

# Optique ionique: principes et applications

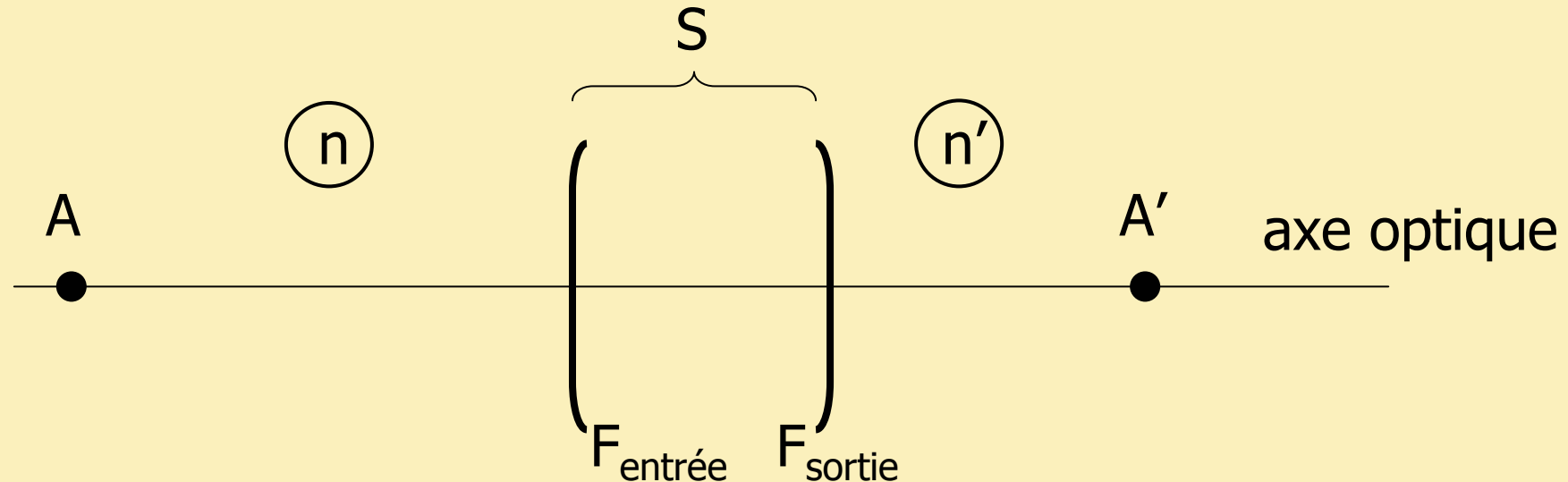
Tom Wirtz

*Département Science et Analyse des Matériaux (SAM)  
Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann  
L-4422 Belvaux  
Luxembourg*

# Sommaire

- Optique géométrique
  - Définitions
  - Éléments cardinaux et construction d'image
  - Aberrations
  
- Optique des particules chargées
  - Principes
  - Éléments cardinaux et construction d'image
  - Aberrations
  
- Applications
  - Éléments électrostatiques
  - Éléments magnétiques
  
- Exemple: canon à ions

# Définitions



Si  $A$  est une source ponctuelle qui émet des rayons lumineux sur  $F_{\text{entrée}}$ ,  $A$  est considéré comme **objet** pour le système  $S$

Si derrière  $F_{\text{sortie}}$  ces rayons passent tous par un point  $A'$ ,  $A'$  est appelé **image** de  $A$  dans  $S$

$A$  et  $A'$  sont dits **points conjugués**

L'image  $A'$  est dite **réelle** quand les rayons lumineux passent effectivement par  $A'$

L'image  $A'$  est dite **virtuelle** quand les prolongements des rayons émergents passent par  $A'$

$n = n(\lambda) = c/v$  est l'**indice de réfraction**,  $c$  et  $v$  étant respectivement la vitesse de la lumière dans le vide et dans le milieu considéré

# Stigmatisme

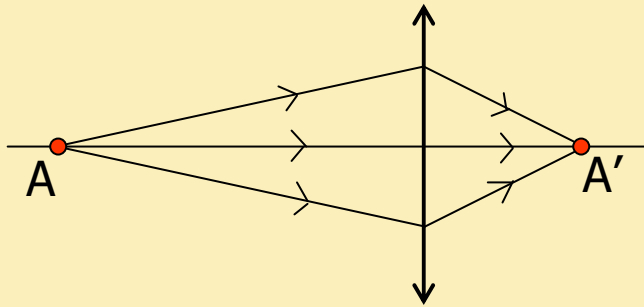
- Un système optique  $S$  est dit **stigmatique** pour un couple de points  $A$  et  $A'$ , si tout rayon passant par  $A$  passe par  $A'$  après son passage dans le système  $S$
- $A$  et  $A'$  sont conjugués par rapport à  $S$
- $A'$  peut être réel ou virtuel

## Approximation de Gauss

- Un système optique  $S$  est dit **centré**, si les centres de l'ensemble des éléments optiques le composant sont alignés sur l'axe optique
- Un système optique centré est utilisé dans les **conditions de Gauss**, si tous les rayons sont **paraxiaux**, c-à-d si les rayons font avec l'axe optique des **angles faibles**
- Dans les conditions de Gauss, on a un **stigmatisme approché**, comme les rayons paraxiaux passent tous au voisinage de  $A'$

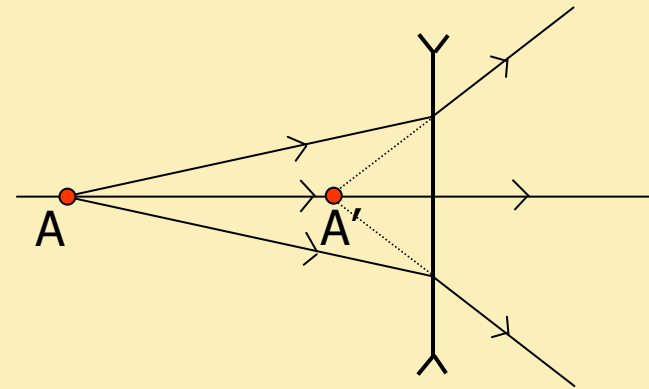
# Lentilles

## Lentille convergente



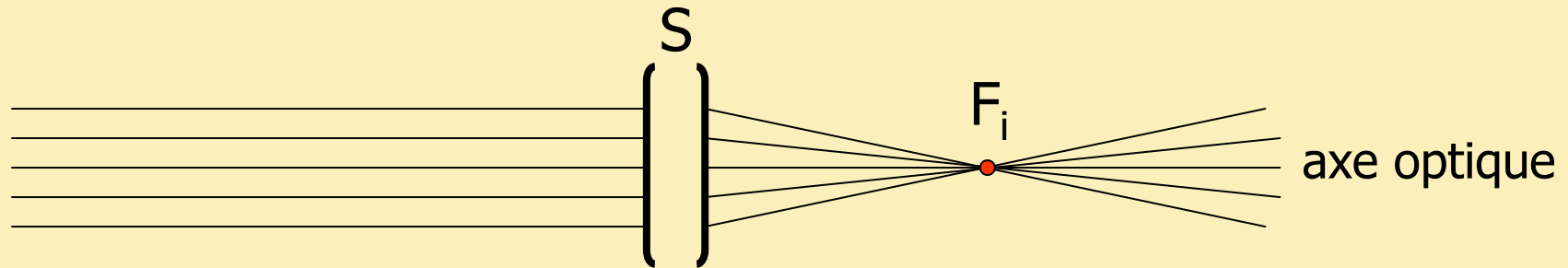
$A'$  est une image réelle de  $A$

## Lentille divergente

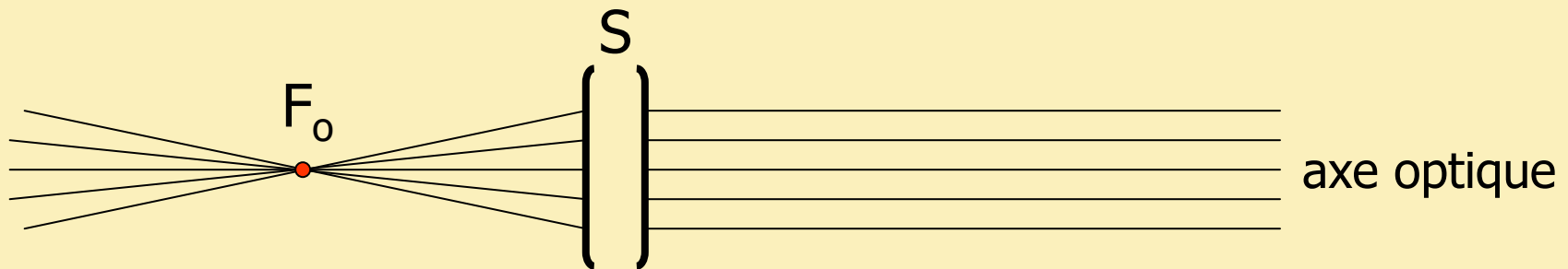


$A'$  est une image virtuelle de  $A$

# Point focal

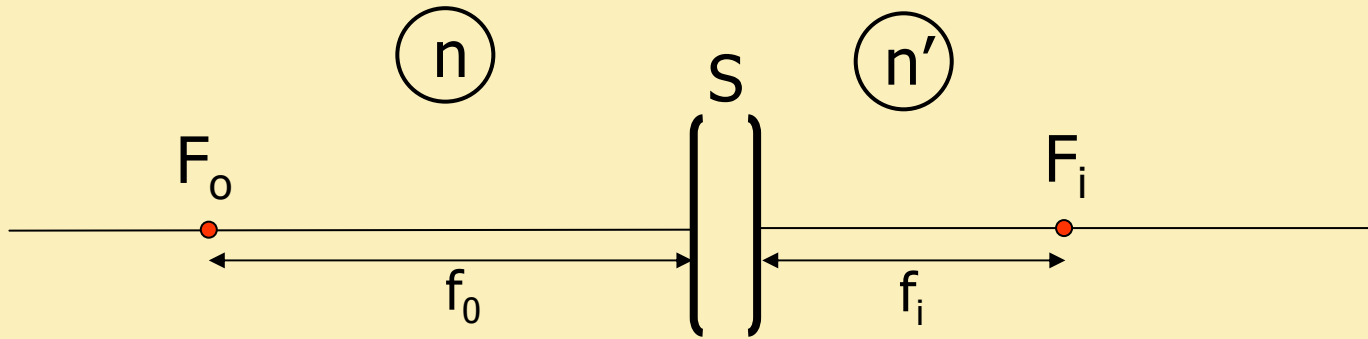


- Le foyer image  $F_i$  est le point conjugué du milieu de l'objet situé sur l'axe optique à l'infini



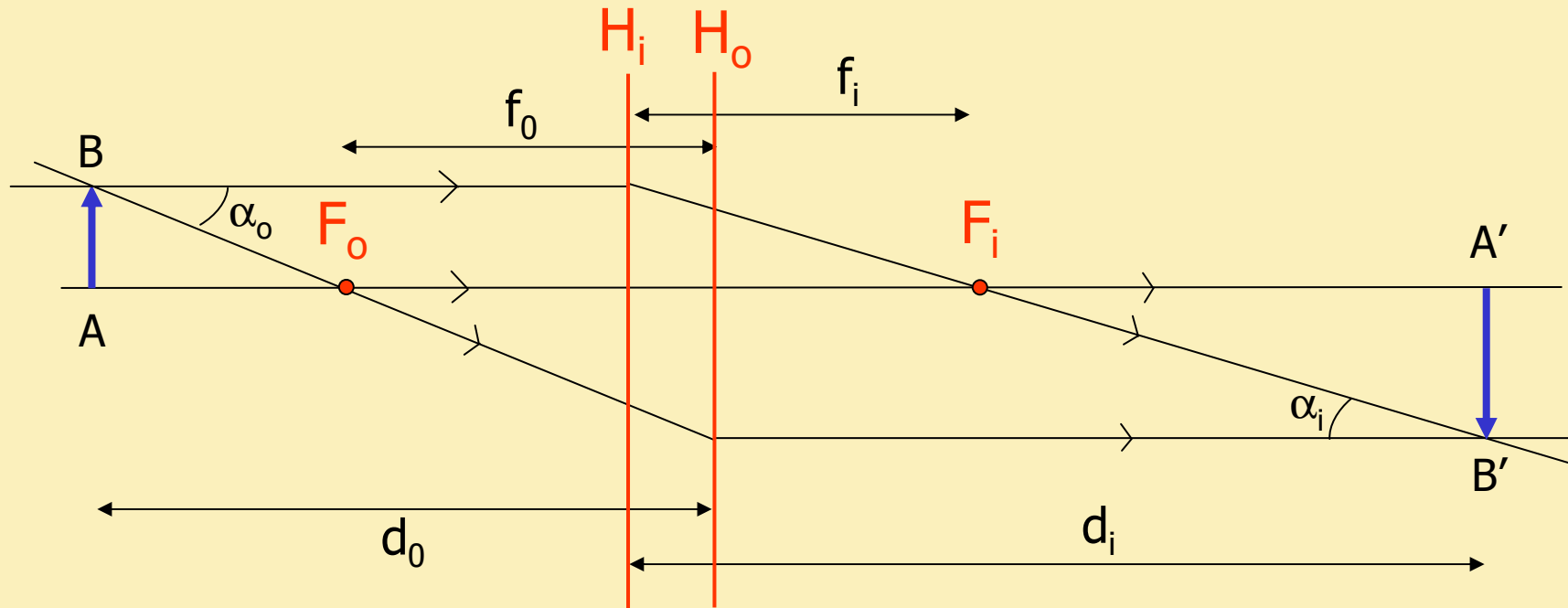
- Le foyer objet  $F_o$  est le point conjugué du milieu de l'image située sur l'axe optique à l'infini

