

FIB : Canons et colonnes ioniques

F.Charlot

frederic.charlot@cmtc.grenoble-inp.fr



FEI - Hélios Nanolab



JEOL - JIB 4600F



HITACHI - NB5000



TESCAN - Lyra

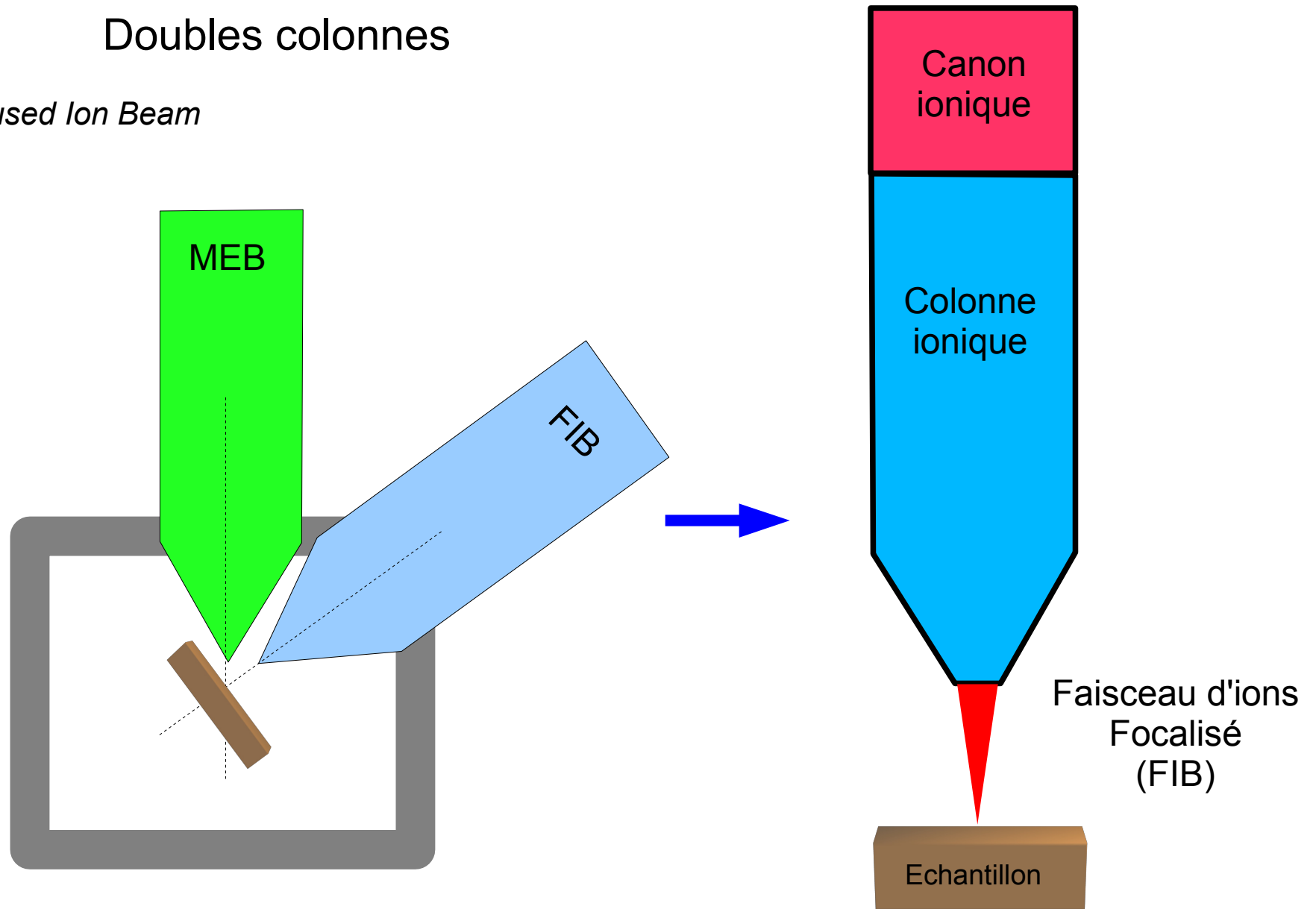


ZEISS - Nvision 40

Les Colonnes d'ions focalisés associées aux MEBs

Doubles colonnes

FIB = Focused Ion Beam



Le canon ionique

La source est une source ionique à partir d'un métal à l'état liquide

LMIS = Liquid Metal Ion Source

LMIS à base de Gallium = Source actuellement standard en FIB

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

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

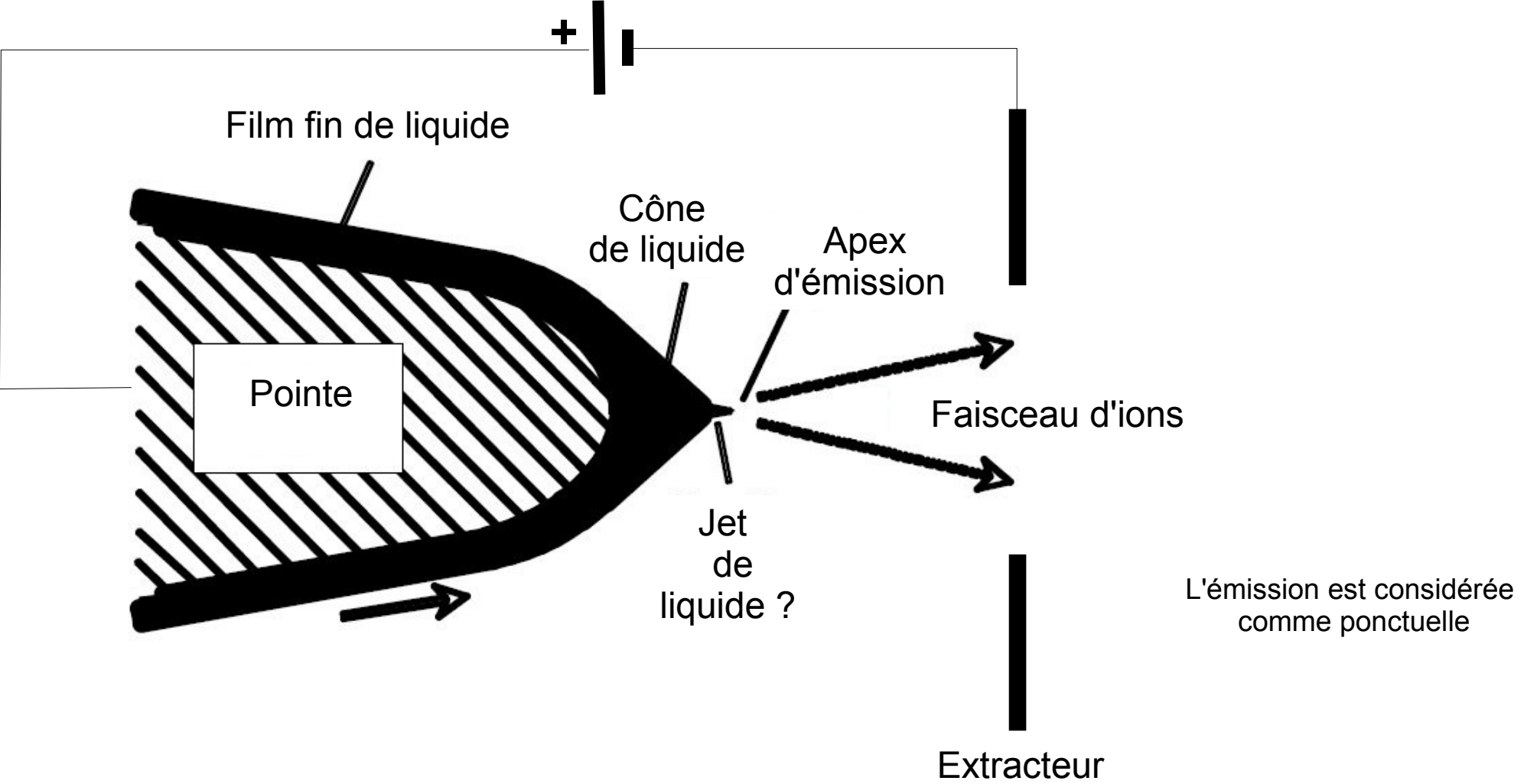
LMAIS = Liquid Metal Alloy Ion Source

C'est une source à émission de champ

Comparable aux émetteurs électronique (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

A Signaler :

Il existe d'autres types de source ionique

■ Sources ioniques gazeuses **GFIS** Gaz Field Ionization Source

He, Ne, H₂ Année 1970 – Levi-Setti et al. et Orloff et al.

→ Développement actuel source ALISTM (Atomic Level Ion Source)

Source à partir d'Hélium Pour 1 microscope

■ Sources ioniques à partir d'un liquide ionique

ILIS Ionic liquid ionic source

À partir d'un sel organique partiellement fondu

Pourquoi le Gallium comme source LMIS ?

Les sources ioniques à base de Gallium sont couramment utilisées

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

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

| | 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 ⁺ , 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 ₂ ⁺ , 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

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

Brève histoire des sources LMIS

1600 - Gilbert 1^{ère} observation d'un cône de liquide en présence d'un champ électrique
Observation d'un cône d'une gouttelette d'eau avec un morceau d'ambre frotté
Traité « De Magnet »

1732 - Gray Pulvérisation d'un liquide sous un champ électrique

1914 - Zeleny Observation de décharge sur un liquide avec un champ électrique
Filme la formation du cône et les jets de matière sur un système de plaques

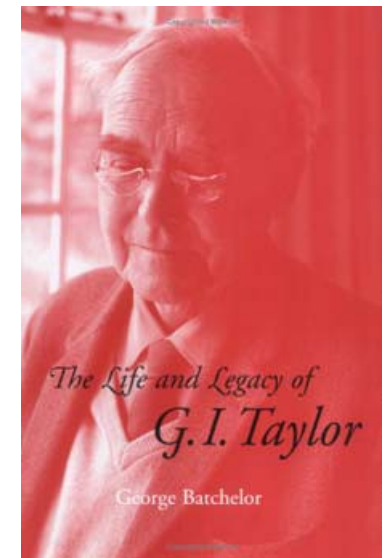
1964 - Taylor Trouve une solution d'un cône de liquide dans un équilibre électrohydrostatique d'un liquide conducteur

Cône de Taylor

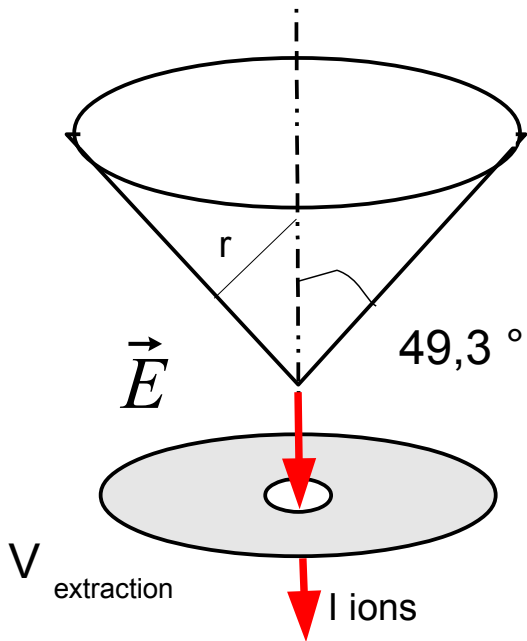
Ou Cône de Gilbert-Taylor

Selon Ljepojevic et Forbes

1975 - Clampitt 1^{ère} source LMIS pour FIB



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

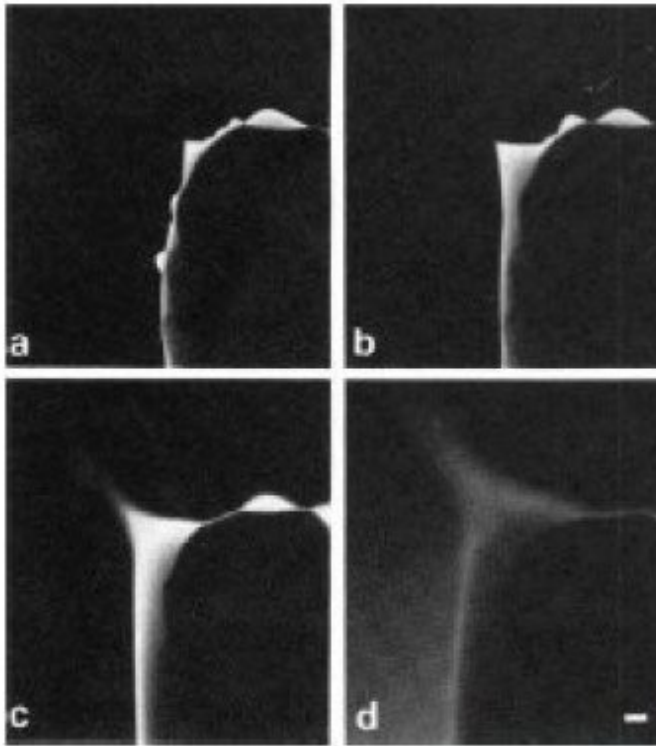
L'équation qui régit cet équilibre dynamique doit tenir compte de ce flux de matière

