

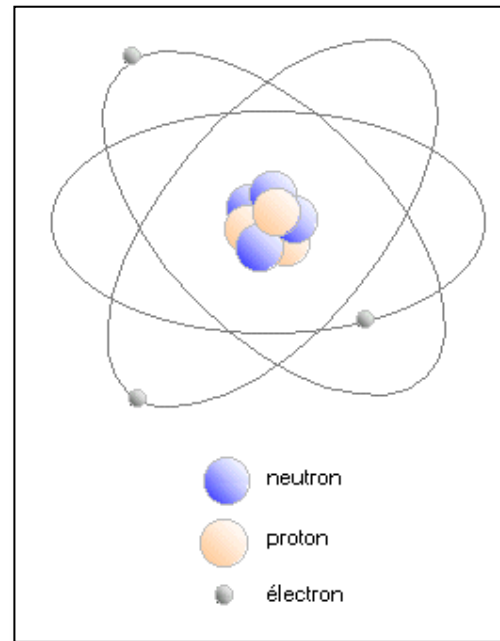
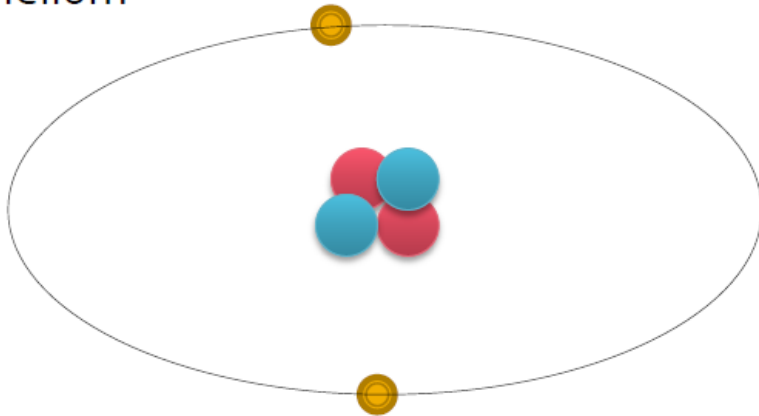
Quelques notions

Qu'est-ce qu'un atome ?

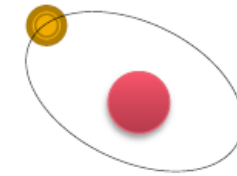
- Atome

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

Helium



Hydrogène

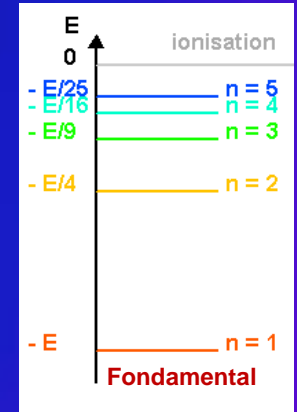
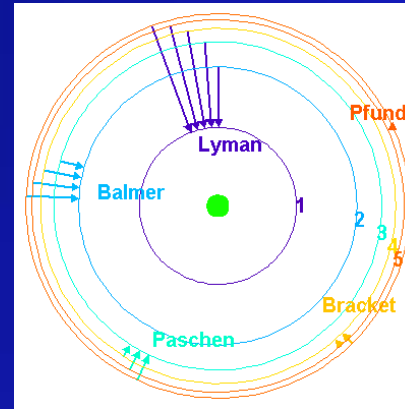
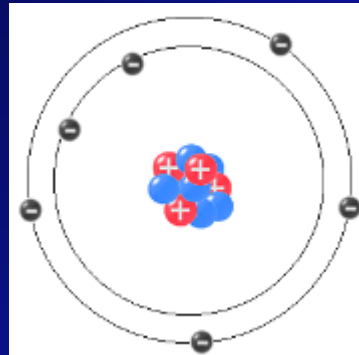


Les niveaux d'énergie

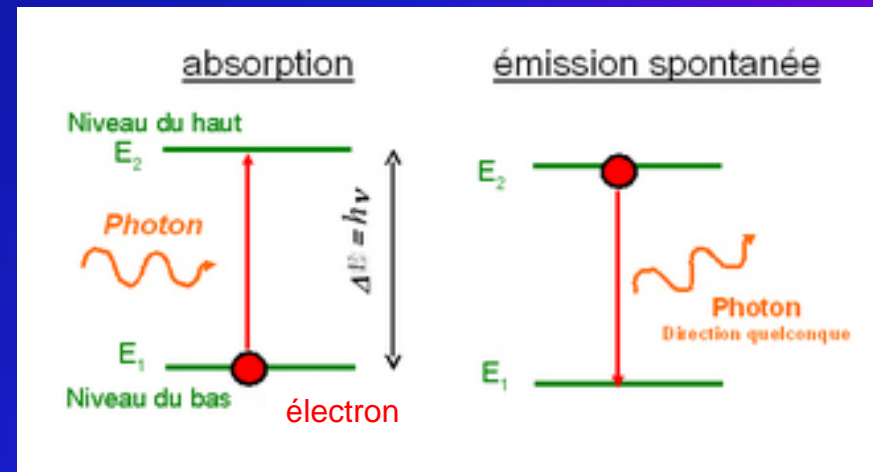
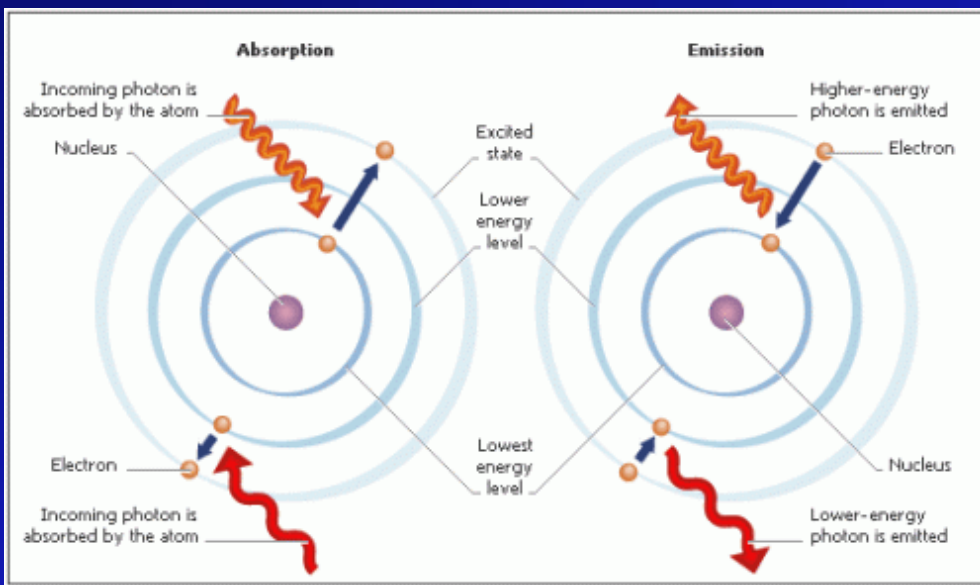
Vue artistique

Vue schématique

Vue scientifique



Excitation et désexcitation



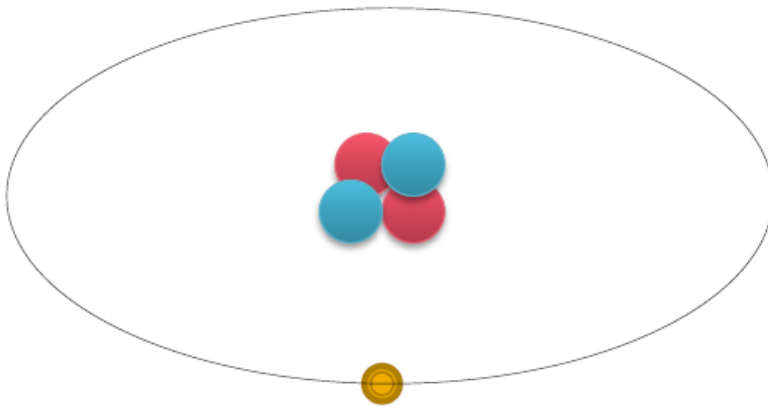
Qu'est-ce qu'un un ion ?

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

Hélium
Une fois ionisé
 He^+



Hélium
deux fois ionisé
 He^{2+}

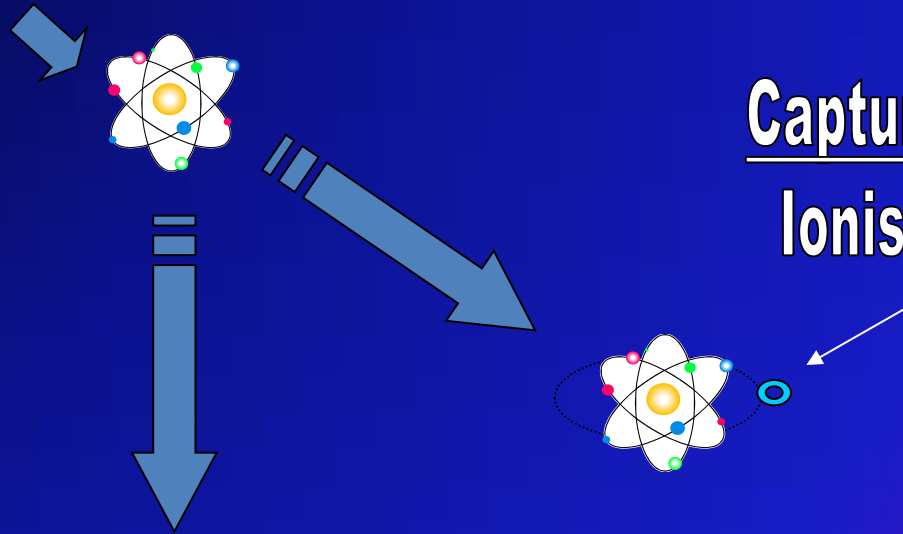


Hydrogène H^+

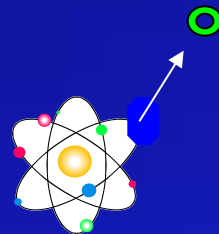
A diagram showing a hydrogen ion (H⁺), represented by a single red sphere.

La production des ions (X^+ et X^-)

PERTURBATION
(collision, T, E, , )



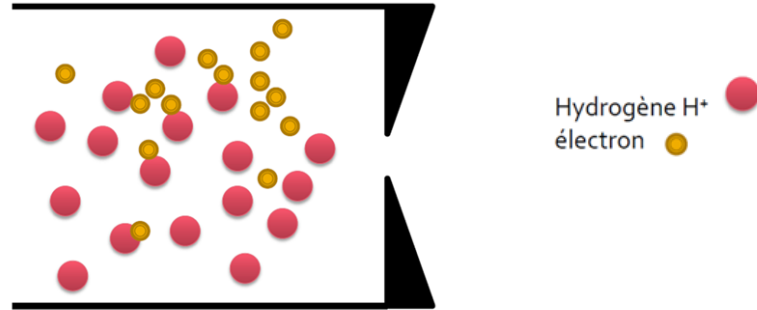
Capture d'électrons :
Ionisation négative



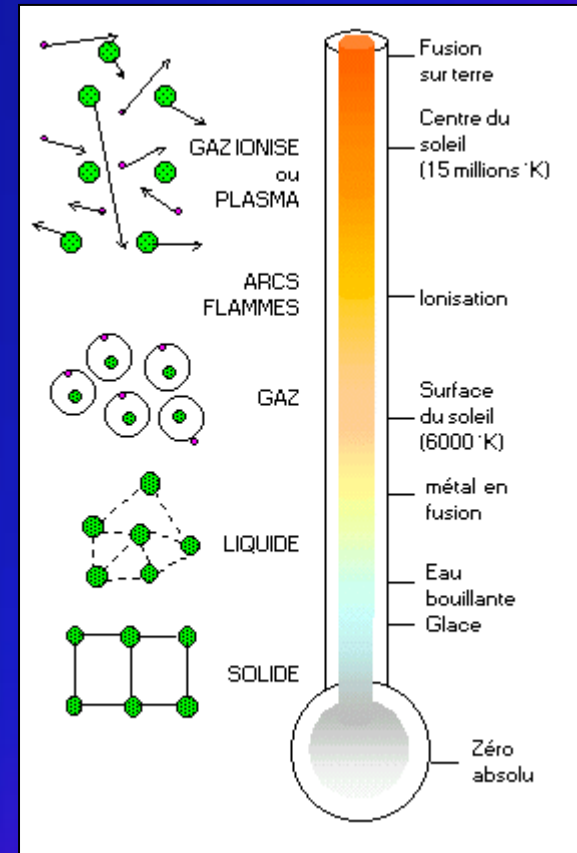
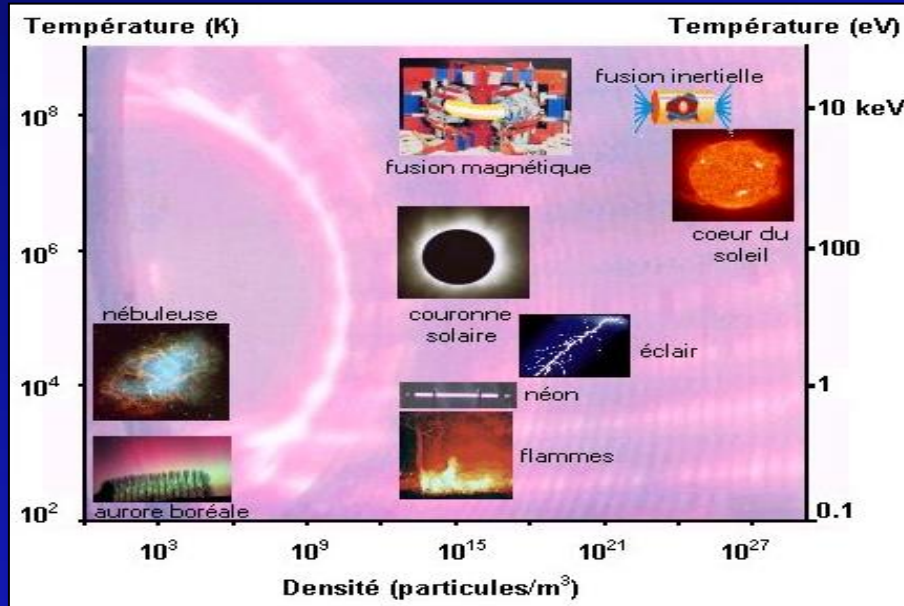
Perte d'électrons :
Ionisation positive

Qu'est-ce qu'un plasma ?

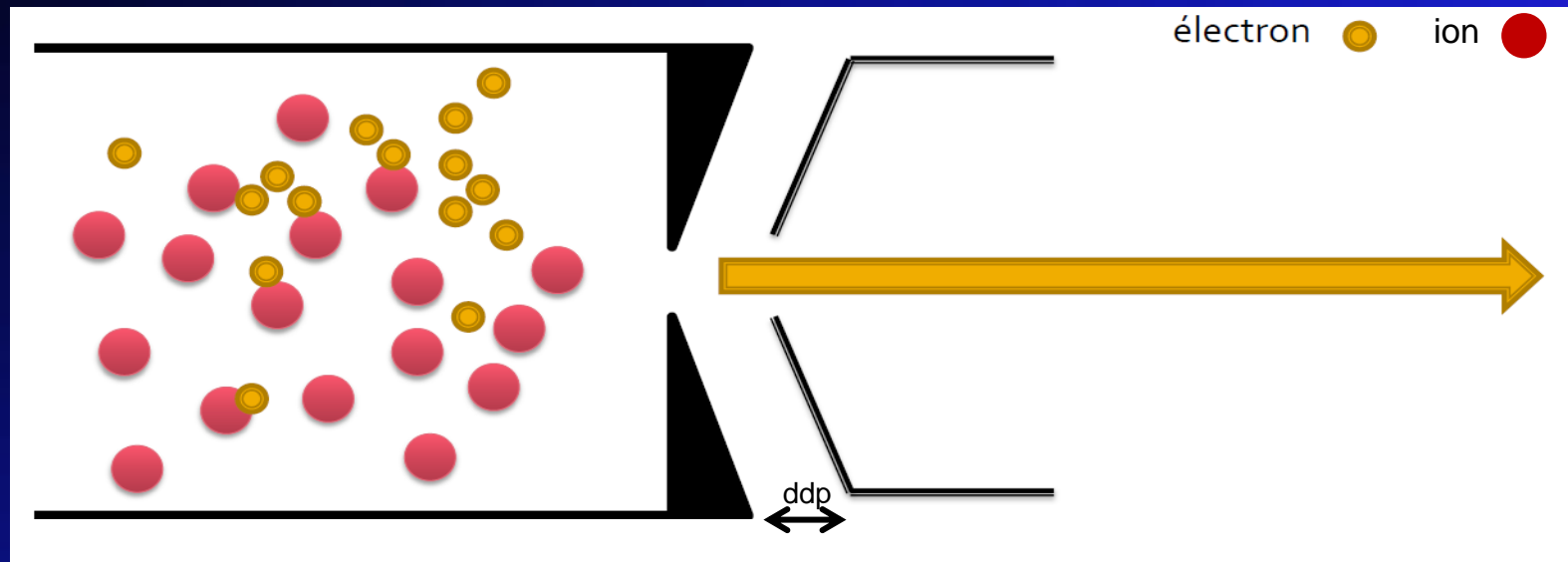
- Plasma : « une soupe » d'ions et d'électrons
 - → globalement neutre



4^{ème} état de la matière



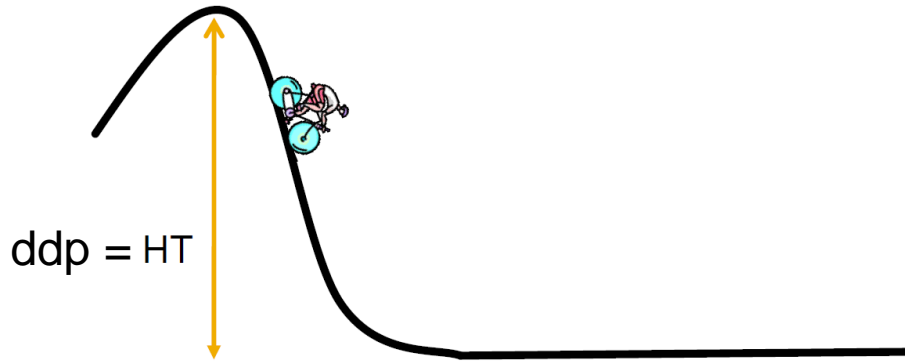
Qu'est-ce qu'une source ?



- « Boîte » de plasma
- Orifice placé devant une électrode à fort potentiel (ddp) qui "extraît" 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.

Qu'est-ce qu'une source ?

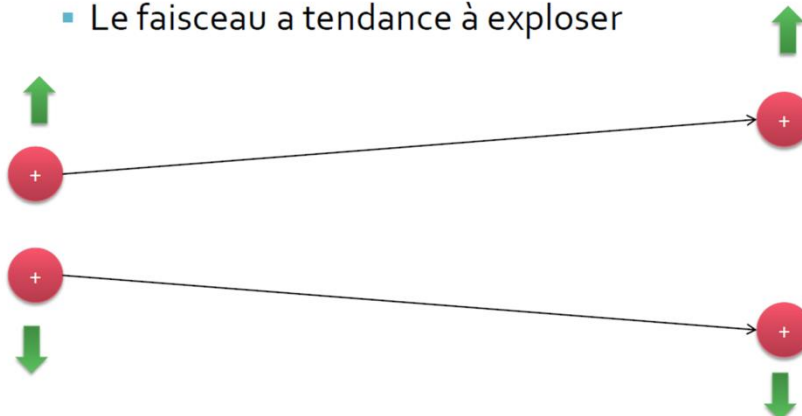
- Energie du faisceau, vitesse des particules



- Notion 1 : Haute tension

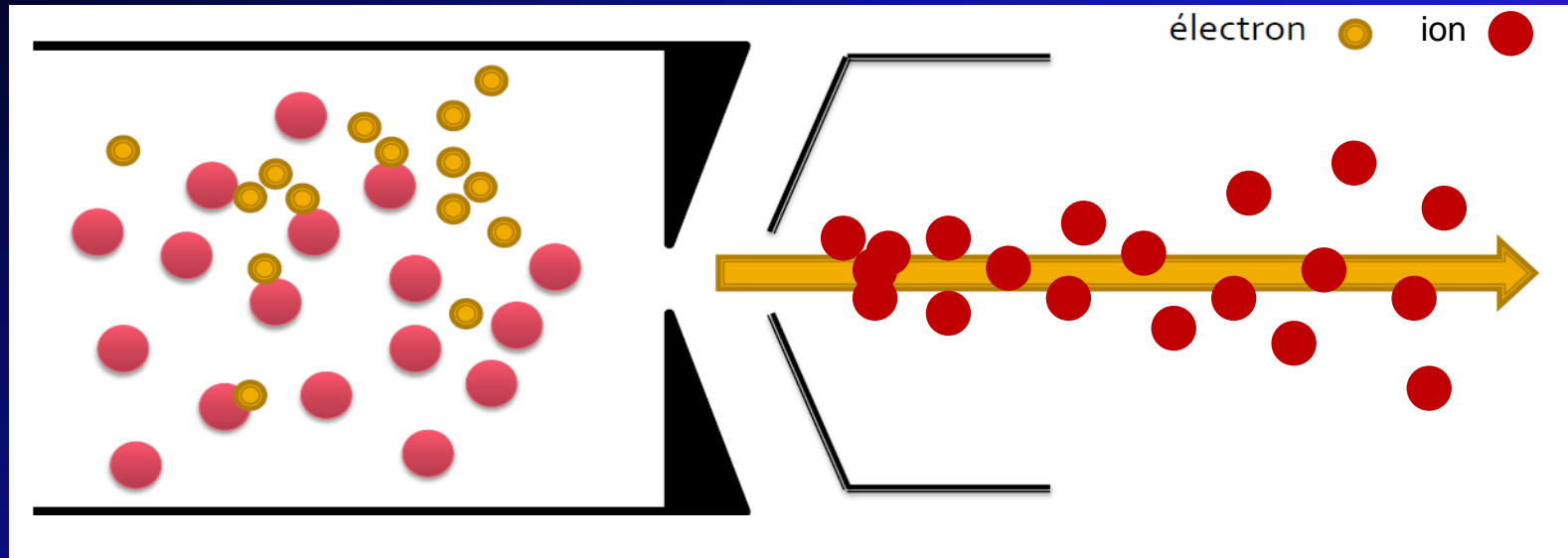
- Répulsion électrostatique

- Les charges positives du faisceau se repoussent
- Le faisceau a tendance à exploser



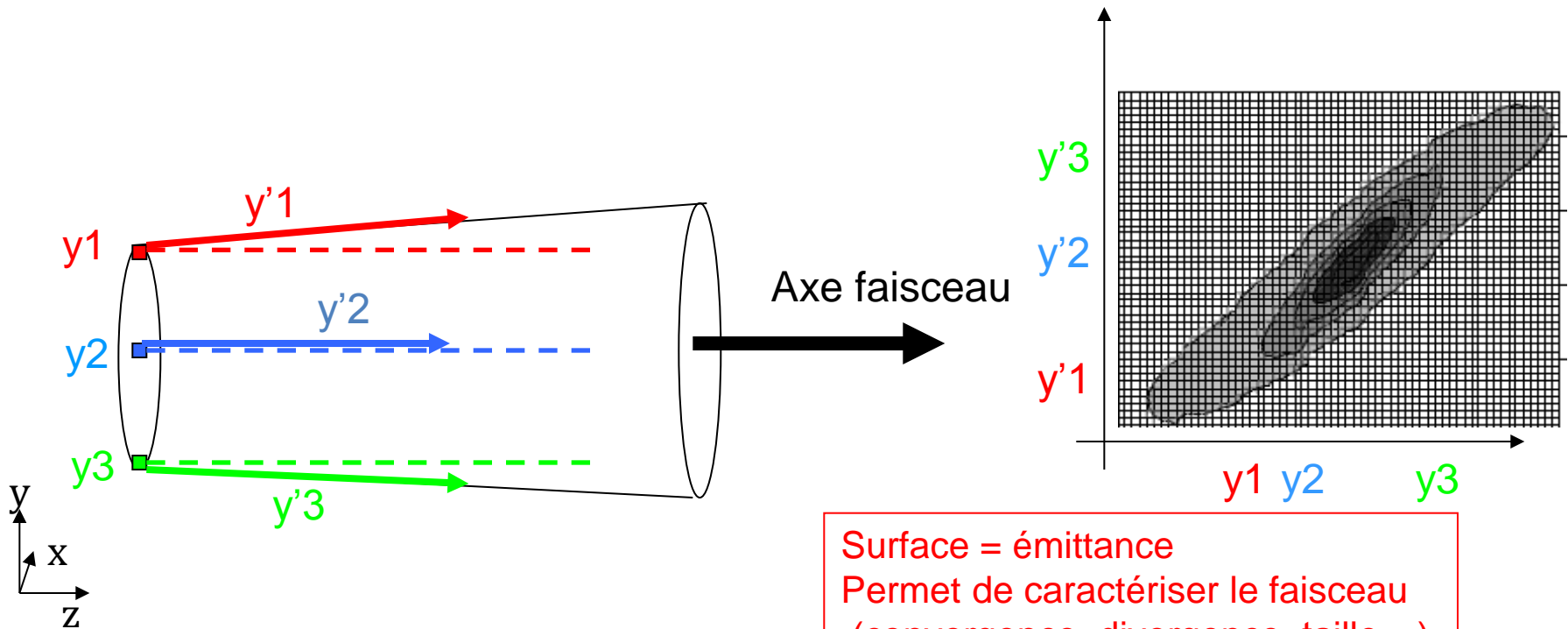
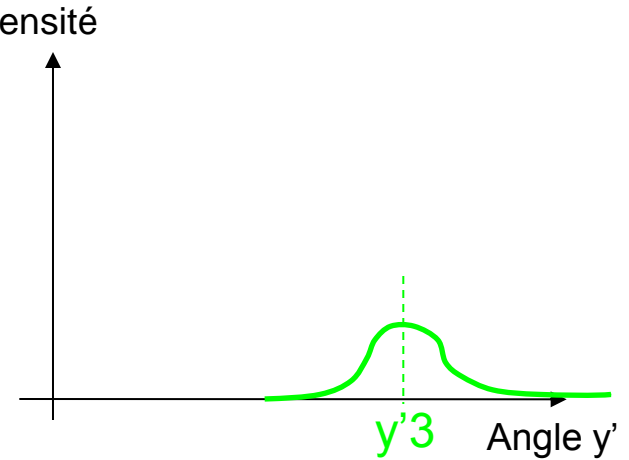
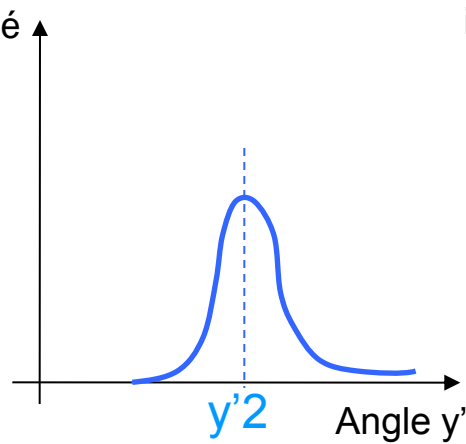
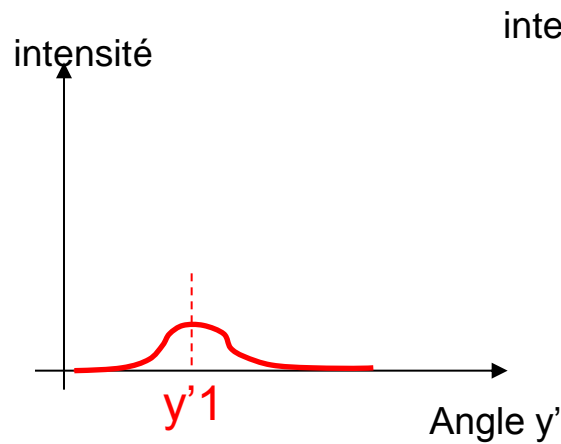
- Notion 2 : Charge d'espace

Qu'est-ce qu'une source ?



