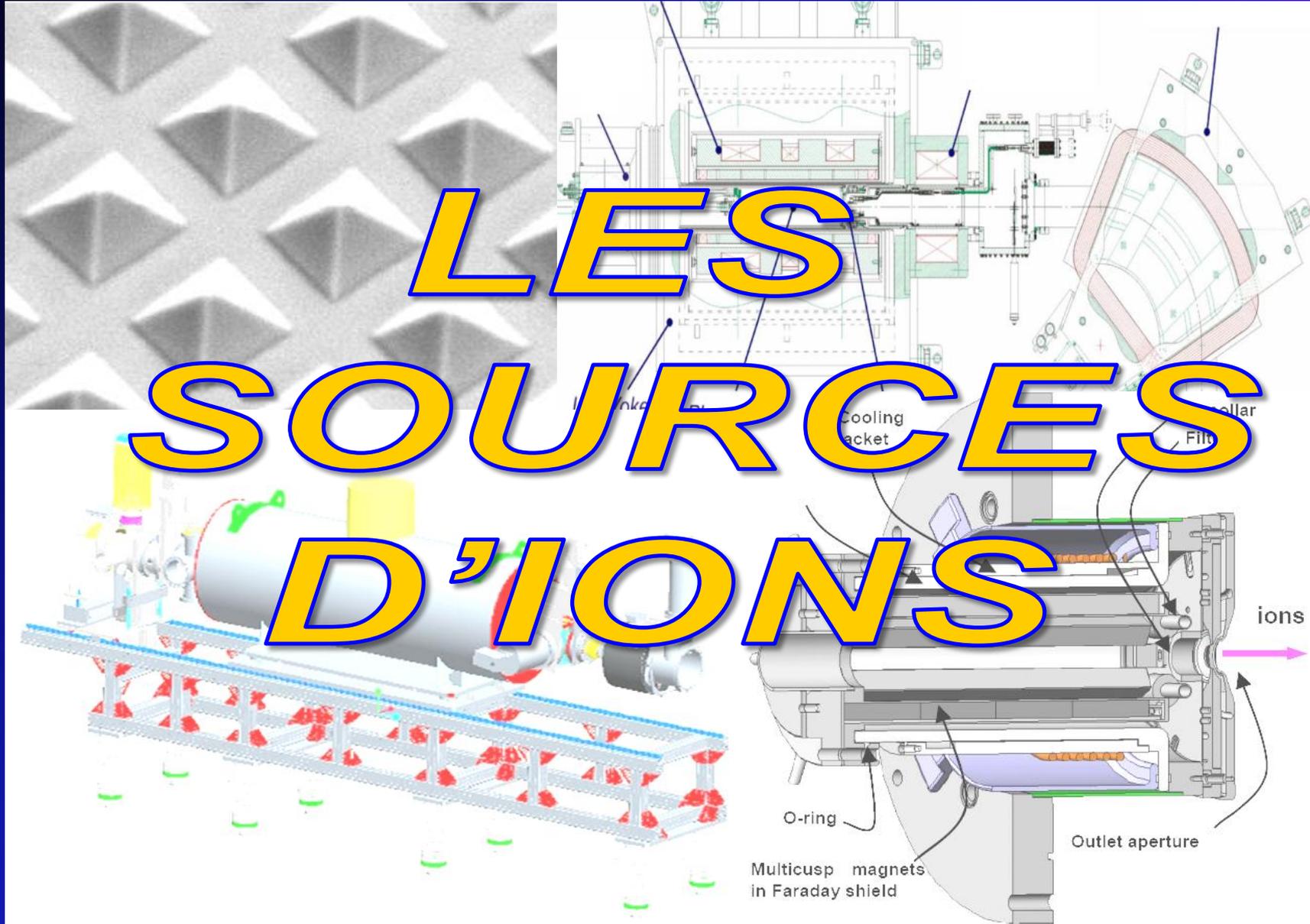


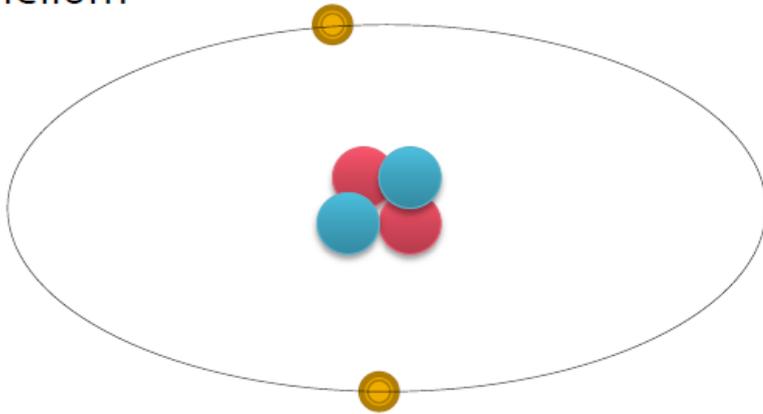
**B  
é  
n  
o  
d  
e  
t  
  
2  
0  
1  
1**



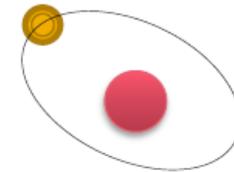
# Définition : un atome

- Atome
  - Autant d'électrons que de charges positives dans le noyau → Neutralité

Helium



Hydrogène



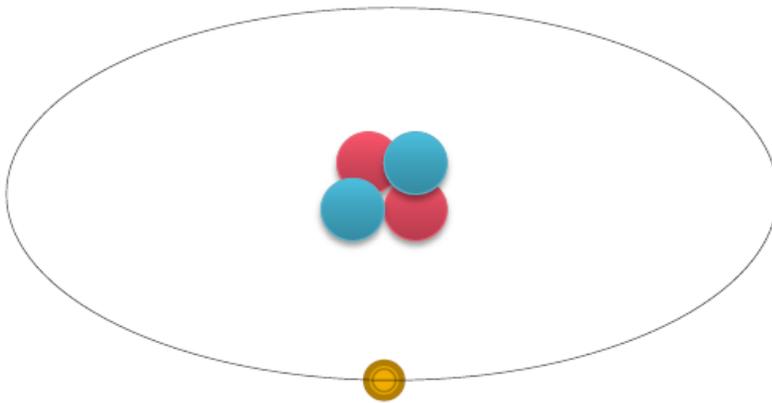
# Définition : un ion

- Ion : excès ou défaut d'électrons
  - → charge électronique

Hélium  
Une fois ionisé  
 $\text{He}^+$



Hélium  
deux fois ionisé  
 $\text{He}^{2+}$



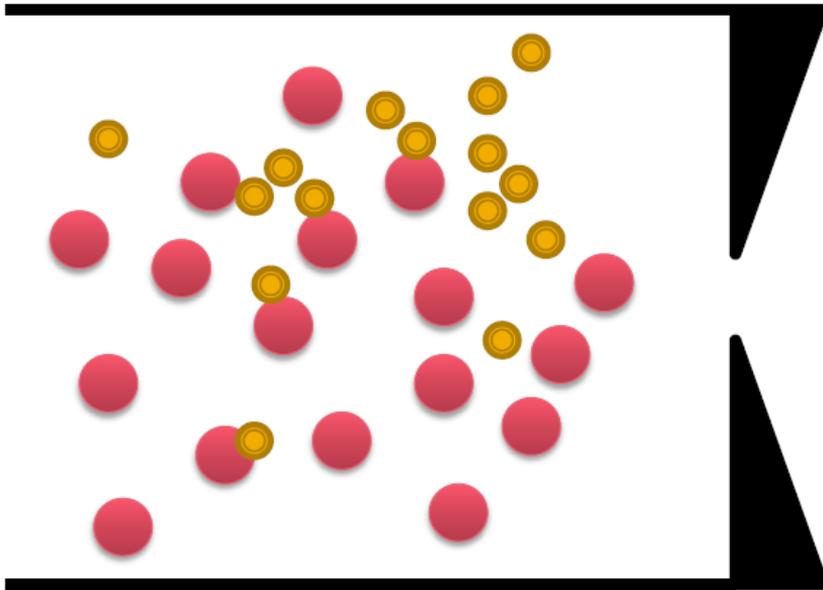
Hydrogène  $\text{H}^+$



# Définition : un plasma

- Plasma : « une soupe » d'ions et d'électrons
  - → globalement neutre

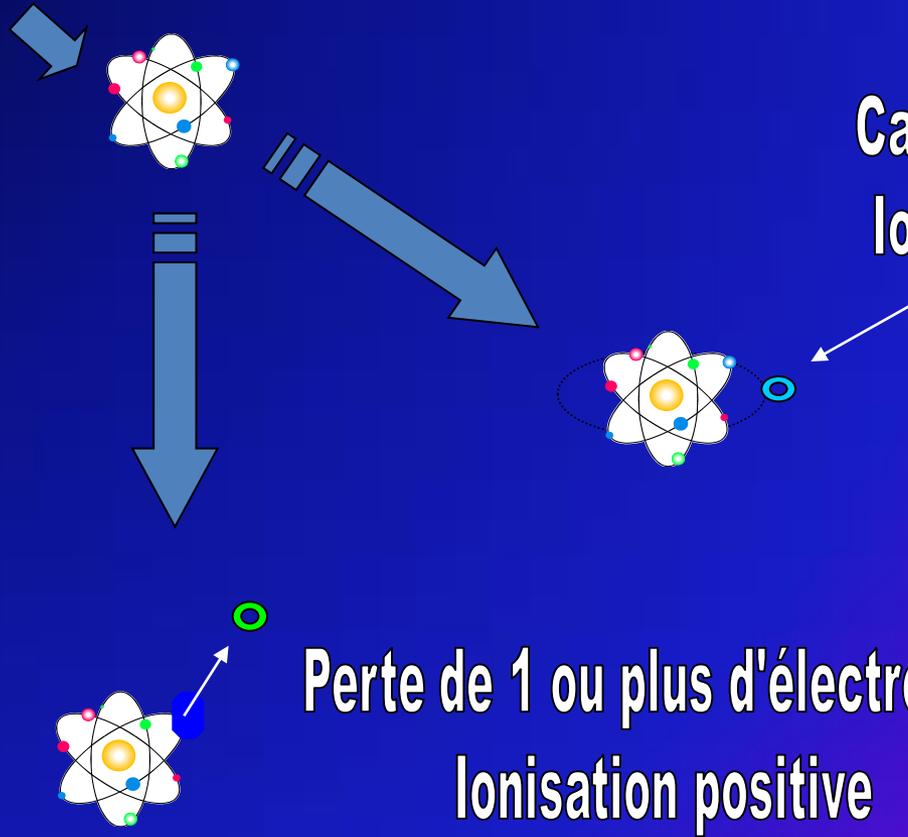
Hydrogène  $H^+$    
électron 



# La génération des ions ( $X^+$ et $X^-$ )

**I  
n  
t  
r  
o  
d  
u  
c  
t  
i  
o  
n**

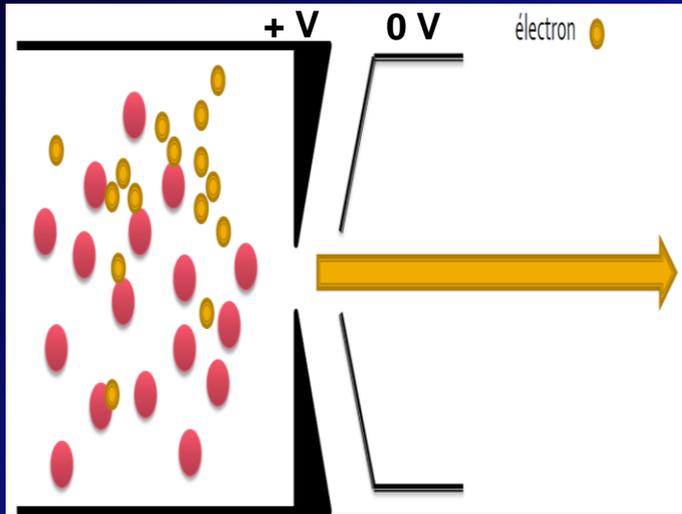
**PERTURBATION**  
(collision, T, E, , )



Perte de 1 ou plus d'électrons :  
Ionisation positive

Capture d'électron :  
Ionisation négative

# Qu'est-ce qu'une source?



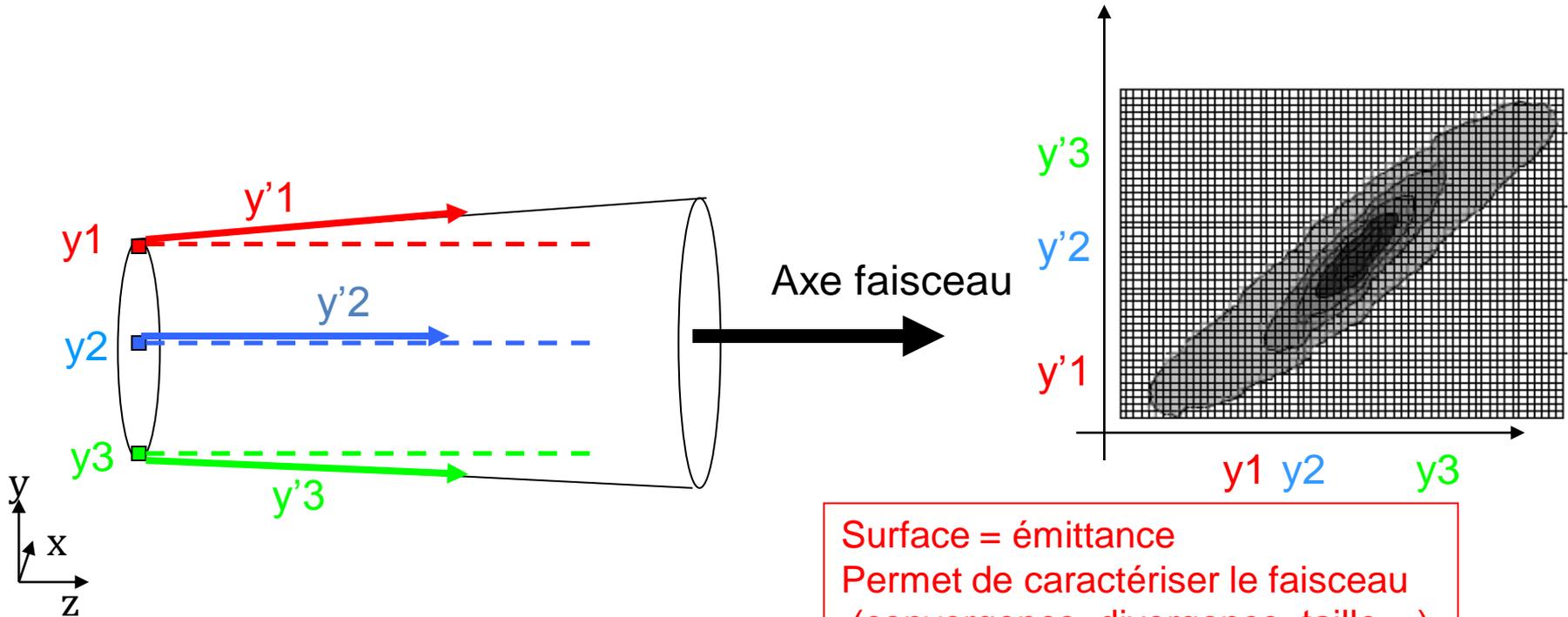
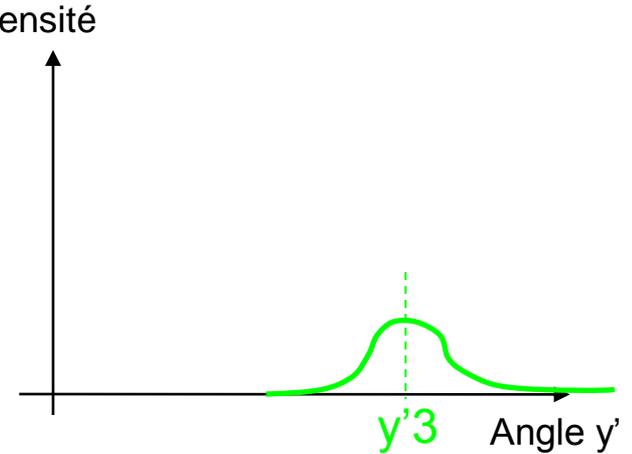
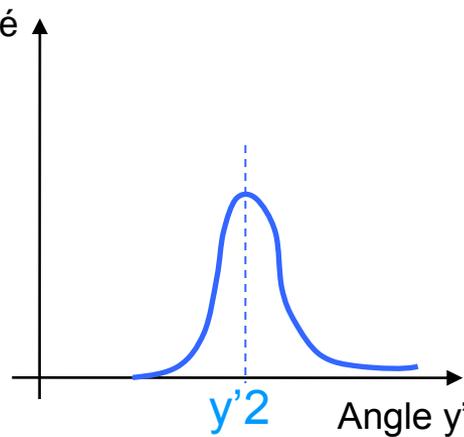
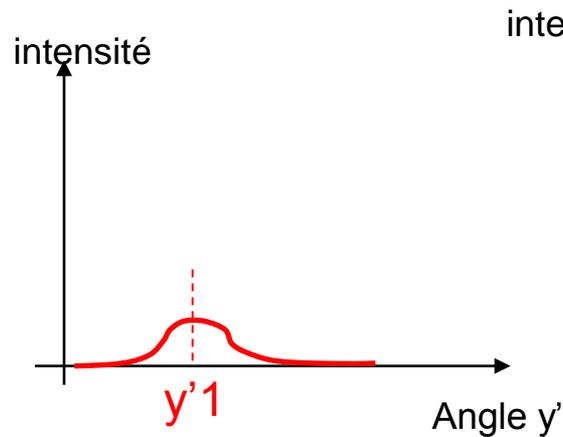
- Orifice placé devant une électrode à fort potentiel qui "extraie" une population de particules de signe opposé au potentiel par rapport à celui de la source.

- Les applications nécessitent que ces particules issues de la source soient mises en forme collective par un choix judicieux de la géométrie d'extraction, puis transportées par un système d'optique corpusculaire.

- *La source travaille dans le vide. Elle génère une collection cohérente de particules le « faisceau »*

- *Avec des caractéristiques bien définies :  $V$ ,  $I$ ,  $r$ ,  $r'$ , composition et l'émittance.*

# Qu'est-ce que l'émittance?

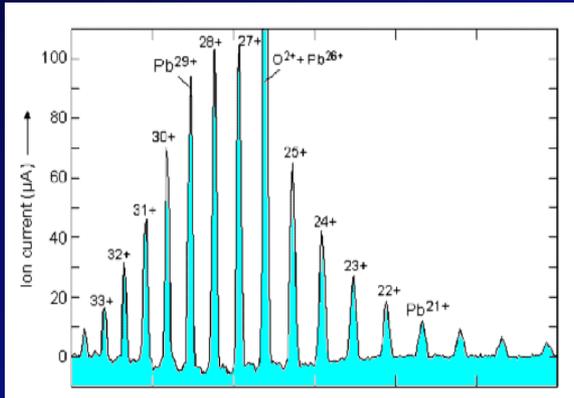


Surface = émittance  
Permet de caractériser le faisceau  
(convergence, divergence, taille...).

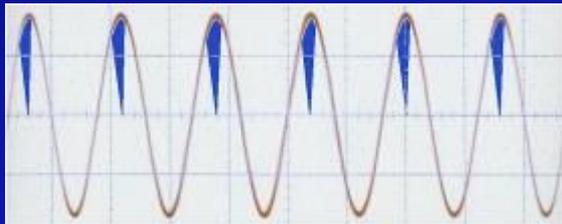
# Le stress du sourcier!

I  
n  
t  
r  
o  
d  
u  
c  
t  
i  
o  
n

## Nature-Intensité-Energie

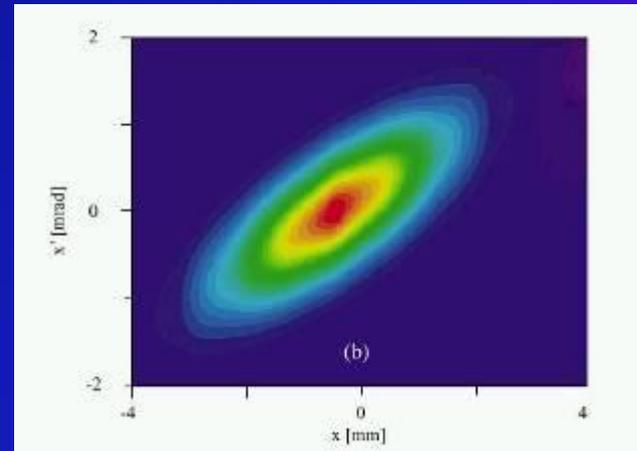


## Cyclage



qq 10ps-1Ghz qq100µs-1Hz

## Propriétés optiques



Durée de vie

Fiabilité

# Les Sources d'ions!

---

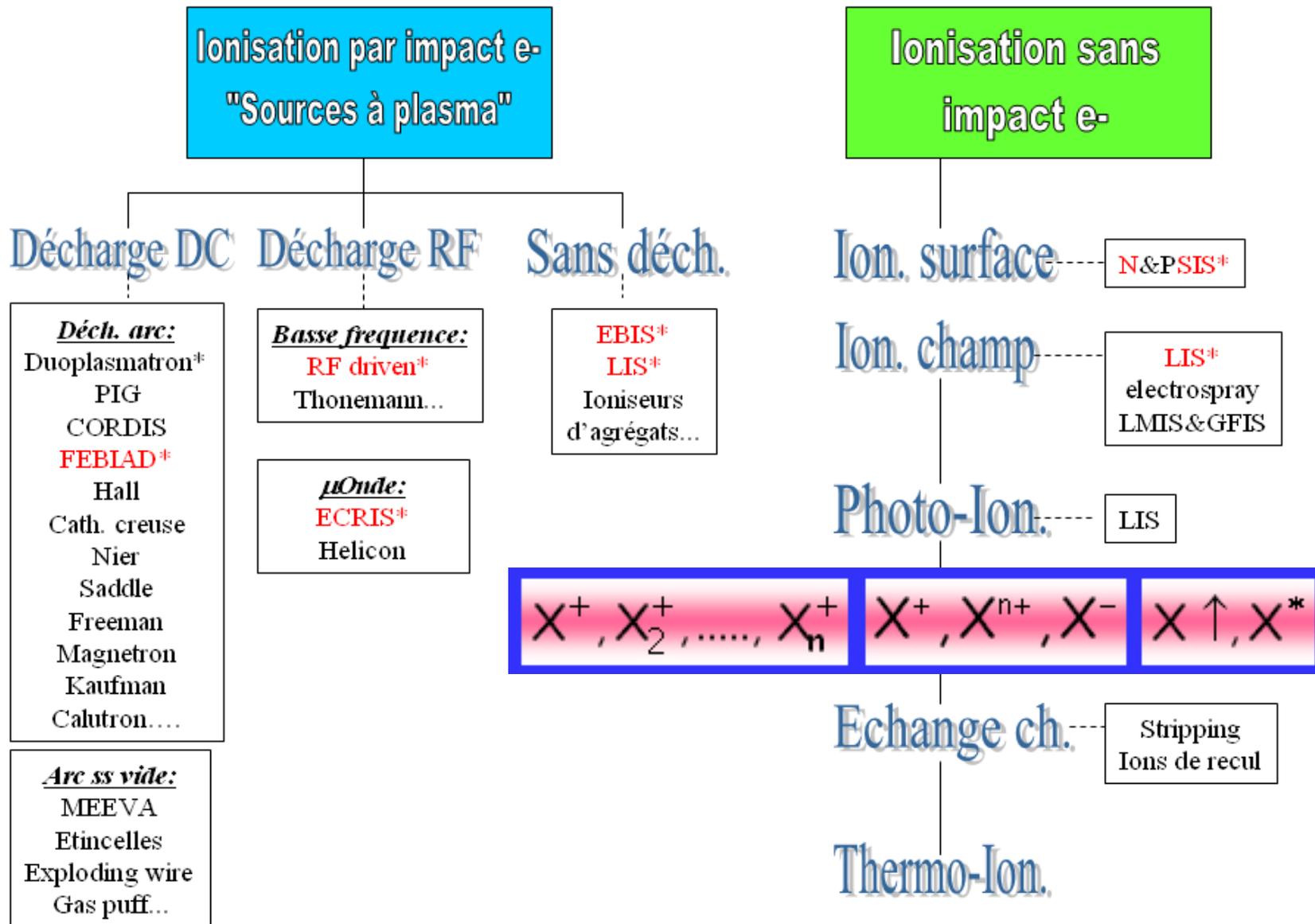
**I  
n  
t  
r  
o  
d  
u  
c  
t  
i  
o  
n**