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

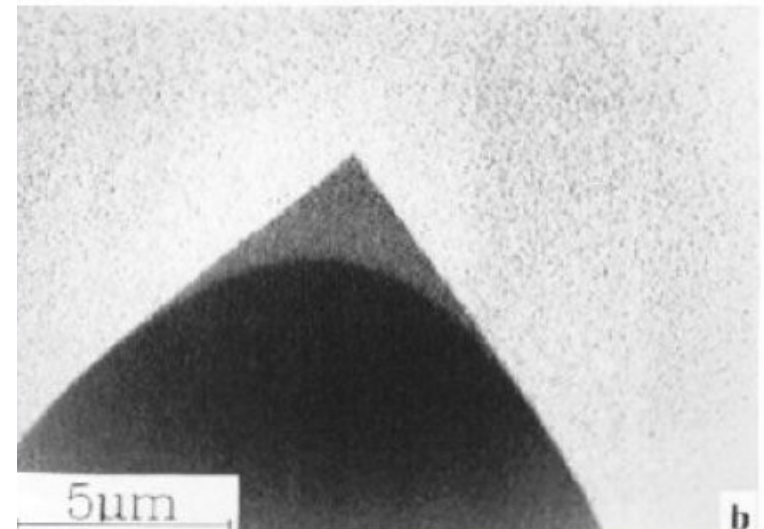
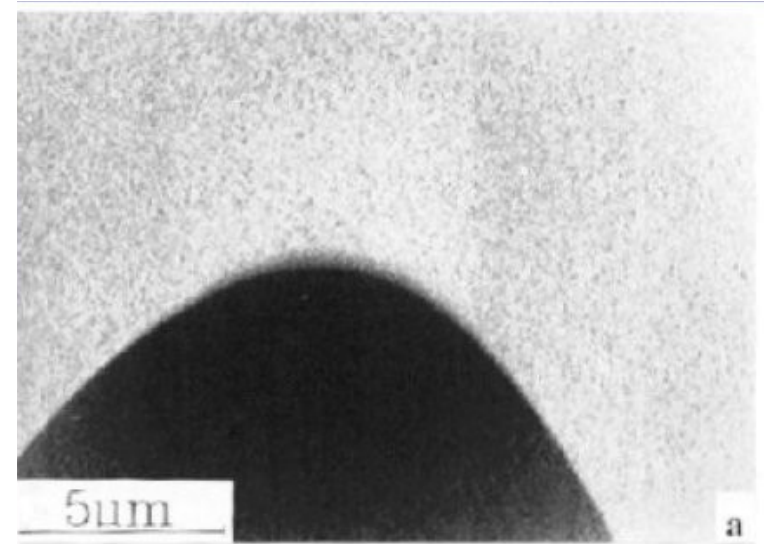
→ Terme de Bernoulli
 Pression du fluide dû à un flux non visqueux

→ Protrusion : Déformation de l'apex du cône

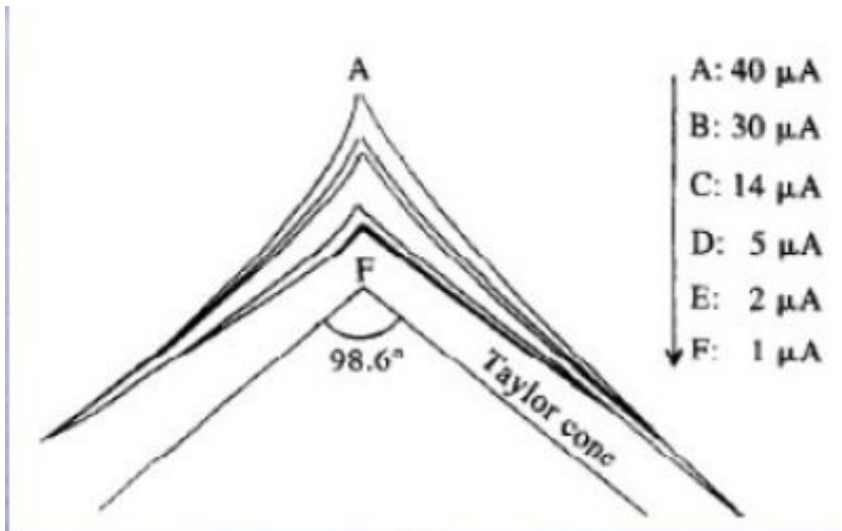
→ Emission d'ions : Mécanisme d'évaporation sous champ (Field evaporation)



Observation par MET 3 MeV



Observation par MET 1 MeV



BenAssayag et al. 1985

Diesel et al. 1996

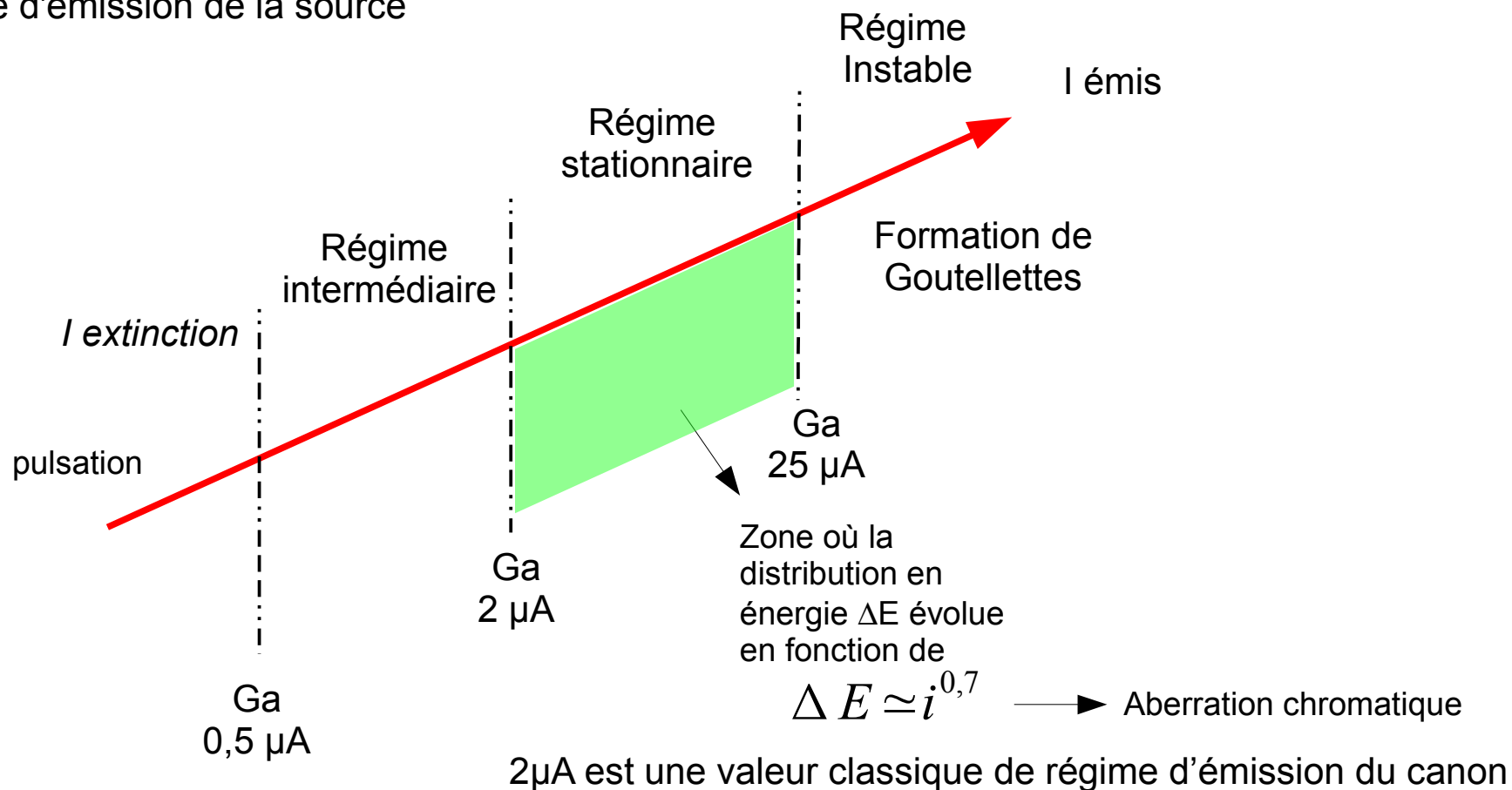
Domaine de fonctionnement d'un canon avec une source LMIS

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

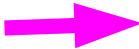
Il existe une tension d'extraction V_c critique pour l'émission car il faut former le cône

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



Caractéristique de la source LMIS en 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 $J_0 \approx 10^6 \text{ A cm}^{-2}$ Importante
- Distribution énergétique $\Delta E \approx 5 \text{ eV}$ à faible courant
 **Aberration chromatique importante**
- Brilliance $\approx 10^6 \text{ A cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
- Distribution angulaire large FWHM : de 25° à 35°
- Durée de vie d'une source Garantie 1500 h

MEB FEG

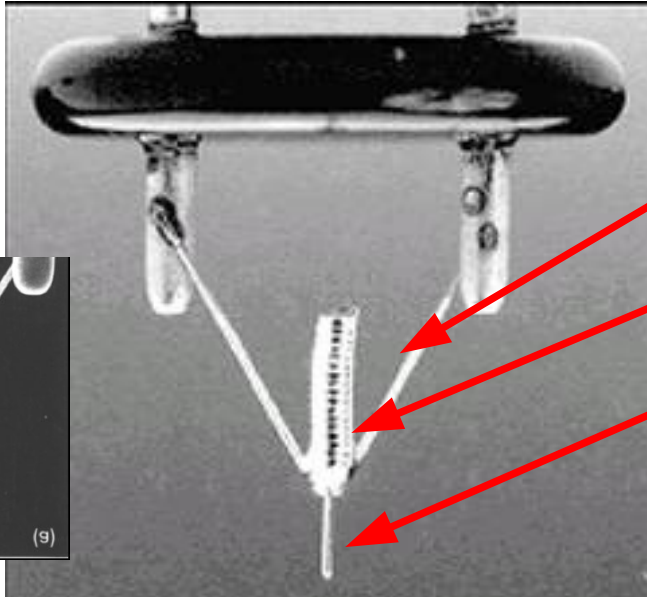
Taille de la source apparente
 $< 10 \text{ nm}$

$J_0 \approx 10^4 - 10^5 \text{ A cm}^{-2}$

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

$B \approx 10^7 - 10^8 \text{ A cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$