- *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.*

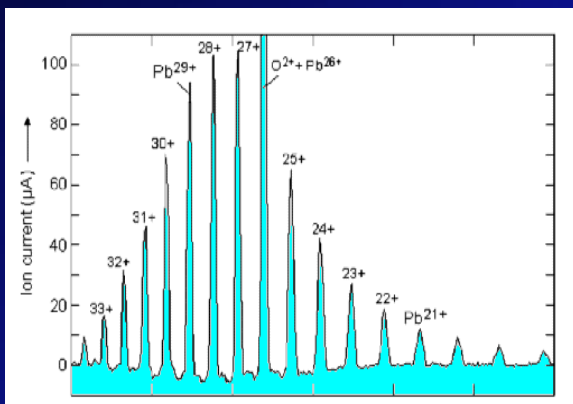
Qu'est-ce que l'émittance ?



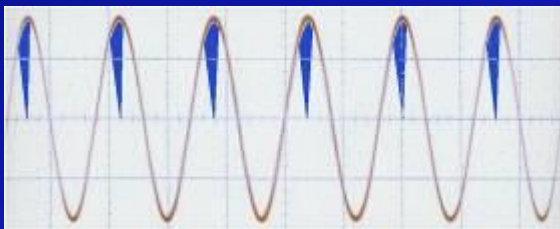
Surface = émittance
Permet de caractériser le faisceau
(convergence, divergence, taille...).

Le stress du sourcier !

Nature-Intensité-Energie

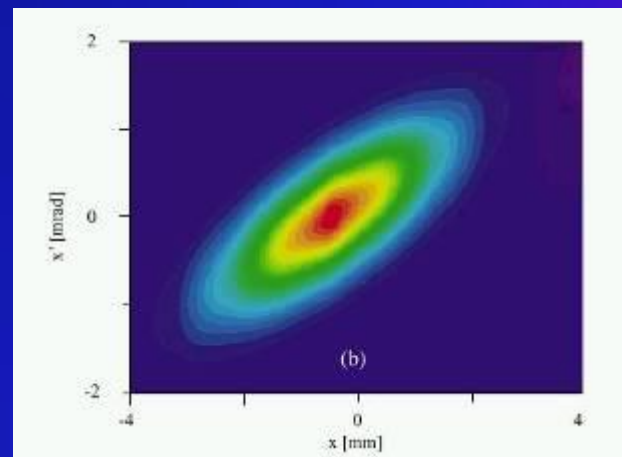


Cyclage



qq 10ps-1Ghz qq100μs-1Hz

Propriétés optiques



Durée de vie

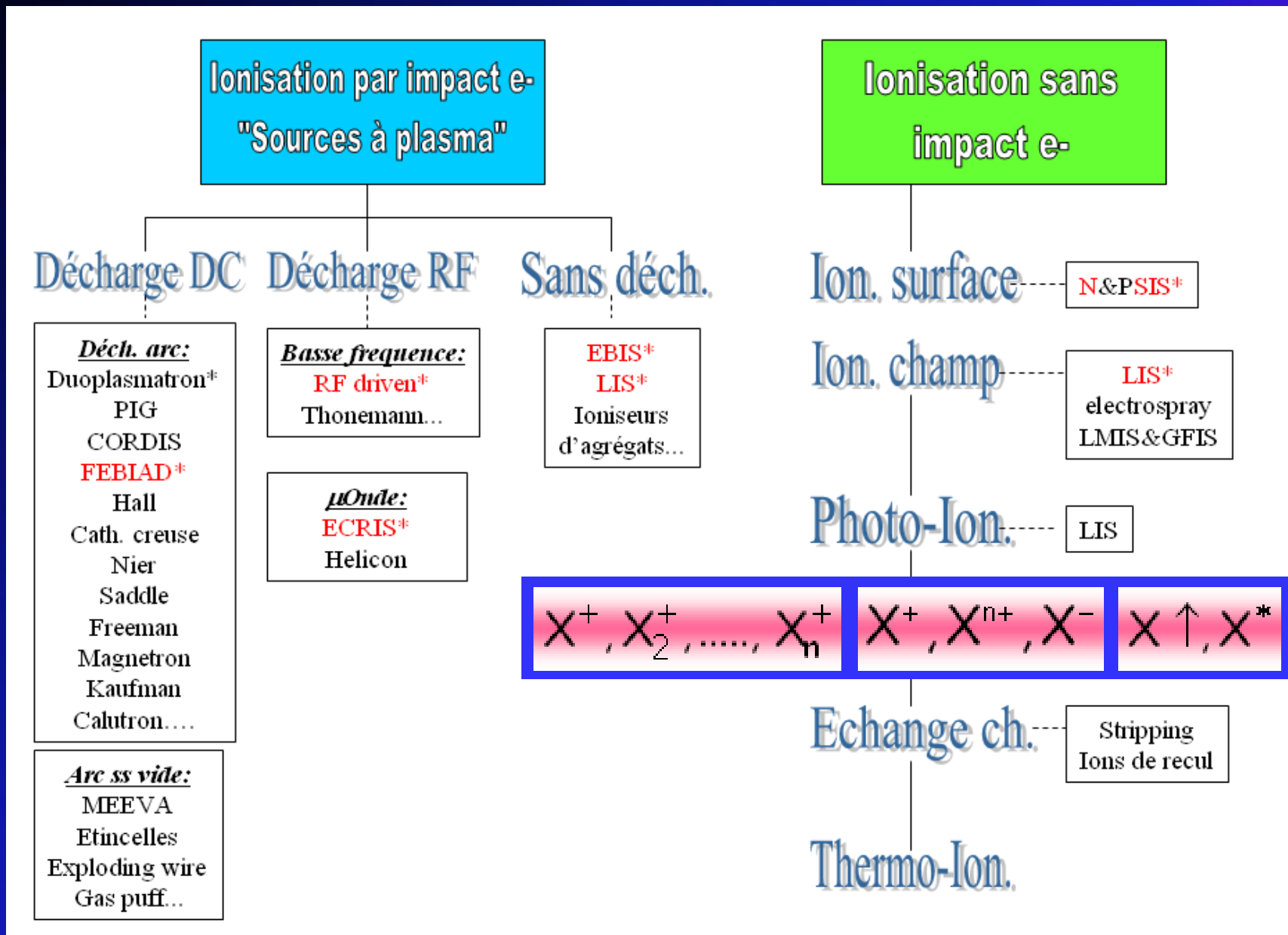
Fiabilité

Les Sources d'ions !

LES GRANDES ORIENTATIONS :

- Des intensités > 100 mA en ions + et -
- Développement des sources d'ions –
- Des sources en cascade
- Des charges toujours plus élevées

Les Sources d'ions : 2 familles



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

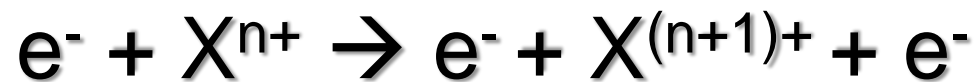
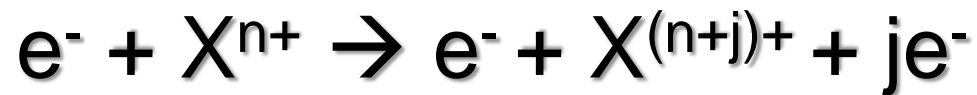
plus efficace des particules ionisantes

c

e

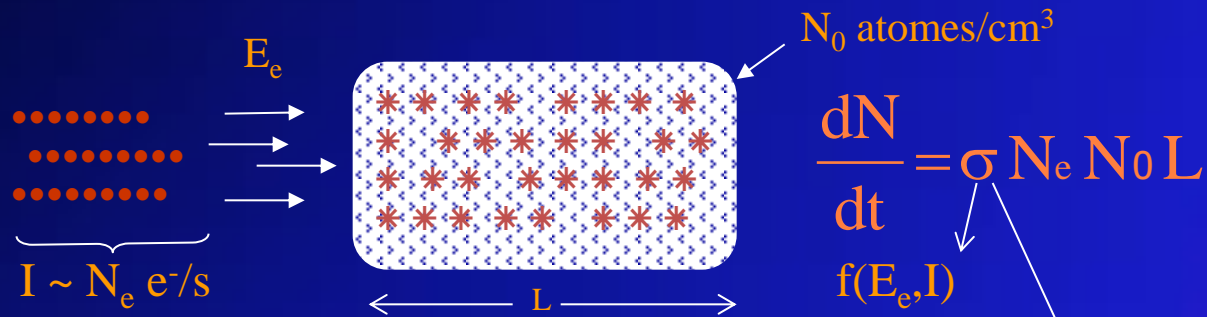
s

+

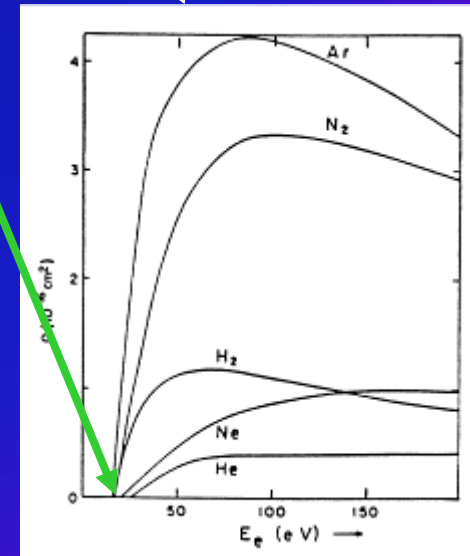


L'ionisation par impact électronique

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

Energie d'ionisation !

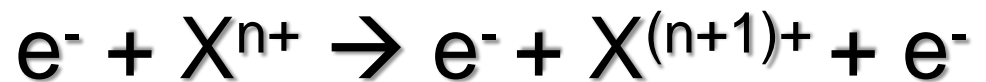
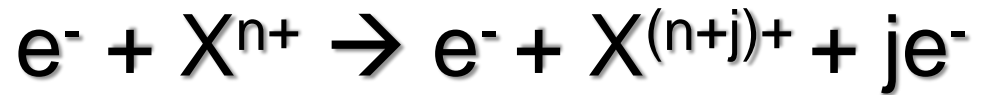
$$W_e < I$$



$$W_e > I$$



$$W_e \gg I_{n+}$$



S
O
U
R
C
E
S
+

L'ionisation par impact électronique

S
o
u
r
c
e
s
+

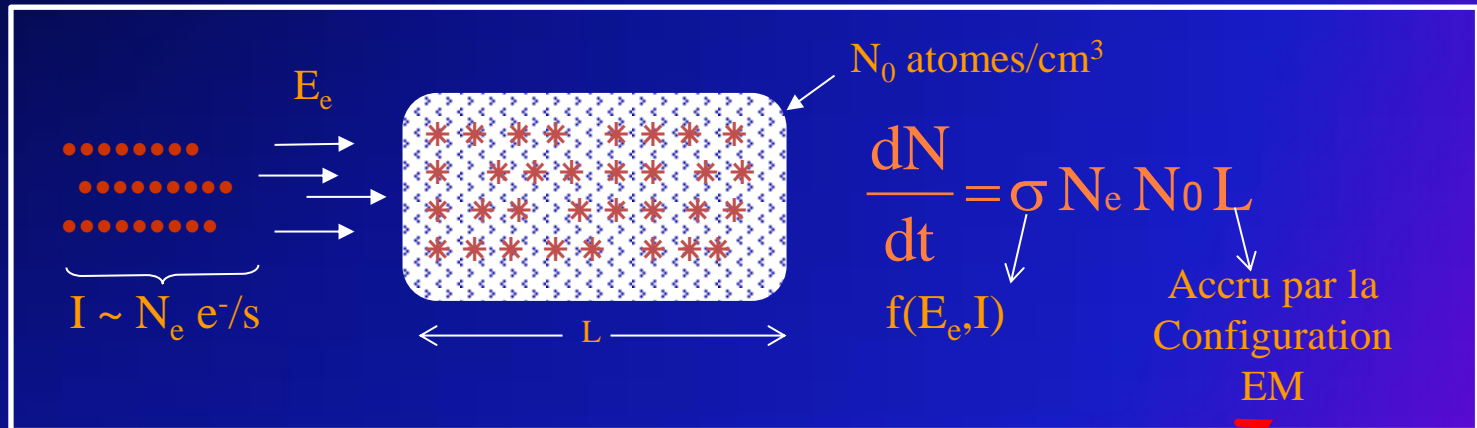
GROUPE							
I A							VIII A
1 H	E _i Energie d'ionisation (eV)						2 He
13.595	A Affinité électronique (eV)						24.58
0.7542	Rayon atomique (pm)						0.078
37	II A	III A	IV A	V A	VI A	VII A	140
3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
5.39	9.32	8.30	11.26	14.54	13.61	17.42	21.56
0.620	< 0	0.28	1.268	< 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

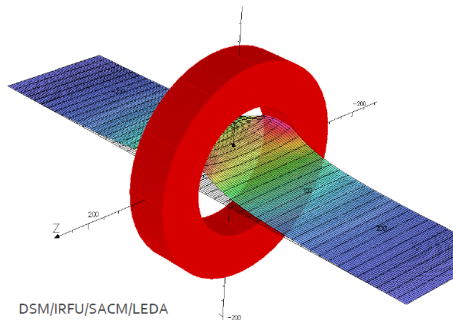
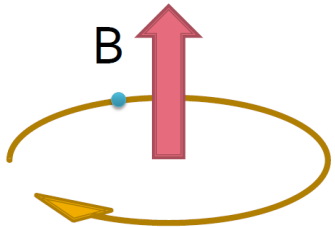
Qu'est-ce qu'un champ magnétique ?

Bobine : conducteur + courant

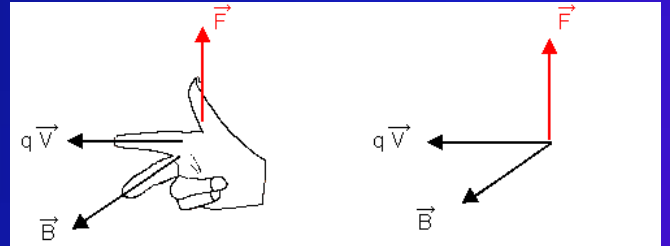
Loi de Biot et Savart

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

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



Dans un champ magnétique une particule de charge q , animée d'une vitesse v , est soumise à la force de Lorentz F .



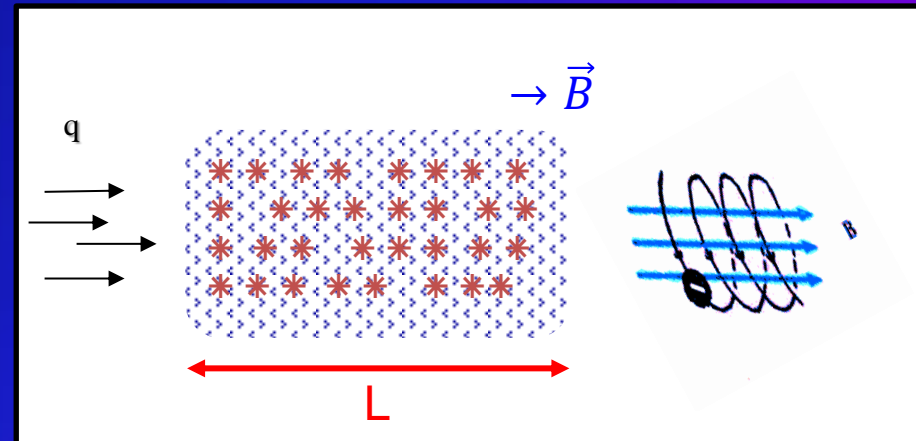
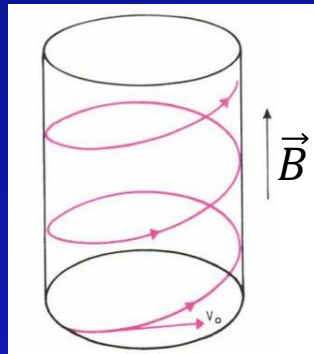
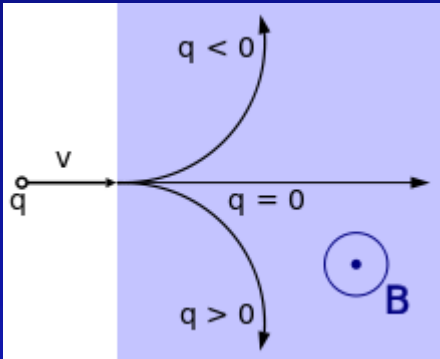
- Les vecteurs \vec{F} , $q\vec{v}$ et \vec{B} forment un trièdre direct que l'on matérialise par la règle de la main droite.

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Pouce, index, majeur de la main droite.

- Le vecteur \vec{F} est perpendiculaire au plan formé par $q\vec{v}$ et \vec{B} .

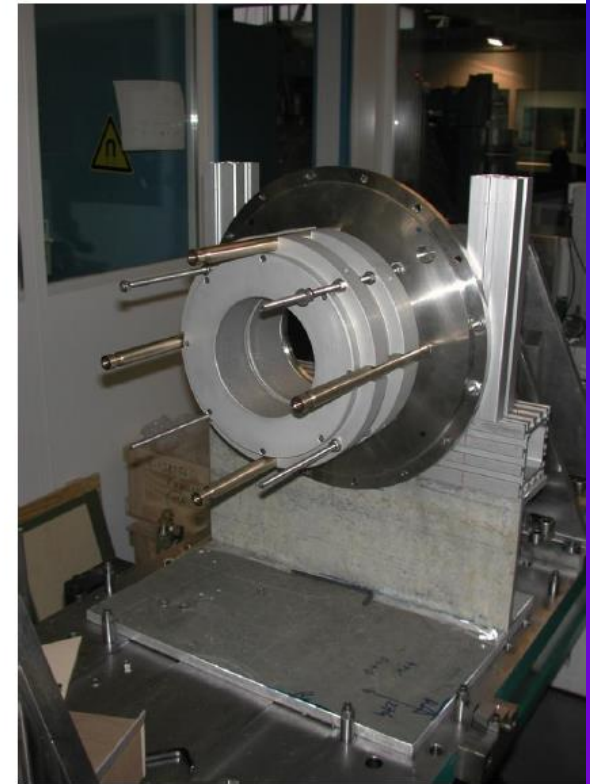
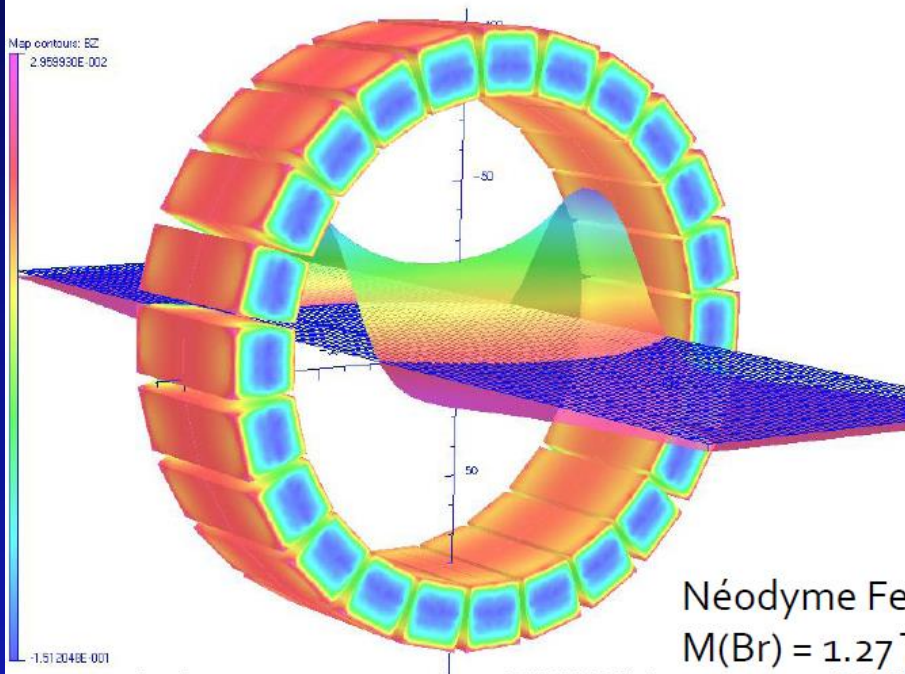
Augmentation de la trajectoire de collision par présence d'un champ magnétique



Qu'est-ce qu'un champ magnétique ?

Bobines + alimentations ou Aimants permanents


- Aimant élémentaire
- Assemblage en couronne



SPIRAL 2

Qu'est-ce qu'un champ magnétique ?

■ Champs magnétique

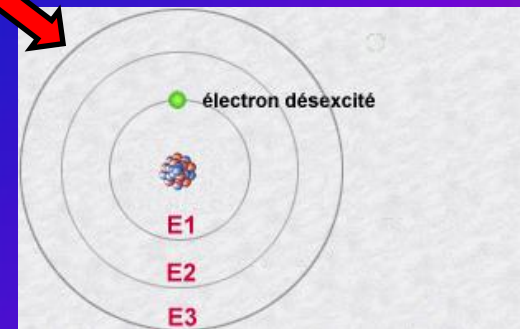
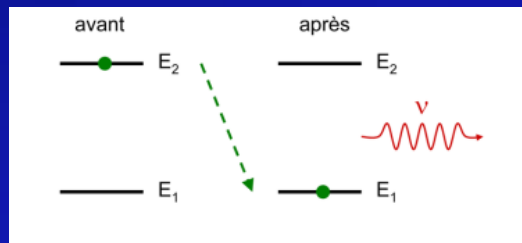
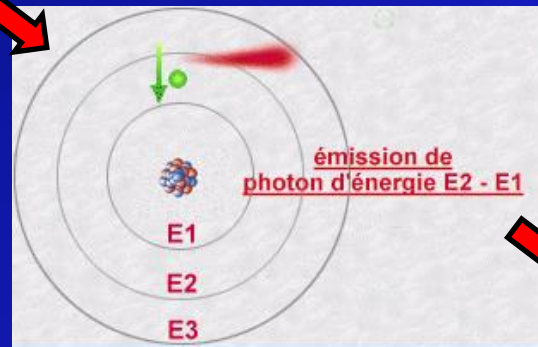
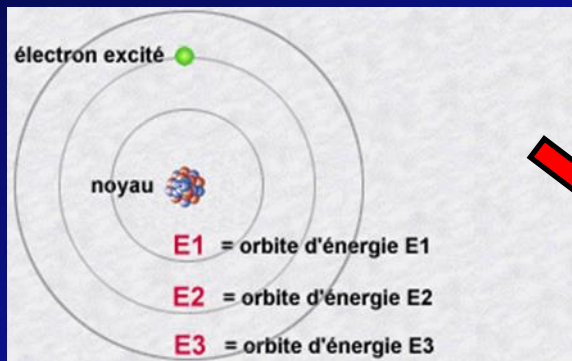
- Courant dans une boucle : Bobine + Alimentation
 - 😊 Intensité réglable → **R&D**
 - ☹️ Refroidissement, défaillances → **Typiquement R&D !!**
 - Couronne d'Aimants permanents
 - 😊 Ne s'arrête jamais, ne nécessite aucune source d'énergie → **Industriel**
 - ☹️ Intensité NON réglable → **Typiquement industriel !!**
- 

Comment perdre des ions n^+ ?

S
o
u
r
c
e
s

n
+

Processus destructifs : capture d'un e^- 1) Par recombinaison diélectronique

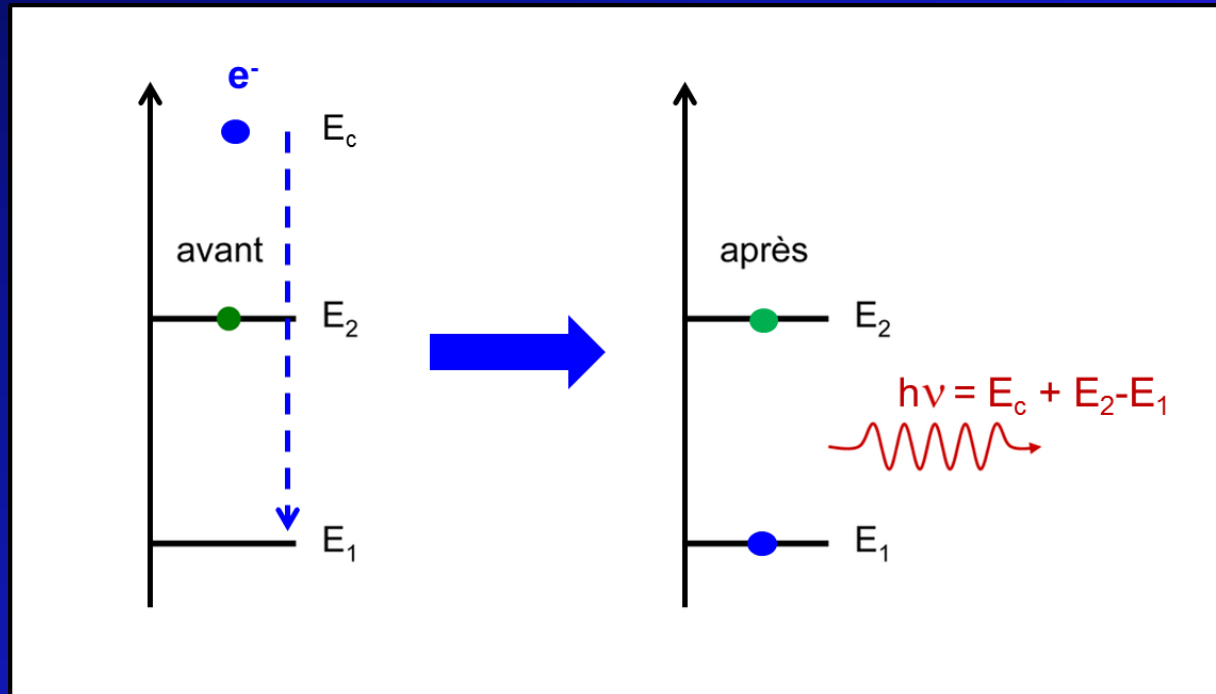


Comment perdre des ions n^+ ?