# Distance focale



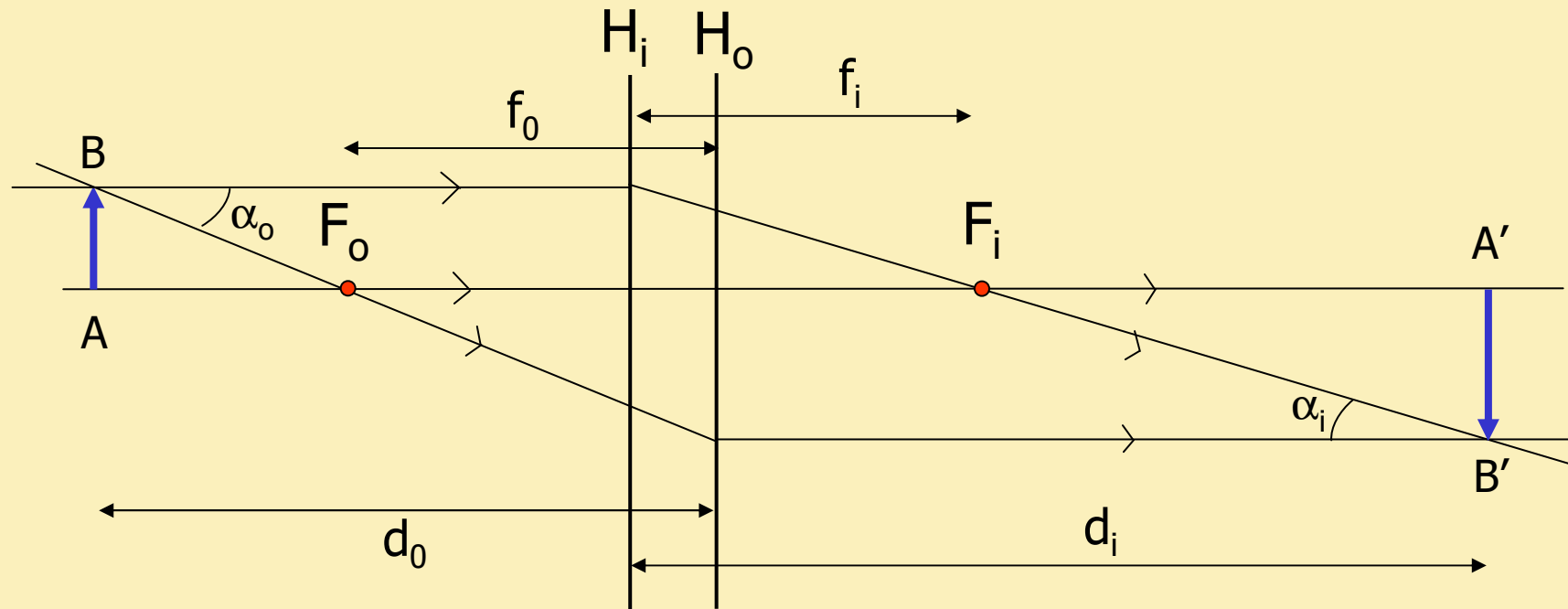
$$\frac{f_o}{f_i} = \frac{n}{n'}$$

# Éléments cardinaux et construction d'image



Position des plans principaux  $H_o$  and  $H_i$   
Position des foyers  $F_o$  and  $F_i$

# Relations importantes



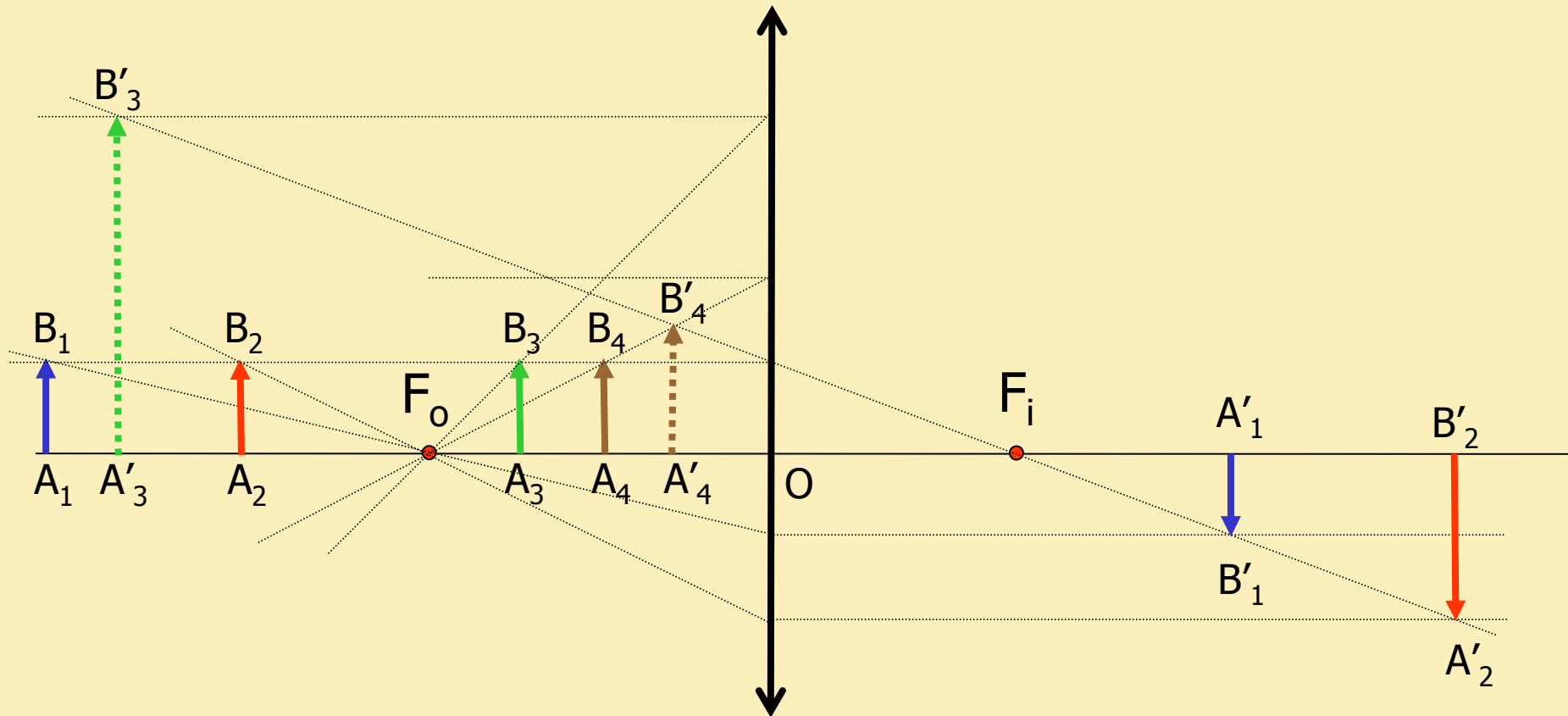
Position de l'image :  $\frac{f_o}{d_o} + \frac{f_i}{d_i} = 1$

Grandissement linéaire :  $M_d = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{f_o}{f_i} \frac{d_i}{d_o}$

Grandissement angulaire :  $M_a = \frac{\alpha_i}{\alpha_o} = -\frac{d_o}{d_i}$

$M_d \cdot M_a = \frac{f_o}{f_i}$

# Position de l'image



$OA > OF_o \rightarrow$  image réelle,  $M_d < 0$

$OA < OF_o \rightarrow$  image virtuelle,  $M_d > 0$

# Aberrations

Aberration sphérique

Aberration chromatique

Astigmatisme

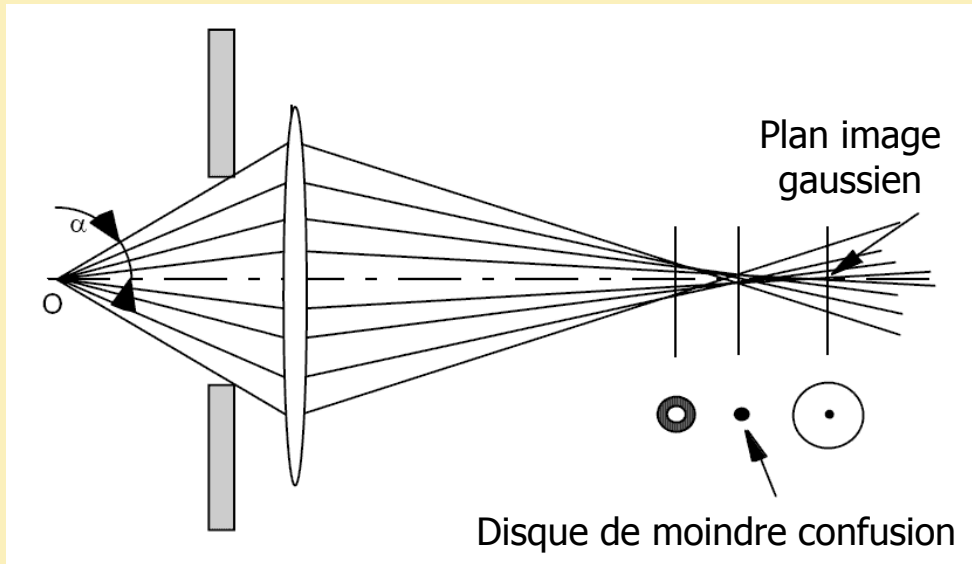
Distortion

Courbure de champ

Coma

$$d_{\text{spot}} = \sqrt{d_{\text{Gauss}}^2 + \sum_i d_{\text{aberration}_i}^2}$$

# Aberrations sphérique et chromatique



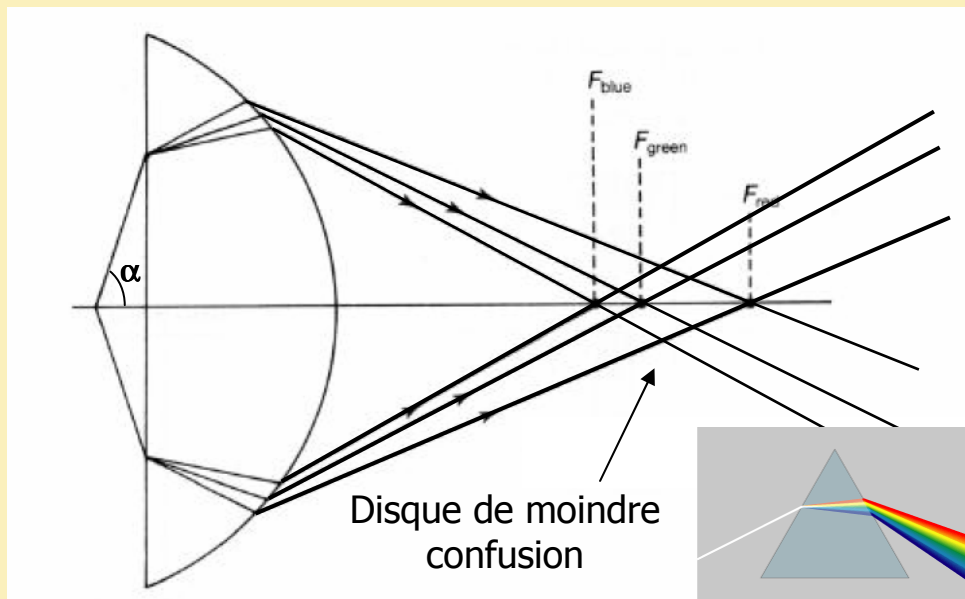
## *Aberration sphérique*

Diamètre du disque de moindre confusion:

$$d_s = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot \alpha^3$$

$C_s$  : constante d'aberration sphérique dépendant du système optique

$\alpha$  : demi-angle d'ouverture du faisceau



## *Aberration chromatique*

Diamètre du disque de moindre confusion:

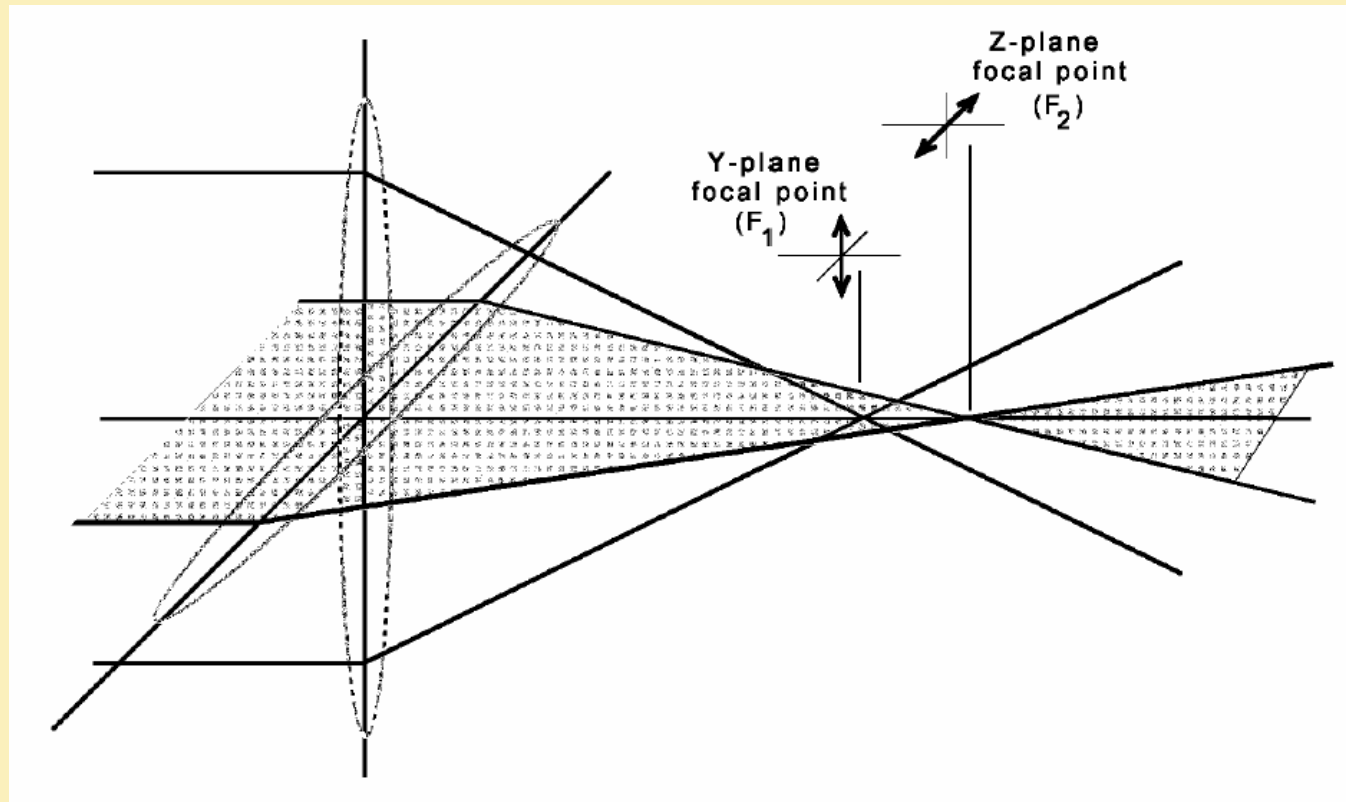
$$d_c = C_c \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