Technologie LMIS pour Ga

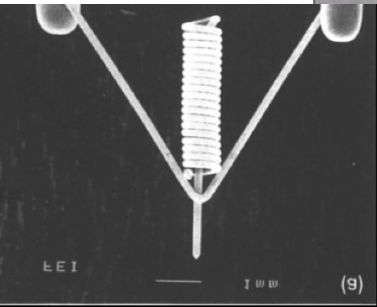


Fil de chauffage en forme de boucle

Réservoir de Ga

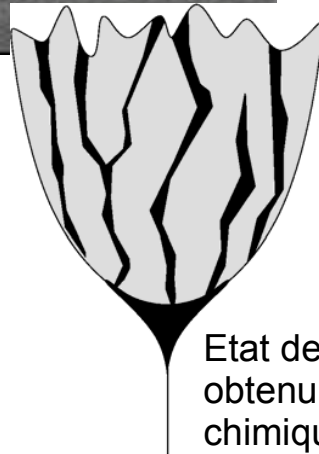
Aiguille en W Diamètre corps = 200 μm
Rayon de courbure à l'apex = 1 – 5 μm

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

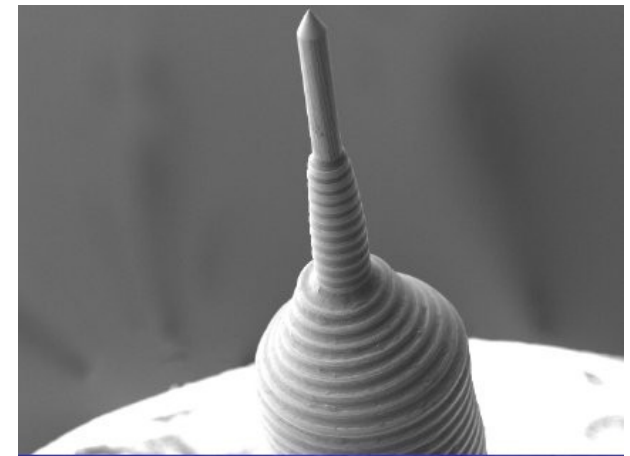


Avant ajout du Ga

LMIS de Ga FEI



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



LMIS de Ga - Orsay Physics

- 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

La source ionique ne démarre pas ?

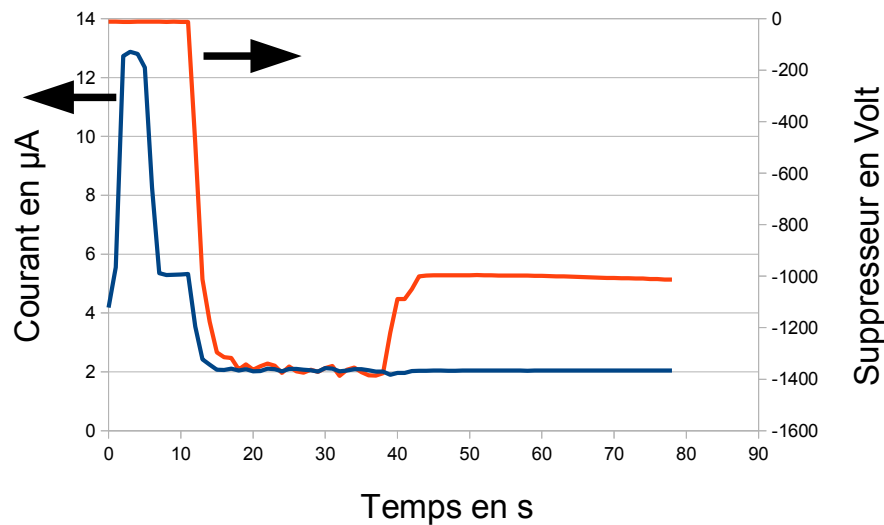
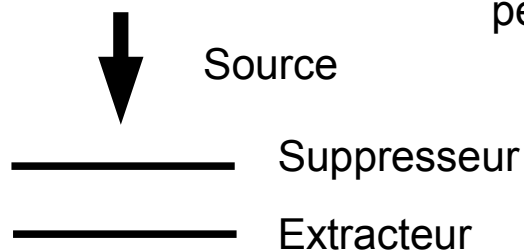
■ Plus de Ga Consommable Durée de vie = 1500 h (garantie)

■ Ga oxydé ou contaminé

Choix {
 Chauffer pour enlever la contamination
 Changer la tension d'extraction
 Mais cela va changer les réglages d'alignements de la colonne

Régulation du courant d'émission

Au niveau du canon on trouve une seconde électrode permettant la régulation du courant d'émission



La colonne ionique

But : Focaliser le faisceau ionique à la surface de l'échantillon

■ Les premières colonnes construites :

1975 – Krohn and Ringo à Argonne

1979 – Seliger and al. au laboratoire Hughes Research

■ Pouvoir usiner avec un rendement correct

Avoir une latitude de courants ioniques

De quelques pA au nA

■ Avoir une bonne résolution pour usiner ou imager avec précision

Limiter les aberrations optiques

Avoir une taille de sonde la plus fine possible

A haute et basse tension

La colonne doit être équipée de dispositifs permettant de :

- | | | |
|--------------------------|--|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Focaliser le faisceau d'ions | Lentilles |
| <input type="checkbox"/> | Balayer une surface définie | Défecteurs |
| <input type="checkbox"/> | Corriger les aberrations en particulier l'astigmatisme | Stigmatiseur |
| <input type="checkbox"/> | Ajuster le courant ionique | Diaphragmes ou autres |

Les Lentilles

Cas d'un faisceau de particules chargées

Rappel sur les propriétés physiques des particules mises en jeu

Ion Gallium

| | Ga ⁺ | Electron |
|-------------------------------|---|---|
| Taille | 0,2 nm | |
| Masse | $1,2 \cdot 10^{-25}$ kg | $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg |
| Vitesse à 30 kV | $2,8 \cdot 10^5$ ms ⁻¹ | $1,0 \cdot 10^8$ ms ⁻¹ |
| Quantité de mouvement à 30 kV | $3,4 \cdot 10^{-20}$ kgms ⁻¹ | $9,1 \cdot 10^{-23}$ kgms ⁻¹ |

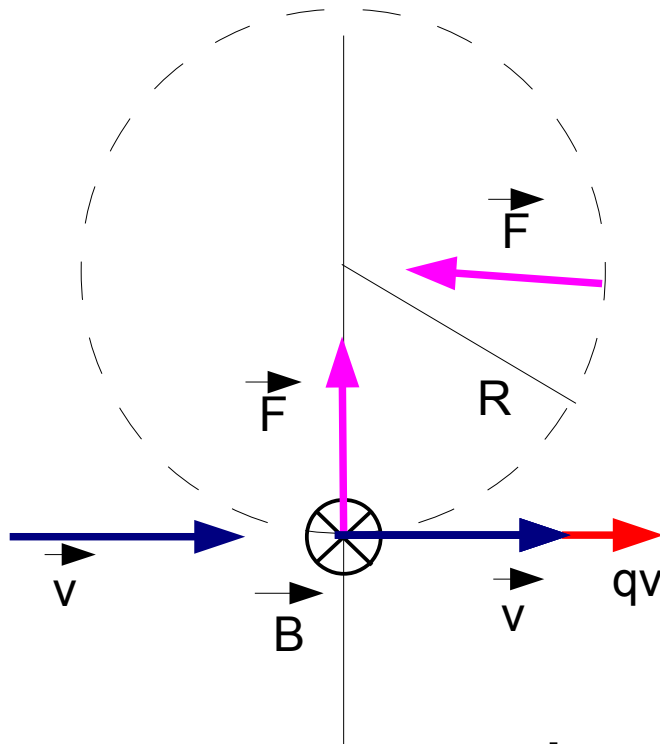
$$v/c \sim 1 \cdot 10^{-3}$$

Pas de correction relativiste

Trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique

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

Cas d'une particule chargée POSITIVEMENT **Ga⁺**



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

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \vec{u} + \frac{v^2}{R} \vec{n} \quad \text{La particule prend une trajectoire circulaire}$$

$= 0$ \longrightarrow $R = \frac{mv}{qB}$

$$\left. \begin{array}{l} E = 1/2mv^2 \\ E = qU \end{array} \right\} \longrightarrow v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} \quad \left. \vphantom{\frac{2qU}{m}} \right\} R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$$

Le rayon de la trajectoire dépend du rapport m/q

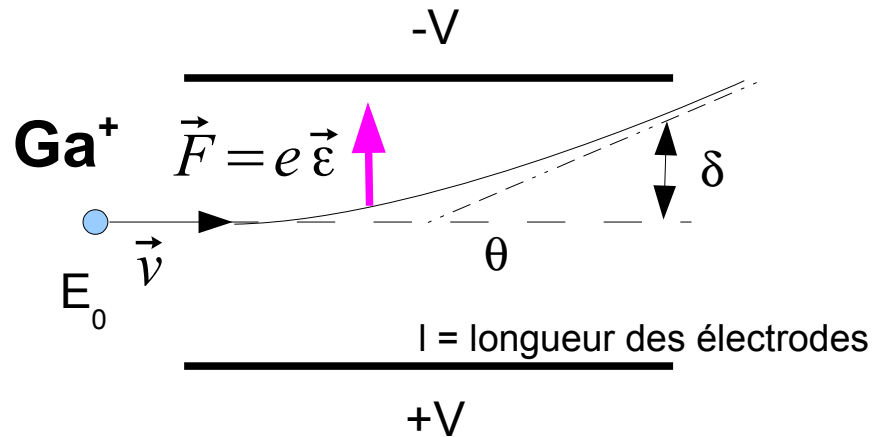
Plus la masse m de la particule est grande, Plus R est grand, Plus la déviation est faible

Et donc , plus le champ magnétique doit être important pour dévier la particule

\longrightarrow Dans le cas des ions : Très faible déviation % électrons

Trajectoire d'une particule chargée dans un champ électrique homogène

Généré par deux électrodes planes



La particule de charge e est accélérée sous un potentiel U en amont

$$E_0 = \frac{1}{2} m v_0^2 = eU \quad \longrightarrow \quad v_0 = \frac{2eU}{m}$$

$$m \vec{a} = \vec{F} = e \vec{\epsilon} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} x = v_0 t \\ y = \frac{e}{2m} \epsilon t^2 \end{cases} \quad \longrightarrow \quad y = \frac{\epsilon}{4U} x^2 \quad \text{La trajectoire est parabolique}$$

En sortie des électrodes, la déviation δ est de $\delta = \frac{\epsilon l^2}{4U}$ avec un angle de $\tan \theta = \frac{\epsilon l}{2U}$

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

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

➡ Indépendant de la MASSE de la particule

Brève historique de l'optique « électrostatique »

■ 1926 Buch pose les bases de l'optique électronique

Traitant de la focalisation d'un faisceau d'électrons à l'aide d'un champ magnétique mais aussi électrostatique

■ 1930 - 1932 Brüche et son équipe - Laboratoire de recherche d'AEG

Développe un instrument à partir d'une optique électrostatique et montre les premières images électroniques

En parallèle , Knoll et Ruska utilise des lentilles magnétiques pour former des images électroniques

■ Fin des années 30 Premier MET avec une optique électrostatique

■ Années 40

Plusieurs productions de microscope utilisant des lentilles électrostatiques

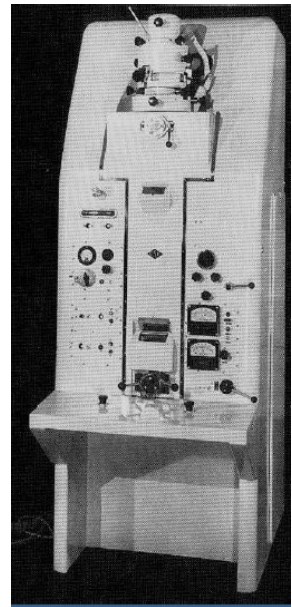
Etats Unis – GE Laboratoire – Farrand Optical Co

France – CSF

Angleterre - Elektros

CSF M3

Suivant travaux de P. Grivet



■ 1956 EM8 - Dernier MET à optique électrostatique Sortie des usines d'AEG

■ Le développement des MET avec des lentilles électrostatiques s'est arrêté car

La tension d'accélération de ces MET électrostatiques était limitée à 70kV
Vide dans la colonne pour éviter le claquage électrique