S
o
u
r
c
e
s
n
+

Processus destructifs : capture d'un e^-

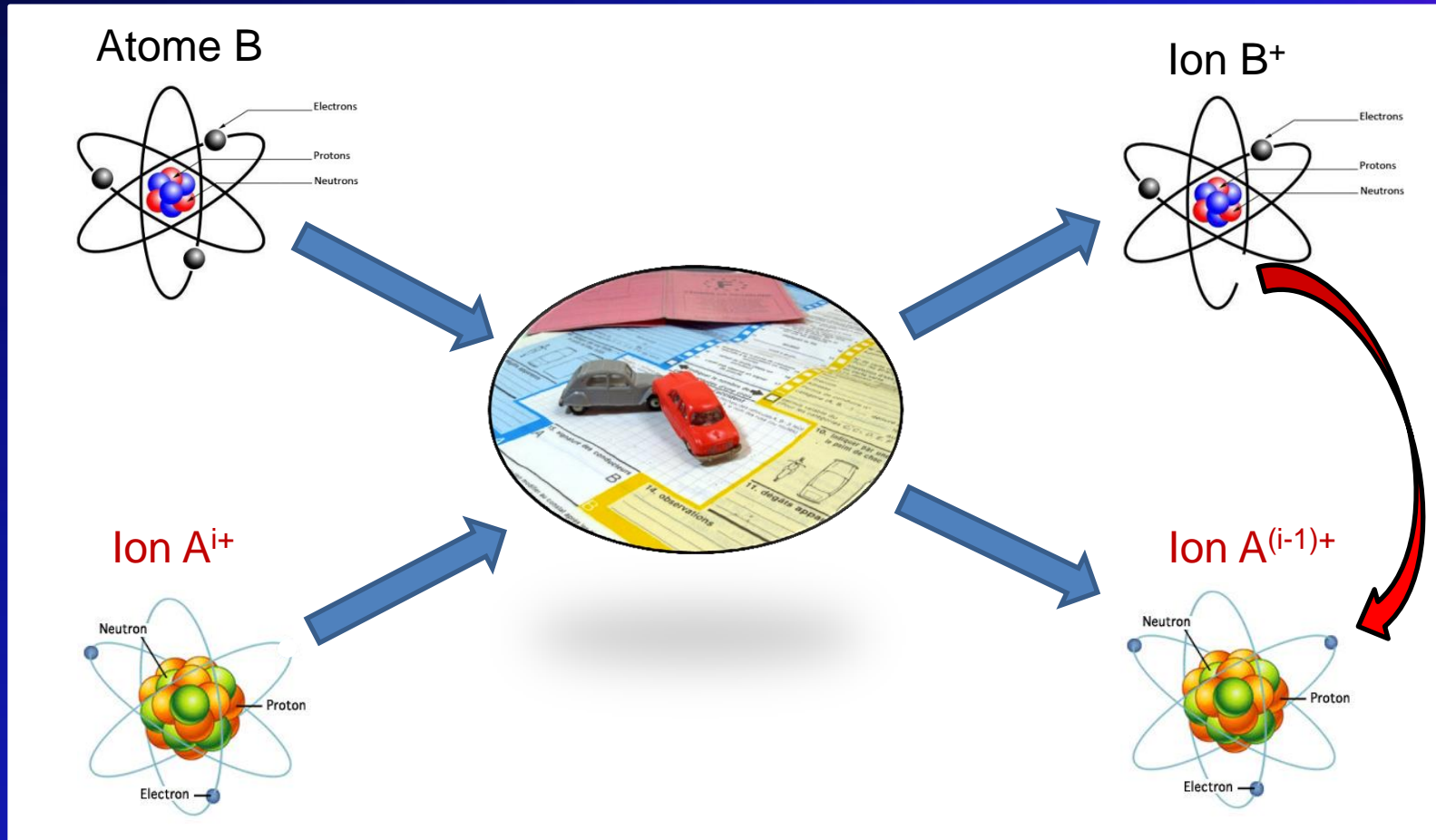
2) Par recombinaison radiative



Comment perdre des ions n+ ?

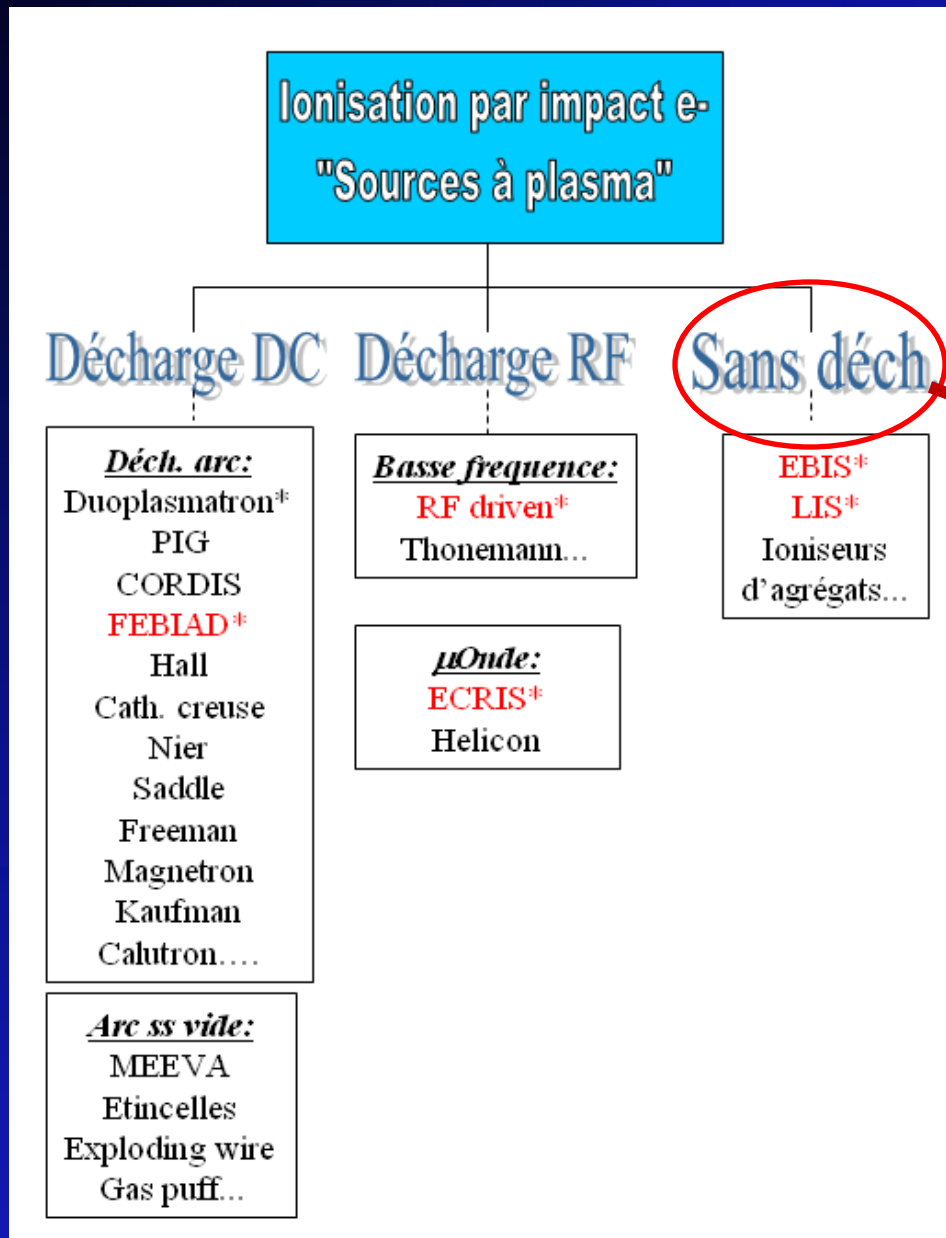
Processus destructifs : capture d'un e⁻

3) Par échange de charges



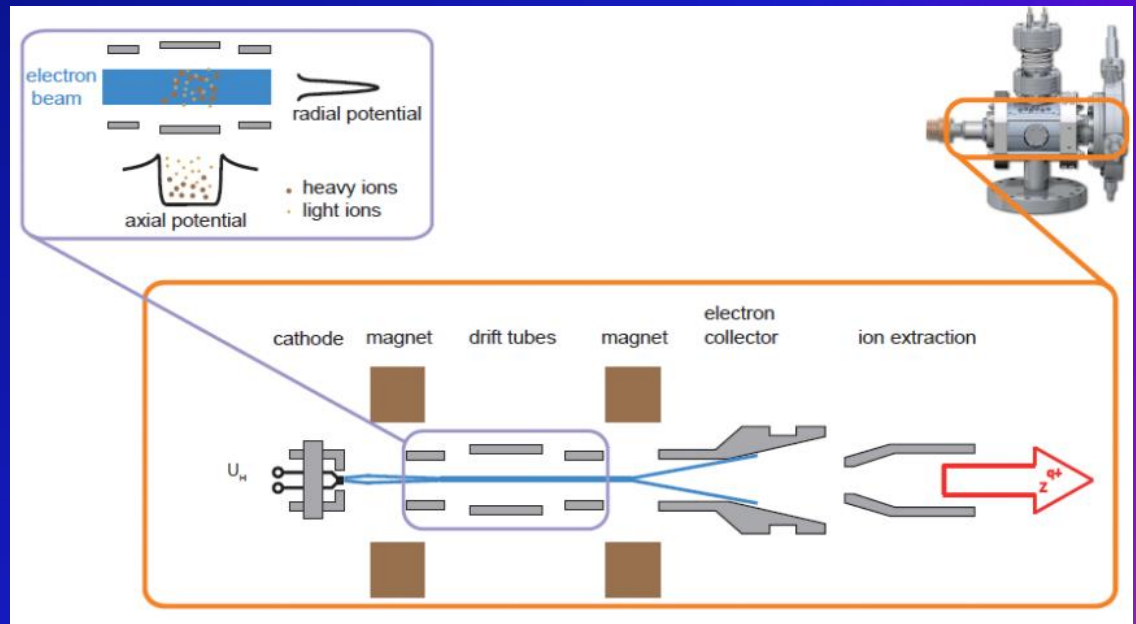
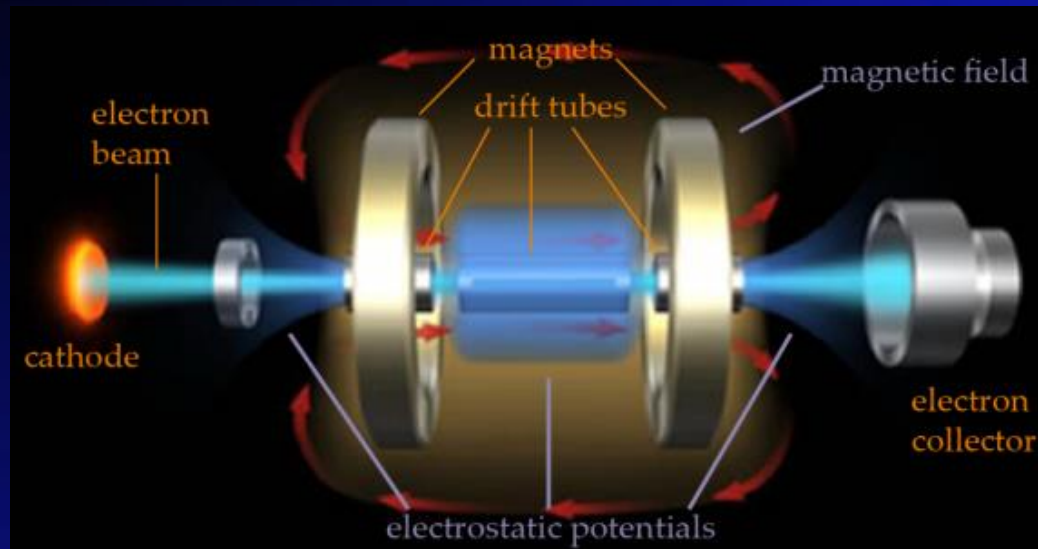
S
O
U
R
C
E
S
+
n

Les Sources d'ions !

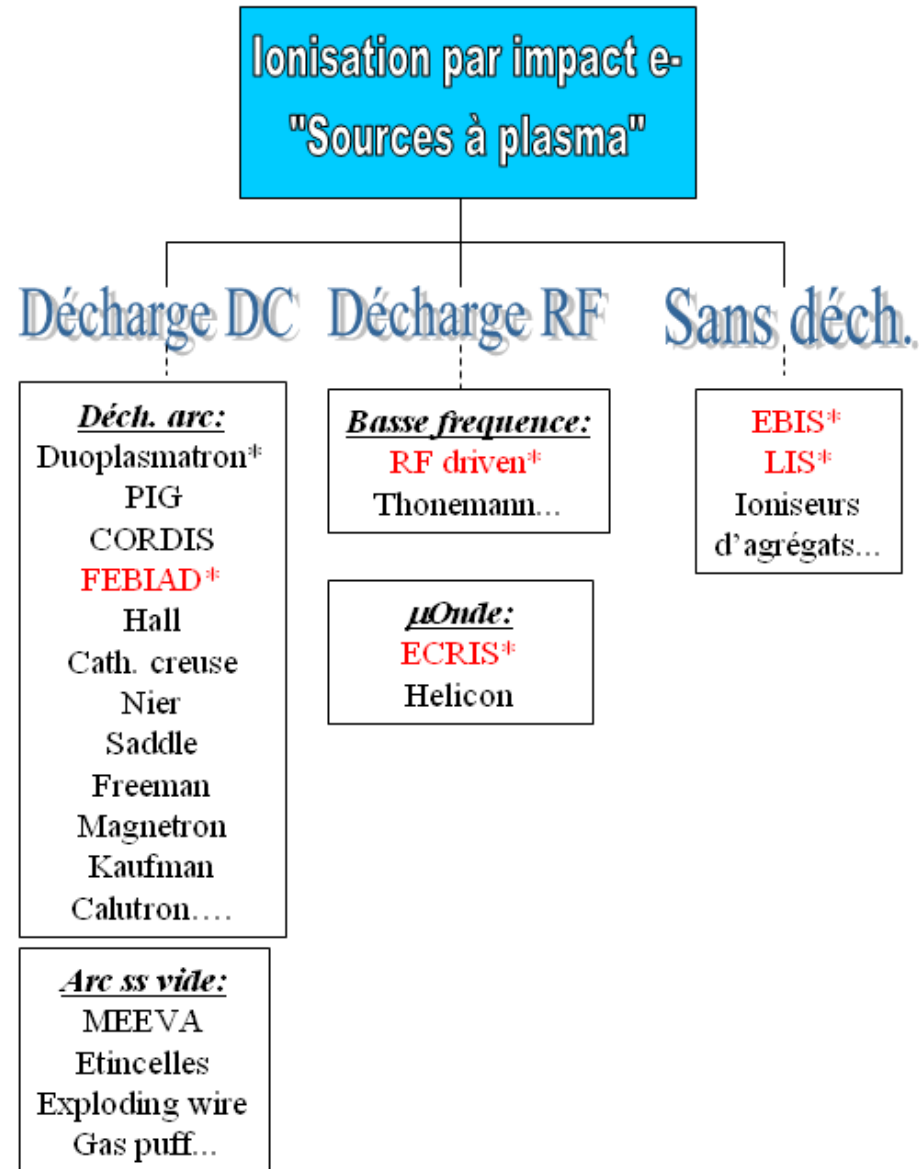


Il faut un faisceau
d'électrons primaire
produit par une
source d'électrons

Les Sources d'ions !

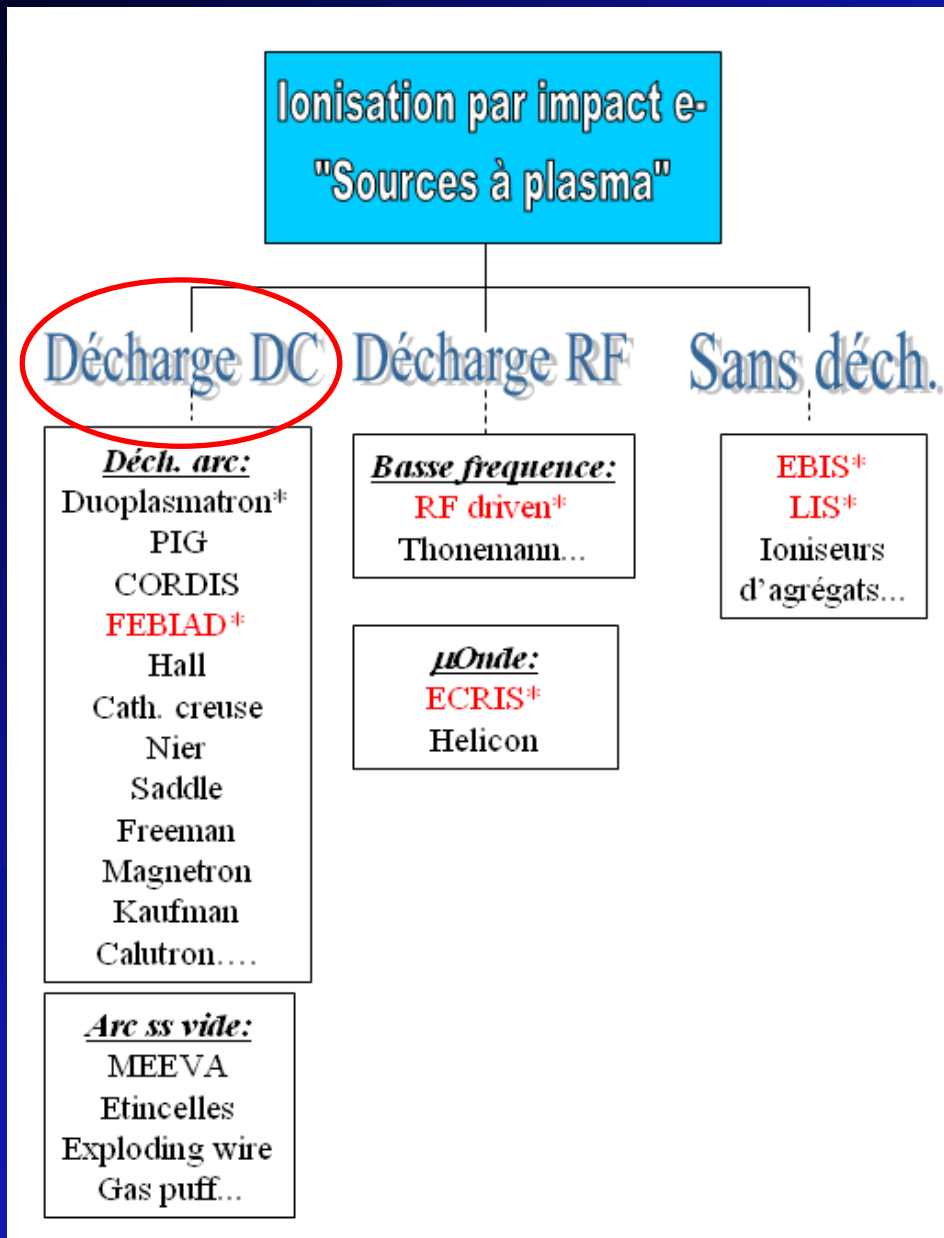


Les Sources d'ions !



**Avec impact
électronique**

Les Sources d'ions !

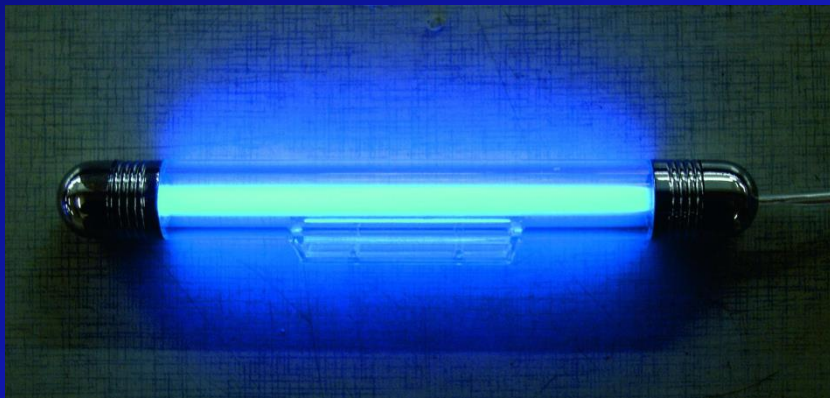
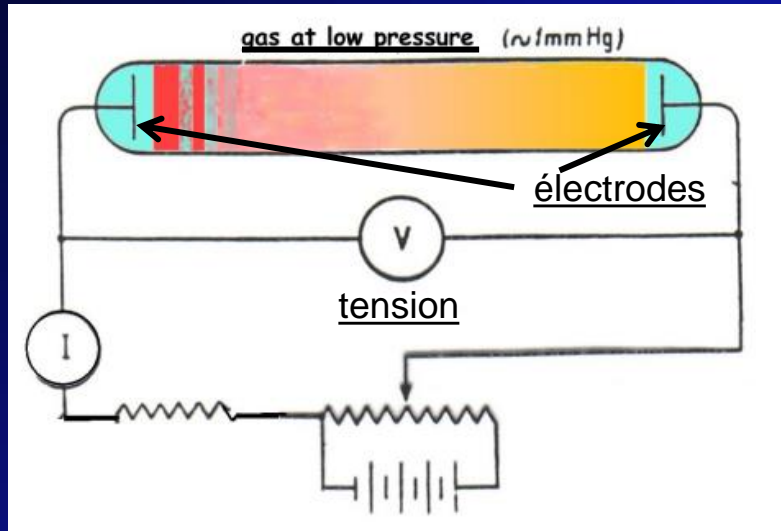


Si on établit une **tension** suffisante entre **deux électrodes** placées dans un **gaz**, il se produit une décharge électrique

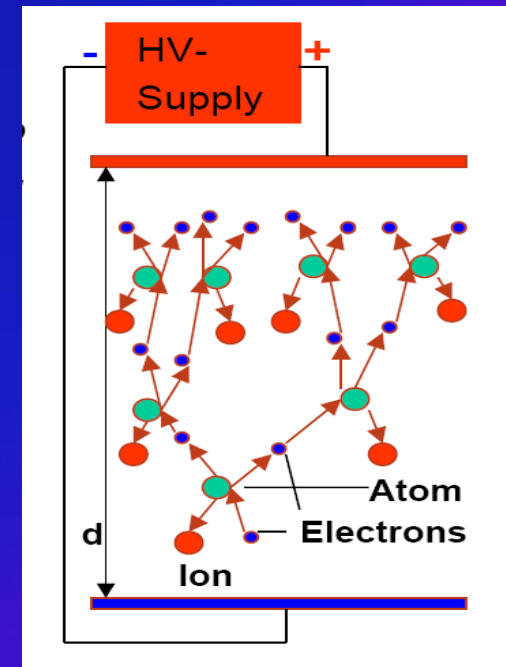
→ passage d'un courant électrique

La décharge électrique (DC)

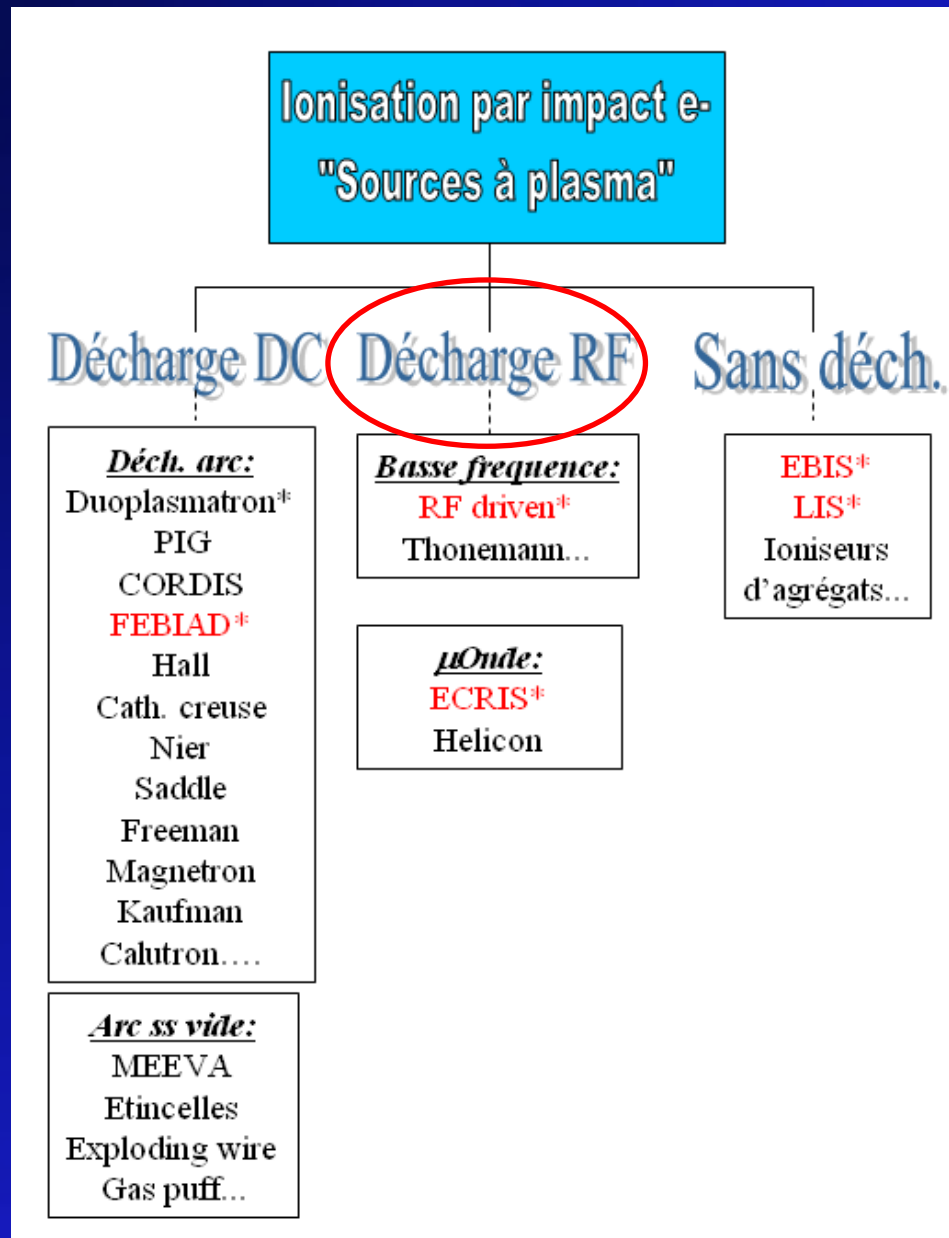
Sources



Un **courant électrique** est un déplacement d'ensemble d'**électrons**. Ce déplacement est imposé par l'action d'un **champ électrique** exerçant une force



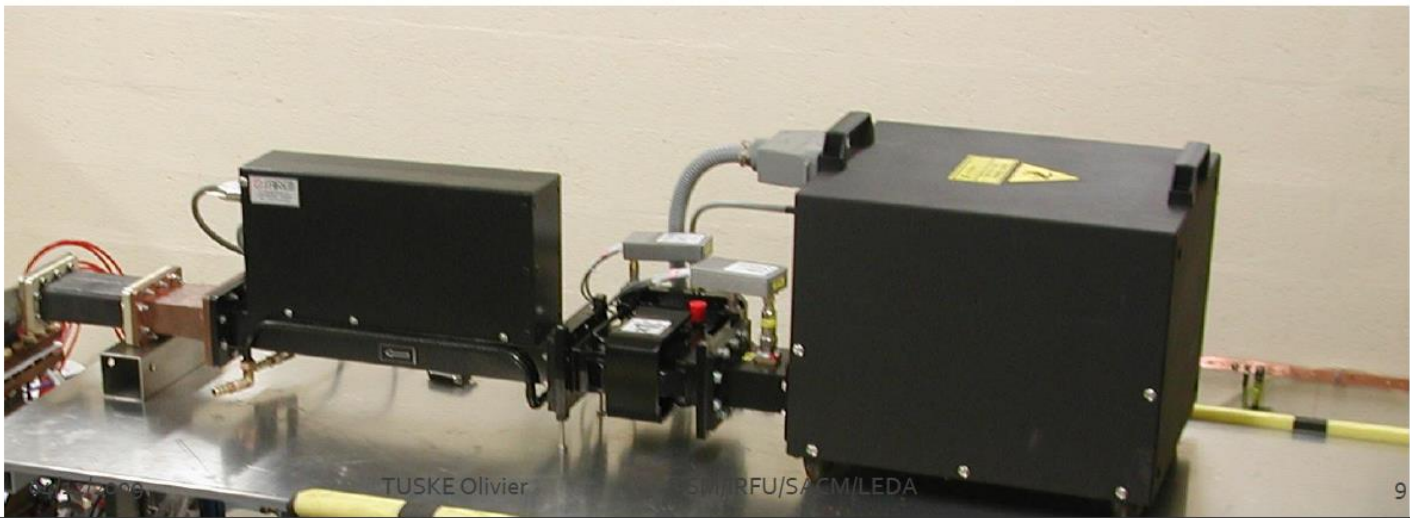
Les Sources d'ions !