$C_c$  : constante d'aberration chromatique dépendant du système optique

$\alpha$  : demi-angle d'ouverture du faisceau

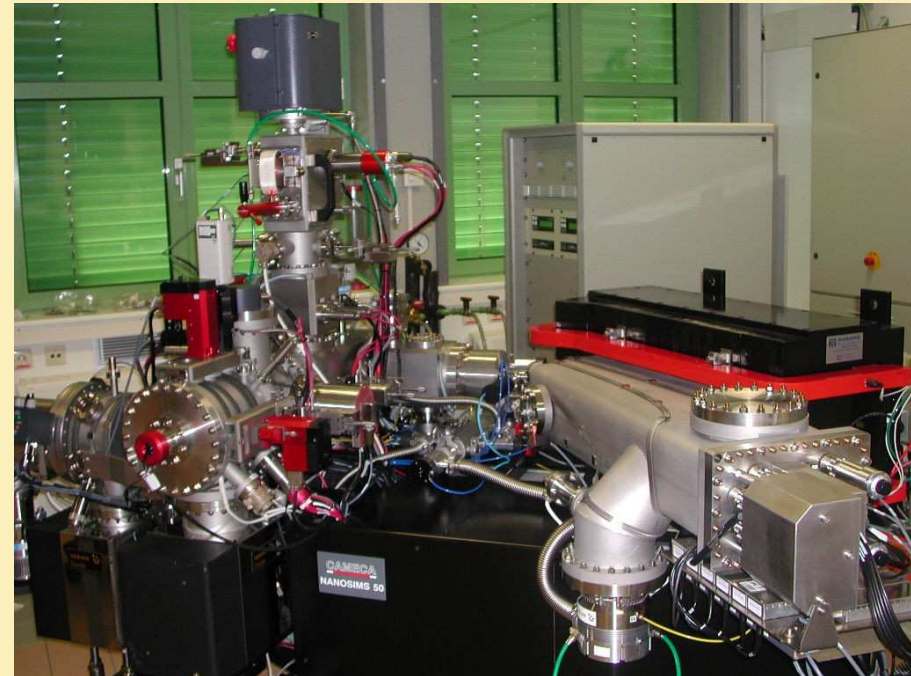
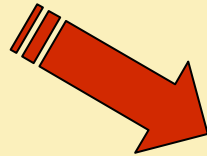
$\lambda$  : longueur d'onde

# Astigmatisme



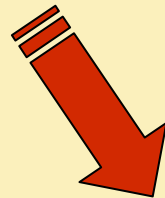
Variation des longueurs focales avec le plan considéré

# Optique des particules chargées



# Optique des particules chargées

lumière  
systèmes optiques en verre  
indice de réfraction



particules chargées (électrons, ions)  
systèmes électrostatiques ou magnétiques  
potentiels

# Equation de base du mouvement

$$\frac{d}{dt} m\vec{v} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad \text{Force de Lorentz}$$

$$\vec{E} = -\text{grad } V$$

## Caractéristiques de la particule:

- masse  $m$
- charge  $q$
- vitesse  $v$

## Caractéristiques du système optique:

- champ électrique  $E$
- champ magnétique  $B$
- potentiel  $V$

# Equations électrostatiques et magnétostatiques de base

## Equations de Maxwell

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \operatorname{rot} \vec{E} = \vec{0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$$

Caractéristiques liées au faisceau de particules:

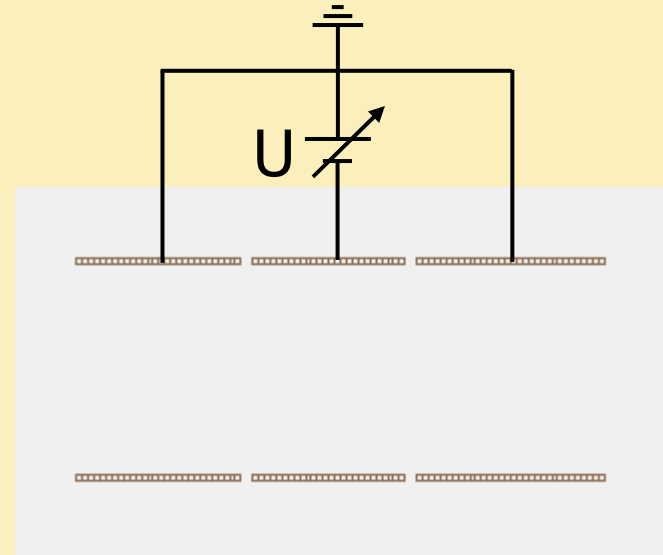
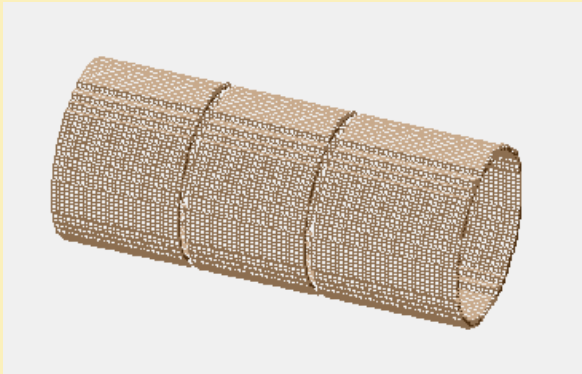
- densité de charge  $\rho$
- densité de courant  $j$

Equation de Poisson:  $\Delta V = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$  (charge d'espace)

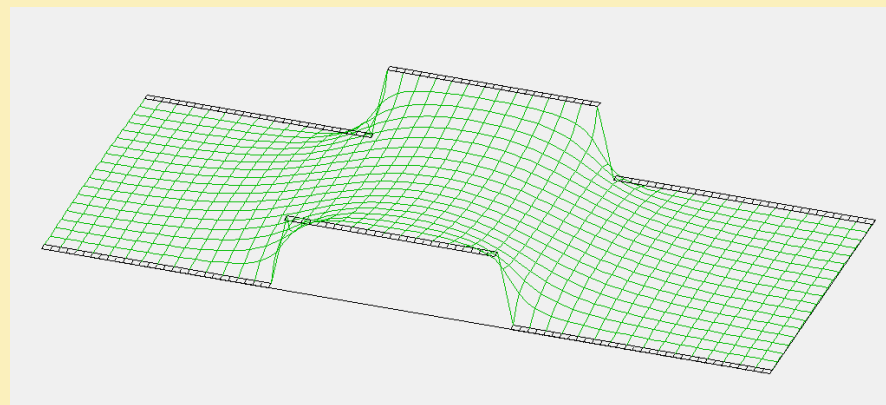
Equation de Laplace:  $\Delta V = 0$  (pas de charge d'espace)

# Lentilles électrostatiques

## *Lentille Einzel*

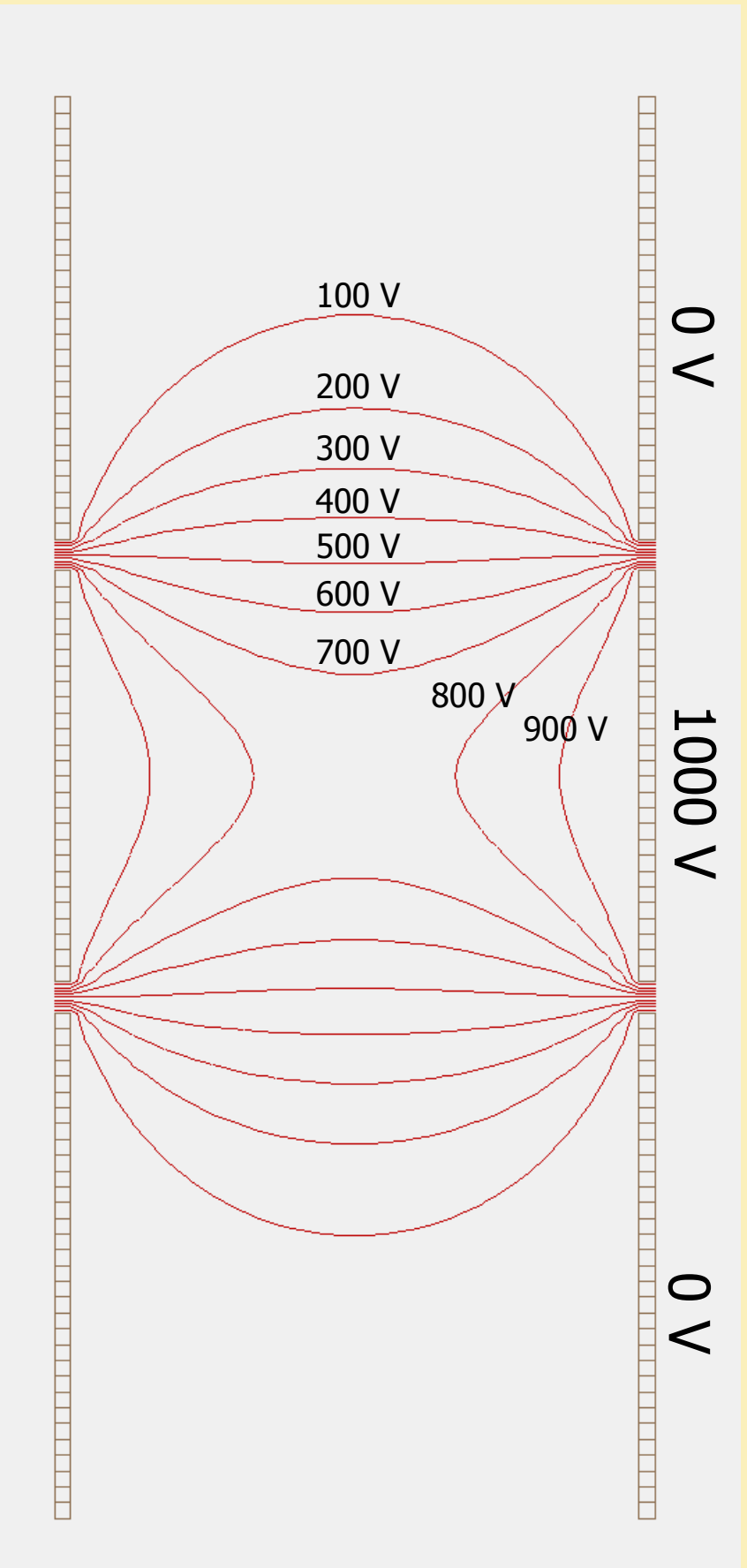


Lentille à 3 éléments, la première et la troisième électrode sont au même potentiel

