

# Etude par la Simulation et l'Expérimentation de l'Evaporation des Métaux dans une Source d'Ions ECR

Alexandre LEDUC



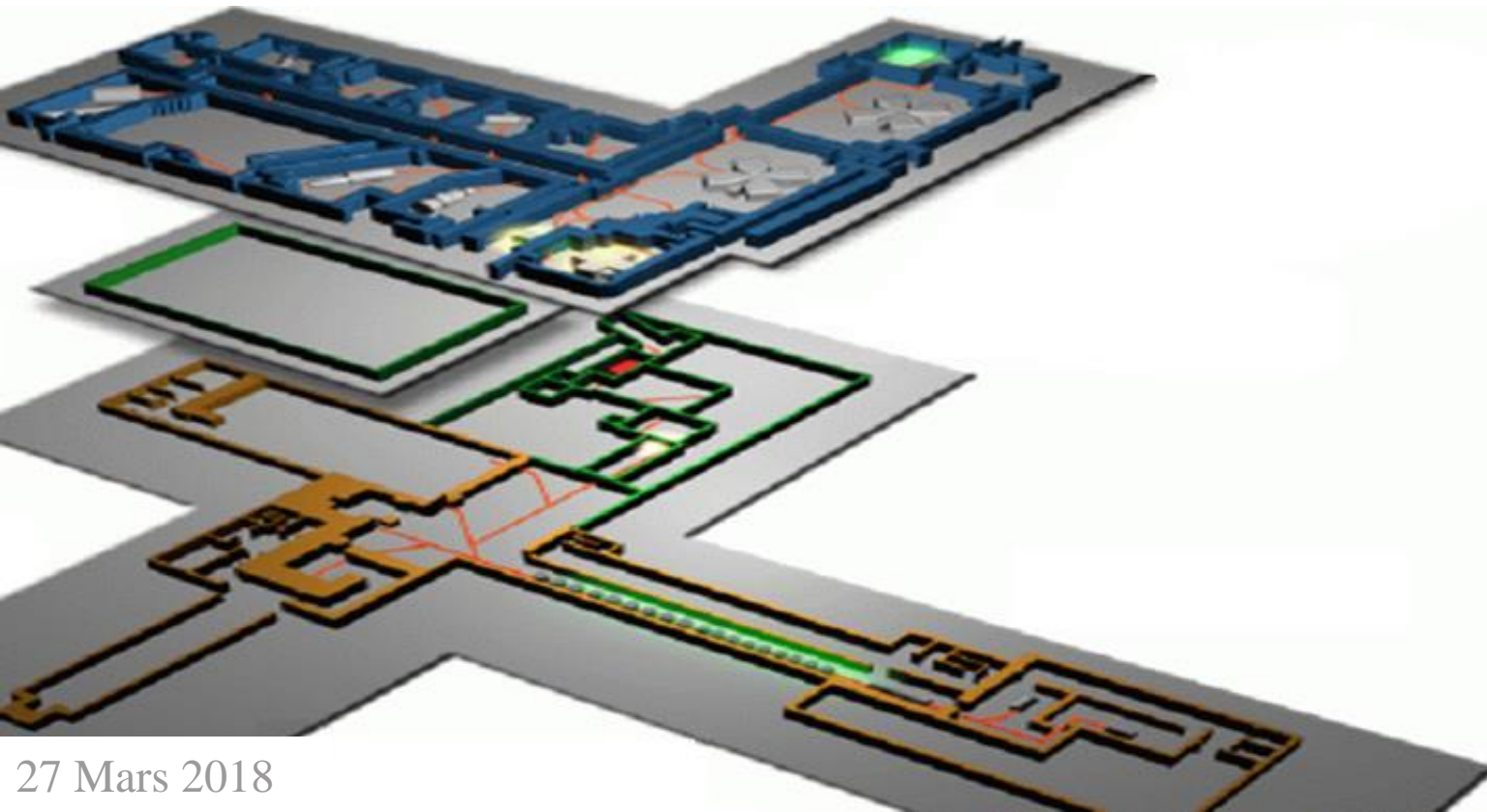
- Motivation de la thèse
- Principe d'une source d'ions ECR
- Modélisation d'une source d'ions
- Production d'ions métalliques
- Perspectives

# Motivation de la thèse

Projet Spiral2 au GANIL à Caen

Besoin de faisceaux d'ions métalliques pour  $S^3$  (dont le  $^{48}\text{Ca}$ )

Rendement actuel de production d'ions métalliques 10% à 20%



# Motivation de la thèse

Objectifs :