L'onde RF

Onde HF

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

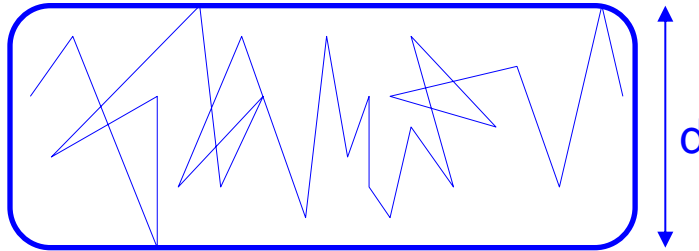


La décharge RF : plasma

S
o
u
r
c
e
s

ν Fréquence de collision

δ_e Libre parcours moyen



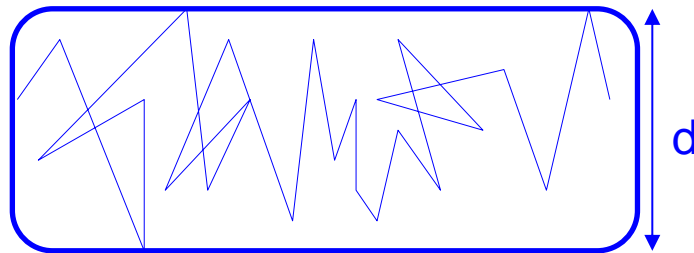
$$\omega_{RF} < \nu$$

$\delta_e \geq d$: pas de collision

$\delta_e < d$: 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
}

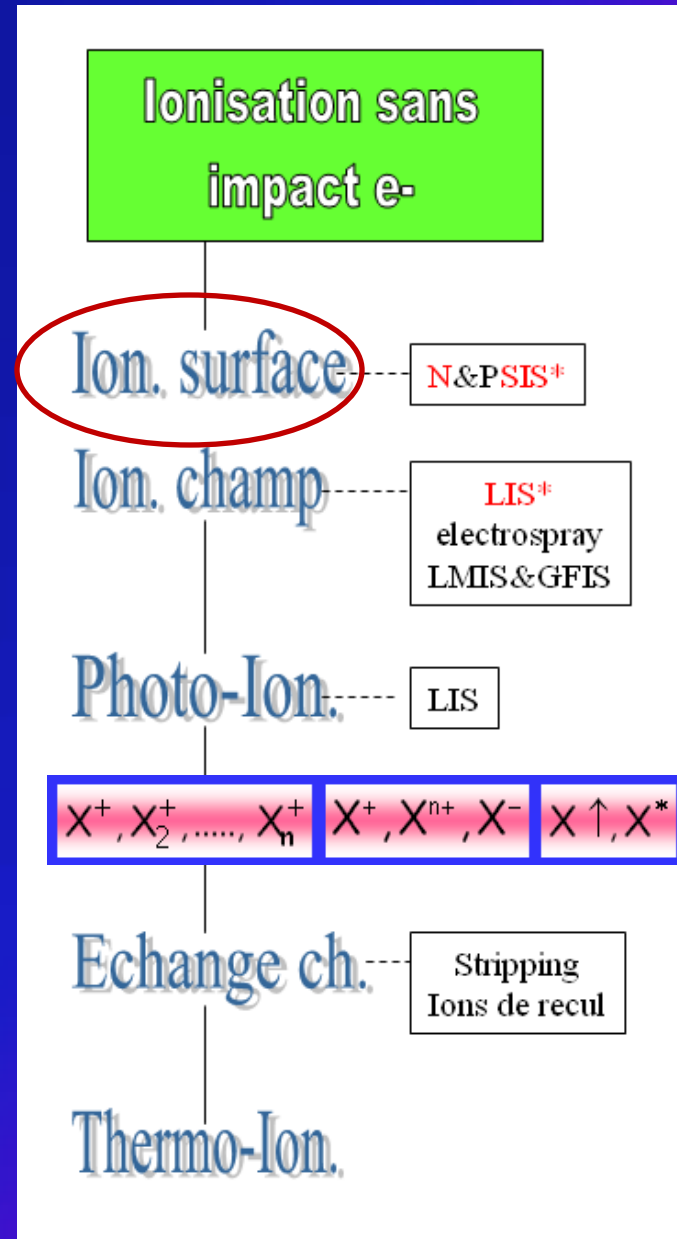
Un système d'extraction

{
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

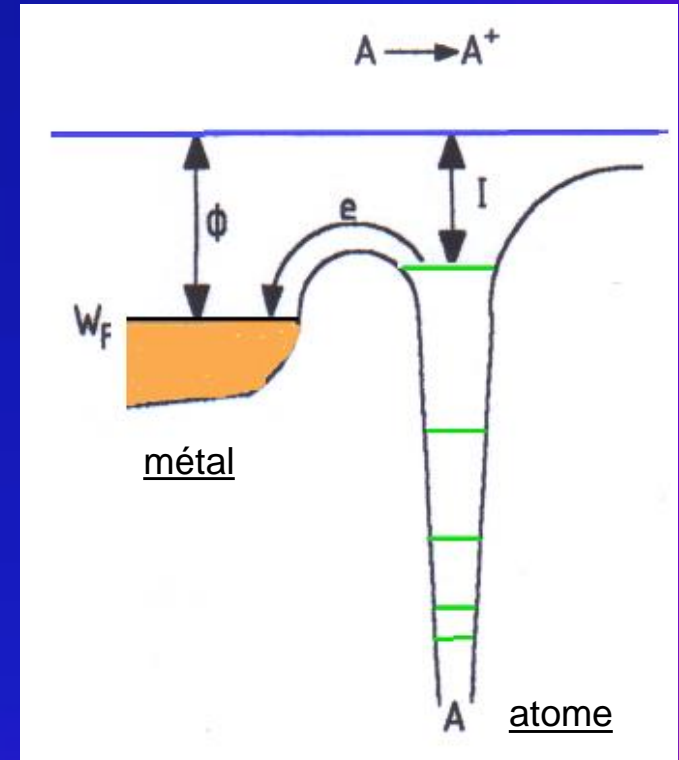
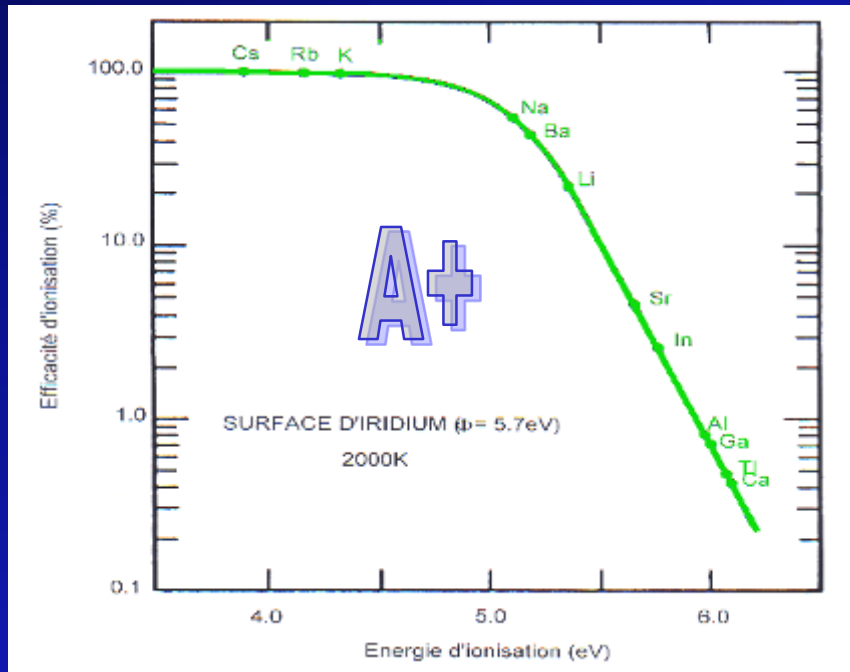
S
O
U
R
C
E
S
+

$\phi > I$: 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.

Energie min. pour arracher un électron

Φ : travail de sortie d'un métal

I : potentiel d'ionisation d'un atome

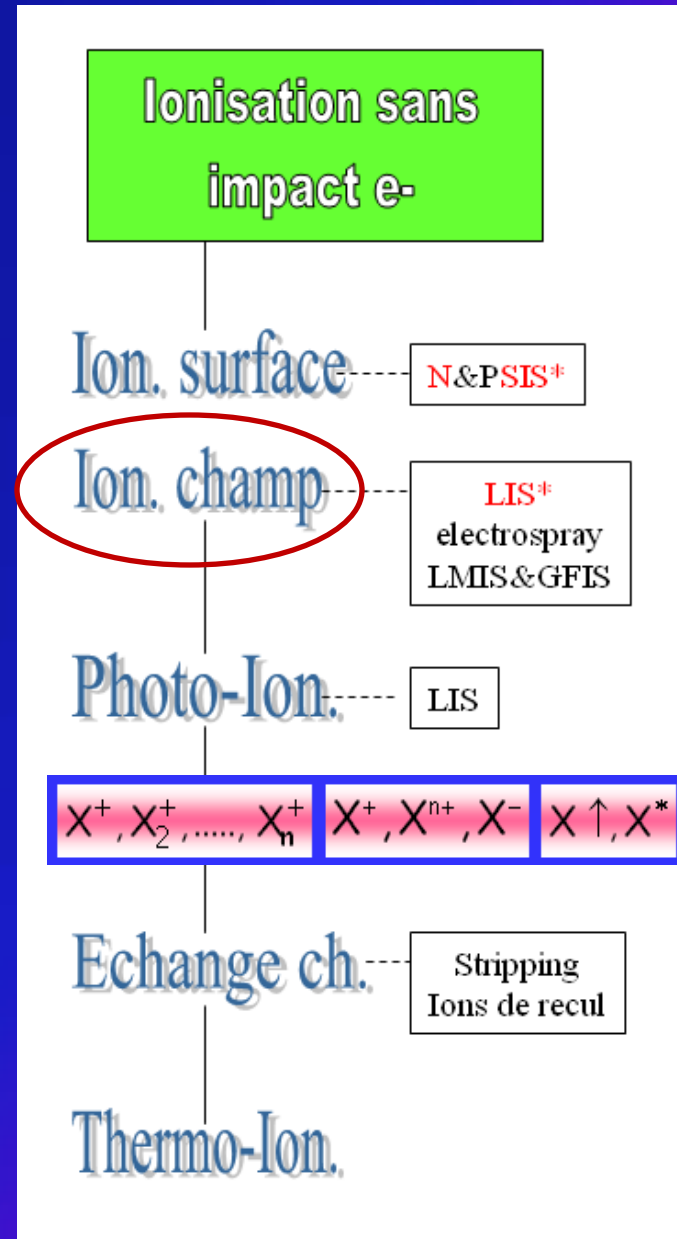


Grande efficacité - Très sélectif

Les Sources d'ions !

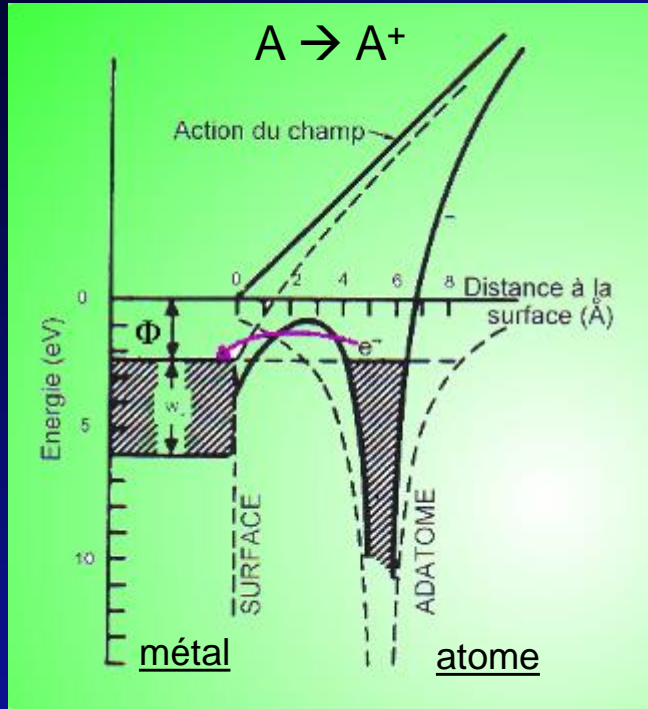
Sources +

Sans impact électronique



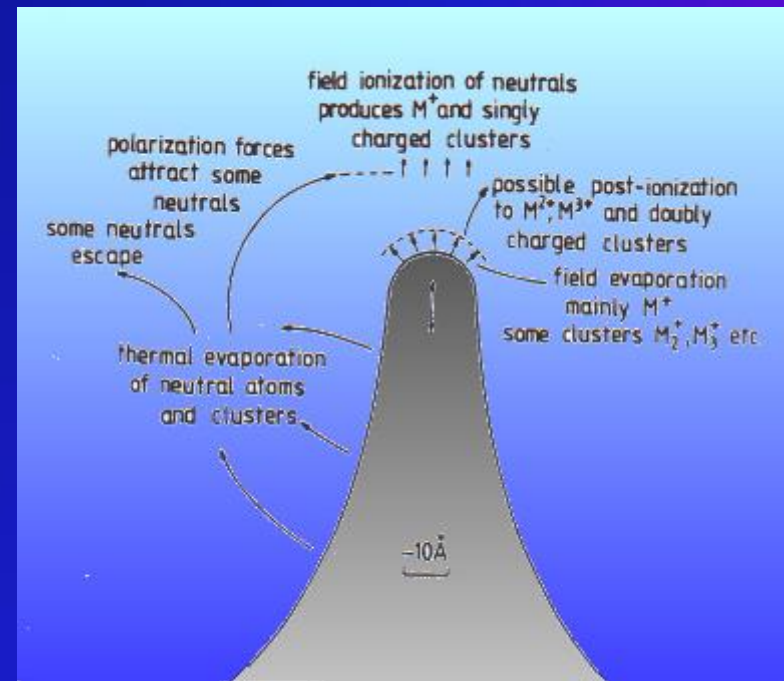
L'ionisation de champ

S
o
u
r
c
e
s
+



L'Application d'un champ électrique intense perturbe la matière : modifie la forme de la barrière de potentiel de la surface métallique

→ électrons peuvent sortir de l'atome vers le métal (effet tunnel)



Au voisinage pointe : $E > 10^8$ V/cm

Brillance très élevée

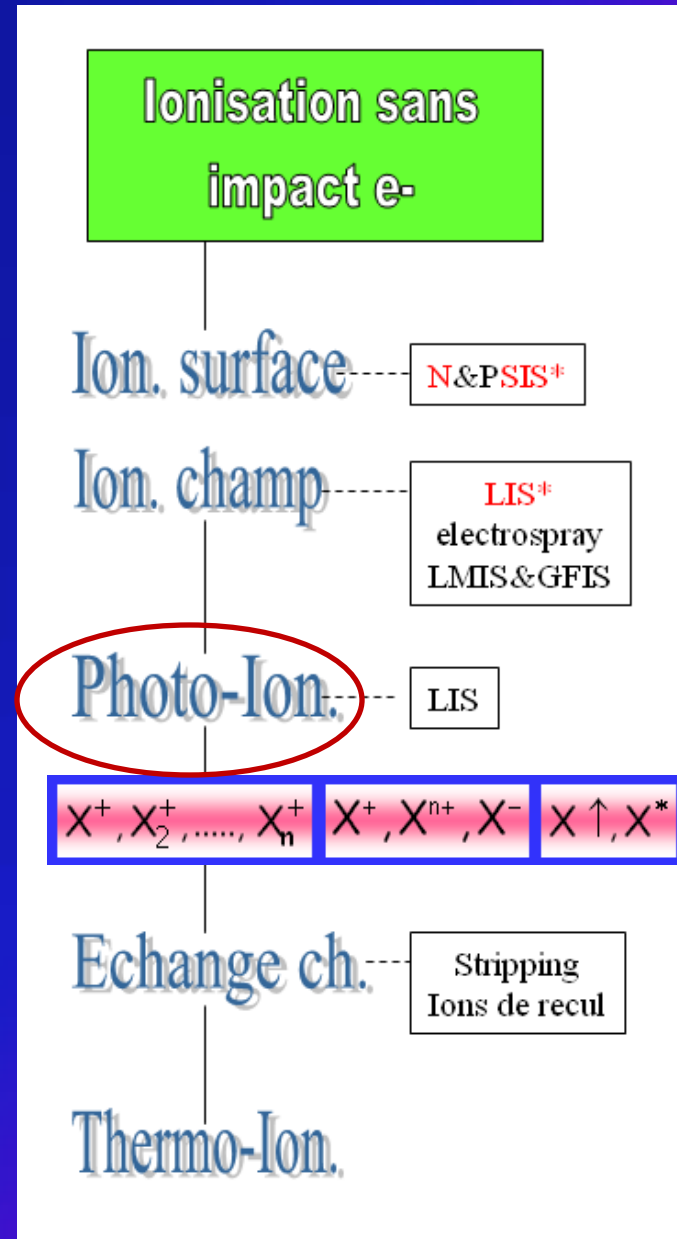
Nano-usinage

Vers des pointes nanométriques!

Les Sources d'ions !

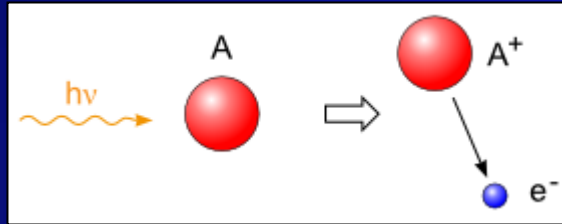
Sources +

Sans impact
électronique



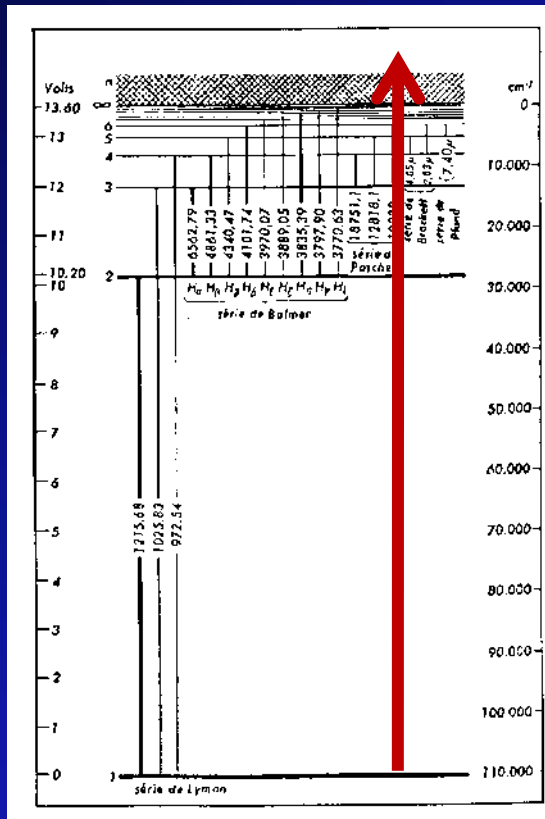
Photoionisation

Sources +

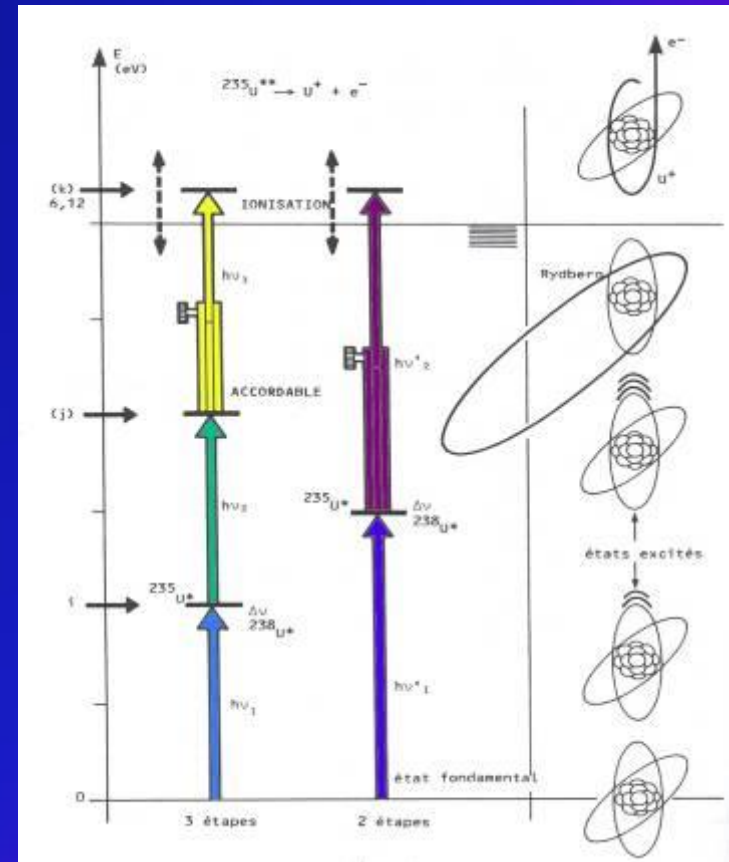


DIRECTE

RESONANTE



Processus peu efficace

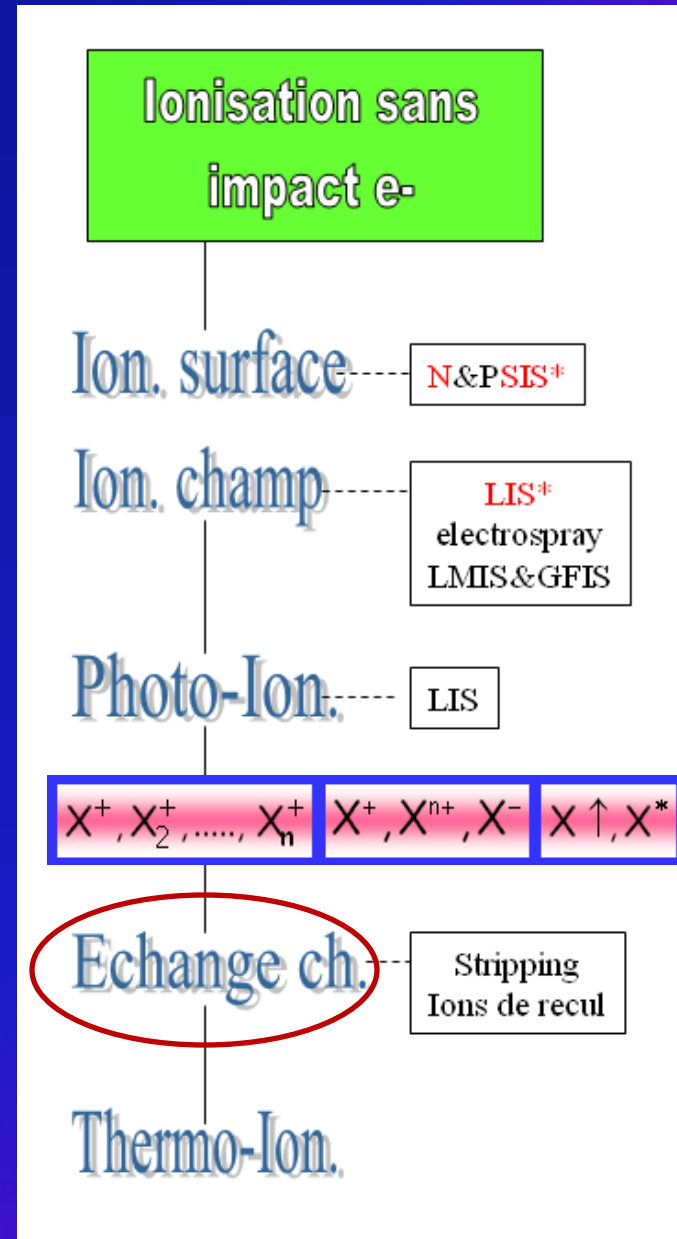


Très sélectif

Les Sources d'ions !

S
o
u
r
c
e
s
+

Sans impact
électronique

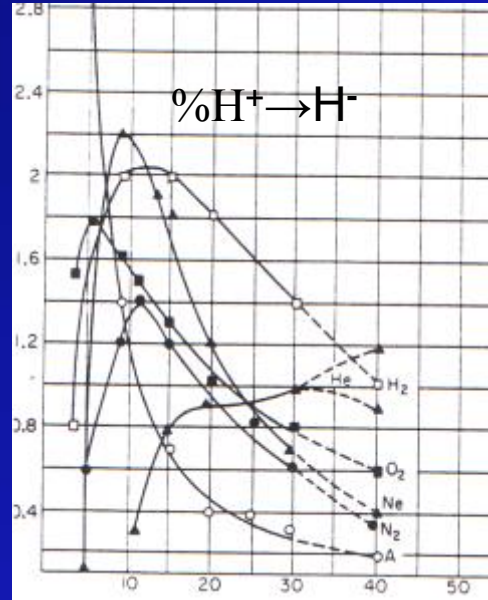
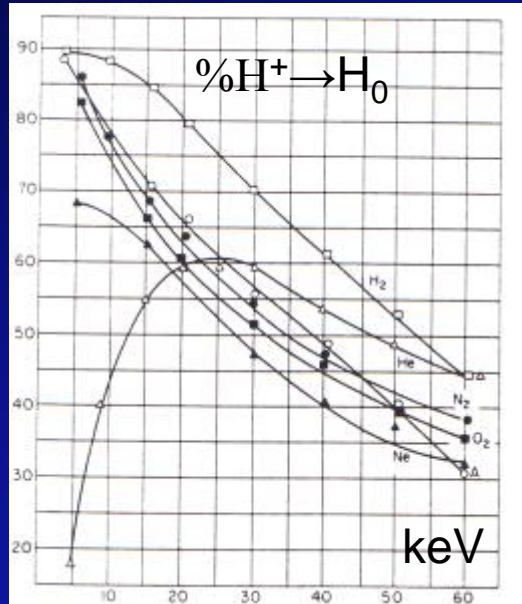


Echange de charge

Passage d'un faisceau dans la matière

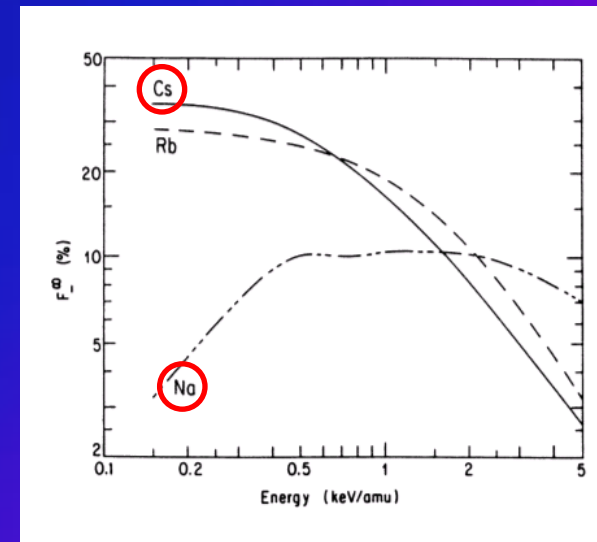
Plusieurs processus peuvent intervenir en fonction de la vitesse de l'ion et de la matière traversée et de sa densité (peut être piégé).

