

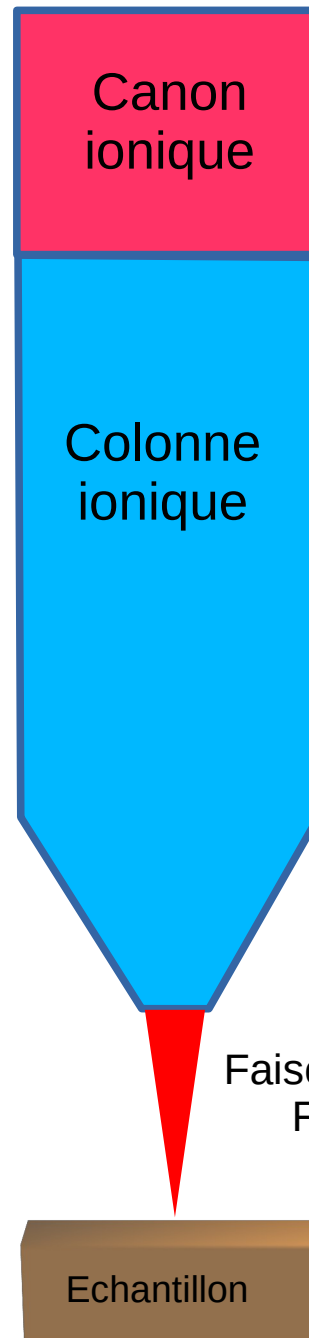
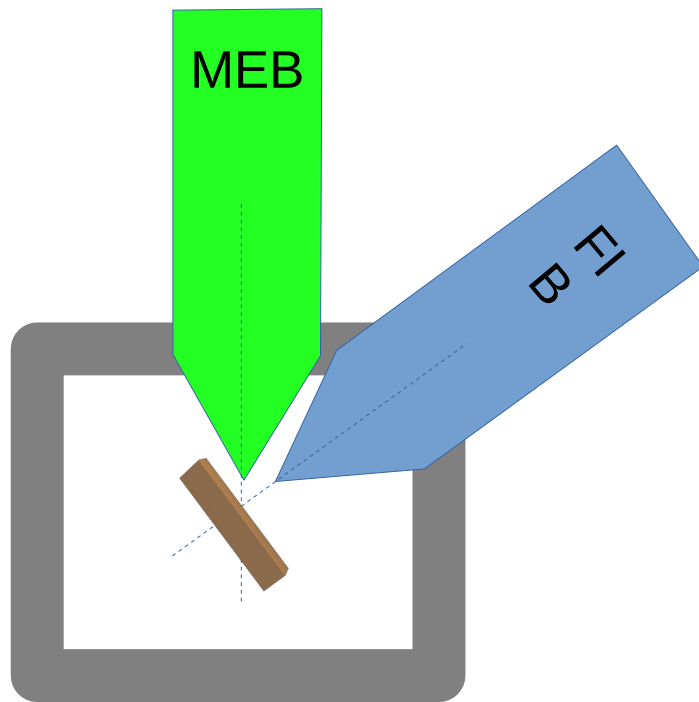
Description des différentes sources ioniques et colonnes ioniques.

F.Charlot

frederic.charlot@grenoble-inp.fr

Journées pédagogiques Gn-MEBA - 2023

FIB = Focused Ion Beam



Les principales sources d'ions sont les sources Ga et Plasma Xe
Description – points forts et Limitations

Principes généraux des colonnes ioniques. Les paramètres colonnes sont conditionnées par la source

Le graal pour des applications de gravure : un fort courant ionique avec une bonne resolution.

Le canon ionique

Est constitué d'une source d'ions et permet l'accélération des ions ainsi créés.

Les sources actuellement présentent sur le marché des FIBs sont principalement les sources LMIS (Ga) et les sources Plasma (Xe).

Source LMIS = Source ionique à partir d'un métal à l'état liquide

LMIS = Liquid Metal Ion Source

Cette dénomination regroupe par extension les sources à base d'alliage

On peut aussi trouver l'acronyme LMAIS dans le cas d'alliage

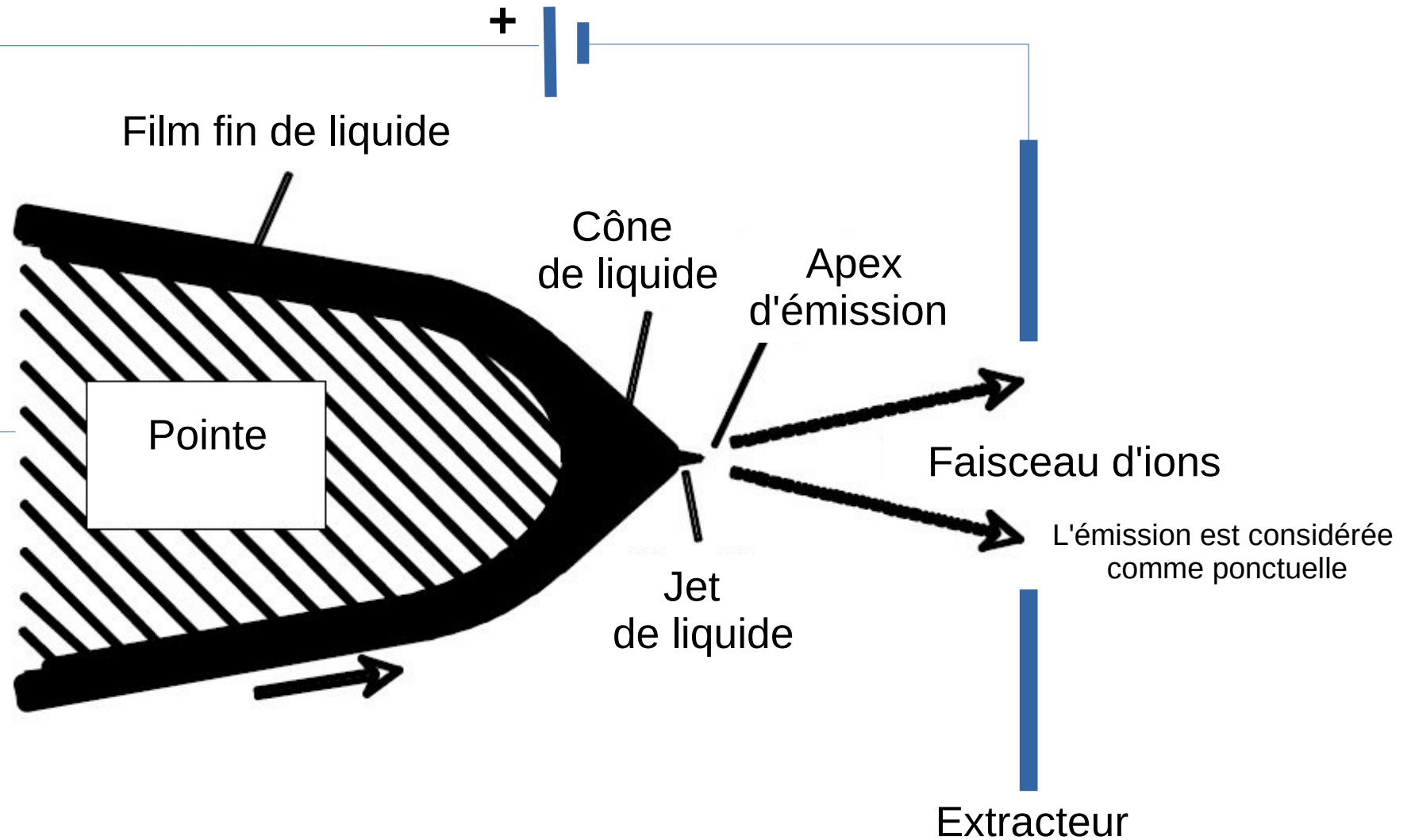
LMAIS = Liquid Metal Alloy Ion Source

C'est une source à émission de champ

Comparable aux émetteurs électroniques (FEG)

Une pointe fine est placée dans un champ électrique

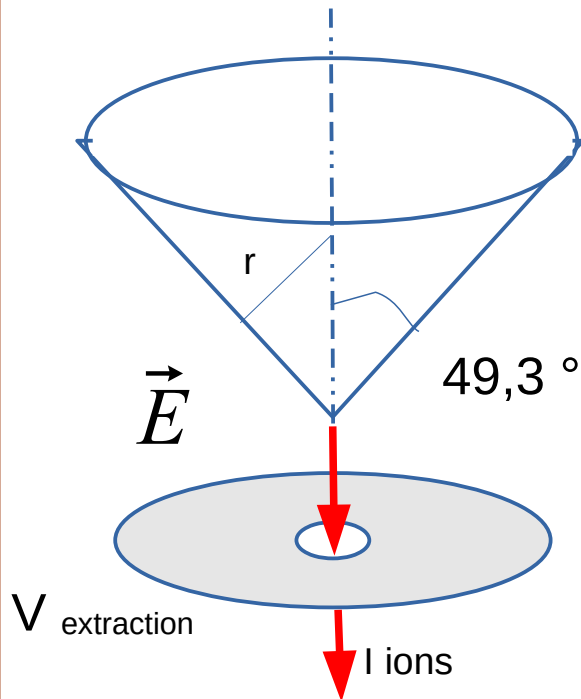
Principe de base d'une source LMIS



Le fonctionnement d'une source LMIS dépend d'un jeu complexe entre les effets **ElectroHydrodynamiques** (EHD) sur

- Le liquide ionisé
- L'émission des ions
- Les effets de charges locales

Principe d'émission des ions dans une source LMIS



Création d'un cône du liquide sous un champ électrique

→ Le cône de Gilbert-Taylor

Les atomes subissent

Les forces de tension de surface

Les forces électrostatiques

Condition d'équilibre de Taylor

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{2\gamma}{r}$$

γ = tension de surface

ϵ_0 = permittivité du vide

γ Ga = 0,7 N/m à temp ambiante

Lorsque le champ électrique est de l'ordre de 10 V/nm, il y a évaporation de la matière

→ Flux de liquide dans le cône

L'équation qui régit cet équilibre dynamique doit tenir compte de ce flux de matière

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{2\gamma}{r} + \frac{1}{2} \rho v^2$$

→ Terme de Bernoulli
Pression du fluide dû à
un flux non visqueux

→ Protrusion : Déformation de l'apex du cône (observé par P Sudraud et Ben Assayag 1985)

→ Emission d'ions : Mécanisme d'évaporation sous champ (Field evaporation)

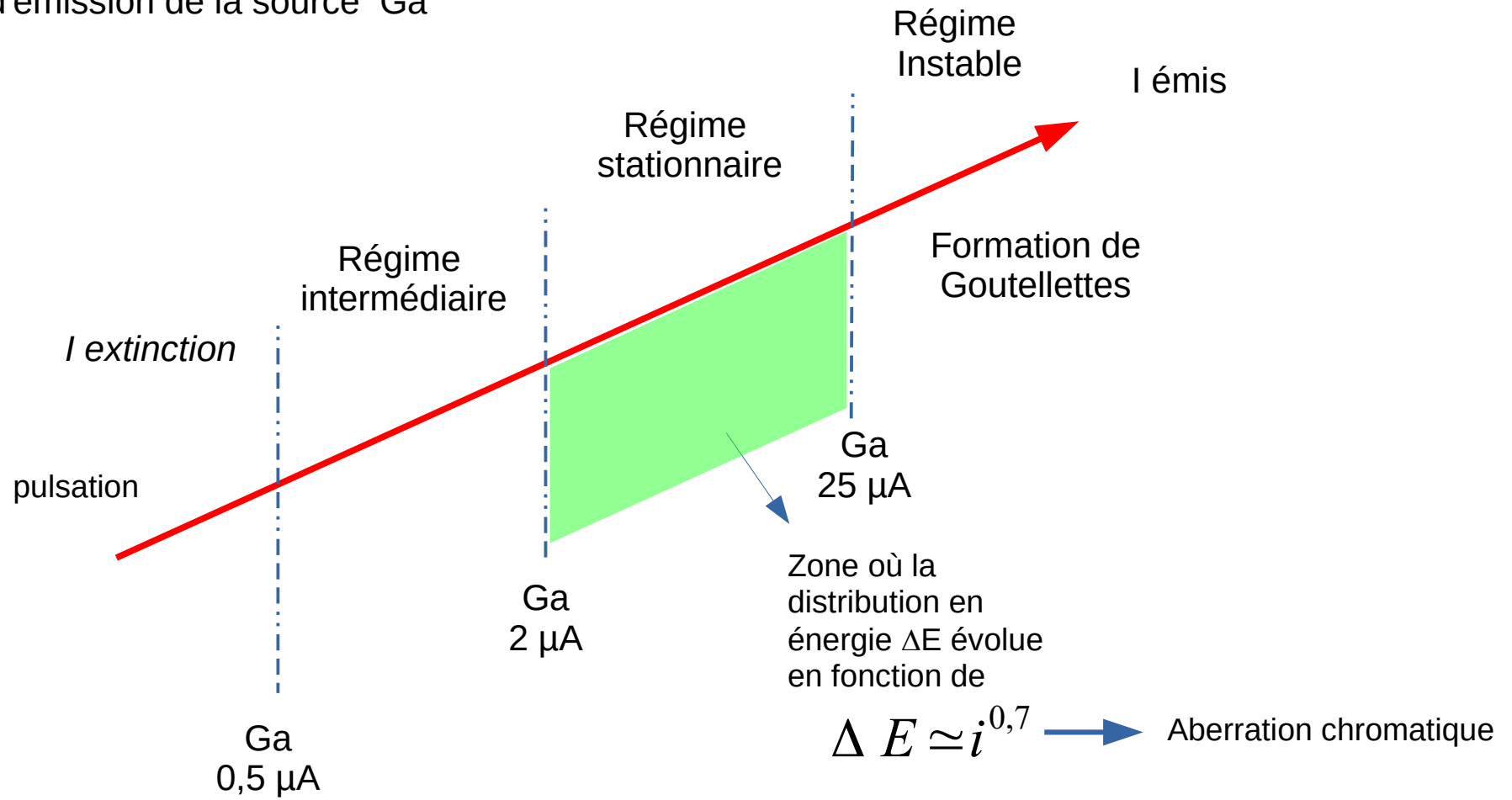
Domaine de fonctionnement d'un canon avec une source LMIS

La caractéristique du courant émis I en fonction de la tension d'extraction n'est pas linéaire