Meilleure résolution obtenue = 2nm

Résolution limitée = Echantillon mince est placé en dehors de la lentille électrostatique
Pour ne pas perturber les champs

➡ **Les colonnes « électromagnétiques » s'imposent**

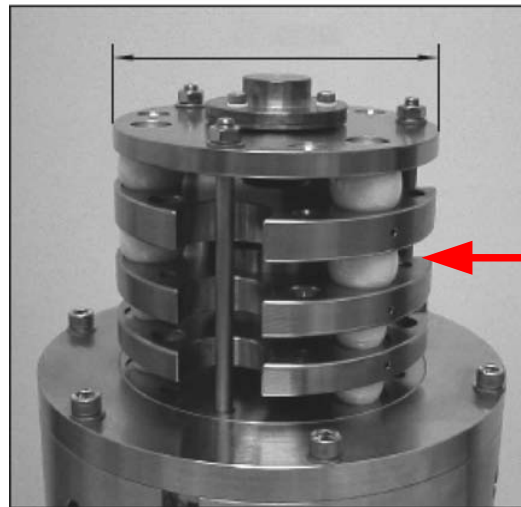
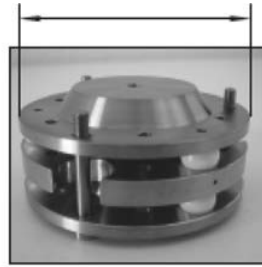
■ **MAIS : Renouveau de l'utilisation des lentilles électrostatiques**

- Spectromètre de masse
- **Colonne FIB**

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)



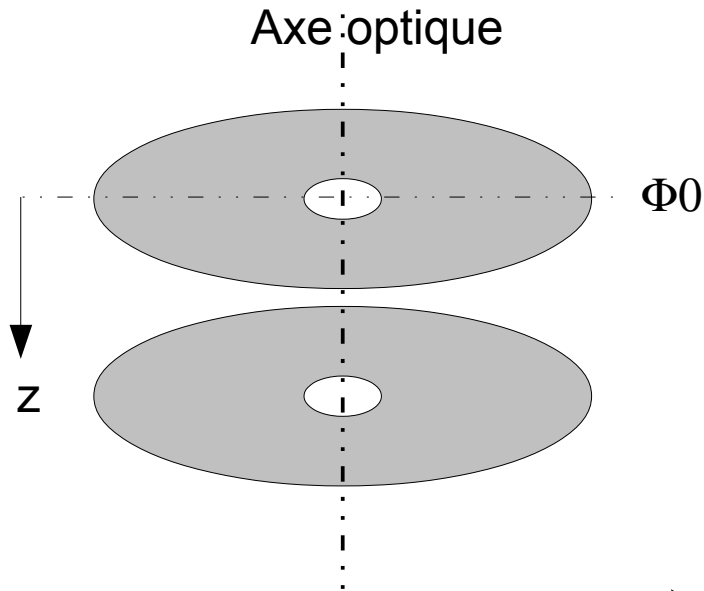
Isolation par des sphères de céramique

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.



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

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

L'expression du potentiel s'exprime par

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

$$\vec{\varepsilon} = -\vec{grad} \phi \quad \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_z = -\phi_0'(z) \\ \varepsilon_r = \frac{r}{2} \phi_0''(z) \end{array} \right. \quad \longrightarrow \quad m \vec{a} = \vec{F} = e \vec{\varepsilon}$$

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

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

$$r'' + \frac{\phi_0'(z)}{2\phi_0(z)} r' + \frac{\phi_0''(z)}{4\phi_0(z)} r = 0$$

Avec l'approximation de Gauss

Dans le cas de particules non relativiste ($v/c < 0,1$)

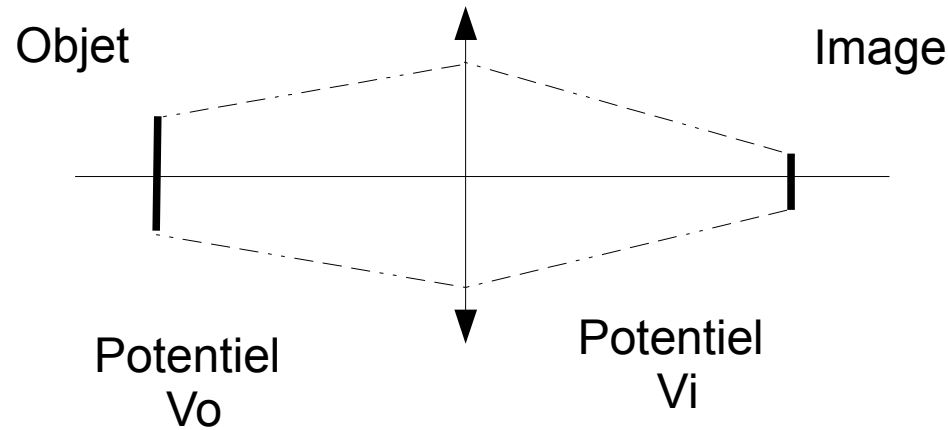
■ Equation différentielle est linéaire , ce qui entraîne la propriété de stigmatisme

■ Indépendance du rapport e/m

■ Analogie optique photonique $n^2 = \phi$ n indice de réfraction du milieu

Indice continûment variable dans une lentille électrostatique

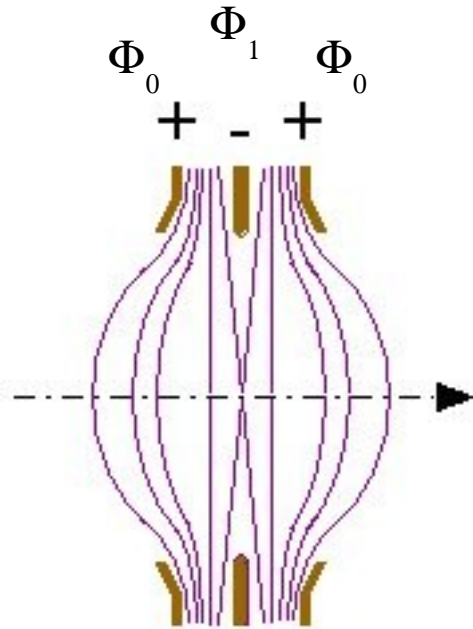
Type de lentille électrostatique



- 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

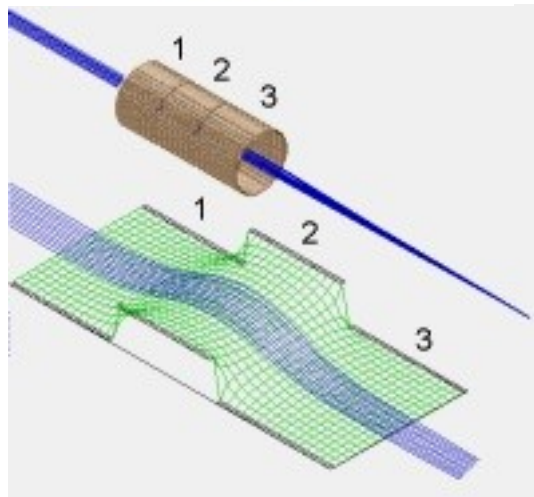
Le potentiel de l'électrode centrale tend à freiner les particules

La lentille est convergente

Dans le cas où $\Phi_1 > \Phi_{\text{faisceau}}$

Les particules ne peuvent plus passer cette barrière de potentiel

→ Miroir électrostatique



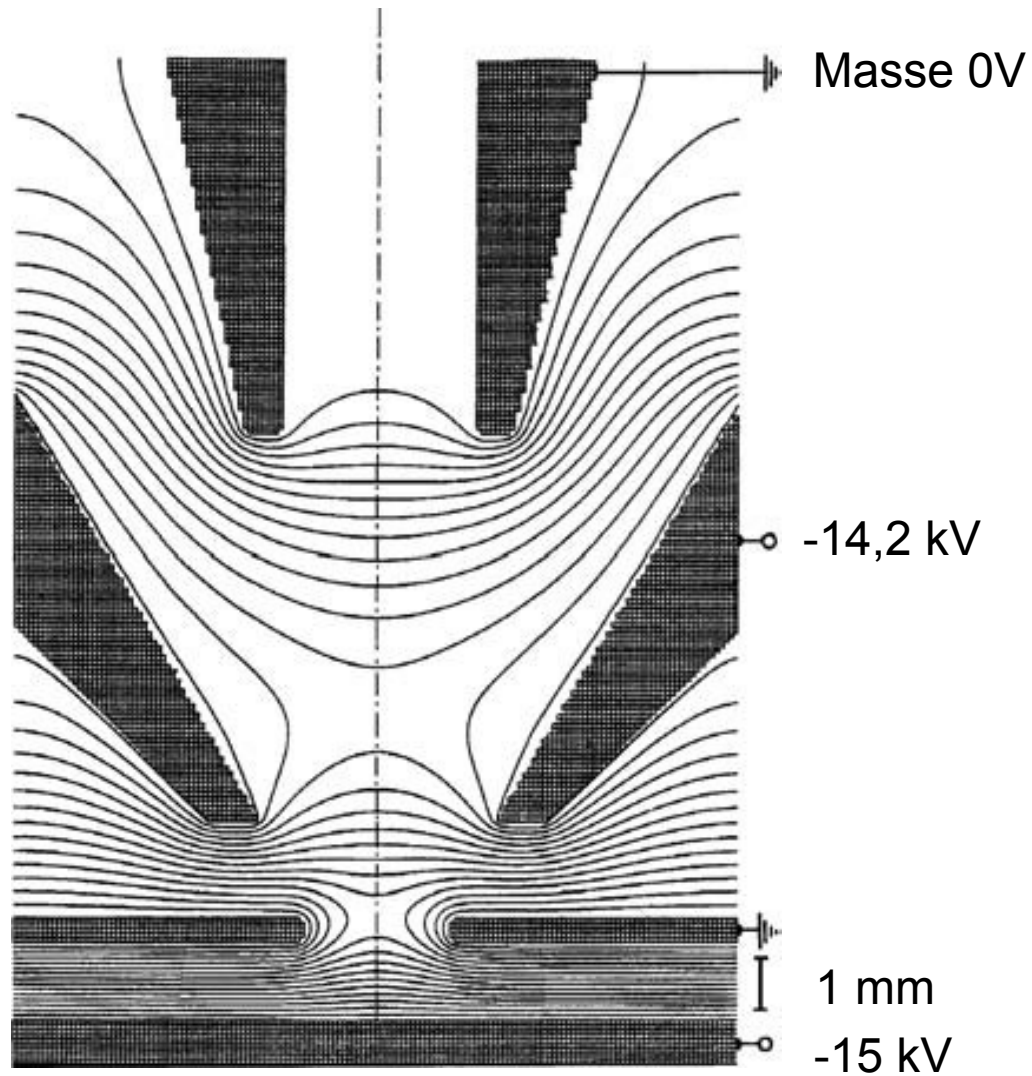
Rmg Des lentilles à immersion à 3 éléments peuvent être appelées une lentille einzel asymétrique

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 $\Phi_{\text{lentille}} / \Phi_{\text{faisceau}}$