## LES GRANDES ORIENTATIONS

- Des intensités  $> 100\text{mA}$  en ions +&-
- Développement des sources d'ions –
- Des sources en cascade
- Des charges toujours plus élevées

# Les Sources d'ions!

Introduction



# L'ionisation par impact électronique

**S** Meilleur moyen pour obtenir des ions + !

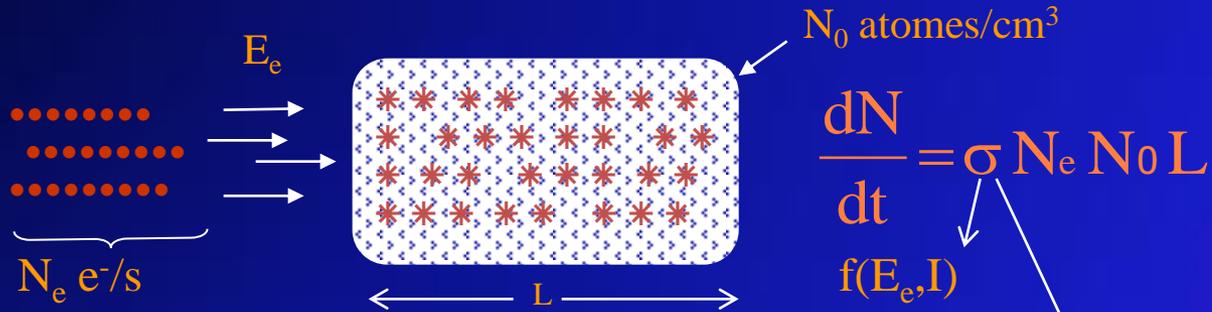
**O** La conservation de l'énergie et de  
**u** l'impulsion favorise l'électron comme la  
**r** plus efficace des particules ionisantes



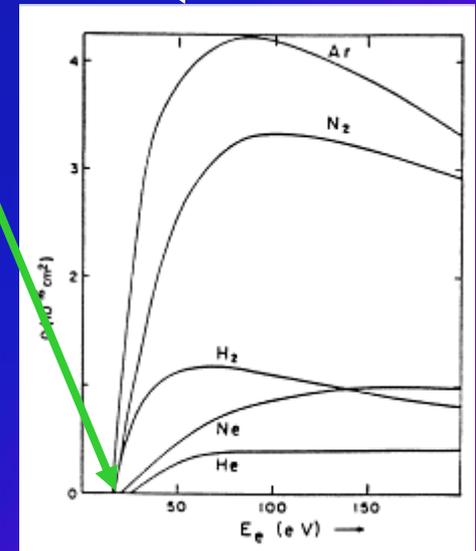
**c**  
**e**  
**s**  
**+**

# L'ionisation par impact électronique

S  
O  
U  
R  
C  
E  
S  
+



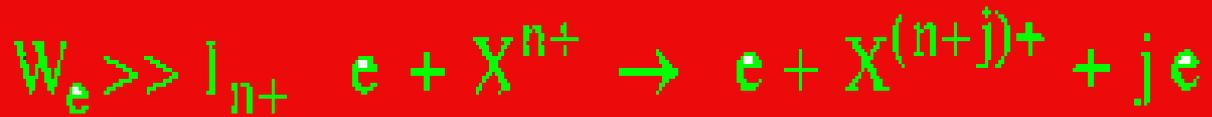
à condition que son énergie dépasse un seuil:  
l'«énergie d'ionisation I»  
13.6eV pour H  
et 24.6eV pour He



# L'ionisation par impact électronique

S  
O  
U  
R  
C  
E  
S  
+

## Energie d'ionisation !



# L'ionisation par impact électronique

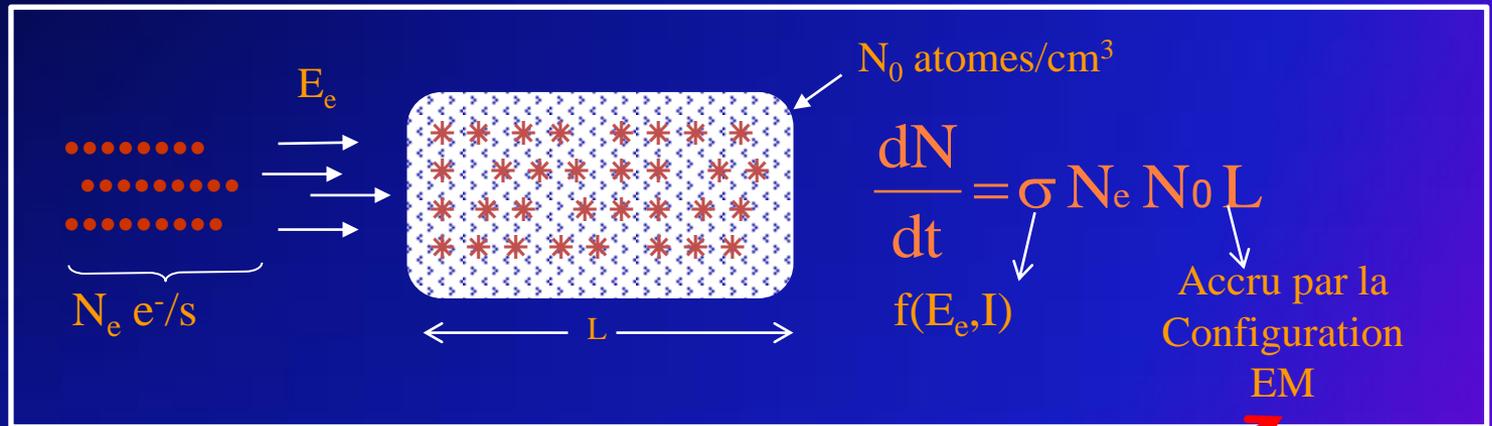
sources +

GROUPE							
I A							VIII A
1 H							2 He
13.595							24.58
0.7542							0.078
37							140
		II A	III A	IV A	V A	VI A	VII A
E <sub>i</sub> Energie d'ionisation (eV)							
A Affinité électronique (eV)							
Rayon atomique (pm)							
3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
5.39	9.32	8.30	11.26	14.54	13.61	17.42	21.56
0.620	< 0	0.28	1.268	< 0	1.462	3.399	< 0
157	112	89	77	74	74	72	154
11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
5.14	7.64	5.98	8.15	10.55	10.36	13.01	15.76
0.548	< 0	0.46	1.385	0.743	2.0772	3.615	< 0
191	160	143	117	110	104	99	188
19 K	20 Ca	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
4.34	6.11	6.00	7.88	9.81	9.75	11.84	14.00
0.5012	< 0	0.3	1.2	0.80	2.0206	3.364	< 0
235	197	153	139	121	117	114	202
37 Rb	38 Sr	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
4.18	5.69	5.78	7.34	8.64	9.01	10.45	12.13
0.4860	< 0	0.3	1.25	1.05	1.9708	3.061	< 0
250	215	167	158	161	137	133	216
55 Cs	56 Ba	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
3.89	5.21	6.11	7.41	7.29	8.43	9.5	10.74
0.4715	< 0	0.3	1.1	1.1	1.9	2.8	< 0
272	224	171	175	182	164	145	240

# Comment obtenir des ions n+?

S  
o  
u  
r  
c  
e  
s  
  
n  
+

Si  $E_e > I_j$   $e^- + X^{j+} \rightarrow e^- + X^{(j+1)+} + e^-$  pas-à-pas (le plus probable)  
et/ou  $e^- + X^{(j+k)+} + k e^-$  multiple



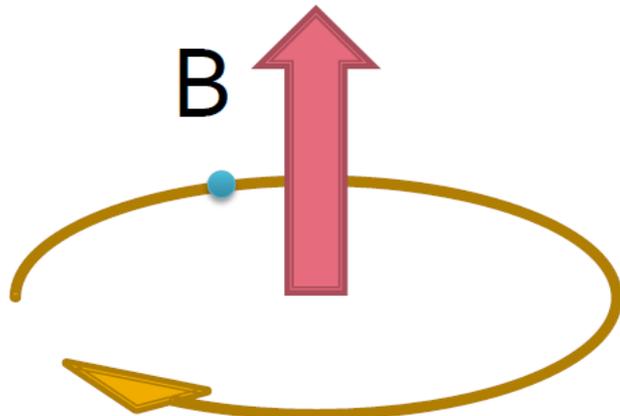
Le processus nécessite une configuration EM de confinement ionique

# Définition : un champ magnétique

## Bobine : conducteur + courant

### Loi de Biot et Savart

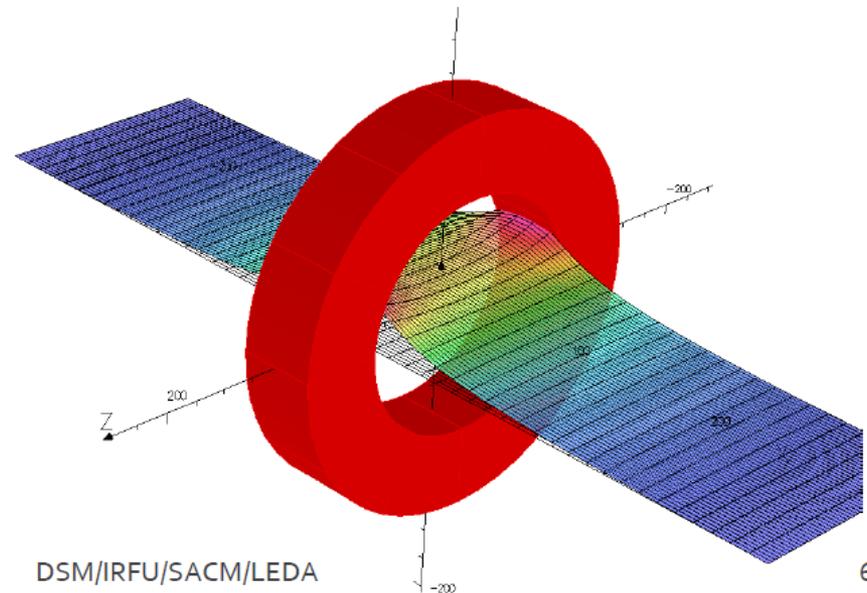
Soit  $C$  la courbe géométrique représentant le circuit filiforme, et soit  $r'$  un point de cette courbe  $C$ . On note  $d\mathbf{l}$  le vecteur déplacement élémentaire tangent à la courbe  $C$  au point  $r'$ . Dans le vide, le circuit parcouru par un courant continu d'intensité  $I$  crée en tout point  $r$  extérieur à  $C$  le champ magnétique  $\mathbf{B}(r)$  donné par la formule



$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{I d\mathbf{l} \wedge (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}$$

04/12/2009

TUSKE Olivier



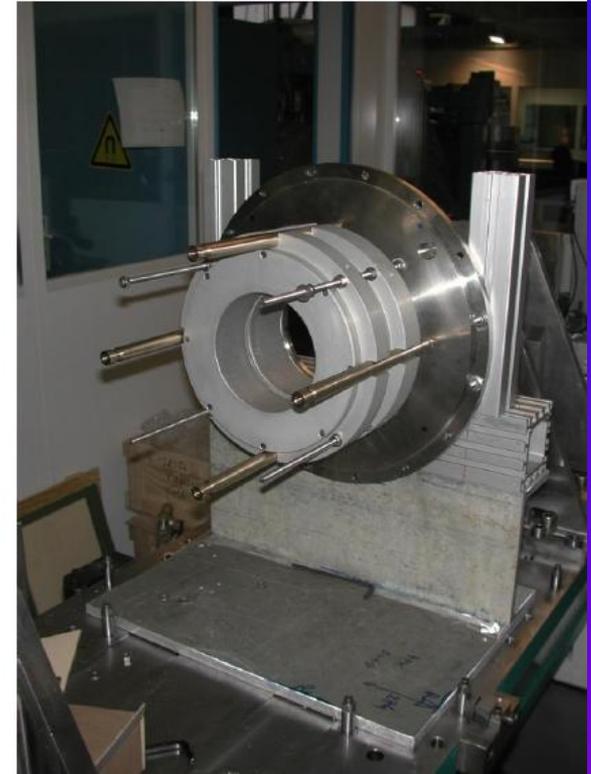
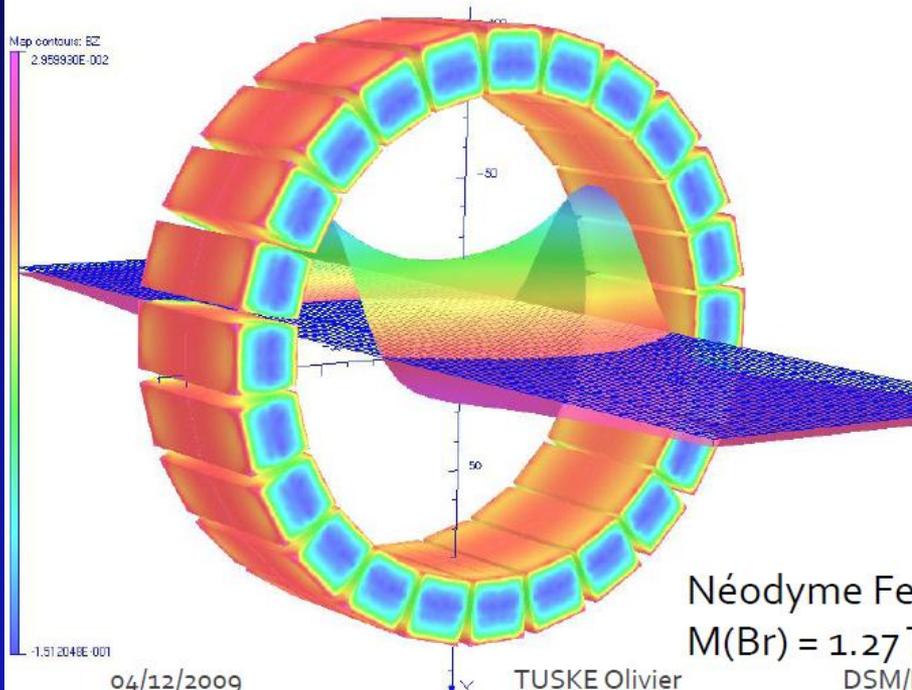
DSM/IRFU/SACM/LEDA

6

# Définition : un champ magnétique

## Aimants permanents

- Aimant élémentaire
- Assemblage en couronne



# Définition : un champ magnétique

- Champs magnétique
  - Courant dans une boucle : Bobine + Alimentation
    - 😊 Intensité réglable
    - ☹️ Refroidissement, défaillances
  - Couronne d'Aimants permanents
    - 😊 Ne s'arrête jamais, ne nécessite aucune source d'énergie
    - ☹️ Intensité NON réglable