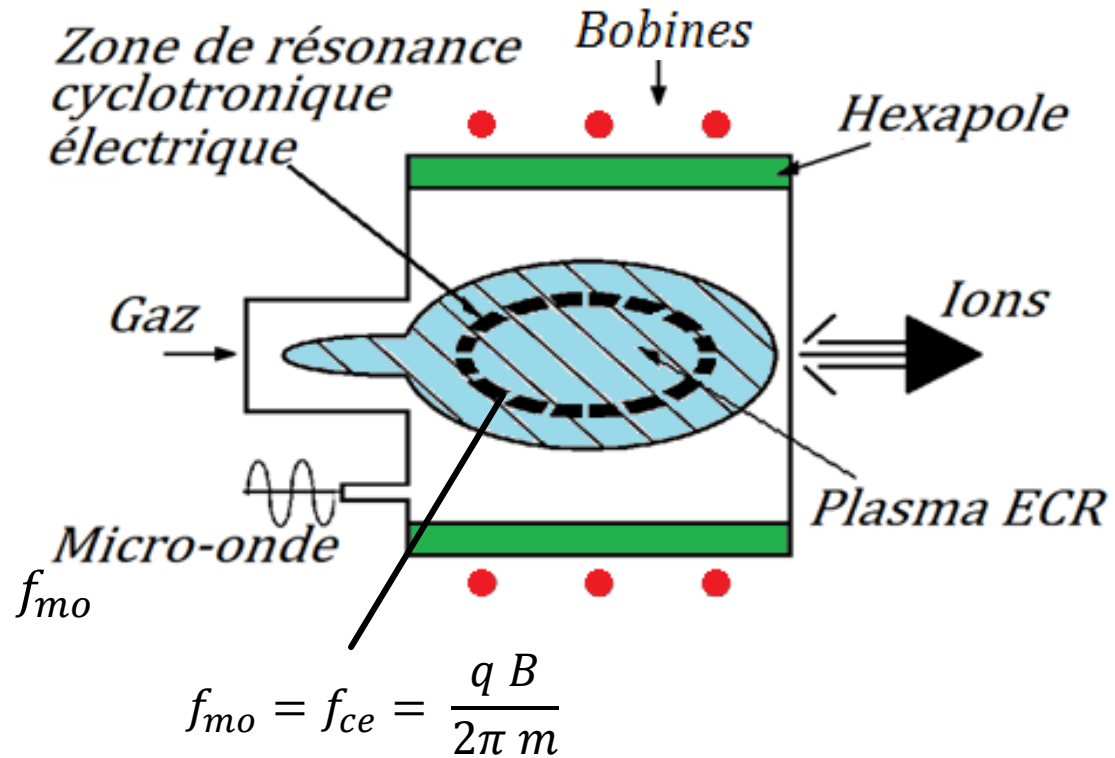
Doubler le rendement

Etude de la dynamique de production  
des ions dans le plasma ECR

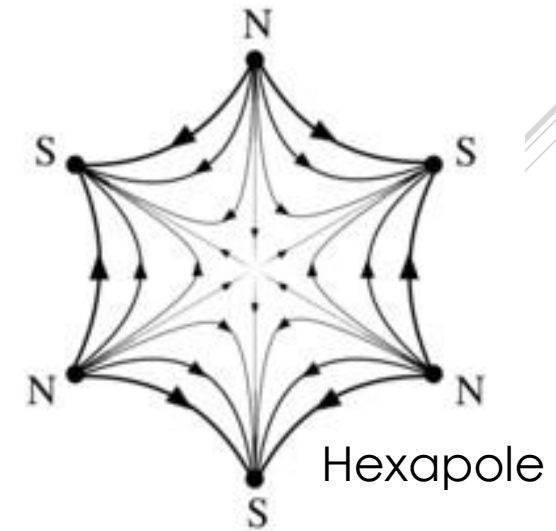
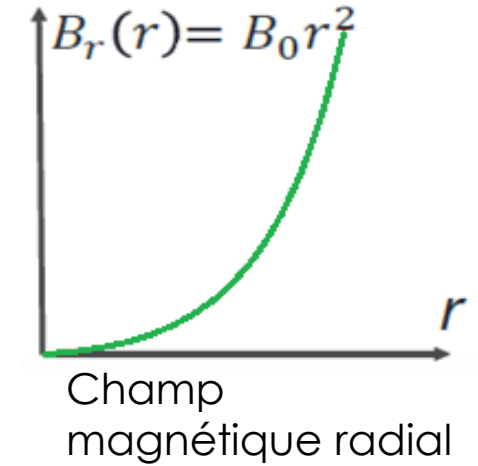
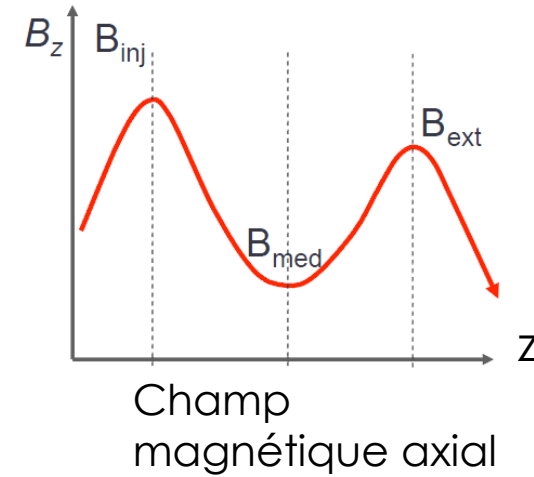
Augmentation du rendement  
d'ionisation avec une paroi chauffée  
thermorégulée

# Principe d'une source d'ions ECR

## Formation du plasma



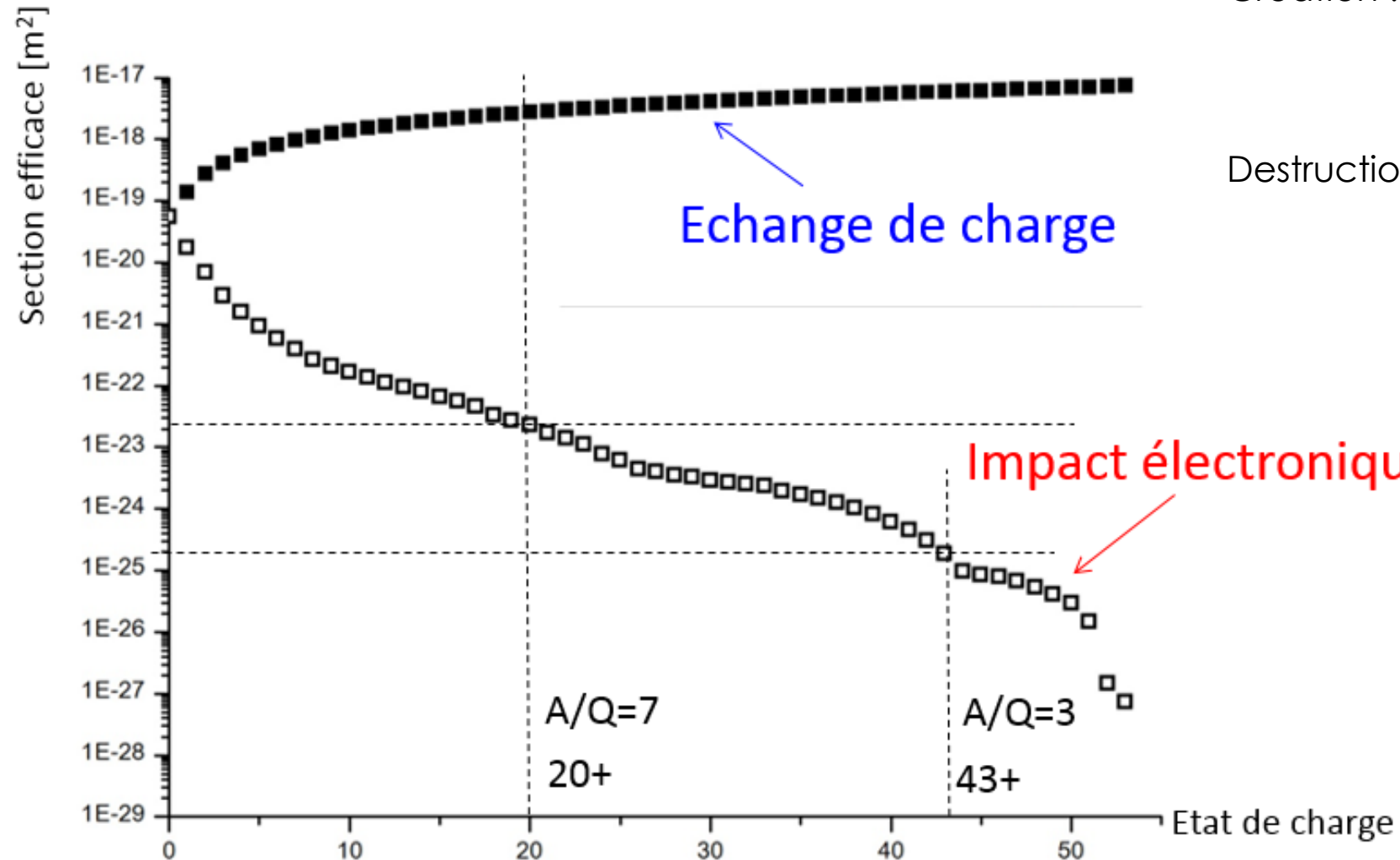
Utilisation d'un gaz support  
confinement magnétique  
multiples aller-retour des électrons