Mode de décélération $\Phi_{\text{lentille}} / \Phi_{\text{faisceau}} < 1$

Mode d'accélération $\Phi_{\text{lentille}} / \Phi_{\text{faisceau}} > 1$

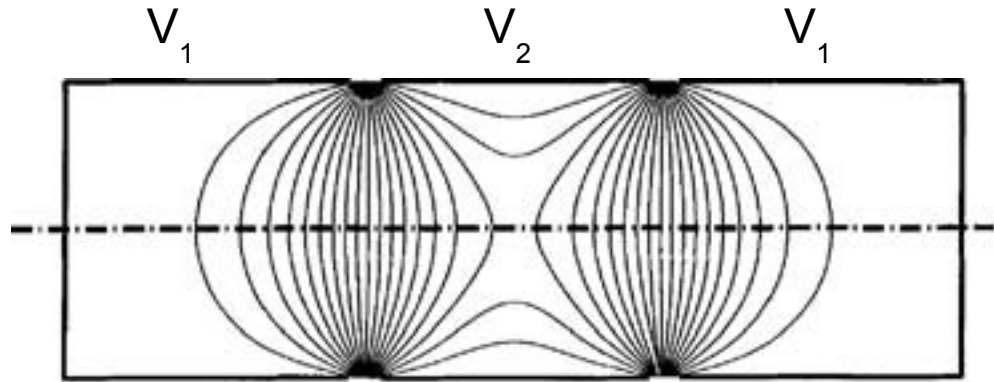
Dimensionnement d'une lentille électrostatique



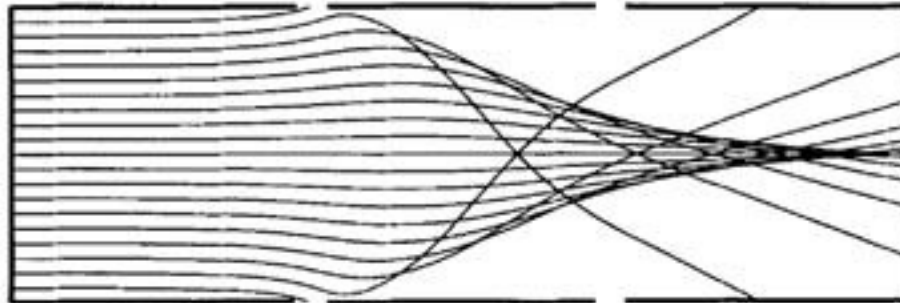
Exemple de simulation des lignes equipotentielles d'une lentille quadripôle
Par le programme SIMION (Dahl and Delmore 1988)

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

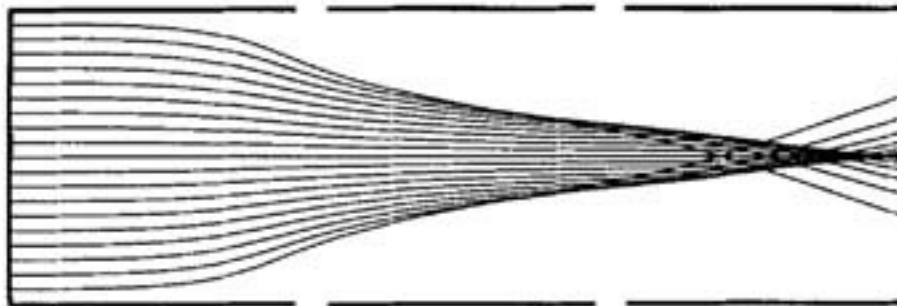
Autre exemple : Lentille à tube



Lignes équipotentielle d'une lentille électrostatiques à 3 cylindres

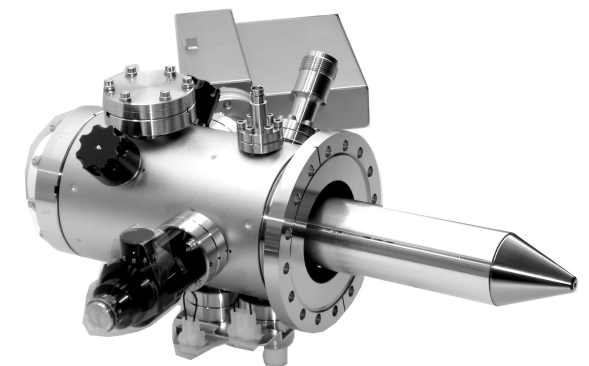
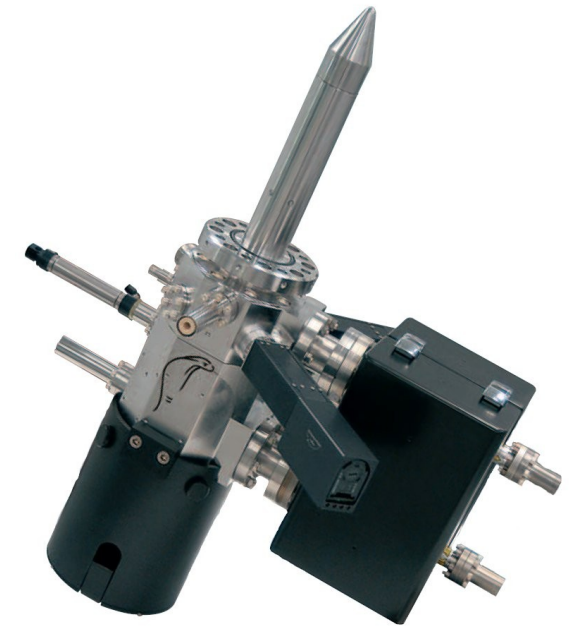
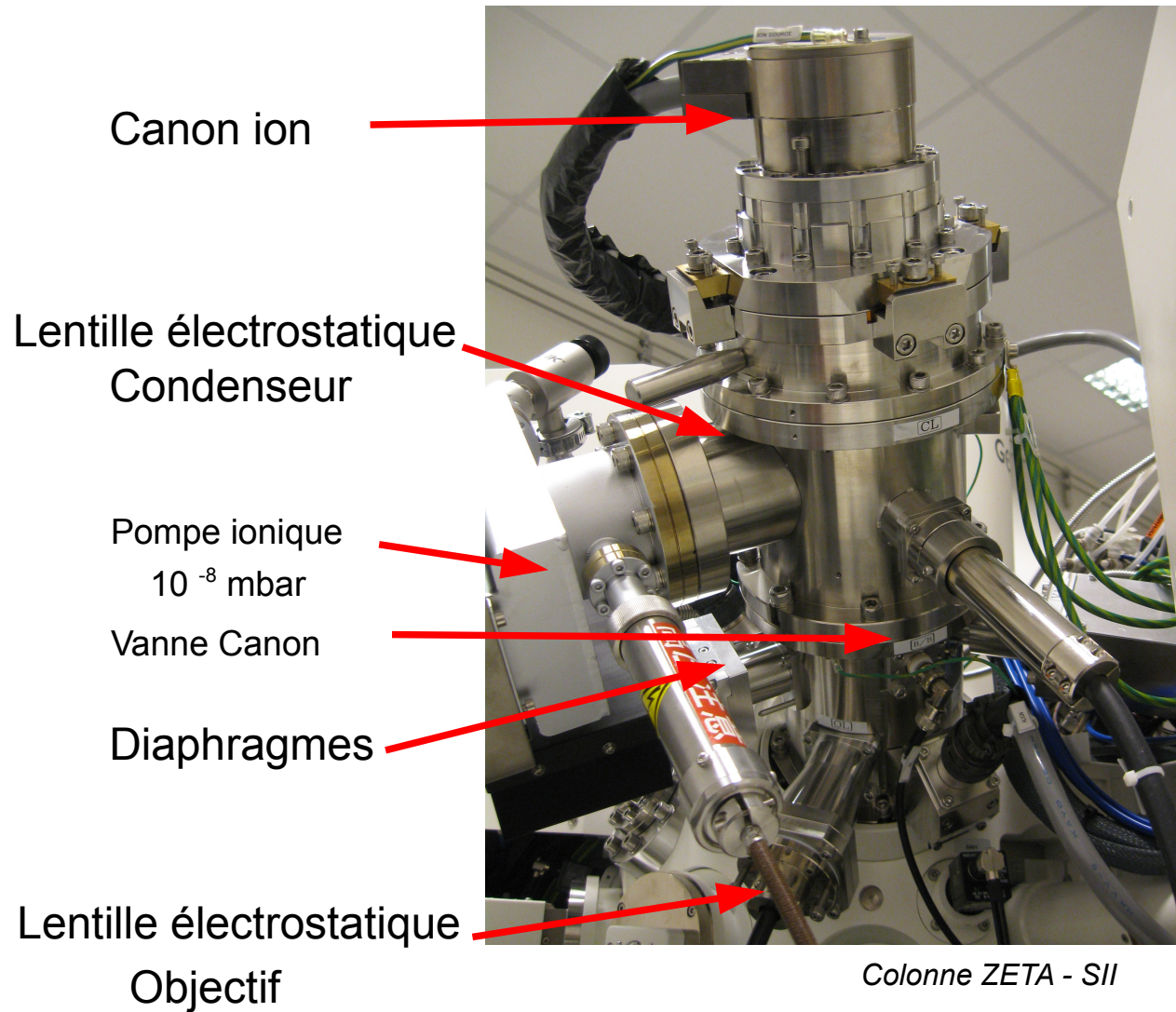


Trace des trajectoires des particules dans le cas où la lentille centrale est décélératrice



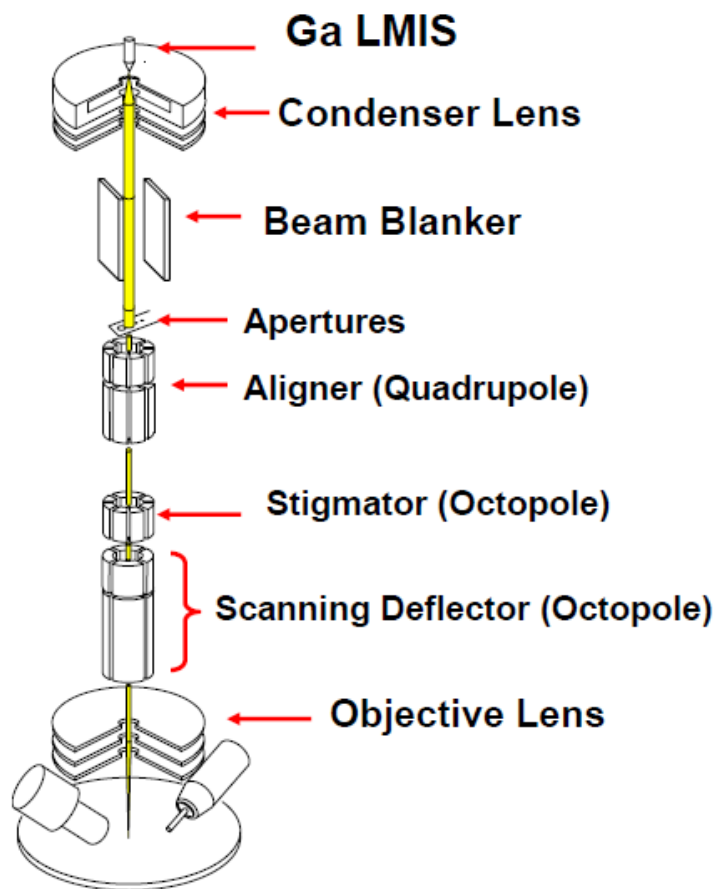
Trace des trajectoires des particules dans le cas où la lentille centrale est accélératrice

La colonne dans son ensemble

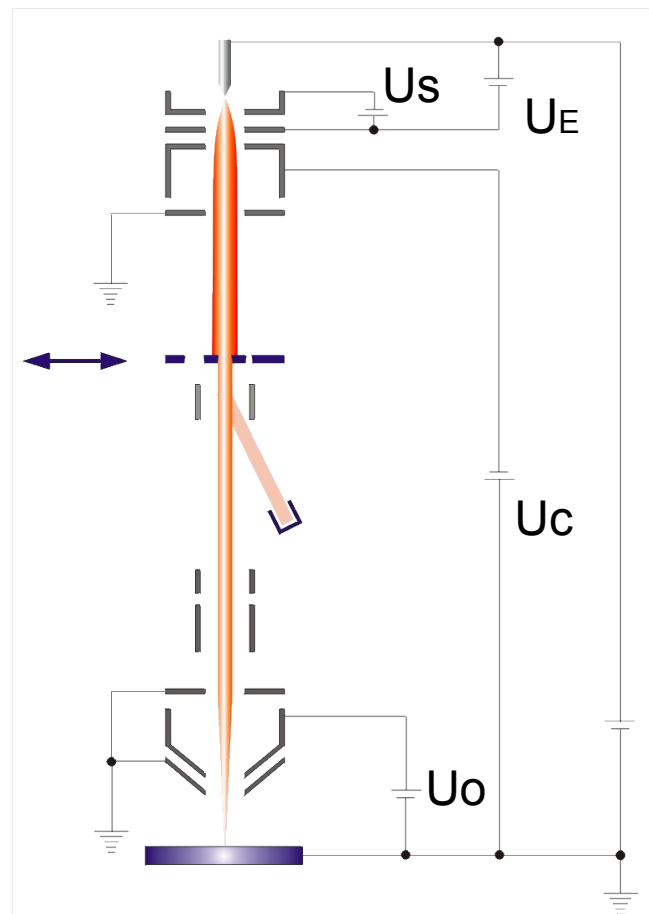


Optique d'une colonne ionique

Colonne classique à deux lentilles (Condenseur - Objectif)