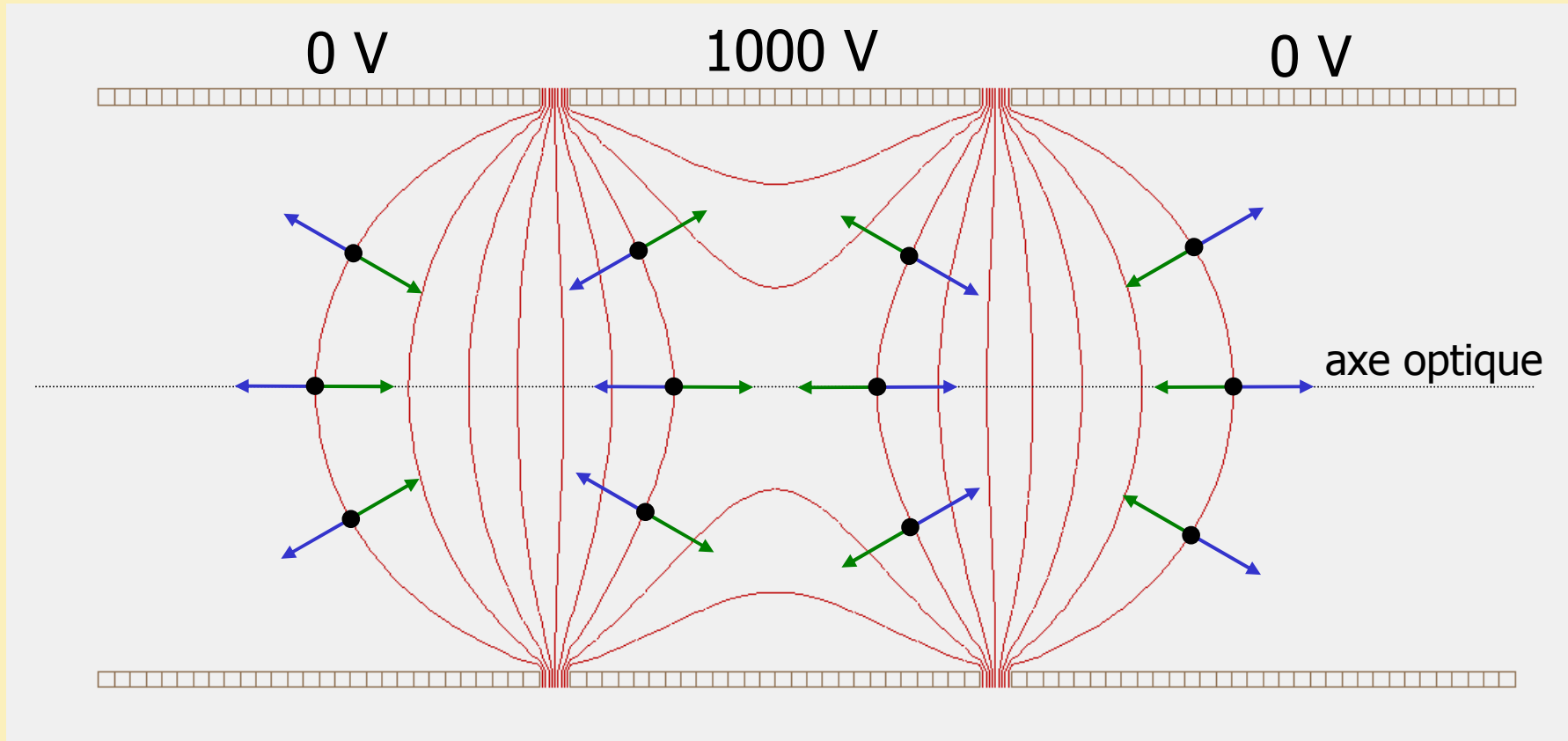


*Conservation de l'énergie de la particule*

# Lignes de champ



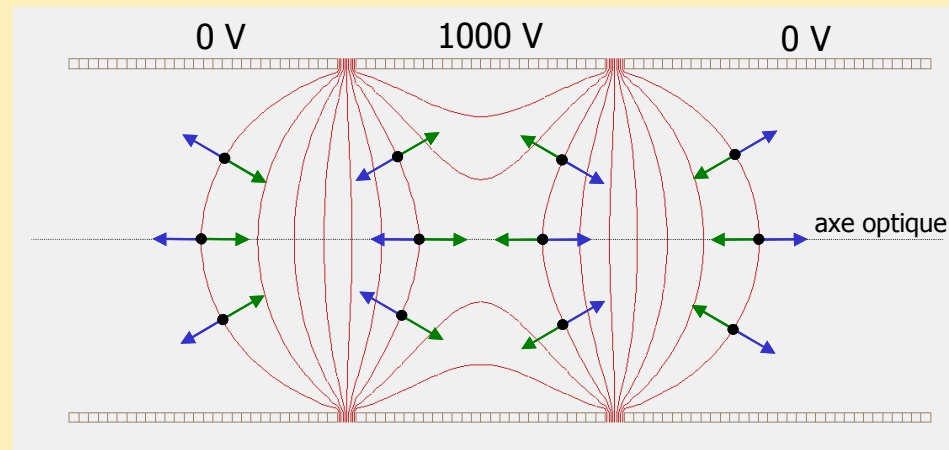
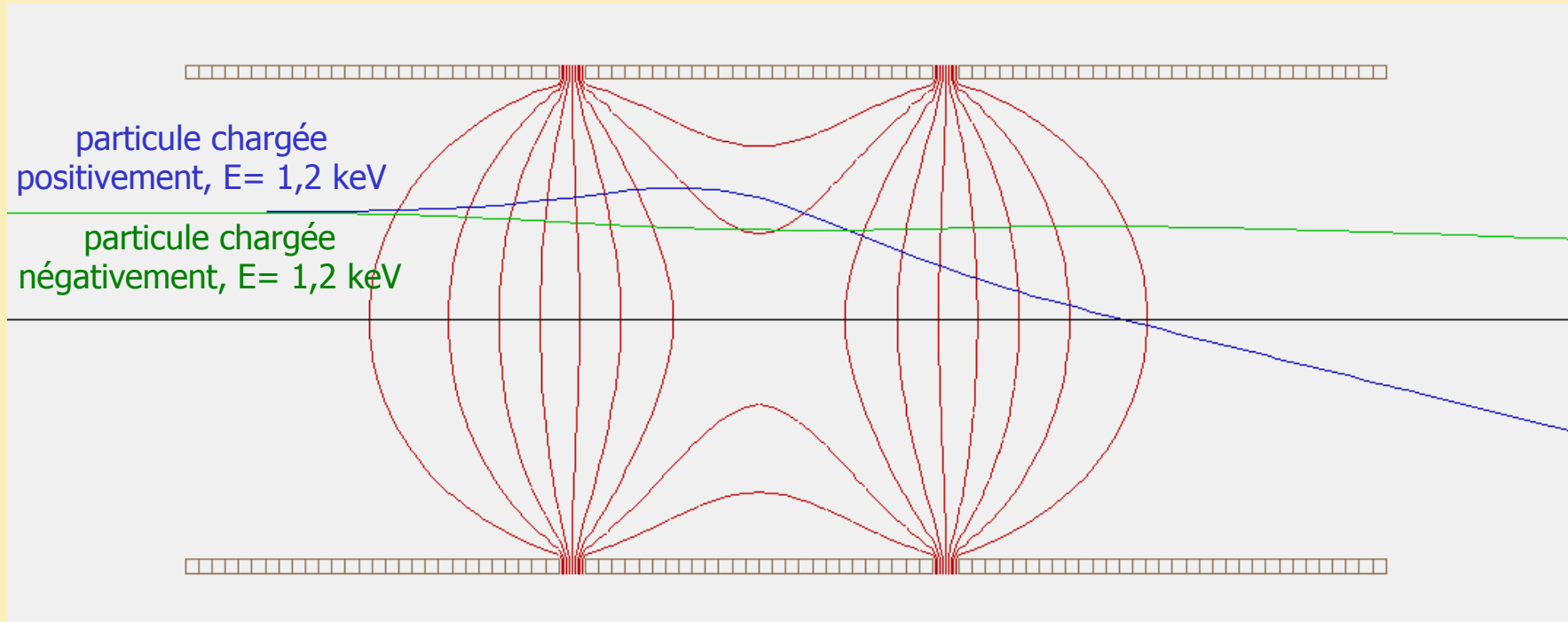
# Forces



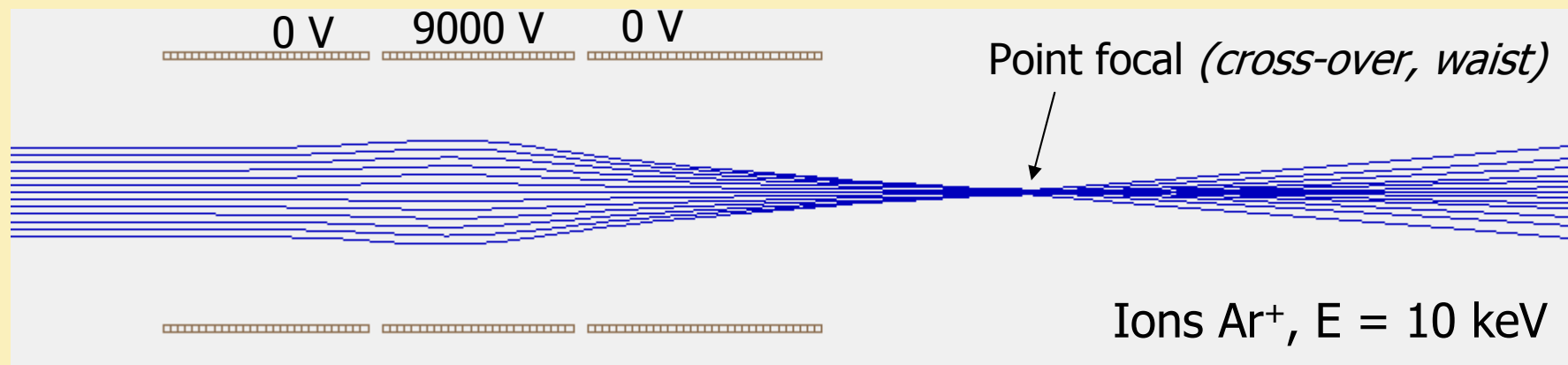
Particule chargée positivement:  $\vec{F} = q \cdot \vec{E} = +|q| \cdot \vec{E}$

Particule chargée négativement:  $\vec{F} = q \cdot \vec{E} = -|q| \cdot \vec{E}$

# Forces

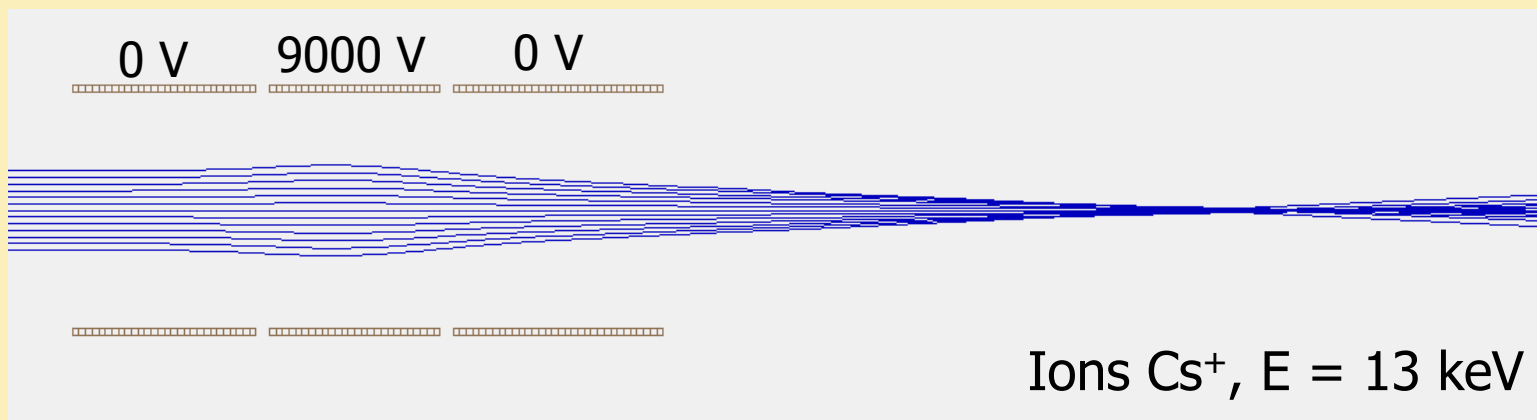
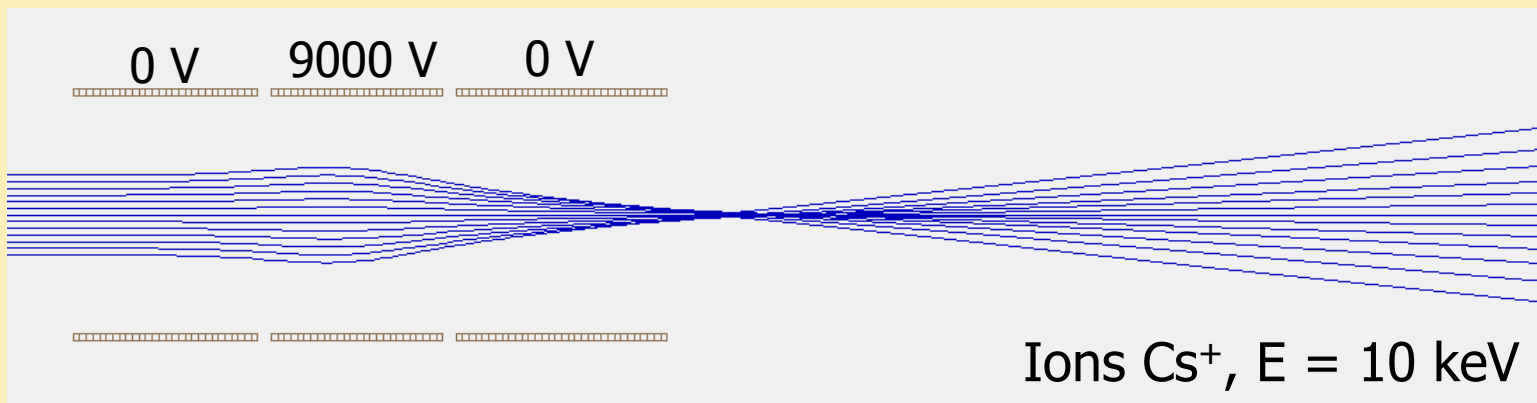


# Focalisation

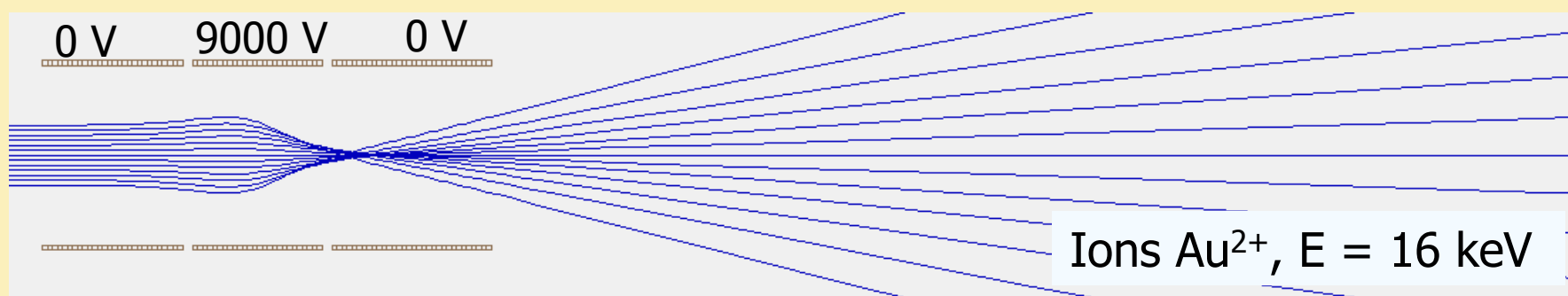
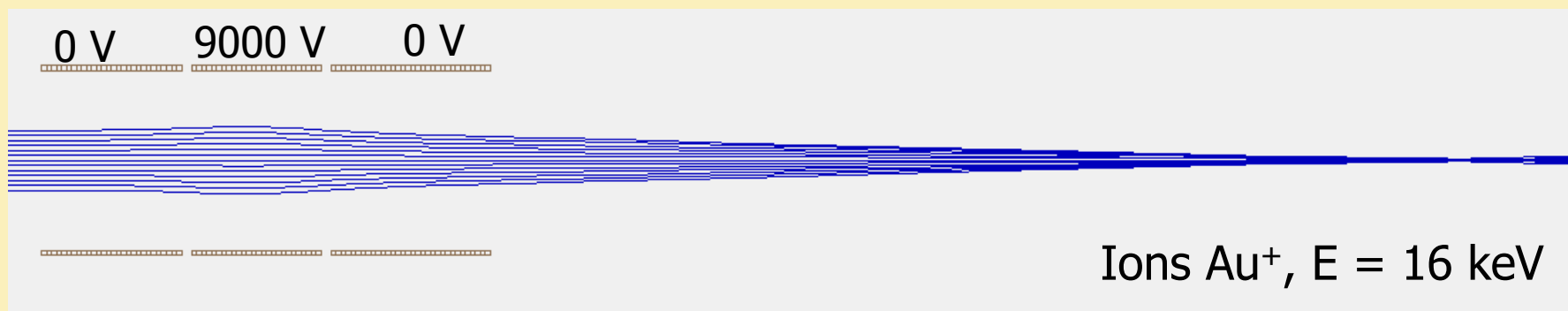