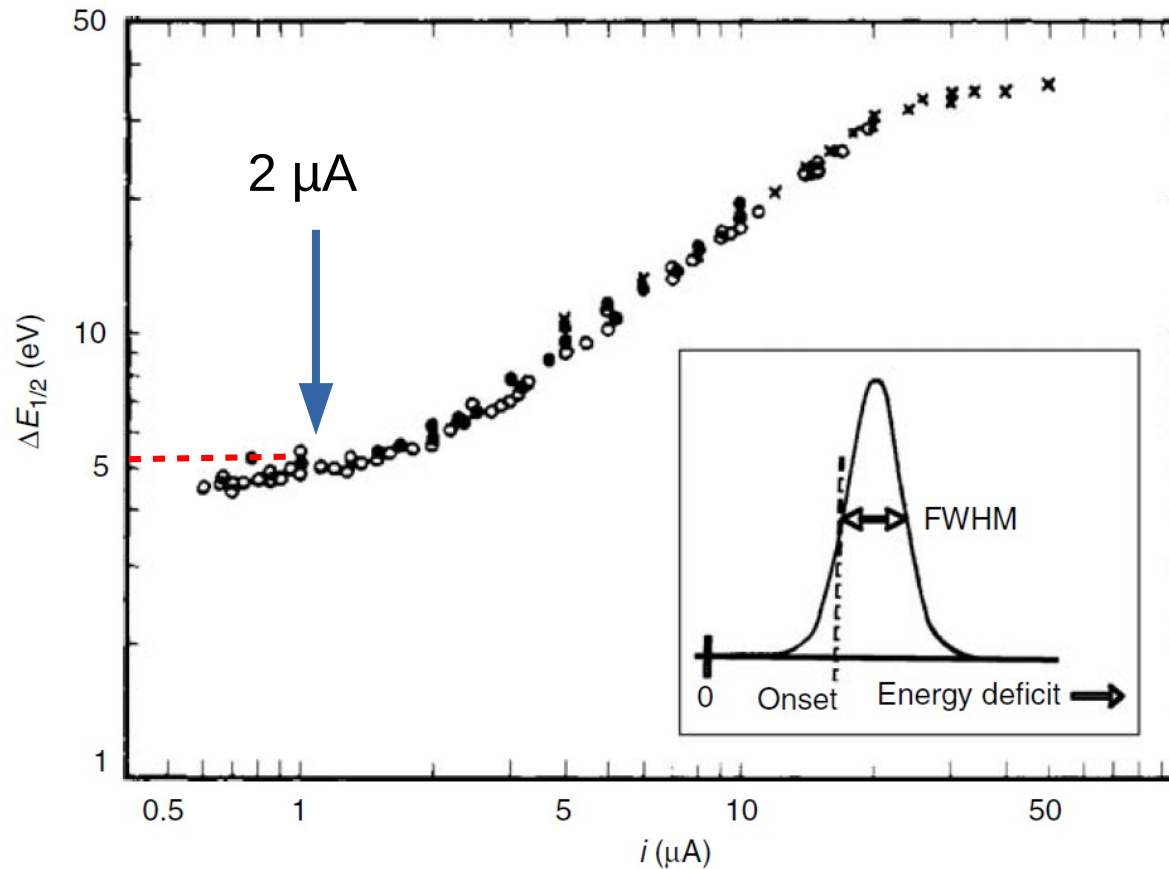
Il existe une tension d'extraction V_c critique pour l'émission car il faut former le cône

Cette V_c dépend de la géométrie de l'émetteur, la rugosité de sa surface, ... $50 \text{ V} < V_c < 10 \text{ kV}$

Régime d'émission de la source Ga



2 μA est une valeur classique de régime d'émission du canon



Doc. Orloff

Evolution de la dispersion en énergie d'une source LMIS de Ga en fonction du courant d'émission

Cela conditionne les aberrations chromatiques

Pourquoi le Ga s'est imposé pour les sources LMIS :

- Température de fusion basse $T_f = 29\text{ °C}$
- Pression de vapeur saturante faible
- Faiblement réactif chimiquement
- Production d'ions = quasiment que Ga^+
Rapport $\text{Ga}^{2+}/\text{Ga}^+ = 10^{-4}$
L'espèce Ga^+ est largement dominante
- Ion Ga^+ est un ion lourd $\text{Masse atomique} = 69$
Permettant la pulvérisation de la matière avec un rendement important

Mais il existe d'autres sources de métal ou d'alliage liquide

De nombreux travaux ont montré la possibilité d'utiliser d'autres sources d'ions

Suivant les applications attendues :

- Limitation de l'endommagement en imagerie
- Implantation (sans masque)
- Création de motif direct
- Eviter la contamination du Ga

Liste non exhaustive

Source LMAIS

Liquid Metal Alloying Ion Source

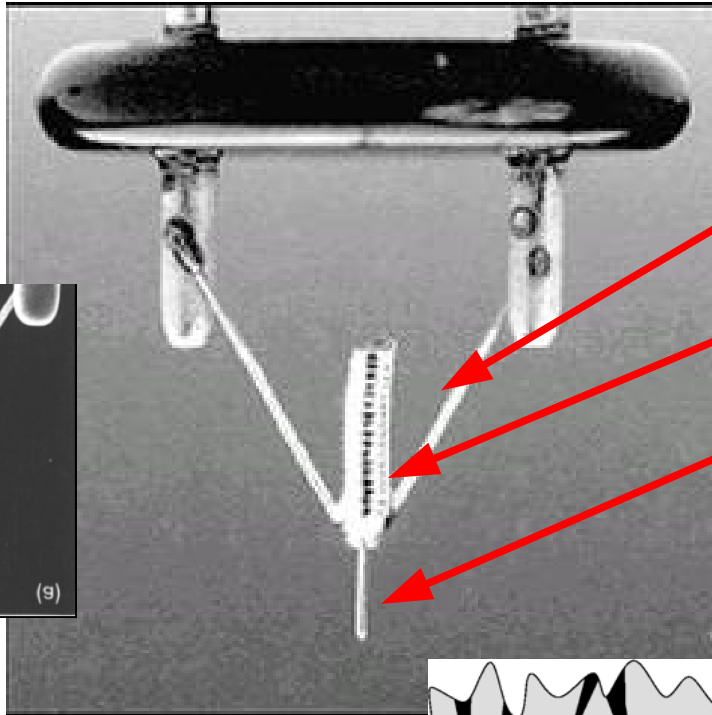
Intérêt : Alliage pour avoir un point de fusion plus bas et des faibles pressions de vapeur saturante.

+ AuSi, AuGe, GaBi, GaBiLi, AsPdBi, CoNd, MgGa, GePd

	Type of LMIS	Most intensive fraction of ions
1	AgGe	Ge ⁺⁺ , Ge ⁺ , Ag ⁺
2	AgAuGe	Ge ⁺⁺ , Ge ⁺ , Ag ⁺ (Au ⁺⁺), Au ⁺ , AuGe ⁺
3	AuBeSi	Be ⁺⁺ , Be ⁺ , Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
4	AuBGeNi	Ni ⁺⁺ , Ni ⁺ , Ge ⁺⁺ , Ge ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺ , AuGe ⁺ , Au ₂ Ge ⁺
5	AuCeSi	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Ce ⁺⁺ , Ce ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
6	AuCoGe	Co ⁺⁺ , Co ⁺ , Ge ⁺⁺ , Ge ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺ , AuGe ⁺ , Au ₂ Ge ⁺
7	AuCrGe	Cr ⁺⁺ , Cr ⁺ , Ge ⁺⁺ , Ge ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺ , AuGe ⁺ , Au ₂ Ge ⁺
8	AuDyGe	Ge ⁺⁺ , Ge ⁺ , Dy ⁺⁺ , Dy ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺ , AuGe ⁺
9	AuDySi	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Dy ⁺⁺ , Dy ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₃ ⁺⁺ , Au ₂ ⁺
10	AuErSi	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Er ⁺⁺ , Er ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
11	AuEuSi	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Eu ⁺⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
12	AuFeGe	Fe ⁺⁺ , Fe ⁺ , Ge ⁺⁺ , Ge ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺ , AuGe ⁺ , Au ₂ Ge ⁺
13	AuGdSi	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Gd ⁺⁺ , Gd ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
14	AuGeMn	Mn ⁺⁺ , Mn ⁺ , Ge ⁺⁺ , Ge ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , AuGe ⁺ , Au ₂ ⁺ , Au ₂ Ge ⁺
15	AuGeNi	Ni ⁺⁺ , Ni ⁺ , Ge ⁺⁺ , Ge ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺ , AuGe ⁺ , Au ₂ Ge ⁺
16	AuGeV	V ⁺⁺ , Ge ⁺⁺ , Ge ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺ , AuGe ⁺ , Au ₂ Ge ⁺
17	AuHoSi	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Ho ⁺⁺ , Ho ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
18	AuLaSi	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , La ⁺⁺ , La ⁺ , La ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
19	AuNdSi	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Nd ⁺⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
20	AuSbSi	
21	AuSiSm	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Sm ⁺⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
22	AuSiTb	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Tb ⁺⁺ , Tb ⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
23	AuSiTm	Si ⁺⁺ , Si ⁺ , Tm ⁺⁺ , Au ⁺⁺ , Au ⁺ , Au ₂ ⁺
24	BPt	B ⁺⁺ , B ⁺ , Pt ⁺⁺ , Pt ⁺
25	Bi	Bi ⁺⁺ , Bi ⁺ , Bi ₃ ⁺⁺ , Bi ₂ ⁺ , Bi ₅ ⁺⁺ , Bi ₃ ⁺ , Bi ₄ ⁺ , Bi ₅ ⁺
26	BiGaIn	Ga ⁺ , Bi ⁺ , In ⁺
27	CoDy	Co ⁺⁺ , Co ⁺ , Dy ⁺⁺ , Dy ⁺
28	CuP	P ⁺ (Cu ⁺⁺), Cu ⁺
29	CuPPt	P ⁺⁺ , P ⁺ (Cu ⁺⁺), Cu ⁺ , Pt ⁺⁺ , PtP ⁺⁺ , PtP ⁺ , Pt ⁺
30	DyNi	Ni ⁺⁺ , Ni ⁺ , Dy ⁺⁺ , Dy ⁺
31	Ga	Ga ⁺
32	GaIn	Ga ⁺ , In ⁺
33	GaZn	
34	GeNiTi	Ti ⁺⁺ , Ni ⁺⁺ , Ge ⁺⁺ , Ti ⁺ , Ni ⁺ , Ge ⁺
35	HoNi	Ni ⁺⁺ , Ni ⁺ , Ho ⁺⁺
36	In	In ⁺
37	Sn	Sn ⁺⁺ , Sn ⁺ , Sn ₂ ⁺⁺ , Sn ₃ ⁺⁺ , Sn ₄ ⁺⁺ , Sn ₅ ⁺⁺

D'après Prof. A. Wieck - RUB

Technologie LMIS pour Ga

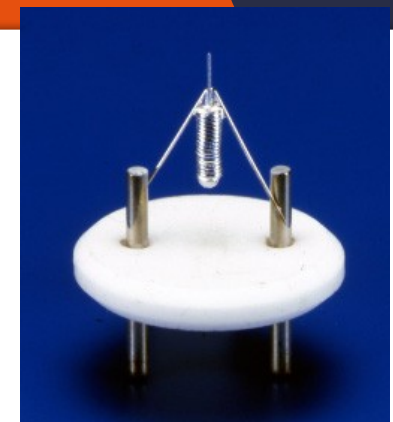


Fil de chauffage en forme de boucle

Réservoir de Ga

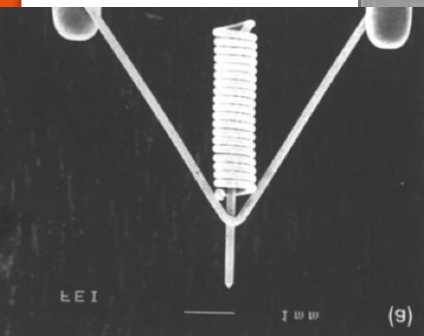
Aiguille en W

Fabrication délicate surtout lors de l'opération d'ajout du Ga pour mouiller la pointe : nécessiter de travailler très proprement



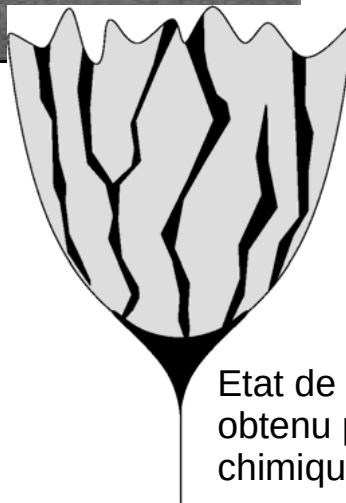
Ga LMIS - Denka

Diamètre corps = 200 μm
 Rayon de courbure à l'apex = 1 – 5 μm

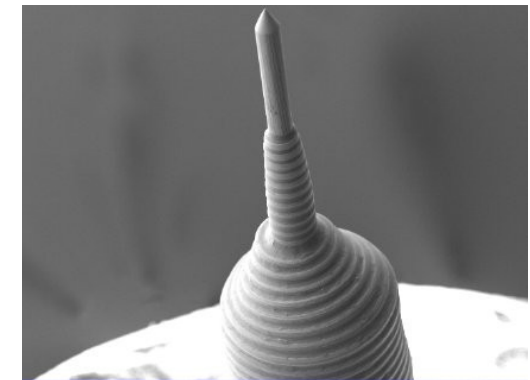


Avant ajout du Ga

LMIS de Ga FEI



Etat de surface rugueux obtenu par une attaque chimique (KOH ou NaOH)




LMIS de Ga Orsay Physics Tescan

Le chauffage de la pointe est soit

- Direct comme dans le cas du Ga – le courant passe au travers de la structure
- Indirect comme dans le cas des alliages – pas de contact entre le chauffage et l'aiguille

Le Ga peut s'oxyder : fonctionnement sous UltraVide

Caractéristiques de la source LMIS Ga

- Taille de la source apparente ≈ 50 nm
La zone d'émission des ions est de quelques nm
MAIS en raison des effets des **charges d'espace importants**, il y a une augmentation de la taille apparente de la source
- Densité de courant $J_0 \approx 10^6$ A cm⁻² Importante
- Distribution énergétique $\Delta E \approx 5$ eV à faible courant
 **Aberration chromatique importante**
- Brillance $\approx 10^6$ Acm⁻²sr⁻¹
- Intensité angulaire $I_{\text{ang}} \approx 15$ μ A sr⁻¹
- Distribution angulaire large FWHM : de 25° à 35 °
- Durée de vie d'une source 2000 h – 3000 h

MEB FEG

Taille de la source apparente
< 10 nm

$J_0 \approx 10^4 - 10^5$ A cm⁻²

$\Delta E < 1$ eV

$B \approx 10^7 - 10^8$ Acm⁻²sr⁻¹

Les sources à ionisation gazeuse - GFIS

Un mot sur ces sources obtenues avec un Gaz plutôt qu'un liquide comme source ionique

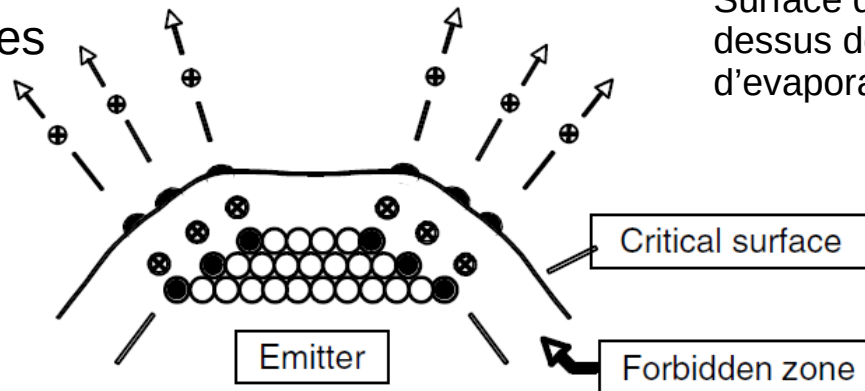
GFIS = Gaz Field Ionisation Source

Principe :