A faible vitesse: neutralisation de l'ion positif (capture d'1 e^-)
ou conversion en ion négatif (capture de 2 e^-)



Remarque:

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

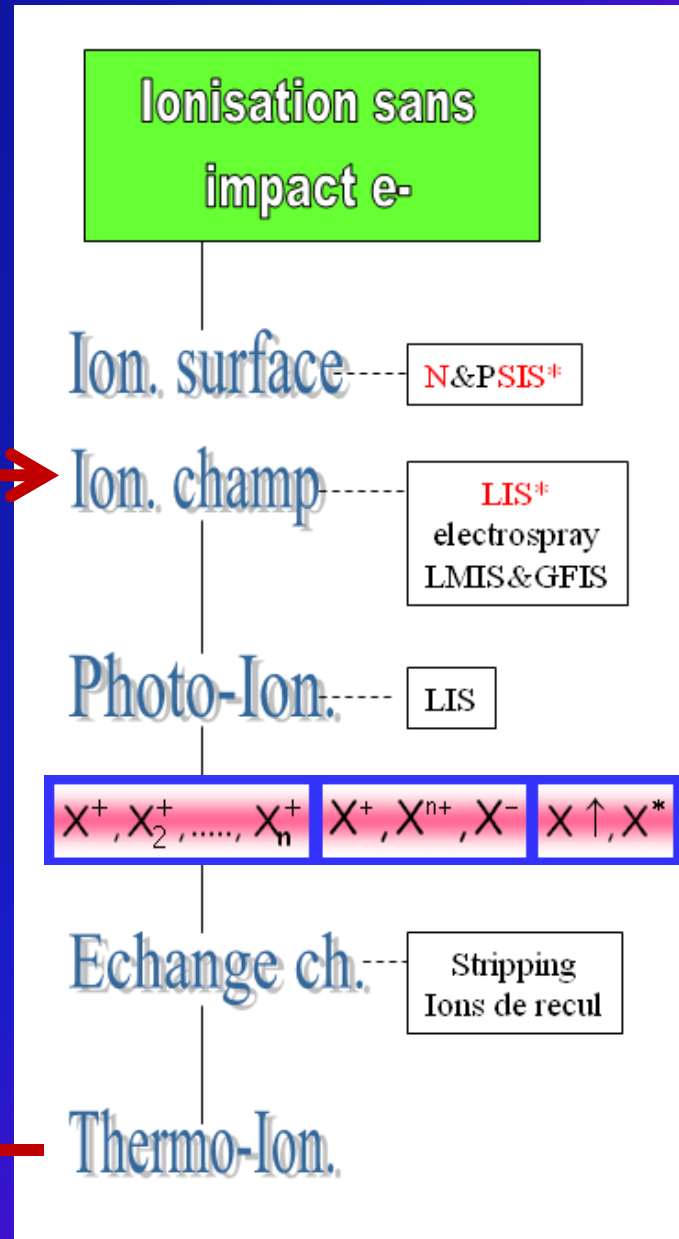


A plus forte énergie: pour tout ion, la traversée de la matière "épluche" plus ou moins l'ion de son cortège (stripping = perte de plusieurs e^-) pour le transformer en ion⁺ multichargé.

Les Sources d'ions !

Sources +

Sans impact électronique

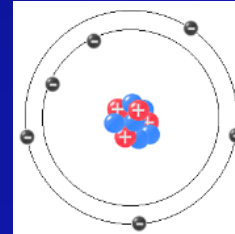


Comment obtenir des ions - ?

S
o
u
r
c
e
s

DEUX VOIES MAJEURES

- La capture électronique
- L'ionisation de surface



Les atomes à couche externe incomplète peuvent capter un électron surnuméraire.

Son énergie de liaison est: l'«**affinité électronique A**»

L'**affinité électronique** est la quantité d'énergie dégagée suite à la capture d'un électron par un atome en phase gazeuse.

Plus l'affinité électronique est grande plus la capture d'un électron par l'atome dégage de l'énergie et plus cette capture est stable.

Une affinité électronique négative signifie au contraire qu'il faut fournir de l'énergie à l'atome pour lui attacher un électron.



Affinité électronique

S
o
u
r
c
e
s

GROUPE							
I A							VIII A
1 H	E _i Energie d'ionisation (eV)						2 He
13.595	A Affinité électronique (eV)						24.58
0.7542	Rayon atomique (pm)						0.078
37	II A	III A	IV A	V A	VI A	VII A	140
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							
4.18							
0.4860							
250							
55 Cs							
3.89							
0.4715							
272							

Les halogènes (F, Cl, Br, I) : manque un seul électron pour avoir la structure électronique du gaz rare le plus proche → grande tendance à capter un électron et former un anion (F⁻, Cl⁻, Br⁻, I⁻) → grande affinité électronique; **structure ionique très stable.**

Les métaux alcalins (Li, Na, K, Rb) : perte d'un électron pour avoir la structure électronique du gaz rare le plus proche → affinités électroniques très faibles.

Les gaz rares ont une affinité électronique négative, → orbitales respectives entièrement remplies → **grande stabilité.**

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^{ème} particule.

Les 2 processus les plus probables sont:

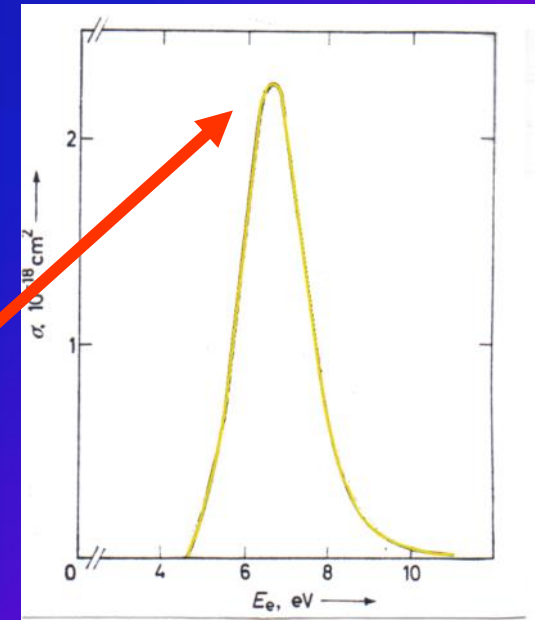
-La collision à 3 corps



-L'attachement dissociatif



Les électrons lents favorisent la production



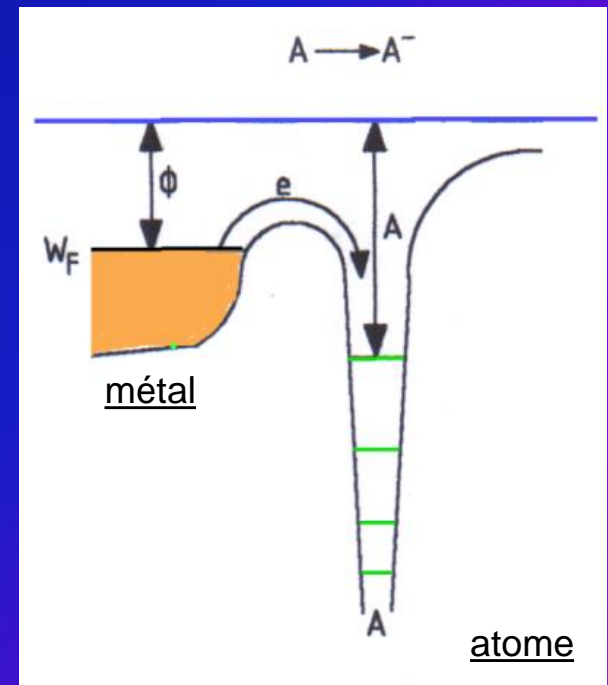
L'ionisation de surface

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 \rightarrow il y a formation d'un ion négatif.

Φ : travail de sortie d'un métal
A : affinité électronique

*Le rendement peut être très élevé
selon la « recette » utilisée*



L'ionisation de surface

S
o
u
r
c
e
s

Les métaux alcalins ont un électron périphérique faiblement lié.

→ Faible affinité électronique

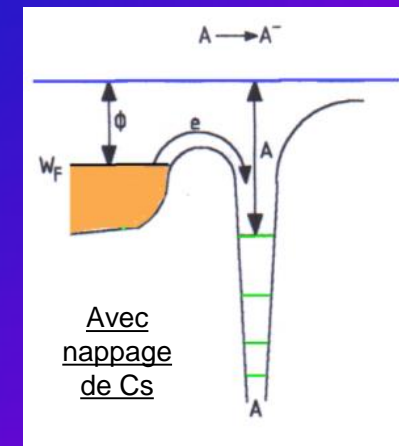
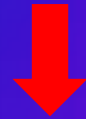
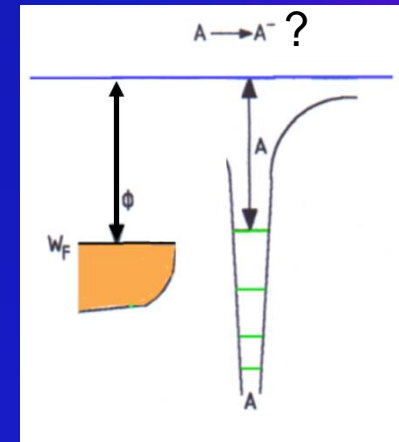
GROUPE 1 A	
1 H	13.595
	0.7542
37	
3 Li	5.39
	0.620
157	
11 Na	5.14
	0.548
191	
19 K	4.34
	0.5012
235	
37 Rb	4.18
	0.4860
250	
55 Cs	3.89
	0.4715
272	

Φ : travail de sortie d'un métal
A : affinité électronique

Astuce du chef !



Le travail de sortie d'une surface métallique peut être diminuée par l'ajout d'une couche superficielle : un nappage de césium



Comment perdre des ions - ?

S
O
U
R
C
E
S

Trop facilement !

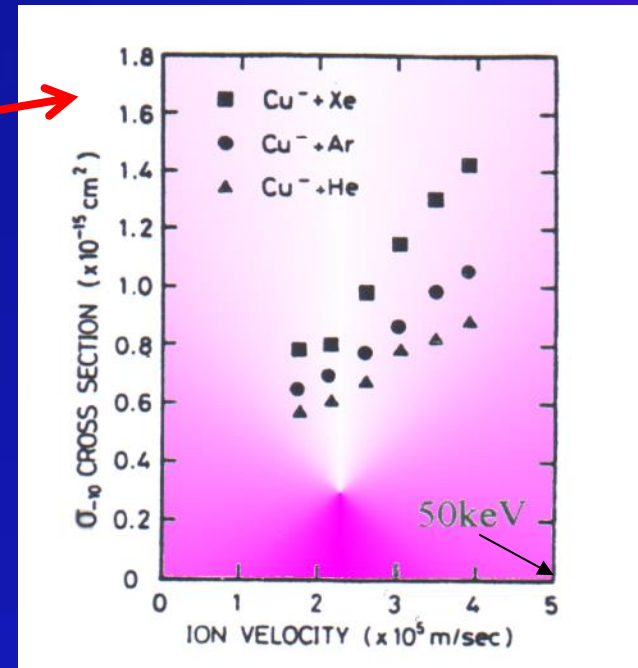
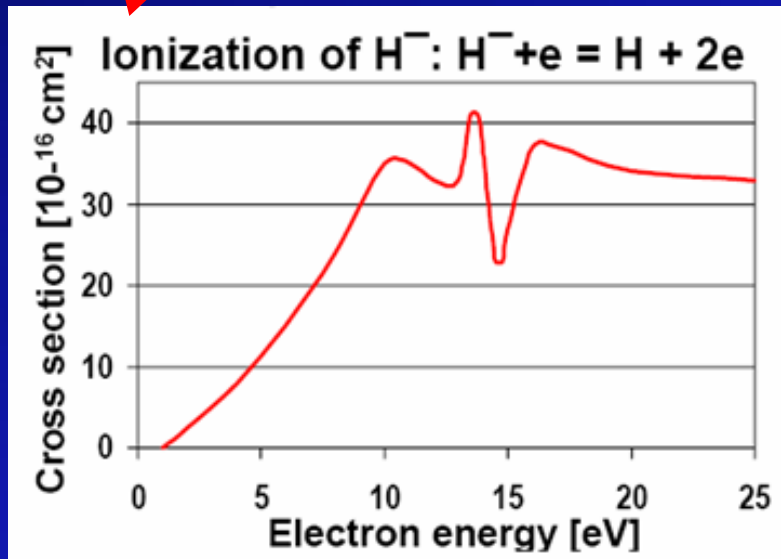
Par détachement collisionnel



Par ionisation



pour $E_e > 10\text{eV}$



Par recombinaison



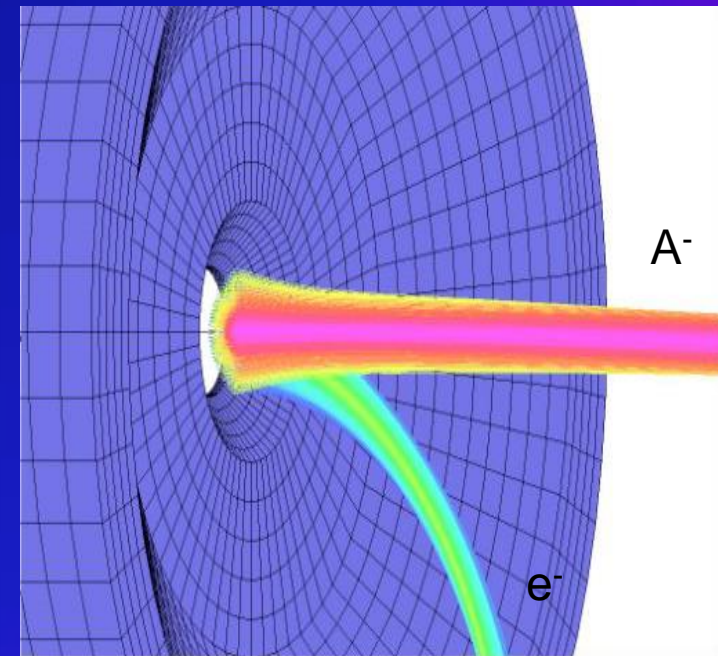
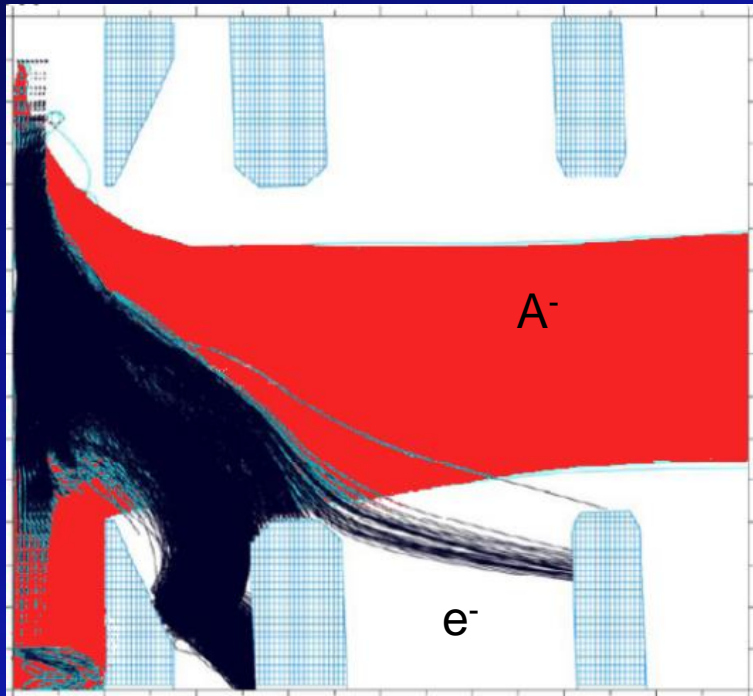
Pour $E_H < 10\text{keV}$ $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-14} \text{cm}^2$

Par éjection cinétique

Un souci majeur

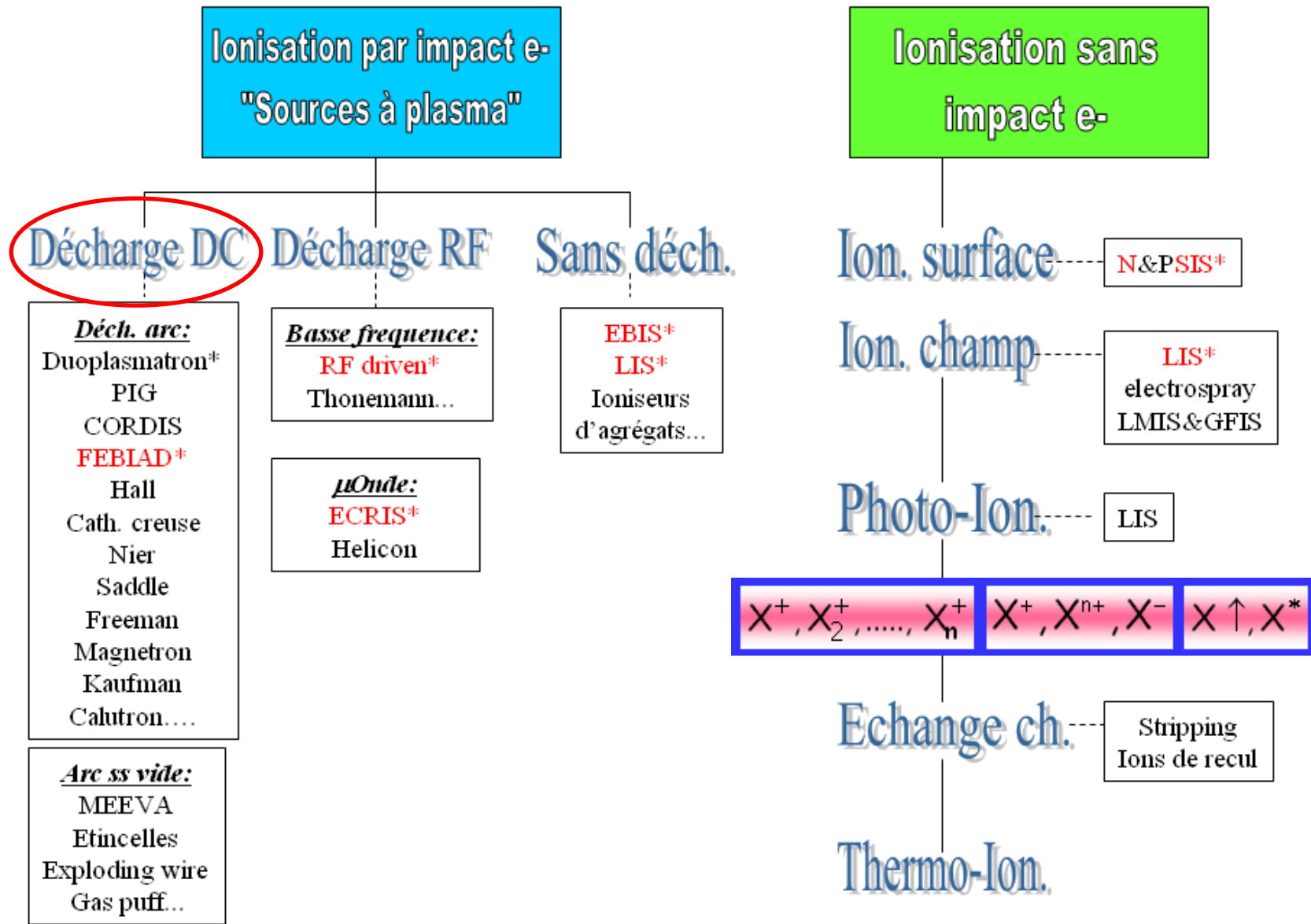
S
o
u
r
c
e
s
i

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



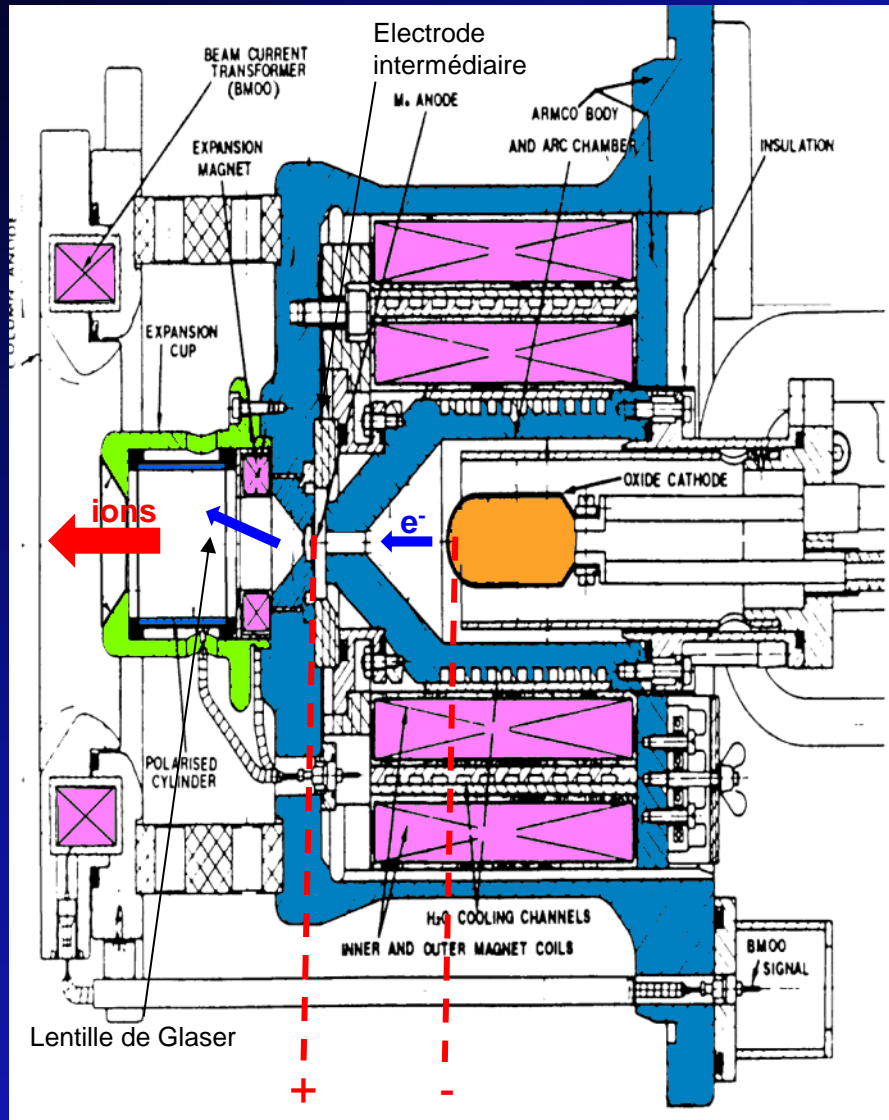
Les Sources d'ions !

Exemple



Source décharge DC

E
x
e
m
p
l
e



DUOPLASMATRON CERN (H⁺)

Paramètres typiques des duoplasmatrons:

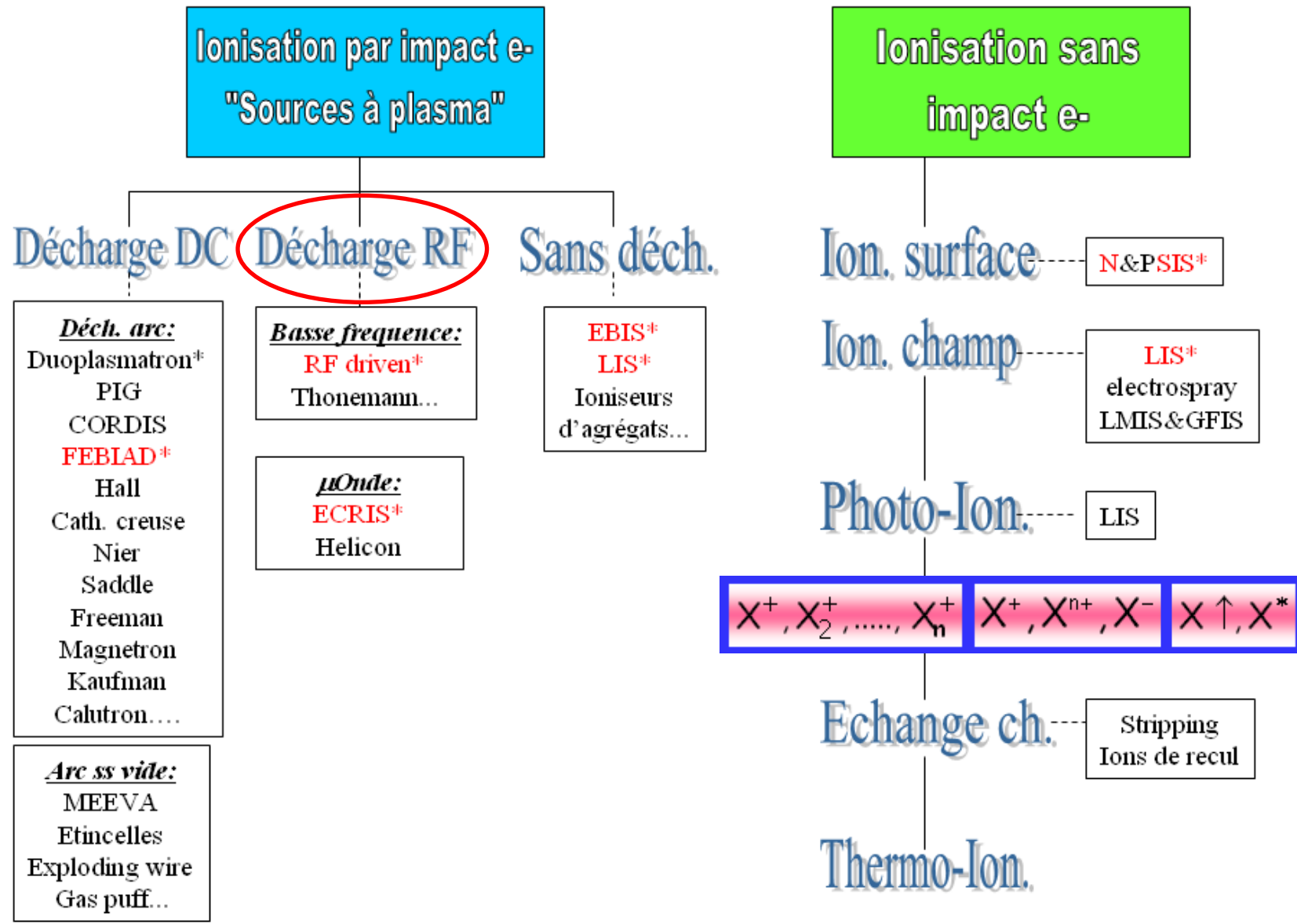
Décharges DC 50V ÷ 200V, 0.1 ÷ 1A
Déch. pulsées (duty-cycle 10%) 250V-10A
Intensités jusqu'à 50mA
Lentille de Glaser de qq kGauss
Filament ou Cathode BaO

Durée de vie de cathode limitée à 200hrs

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

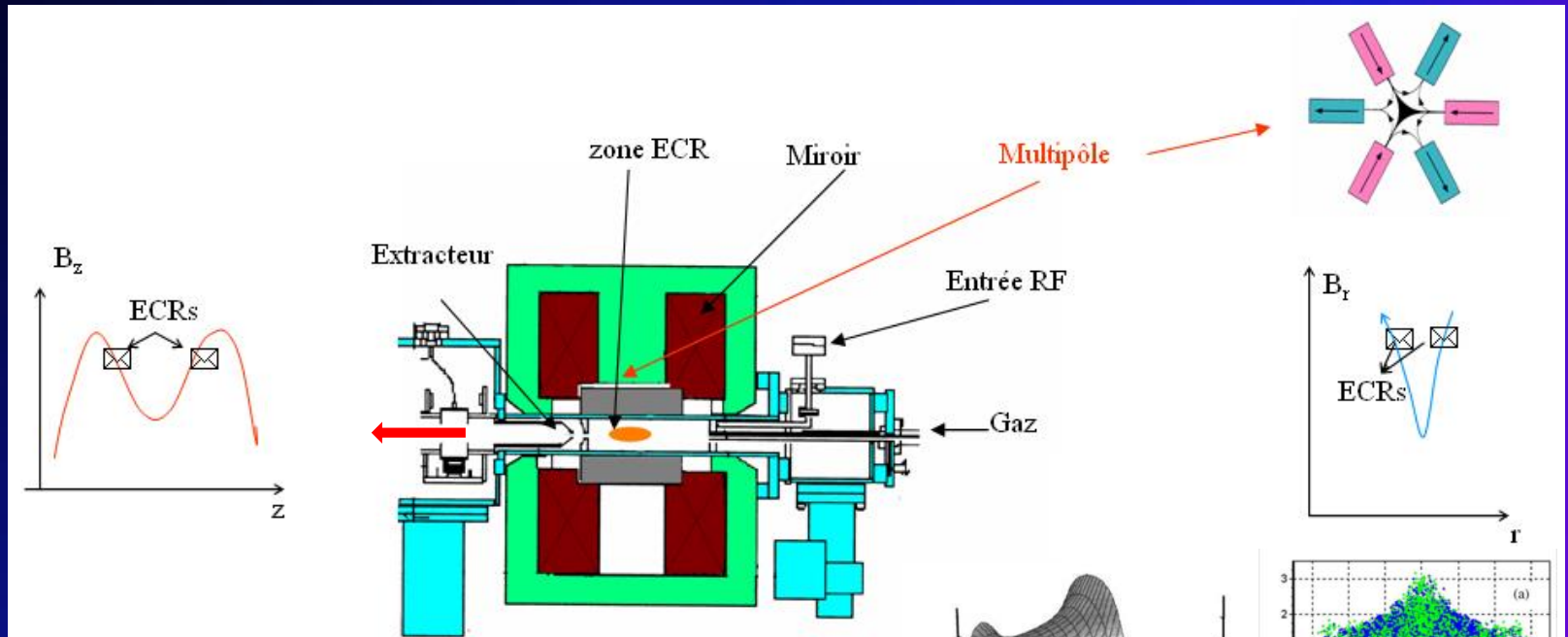
Les Sources d'ions !