Colonne Zeta - SII



Emetteur LMIS

Suppresseur

Extracteur

Condenseur

U_{EHT} 0,5 à 30 kV

Objectif

potentiel symétrique
Mais forme asymétrique

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 et de son angle

Aberrations Sphérique et Chromatique principalement

Dispositif de correction difficile

→ Un des moyens = Travailler dans l'approximation de Gauss
(approximation paraxial)

En symétrie cylindrique $r'' + \frac{\phi_0'(z)}{2\phi_0(z)} r' + \frac{\phi_0''(z)}{4\phi_0(z)} r = 0$ Equation paraxial des rayons

| α petit < 0,01 rad
| r^3 négligeable

→ Comment ? On diaphragme le faisceau

Rôle des diaphragmes

Aberration de sphéricité

Les diaphragmes limitent cette aberration

Aberration de diffraction



1924 Louis de Broglie
Equivalence Onde - Corpuscule

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

avec h constante de Planck = $6,62 \cdot 10^{-34}$ Js

À 30 kV

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

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

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

avec α angle de $\frac{1}{2}$ ouverture du faisceau

Approximation de Gauss

$$\alpha = 0,01 \text{ rd}$$

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

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

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

Limite le courant

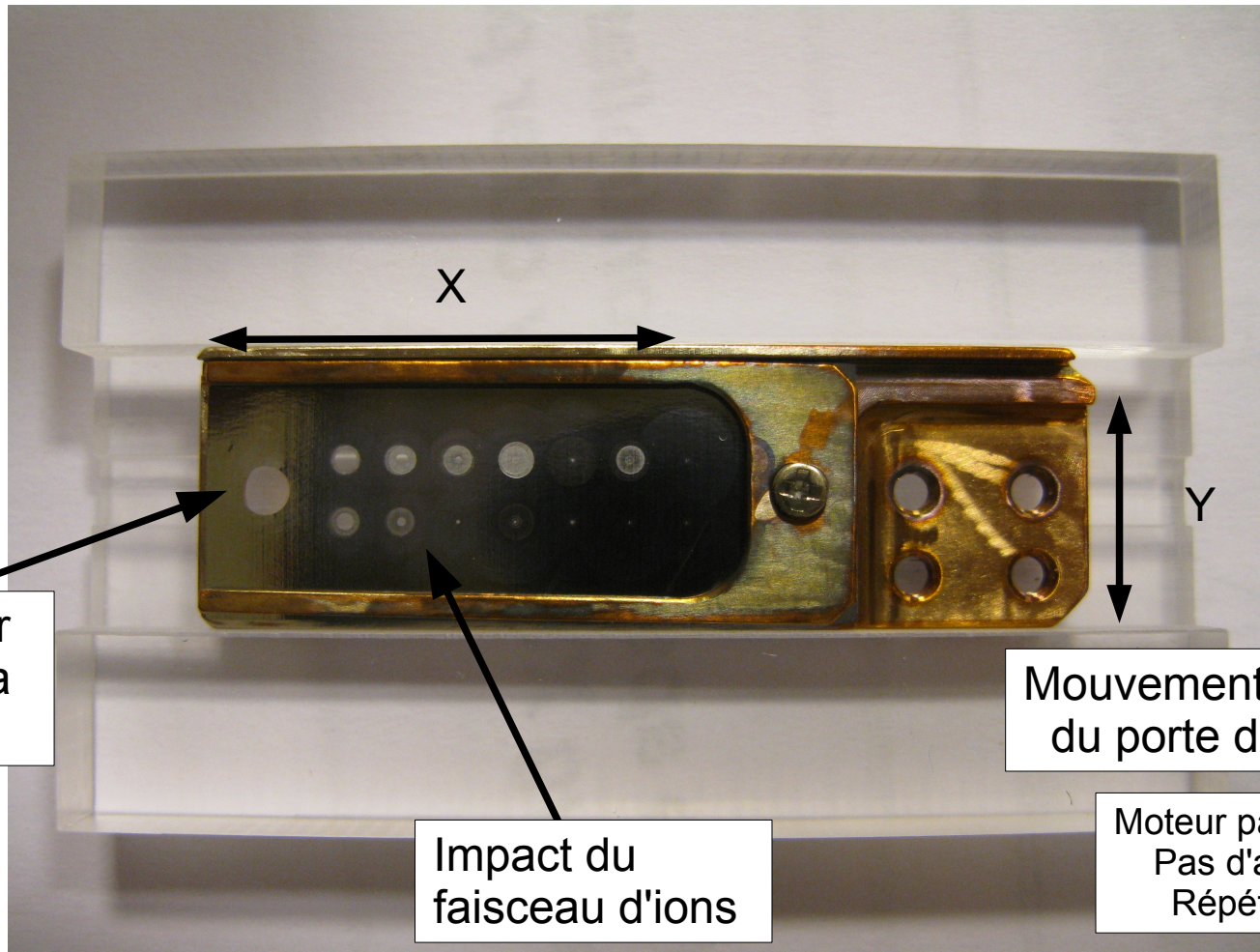
Les diaphragmes

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 Octopoles

Permet de :

Gérer la déflexion (x et y)

D'agir sur l'alignement

De corriger l'astigmatisme

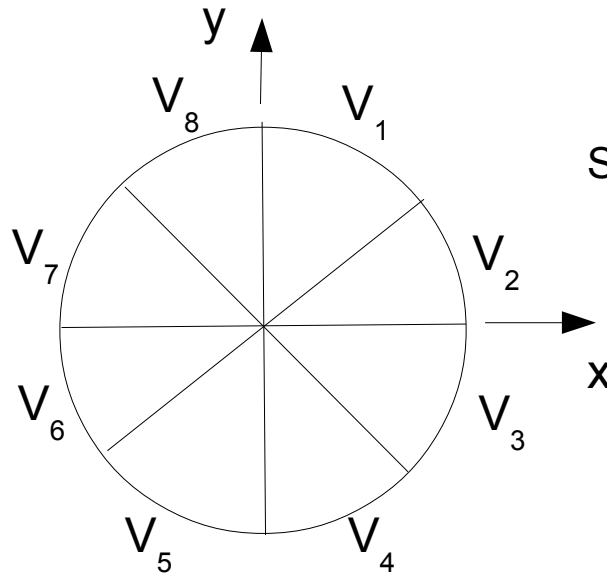
De tourner le plan de rotation de l'image (Scan rotation)

Une colonne à haute résolution nécessite une faible distance de travail

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

Cela suppose aussi un double système d'octopoles travaillant en tandem

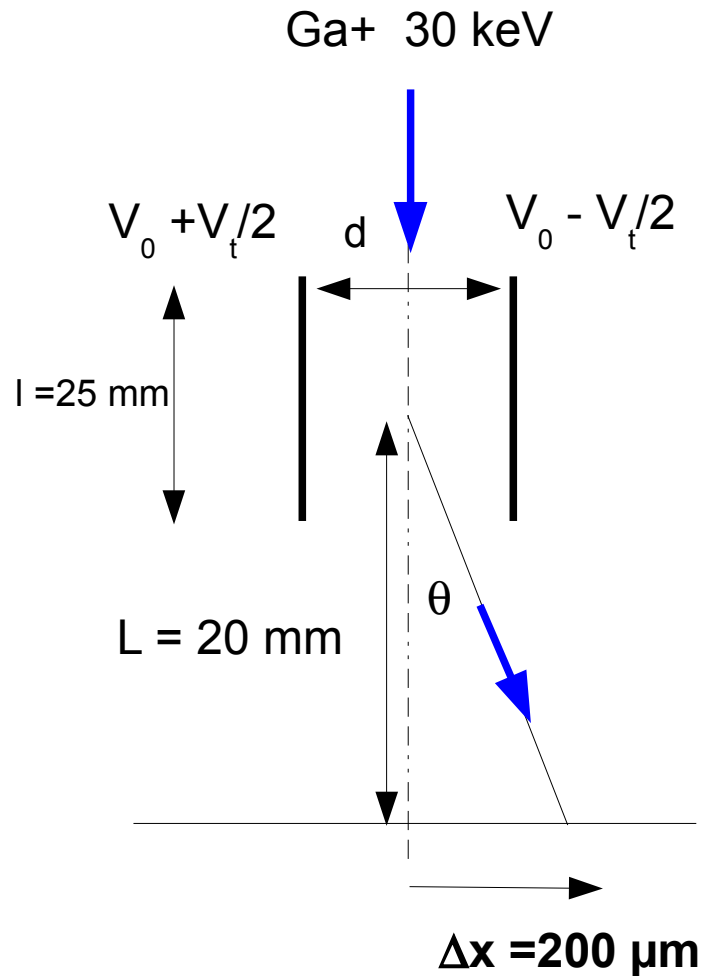
Permettant un point de pivotement du faisceau ionique dans la lentille finale
(au point de « Sans aberration de COMA »)



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

Le système de déflexion

Exemple



rappel $\tan \theta = \frac{\epsilon l}{2U}$

$$\theta = \frac{V_t l}{2V_0} \quad \begin{array}{l} V_0 = 30 \text{ kV} \\ V_t = 125 \text{ V} \end{array}$$

$$\Delta x = L \theta$$

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 (géré par le canon)

Un point de fonctionnement correspond à
Une tension d'accélération des ions
Un courant de sonde