Condition Cryogénique < 100 K

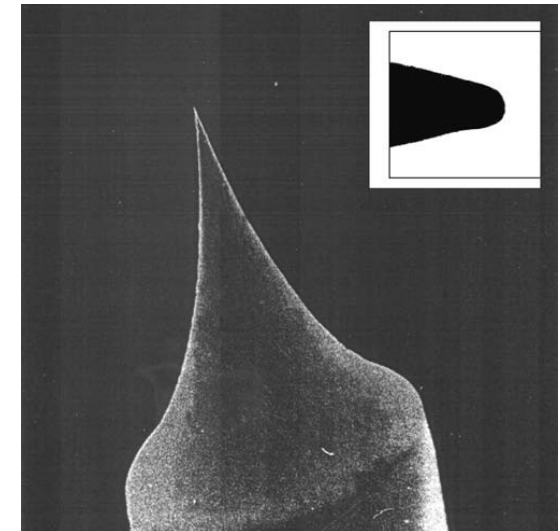
He
atomes

Surface d'ionisation au
dessus de la surface
d'évaporation

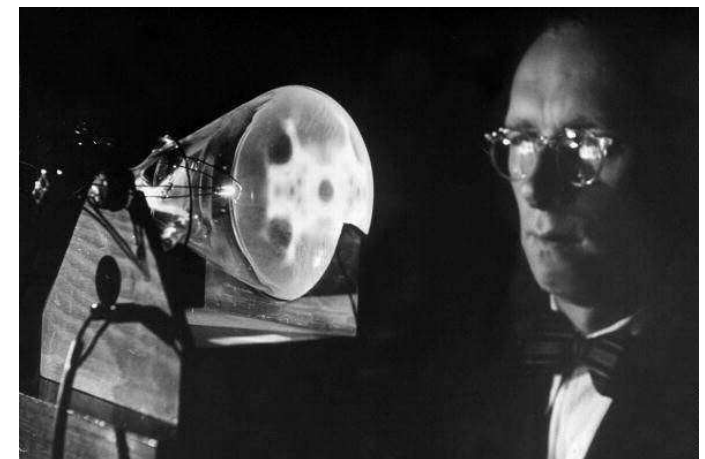


- Emitter atom
- Protruding atom
- ◐ Ionization zone
- ⊕ Imaging-gas ion
- ⊗ Field-adsorbed atom

*Doc. Orloff – 2 nd edition-
Chap 3*

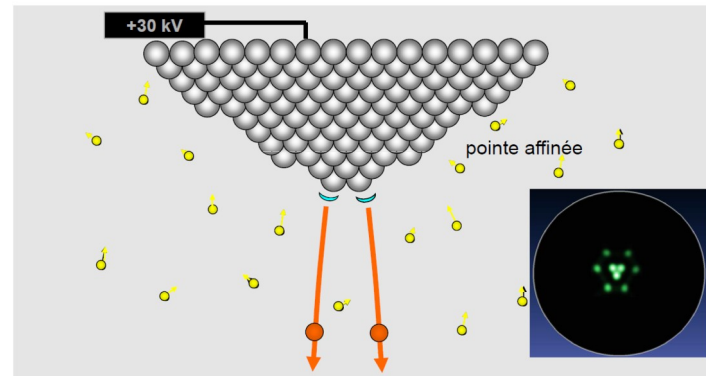
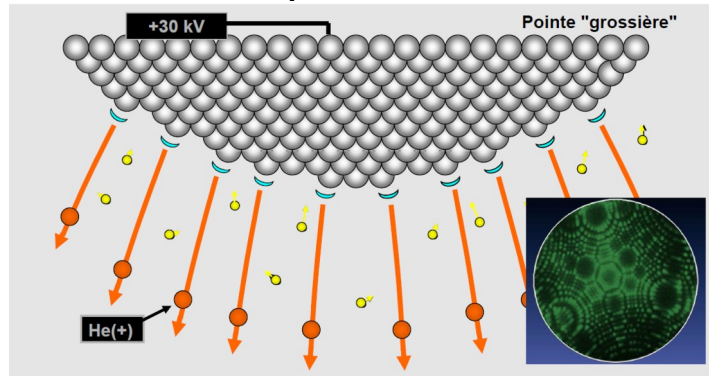


Conventionnel W Muller
émetteur



Erwin Müller – (1911 -1977)

Suivant la forme de la pointe



Doc. Zeiss

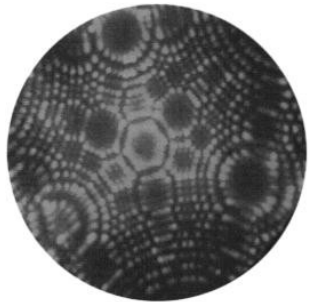
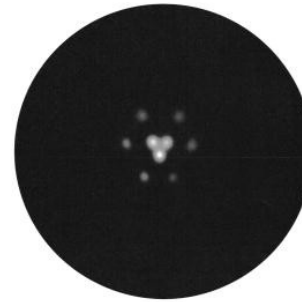


Image de la distribution atomique de la pointe par He – Pointe large



Pointe fine pyramidale en W. Procédé ALIS 3 atomes en pointe TRIMER

Une application s'est particulièrement développée avec un microscope ionique FIM

Le faisceau ionique est issu uniquement d'un seul atome du Trimer par un diaphragme de sélection

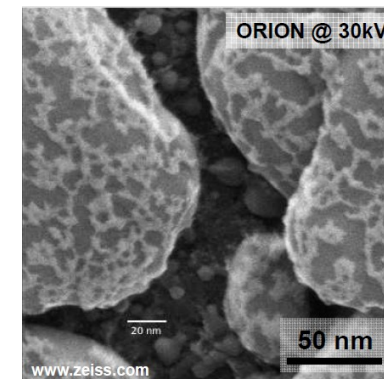
Forte brillance $4 \cdot 10^9 \text{ Acm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$

Courant ionique faible inférieur à 2 pA

Sonde ionique < 0,35 nm

Aberration diffraction négligeable

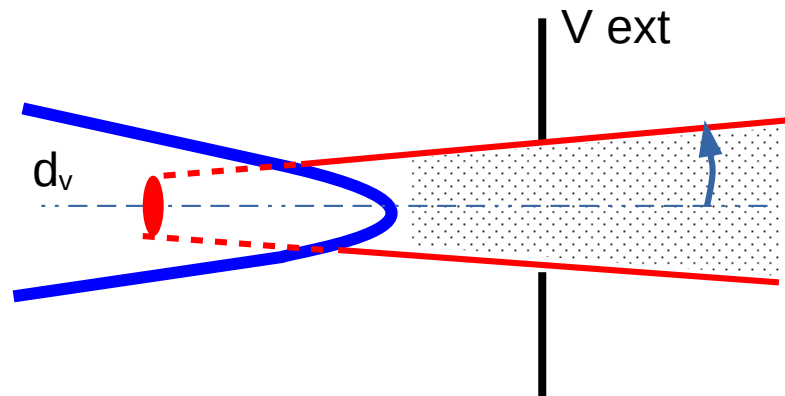
$\Delta E < 1\text{eV}$



B. W. Ward and al., *J. Vac. Sci. Technol. B* 24, 2871–2874 (2006)

Les sources plasmas

Les sources LMIS présentent des limitations principalement à fort courant
Et donc des limitations pour abraiser des gros volumes avec des temps raisonnables.



$$\alpha \sim 20^\circ$$

$$d_{\text{virtuel}} \sim 50 \text{ nm}$$

$$\text{Brillance} \sim 1 \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{V}^{-1}$$

$$I_{\text{angulaire}} \sim 15 \mu\text{Asr}^{-1}$$

Source LMIS très bonne résolution à faible courant

Mais pour des applications à forts courant ($I_{\text{sonde}} > 100 \text{ nA}$)

Le fait que l'intensité angulaire soit faible nécessite d'avoir un faisceau fortement ouvert (α grand)

Contribution des aberrations sphériques : $C_s \alpha^3$!!

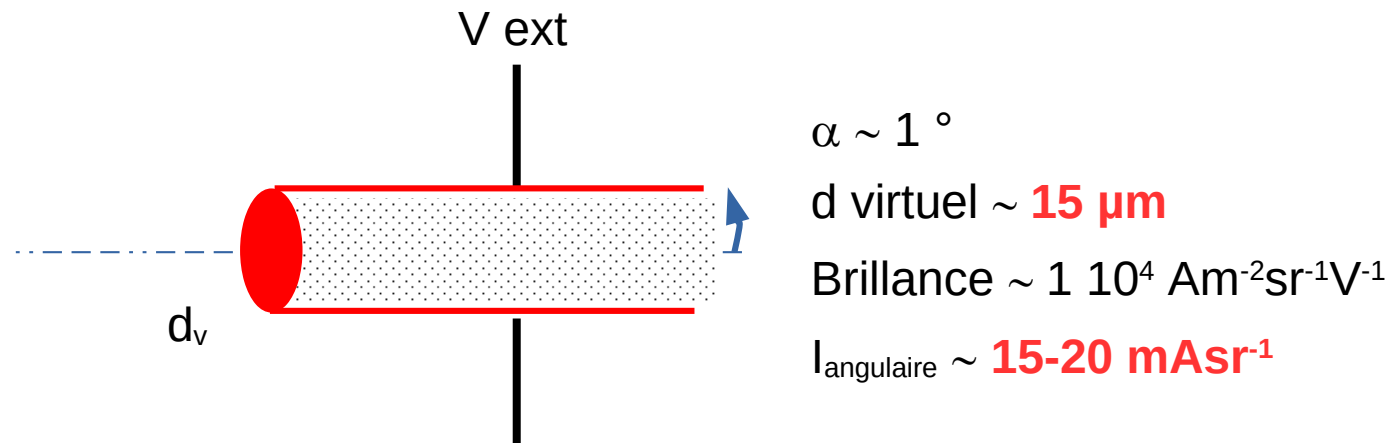
Or le diamètre de sonde au niveau échantillon dépend de : $d_s = (d_g^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_d^2)^{1/2}$

$$C_s \alpha^3$$

Pour abraser des gros volumes en des temps raisonnables :
Utiliser des ions « plus lourd » pour éjecter plus de matière
Et
Avoir un courant de sonde plus important

→ Les sources plasmas

Par conception les sources plasmas ont une intensité angulaire importante et donc permettent d'atteindre des courants de sonde avec des tailles de spot raisonnables pour imager.

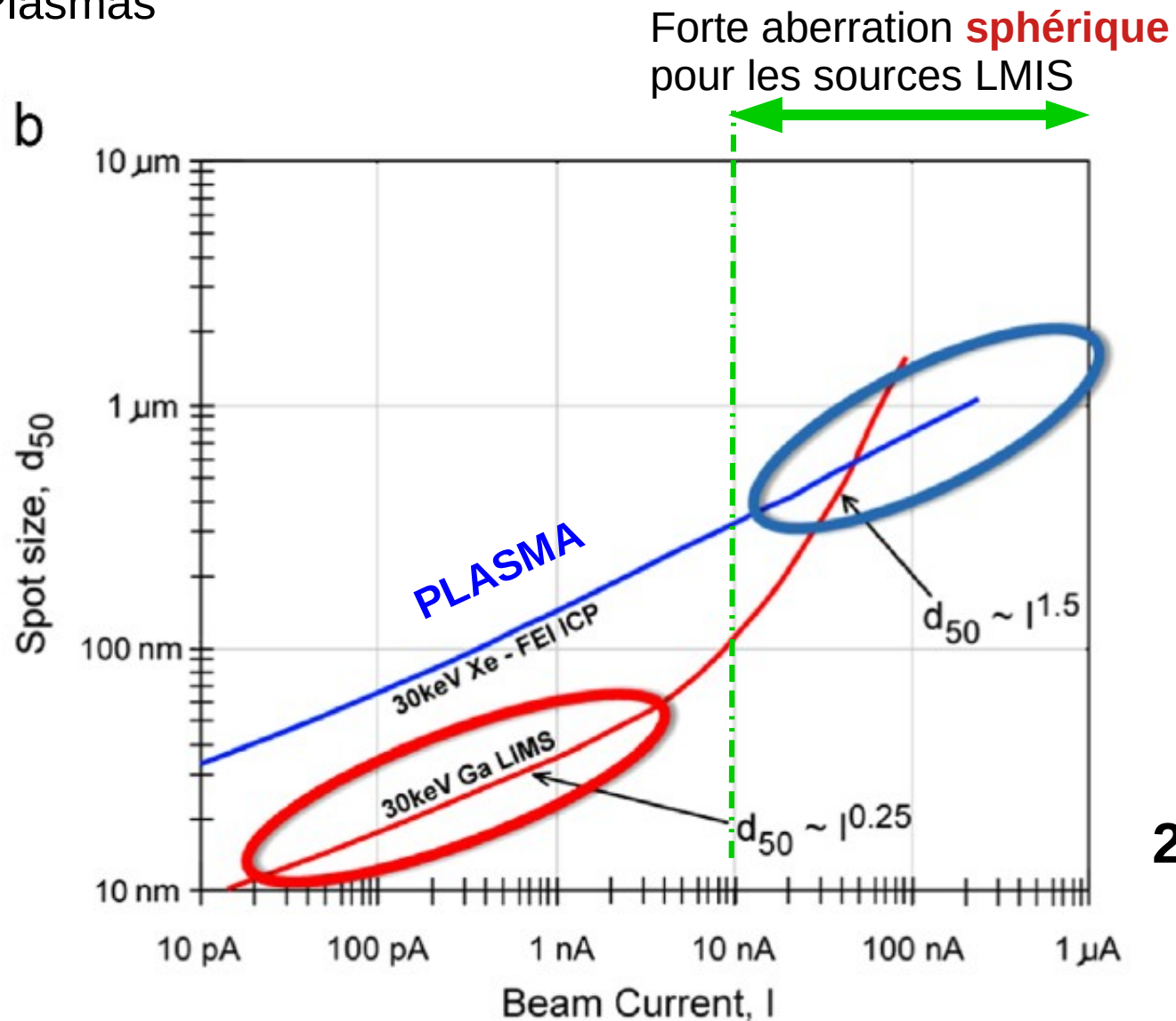


α faible donc des aberrations sphériques faibles $C_s \alpha^3$ faible

Densité des ions importante donc fort courant possible (domaine « μa »)
MAIS résolution moins bonne ...suffisante pour imager

Actuellement les sources plasmas sont principalement des plasmas Xe, même si on trouve aussi des sources Ar, O, N

Les sources Plasmas



2006

Evolution du diamètre de sonde final (spot size) à d_{50} en fonction du courant de sonde. d_{50} est le diamètre de la sonde contenant 50 % du courant de sonde.

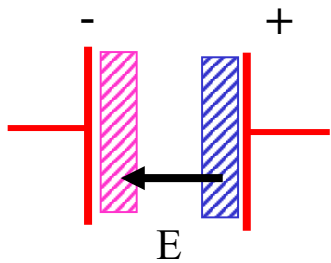
N.S. Smith and al, *J. Vac. Sci. Technol. B* 24, 2902–2906 (2006) <https://doi.org/10.1116/1.2366617>

Production du plasma

Les plasmas froids (Plasma de laboratoire) sont produits par un transfert d'énergie électrique à un milieu gazeux.

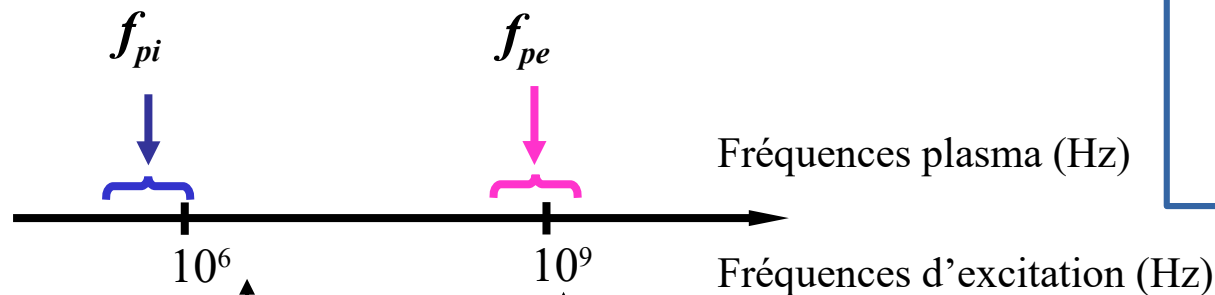
Etape d'amorçage (augmentation de la conductivité du gaz neutre) et de l'entretien du plasma (maintien de l'ionisation des entités).

Plusieurs technologies : soit par une décharge à courant continu (DC) ou alternatif (AC) par Radio-Fréquence (RF) ou Micro-Onde.