*Simulation avec le logiciel Simion 7.0 3D*

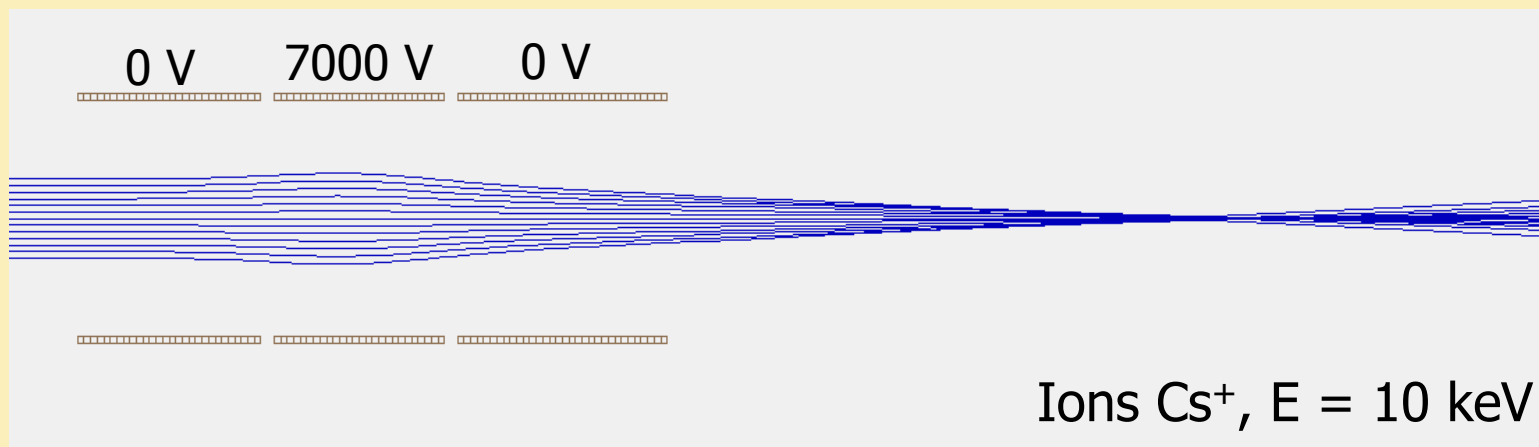
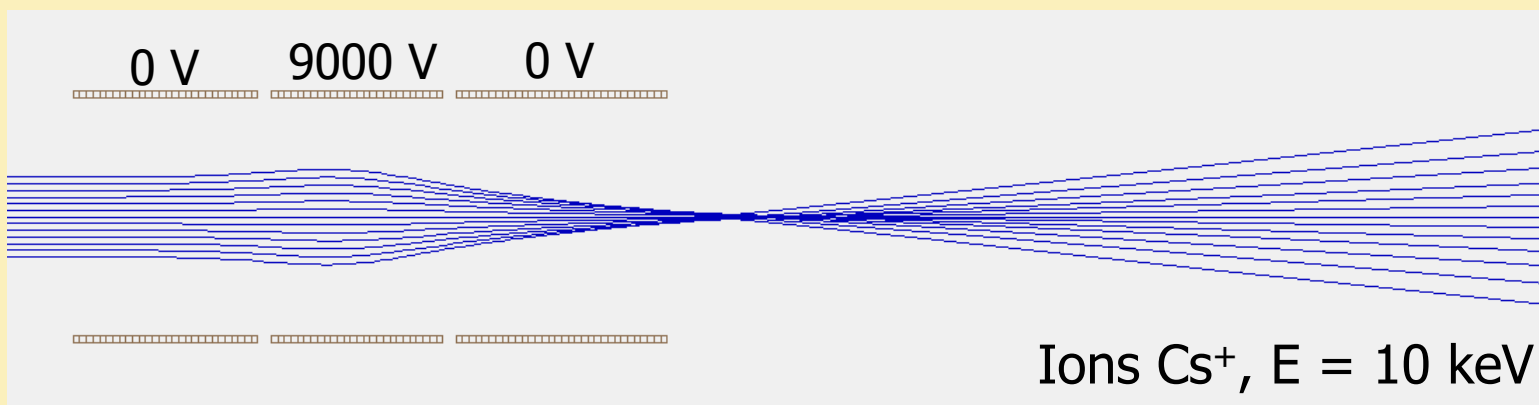
# Energie des particules chargées



# Etat de charge des particules



# Potentiel des électrodes de la lentille



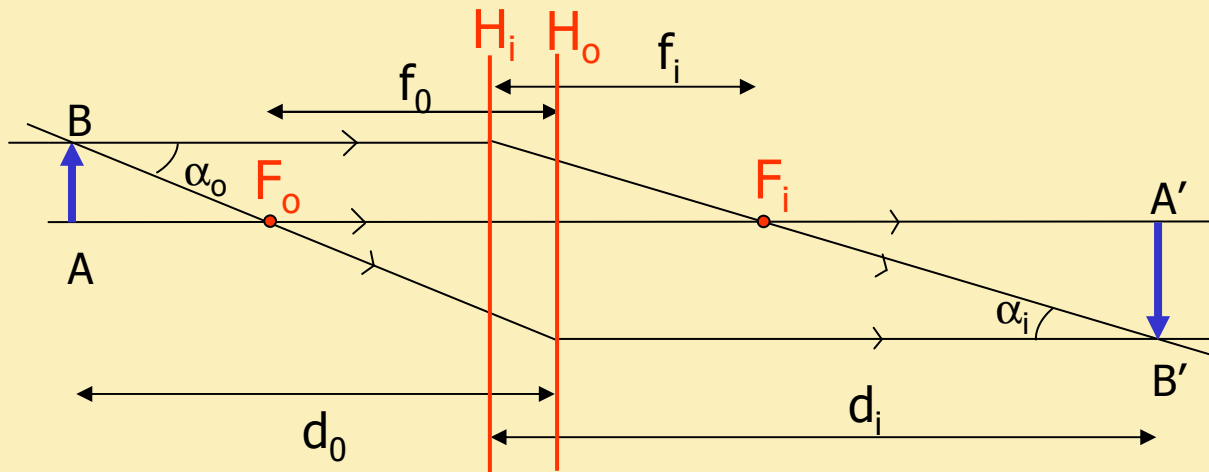
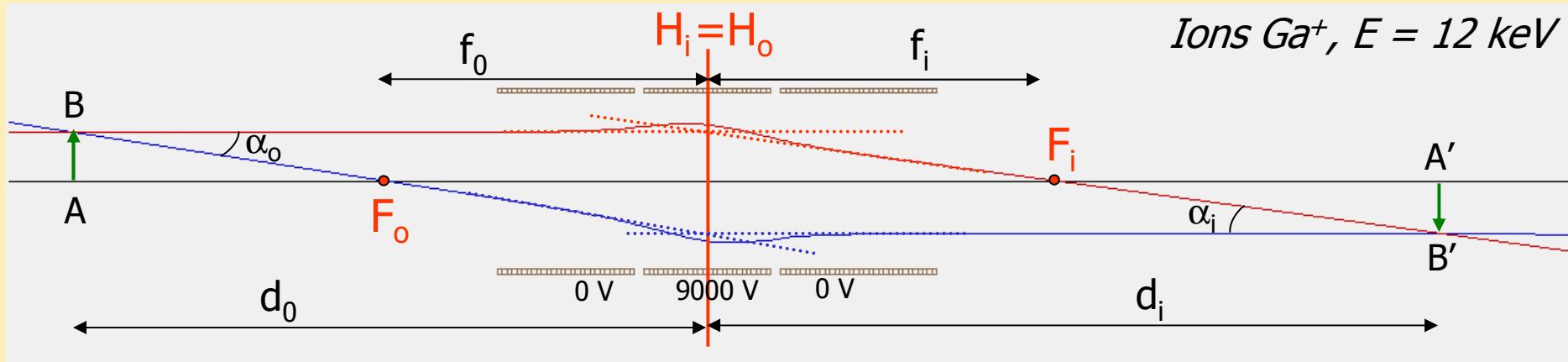
# Propriétés de focalisation

Les propriétés de focalisation d'une lentille électrostatique dépendent de :

- l'énergie des particules chargées
- la charge électrique des particules
- le potentiel des électrodes de la lentille
- la géométrie de la lentille (diamètre d'ouverture des électrodes, longueur des électrodes, distance entre les électrodes)

Elles ne dépendent PAS de la masse des particules chargées

# Éléments cardinaux et construction d'image



$$\frac{f_0}{d_0} + \frac{f_i}{d_i} = 1$$

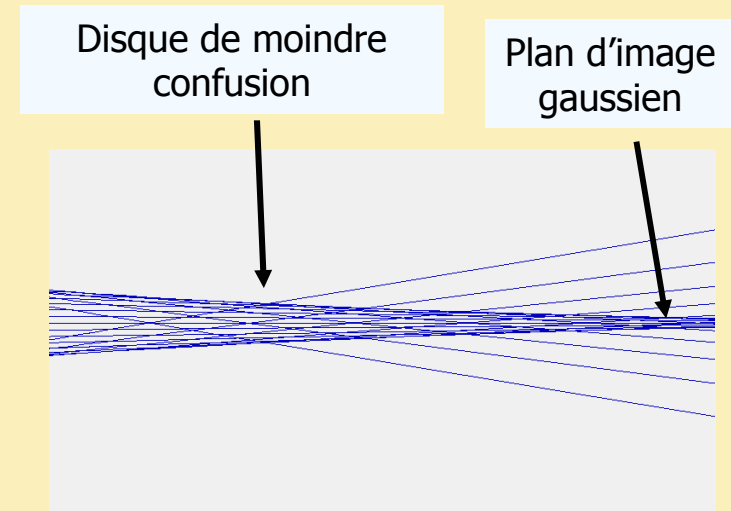
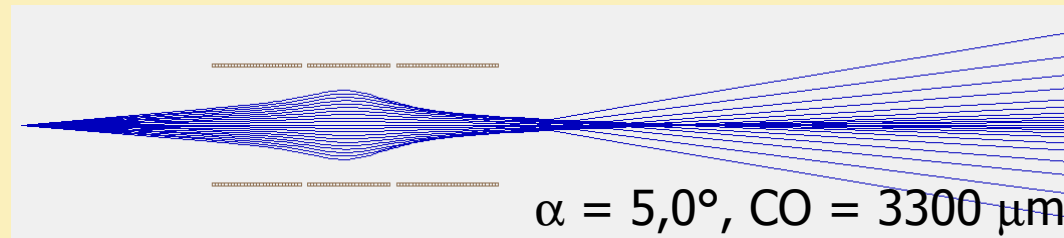
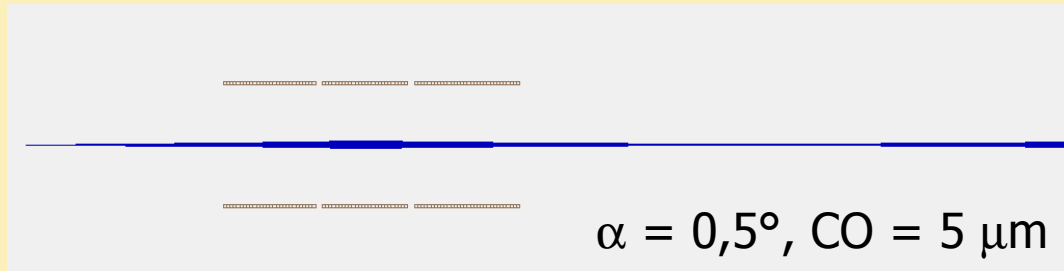
$$M_d = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{f_0}{f_i} \frac{d_i}{d_0}$$