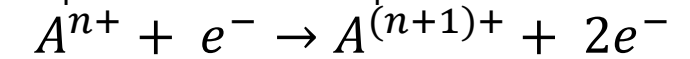
# Principe d'une source d'ions ECR

## Formation du plasma

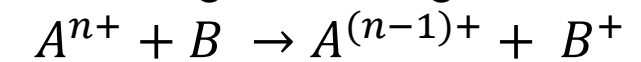
**$^{128}\text{Xenon}$**



Création : Impact électronique

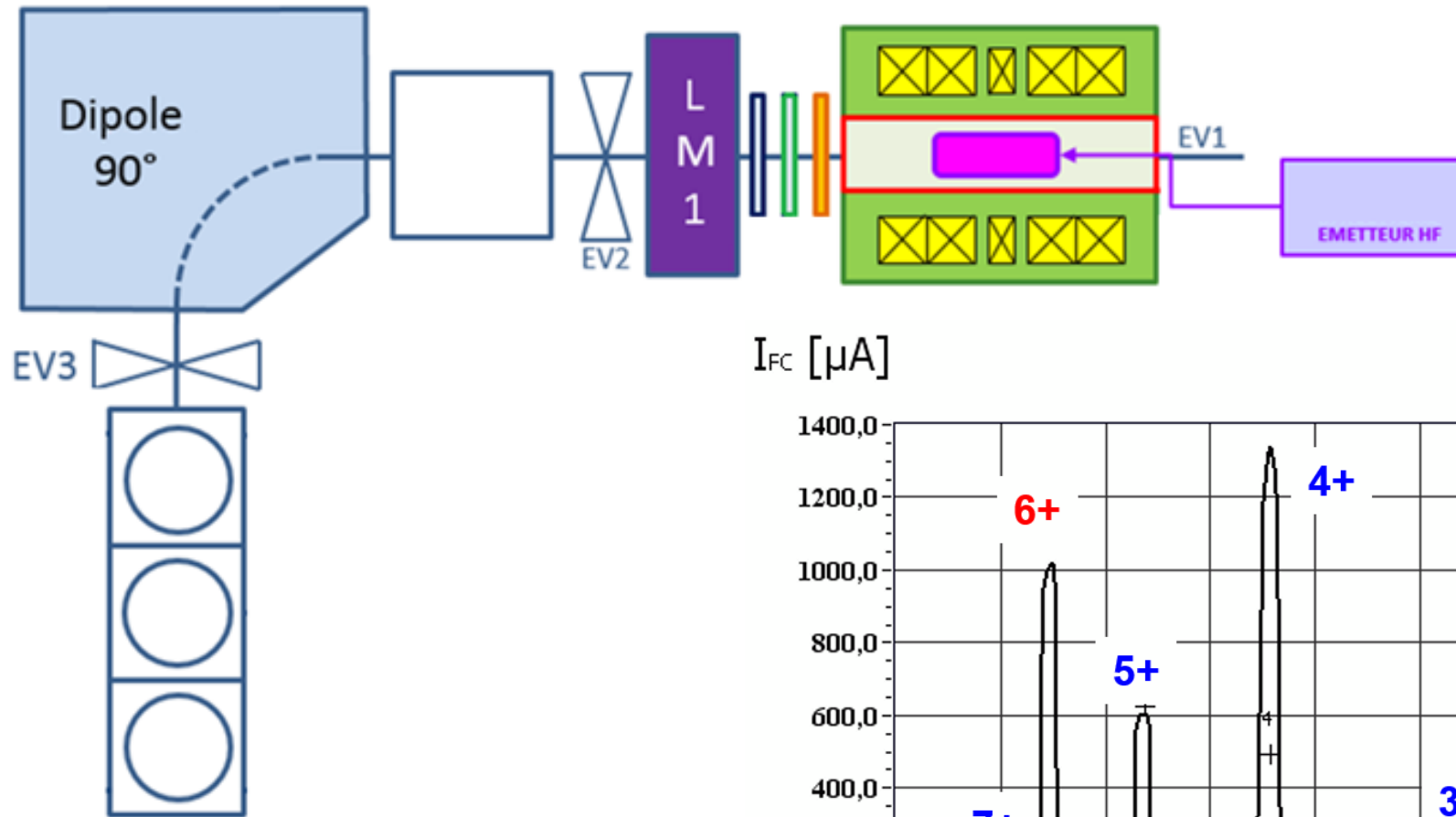


Destruction : Echange de charge

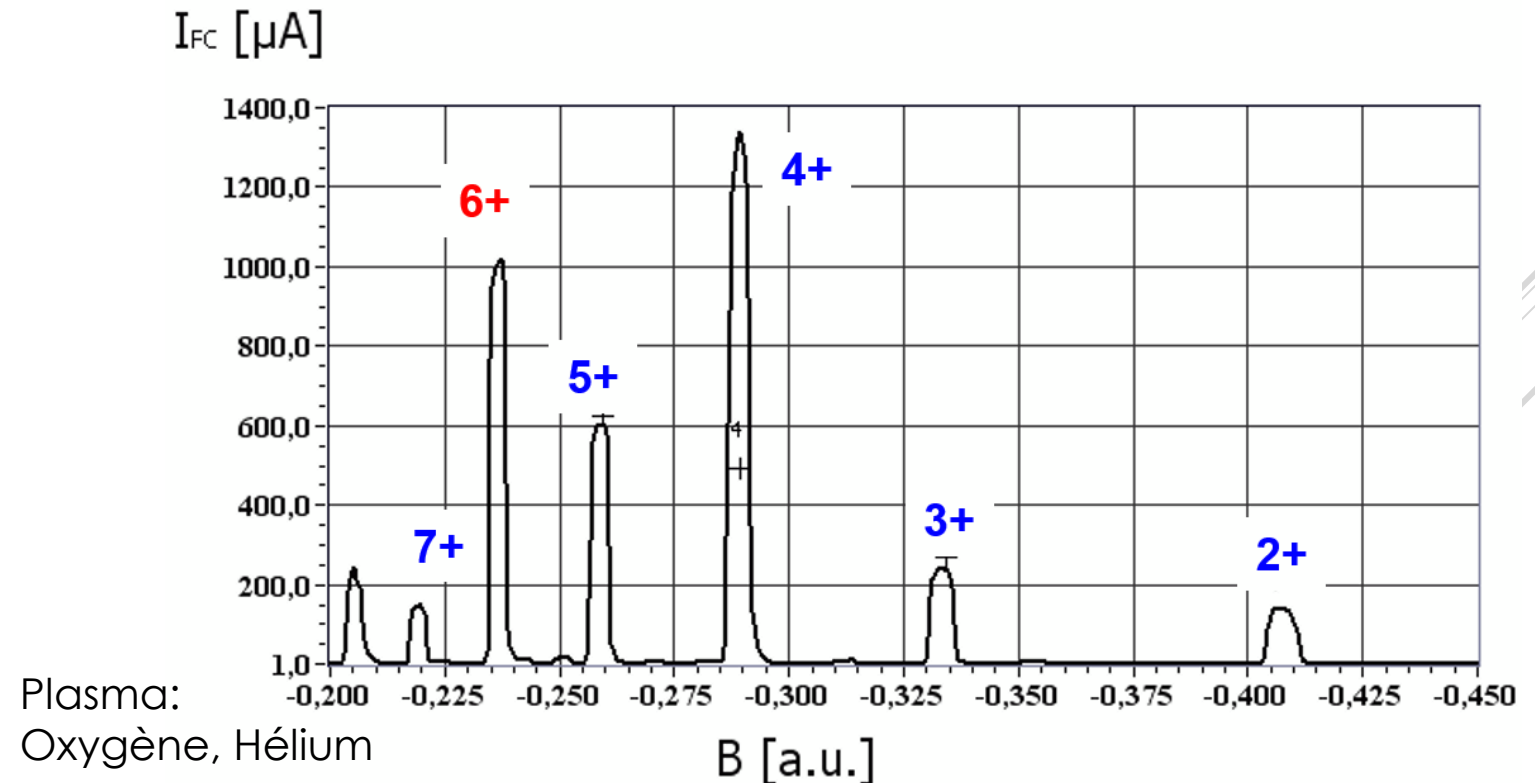


# Principe d'une source d'ions ECR

## Analyse de faisceaux



Ions extraits par une différence de potentiel

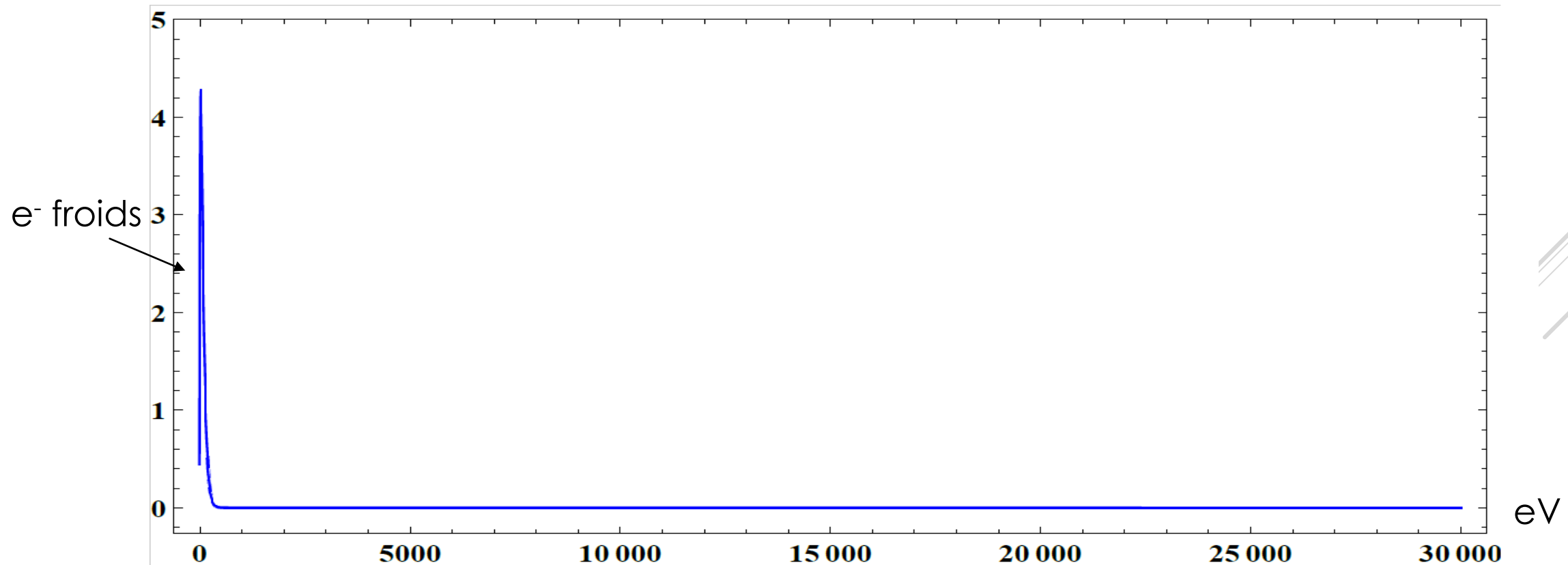