Sous l'action du champ électrique alternatif

Oscillations collectives des électrons et des ions



13,56 MHz

2,45 GHz

Radio Fréquence
RF

Micro ondes

Fréquences attribuées par ITU
International Telecommunication Union

A basse fréquence

$$f < f_{pi} \ll f_{pe}$$

Ions et électrons suivent les oscillations de E

Au Radio Fréquence (RF)

$$f_{pi} < f < f_{pe}$$

Electrons suivent la variation,

Au Fréquence MicroOnde (MO)

$$f_{pi} \ll f = f_{pe}$$

Ion sensible à la valeur moyenne

Fréquence propre du plasma
électronique f_{pe} et ionique f_{pi}

$$f_{pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q^2 \times n_i}{\epsilon_0 \times m_i}}$$

$$f_{pe} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q^2 \times n_e}{\epsilon_0 \times m_e}}$$

Plusieurs types de reacteur plasma avec des modes de couplage différent :

Générateur électrique
Continu
Alternatif

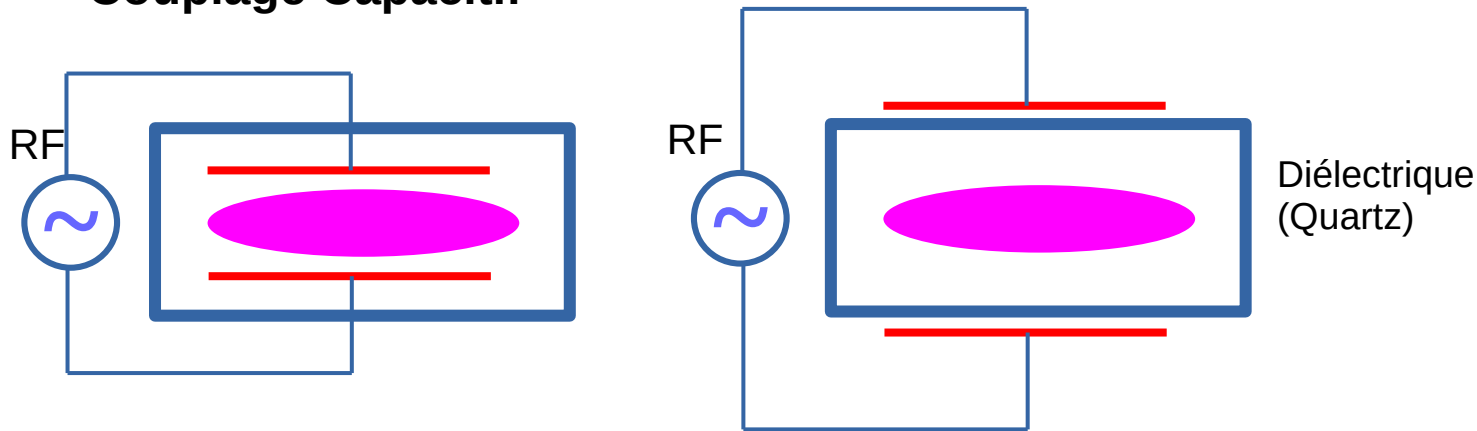


Plasma

Couplage

Capacitif, Inductif, ...

Couplage Capacitif



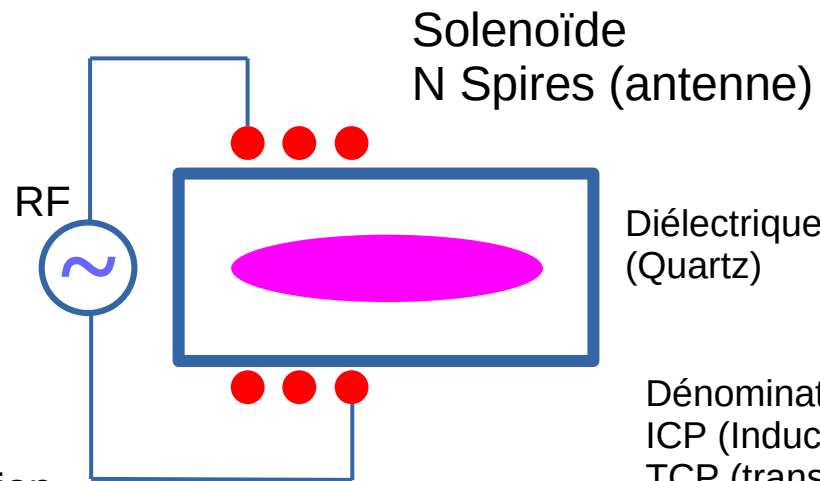
Couplage Capacitif
très répandu pour
créer des plasmas
mais limitation car
densité ionique faible

$N_e < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Couplage Inductif

Decouverte ne
1884 par Hittorf
Regain d'intérêt
dans les années
1980.

Dans ce cas là , pas de pulvérisation
de la cathode liée aux ions produits

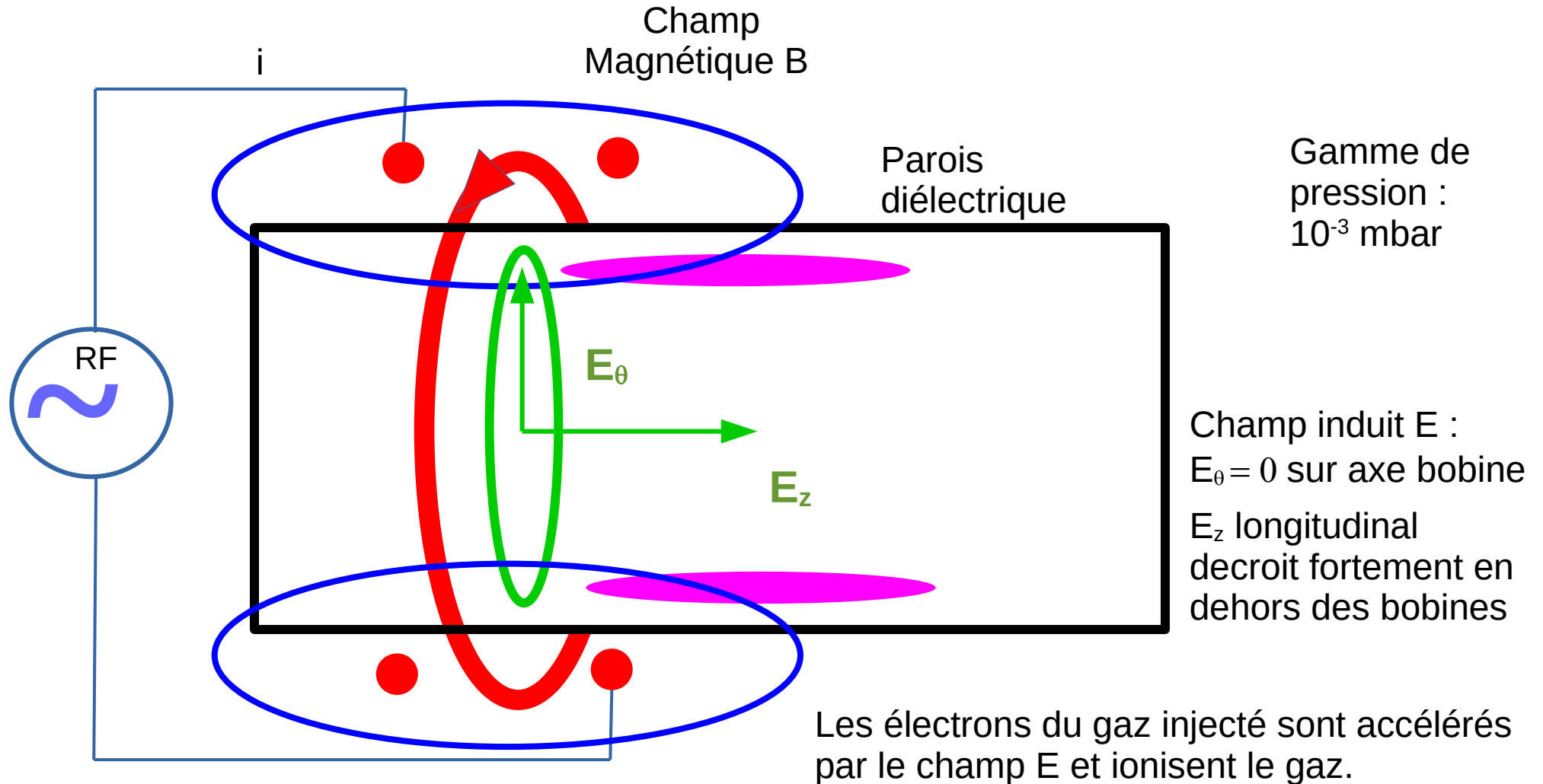


Forte densité
ionique.

$N_e < 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

Dénomination de ces sources :
ICP (Inductively Coupled Plasma),
TCP (transformer coupled plasmas),
RFI (Radio-Fréquence Inductive)

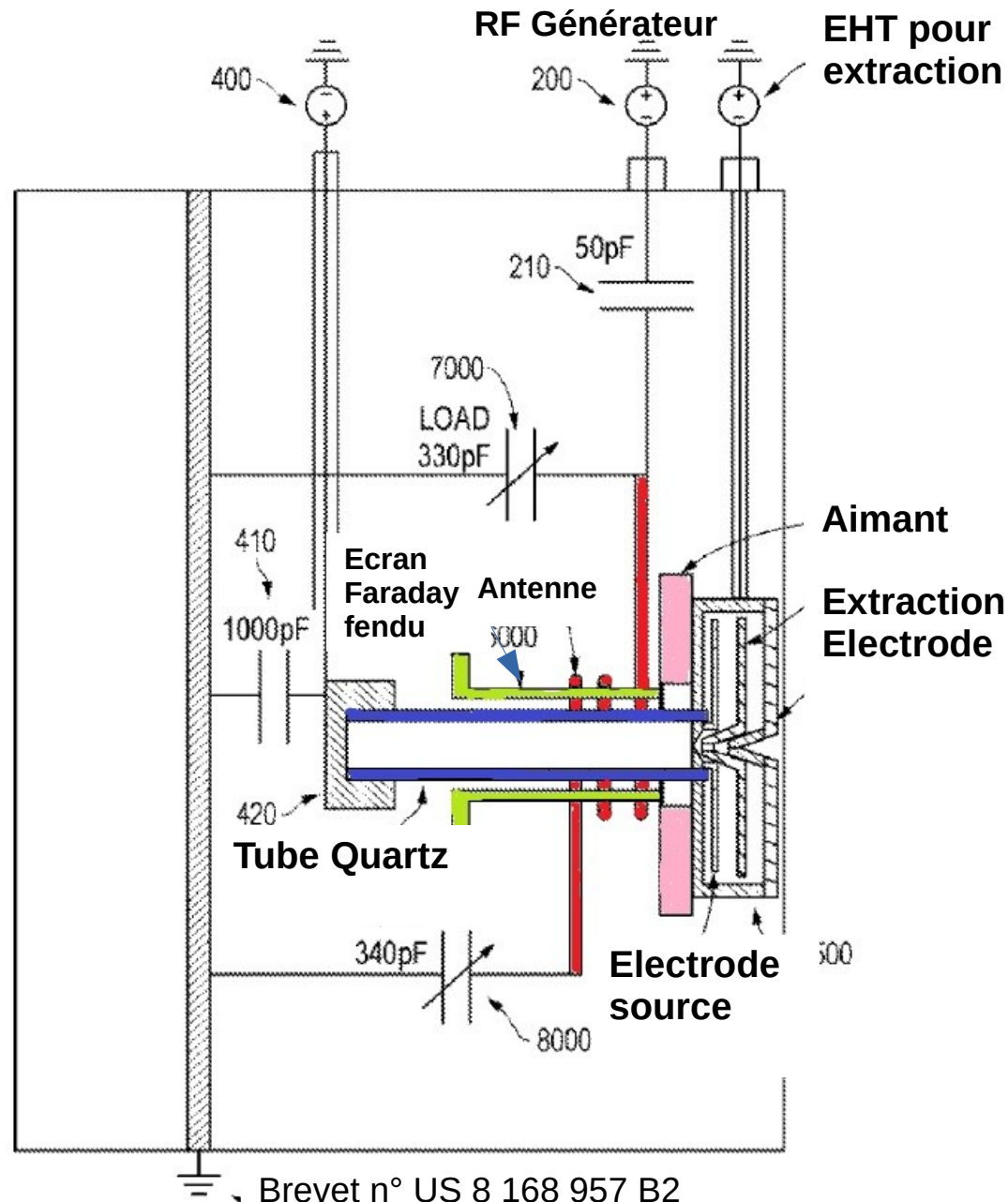
Source de plasma inductive de type ICP (Inductively Coupled Plasma)



L'épaisseur de la peau (δ)
correspondant à la zone
de transfert d'énergie

Couplage essentiellement inductif (H mode) mais il existe une
composante de couplage capacitif entre spires et plasma au travers
de la fenêtre diélectrique (E mode)

Source ICP magnétiquement augmenté pour FIB



Tube de quartz en bleu diamètre 20 mm

Systeme d'accord composé de différents condensateurs

Antenne hélicoïdale de 3 spires en rouge

Aimant (200- 1000 Gauss) en rose pour augmenter la densité du plasma.

Testé ici pour une source Ar

Brevet n° US 8 168 957 B2
J. Keller, N. Smith and al.

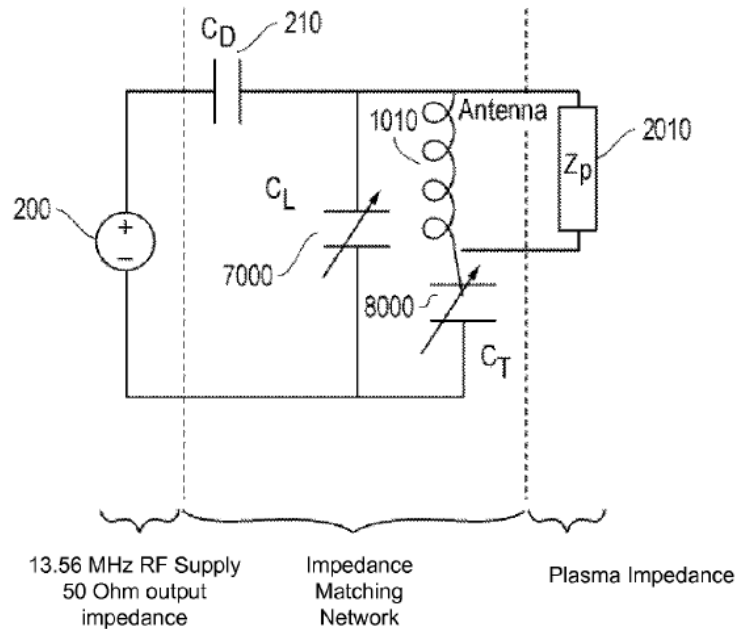
2012

Importance de la « boîte d'accord » entre l'antenne et le plasma

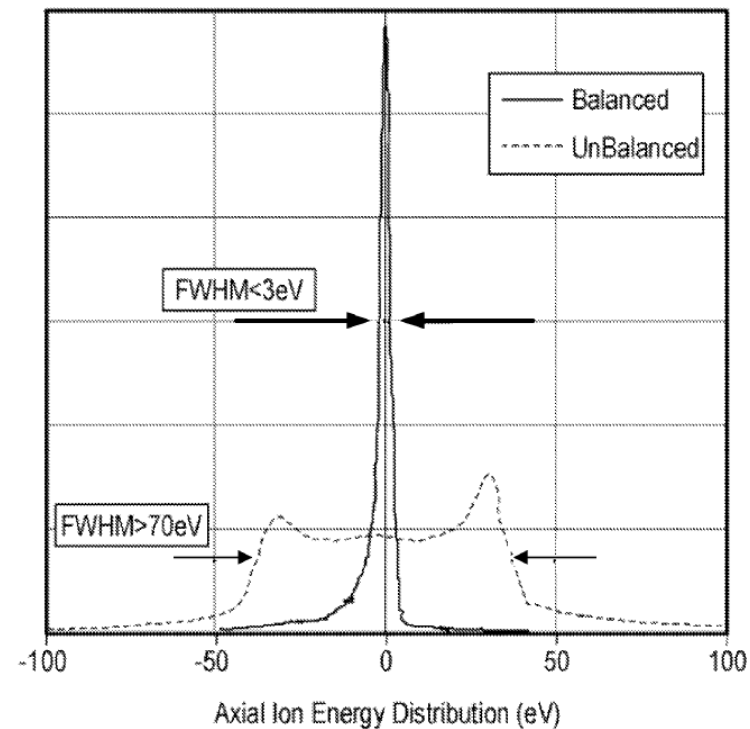
Le generateur RF peut conduire à une oscillation du potentiel du plasma
Et donc crée une forte distribution en énergie des ions.