# Comment perdre des ions n+?

## Processus destructifs

Par recombinaison radiative



Par échange de charges

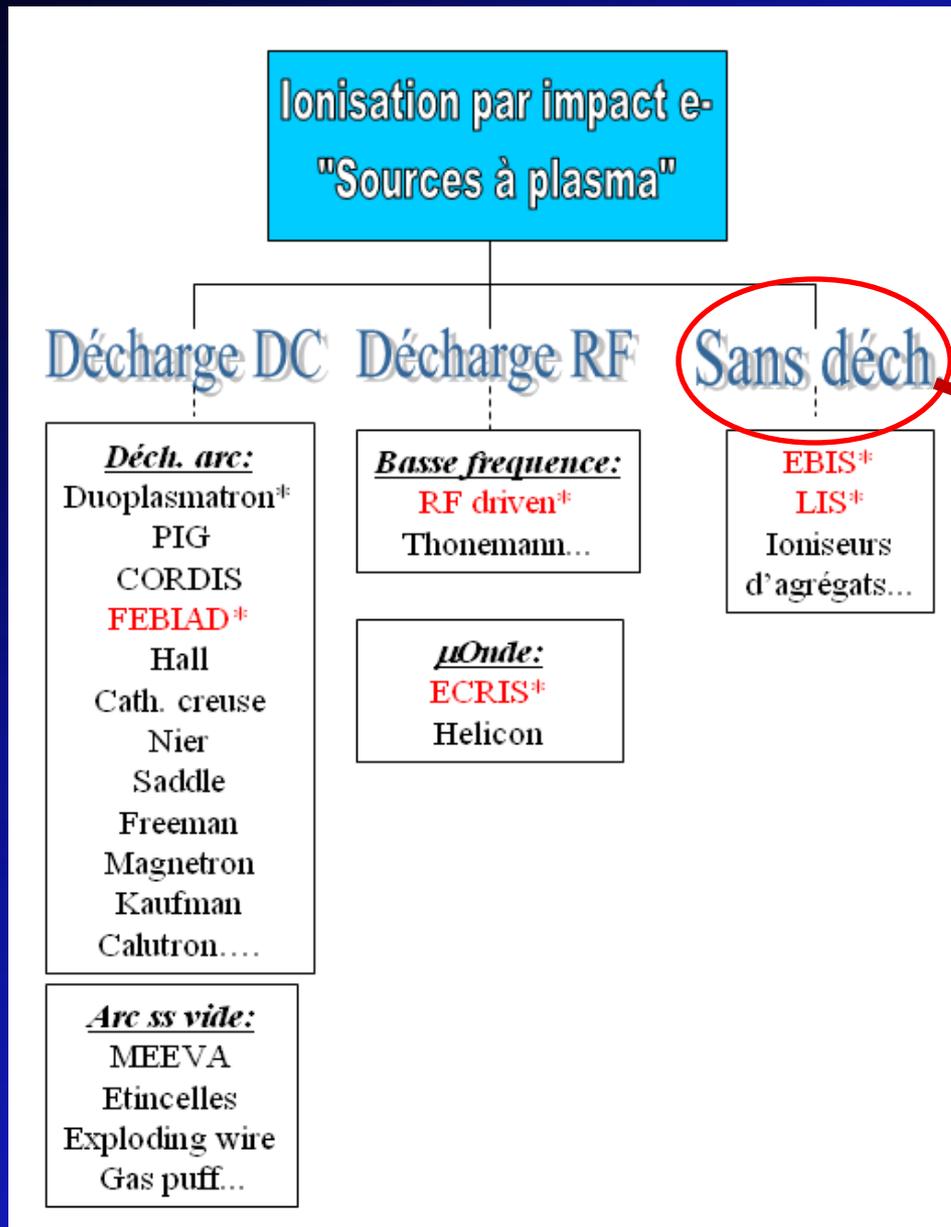


Par recombinaison diélectronique



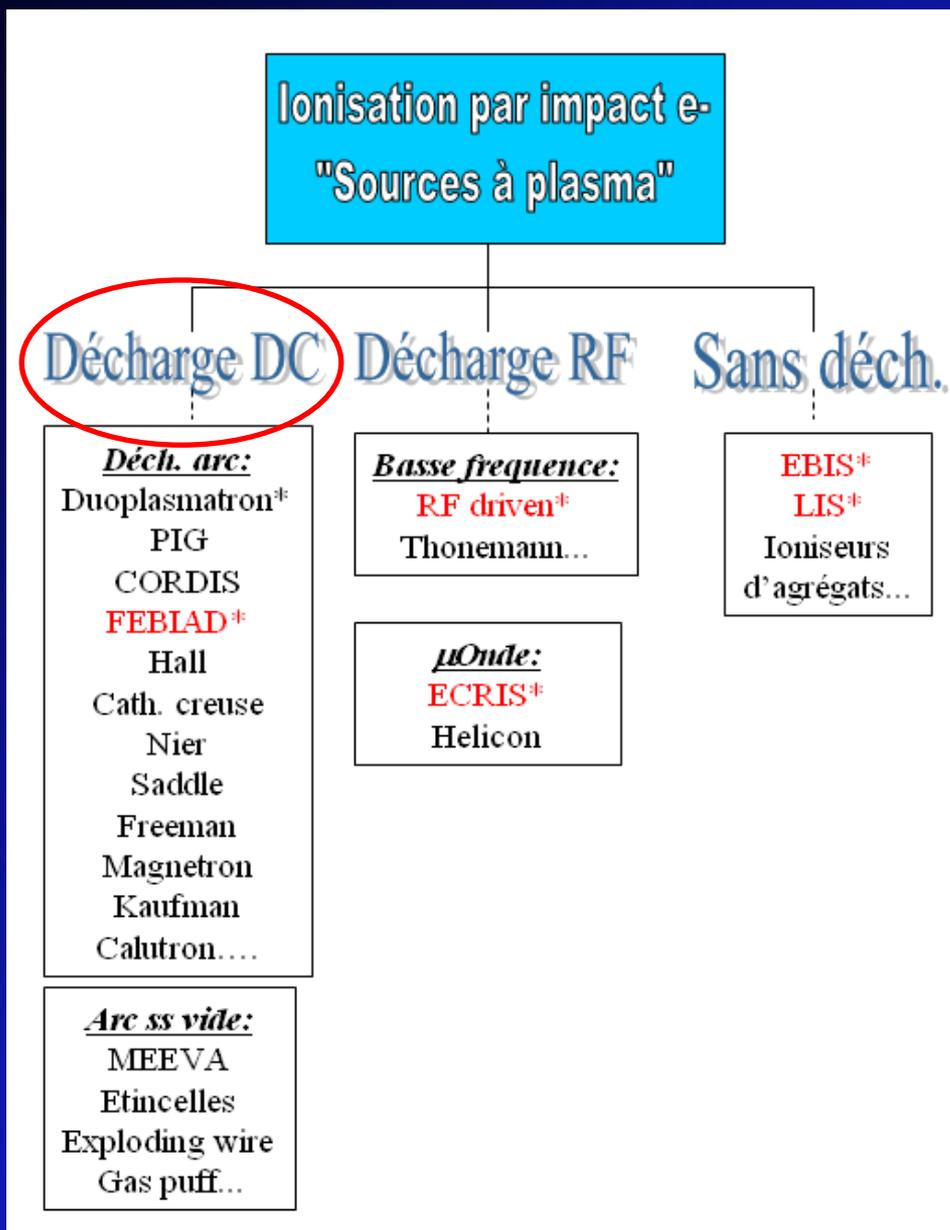
S  
o  
u  
r  
c  
e  
s  
  
n  
+

# Les Sources d'ions!



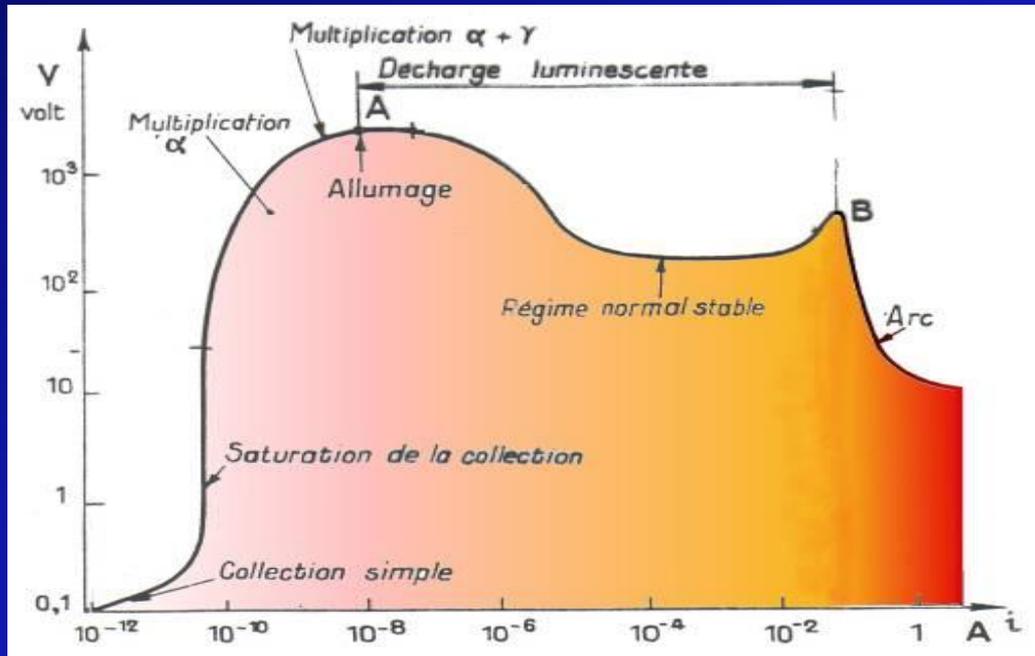
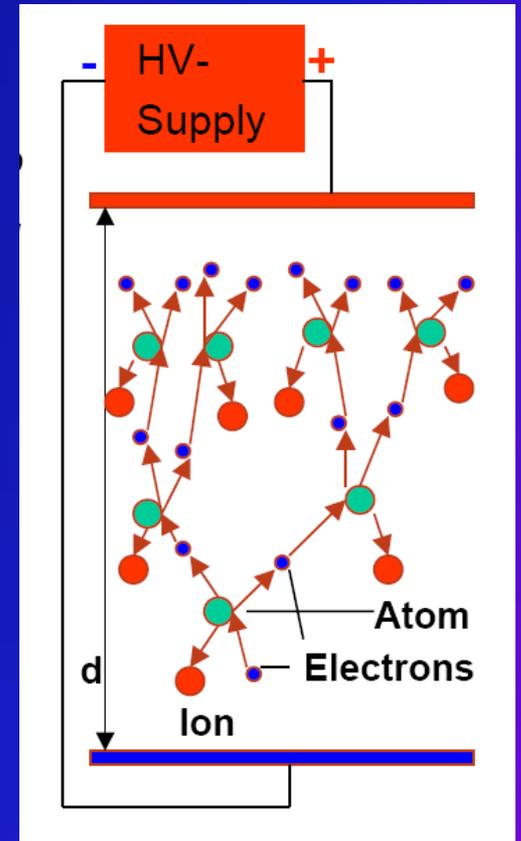
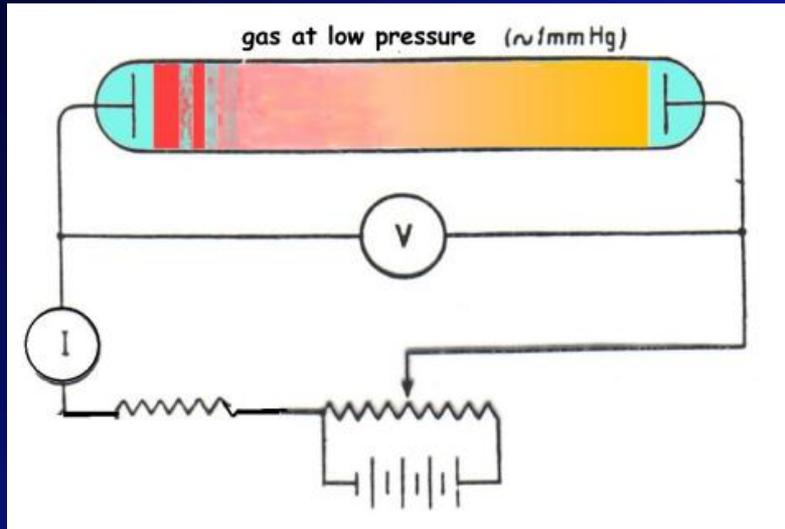
Il faut un faisceau  
d'électrons primaire  
produit par une  
source d'électrons

# Les Sources d'ions!

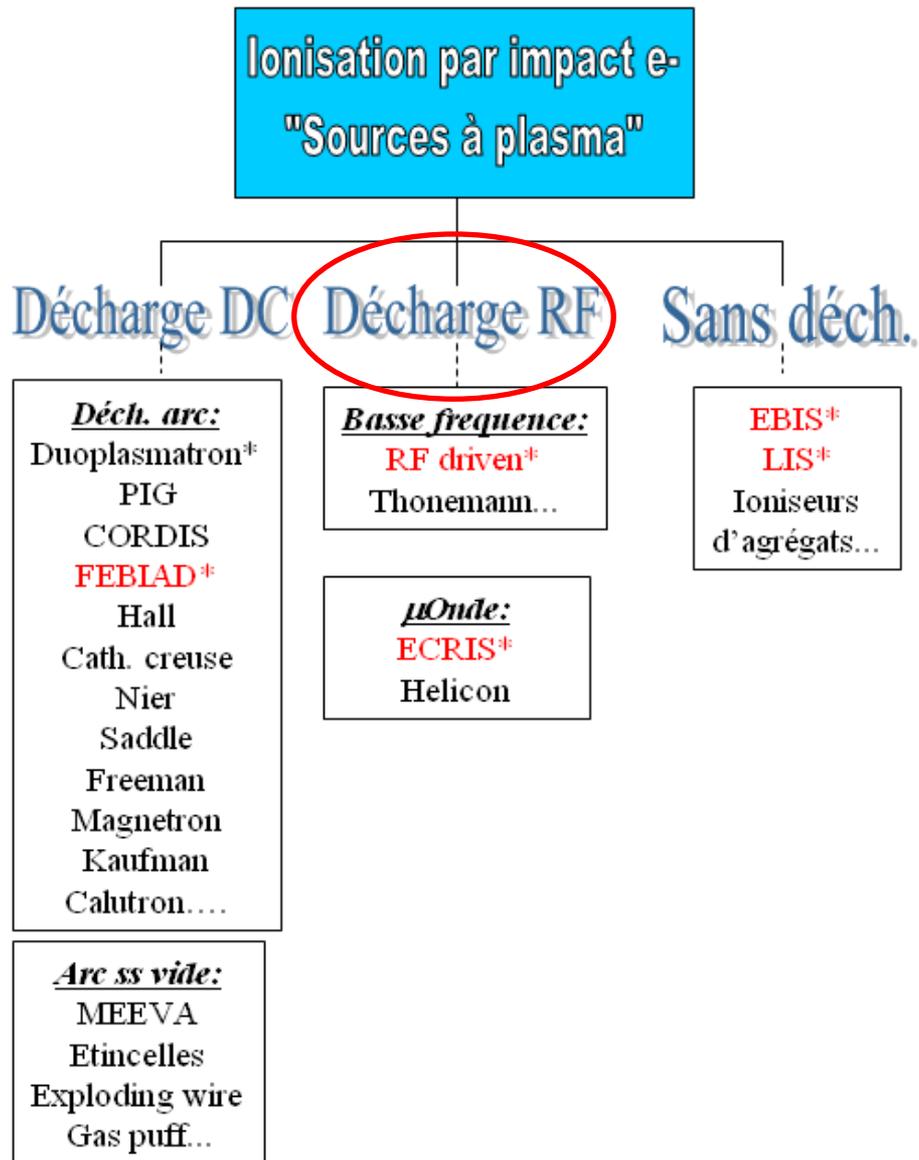


# La décharge électrique (DC)

Sources



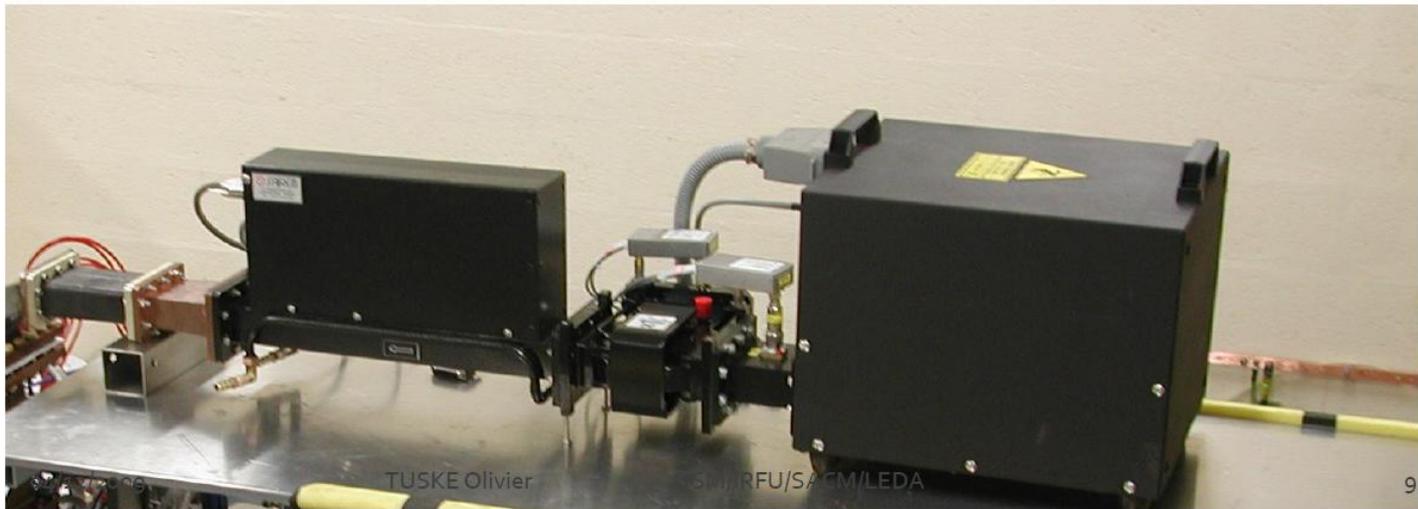
# Les Sources d'ions!



# L'onde RF

## Onde HF

- Onde HF
  - Micro-onde 2,45GHz industriel
  - Guide d'onde WR340
  - Pilotage en analogique (mode Continu ou Pulsé)



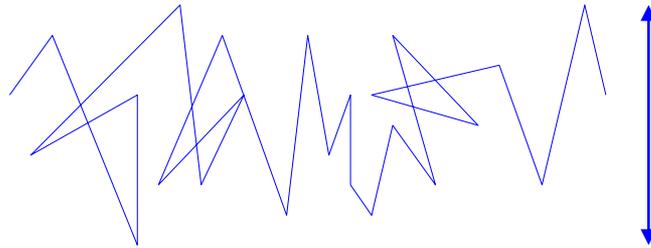
# La décharge RF : plasma

S  
o  
u  
r  
c  
e  
s

$\nu$  Fréquence de collision

$\delta_e$  Libre parcours moyen

$$\omega_{RF} < \nu$$



$< 150 \text{ kHz} \equiv \text{DC}$

$\delta_e \geq d$  : pas de collision

$> 150 \text{ kHz}$

$\delta_e < d$  : collision, transfert E,  $W_e \nearrow$

$$\omega_{RF} > \nu$$

Pas de collision  $W_e = 0$  excepté si

$$\omega_{RF} \approx \omega_p = \omega_c$$

résonance cyclotron

(plasma)

# De quoi se compose une source à plasma?

généralement

S  
o  
u  
r  
c  
e  
s

Une source d'e- {  
*Cathode*  
*et/ou*  
*Le plasma lui-même*

Une source d'énergie *Champ élect. Alt. ou DC*

Une configuration EM confinante

{  
 *$\vec{E}$  reflex*  
*Multicusp  $\vec{B}$*   
*Axial  $\vec{B}$*

{  
 *$\vec{E} \perp \vec{B}$*   
*Une combinaison*

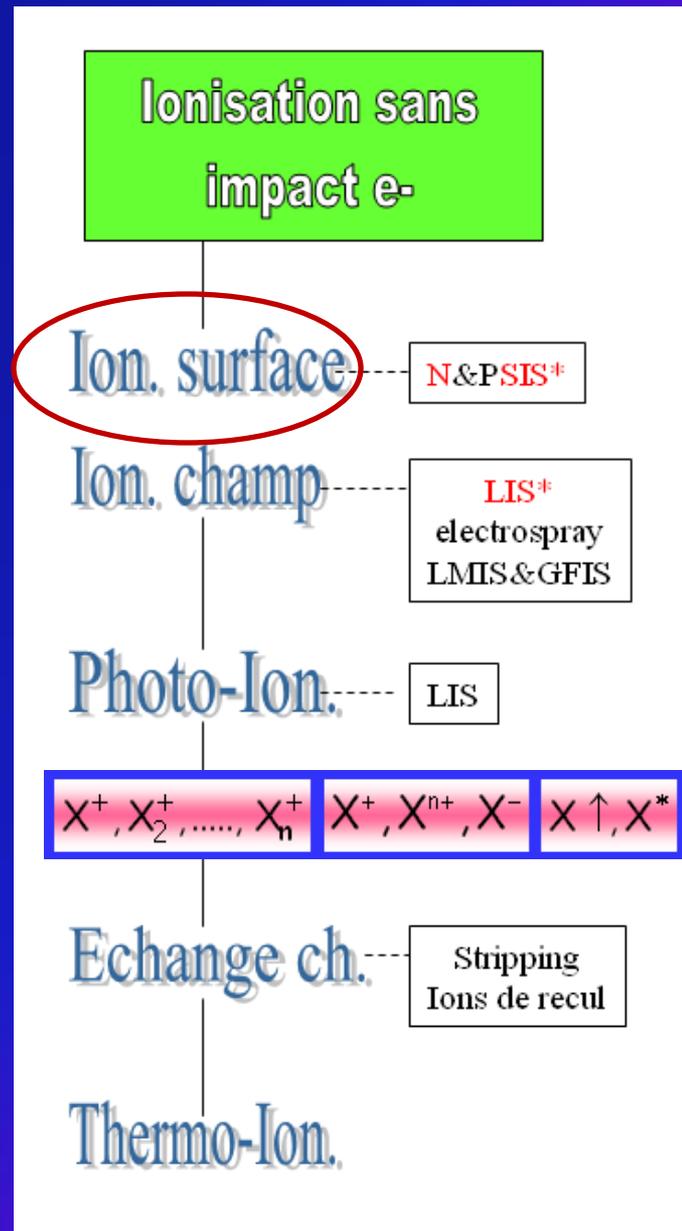
Un système d'extraction

{  
*Un trou ou une fente*  
*+ une coupe d'expansion*  
*Une grille ou*  
*Multi-ouvertures*

# Les Sources d'ions!

Sources +

Sans impact électronique



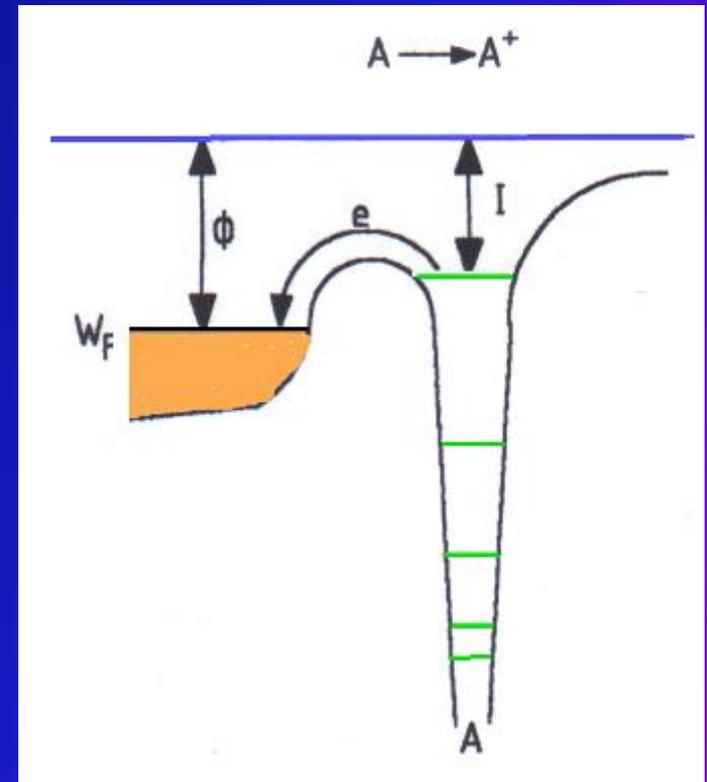
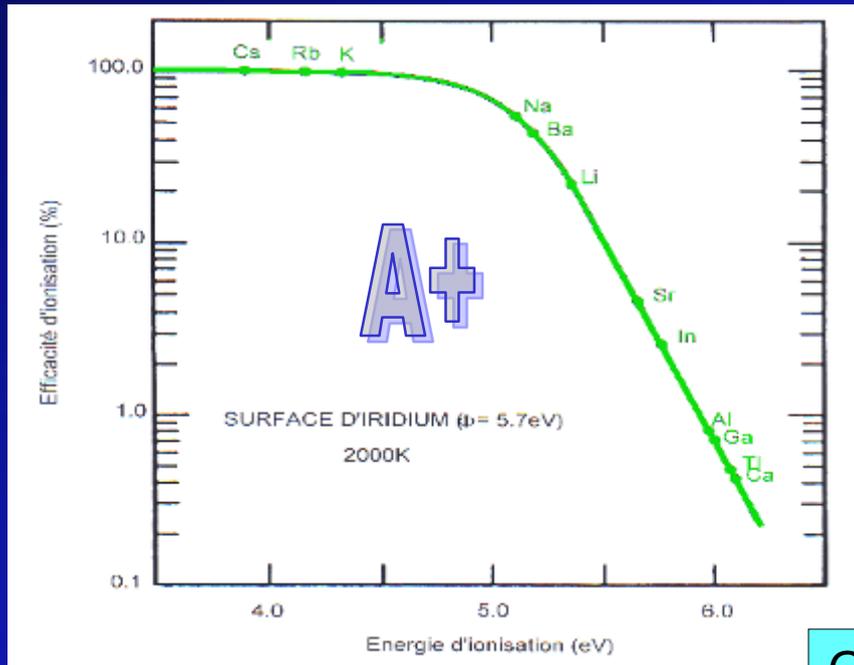
# L'ionisation de surface

S  
o  
u  
r  
c  
e  
s  
+

$\phi > I$ . Le puits de potentiel de l'atome est déformé par les électrons du métal et un électron de valence peut être transféré par effet tunnel vers le métal, il y a formation d'un ion positif.