# Principe d'une source d'ions ECR

## Caractéristiques du plasma

3 composantes qualitatives :

électrons froids 1-50 eV : par ionisation ou électrons secondaires





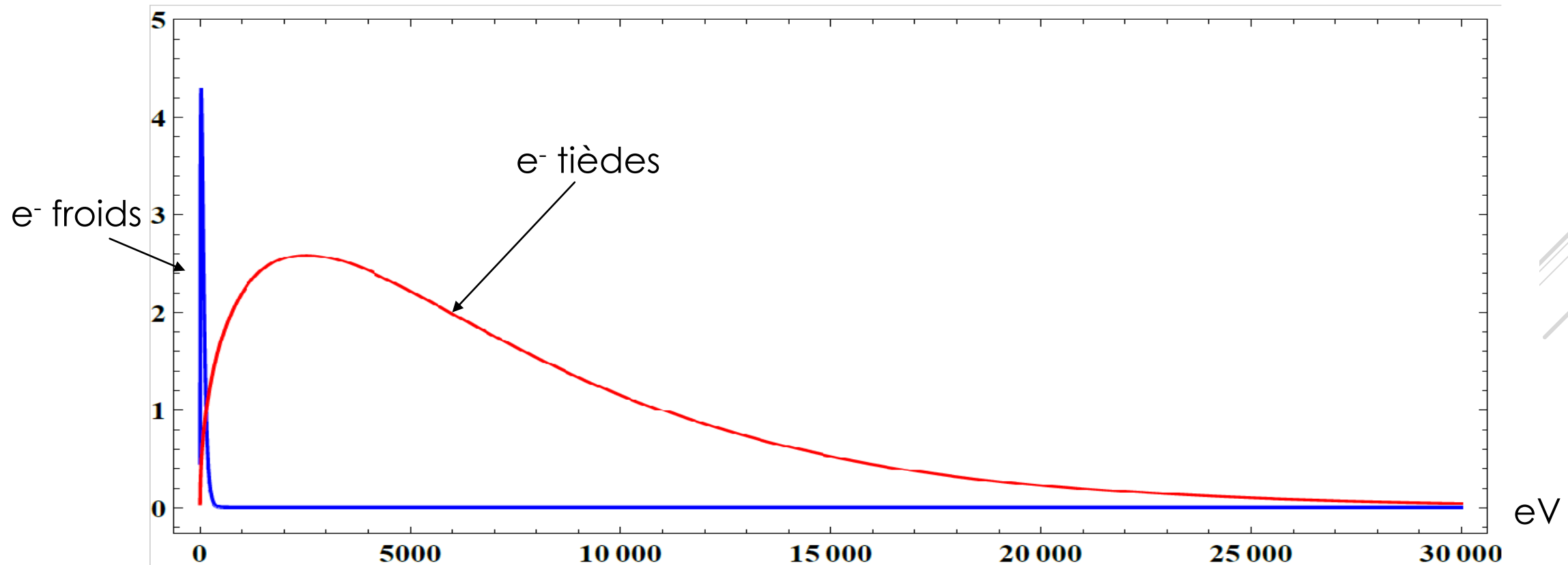
# Principe d'une source d'ions ECR

## Caractéristiques du plasma

3 composantes qualitatives :

électrons froids 1-50 eV : par ionisation ou électrons secondaires

électrons tièdes 1-5 keV: ceux qui multi-ionisent



# Principe d'une source d'ions ECR

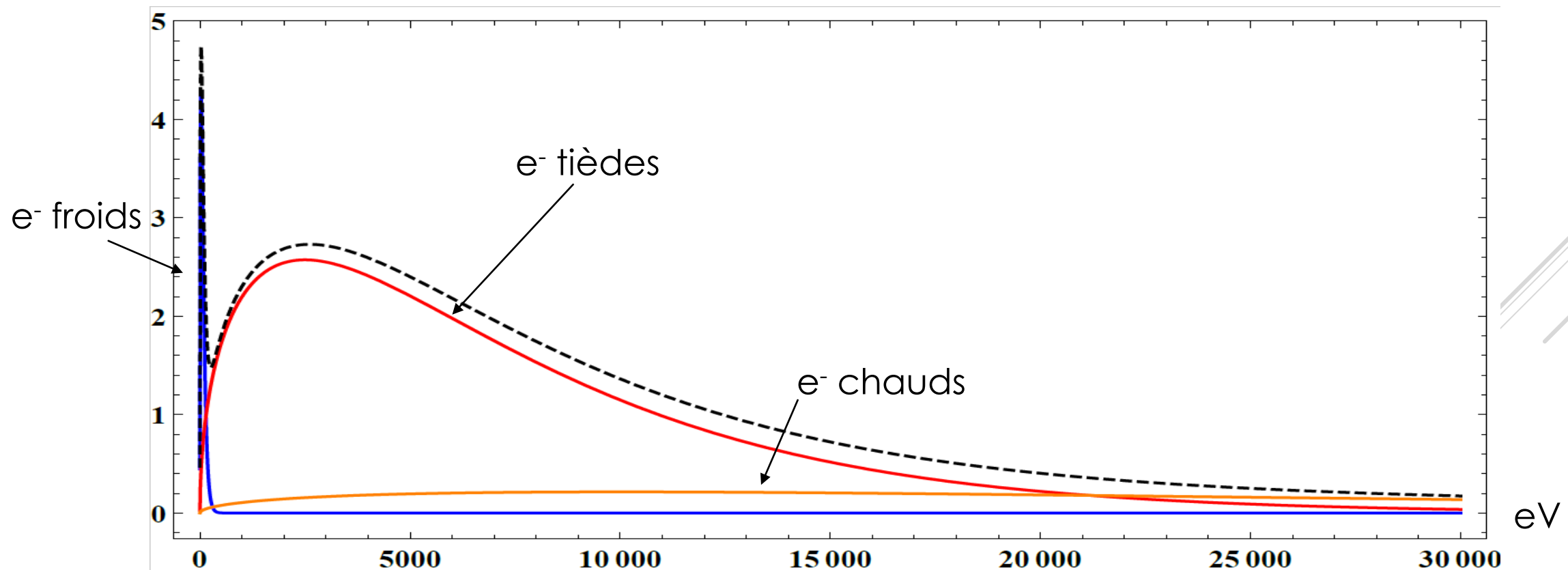
## Caractéristiques du plasma

3 composantes qualitatives :