Aberration chromatique importante $dc=C_c\alpha\Delta E/E$

Dans le cas où le déphasage de l'antenne par rapport au plasma est de 180° , la dispersion en énergie est réduite.

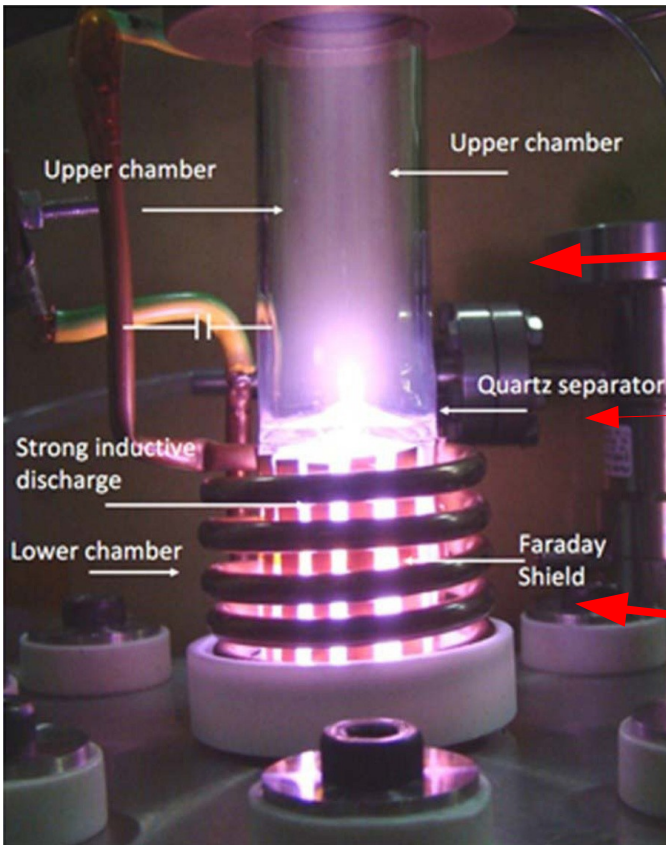


Brevet n° US 8 168 957 B2
J. Keller, N. Smith and al.



Developpement des sources ICP comme source FIB

Cas d'un démonstrateur d'une source Plasma ICP à 2 chambres



Chambre haute : Amorcage du Plasma par un effet capacitif

Fenêtre Quartz séparatrice

Chambre Basse : Création d'un Plasma à haute densité par un effet inductif.
La présence d'un écran faraday permet de couper le couplage capacitif

P. Y. Nabhiraj J. Vac. Sci. Technol. B
29(5), Sep/Oct 2011

Gaz Argon

Cette solution à 2 chambres permet de diviser par deux la puissance du générateur RF

→ Refroidissement à l'air est suffisant.

Autre principe de source plasma : la résonance cyclotronique électronique (RCE)

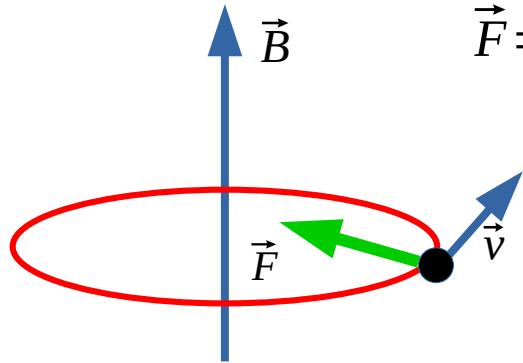
Principe : Un électron dans un champ magnétique permanent subit la force de Lorentz

$$\vec{F} = -e \vec{v} \wedge \vec{B}$$

La vitesse angulaire de l'électron est :

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e}$$

Pulsation cyclotronique électronique



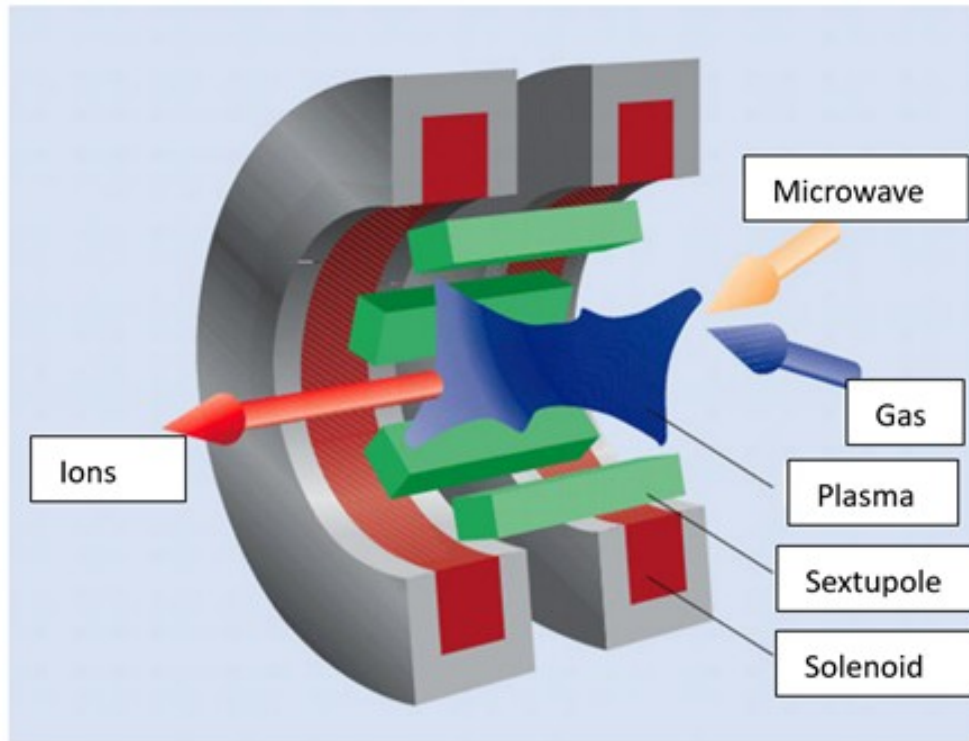
A ce champ B, un champ électrique E alternatif de pulsation ω est superposé.

Condition de résonance ECR : $\omega = \omega_{ce}$

Les plasmas RCE reposent sur le principe de la résonance cyclotronique électronique (RCE) qui nécessitent donc un champ magnétique statique (aimant permanent) et d'une onde électromagnétique qui sera ici dans le domaine des Micro-ondes.

Source plasma RCE

Au lieu d'avoir un générateur RF, l'excitateur est un générateur de Micro-Onde
Fréquence d'excitation = 2,54 Ghz



Doc Tescan

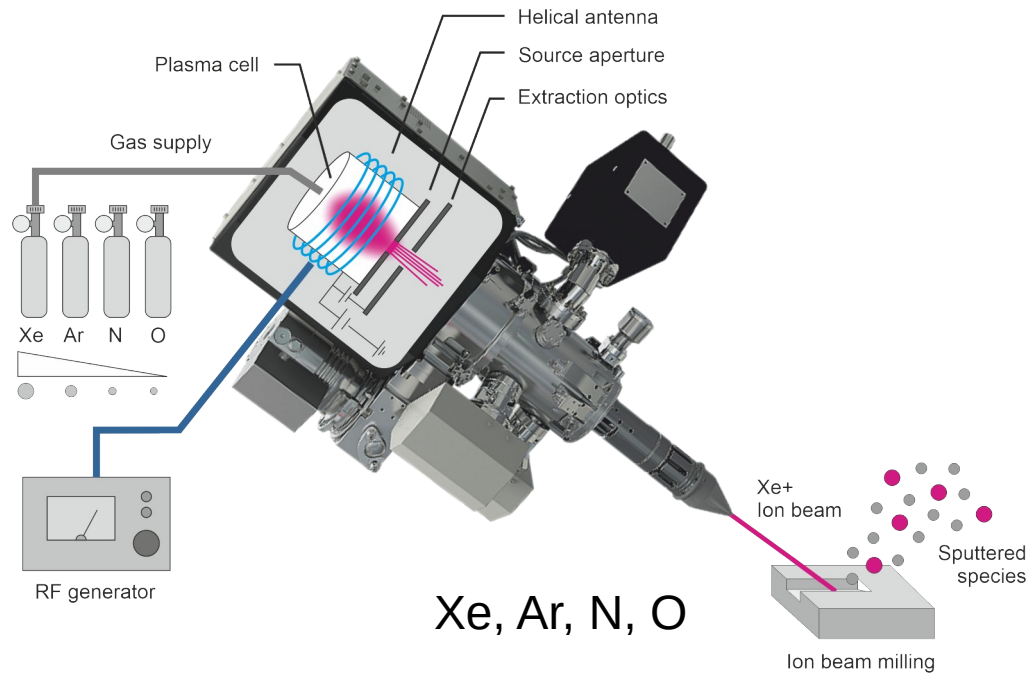
La résonance a lieu ici pour un champ B de 875 Gauss

L'excitateur est une onde microonde de haute fréquence (2,45 Ghz).
A la résonance, les électrons ont un libre parcours moyen plus important et donc augmentent leur énergie pour aller ioniser les atomes de gaz.

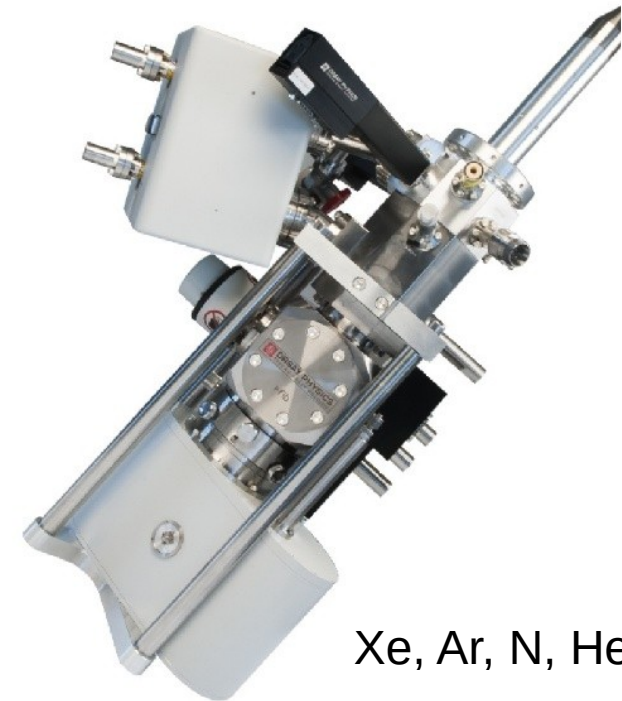
Domaine Basse Pression : 10^{-3} mbar

Ces sources ECR ont une forte densité angulaire et permet aussi d'avoir des courants ioniques de plusieurs μA .

Certains constructeurs proposent du multi-gaz comme source plasma avec la même colonne



doc Thermofisher
Hydra
Source type ICP

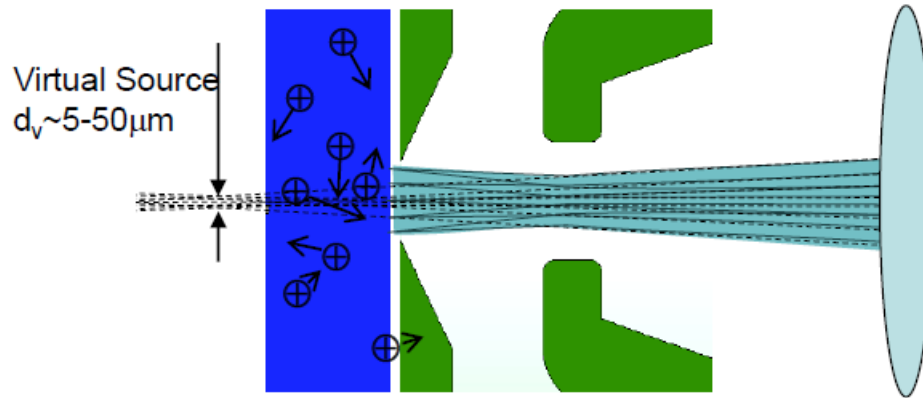


Xe, Ar, N, He, O

doc Tescan – Orsay Physics
HV Plasma FIB
Source type ECR

Emission du plasma de la source

Etape d'extraction des ions de la source



doc. Oregon Physics,
N.Smith and al

Etape importante pour limiter la divergence du faisceau , conserver les propriétés de la source (densité d'ions, ...). Ces electrodes ne doivent pas aussi être pulvérisées par le passage du fort courant ionique . Paramètres dimensionnelles et potentiel à optimiser



Optimiser pour avoir une

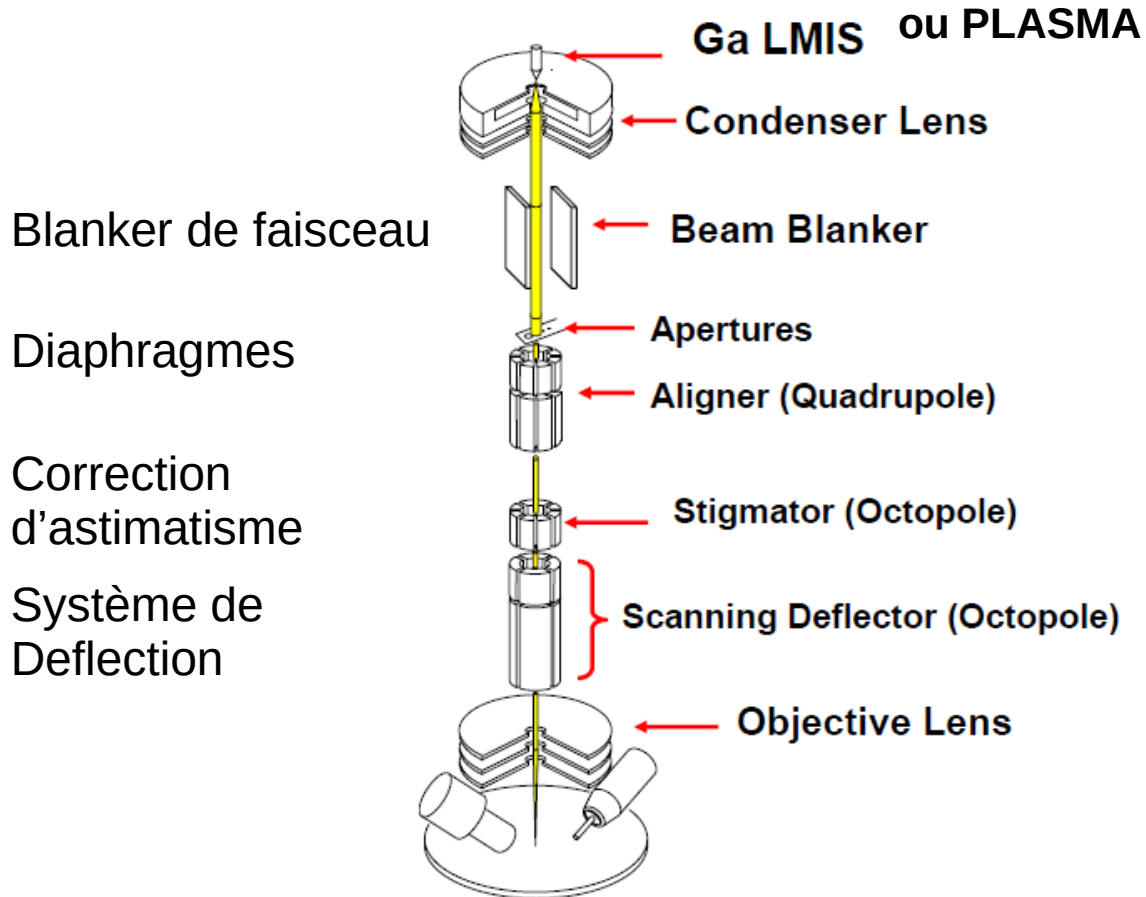
Forte densité ionique.
Forte densité angulaire