Pour une tension,

Le courant de sonde est défini par le couple Condenseur - Diaphragme

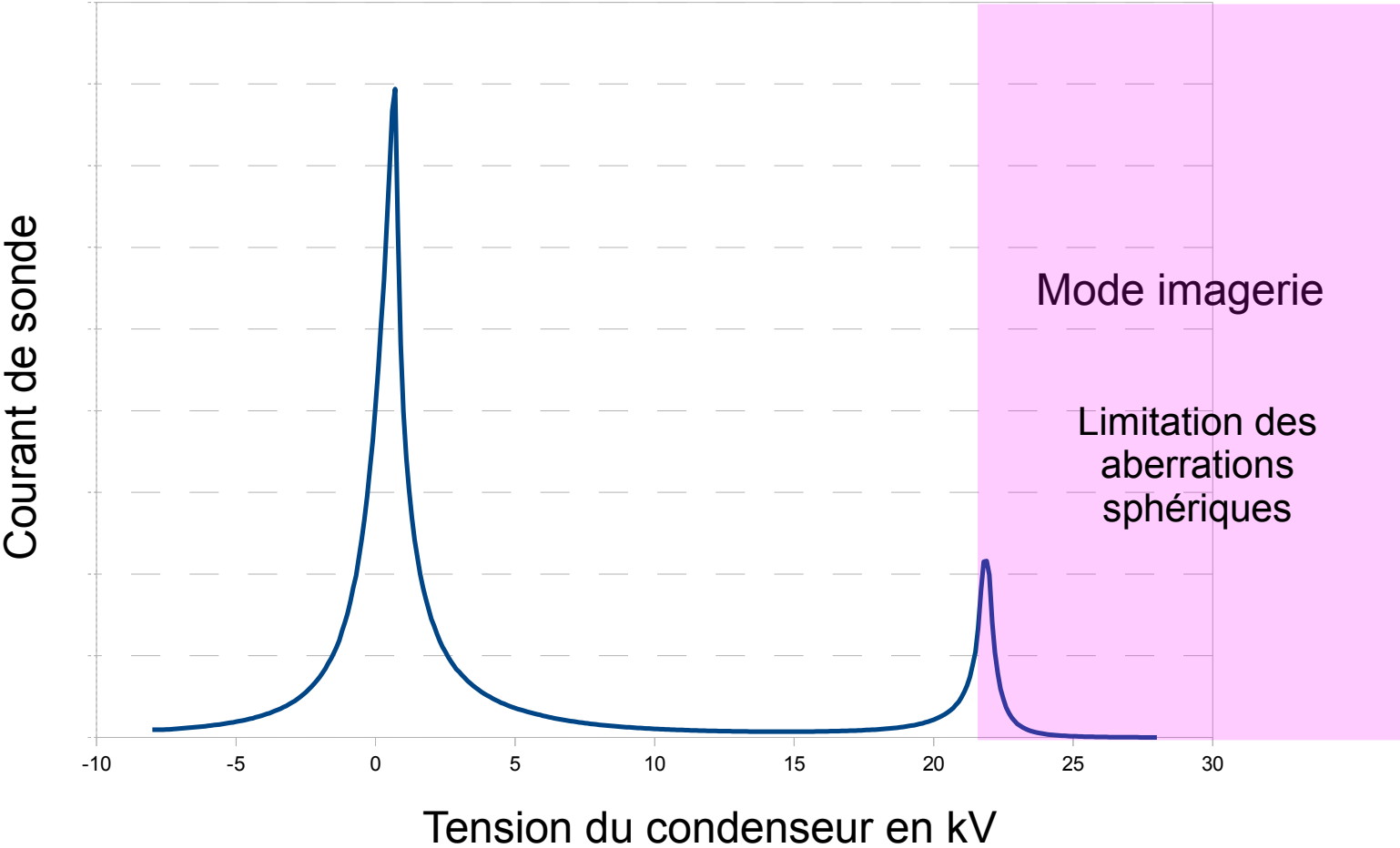
La focalisation, la correction de stigmatisme , l'alignement du diaphragme sont enregistrés

Dans ce système, à un point de fonctionnement, une résolution du faisceau est fixée

Des tables de fonctionnement sont définies

Signature d'une colonne ionique

Pour un diaphragme donné à 30 kV

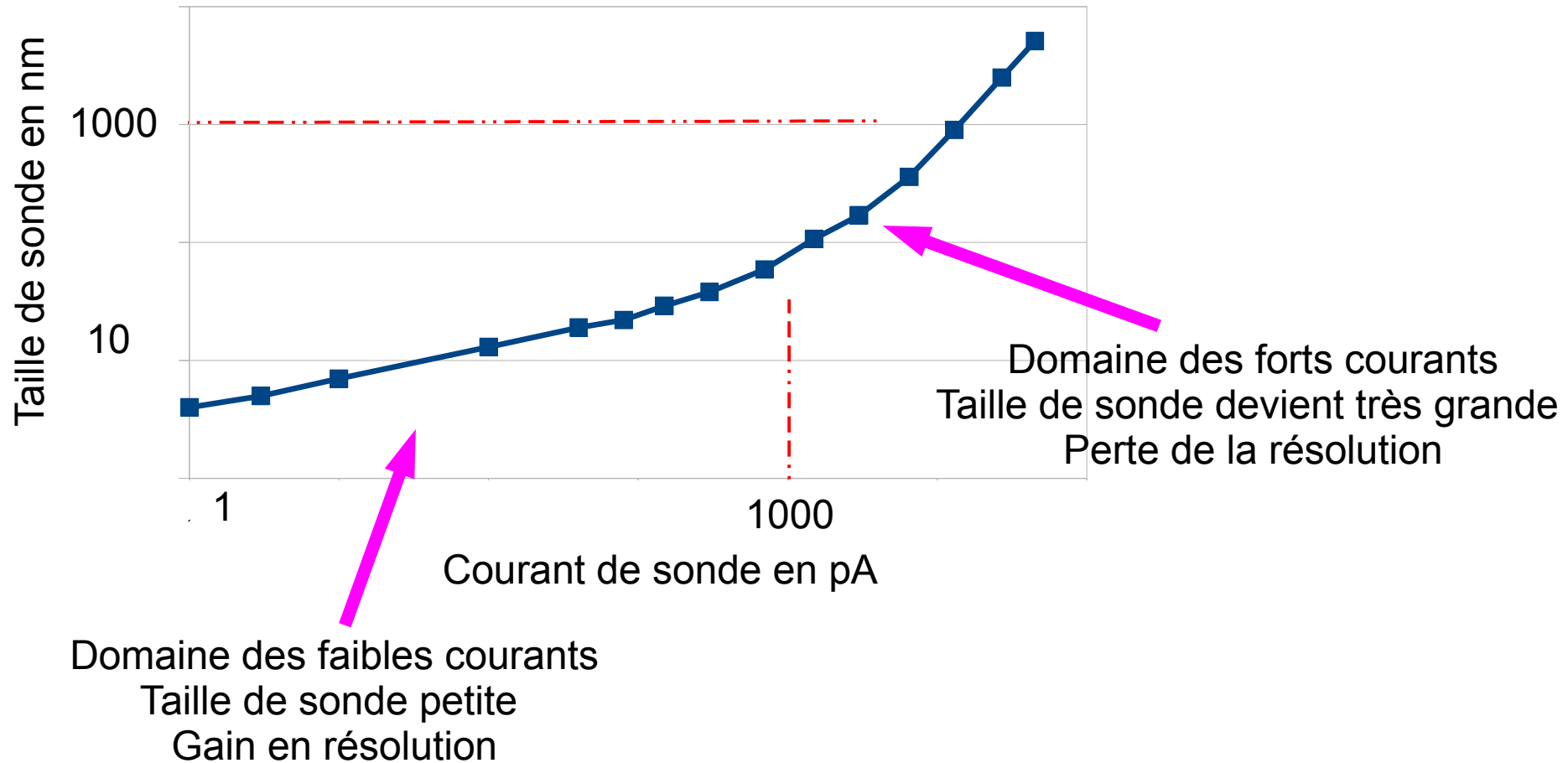


➡ Une taille de sonde

Fonctionnement d'une colonne

Caractéristique globale d'une colonne FIB

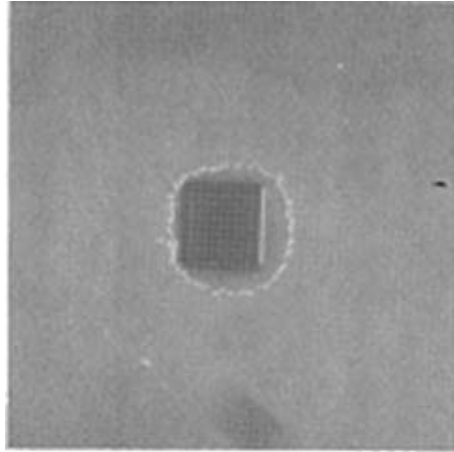
Taille de sonde et courant de sonde



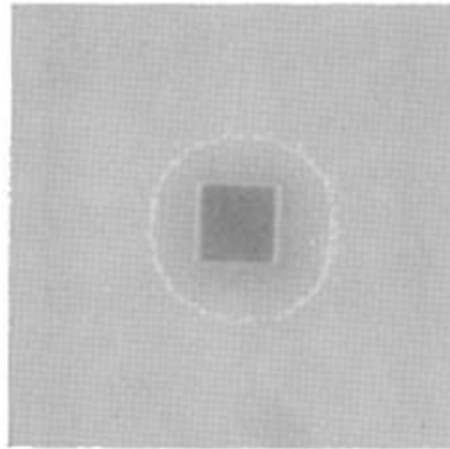
Impact sur la résolution des effets d'interaction coulombienne

Principalement à fort courant, l'effet est observé

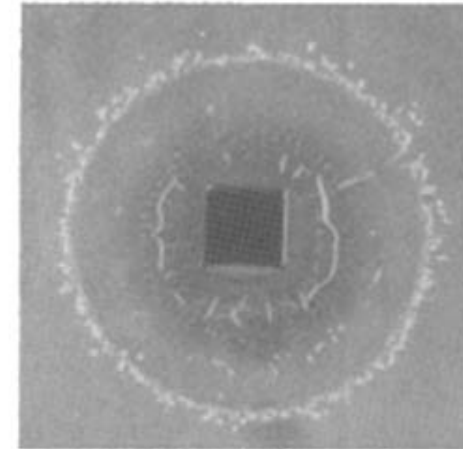
Observation d'un halo dû à l'effet de la distribution radiale des ions d'Au



t = 2 sec
D = 4×10^{14} ions/cm²

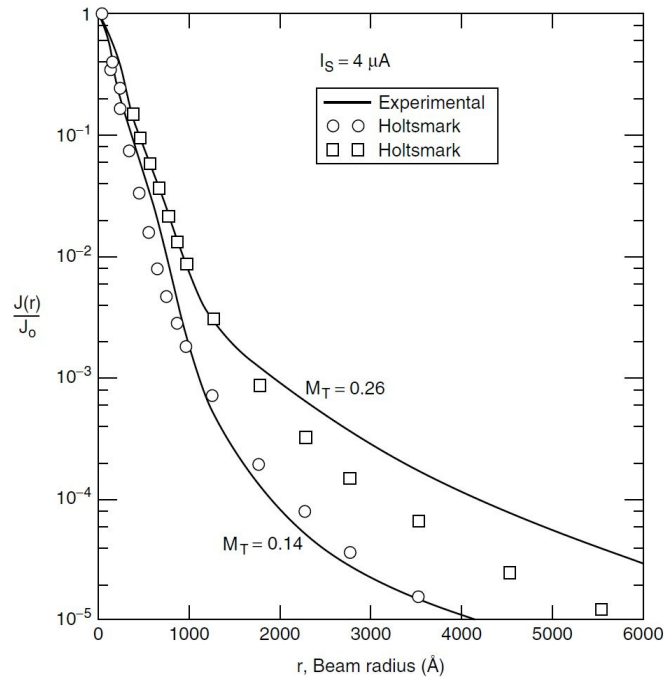


t = 10 sec
D = 2×10^{15} ions/cm²



t = 100 sec
D = 2×10^{16} ions/cm²

doc. J. Orloff



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

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

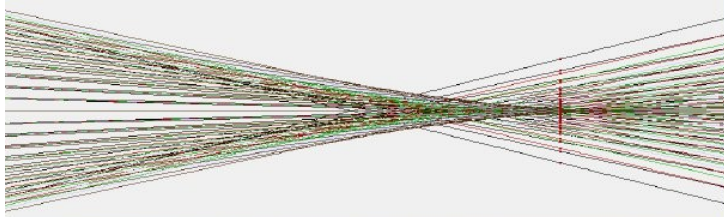
M_T = grandissement

Optimisation d'une colonne

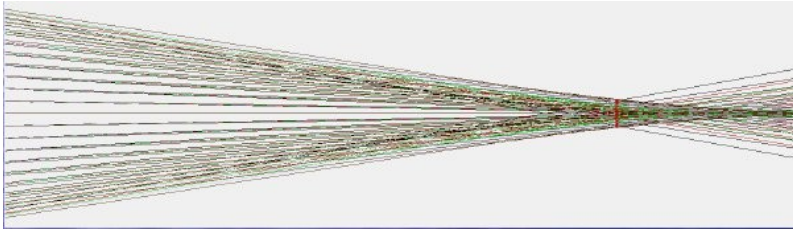
Fonctionnement à Fort Courant

La focalisation peut être ajustée

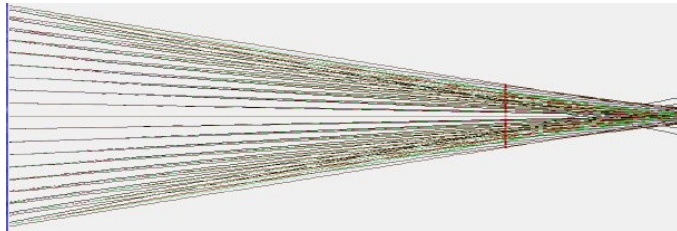
Focalisé



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

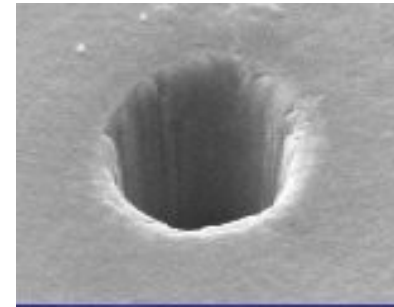
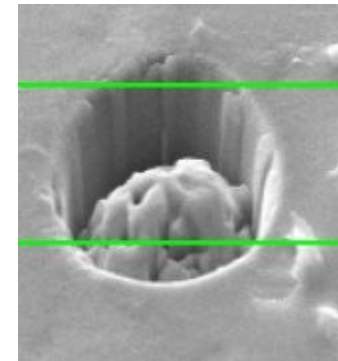