électrons froids 1-50 eV : par ionisation ou électrons secondaires

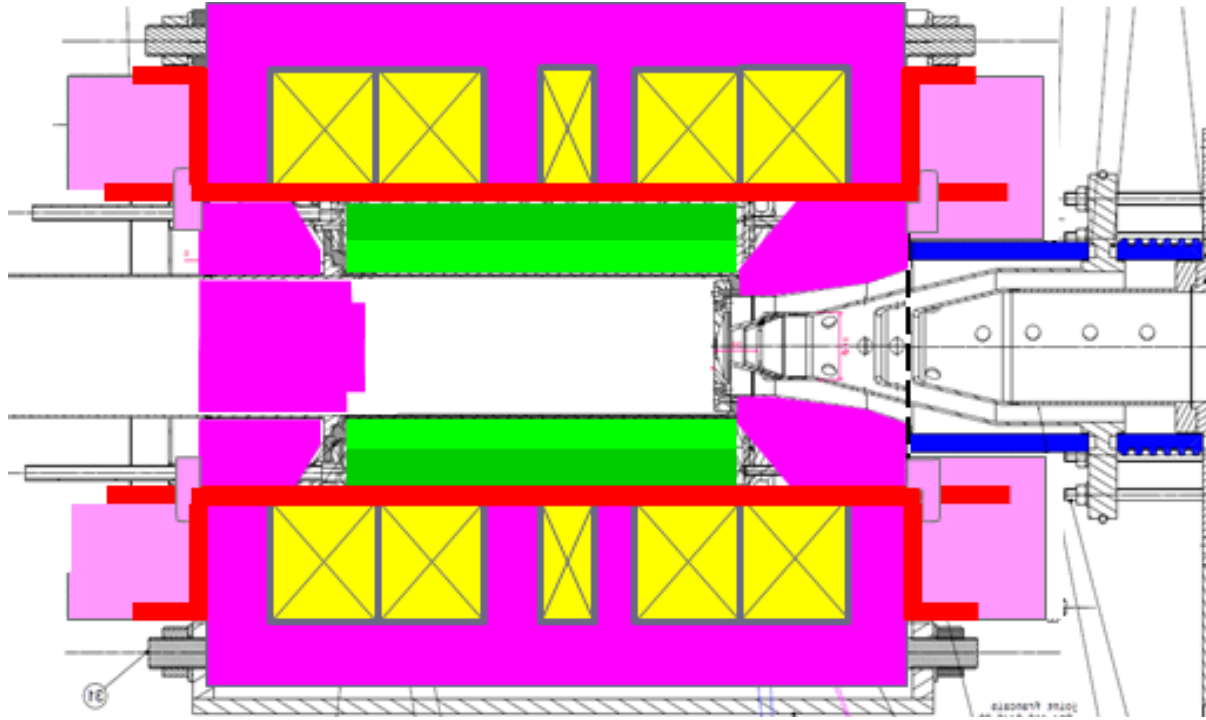
électrons tièdes 1-5 keV : ceux qui multi-ionisent

électrons chauds > 10 keV : « runaway electrons » observés jusqu'à 1 MeV (via émission d'X Bremsstrahlung)



# Modélisation d'une source d'ions ECR

## PHOENIX V3



Objectif : la production  
d'ions métalliques

Phoenix V3 pour Spiral2

Longueur de 220 mm

Rayon de 46 mm

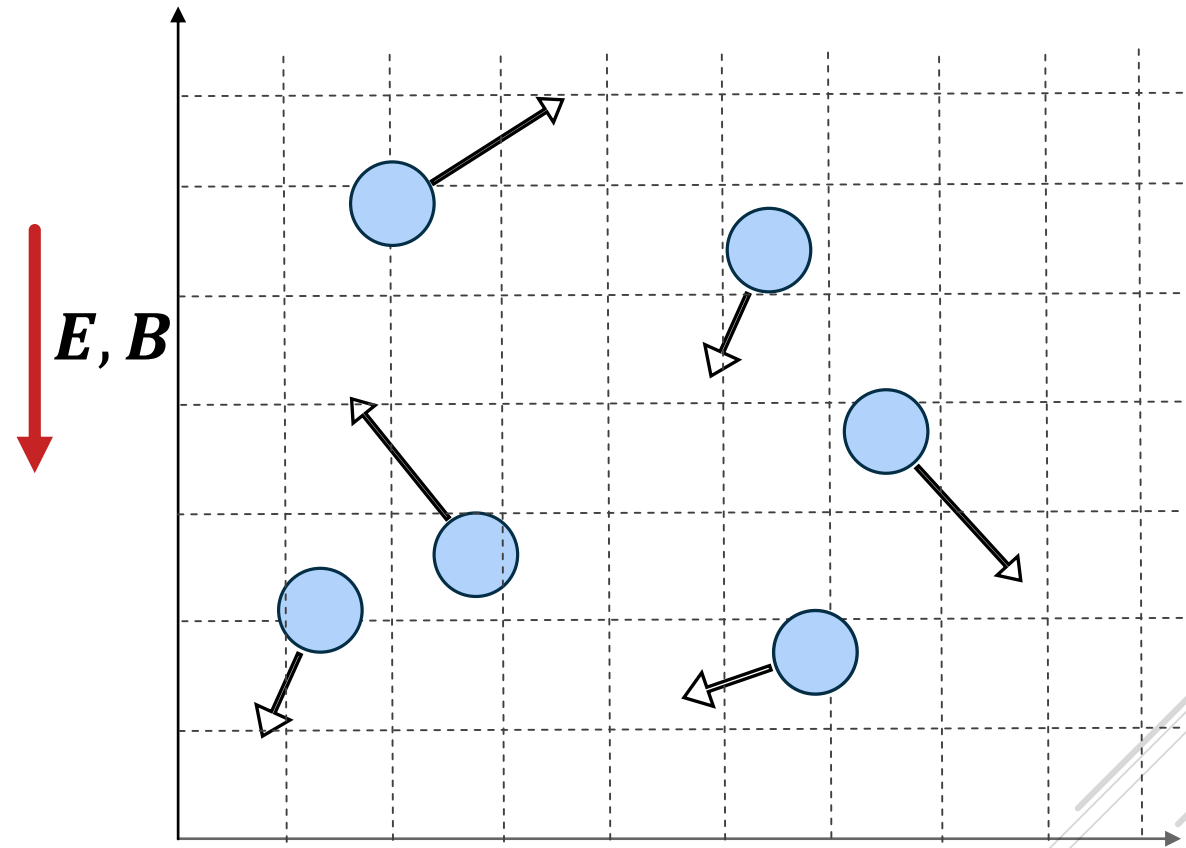
Volume de 1,45 litre

Zone ECR de 95 cm<sup>3</sup>

# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Simulation Particle In Cell

- Maillage du domaine
- Propagation de particules neutres ou chargées
- Initialisation aléatoires
- Propagation avec la méthode du « Leap Frog »
- Résolution de l'équation de Poisson
- Tirage aléatoire de la collision



# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Simulation pour PHOENIX V3

Volume de 1,45 litre

Longueur de Debye

$$\lambda_D \approx 20 \times 10^{-6} m$$

Temps à simuler de l'ordre de la milliseconde

Temps caractéristique des électrons  $\sim 10^{-12} s$

(2ans)

Temps caractéristique des ions  $\sim 10^{-8} s$

(2heures)

# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Simulation pour PHOENIX V3

Volume de 1,45 litre

Longueur de Debye  $\lambda_D \approx 20 \times 10^{-6} m$

Temps à simuler de l'ordre de la milliseconde

Temps caractéristique des électrons  $\sim 10^{-12} s$  (2ans)

Temps caractéristique des ions  $\sim 10^{-8} s$  (2heures)

Hypothèses de travail

- Pas de propagation particulière des électrons

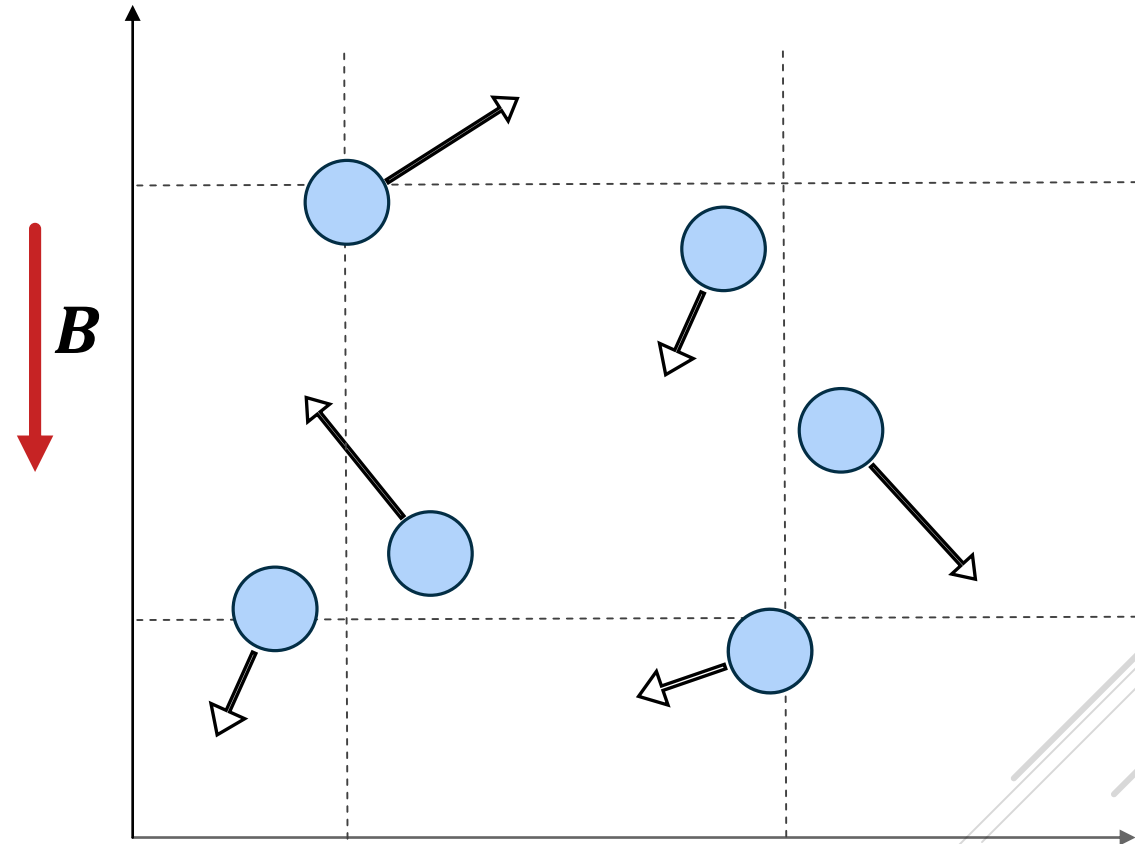
- Energie des électrons constante

- Confinement électrostatique du plasma (potential dip) autour de la zone ECR

# Modélisation d'une source d'ions ECR

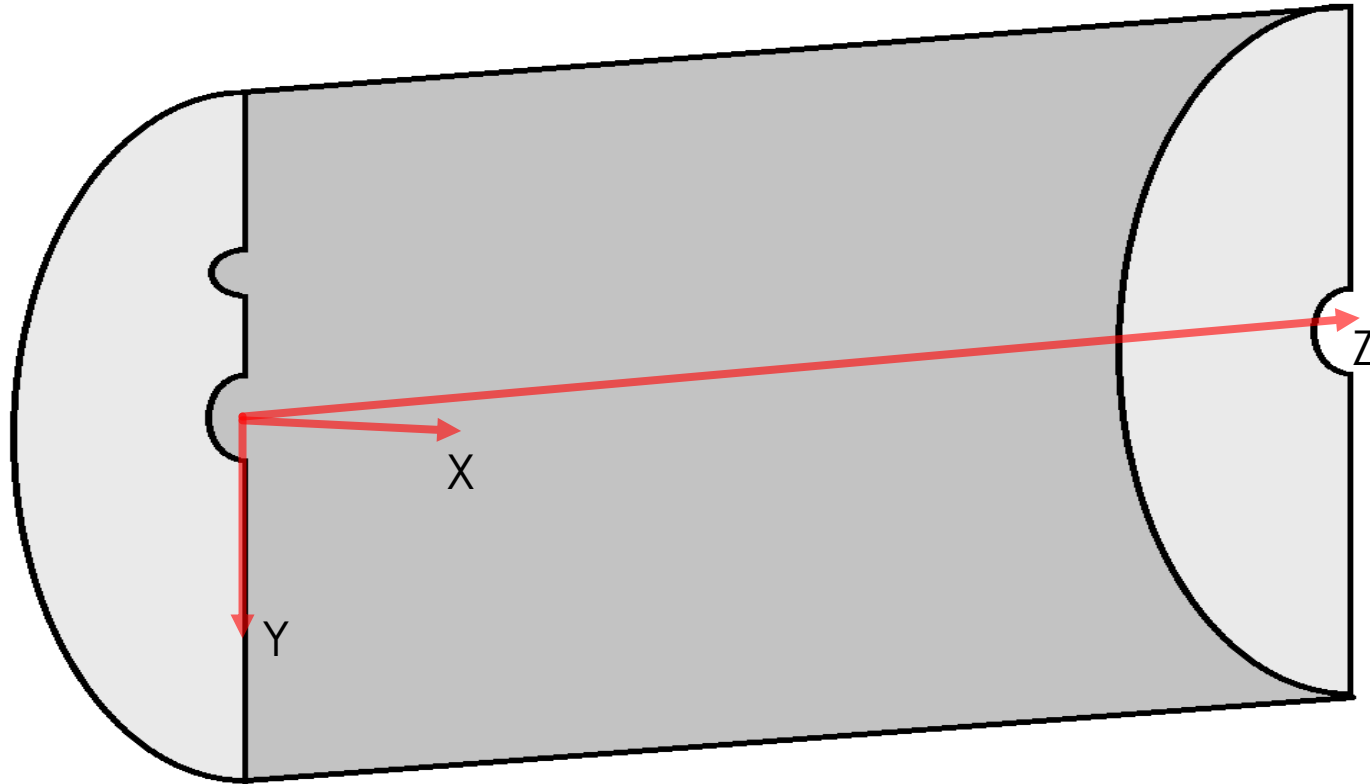
## Simulation pour PHOENIX V3

- Propagation d'atomes et d'ions
- Initialisation aléatoires
- Maillage cartésien
- Propagation avec la méthode de Boris
- Tirage aléatoire de la collision
- Collage et décollage des particules sur les parois