$\Phi$  : travail de sortie d'un métal

$$\frac{N^+}{N_0} = C^+ e^{((\Phi - I)/kT)}$$



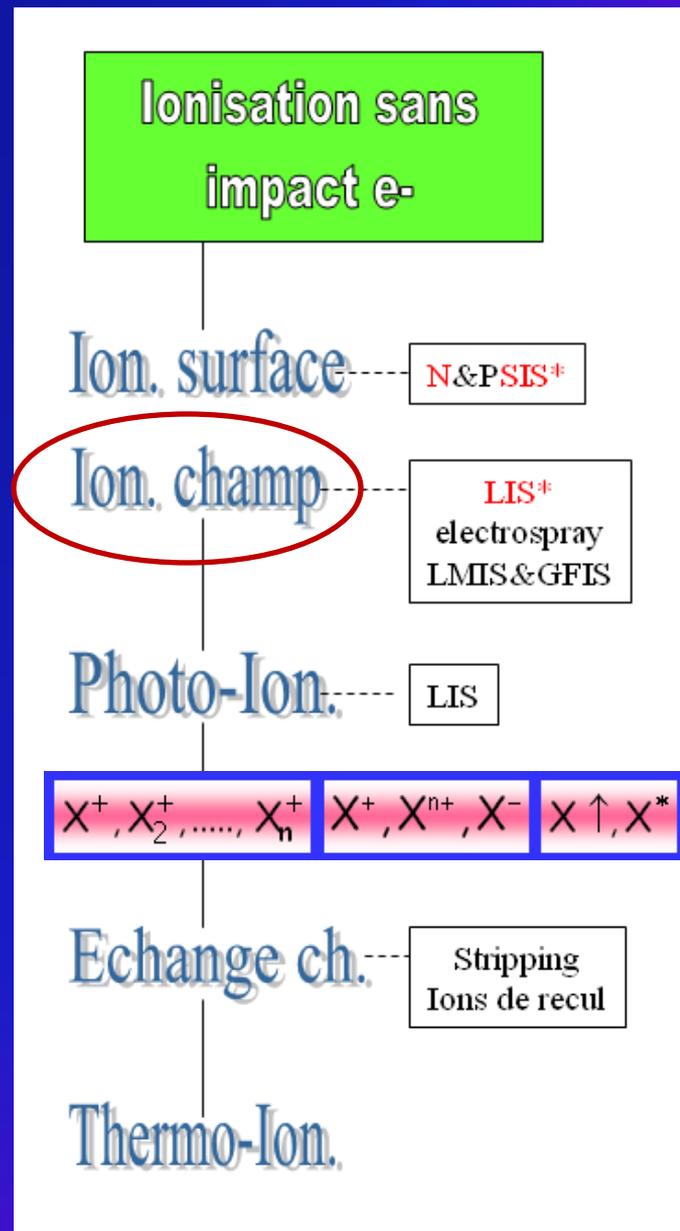
Grande efficacité

Très sélectif

# Les Sources d'ions!

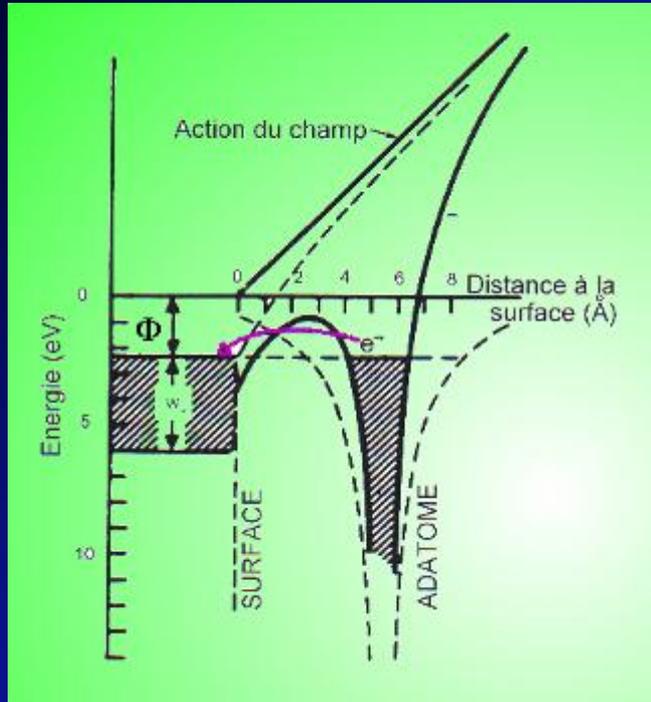
Sources +

Sans impact  
électronique



# L'ionisation de champ

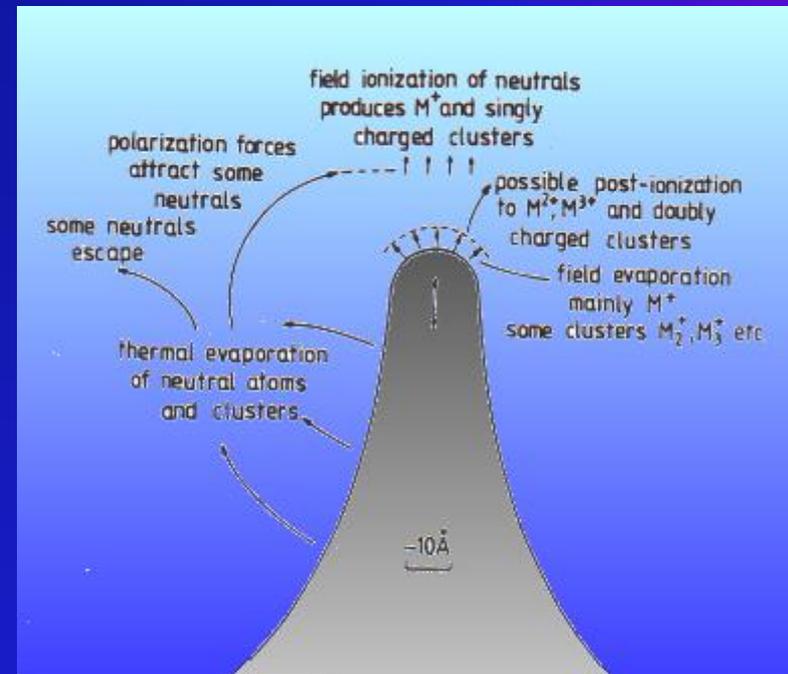
Sources +



Application d'un champ électrique intense ( $E > 1 \text{ GV/m}$ ) perturbe la matière

→ électrons peuvent sortir de la matière (effet tunnel)

Au voisinage pointe :  $E > 10^8 \text{ V/cm}$   
Brillance très élevée  
Nano-usinage

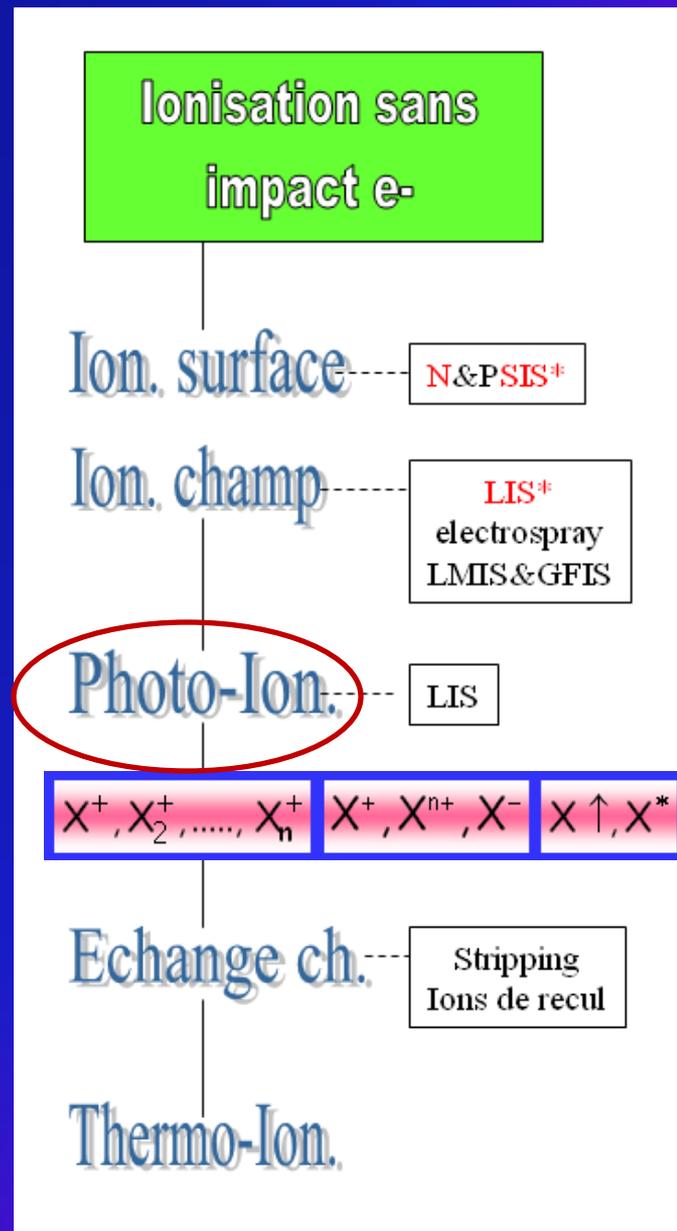


*Vers des pointes nanométriques!*

# Les Sources d'ions!

Sources +

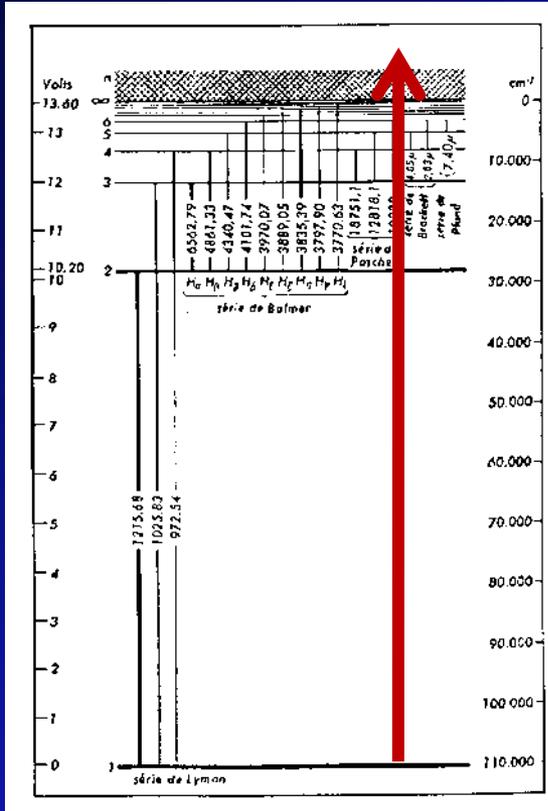
Sans impact électronique



# Photoionisation

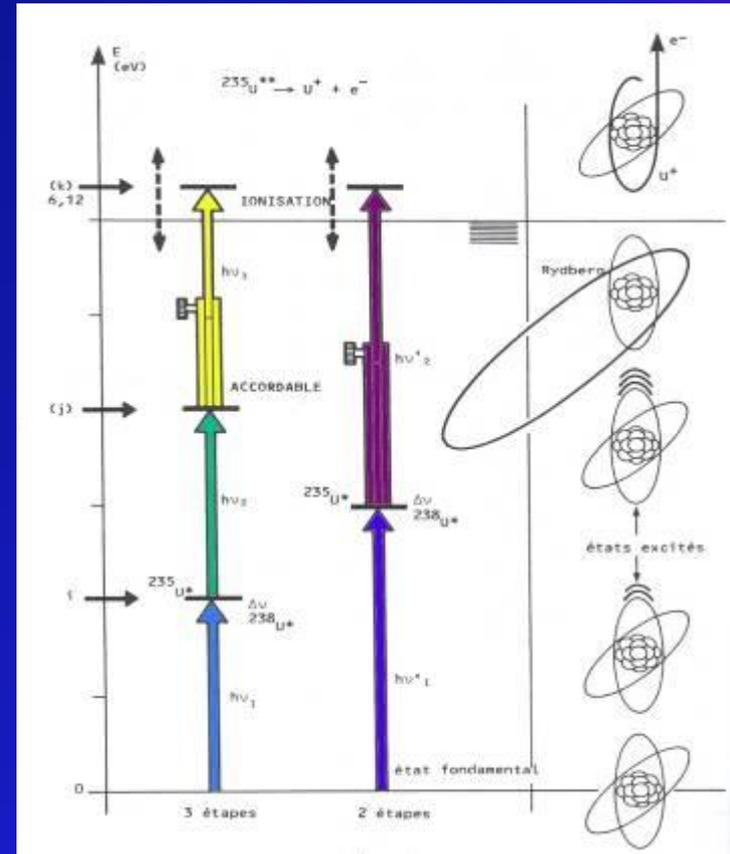
Sources +

DIRECTE



Processus peu efficace

RESONANTE

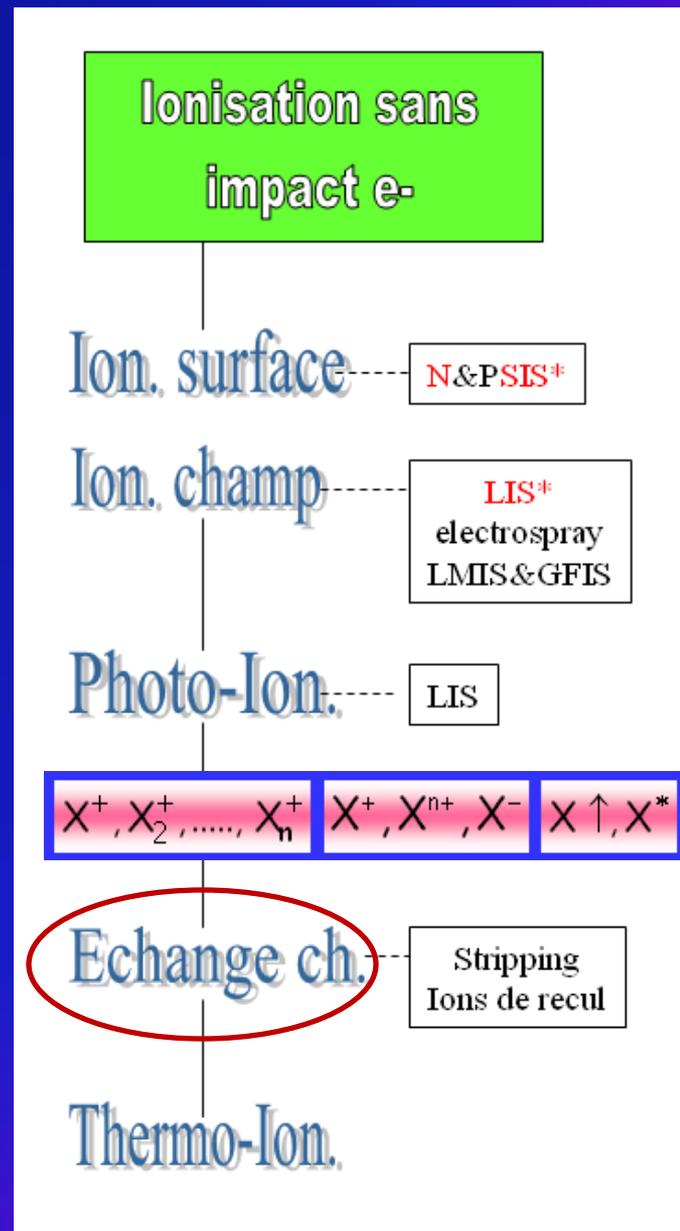


Très sélectif

# Les Sources d'ions!

Sources +

Sans impact  
électronique

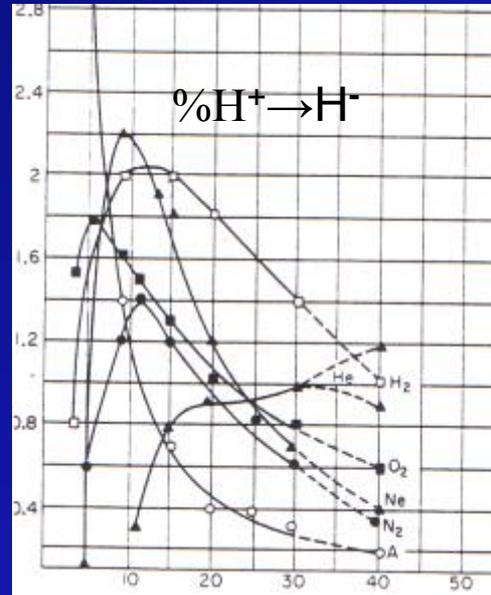
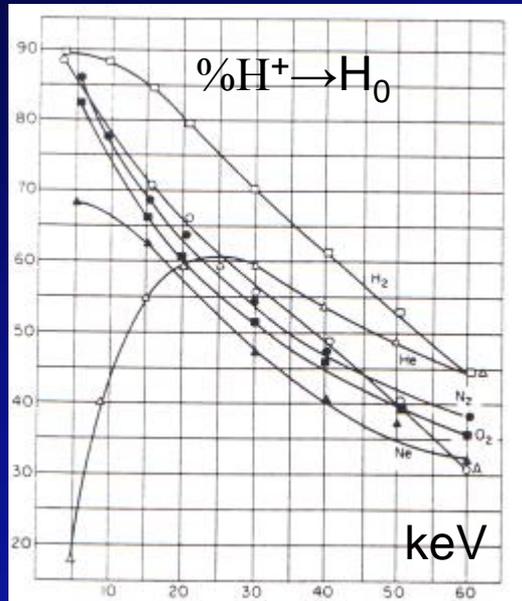


# Echange de charge

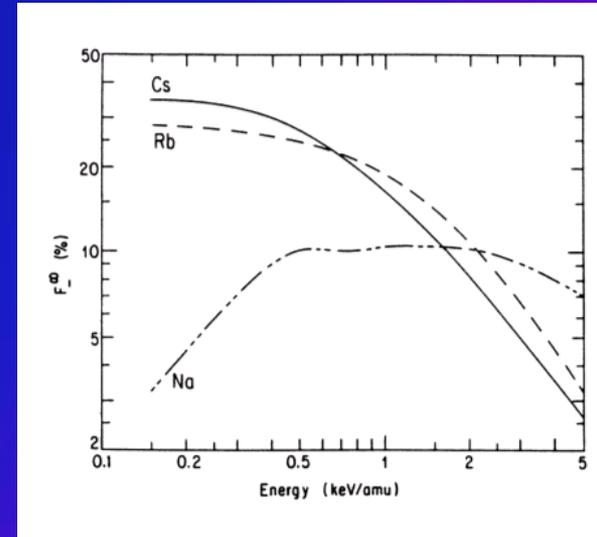
## Passage d'un faisceau dans la matière

Plusieurs processus peuvent intervenir en fonction de la vitesse de l'ion et de la densité de la matière traversée.

A faible vitesse: neutralisation de l'ion positif ou conversion en ion négatif.



Traversée de vapeurs d'alcalins :  
augmentation d'ions négatifs

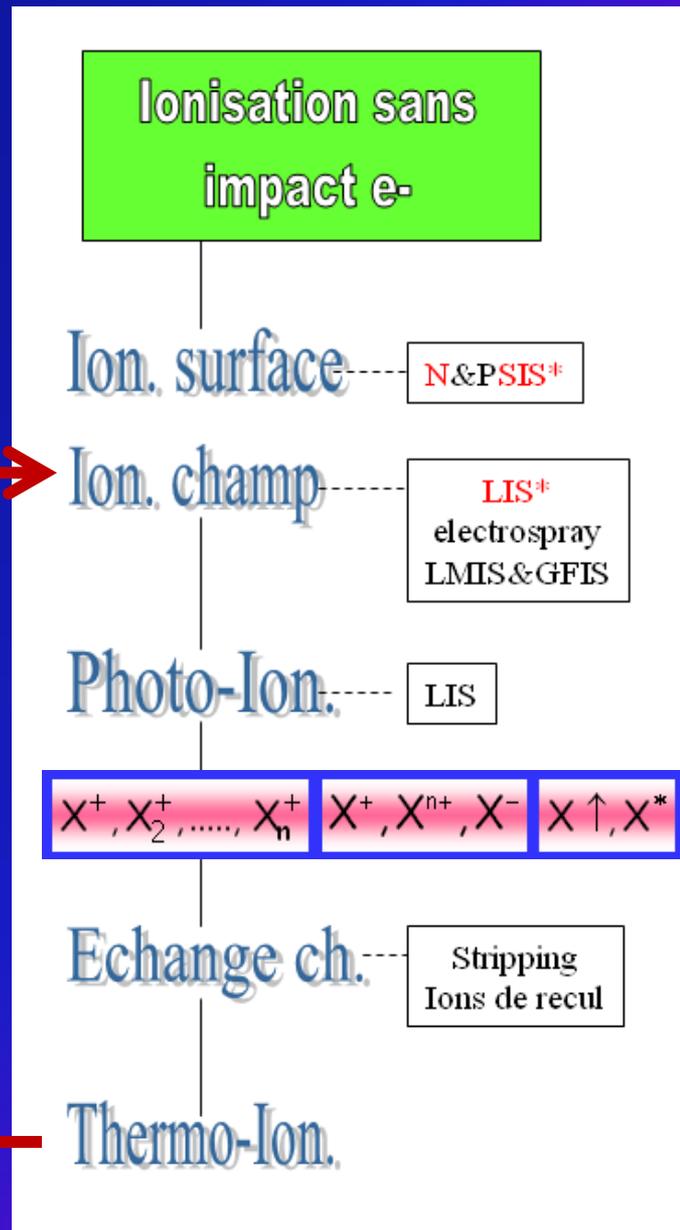


A plus forte énergie: pour tout ion, la traversée de la matière "épluche" plus ou moins l'ion de son cortège (stripping) pour le transformer en ion multichargé.

# Les Sources d'ions!

Sources +

Sans impact électronique



# Comment obtenir des ions - ?

S  
o  
u  
r  
c  
e  
s

Les atomes à couche externe incomplète peuvent capter un électron surnuméraire. Son énergie de liaison est: l'«**affinité électronique A**»  
3.6eV pour Cl et 0.75eV pour H

## DEUX VOIES MAJEURES

- La capture électronique
- L'ionisation de surface



# Capture électronique ou ionisation négative

S  
o  
u  
r  
c  
e  
s

Appelée aussi «ionisation en volume ».

La capture est exothermique.

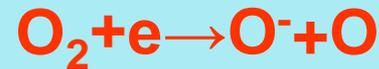
L'excès d'énergie doit être dissipée  
par une 3<sup>ème</sup> particule.

Les 2 processus les plus probables sont:

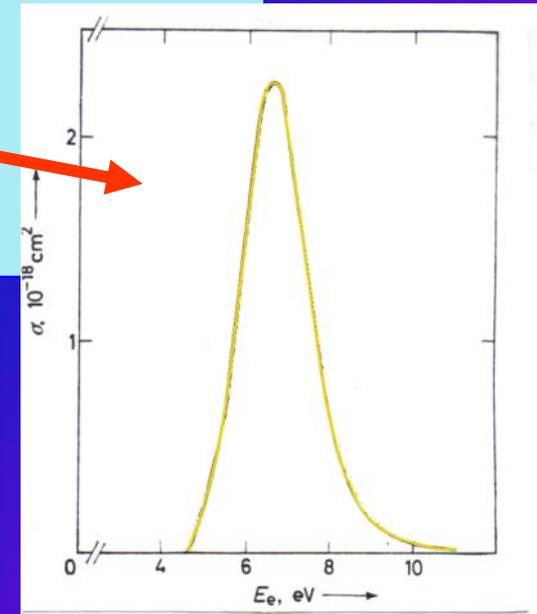
-La collision à 3 corps



-L'attachement dissociatif



*Les électrons lents favorisent la production*



# L'ionisation de surface

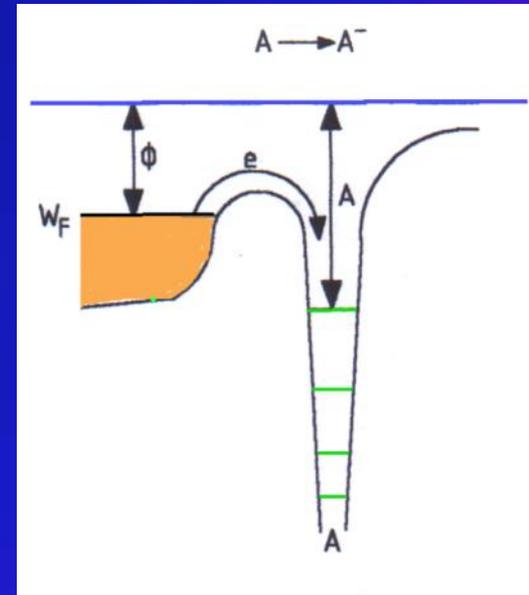
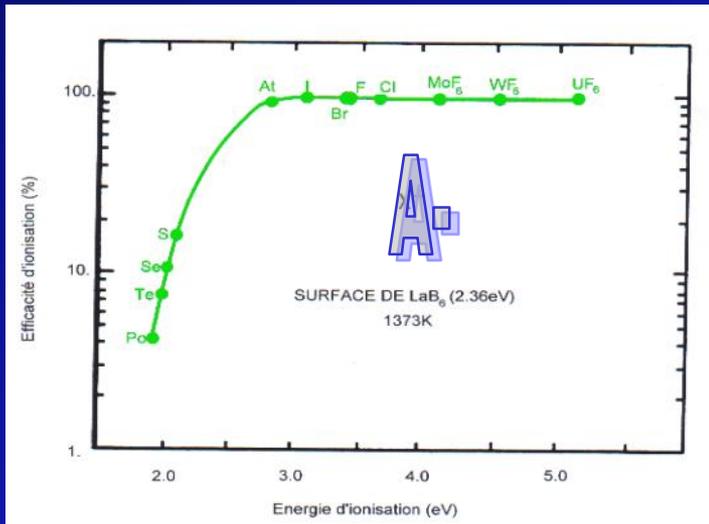
S  
o  
u  
r  
c  
e  
s

Appelée aussi «conversion en surface ».