Avec la plus forte brillance possible

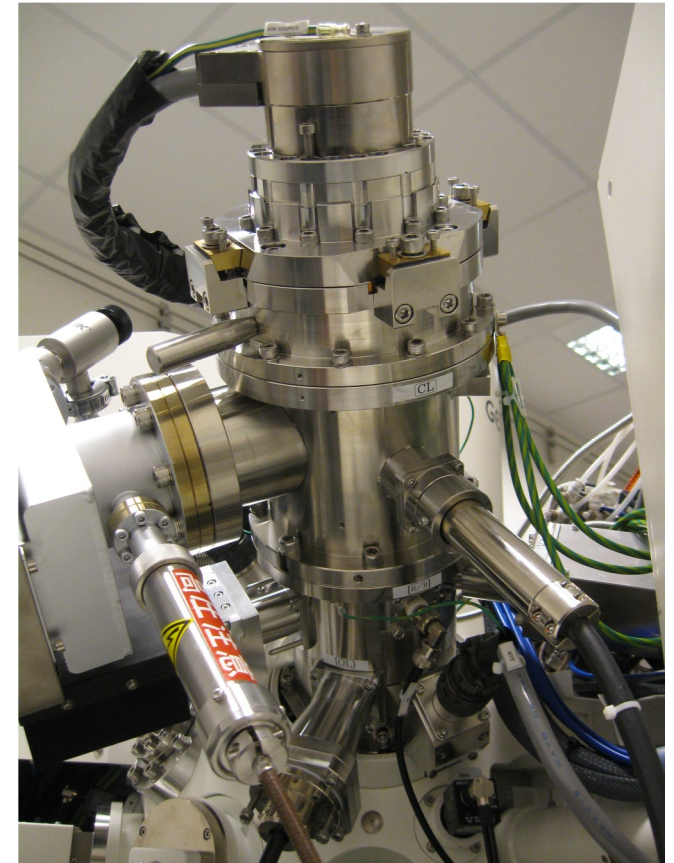
Néanmoins on trouve un schéma commun dans les colonnes ioniques :

Colonne à deux lentilles

Une lentille en position haute qui sert de condenseur
Et une lentille basse qui est l'objectif



Colonne Zeta - SII



Les Lentilles

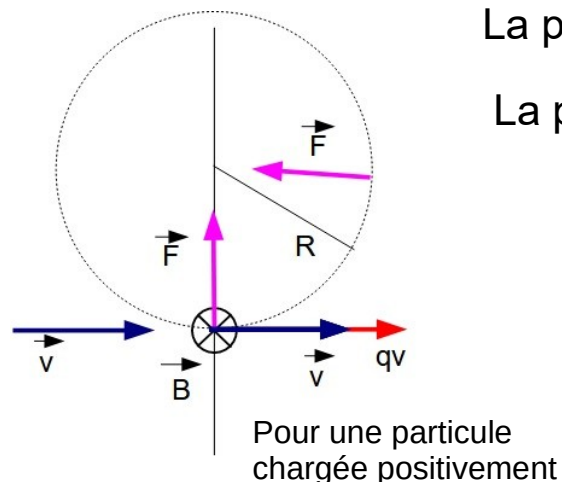
Trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique

Cas d'un champ uniforme normal à la trajectoire de la particule

La particule est soumise à $\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$

La particule prend une trajectoire circulaire

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$$



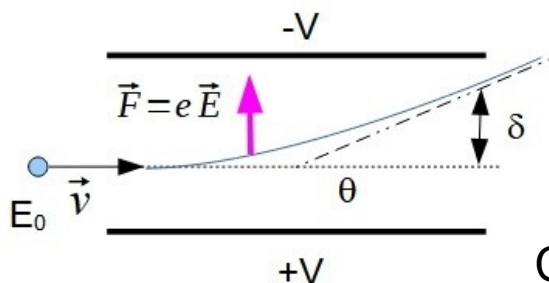
Le rayon de la trajectoire dépend du rapport m/q

$$m_{\text{Ga}} \sim 1,2 \cdot 10^{-25} \text{ kg} - m_{\text{Xe}} \sim 2,1 \cdot 10^{-25} \text{ kg} - m_e \sim 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_{\text{ion}} \sim x \cdot 10^6 m_e$$

➡ Très faible déviation des ions % électrons

Trajectoire d'une particule chargée dans un champ électrique



En sortie des électrodes, la déviation δ est avec un angle de :

$$\tan \theta = \frac{El}{2U}$$

La déviation de la particule ne dépend que du rapport E/U

C'est à dire de **l'énergie de la particule et du champ électrique**

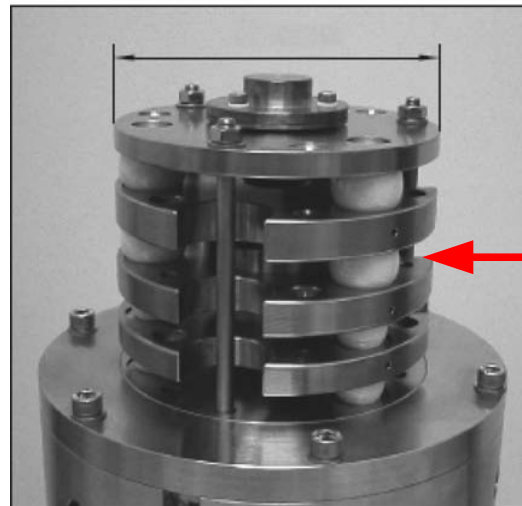
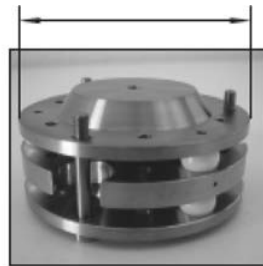
➡ **Indépendant de la MASSE de la particule**

Vers un choix de lentille ELECTROSTATIQUE

Les lentilles électrostatiques

Les lentilles électrostatiques sont généralement constituées :

- d'électrodes métalliques portées à un potentiel donné (fixe ou variable)
- percées d'un trou circulaire permettant le passage du faisceau
- positionnées et empilées avec précision sur un axe commun (Symétrie de révolution)



Isolation par des sphères de céramique

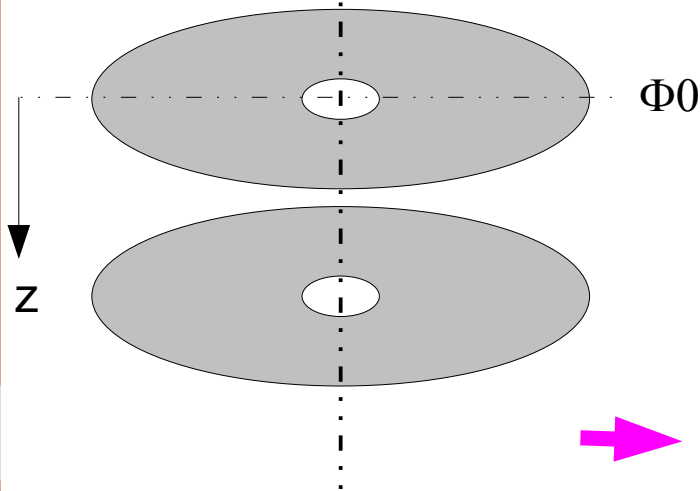
Exemple de lentilles électrostatiques

Fonctionnement d'une lentille électrostatique

Les lentilles sont de symétrie cylindrique

La connaissance de la distribution du potentiel électrique dans l'espace inter-électrode permet de déterminer les propriétés optiques de la lentille.

Axe optique



$$\phi(r, z) \quad ?$$

En **optique de Gauss** (trajectoires peu inclinées)

L'expression du potentiel s'exprime par

$$\phi(r, z) = \phi_0(z) - \frac{r^2}{4} \phi_0'' \quad \text{Avec} \quad \phi_0(z) = \phi(0, z)$$



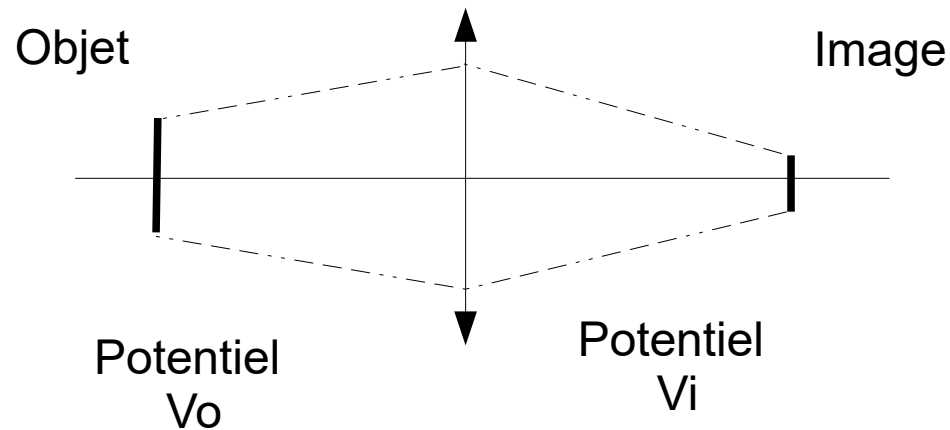
Equation différentielle de la trajectoire des particules $r(z)$

- Equation différentielle est linéaire , ce qui entraîne la propriété de stigmatisme
- Indépendance du rapport $\mathbf{E/m}$
- Analogie optique photonique

$$n^2 = \phi \quad n \text{ indice de réfraction du milieu}$$

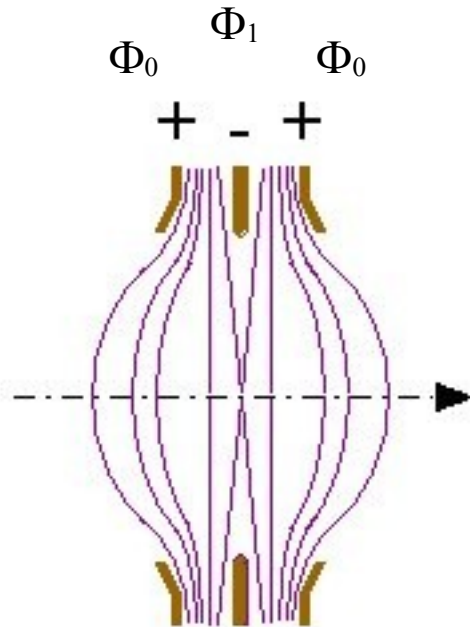
Indice continûment variable dans une lentille électrostatique

Type de lentille électrostatique



- Si $V_o \neq V_i$ La lentille est une lentille à immersion
L'objet et l'image sont immergés dans un champ électrique
- Si $V_o = V_i$ La lentille est une lentille unipotentielle ou lentille Einzel
Typiquement ces lentilles ont 3 électrodes

Lentille unipotentielle ou lentille Einzel



Les électrodes séparent deux régions de même indice

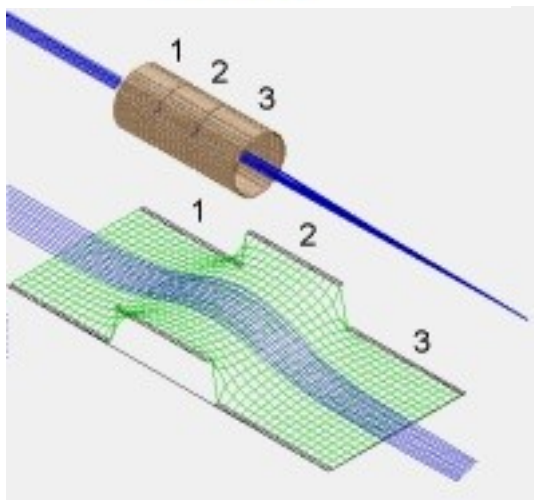
Le potentiel de l'électrode centrale tend à freiner les particules

La lentille est convergente

Dans le cas où $\Phi_1 > \Phi$ faisceau

Les particules ne peuvent plus passer cette barrière de potentiel

→ Miroir électrostatique



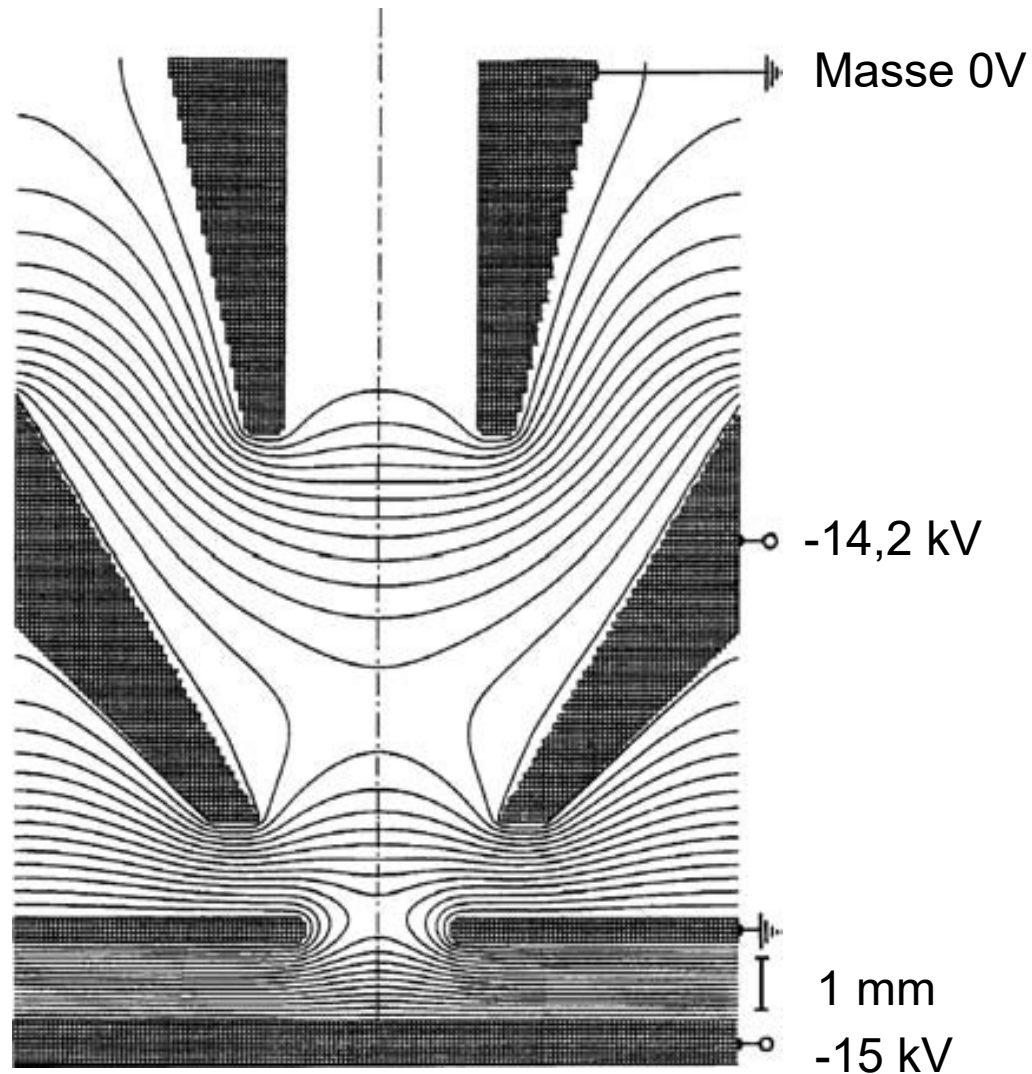
Rmg Des lentilles à immersion à 3 éléments peuvent être appelées une lentille einzel asymétrique