$$M_a = \frac{\alpha_i}{\alpha_0} = -\frac{d_0}{d_i}$$

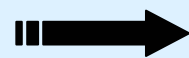
$$M_d \cdot M_a = \frac{f_0}{f_i}$$

Lentille Einzel:  $f_0 = f_i = f$

# Aberrations sphériques

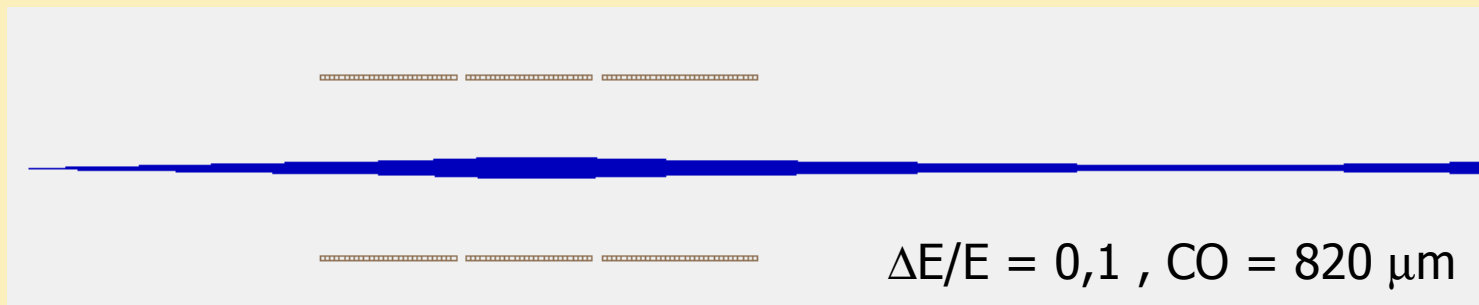
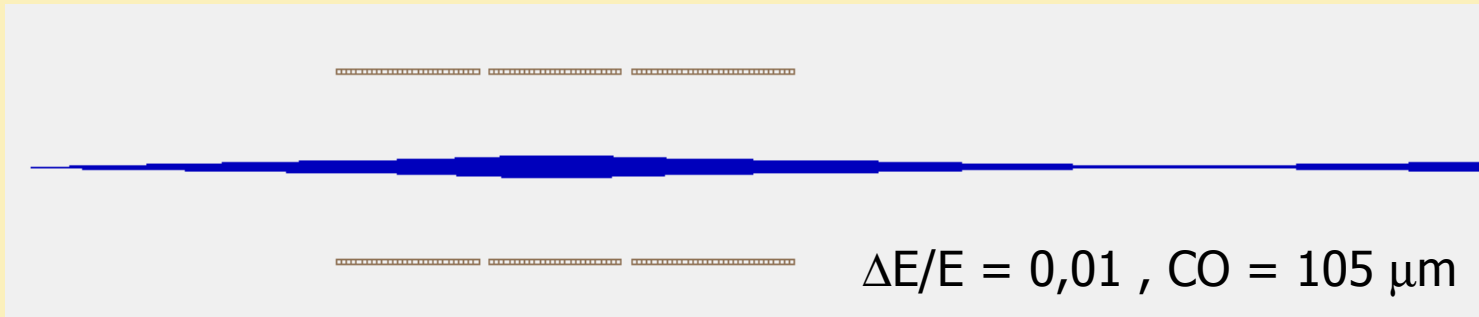


Diamètre du disque de moindre confusion:  $d_s = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot \alpha^3$



Diaphragmes pour limiter l'angle du faisceau

# Aberrations chromatiques



Diamètre du disque de moindre confusion:  $d_C = C_C \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta E}{E}$



Accélérer les particules à une énergie élevée pour  
minimiser les effets dus à la dispersion énergétique initiale

# Principaux éléments optiques

- Lentilles électrostatiques : Einzel  
Immersion
- Lentille magnétique
- Déflecteur électrostatique
- Quadrupole
- Secteur électrostatique
- Secteur magnétique

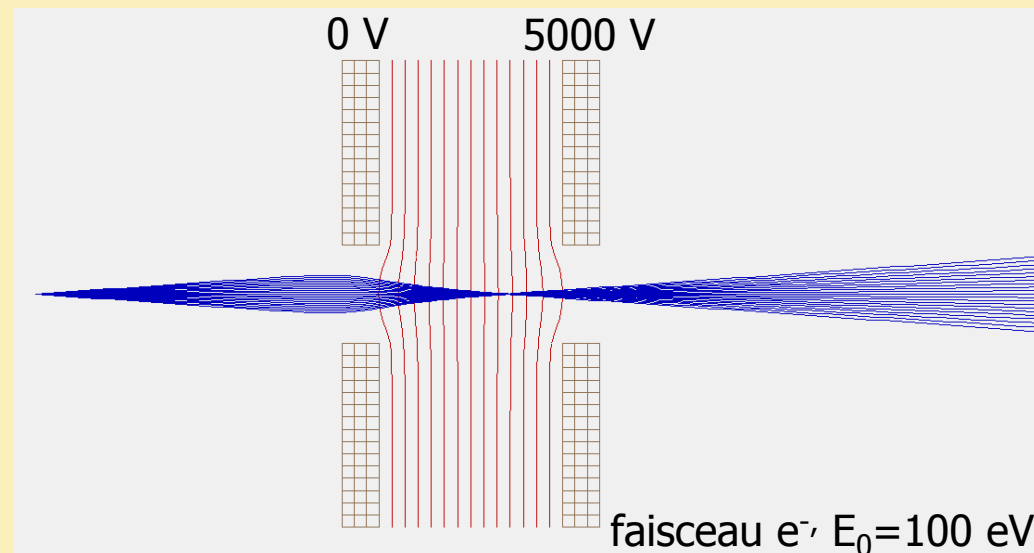
# Lentilles électrostatiques

## *Lentille Einzel*

- lentille à 3 éléments dans laquelle la première et la troisième électrode sont au même potentiel
- conservation de l'énergie de la particule

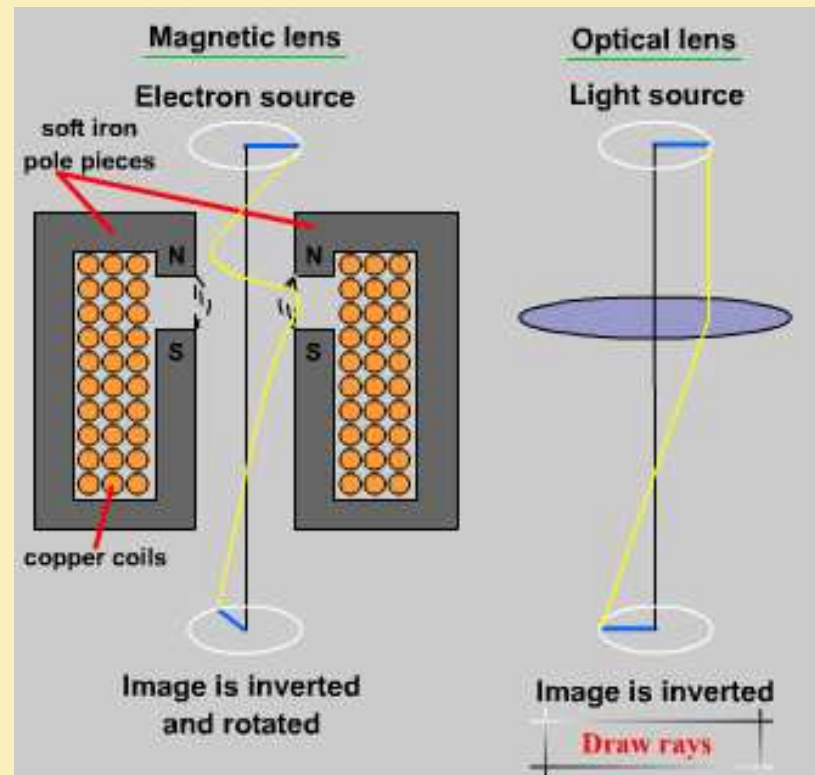
## *Lentille à immersion*

- potentiels différents sur la première et dernière électrode
- effet global d'accélération ou de décélération
- exemple typique: lentilles à deux électrodes uniquement



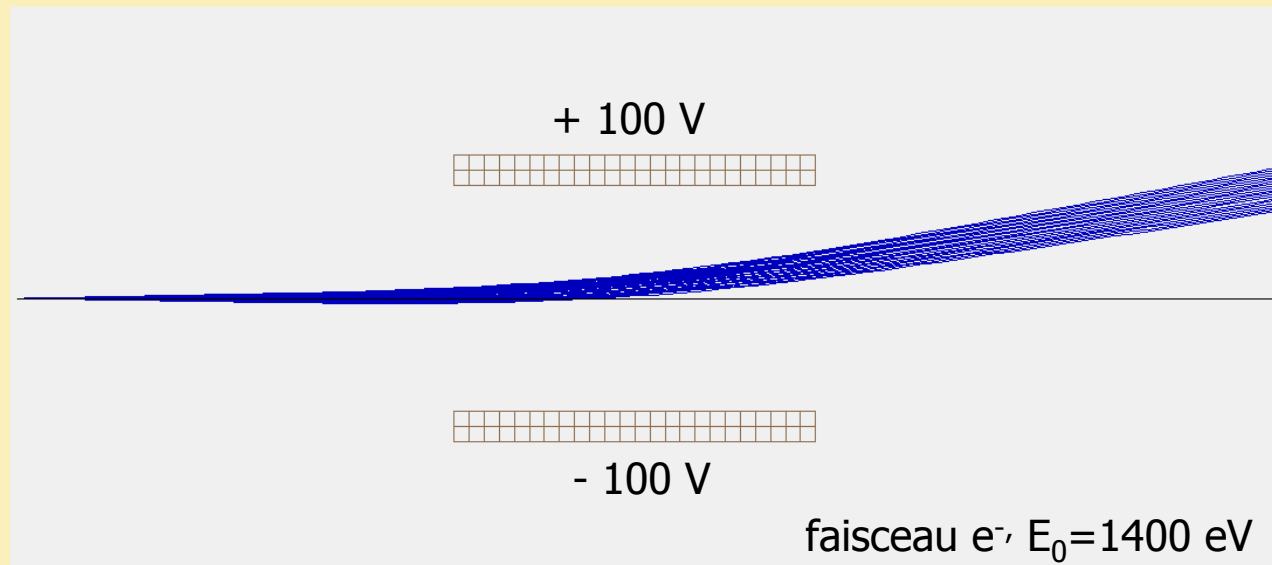
# Lentille magnétique

- un champ magnétique élevé est généré en faisant circuler un courant dans des bobines. Ce champ agit comme une lentille convergente
- les propriétés focales dépendent de la masse → principalement utilisé en optique électronique
- coefficients d'aberration faibles



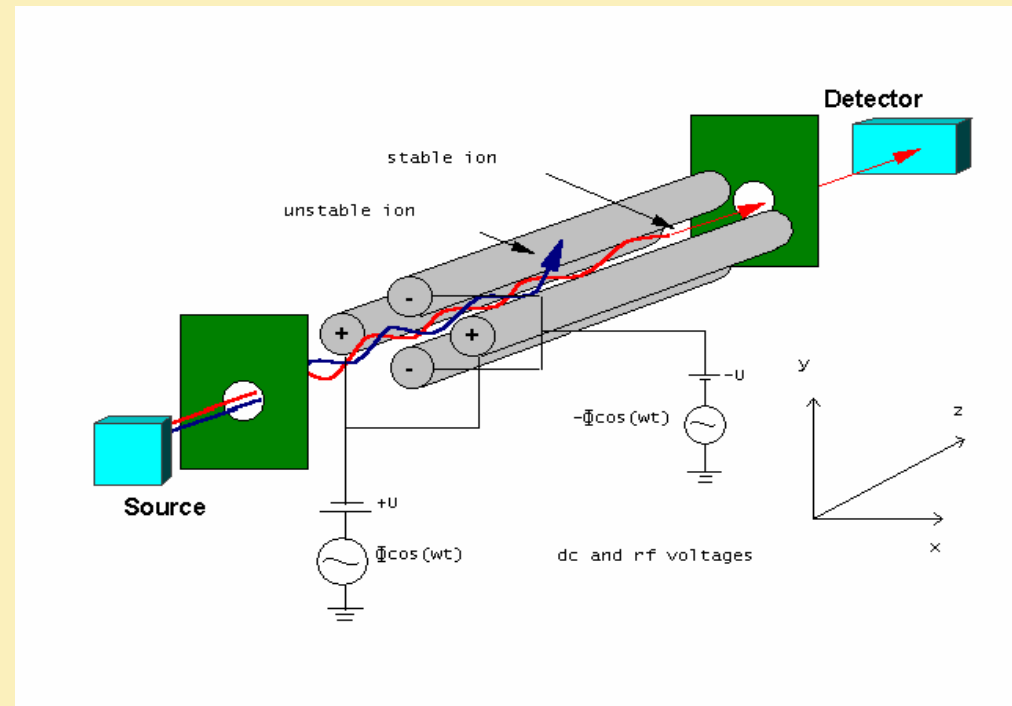
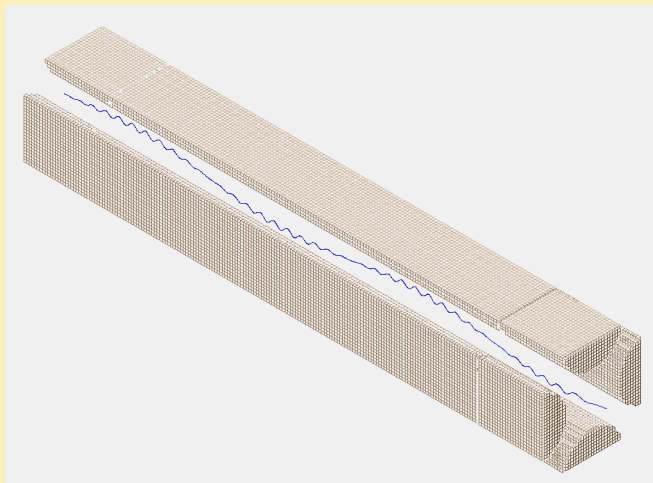
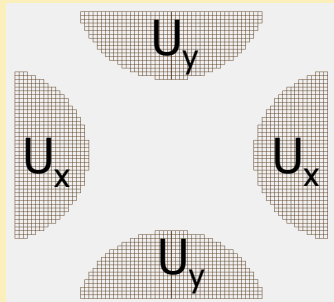
# Déflecteur électrostatique