$\phi < A$ . Le puits de potentiel de l'atome est déformé par les électrons du métal et un électron de valence peut être transféré par effet tunnel vers l'atome, il y a formation d'un ion négatif.

Les alcalins ont un électron périphérique faiblement lié. Le travail de sortie d'une surface métallique nappée de césium peut chuter à  $1.4 \div 1.8\text{eV}$ .

$\Phi$  : travail de sortie d'un métal  
A : affinité électronique



*Le rendement peut être très élevé*

$$\frac{N^-}{N_0} = C^- e^{((A-\Phi)/kT)}$$

# Comment perdre des ions - ?

S  
o  
u  
r  
c  
e  
s

**Trop facilement!**

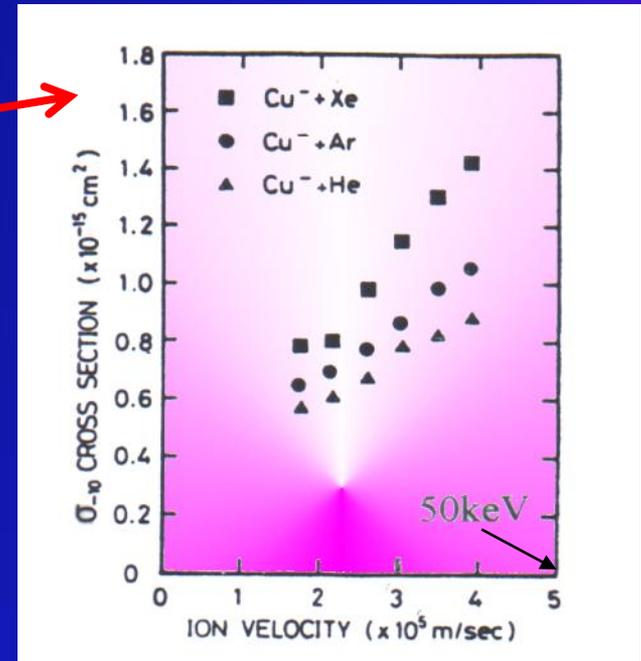
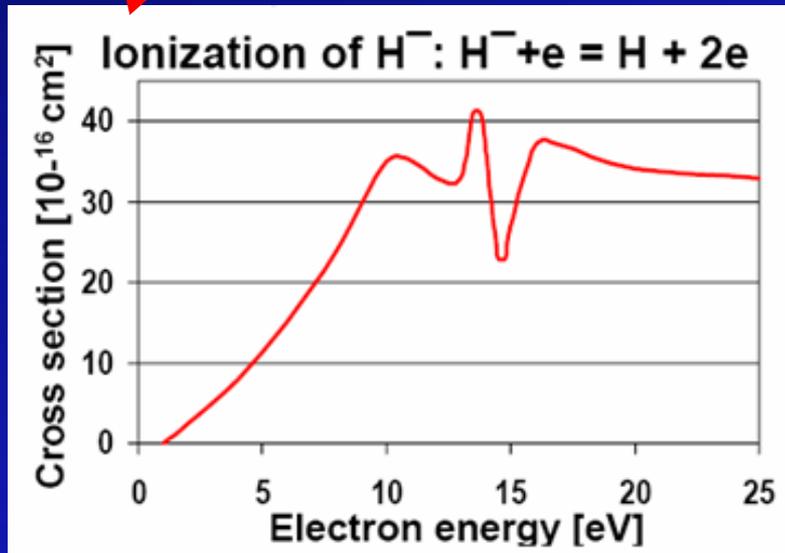
Par détachement collisionnel



Par ionisation



pour  $E_e > 10\text{eV}$



Par recombinaison



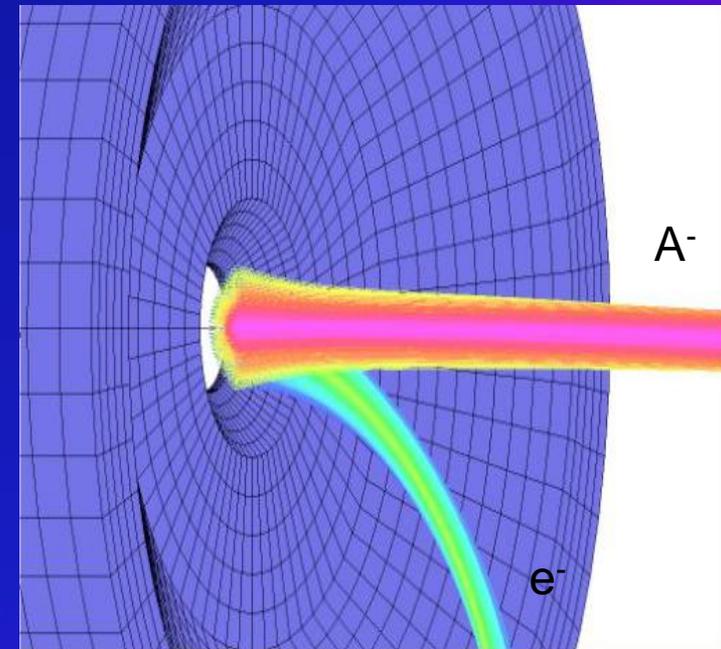
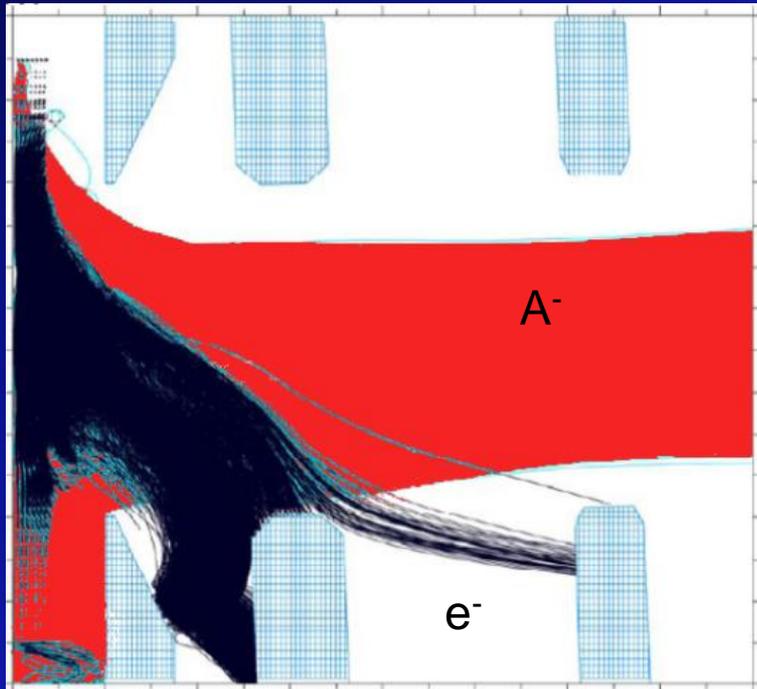
Pour  $E_H < 10\text{keV}$   $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$

Par éjection cinétique

# Un souci majeur

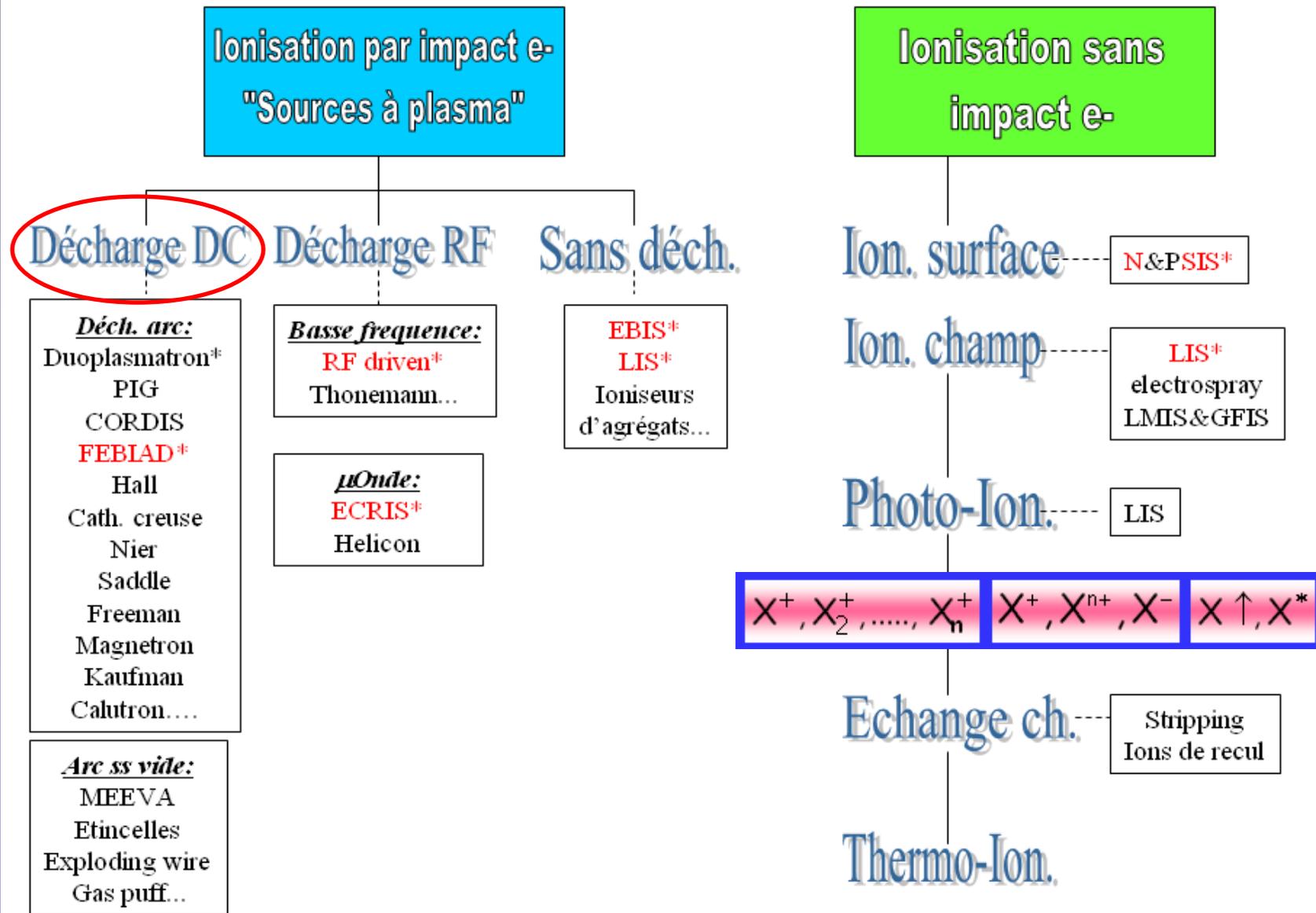
S  
o  
u  
r  
c  
e  
s

Les **e- co-extraits** avec les ions négatifs qui doivent être éliminés au plus près.



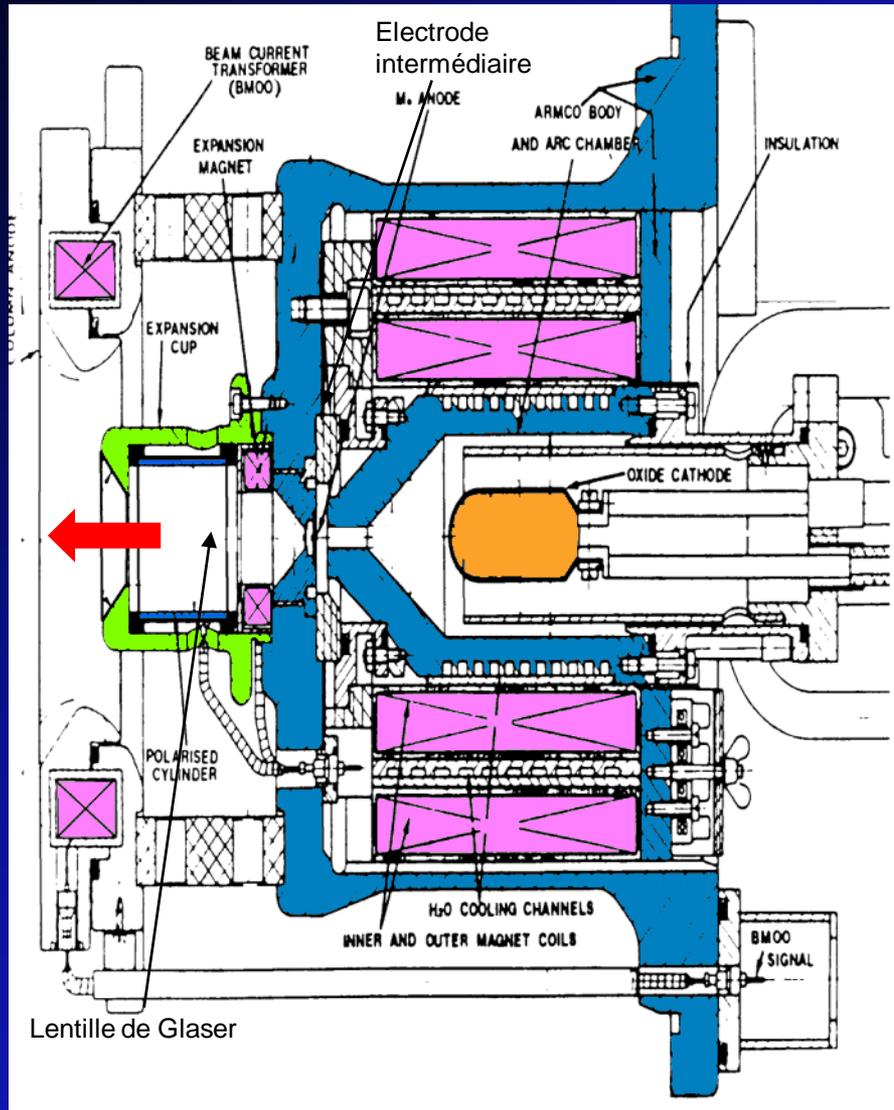
# Les Sources d'ions!

E  
x  
e  
m  
p  
l  
e



# Source décharge DC

E  
x  
e  
m  
p  
l  
e



## DUOPLASMATRON CERN (H<sup>+</sup>)

*Paramètres typiques des duoplasmatrons:*

Décharges DC 50V ÷ 200V, 0.1 ÷ 1A

Déch. pulsées (duty-cycle 10%) 250V-10A

Intensités jusqu'à 50mA

Lentille de Glaser de qq kGauss

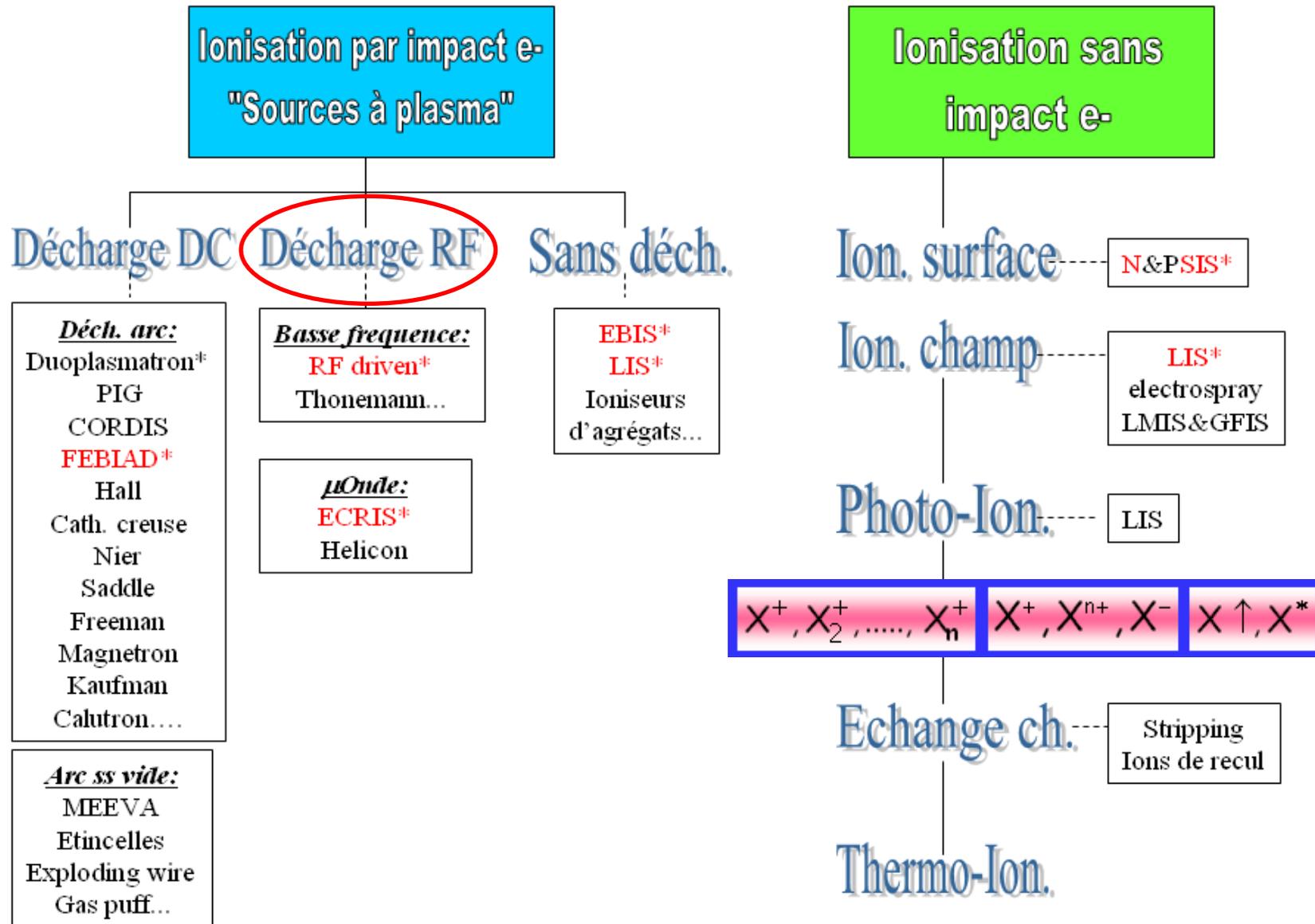
Filament ou Cathode BaO

Durée de vie de cathode limitée à 200hrs

*Ions métal. produits par sputtering de l'électrode intermédiaire*

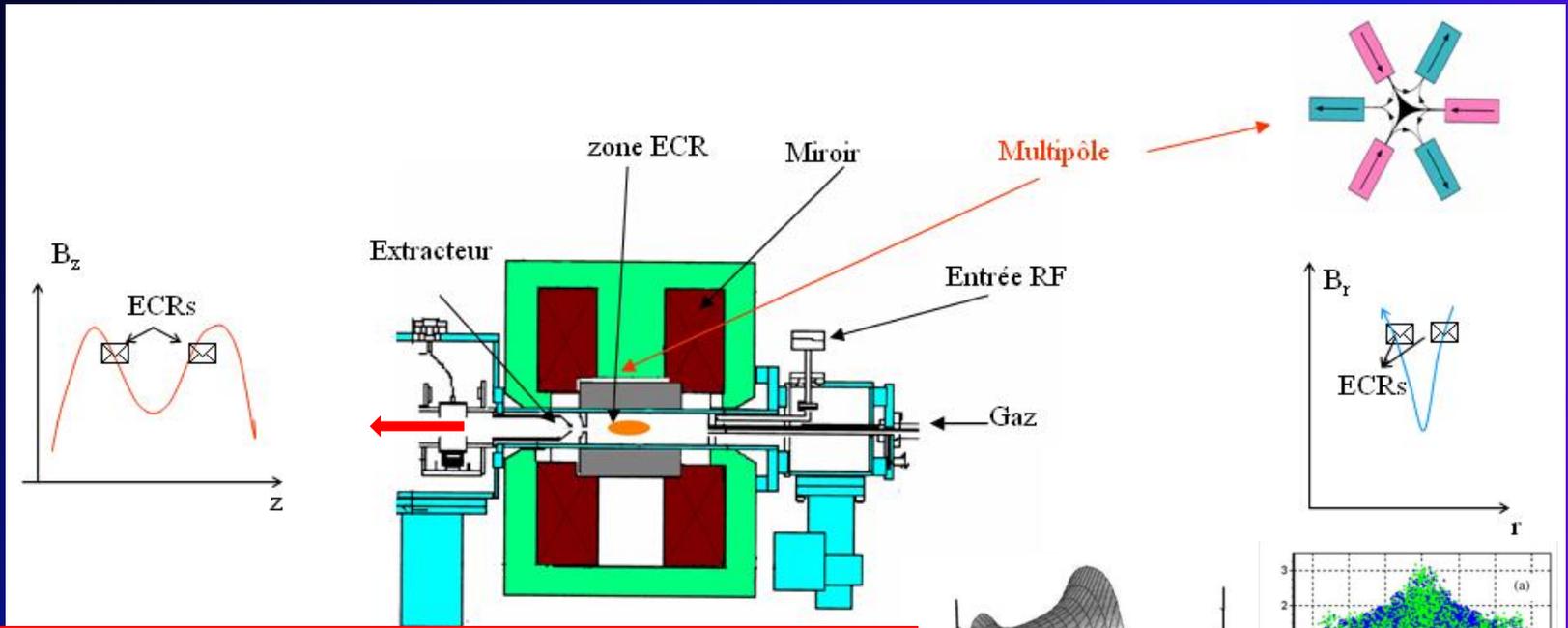
# Les Sources d'ions!