La **distance focale** et les **aberrations de la lentille** C_s et C_c dépendent fortement pour une position d'objet et d'image donnée du rapport Φ lentille/ Φ faisceau

Mode de décélération Φ lentille/ Φ faisceau < 1

Mode d'accélération Φ lentille/ Φ faisceau > 1

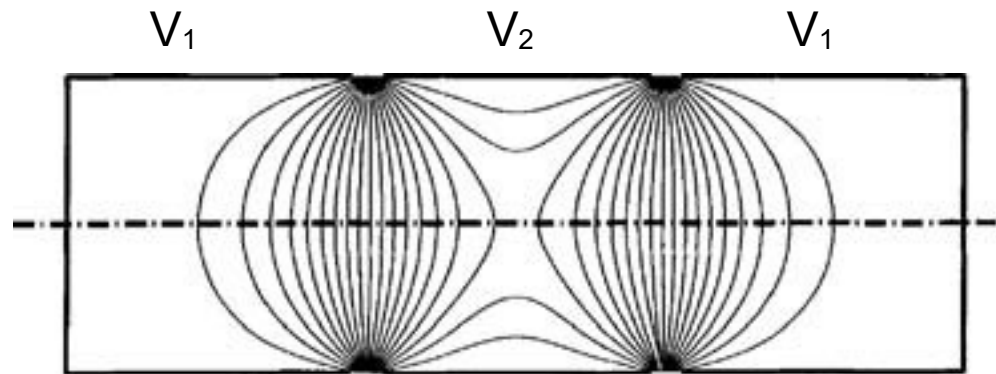
Dimensionnement d'une lentille électrostatique



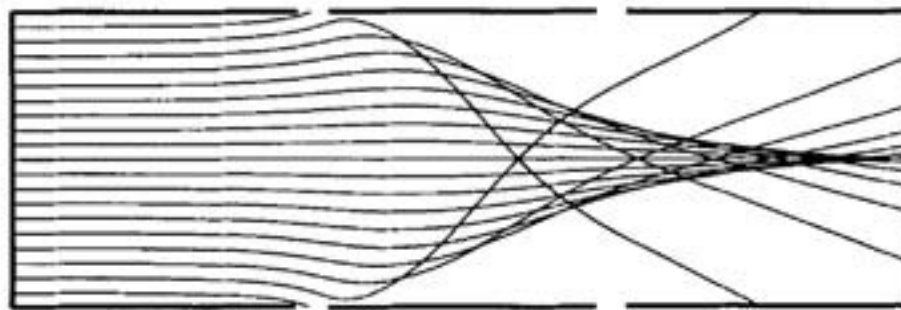
Exemple de simulation des lignes équipotentiels d'une lentille quadripôle
Par le programme SIMION (Dahl and Delmore 1988)

Autre méthode : Simulation par Différence Finie (FDM) - Munro 1996

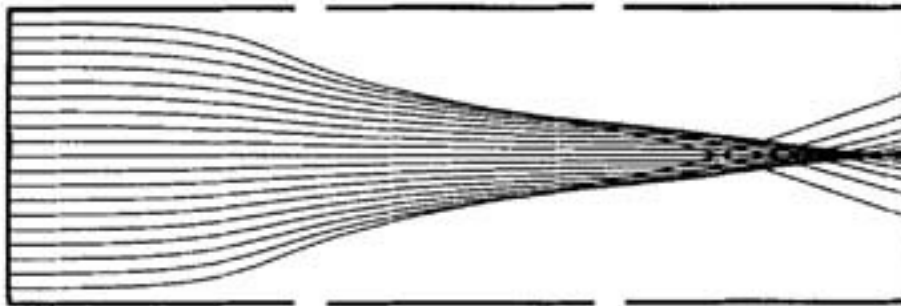
Autre exemple : Lentille à tube



Lignes équipotentielles d'une lentille électrostatiques à 3 cylindres



Trace des trajectoires des particules dans le cas où la lentille centrale est décélétratrice



Trace des trajectoires des particules dans le cas où la lentille centrale est accélératrice

Aberration des lentilles électrostatiques

Les lentilles électrostatiques sont connues comme des lentilles ayant de fortes aberrations

La distance focale dépend fortement de la distance de la particule par rapport à l'axe (r) et de son angle (α)

Dispositif de correction difficile Travailler dans l'approximation de Gauss α petit $< 0,01$ rad
 r^3 négligeable

→ Diaphragmer le faisceau

Aberration de diffraction



Louis de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \text{À 30 kV}$$

$$\lambda \text{ électron} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$$

$$\lambda \text{ ion Ga} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ nm}$$

$$\text{Si } \alpha = 0,01 \text{ rd (Gauss)}$$

$$d_{\text{diffraction}} = 1,22 \frac{\lambda}{\alpha}$$

$$d \text{ électron} = 0,8 \text{ nm}$$

$$d \text{ ion Ga} = 0,0025 \text{ nm}$$

L'aberration de diffraction est négligeable dans le cas d'un faisceau d'ions

Aberration de sphéricité

Les diaphragmes limitent cette aberration

$$d_s = C_s \alpha^3$$

Choix du courant

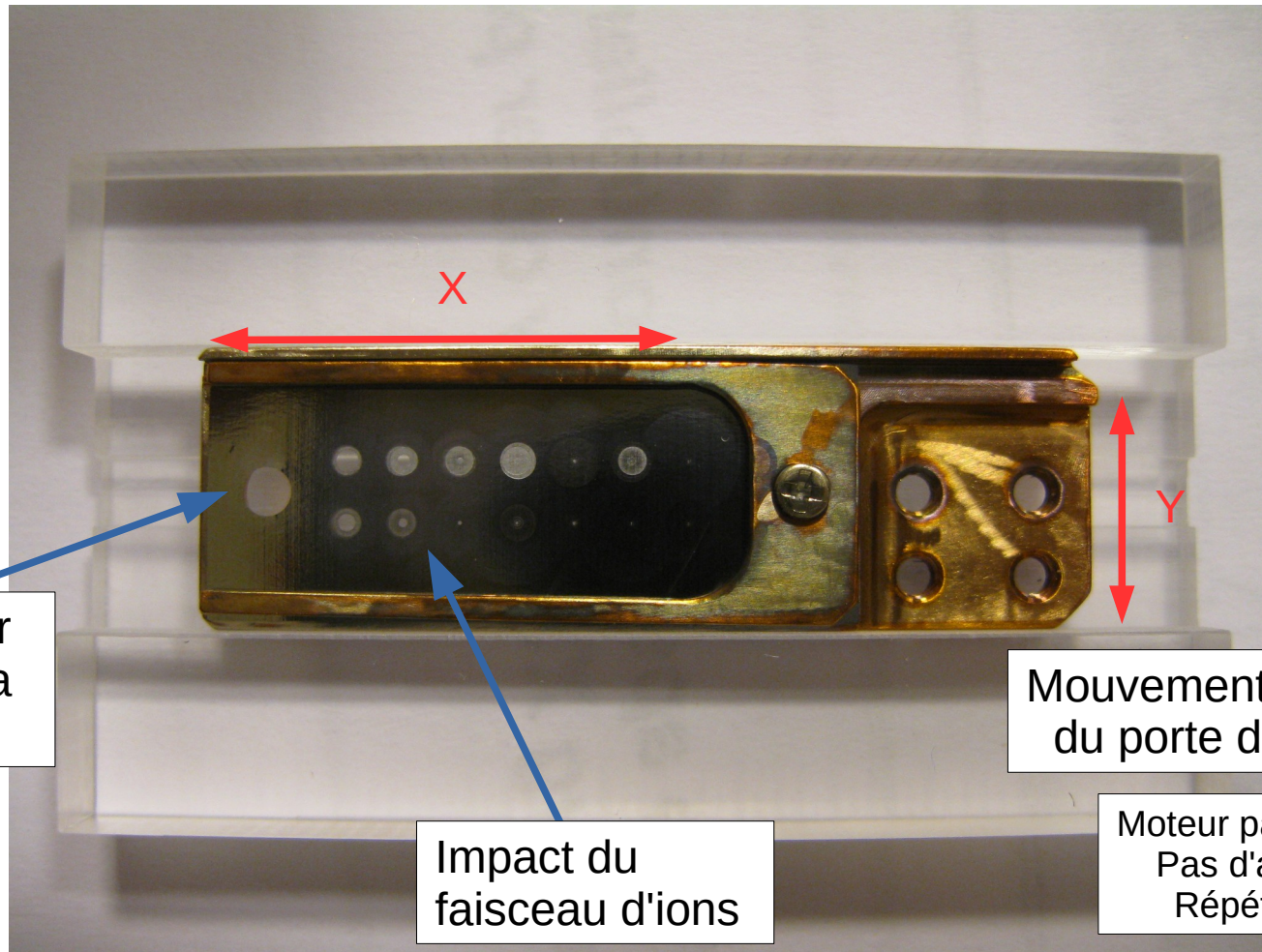
Les diaphragmes

Une plaquette métallique percée de plusieurs trous calibrés

En général de la dizaine à plusieurs centaines de microns.

Certains diaphragmes sont doublés

Pour certains courants le même diaphragme peut être utilisé (Condenseur - Diaphragme)



Diaphragme pour l'alignement de la source

(de l'ordre du mm de diamètre)

Impact du faisceau d'ions

Mouvement mécanique du porte diaphragme

Moteur pas ou pas ou continu.
Pas d'adressage ≈ 50 nm
Répétabilité < 100 nm

Le système de déflexion

La déflexion du faisceau est assurée par un champ électrique transversal

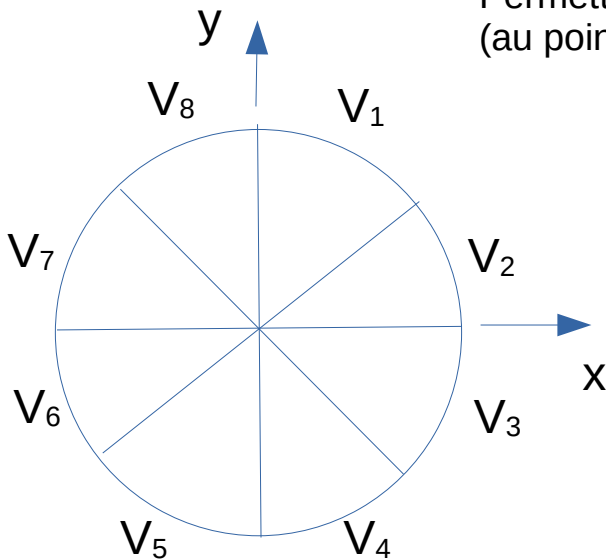
Utilisation d'un Octopole

Permet de :

- Gérer la déflexion (x et y)
- D'agir sur l'alignement
- De corriger l'astigmatisme
- De tourner le plan de rotation de l'image (Scan rotation)

Le système de déflexion est Avant la lentille final (Objectif)

Cela suppose aussi un double système d'octopoles travaillant en tandem
Permettant un point de pivotement du faisceau ionique dans la lentille finale
(au point de « Sans aberration de COMA »)



Secteur à différents potentiels suivant la fonction choisie
Déflexion, stigmatisme, ...

Fonctionnement d'une colonne

Le mode de fonctionnement d'une colonne ionique est **DISCRET**

Les points de fonctionnement de la colonne sont enregistrés

L'émission ionique est fixée et stable (gérée au niveau du canon)

Un point de fonctionnement correspond à :

Une tension d'accélération des ions

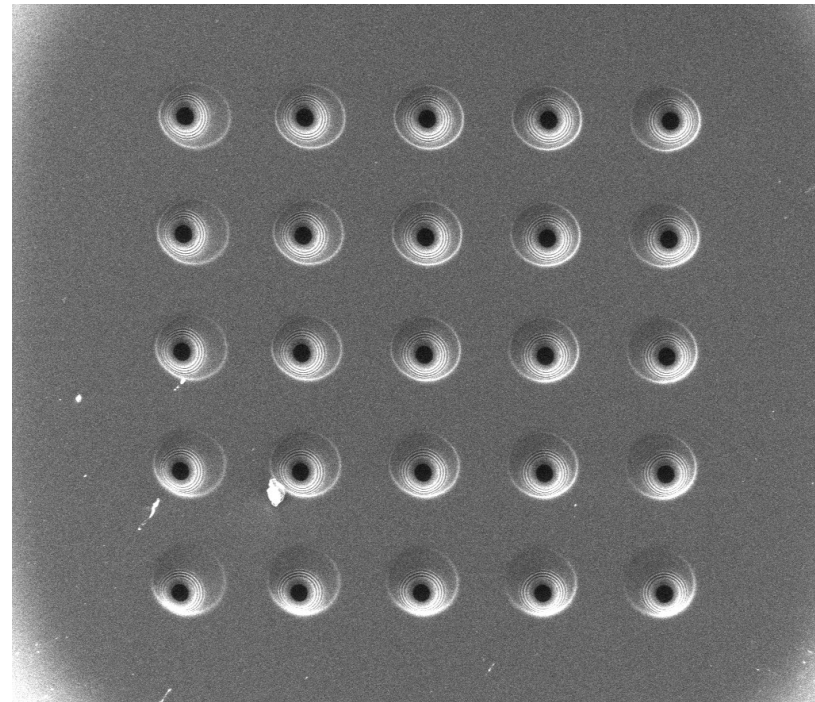
Un courant de sonde → couple Condenseur - Diaphragme

Un point de focalisation → Focalisation et même correction d'astigmatisme

Des tables de fonctionnement sont définies et enregistrées

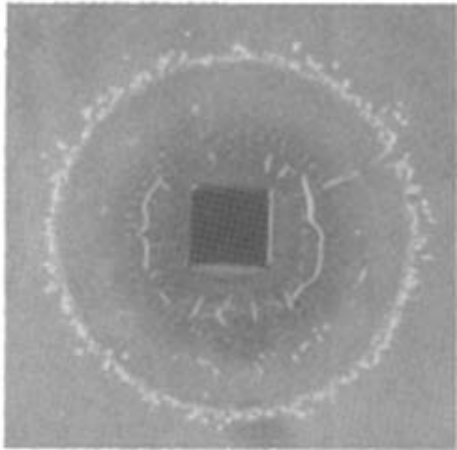
MAIS il faut de temps en temps les vérifier et donc réaligner le faisceau