Exemple

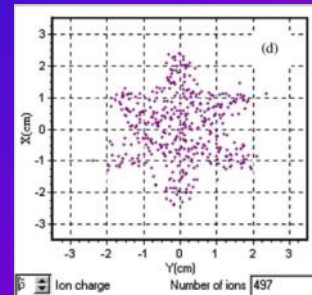
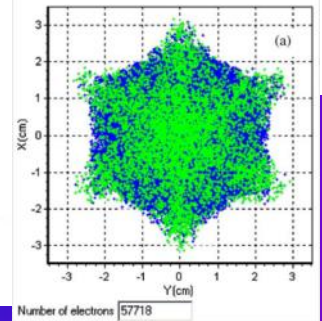
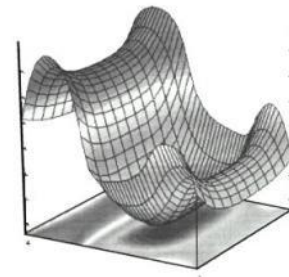


ECRIS

Source décharge RF

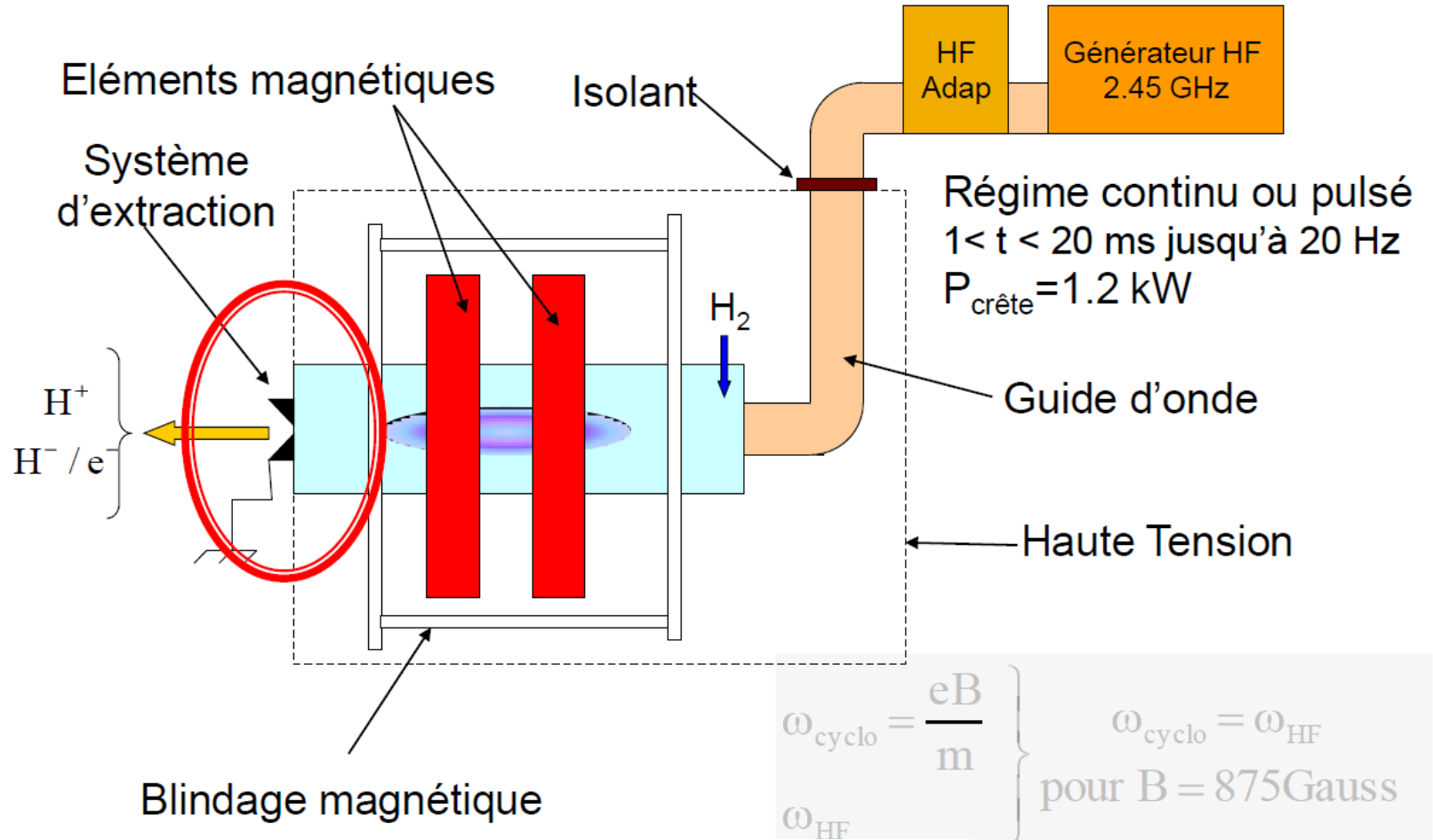
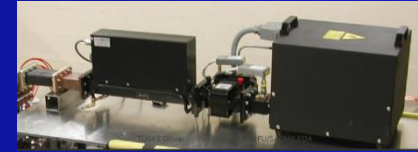


Dans une configuration de bouteille magnétique, les e^- du plasma sont chauffés par résonance avec une onde RF de 2.45 à 28GHz. Les ions sont extraits en DC ou en pulsé.



U
n
i
v
e
r
s
i
t
é
d
e
B
r
a
s
i
l

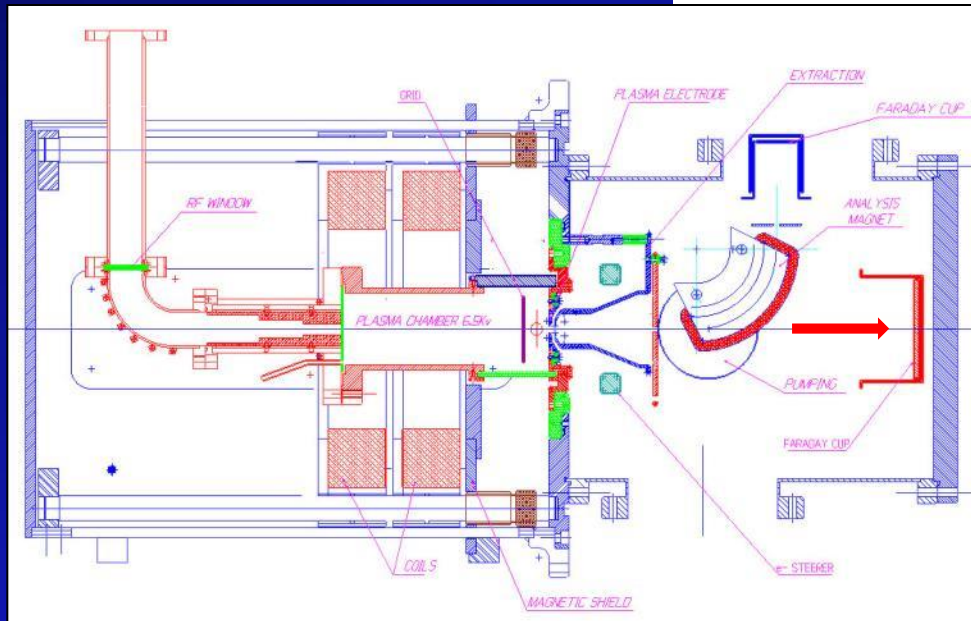
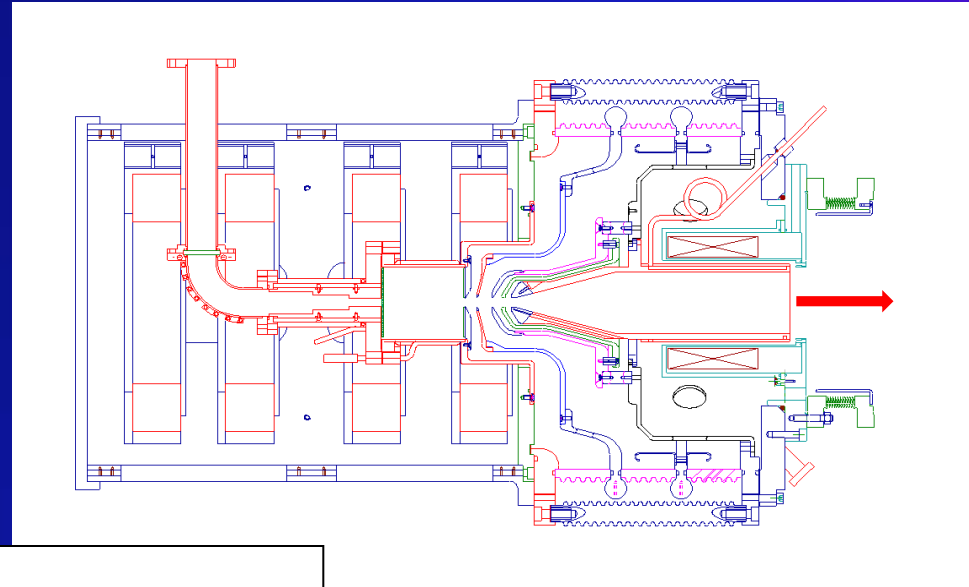
Schéma de principe



ECRIS intenses

Sources & collecteurs

CEA SILHI
2.45GHz-6kW
3ms pulses, 1Hz
Intensités → 157mA H⁺



CEA ECRIN
2.45GHz-6kW
3mA H⁻
(sans Cs)
Rem.: collecteur e⁻

ECRIS intenses

S
o
u
r
c
e
s
&
i

SPIRAL 2

20kV -- 5mA H+

40kV -- 5mA D+

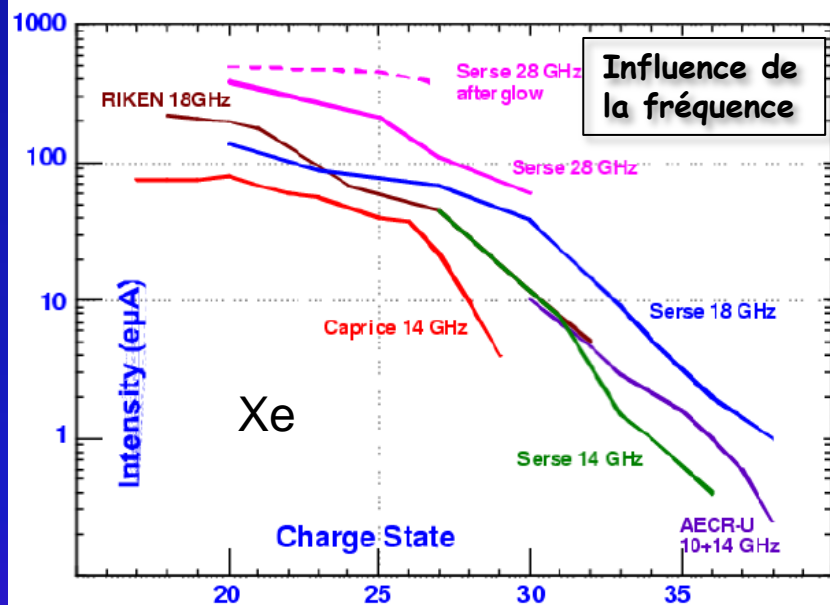
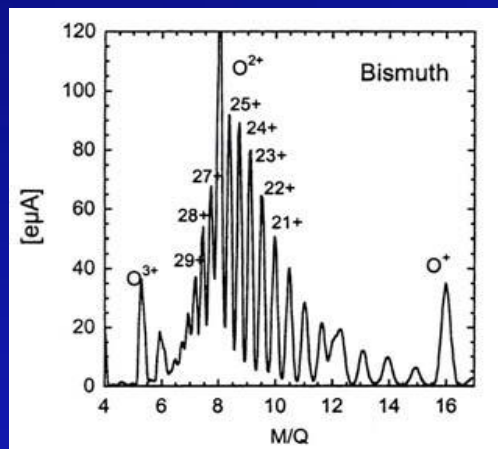
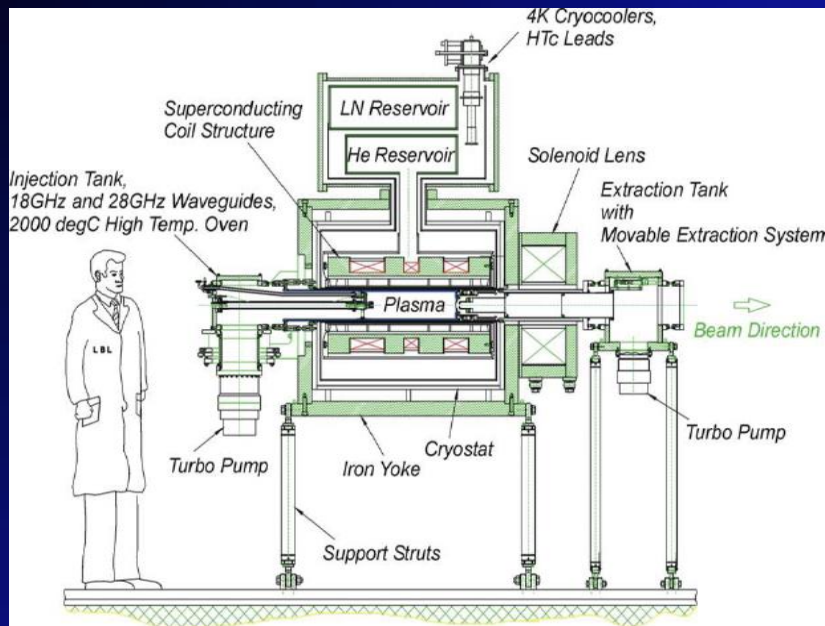
Aimants permanents



ECRIS n⁺

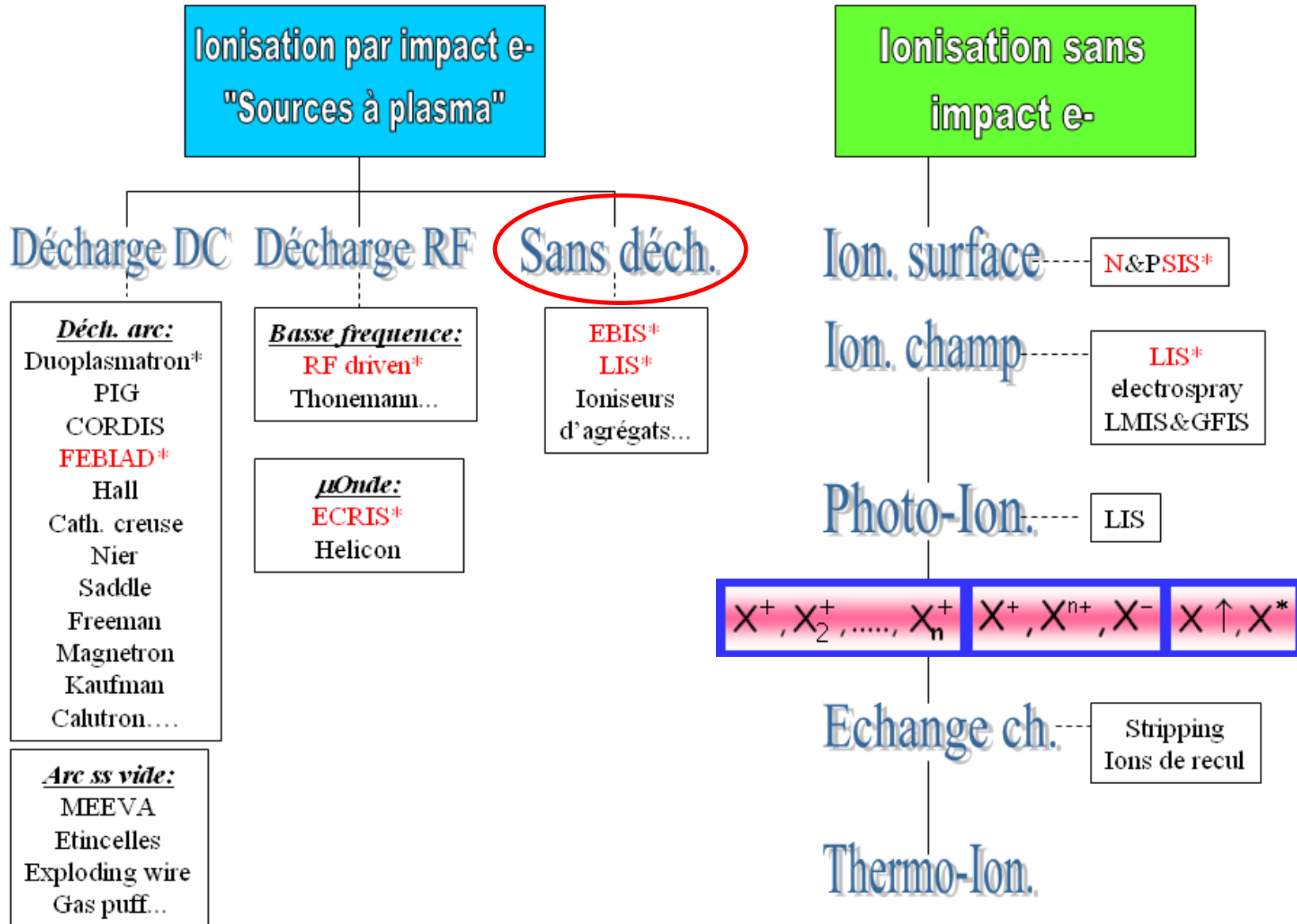
Lawrence Berkeley National Laboratory 2000

V
e
n
u
s



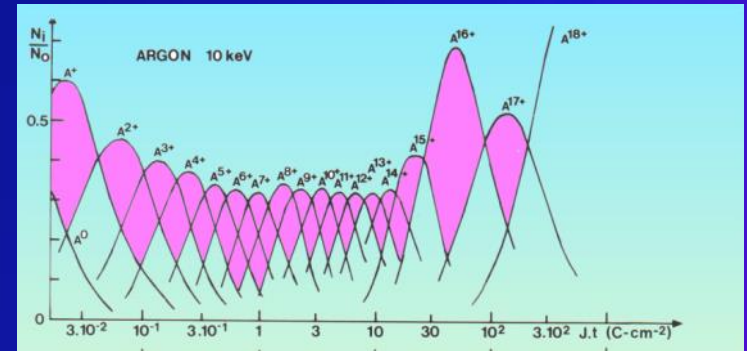
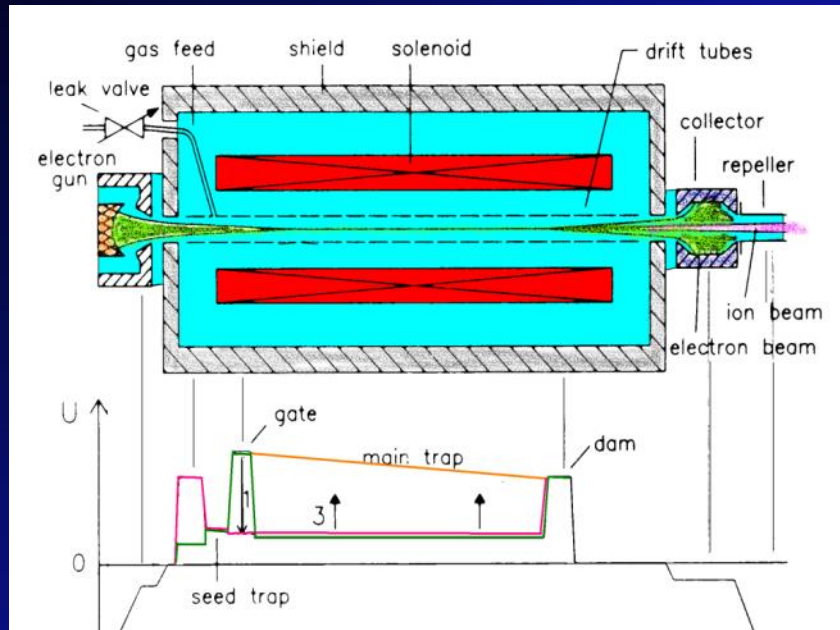
Les Sources d'ions !

E
x
e
m
p
l
e



EBIS Source sans décharge

S
e
c
r
e
t

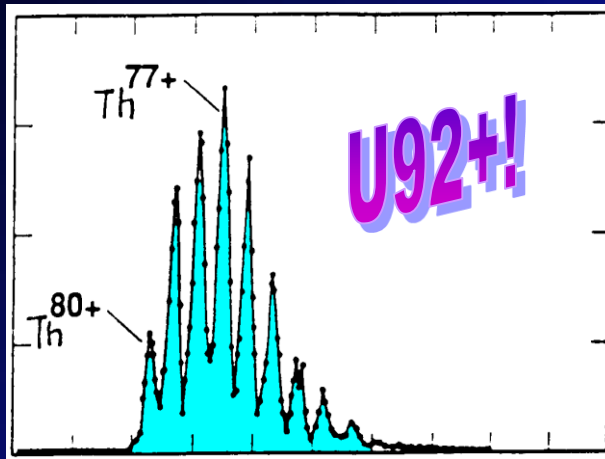


Le nombre d'ions multichargés dépend du nombre d'interactions et du lieu de départ de l'atome

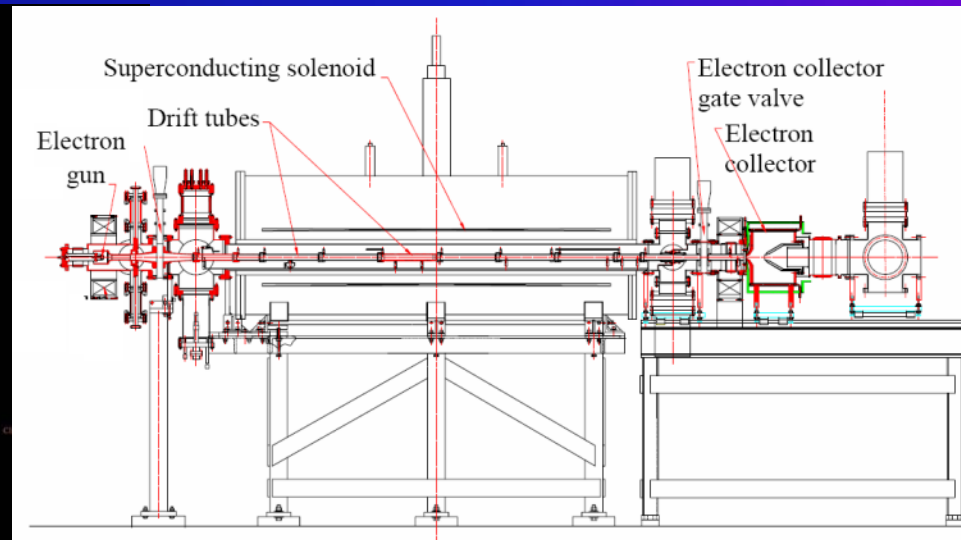
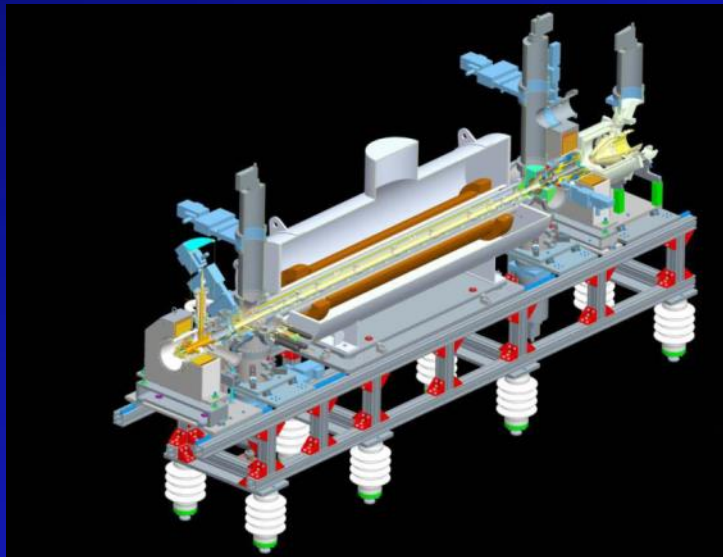
Un faisceau d'e⁻ dense et intense ($\rightarrow 20\text{A}-1000\text{A}/\text{cm}^2$), parcourt l'axe d'un solénoïde et ionise par étapes. Sa CE + diverses distributions de potentiel sur des tubes concentriques assurent le confinement et l'extraction.

EBIS intenses

Lawrence Berkeley National Laboratory 2009



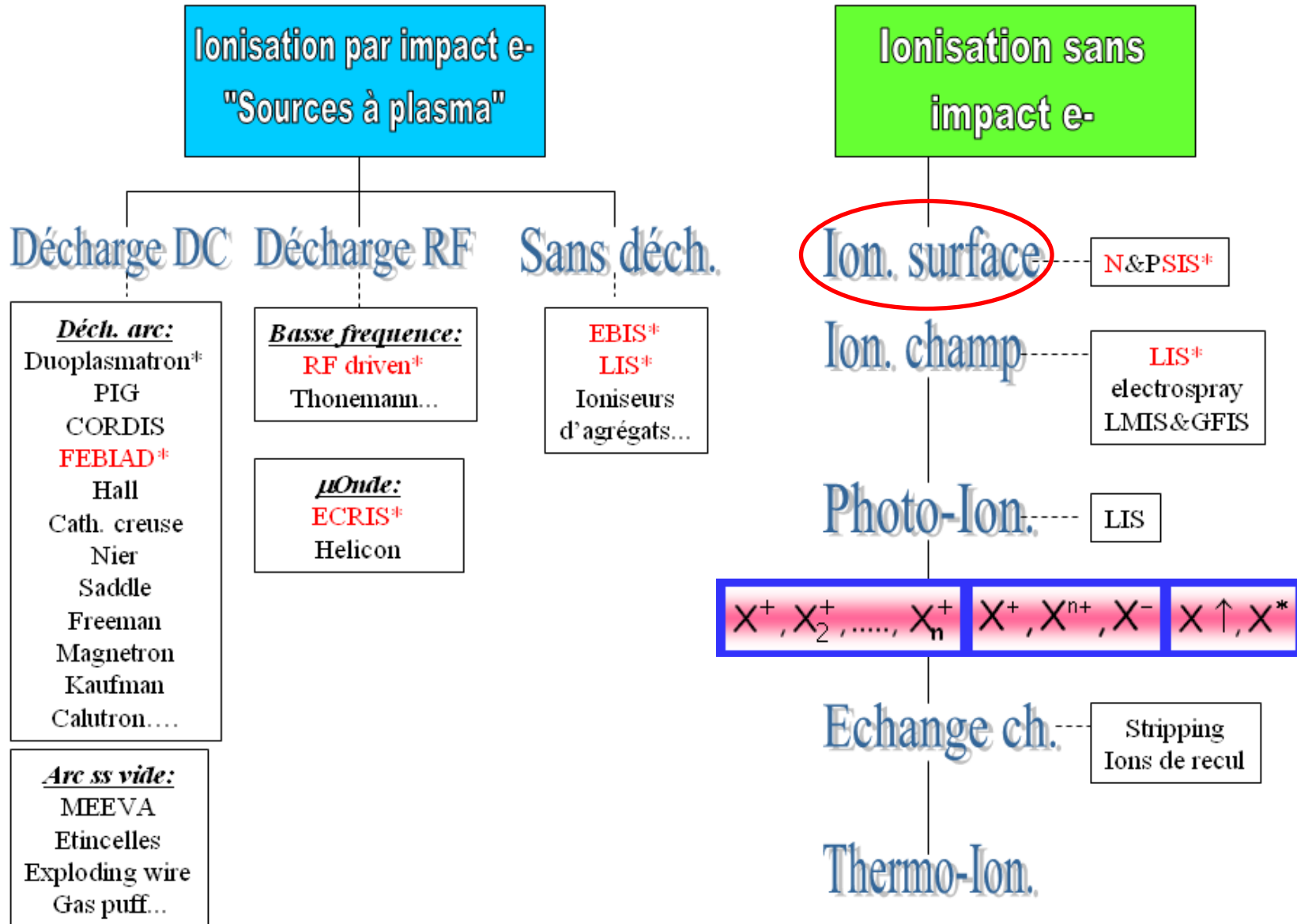
1.7emA-10 μ s-5Hz



R
H
I
C

Les Sources d'ions !