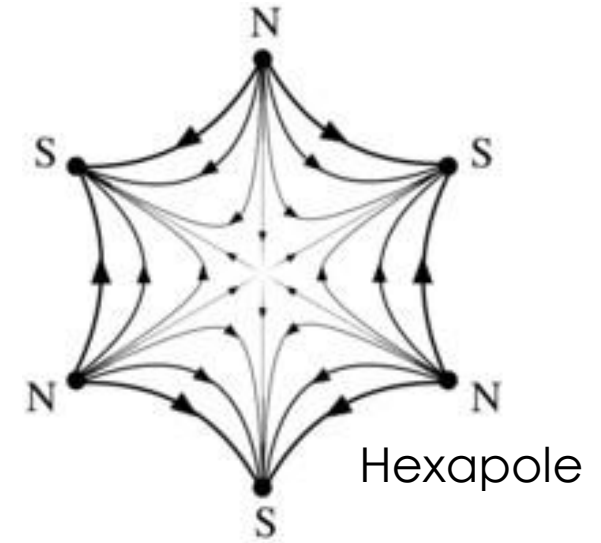


# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Symétrie de PHOENIX V3



Simulation de la moitié de la source d'ions

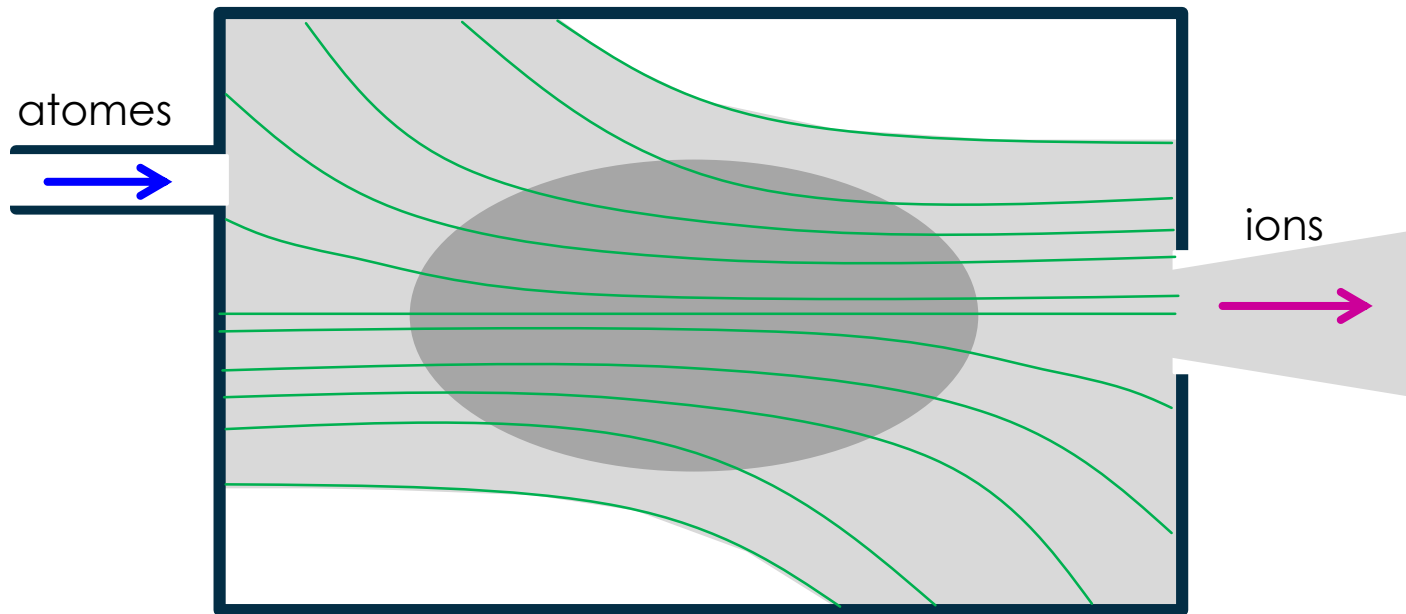


Bobines  
symétrie cylindrique  
Hexapole  
3 plans de symétrie  
Injection Extraction de gaz  
1 plan de symétrie



# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Système dynamique



Injection d'atomes

Extraction d'ions

Nombre de particules dans  
la simulation variable  
(modification du poids des  
macroparticules pendant la simulation)

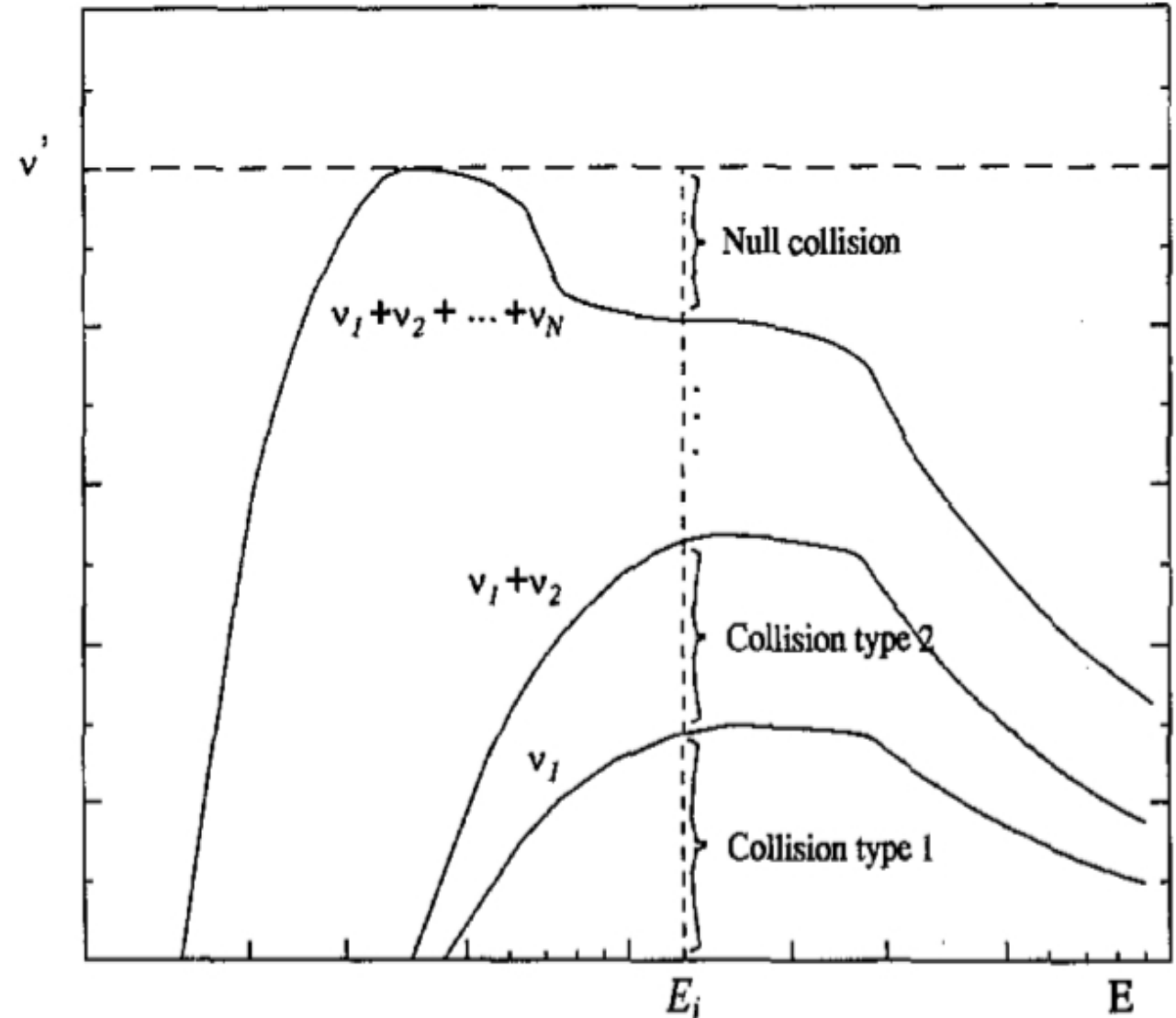
# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Collisions