E  
x  
e  
m  
p  
l  
e

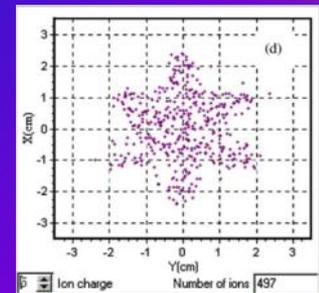
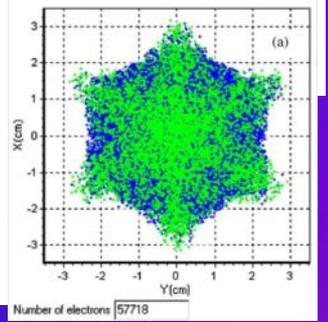
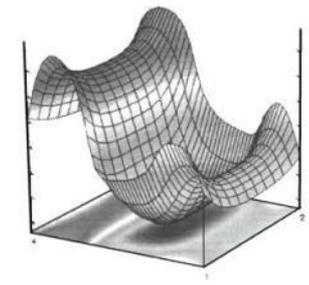


# ECRIS Source décharge RF

U  
n  
i  
v  
e  
r  
s  
i  
t  
é

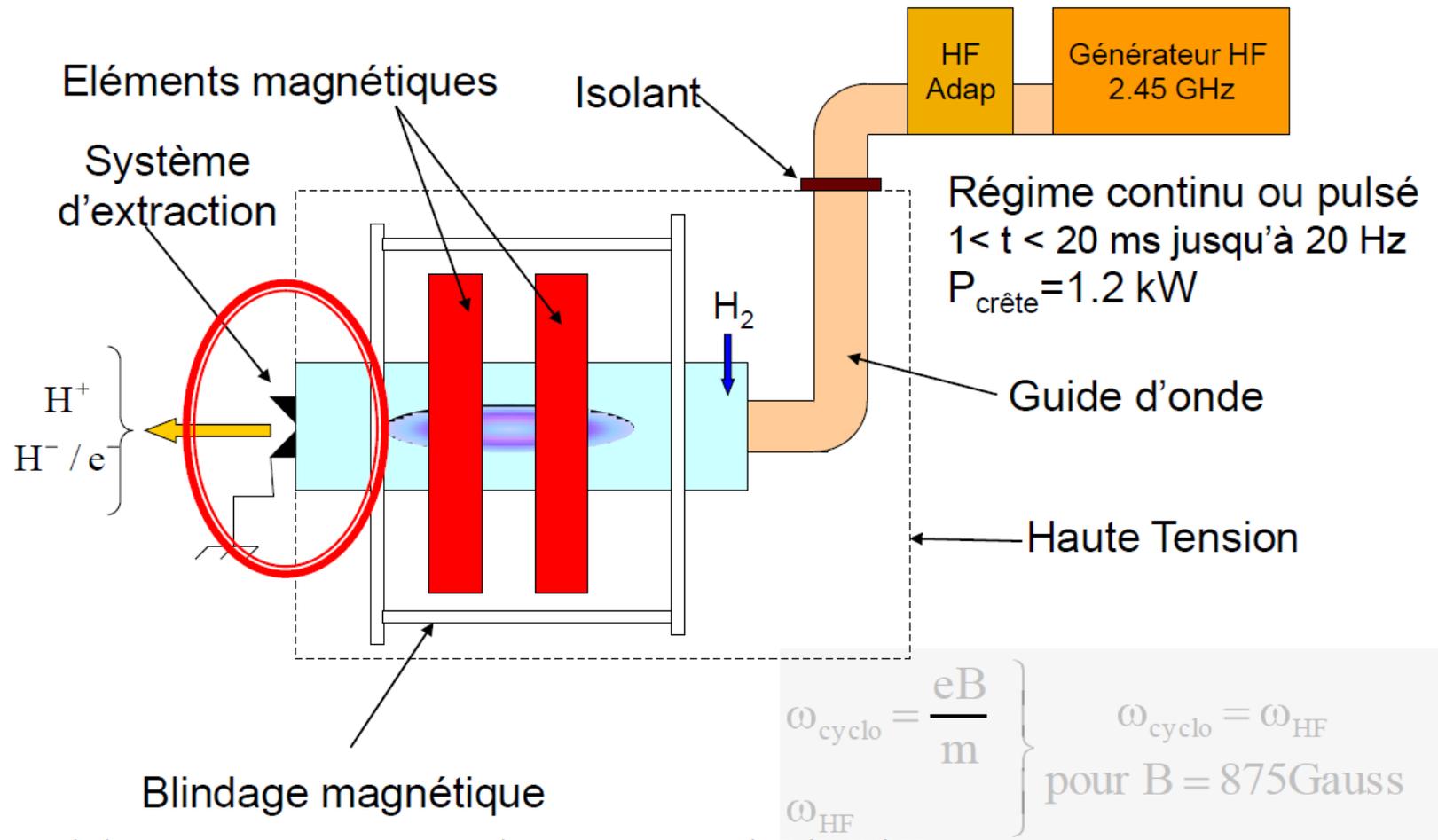


Dans une configuration de bouteille magnétique, les  $e^-$  du plasma sont chauffés par résonance avec une onde RF de 2.45 à 28GHz. Les ions sont extraits en DC ou en pulses.



# ECRIS Source décharge RF

## Schéma de principe

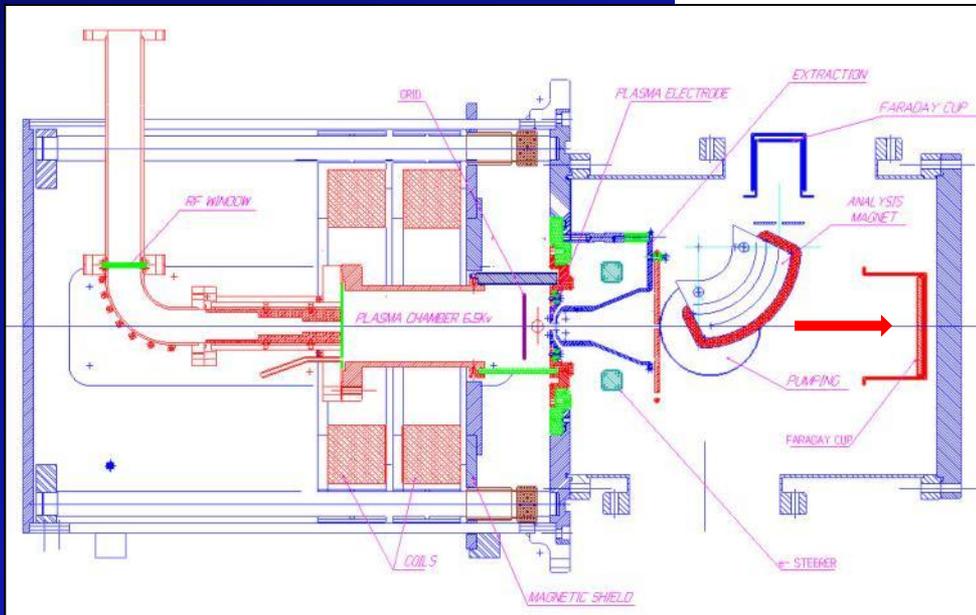
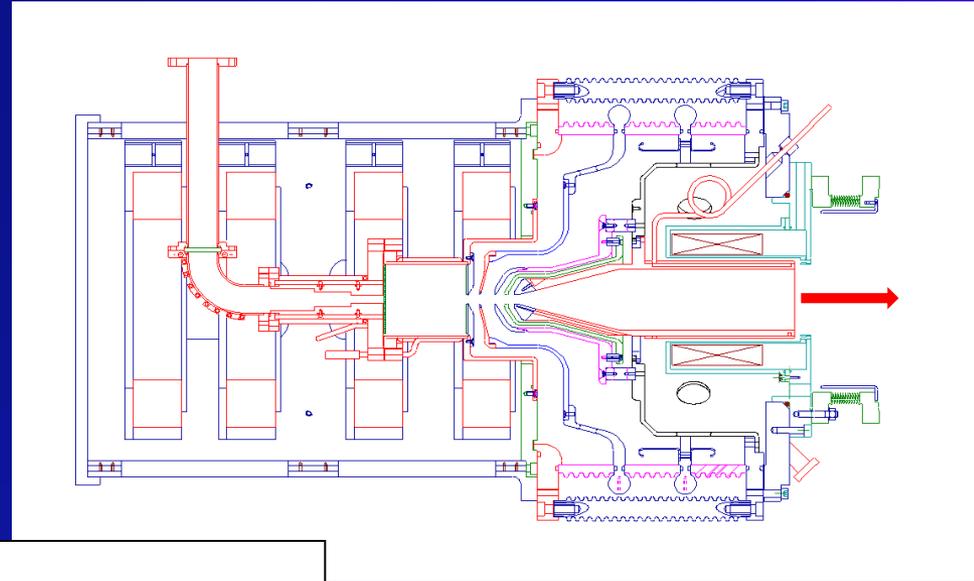


U  
n  
i  
v  
e  
r  
s  
i  
t  
é

# ECRIS intenses

Sources + & i

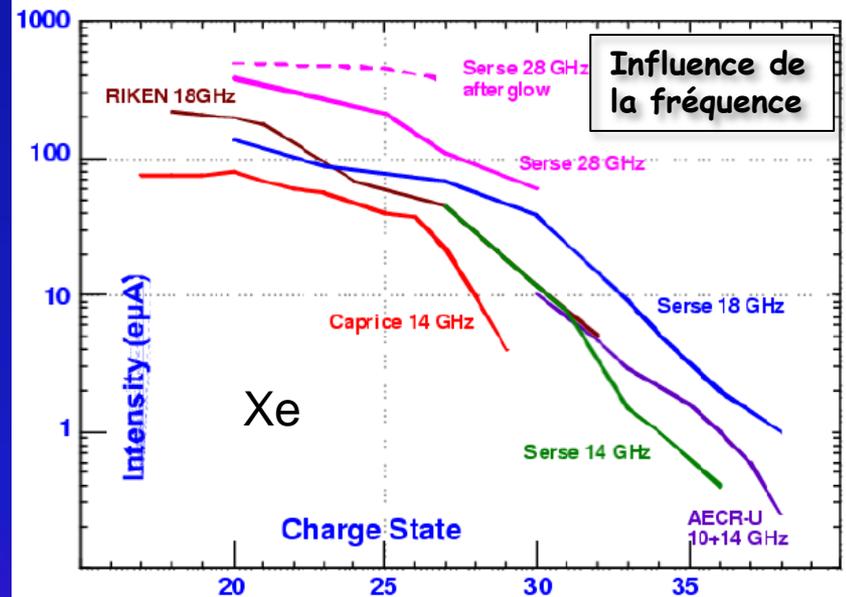
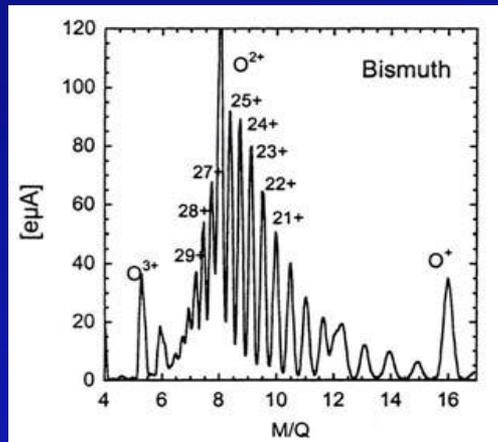
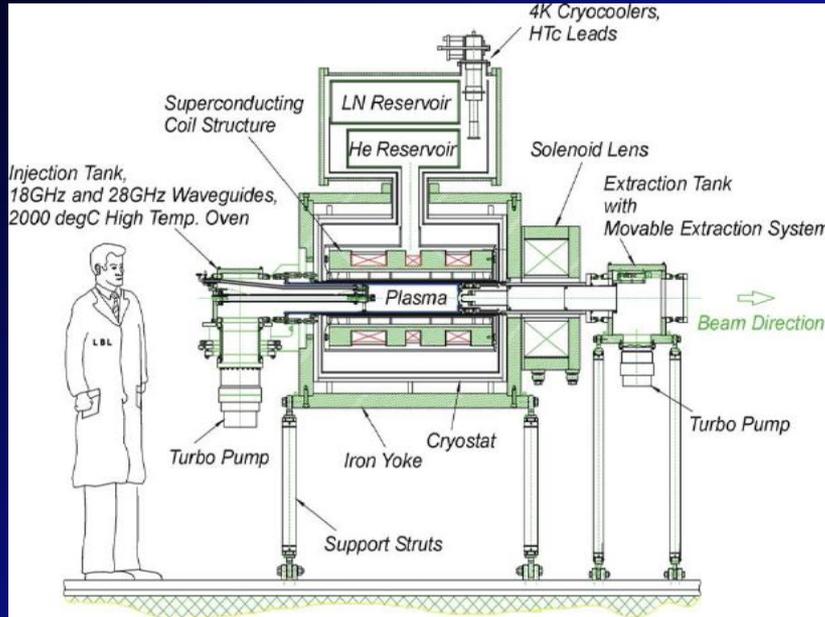
**CEA SILHI**  
2.45GHz-6kW  
3ms pulses, 1Hz  
Intensités → 157mA H<sup>+</sup>



**CEA ECRIN**  
2.45GHz-6kW  
3mA H<sup>-</sup>  
(sans Cs)

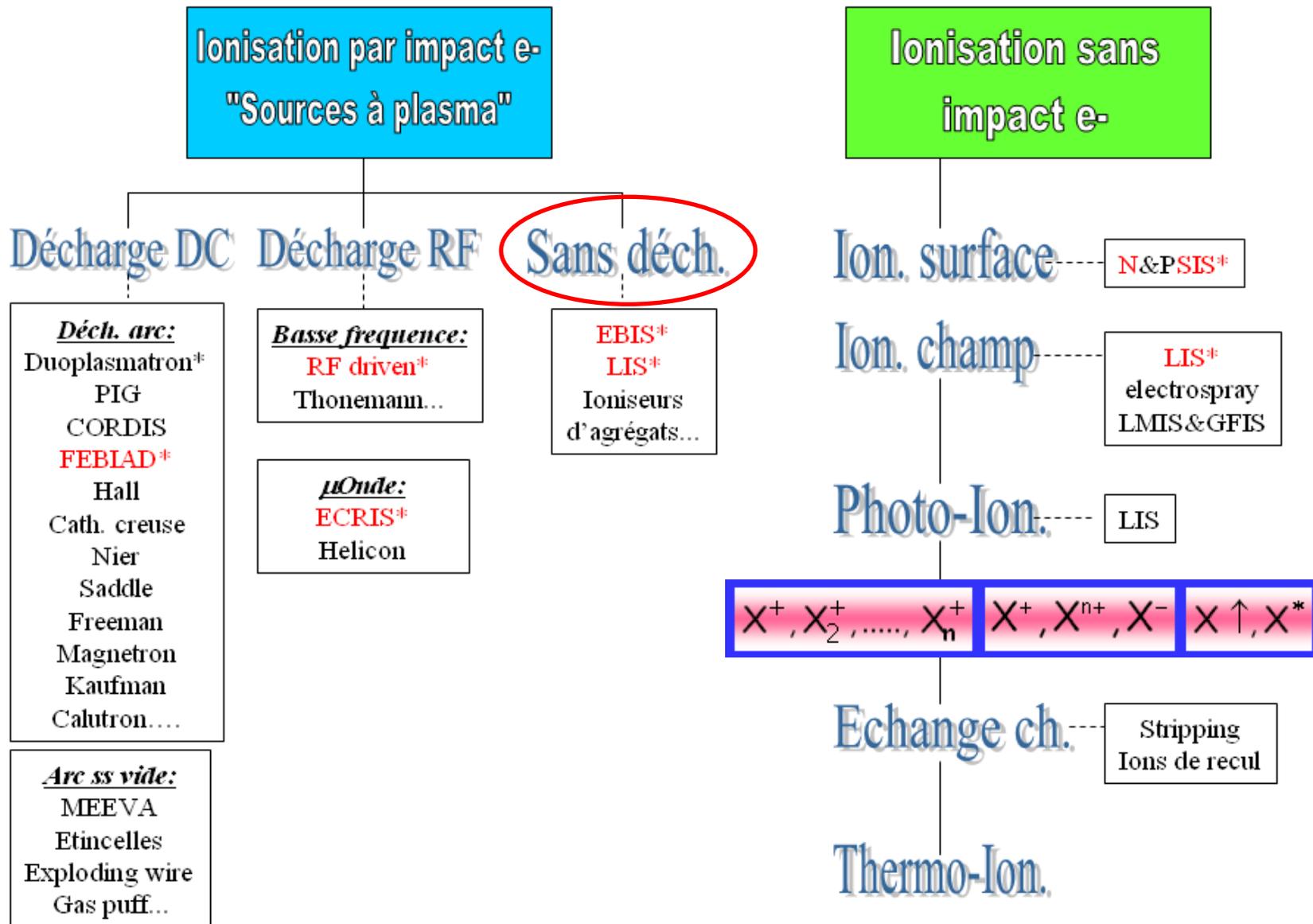
# ECRIS n+

V  
e  
n  
u  
s



# Les Sources d'ions!

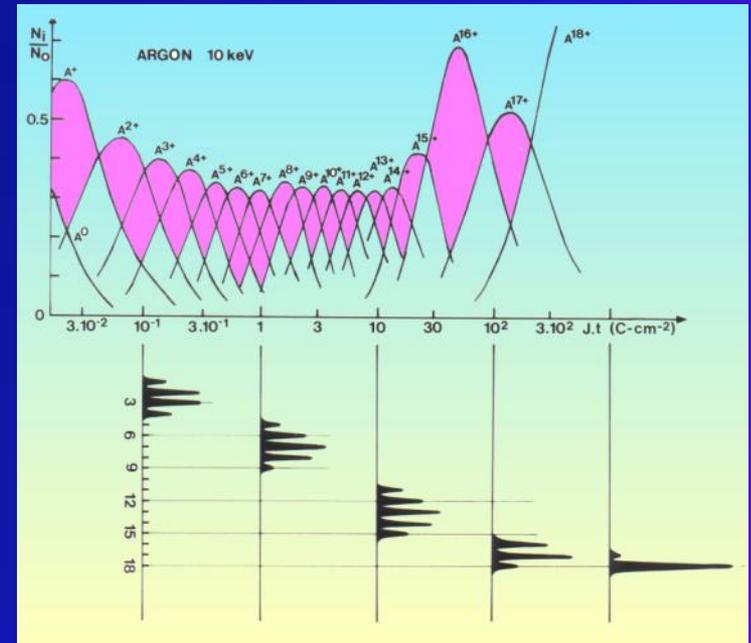
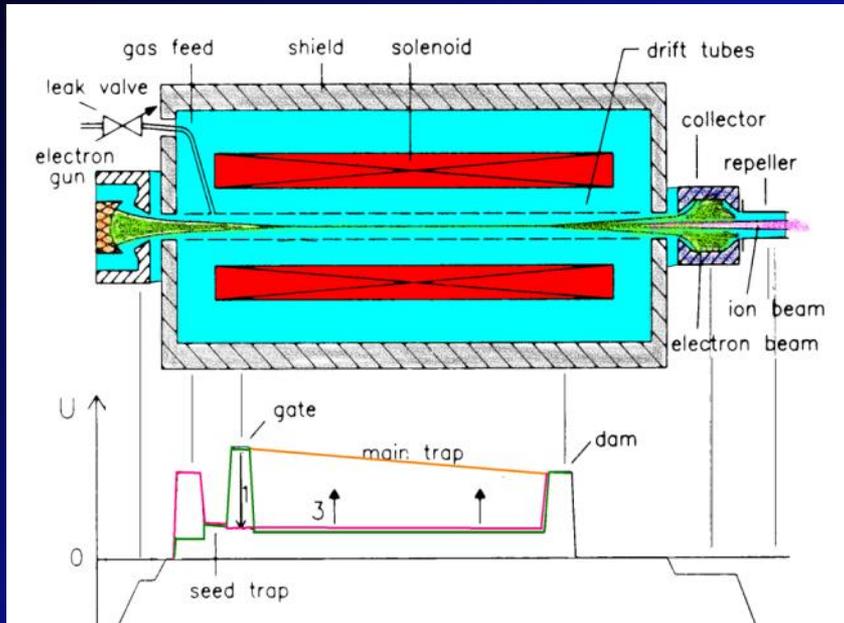
E  
x  
e  
m  
p  
l  
e



# EBIS

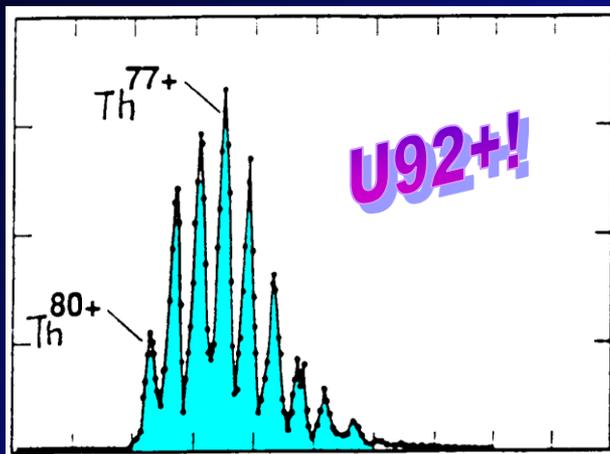
# Source sans décharge

S  
e  
c  
r  
e  
t  
s  
+  
n

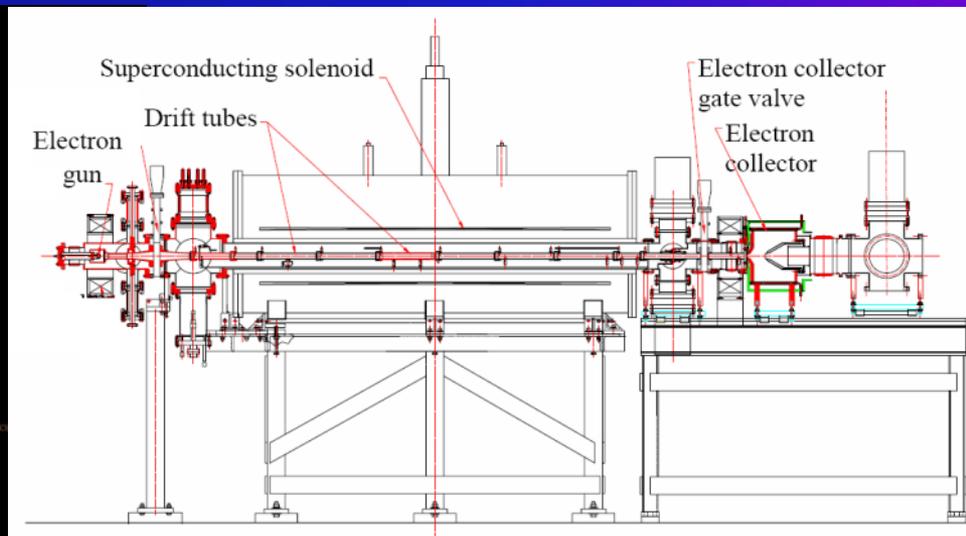
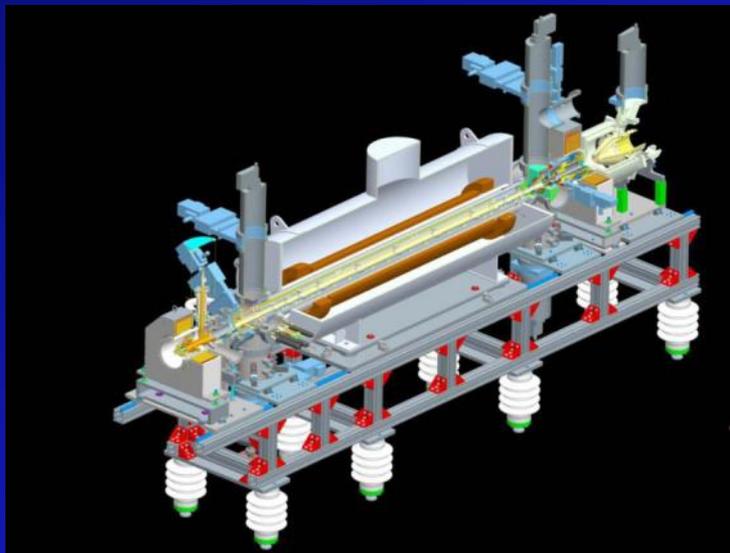


Un faisceau d' $e^-$  dense et intense ( $\rightarrow 20A-1000A/cm^2$ ), parcourt l'axe d'un solénoïde et ionise par étapes. Sa CE + diverses distributions de potentiel sur des tubes concentriques assurent le confinement et l'extraction.