- déviation, centrage, balayage, ... du faisceau de particules chargées



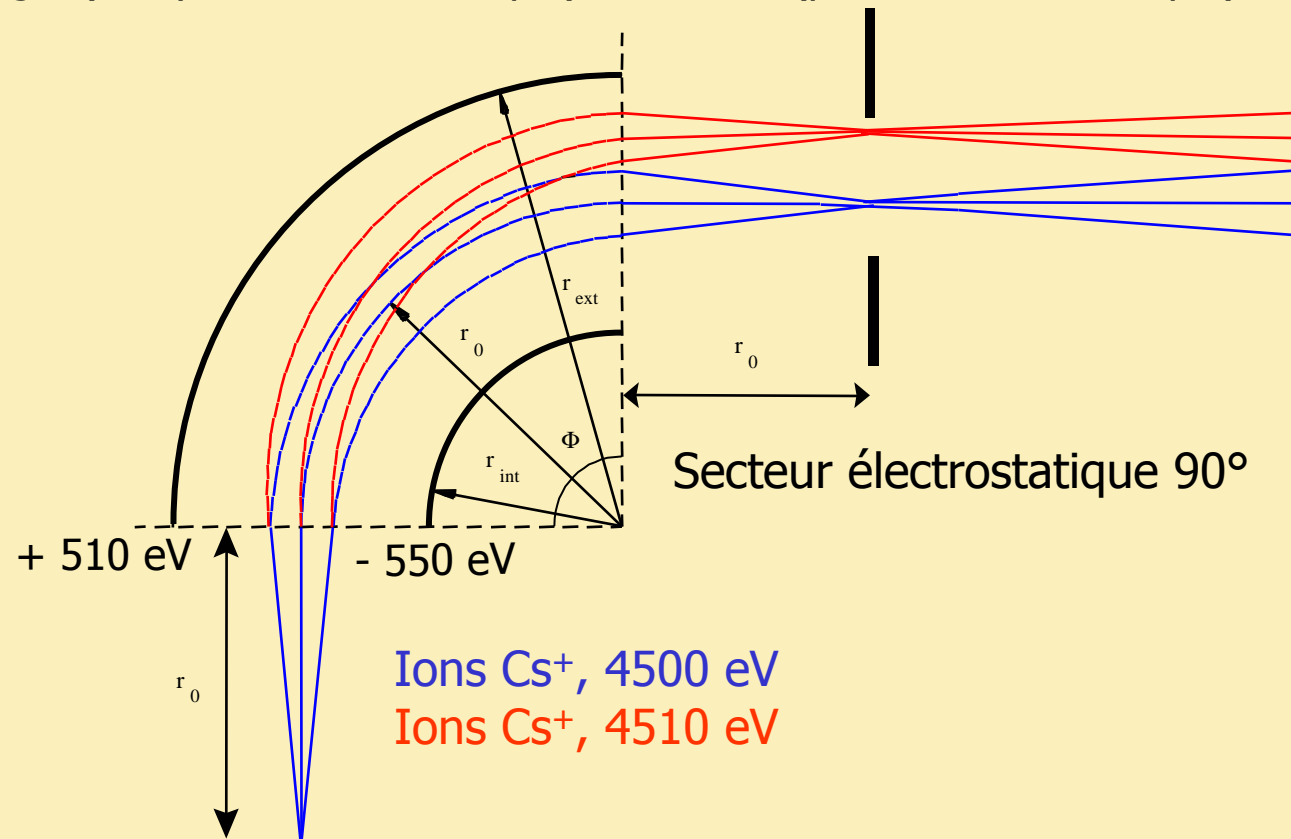
# Quadrupole électrostatique

- 4 électrodes hyperboliques
- les barres opposées sont mises à un même potentiel RF ou constant
- convergent dans un plan, divergent dans le plan perpendiculaire (astigmatique)
- mise en forme du faisceau
- système stigmatique obtenu en couplant au moins deux quadrupoles
- filtrage du faisceau de particules (filtrage en masse, filtrage en énergie)



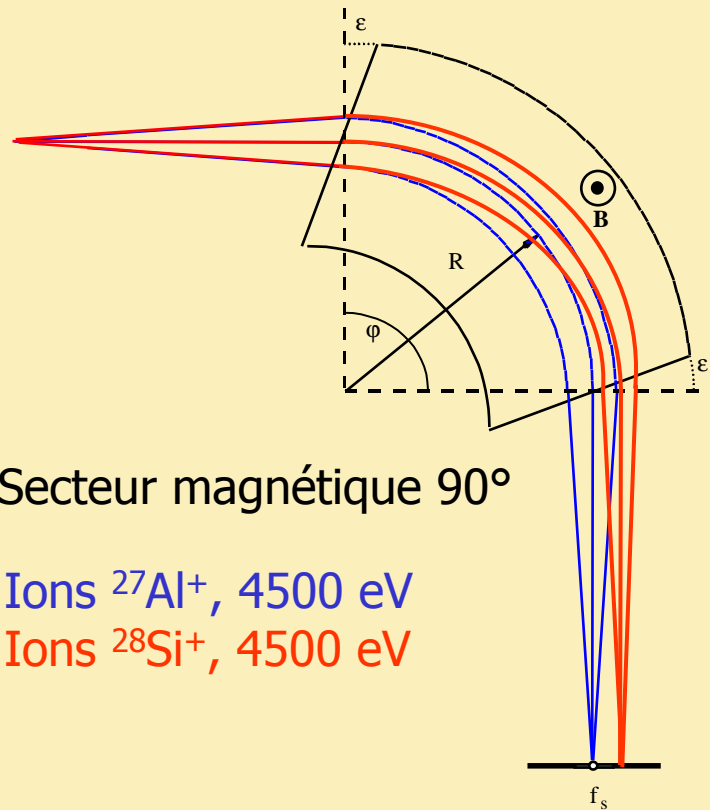
# Secteur électrostatique

- électrodes internes et externes maintenues à des potentiels opposés (cylindrique, sphérique, toroïdal)
- rayon de courbure:  $r_0 = \frac{2\varepsilon}{qE}$ ,  $\varepsilon$  = énergie de la particule,  $E$  = champ électrique,  $q$  = charge
- sensible à l'énergie, insensible à la masse
- filtrage en énergie (analyseur électrostatique), déviation (prisme électrostatique)



# Secteur magnétique

- rayon de courbure:  $r_0 = \frac{\sqrt{2\varepsilon m}}{qB}$ ,  $\varepsilon$  = énergie de la particule,  $m$  = masse de la particule,  $B$  = champ magnétique,  $q$  = charge
- sensible à l'énergie et à la masse
- filtrage en masse (analyseur magnétique), déviation (prisme magnétique)



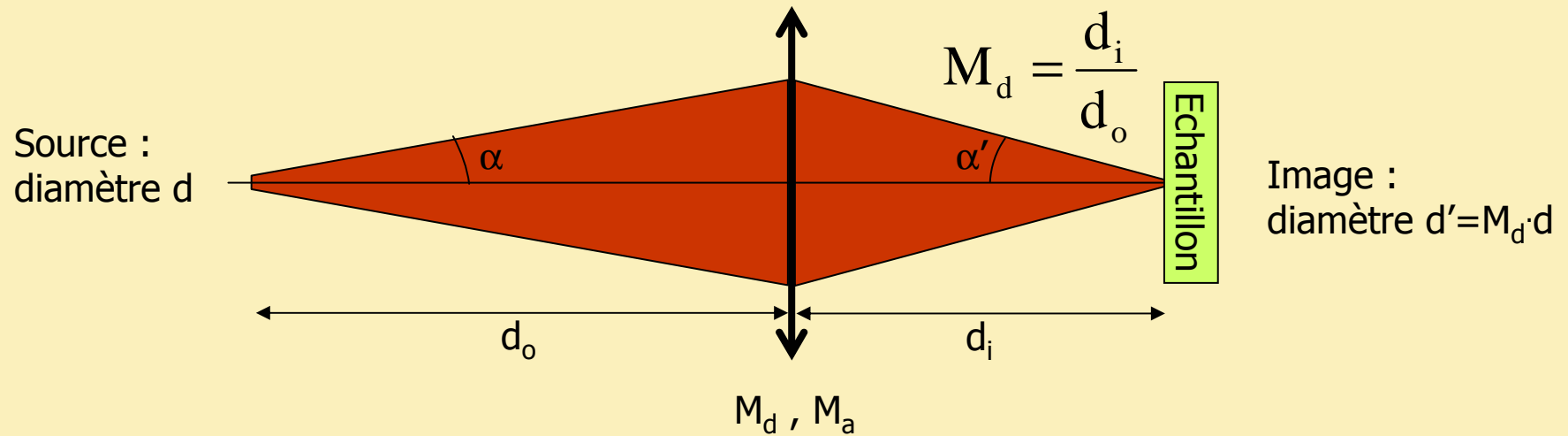
# Canon à ions

Objectif : former une image (réduite) de la source sur l'échantillon



arrangement d'éléments optiques

# Canon à ions



Aberrations sphériques ?

➔ limiter  $\alpha$

Diamètre du disque de moindre confusion:

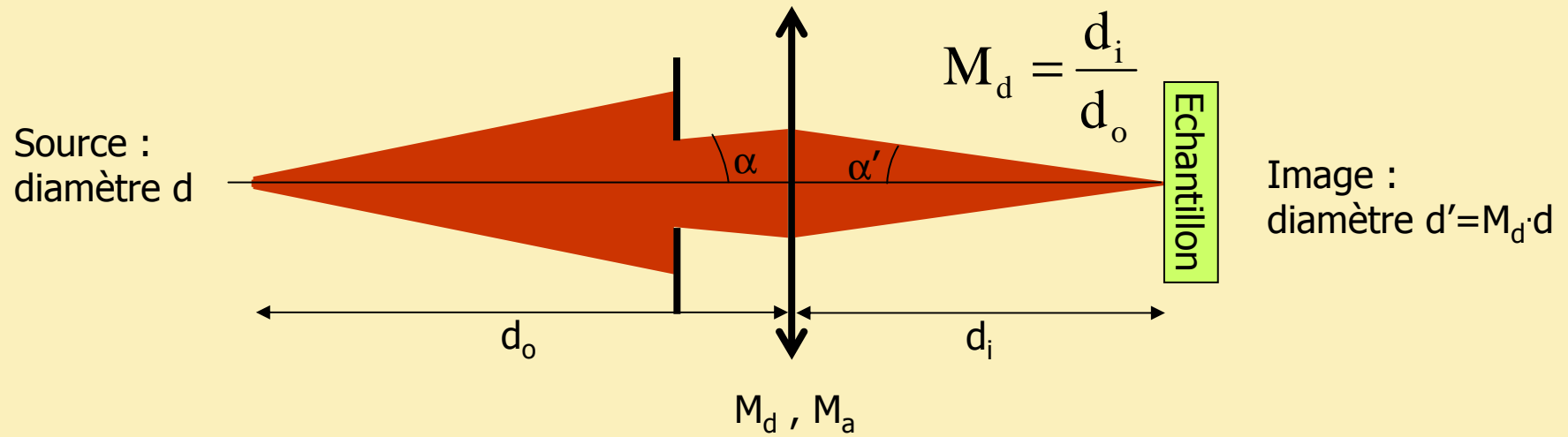
$$d_s = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot \alpha^3$$

$C_s$  : constante d'aberration sphérique  
dépendant de l'élément optique

$\alpha$  : angle de semi-ouverture du faisceau

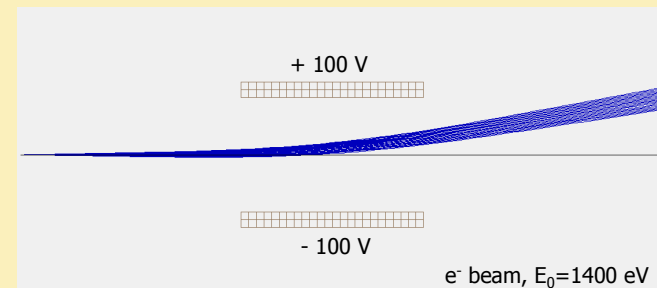
$$d_{\text{spot}} = \sqrt{d_{\text{Gauss}}^2 + \sum_i d_{\text{aberration}_i}^2}$$

# Canon à ions

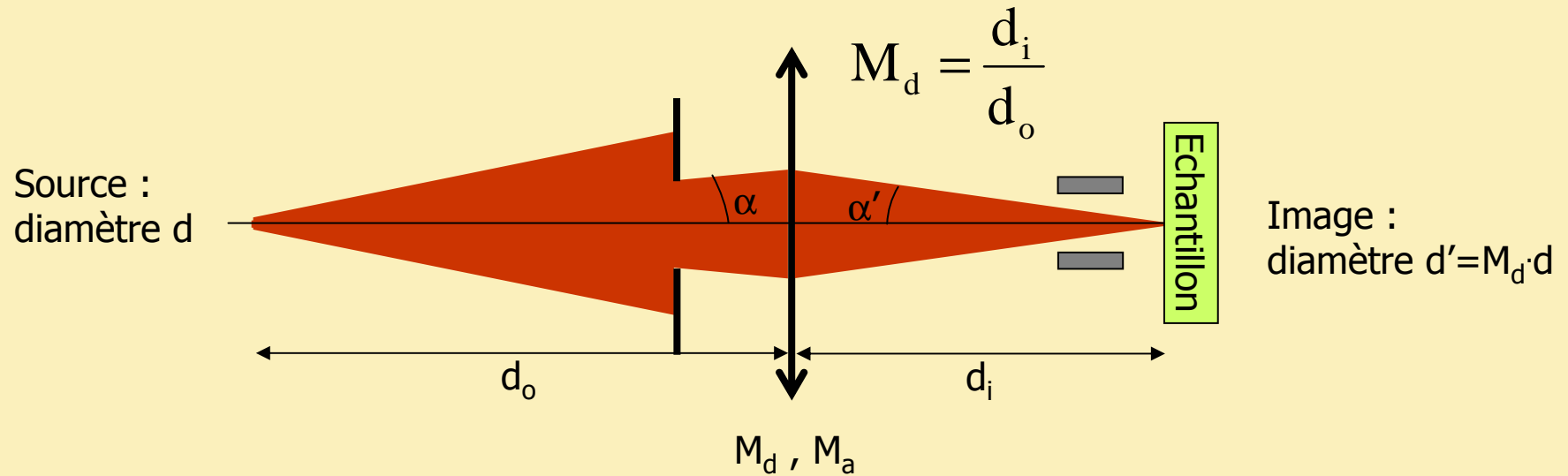


Positionnement/balayage du faisceau ?