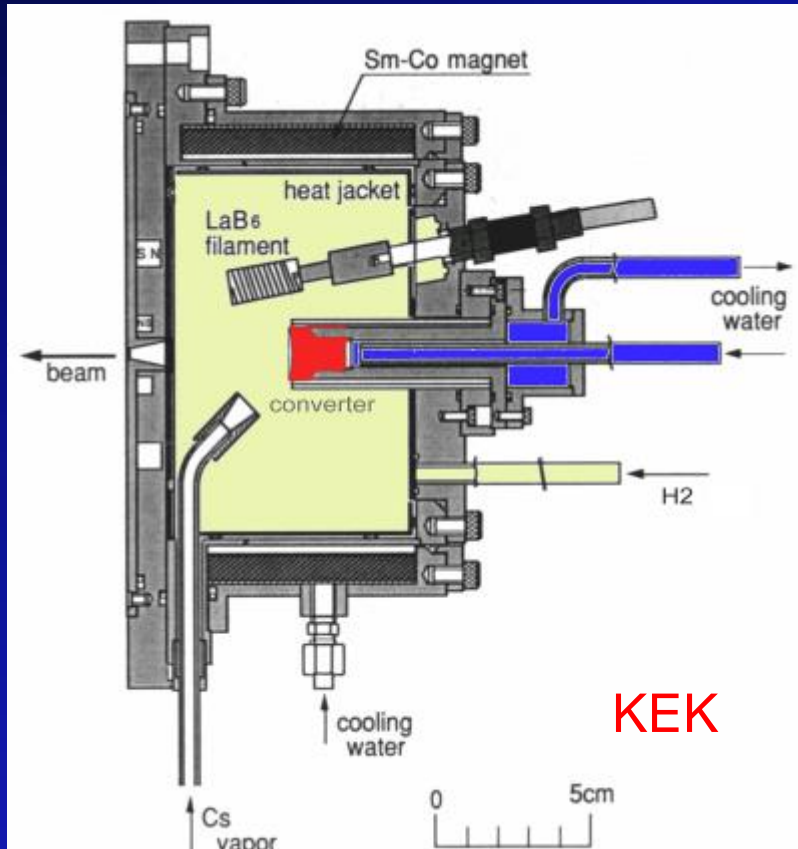
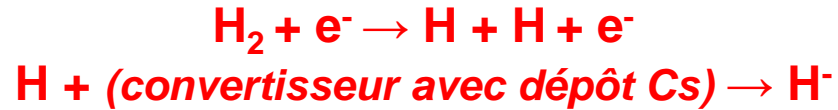
Ex
m
p
le



Les sources à ionisation de surface

E
X
e
m
p
l
e

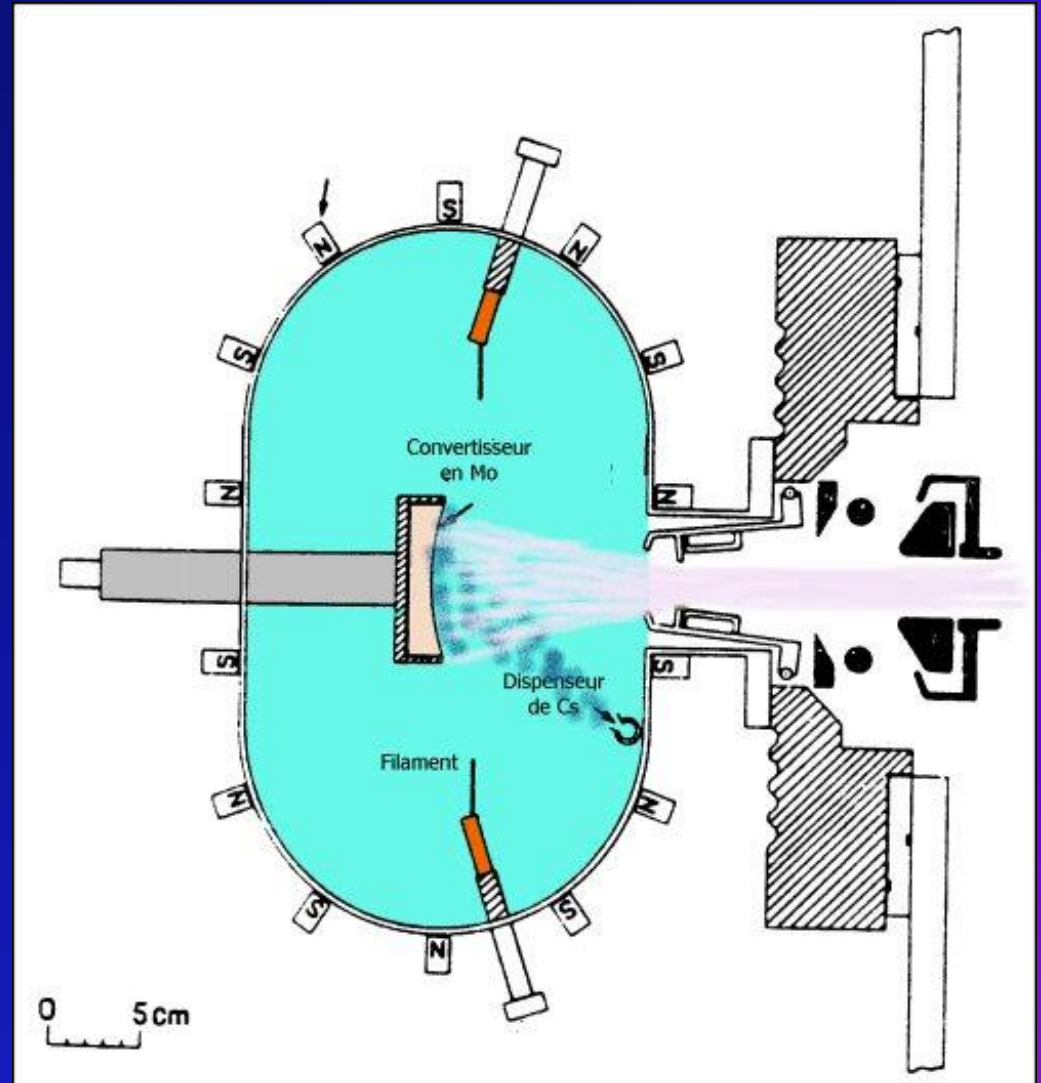
Production de H⁻



Les sources à ionisation de surface

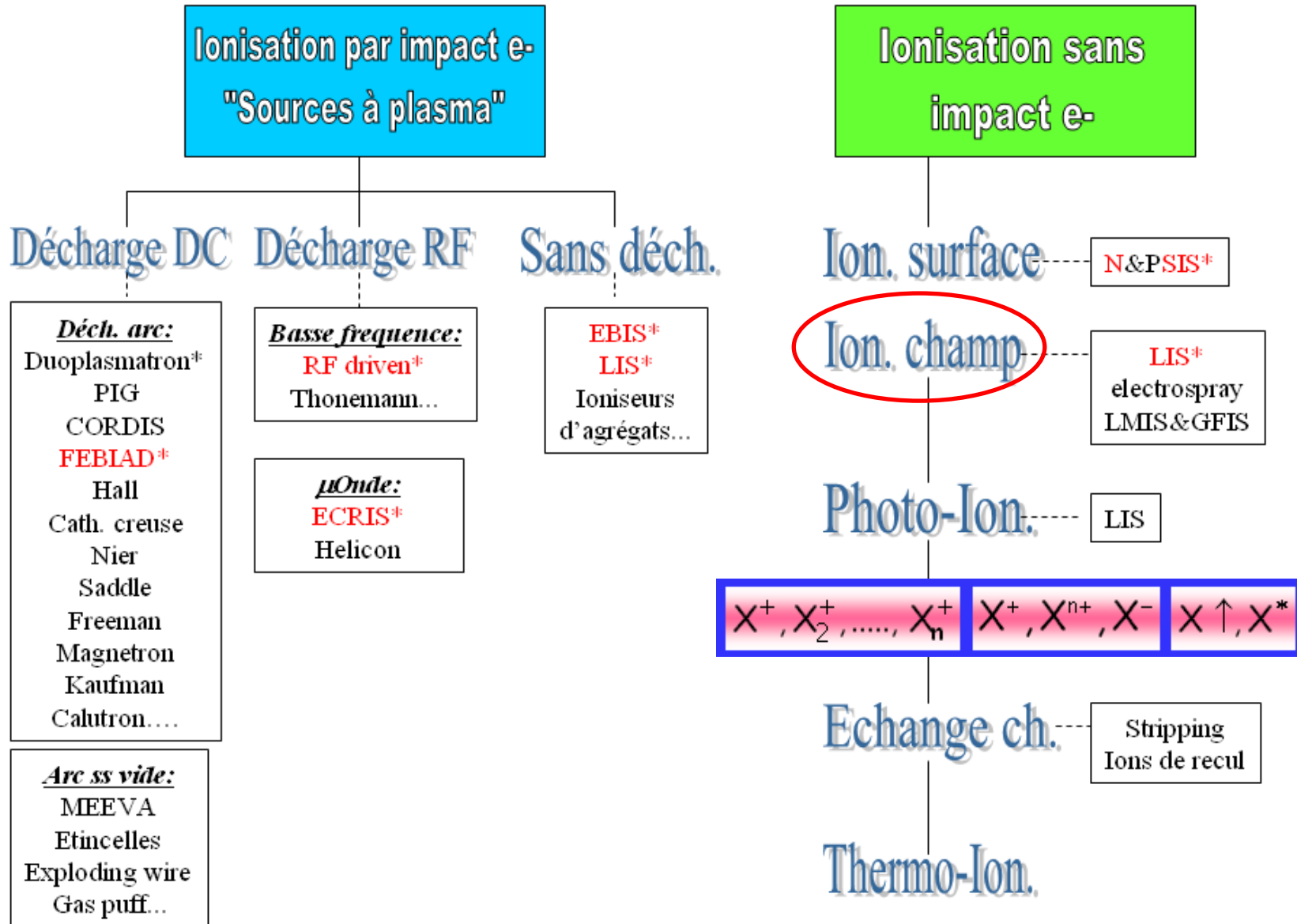
E
x
e
m
p
l
e

tokomaks
→ 100A de neutre à
partir de H!!



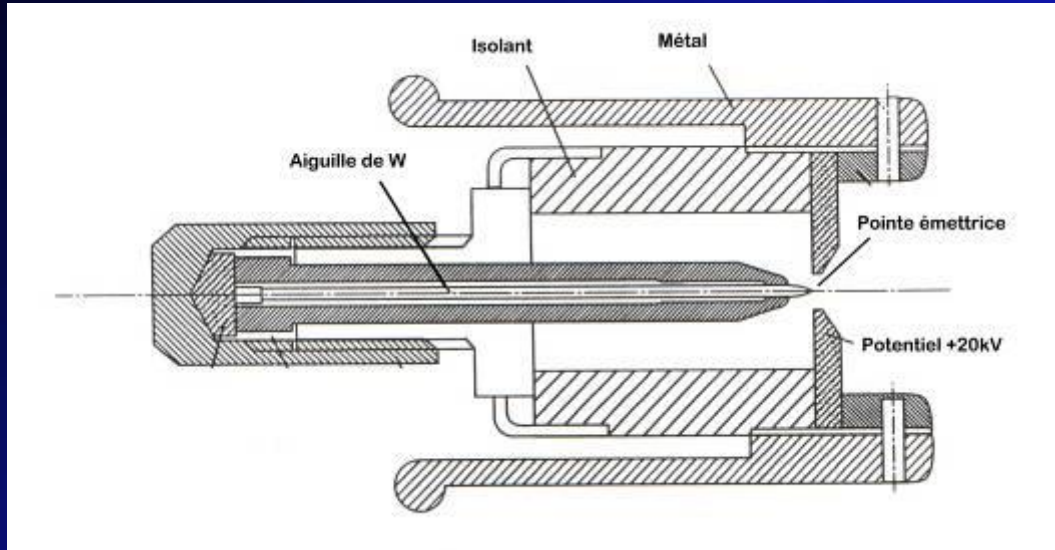
Les Sources d'ions !

E
x
e
m
p
l
e



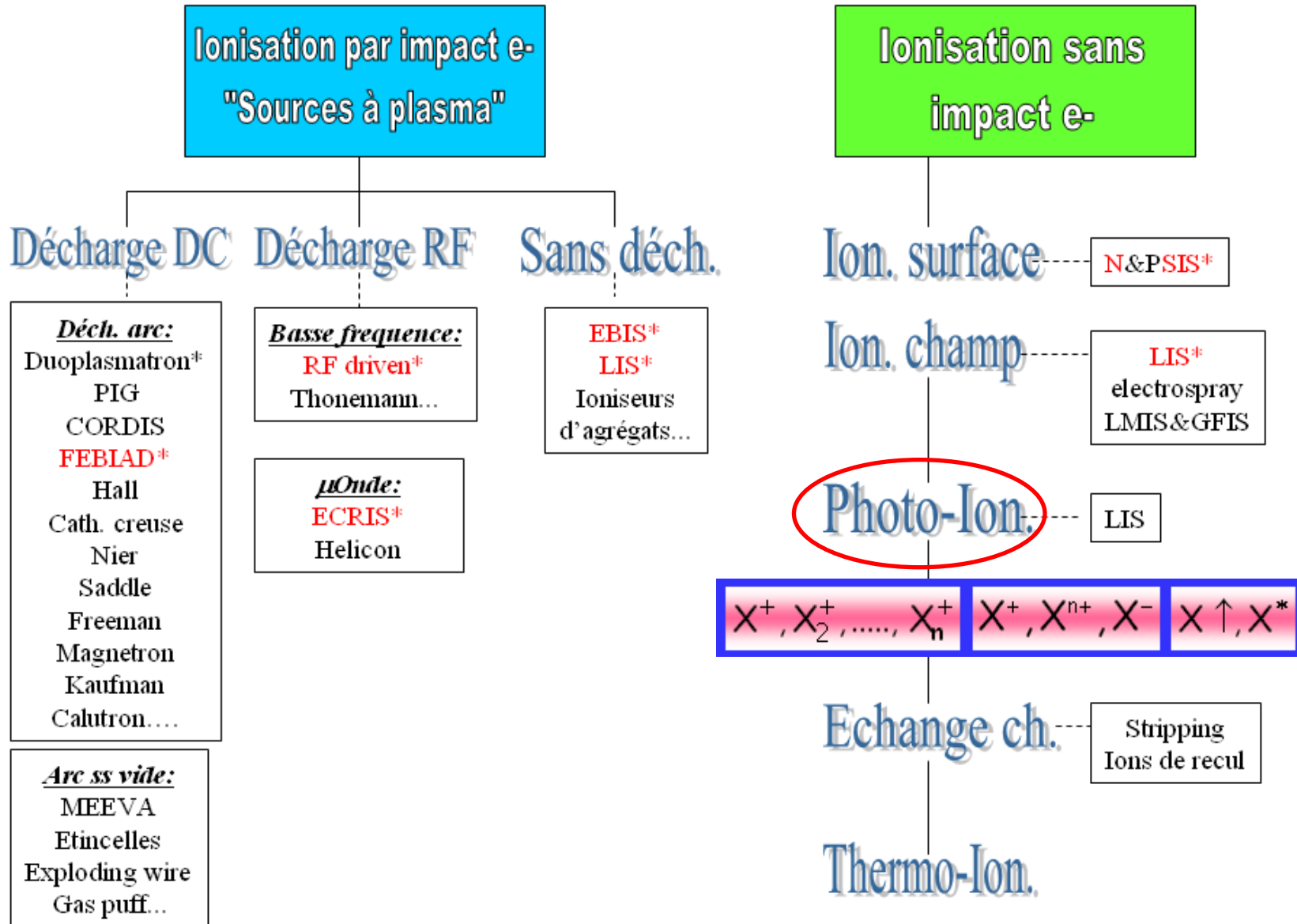
Les sources à ionisation de champ

E
x
e
m
p
l
e



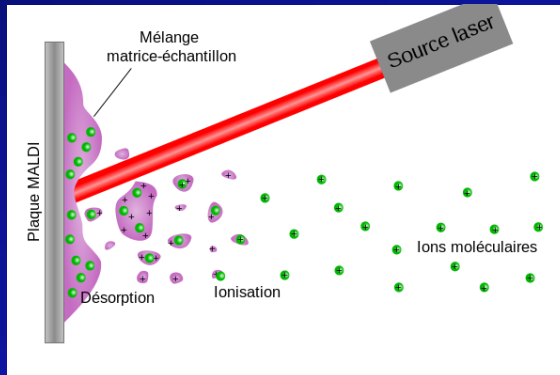
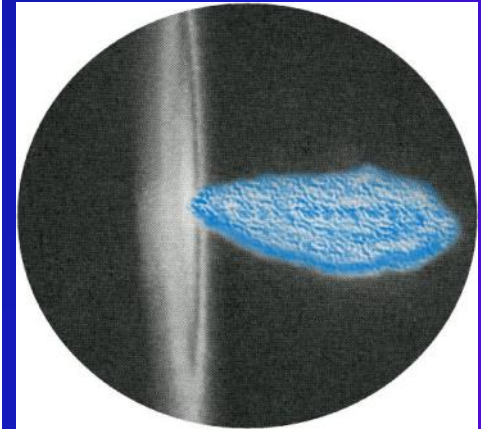
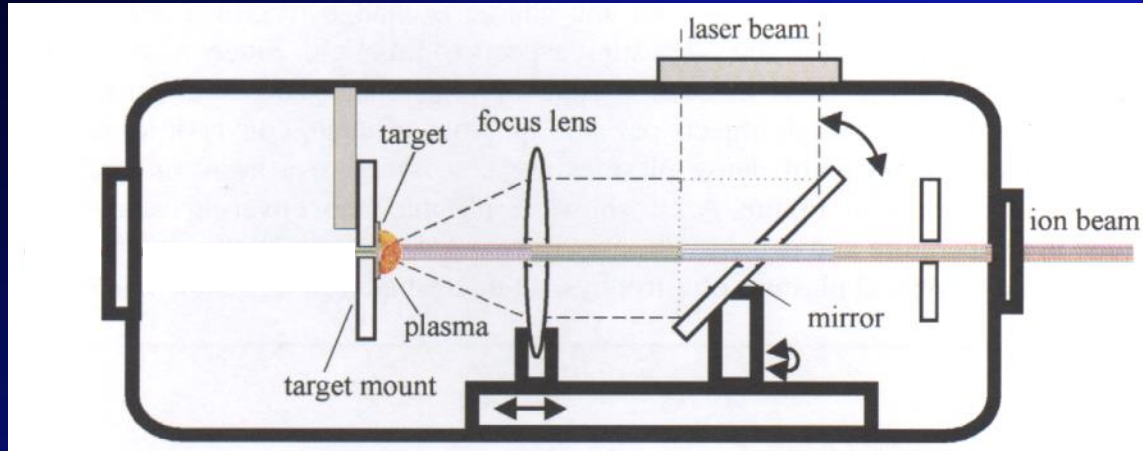
Les Sources d'ions !

E
x
e
m
p
l
e



Les sources laser

S
E
R
V
I
C
E
S
+
B



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.

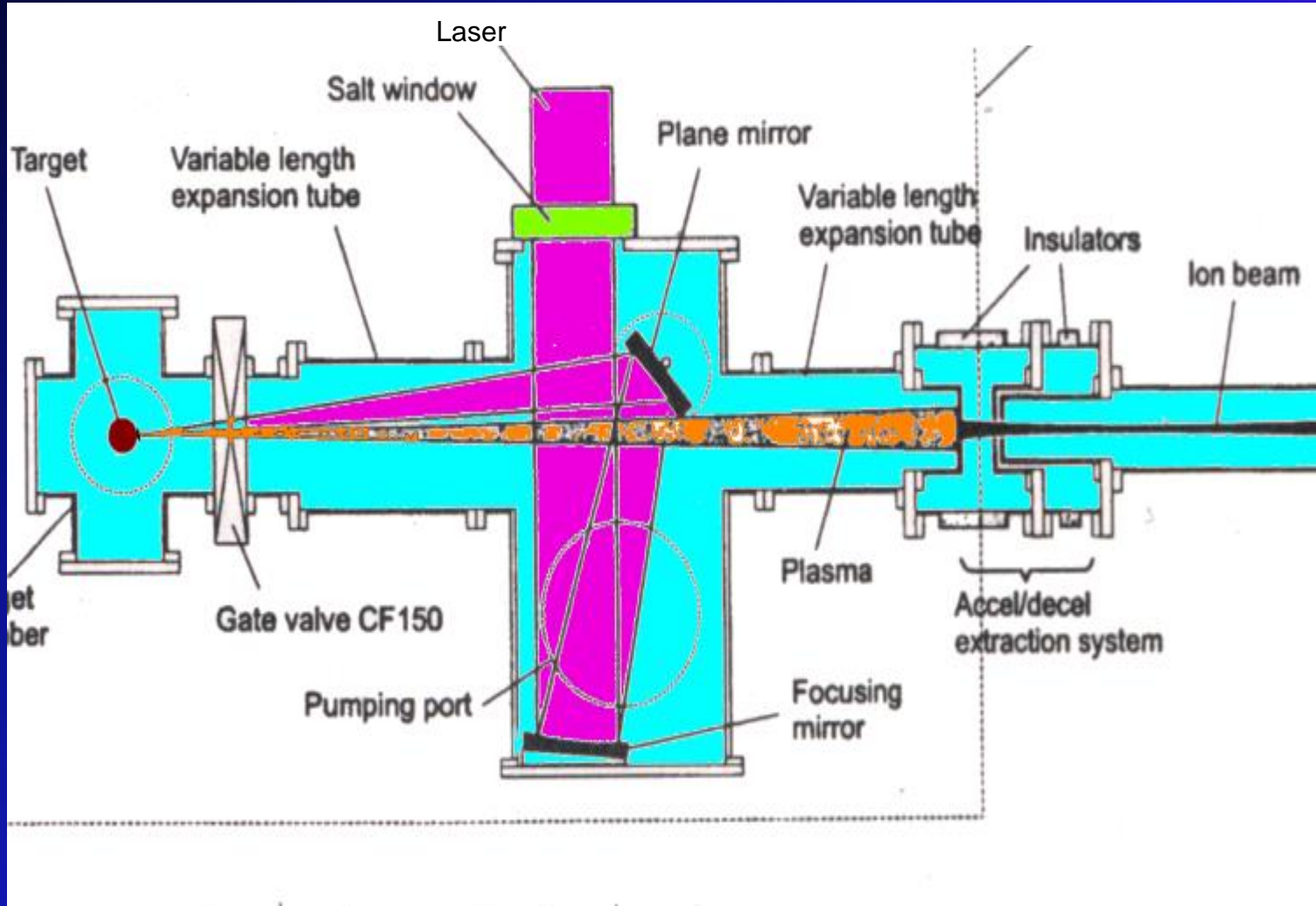
Les sources laser

CO₂-Ne-He 100J
10¹³W/cm²-50ns



C
E
R
N
L
I
S

Les sources laser



CERN
ILL
S

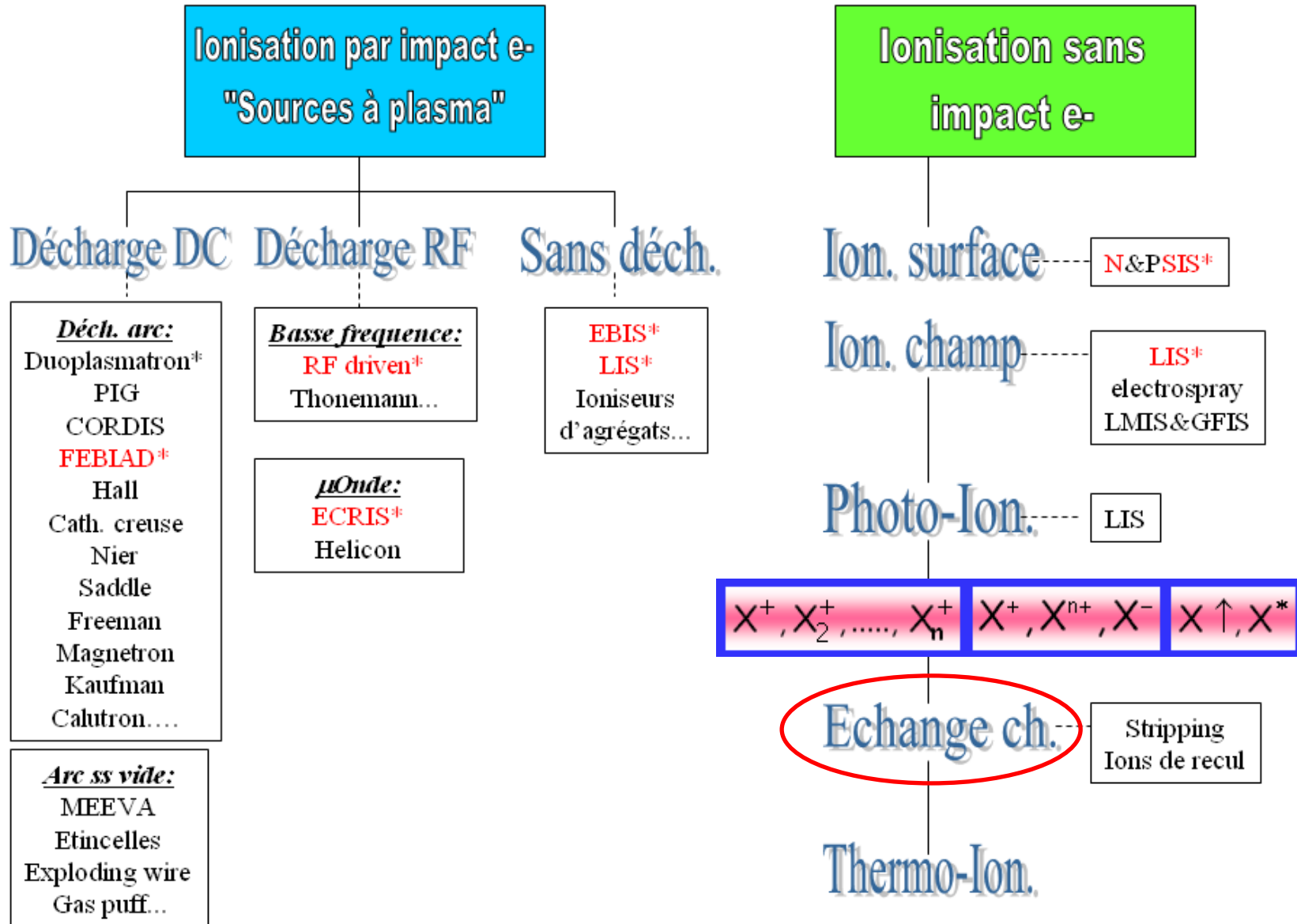
Les sources laser

Le laser



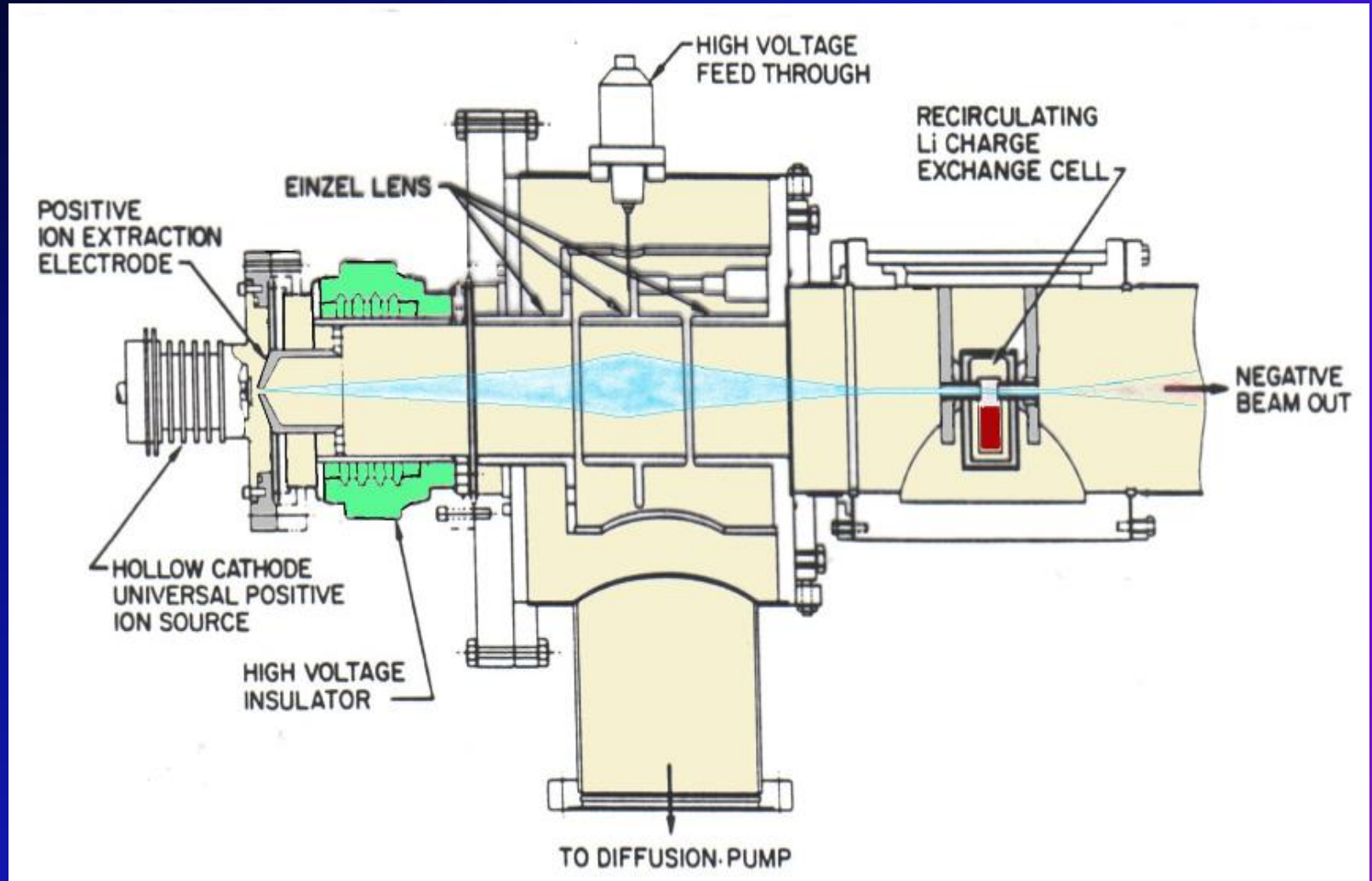
Les Sources d'ions !