- * Soit par image pour les faibles courants
- * Soit par des matrices de spots



Impact sur la résolution des effets d'interaction coulombienne

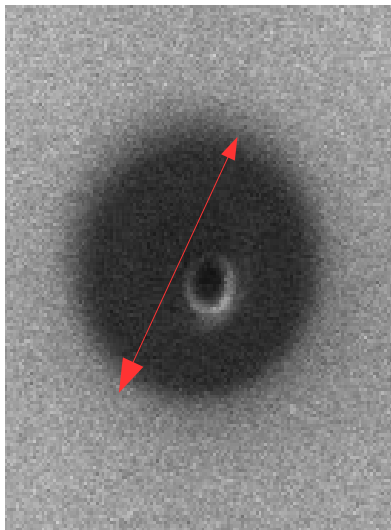
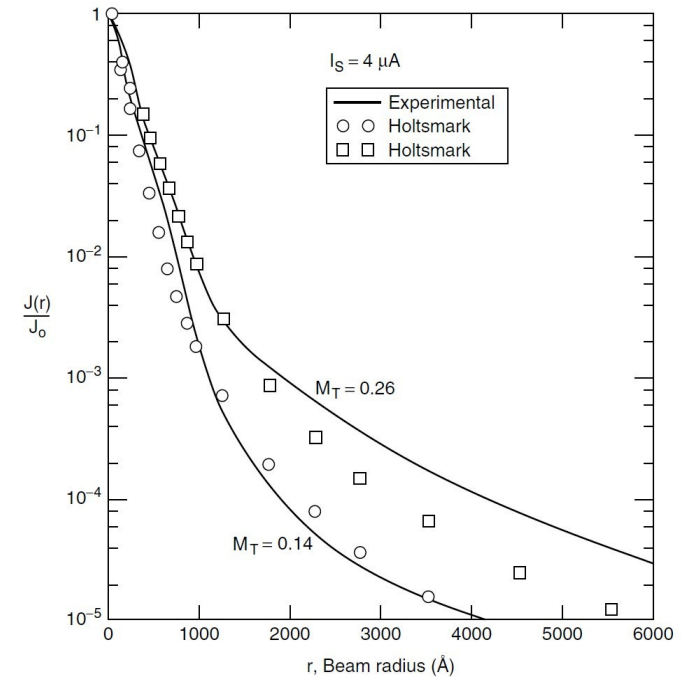
Principalement à fort courant, Effet d'halo – Queue de faisceau



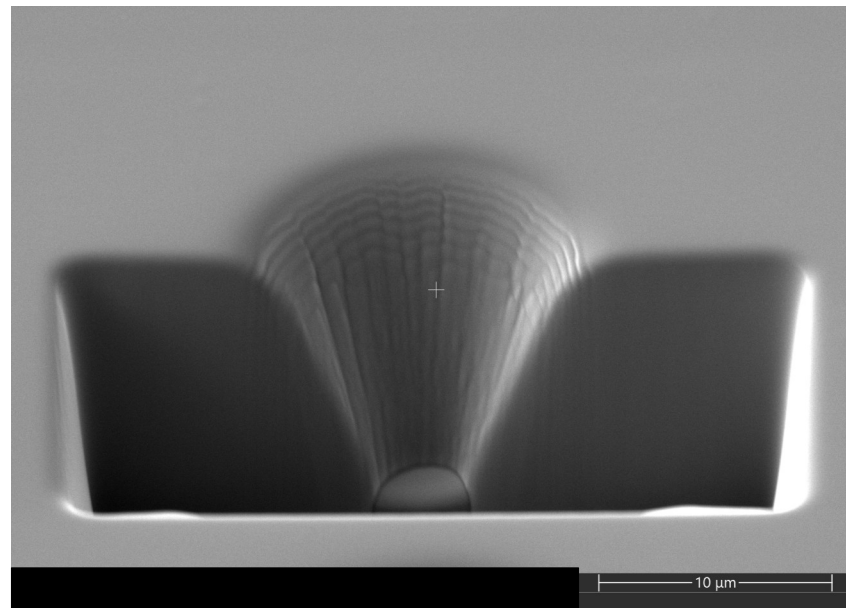
doc . J. Orloff

Distribution radiale des ions Ga sous 50 keV dans un colonne à 2 lentilles

Les traits représentent la simulation de la distribution en utilisant une distribution de type Holtsmark



Halo dû à la queue du faisceau sur Si à 60 nA



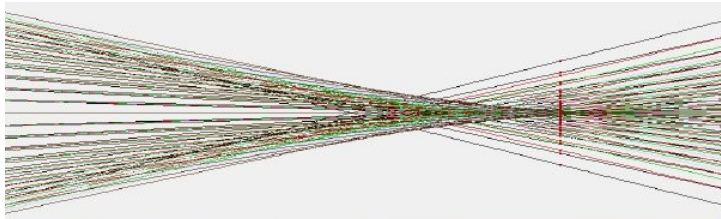
Forme du faisceau Plasma Xe à 400 nA

Optimisation d'une colonne

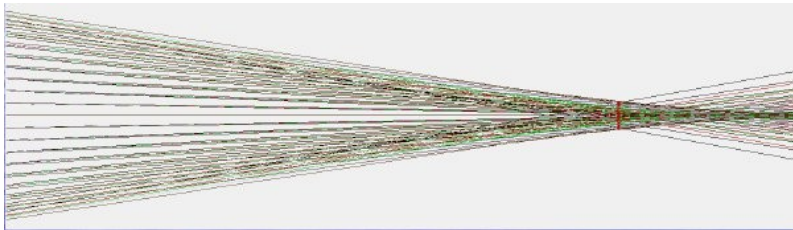
Fonctionnement à Fort Courant

La focalisation peut être ajustée

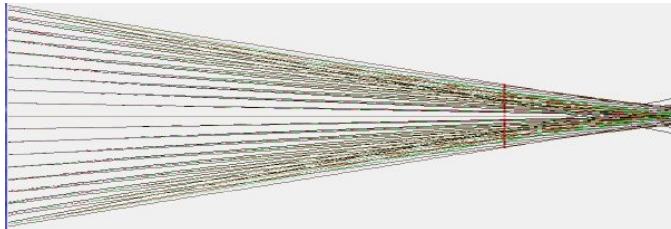
Focalisé



Défocalisé de -60 V



Défocalisé de -110 V



Courant de
15 nA



Image résolue mais l'abrasion n'est pas optimale :
Les bords du motif ne sont pas nets

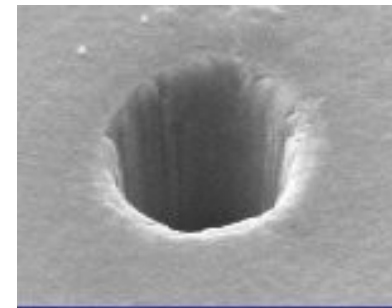
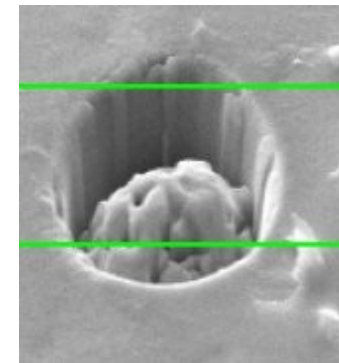


Image moins résolue mais l'abrasion est optimale :
Les bords du motif sont nets



Dégradation de l'image et de l'abrasion

Doc A. Delobbe, B. Rasser

Une défocalisation de quelques dizaines de volt permet d'avoir un meilleur profil du faisceau en abrasion au détriment de l'image

Optimisation d'une colonne

Fonctionnement à basse tension

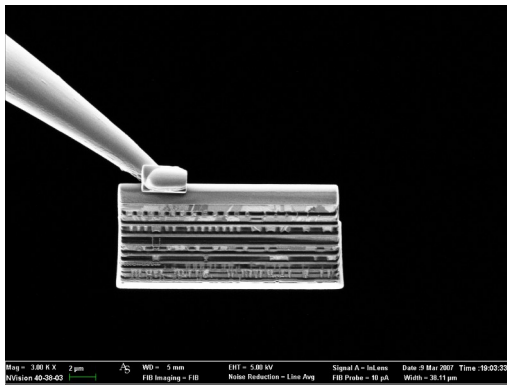
Intérêt de la basse tension =

Limiter l'impact des ions dans la structure cristalline de l'échantillon

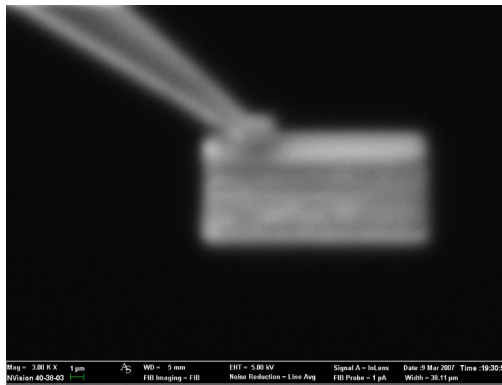
➡ **Amorphisation**

Adaptation de l'optique de la colonne à basse tension

Taille de sonde (Limiter des aberrations,...)



30kV



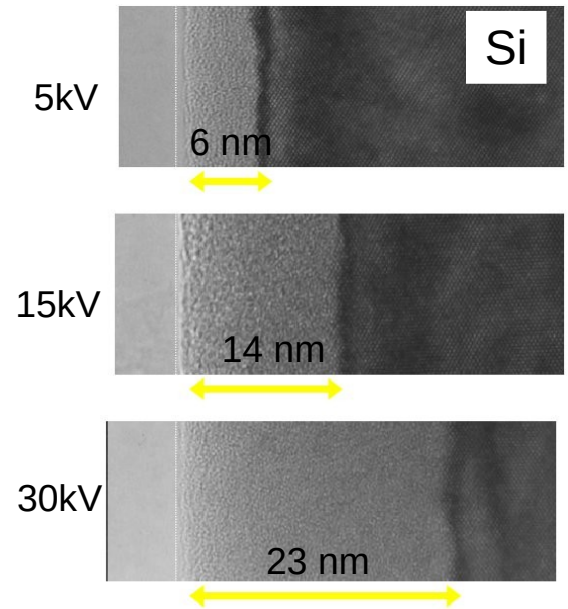
1kV

Voir 500 Volts

Différentes voies :

Addition de dispositifs de correction du faisceau

Deux quadripôles pour réaligner la colonne sans réglage mécanique



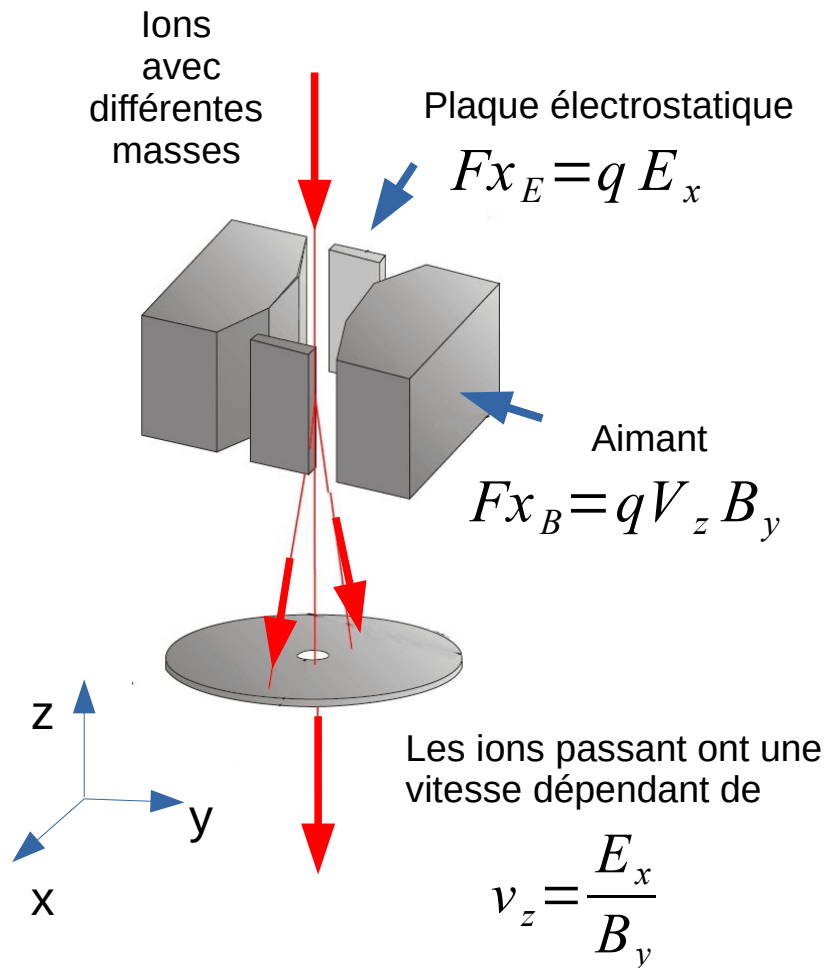
Amorphisation lié à l'impact d'un faisceau Ga

Colonnes spécifiques

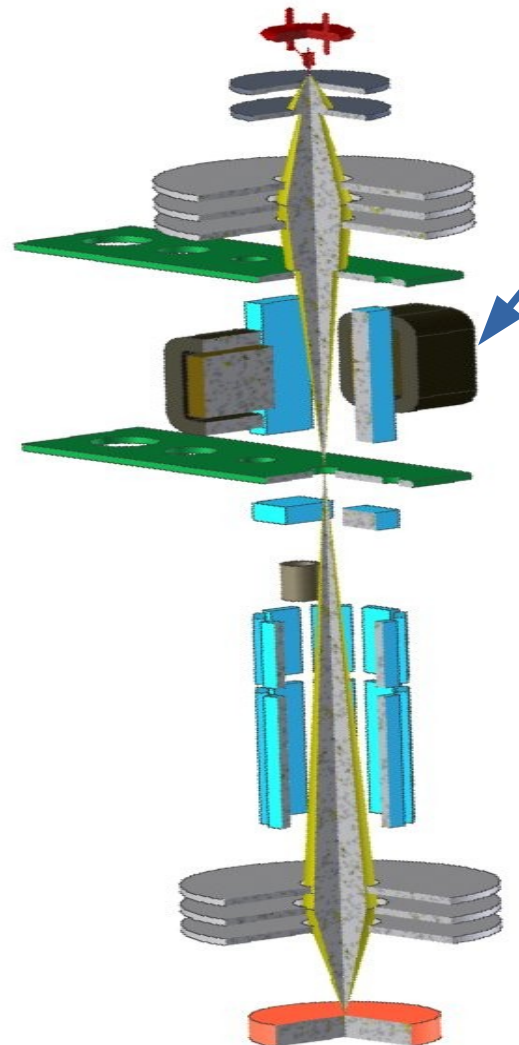
Dans le cas de l'utilisation d'une source ionique à partir d'un alliage, d'un sel, ...
Il faut sélectionner les entités ioniques souhaitées

Principe du filtre de Wien ou ExB

Utiliser un champ électrique croisé avec un champ magnétique



Un filtre de Wien est introduit dans la colonne



Filtre de Wien



HV Veloce
Tescan Orsay Physics

Source LMAIS
AuGe/AuSi

Actuellement , de nombreuses propositions de colonne chez les constructeurs

Des colonnes avec des sources Ga permettent :

- * Des très bonnes résolutions jusqu'à 2,5 nm à 30 kV
- * Des forts courants jusqu'à 135 nA

Hitachi, Jeol,

Thermofisher : Sidewinder / Thomahawk / Phoenix

Tescan : DeepFIB / Orage

Zeiss : Ion Sculptor

Des colonnes avec des sources Plasmas permettent :

Principalement Plasma Xe mais d'autres ions sont possibles

- * Des résolutions moindre qu'avec les sources Ga
de l'ordre de 15-20 nm à 30 kV
- * Des forts courants jusqu'à 3 μ A

Thermofisher : PFIB2.0 / Hydra

Tescan : HV Plasma Fib

MERCI de votre attention

Merci au GN MEBA pour l'invitation

Merci aux constructeurs aux travers de discussion avec Stéphane Letheux, Jérémie Silvent, Guillaume Amiard.

Quelques références :

Plasma FIB : Principes et applications – G Audoit – GnMeba Dec. 2018

Metrology for 3D Devices: Plasma-FIB for High Throughput Sectioning of Large Dimensions - N. Smith and al.

The ECR – FIB - A Delobbe, O Salord, P Sudraud , The European Focused Ion Beam Users Group (EFUG) annual meeting 2011 Bordeaux.

High Resolution Focused Ion Beams - J. Orloff and al. - Kluwer Acad. Plenum Publishers – 2003

Handbook of charged particle optics - edited by Jon Orloff. - 2nd ed – CRC press - Taylor and Francis Group – 2009