➔ ajouter un déflecteur électrostatique



# Canon à ions



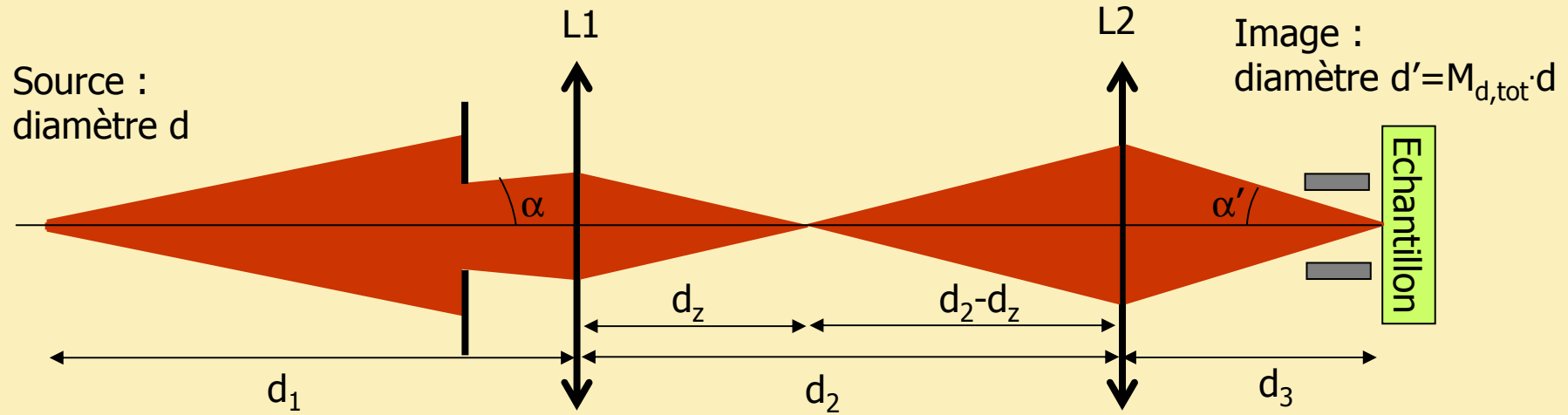
Positions fixes de la source, de l'échantillon et de la lentille

➡  $M_d = \frac{d_i}{d_o}$  est fixe

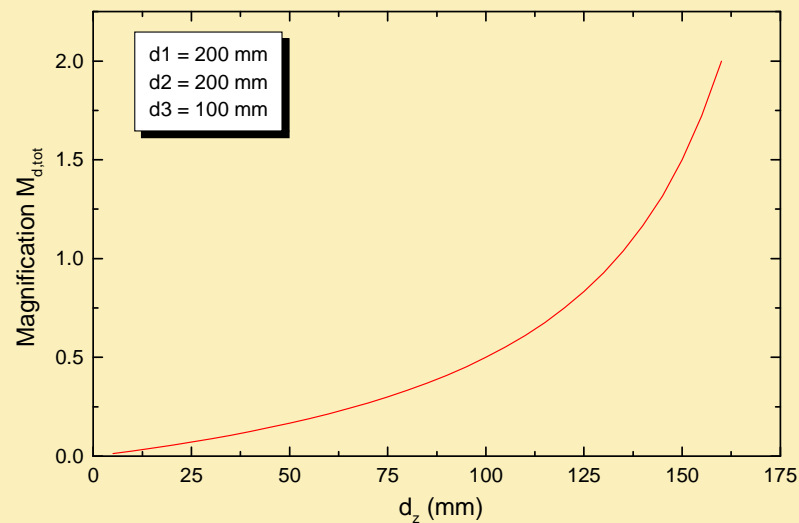
➡ le diamètre du spot ne peut pas être varié

➡ ajouter une lentille zoom

# Canon à ions

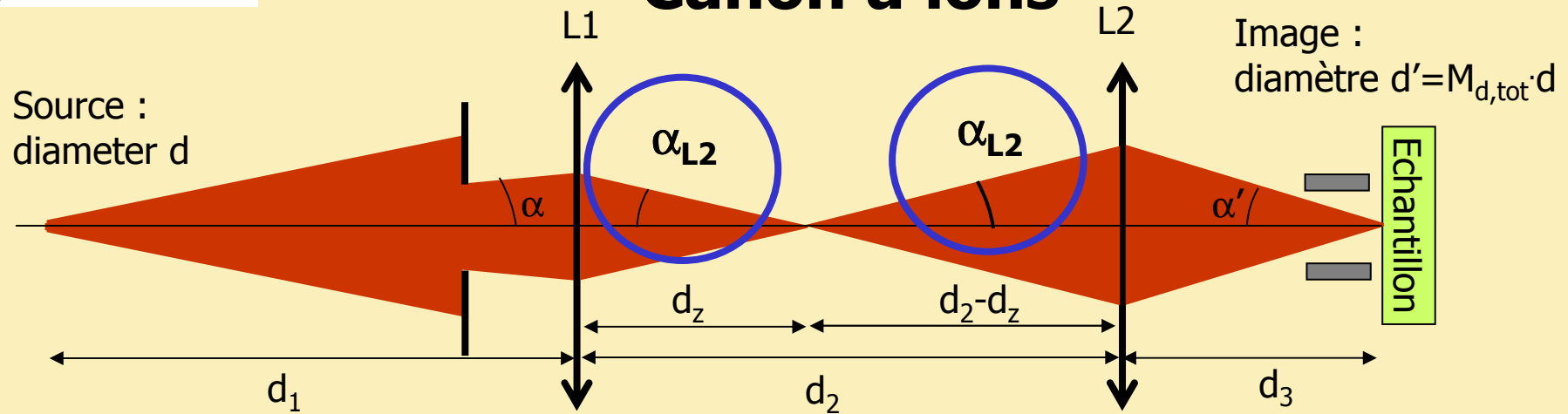


$$M_{d,tot} = M_{d,L1} \cdot M_{d,L2} = \frac{d_z}{d_1} \cdot \frac{d_3}{d_2 - d_z} = \frac{d_3}{d_1} \cdot \frac{d_z}{d_2 - d_z}$$



fonction des tensions  
appliquées à  $L1$  et  $L2$

# Canon à ions



$$\left. \begin{aligned} M_d \cdot M_a &= \frac{f_o}{f_i} \\ \text{Lentille Einzel: } f_o &= f_i = f \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{Lentille Einzel} \\ &\Rightarrow M_d \cdot M_a = 1 \end{aligned}$$

$$M_{d,L1} < 1 \text{ (réduction)} \Rightarrow M_{a,L1} > 1 \Rightarrow \alpha_{L2} = M_{a,L1} \cdot \alpha_{L1} > \alpha_{L1}$$

➔ Prudence avec les aberrations sphériques  $d_s = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot \alpha^3$

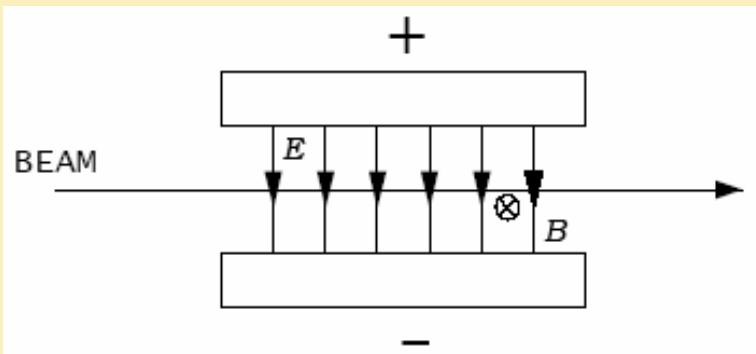
Design de la lentille + limitation de  $\alpha$

# Canon à ions

## Propreté du spectre de masse de la source à ions ?

- impuretés
- isotopes
- ions multi-chargés
- clusters

➡ ajouter un filtre de Wien



$$\vec{E} \perp \vec{B}$$

$$\vec{v} \perp \vec{E} \text{ et } \vec{v} \perp \vec{B}$$

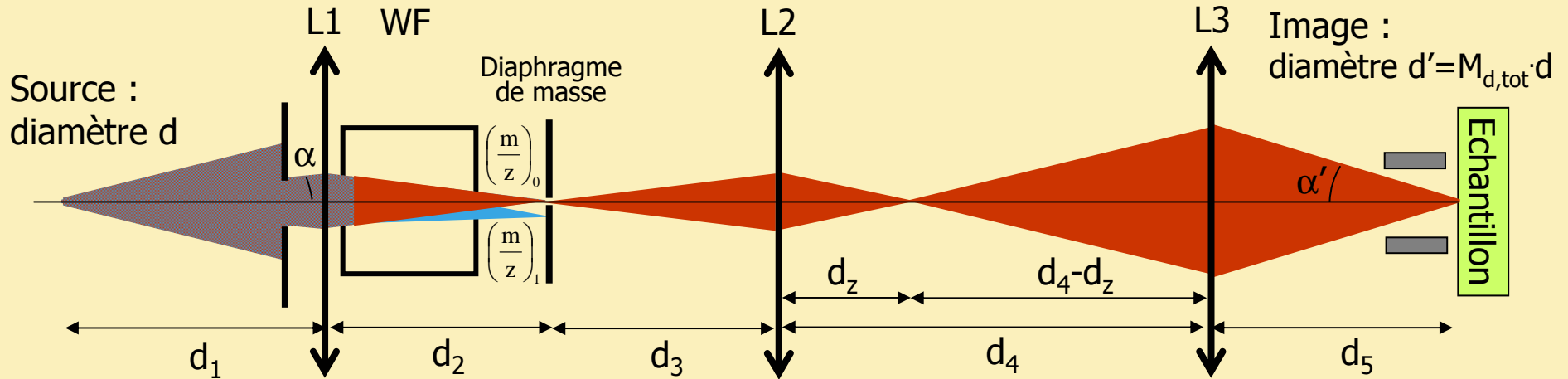
Trajectoire stable:  $\vec{F}_{\text{tot}} = \vec{F}_E + \vec{F}_B = q\vec{E} + q(\vec{v} \wedge \vec{B}) = \vec{0}$

$$\Rightarrow v = \frac{E}{B} \quad \text{et} \quad \varepsilon = qV = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

$\varepsilon$  : énergie de l'ion ,  $V$  : tension d'accélération

➡ un seul  $m/z$  traverse le filtre sans déviation

# Canon à ions



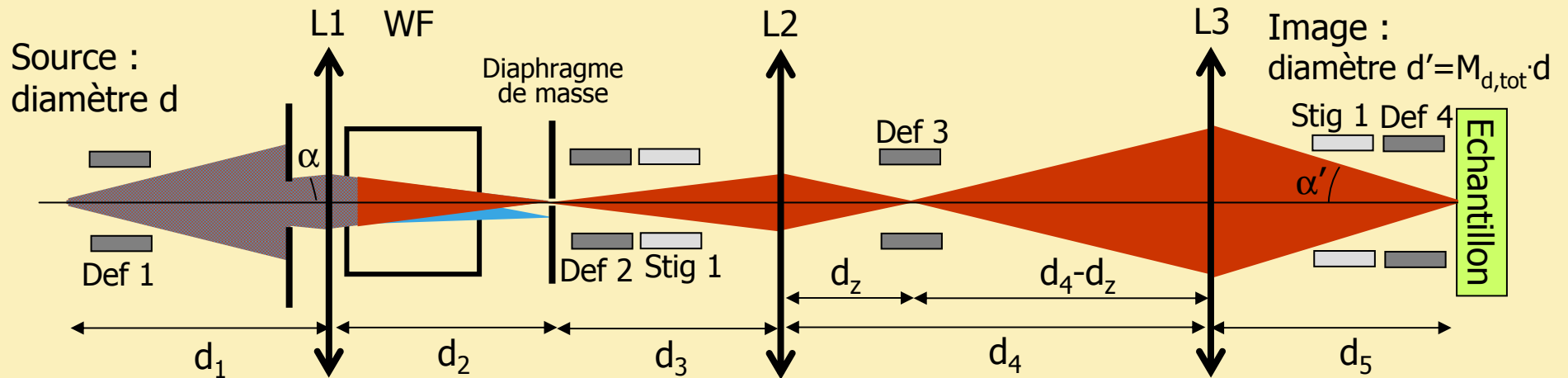
$$M_{d,tot} = M_{d,L1} \cdot M_{d,L2} \cdot M_{d,L3} = \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{d_z}{d_3} \cdot \frac{d_5}{d_4 - d_z} = \frac{d_2 \cdot d_5}{d_1 \cdot d_3} \cdot \frac{d_z}{d_4 - d_z}$$

fonction des tensions  
appliquées à L2 et L3

Alignement du faisceau + correction de l'astigmatisme

➡ ajouter des déflecteurs électrostatiques + stigmatiseurs (quadrupoles, octopoles)

# Canon à ions



$$M_{d,tot} = M_{d,L1} \cdot M_{d,L2} \cdot M_{d,L3} = \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{d_z}{d_3} \cdot \frac{d_5}{d_4 - d_z} = \frac{d_2 \cdot d_5}{d_1 \cdot d_3} \cdot \frac{d_z}{d_4 - d_z}$$

fonction des tensions  
appliquées à L2 et L3

# Bibliographie

1. Electron Optics, P. Grivet, Pergamon Press, 1965
2. Focusing of Charged Particles, A. Septier, Academic Press, 1967
3. Optics of Charged Particles, H. Wollnik, Academic Press, 1987
4. Einführung in die Teilchenoptik, J. Grosser, Teubner Studienbücher, 1983