# EBIS intenses



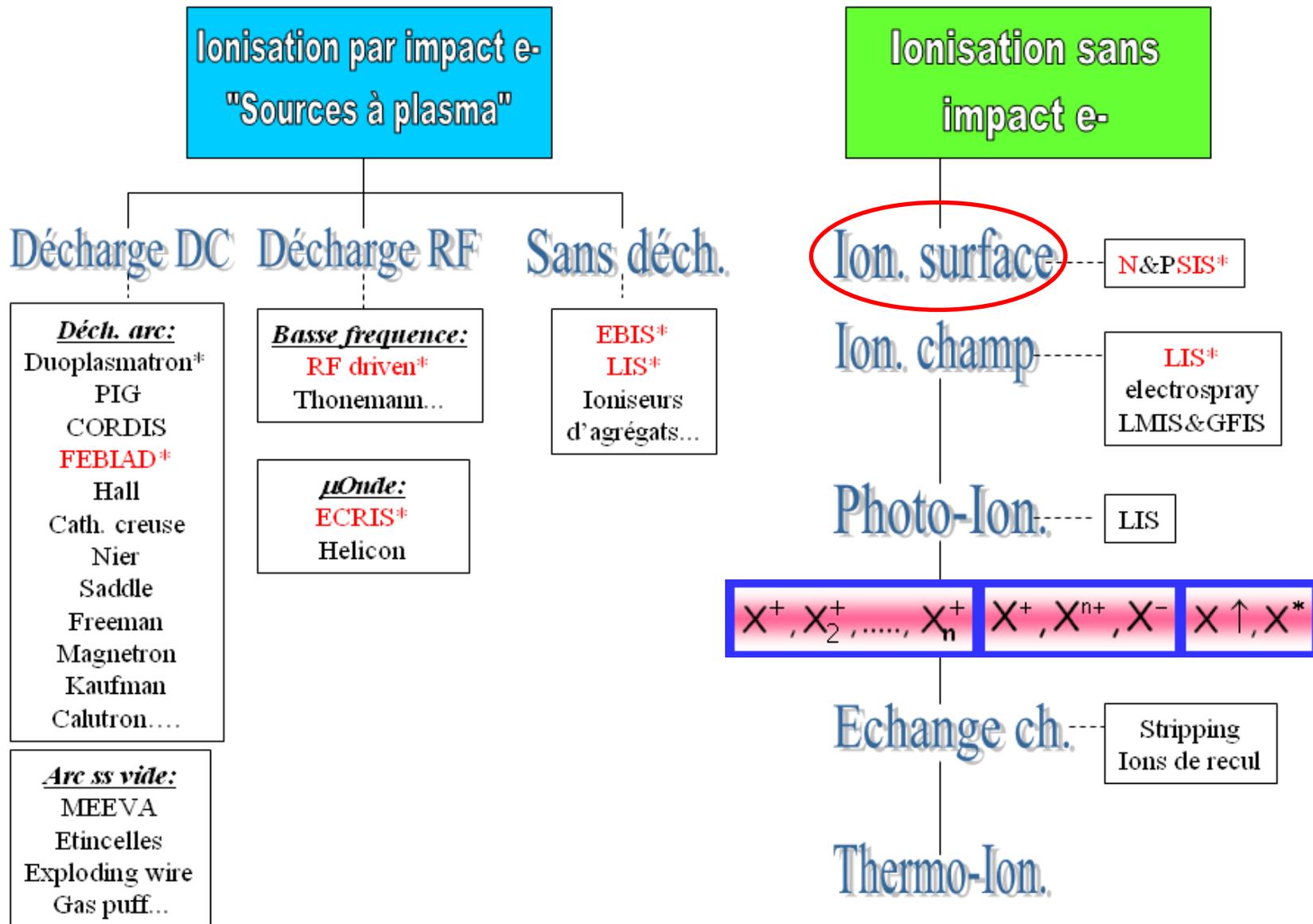
1.7eA-10 $\mu$ s-5Hz



R  
H  
I  
C

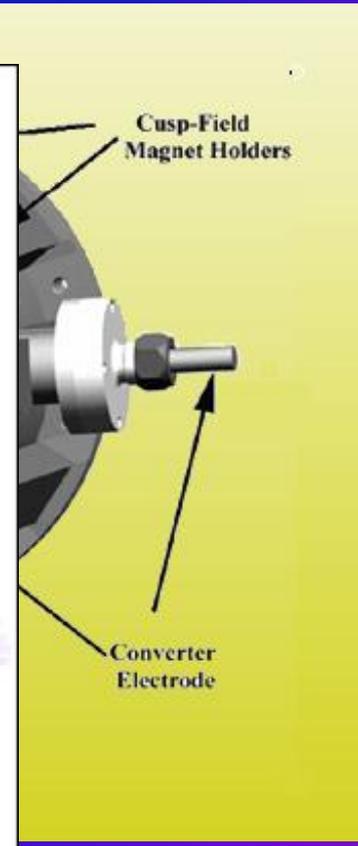
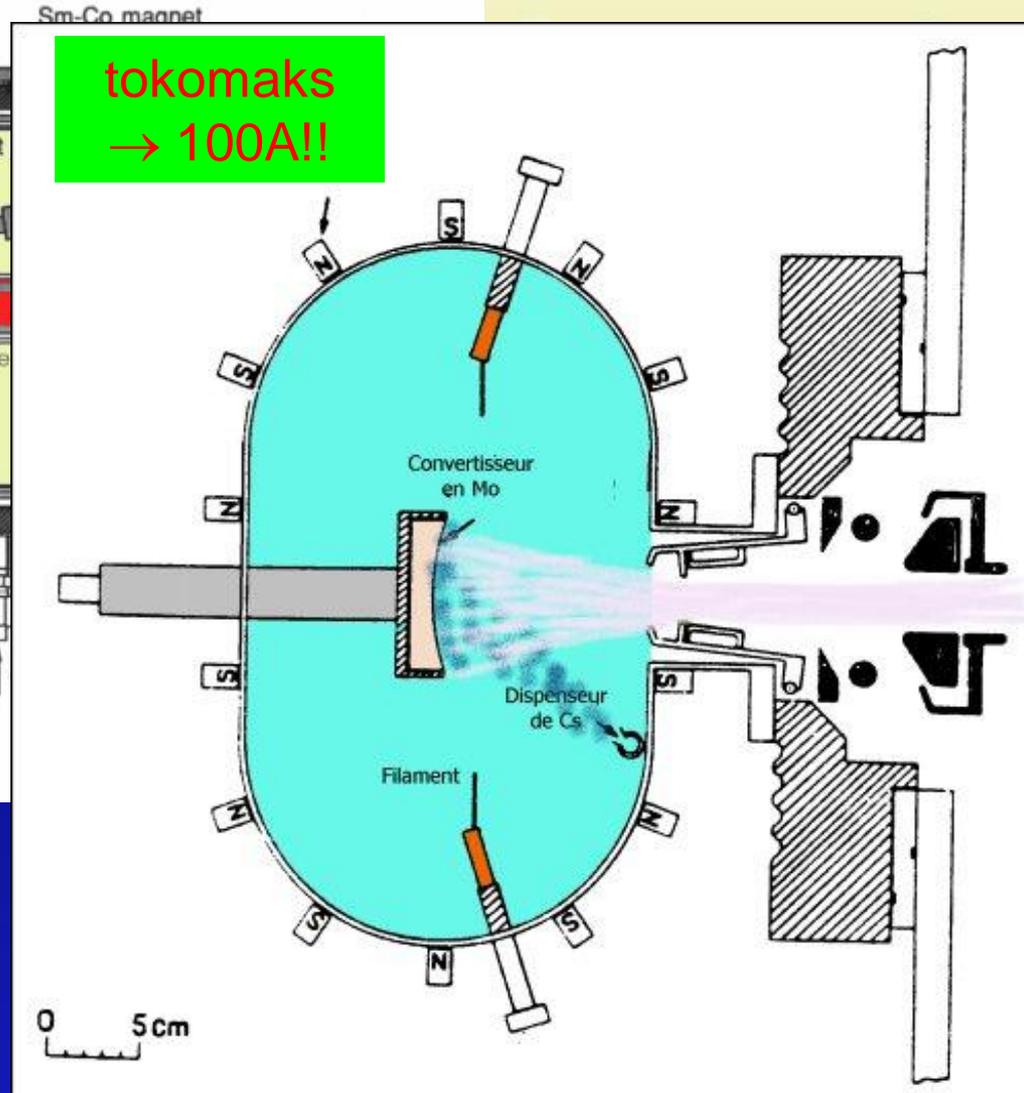
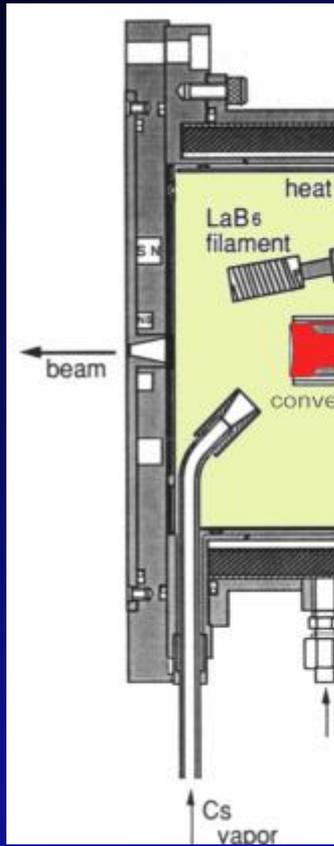
# Les Sources d'ions!

E  
x  
e  
m  
p  
l  
e



# Les sources à ionisation de surface

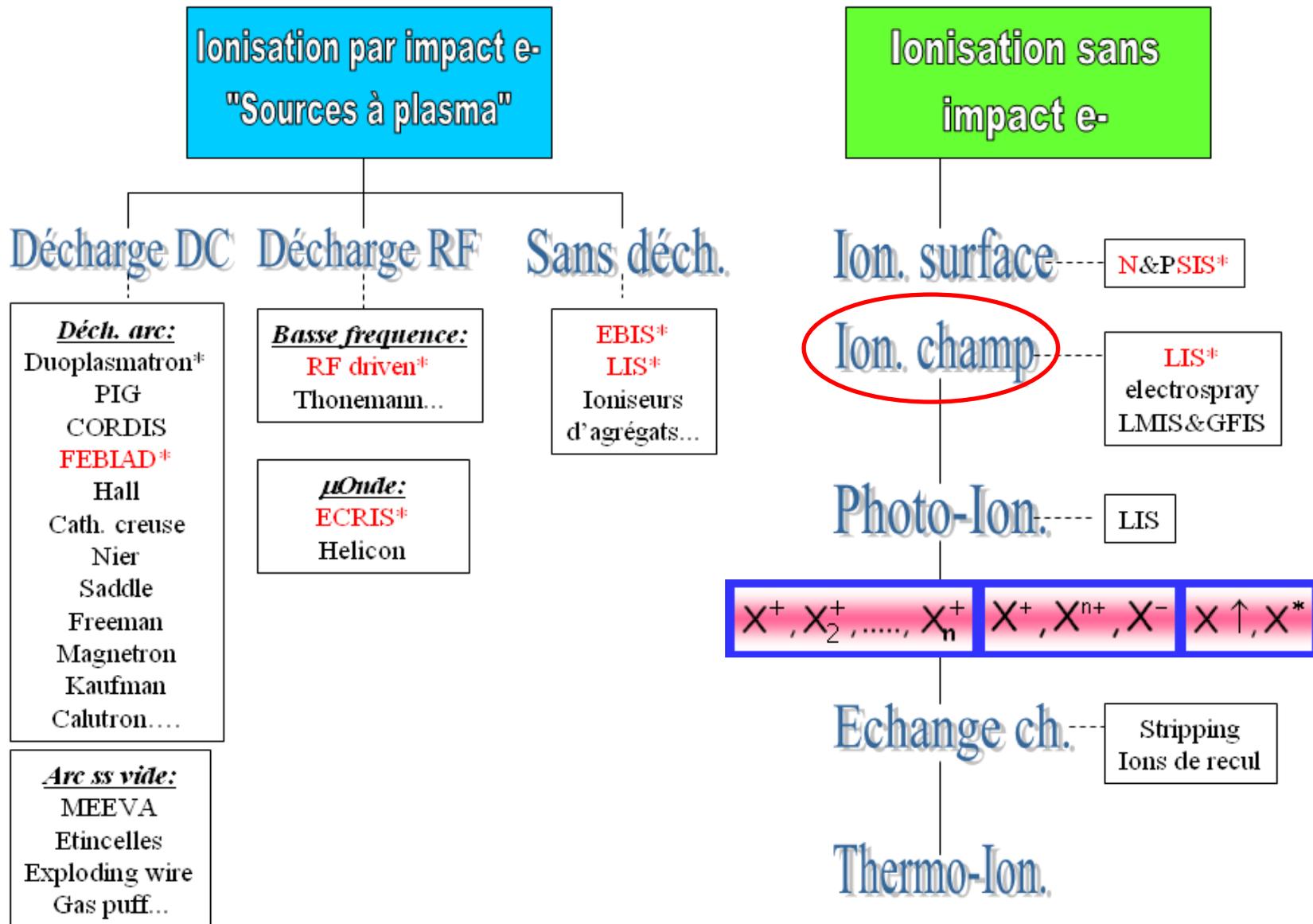
E  
x  
e  
m  
p  
l  
e



H

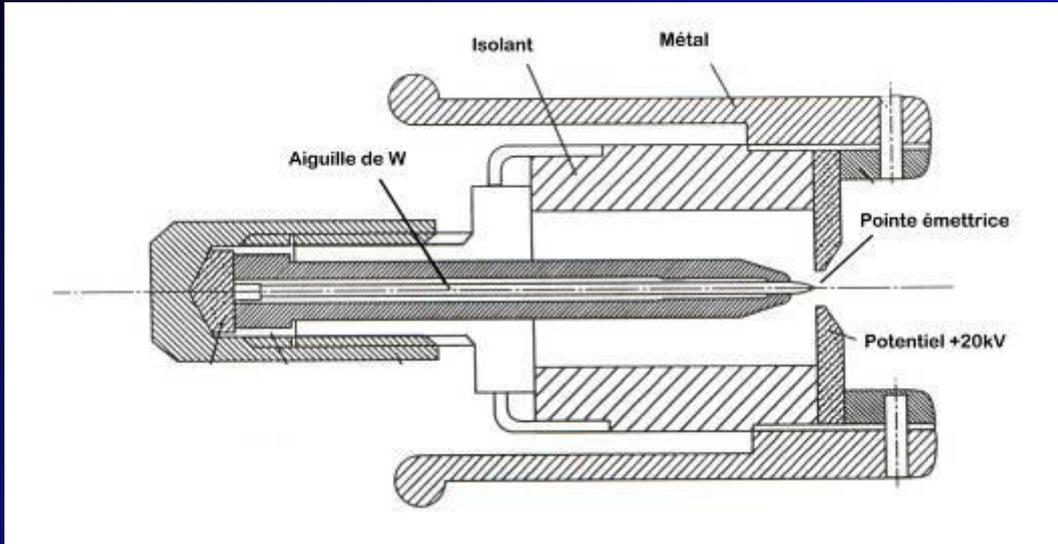
# Les Sources d'ions!

E  
x  
e  
m  
p  
l  
e



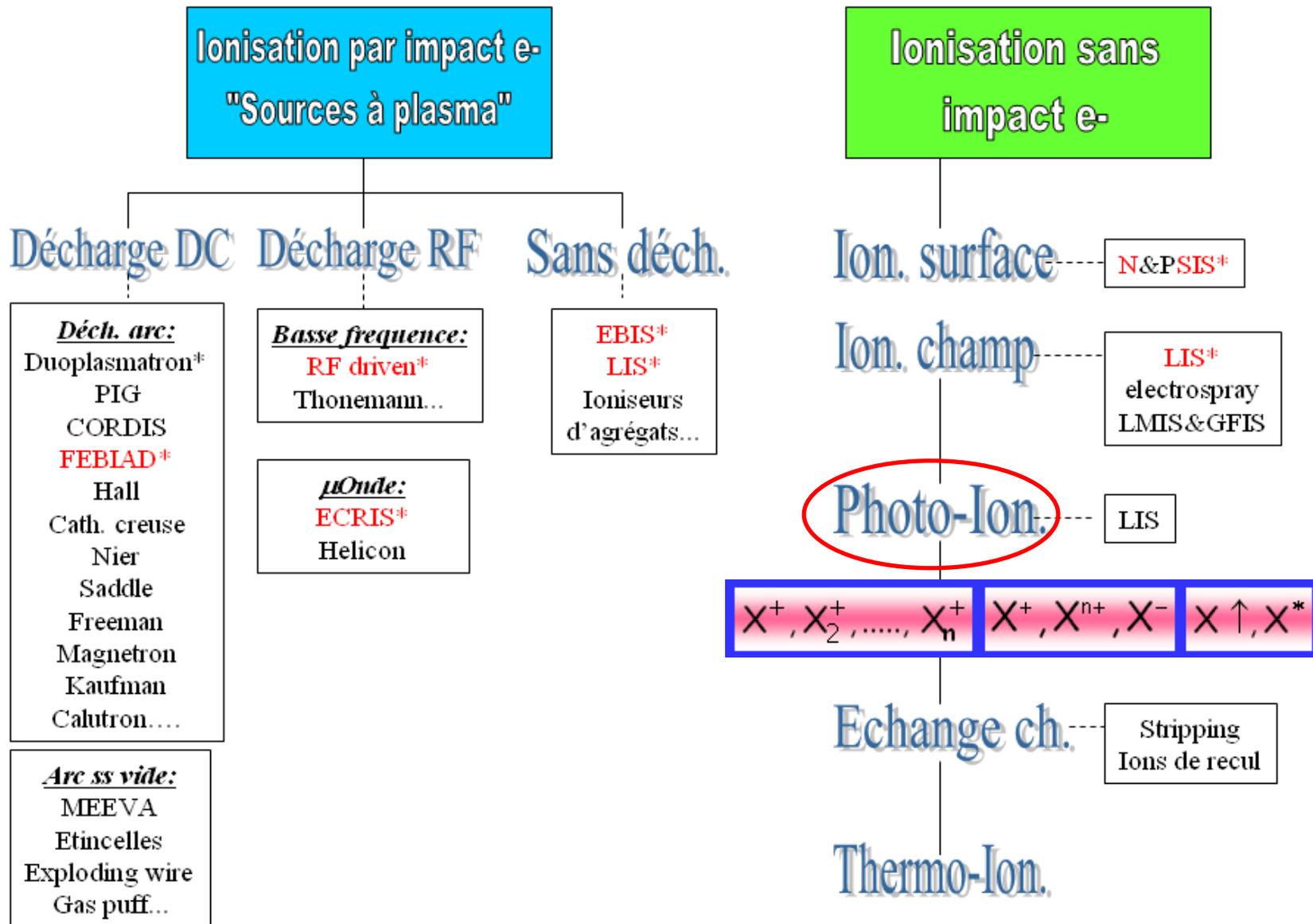
# Les sources à ionisation de champ

E  
x  
e  
m  
p  
l  
e



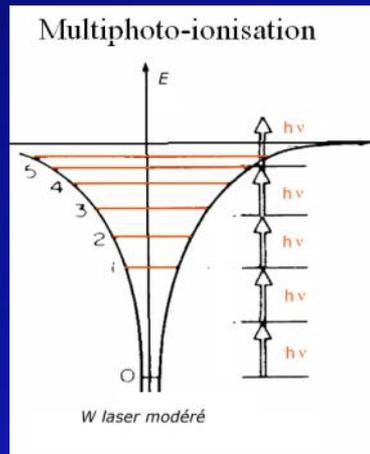
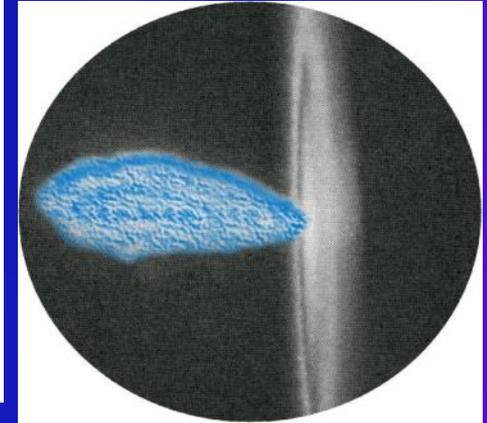
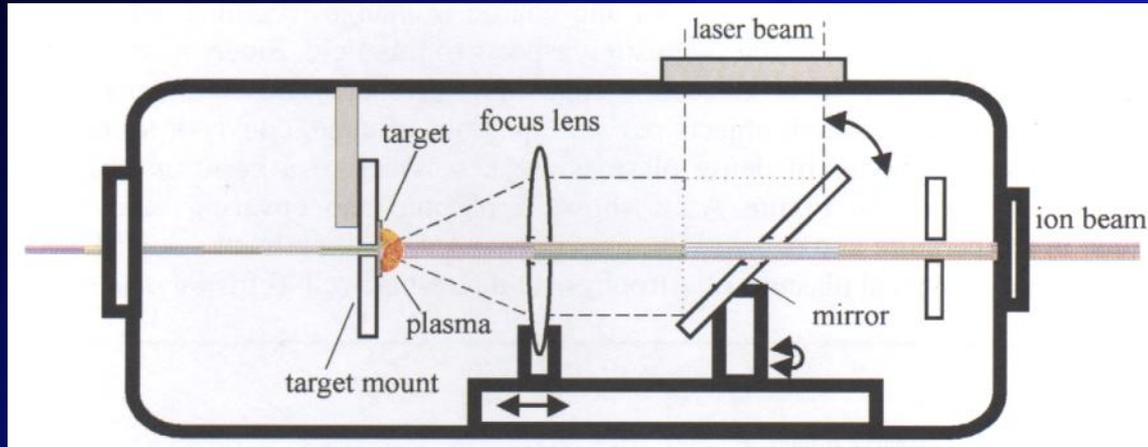
# Les Sources d'ions!

