbles, du caoutchouc des pneus, des plastiques,	Traitement de surface, des polymères, des eaux usées, irradiation, stérilisation pour le médical et la nourriture, ...	Contrôle non destructif par rayons X (sécurité)
Taille marché	150 M\$ + 8%	100 M\$ + 10%		70 M\$ + 80%
Technique accélération	HT externe	Cockroft-Walton, Dynamitron, Linacs RF, Rhodotron		Linacs

Applications industrielles