Image moins résolue mais l'abrasion est optimale :
Les bords du motif sont nets



Dégradation de l'image et de l'abrasion

Condition non optimale

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

Mode de fonctionnement d'une colonne

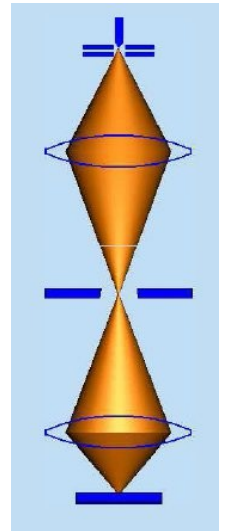
Certaines colonnes proposent plusieurs modes de fonctionnement

■ Mode d'imagerie

Chemin optique **AVEC** Cross Over

Densité de courant plus faible
Taille de sonde plus petite

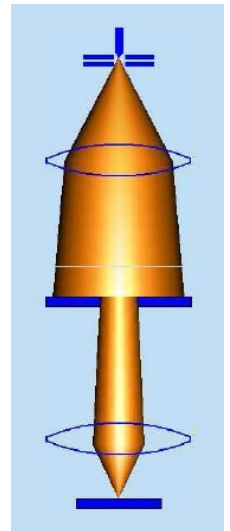
Résolution



■ Mode d'abrasion

Chemin optique **SANS** Cross Over

Permet des densités de courant plus fortes et donc une meilleure abrasion
Limite la dispersion énergétique à fort courant (liée aux interactions coulombiennes)



Optimisation d'une colonne

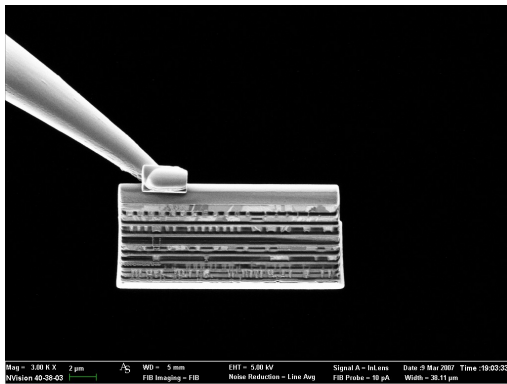
Fonctionnement à basse tension

Intérêt de la basse tension =

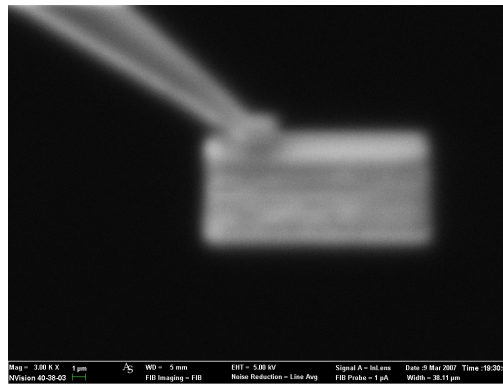
Limiter l'impact des ions gallium dans la structure cristalline de l'échantillon

Amorphisation

➔ Adaptation de l'optique de la colonne à basse tension
Taille de sonde (Limiter des aberrations,...)

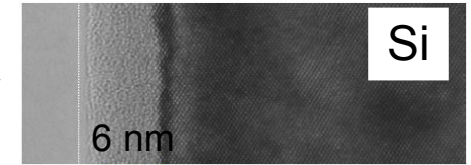


30kV



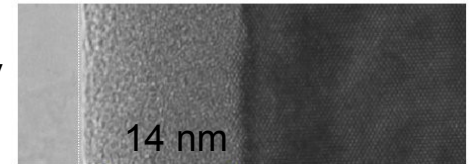
1kV

Voir 500 Volts



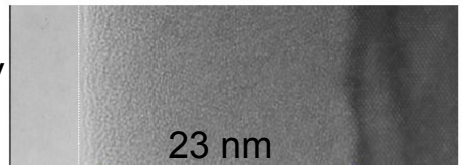
5kV

6 nm



15kV

14 nm



30kV

23 nm

Amorphisation

Différentes voies :

Addition de dispositifs de correction du faisceau

Deux quadripôles pour réaligner la colonne sans réglage mécanique

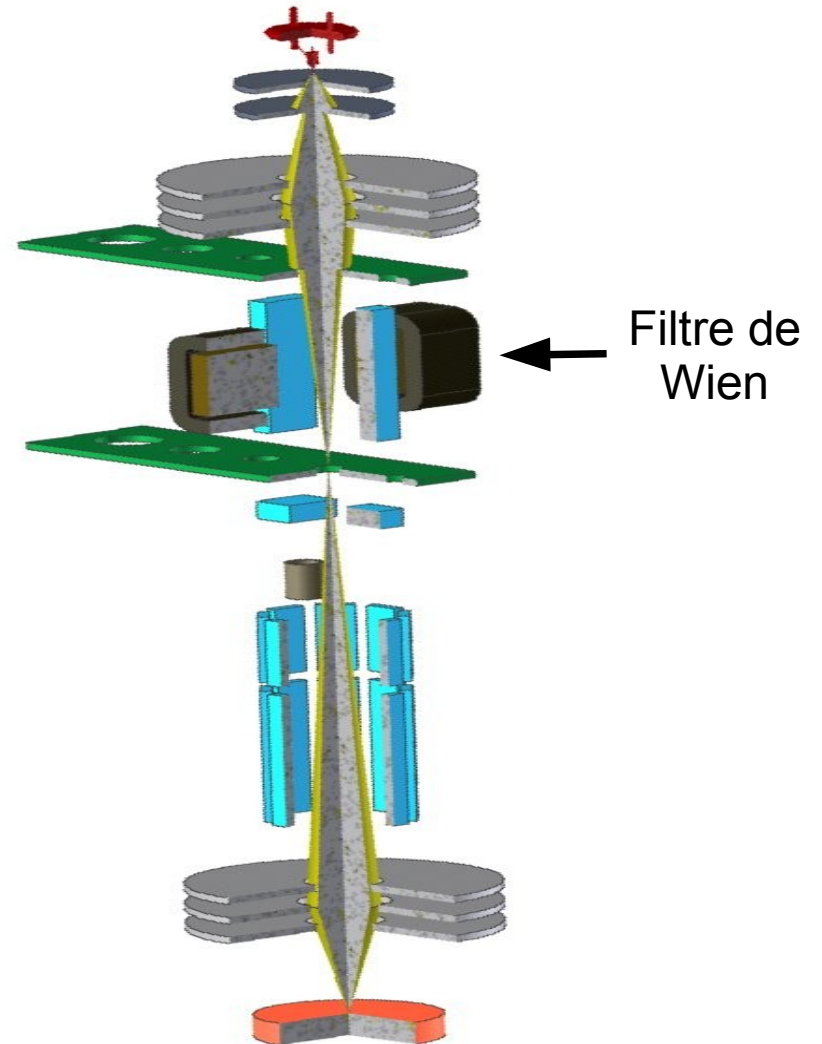
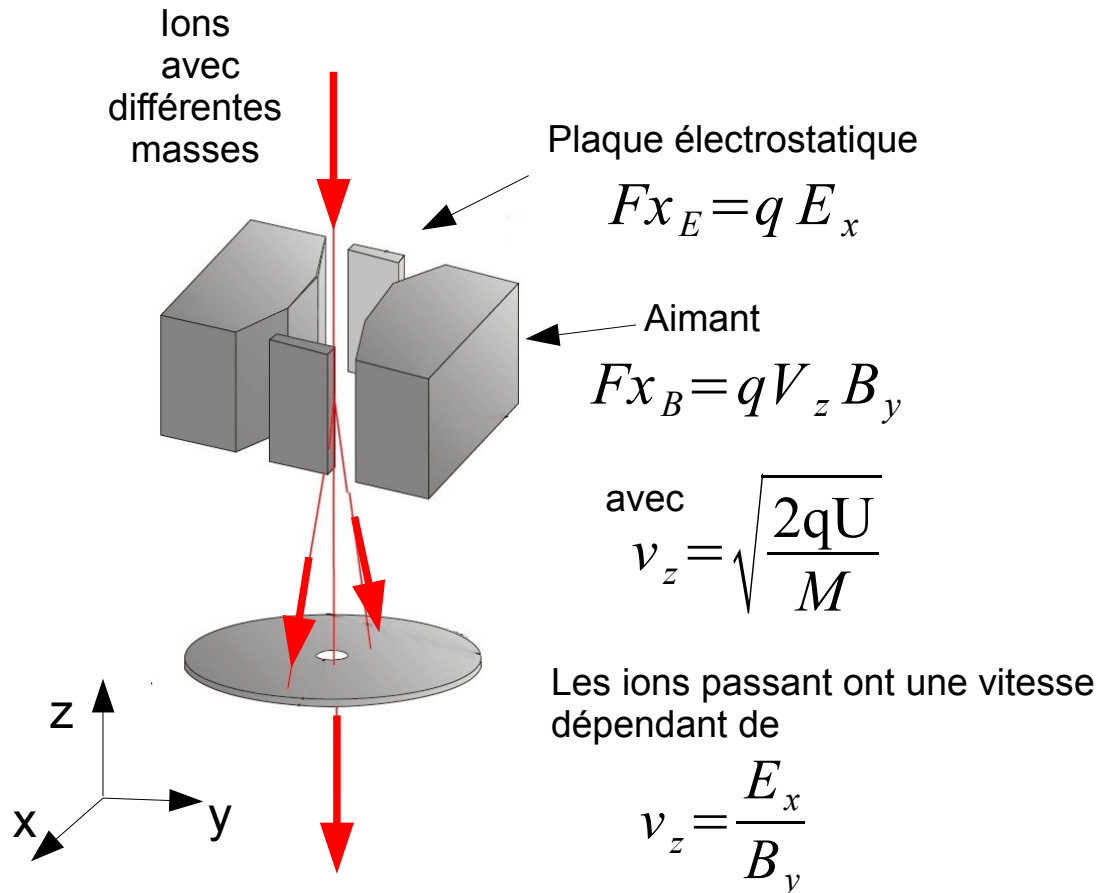
Colonnes spécifiques

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

Un filtre de Wien est introduit dans la colonne

Principe du filtre de Wien ou ExB

Utiliser un champ électrique croisé
avec un champ magnétique



Les performances actuelles... *Résumé*

Colonnes ioniques commercialisées et montées sur des doubles colonnes MEB - FIB

LMIS source de Gallium

- Durée de vie de la source = 1500 h garantie
- Tension d'accélération Jusqu'à 500 V
- Résolution Jusqu'à 2,5 nm à 30 kV – faible courant
 À basse tension, pas d'information
- Courant de sonde Jusqu'à 65 nA

■ Références :

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

■ Remerciements

Florence Robaut – CMTC
Laurent Maniguet - CMTC
Jean Claude Ménard – ZEISS
Nicolas Vivet - Orsay Physics

MERCI de votre attention