E  
x  
e  
m  
p  
l  
e



# Les sources laser

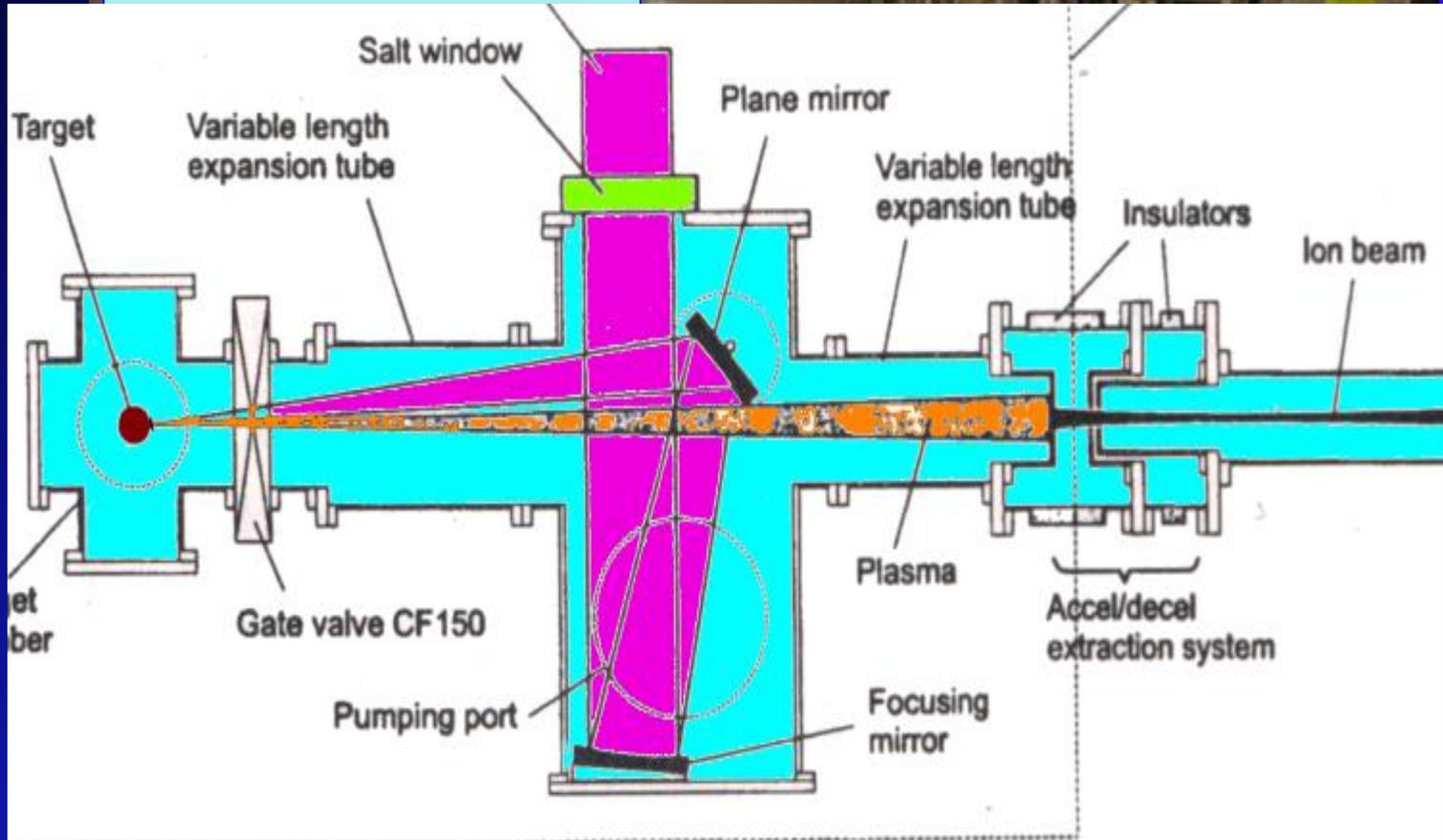
S  
e  
c  
r  
e  
t  
+



Un faisceau lumineux intense frappe une cible et crée une onde de choc thermique qui expulse une plume de plasma. Les pulses font qq ns à faible cycle.

# Les sources laser

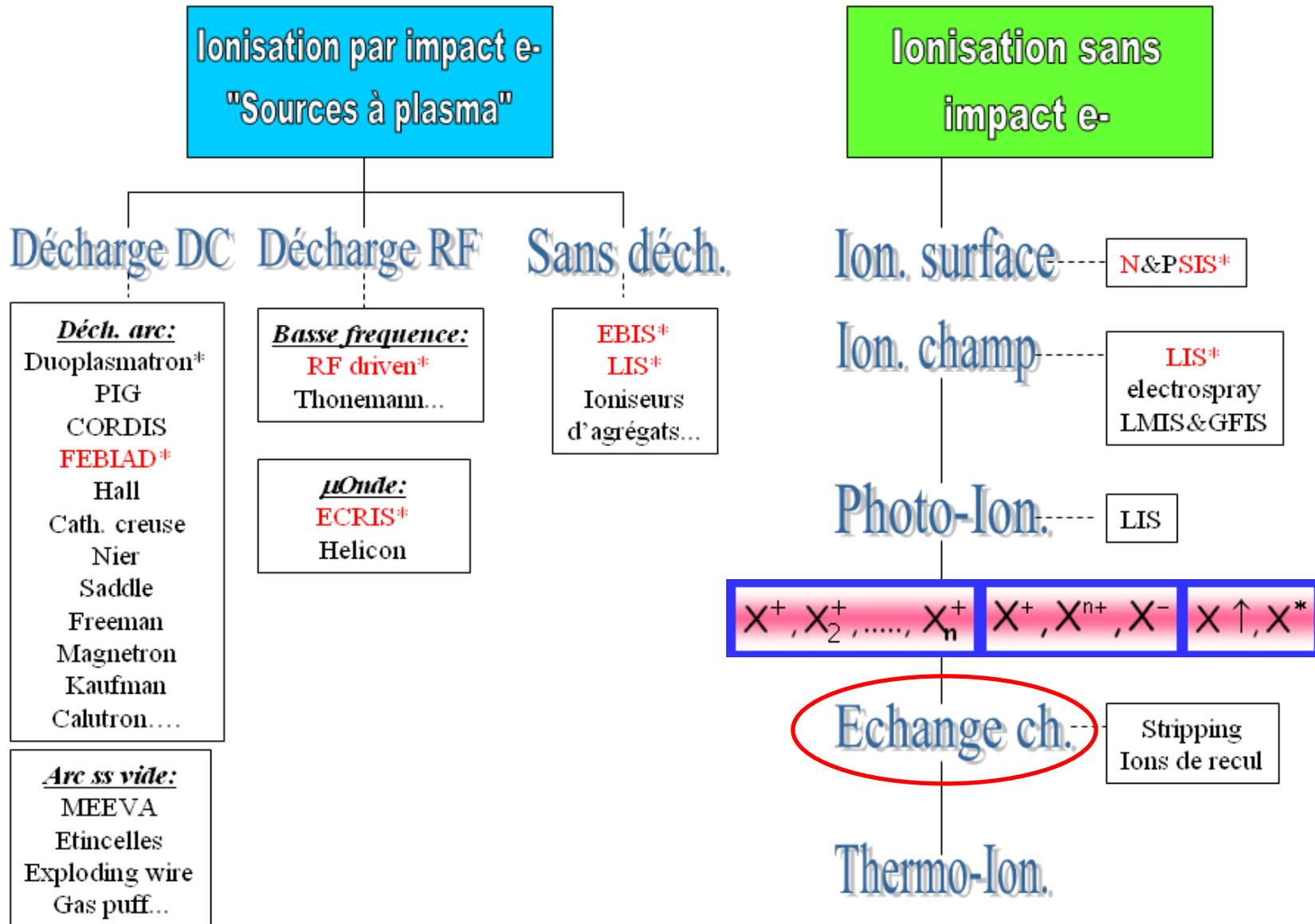
CO<sub>2</sub>-Ne-He 100J



C  
E  
R  
N  
L  
I  
S

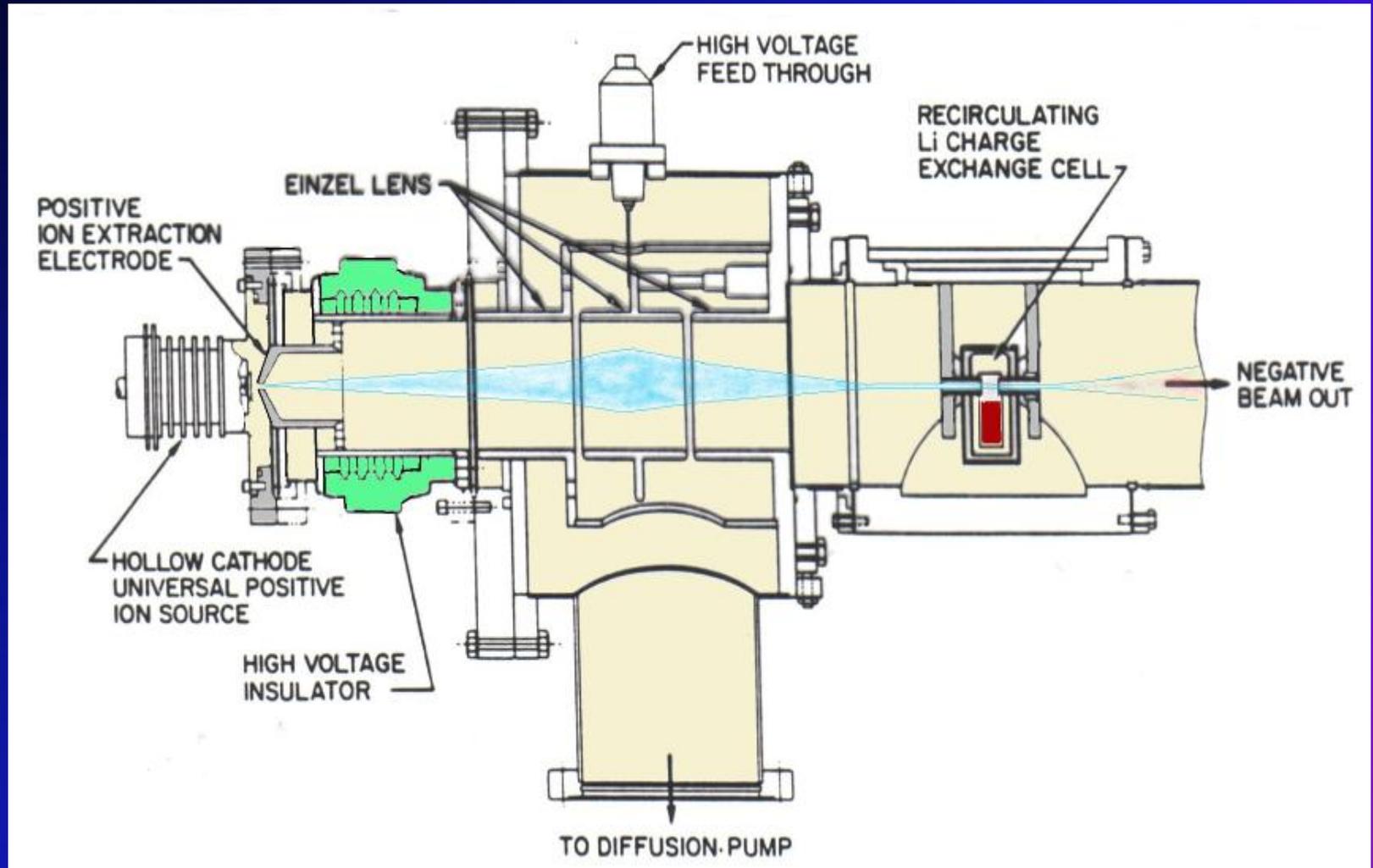
# Les Sources d'ions!

E  
x  
e  
m  
p  
l  
e



# Les sources à échange de charge

E  
x  
e  
m  
p  
l  
e



# Les techniques à maîtriser

B  
i  
l  
a  
n

## Technique à maîtriser



➤ HV Technic

➤ CEM

➤ RF injection and coupling



➤ Control system



04/12/2009

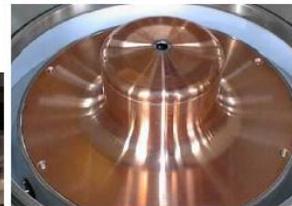


TUSKE Olivier



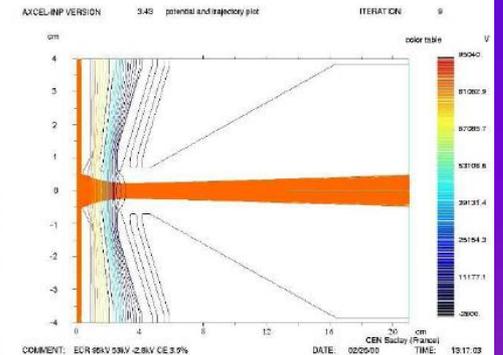
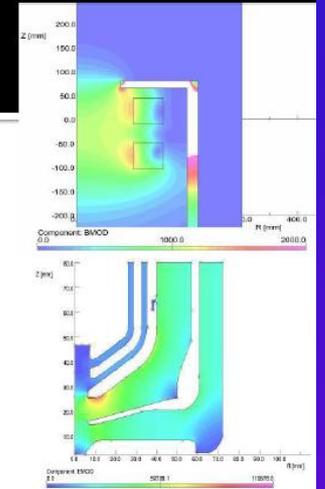
DSM/IRFU/SACM/LEDA

➤ Magnetic, thermal and electrostatic calculations



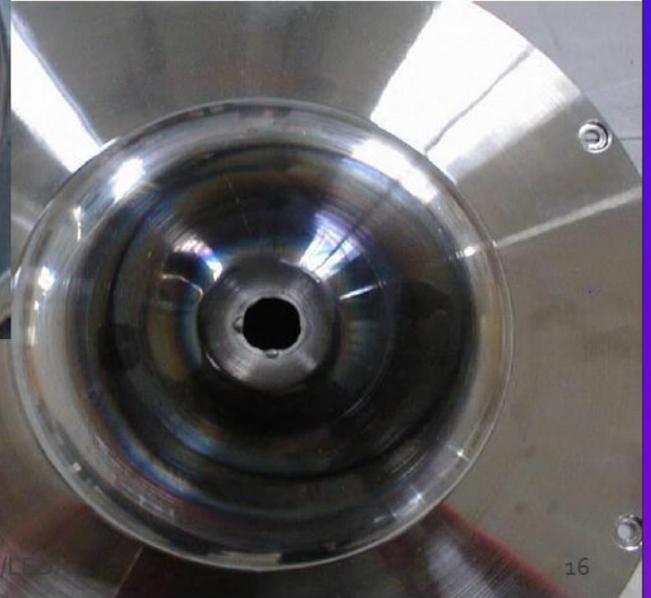
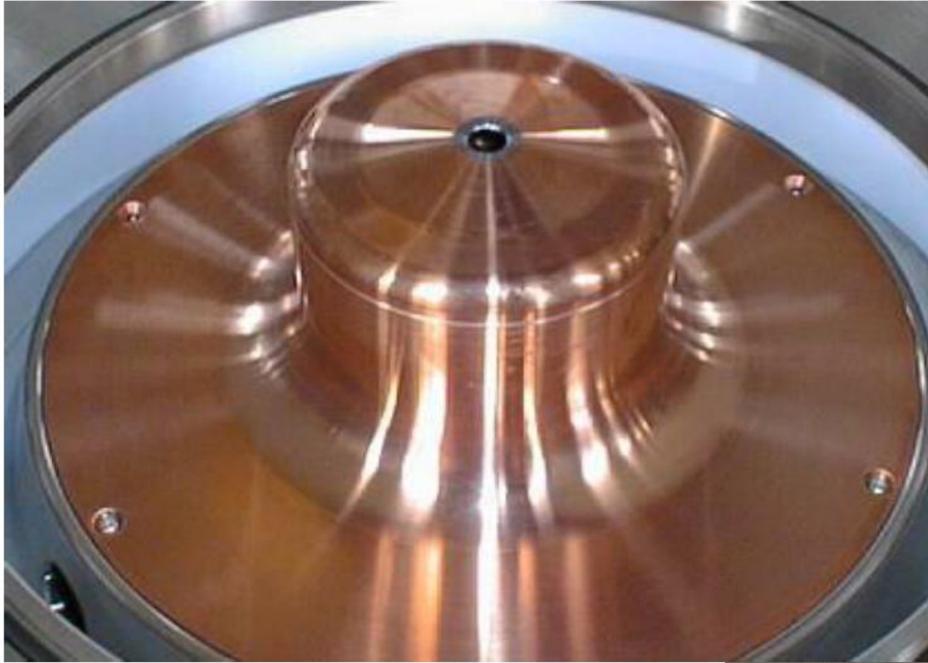
➤ Matériaux

➤ Beam Extraction (10 kW)



# Les techniques à maîtriser

B  
i  
l  
a  
n



04/12/2009

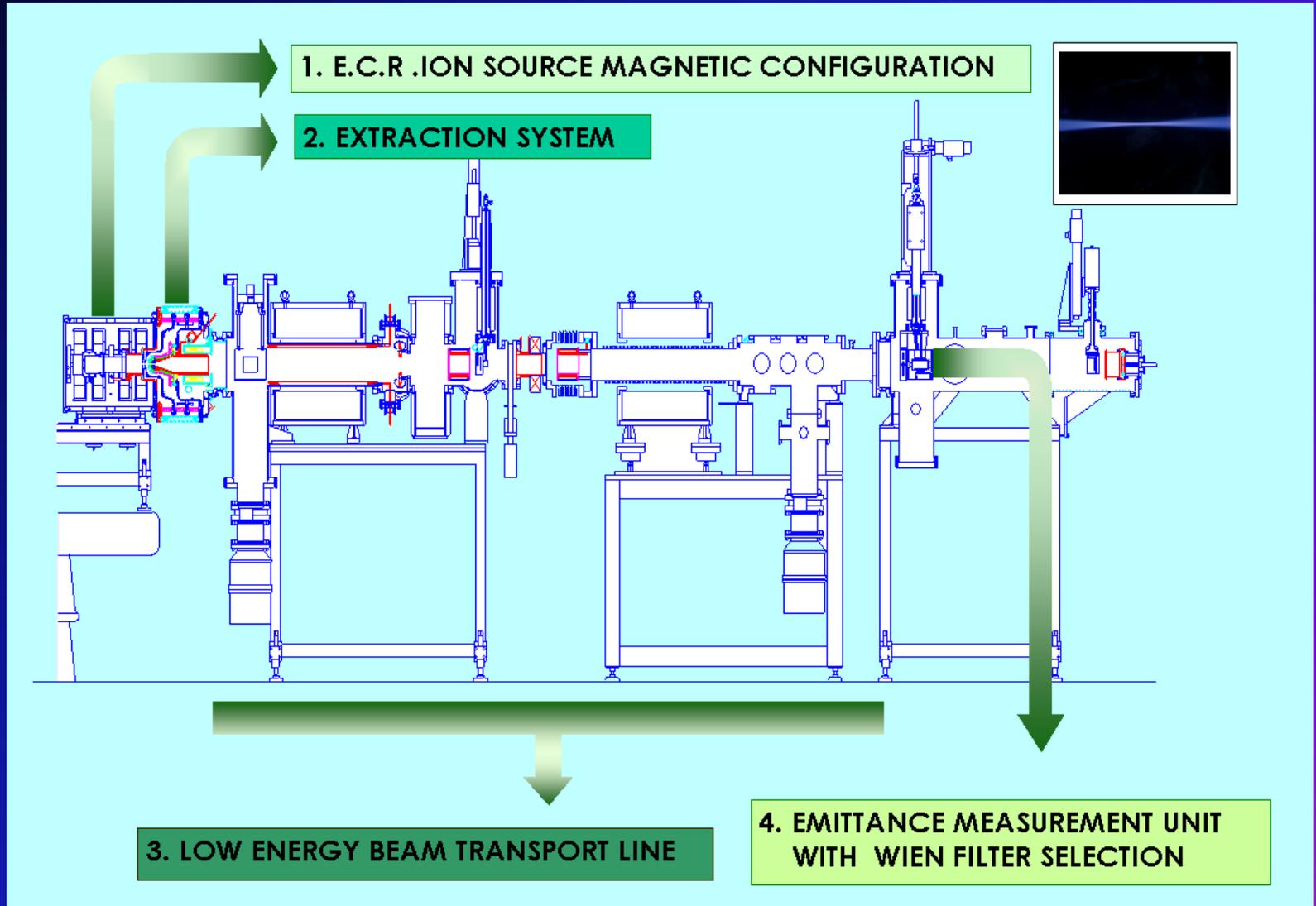
TUSKE Olivier

DSM/IRFU/SACM/LEA

16

# Les techniques à maîtriser

B  
i  
l  
a  
n



# Les matériaux de construction des sources d'ions

## B i l a n

- **compatibilité avec les exigences de l'application et du fonctionnement**
- **travailler pendant de longues périodes à haute température, dans des milieux agressifs, tout en étant mécaniquement résistants voire isolants, peu dégazants, inertes**
- **usinables facilement, bon marché et rapidement disponibles.**
- **Cu** : liaisons électriques dans des environnements non-agressifs, Excellentes conductibilités électrique et thermique, usinage mou. On doit l'utiliser à moins de 900°C.
- **Al** : à proscrire à cause de son bas point de fusion et sa faible résistance à la corrosion.
- **Le graphite à haute densité** : utilisé pour la fabrication d'éléments ayant à supporter des températures allant jusqu'à 3000°C (chambre de décharge, fours, fentes d'extraction, électrodes...) Usinable facilement et bon marché ; il a de faibles taux de pulvérisation et d'émission secondaire. Fragile, très dégazant.

# Les matériaux de construction des sources d'ions

## • L'acier inoxydable :

- Constituant privilégié des enceintes, des supports
- mécaniques internes et des éléments d'optiques
- Largement utilisé à basse température (< 1000°C).
- Excellentes propriétés mécaniques
- Aisément usinable. Il n'est pas toujours amagnétique

## • Le titane :

- Utilisé pour réduire les pertes thermiques dans les connexions électriques du fait de sa mauvaise conductibilité thermique.
- Excellentes propriétés mécaniques jusqu'à 800°C.

## • Le molybdène :

- Matériau réfractaire le plus facilement usinable et le moins cher.
- Composants travaillant à moins de 2000°C.
- Peu cassant et résistant aux érosions chimiques.

## • Le tantale :

- Plus mou ; sa malléabilité permet d'en obtenir des feuilles minces.
- Il travaille jusqu'à 2600°C et est utilisé pour faire des filaments ou des cathodes et des écrans anti-radiations.
- Il réagit vivement à haute température avec l'azote et l'oxygène et devient cassant.

## • Le tungstène :

- Matériau réfractaire privilégié pour faire des filaments et des cathodes travaillant jusqu'à 3000°C.
- Il est peu usinable et cassant.
- A chaud, il a tendance à cristalliser et devient ensuite très fragile.

**B  
i  
l  
a  
n**

# Les matériaux de construction des sources d'ions

B  
i  
l  
a  
n

- L'or et le platine :

- Utilisés pour leur remarquable résistance chimique, le plus souvent sous forme de dépôts superficiels.
- Ils sont mous

- Le verre et le quartz :

- isolants, les plus anciennement utilisés
- fragiles et on sait usiner (difficilement).
- Utilisés pour les isolements volumineux, de part leur faible coût (colonne d'accélération par exemple) et leur faible dégazage.

- Le nitrure de bore :

- Coûteux, est remarquable par son inertie chimique et l'aisance de son usinage.
- Très peu résistant mécaniquement ; on peut l'utiliser jusqu'à 2000°C, température à partir de laquelle il se décompose lentement. Il est très dégazant

- L'alumine :

- Meilleur des isolants. On peut l'utiliser jusqu'à 1500°C, mais il perd de ses qualités diélectriques avec un usage prolongé à haute température.
- Matériau bon marché dont l'usinage est possible mais délicat.
- Bon conducteur thermique aux très basses températures