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

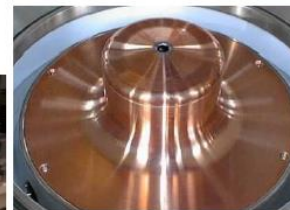
➤ RF injection and coupling



➤ Control system

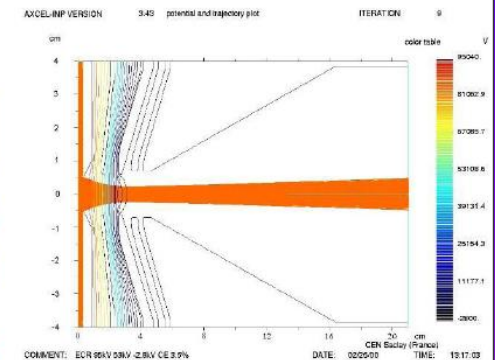
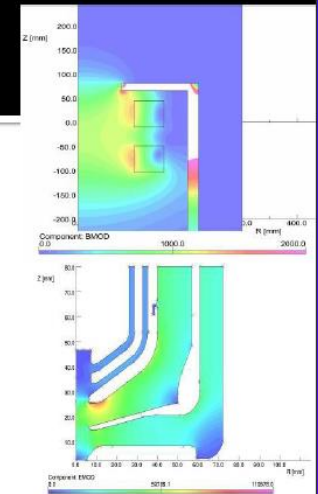


➤ Magnetic, thermal and electrostatic calculations



➤ Matériaux

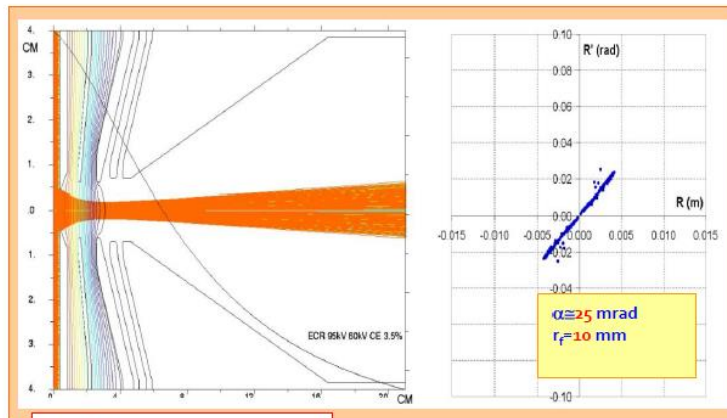
➤ Beam Extraction (10 kW)



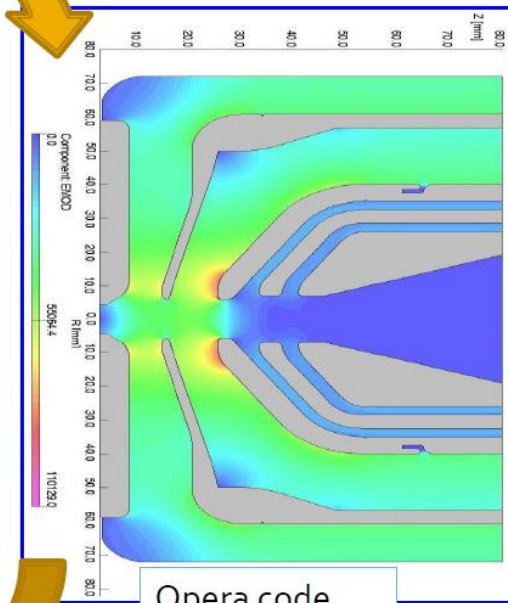
Les techniques à maîtriser

Simulations

Extraction system



AXCEL code



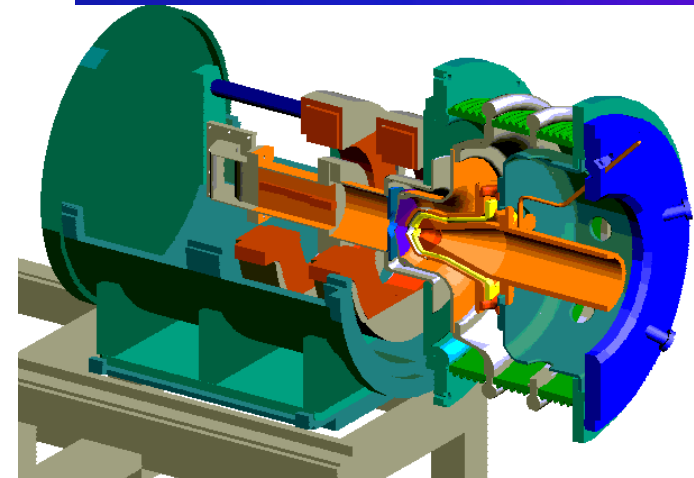
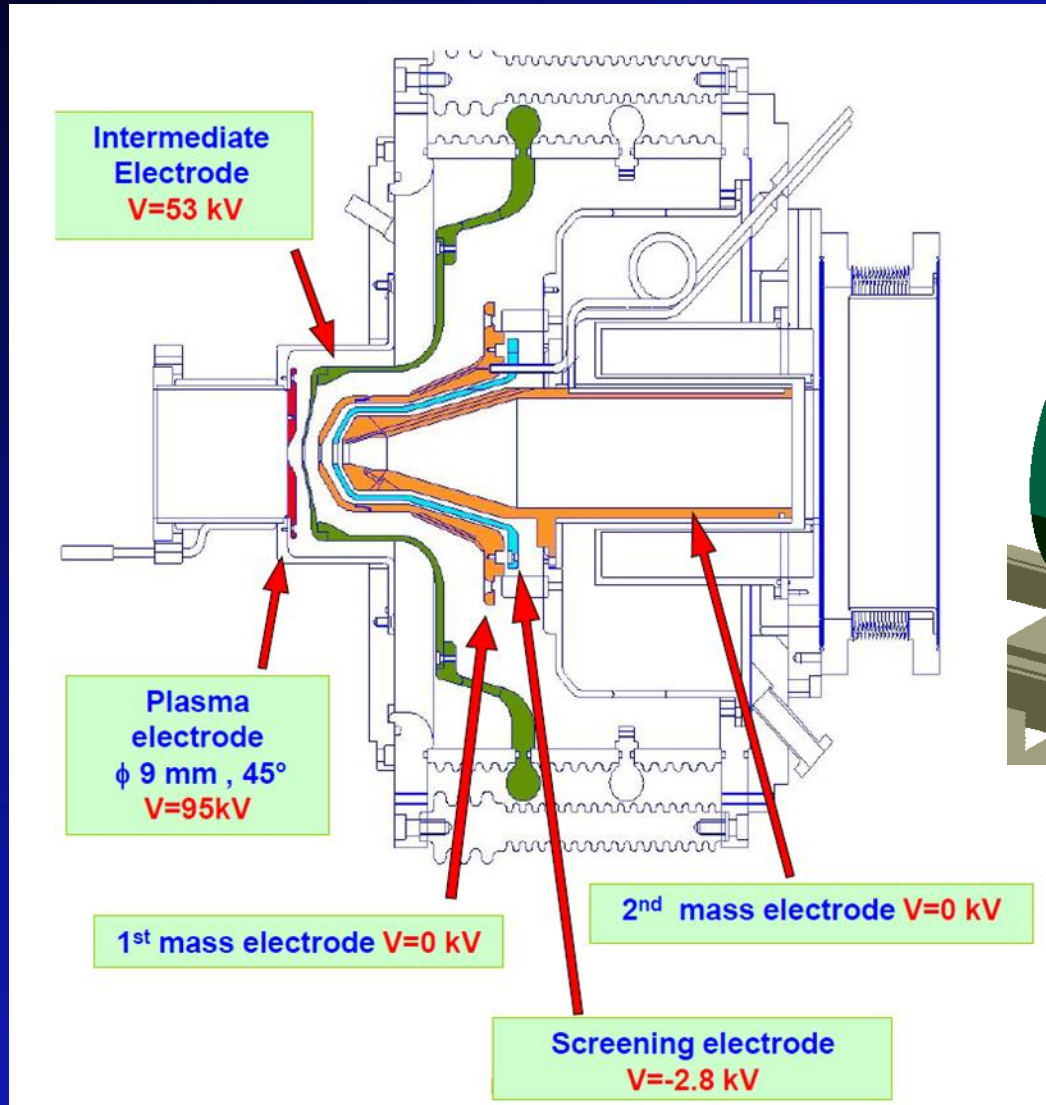
Opera code

B
i
l
l
a
n

Les techniques à maîtriser

Mise en plan

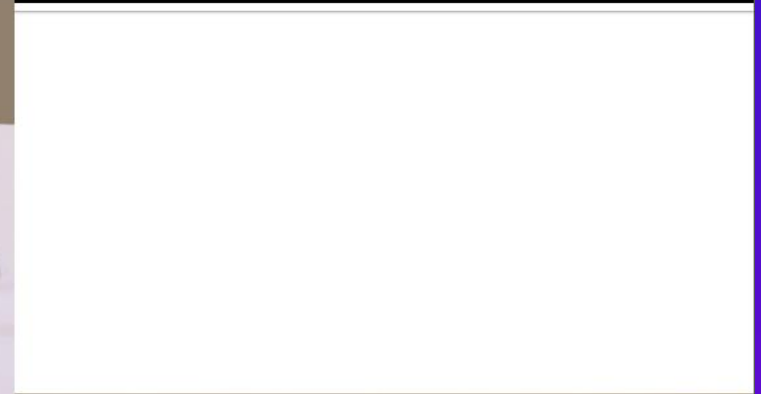
B
i
l
l
a
n



Les techniques à maîtriser

Fabrication

Point critique : le tube accélérateur

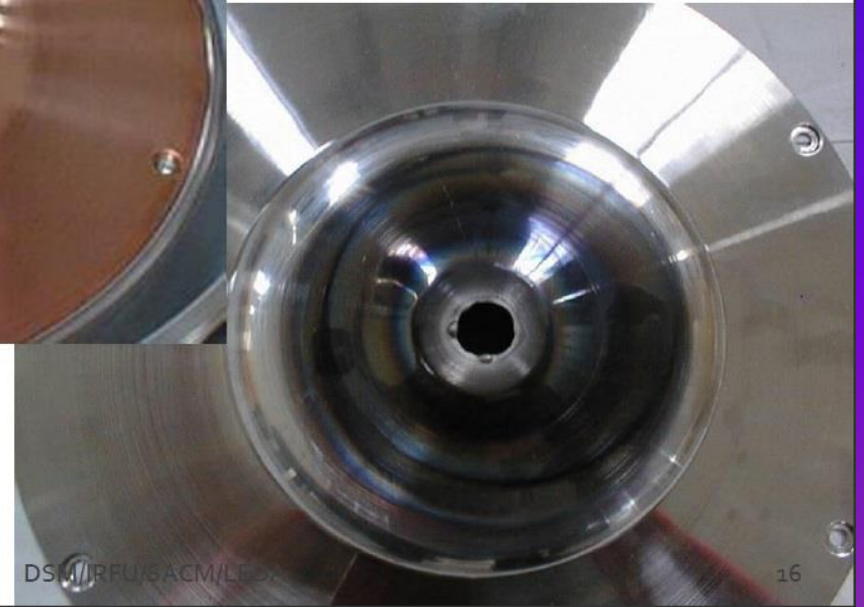
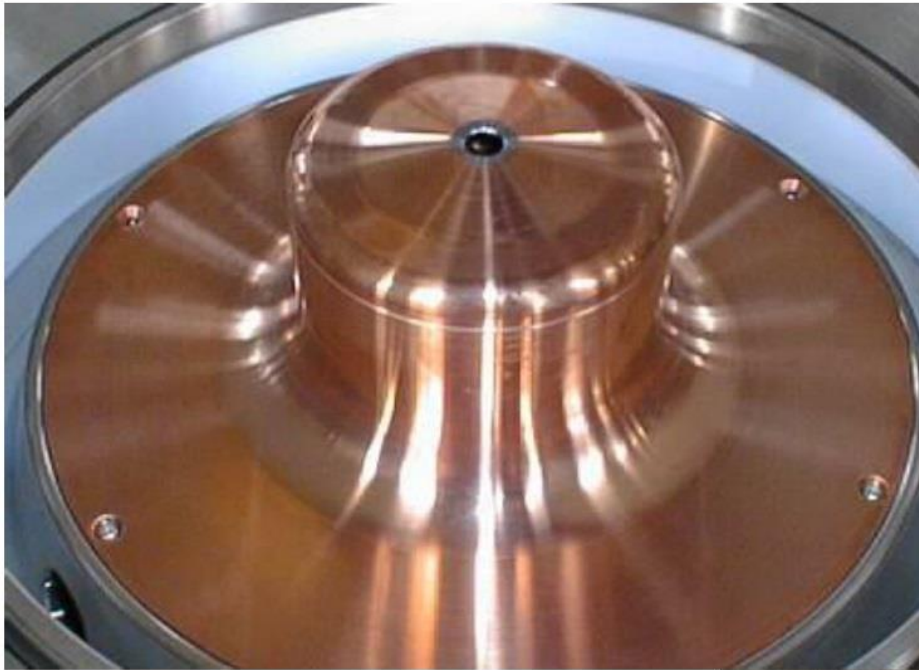


DSM/IRFU/SACM/LEDA

Les techniques à « maitriser »

Tests

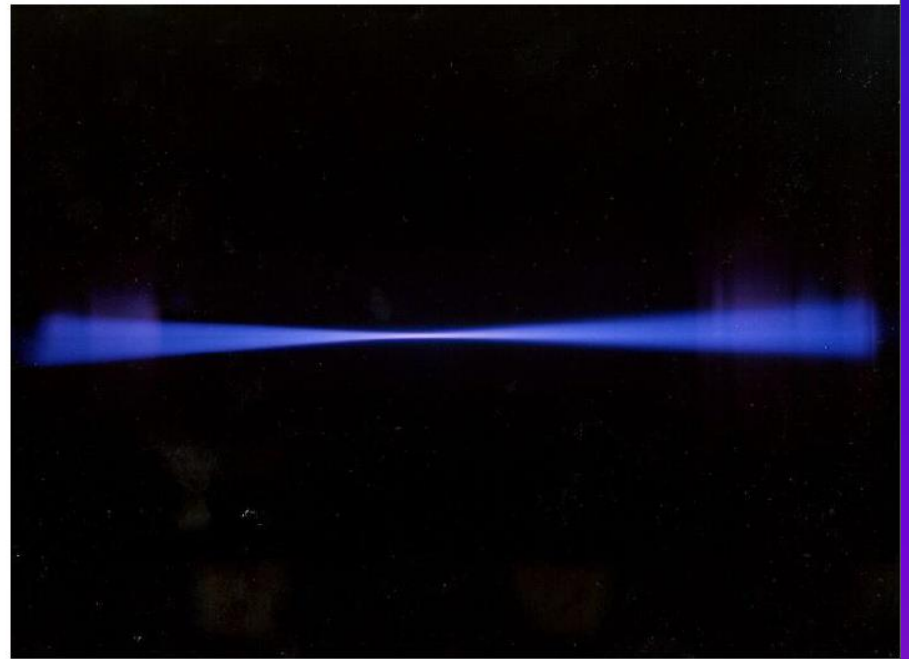
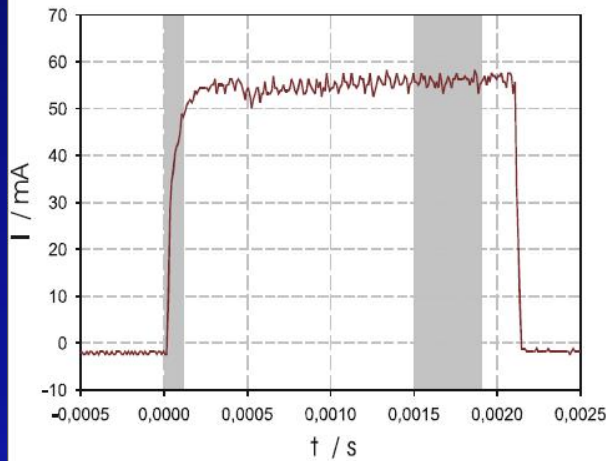
B
i
l
a
n



Les techniques à maîtriser

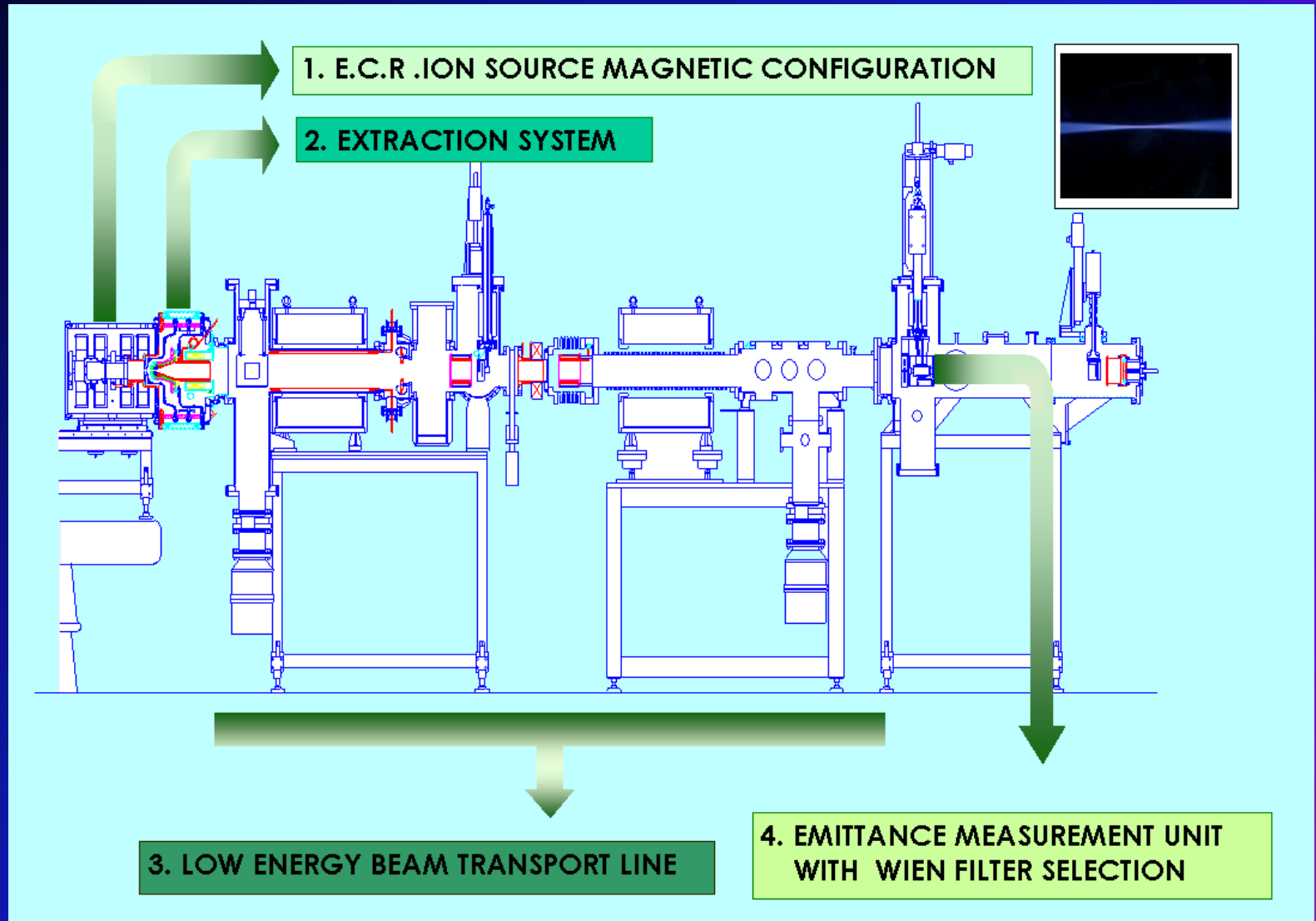
B
i
l
a
n

RF configuration



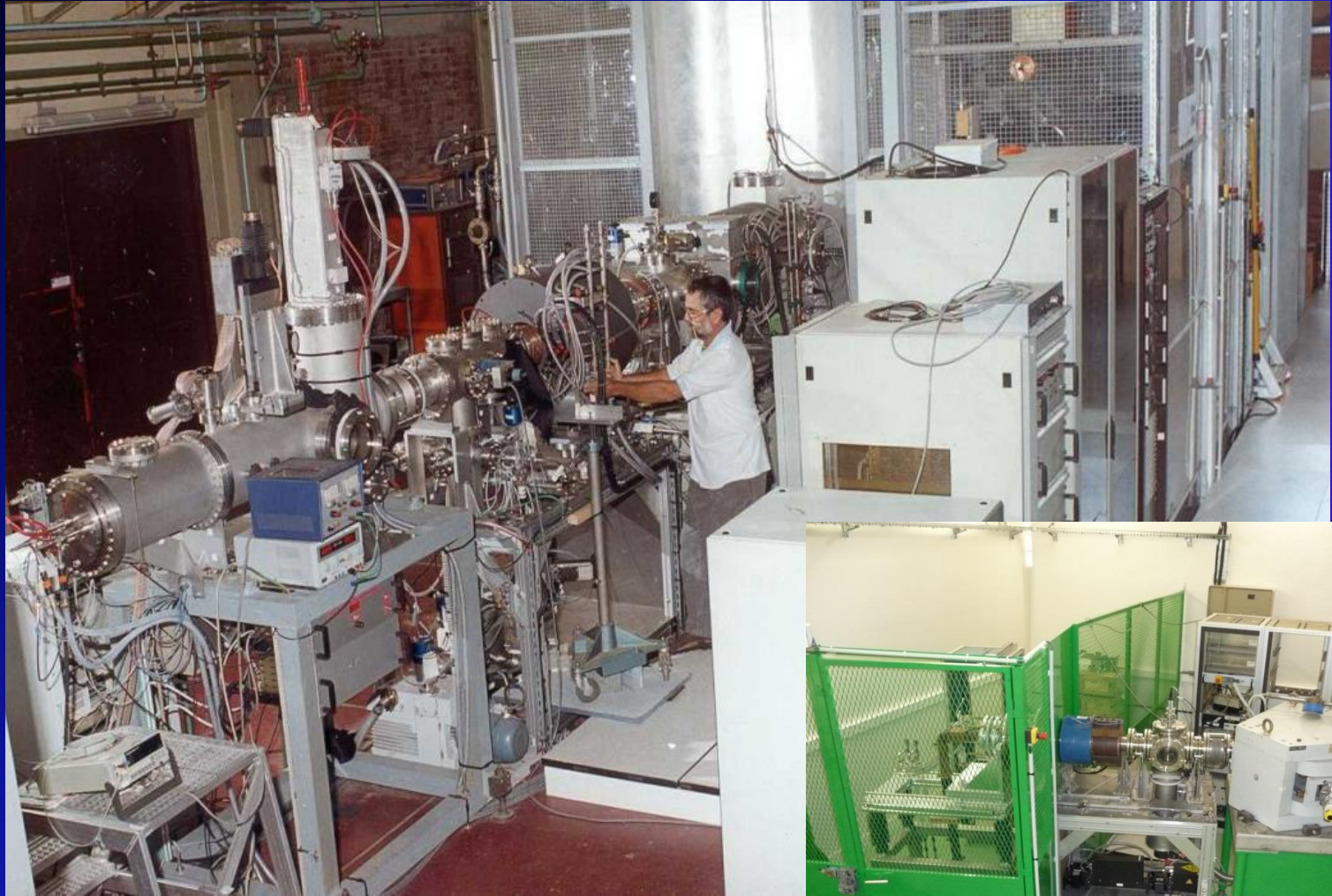
Les techniques à maîtriser

B
i
l
a
n



Les techniques à maîtriser

B
i
l
a
n



Les matériaux de construction

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

- 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

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