Théorie de la collisions nulle

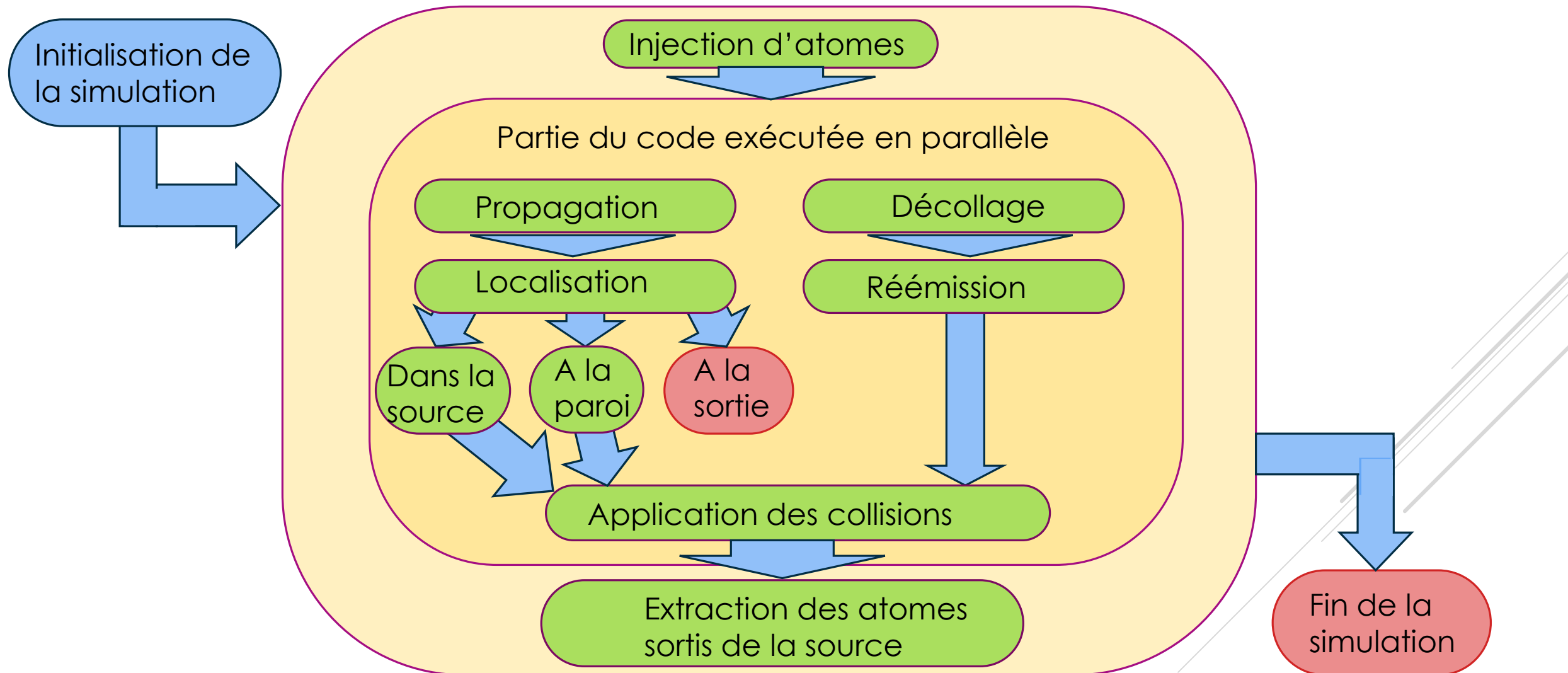
- ▶ Ionisations (simple et double) (Lotz)
- ▶ Echange de Charge (Müller)
- ▶ Recombinaison (Hahn)

Collisions coulombiennes  
("Theory of cumulative small-angle collisions  
in plasmas" de K. Nanbu)



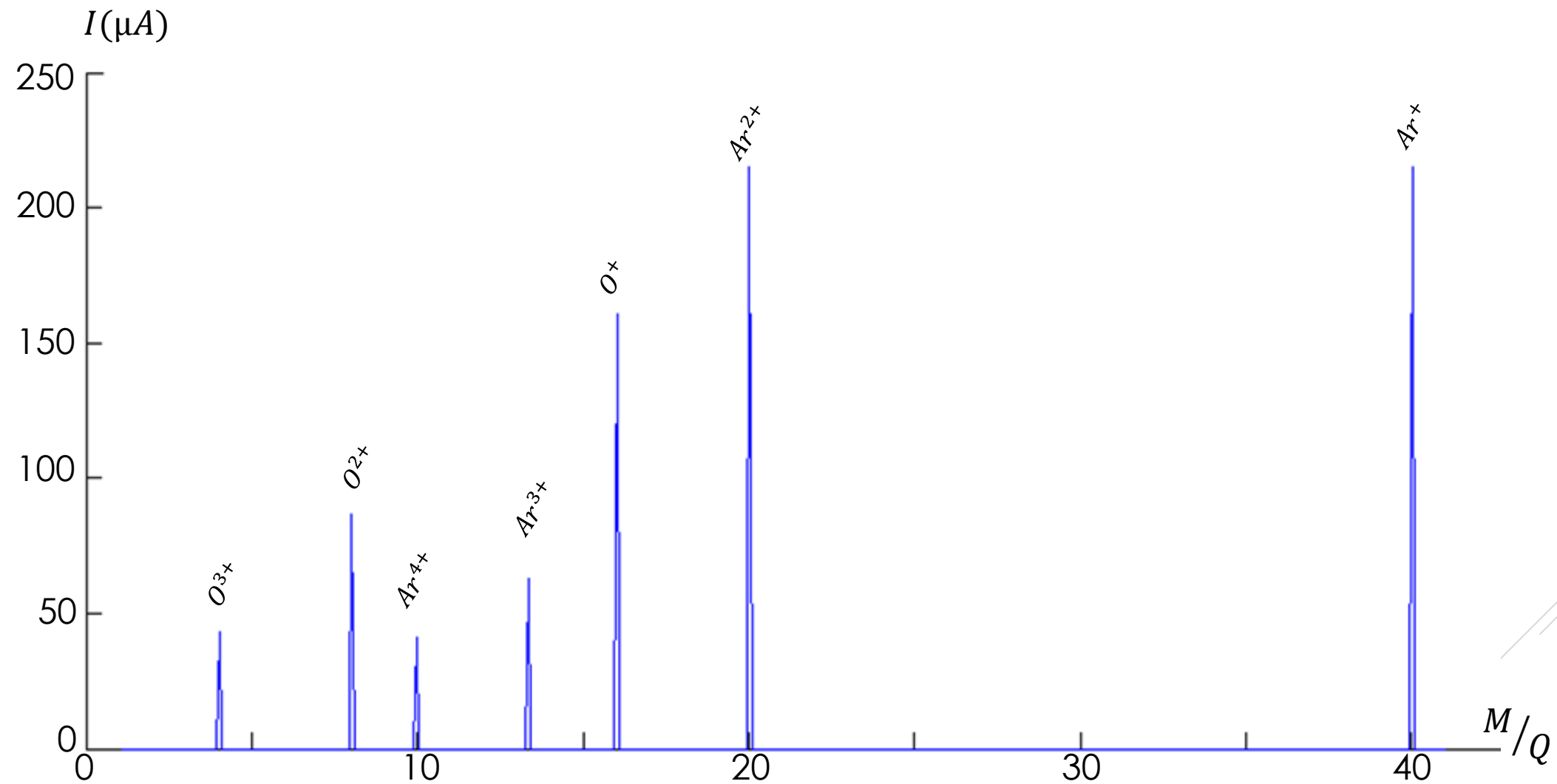
# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Organigramme du code



# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Résultats



# Evaporation de métaux

## Production d'ions métalliques

Atomes métalliques sublimés à l'aide d'un four

Injectés dans la source en dehors du plasma

Probabilité d'ionisation en vol (10-20%)

Collage des particules

$$P_{collage} = C_o$$

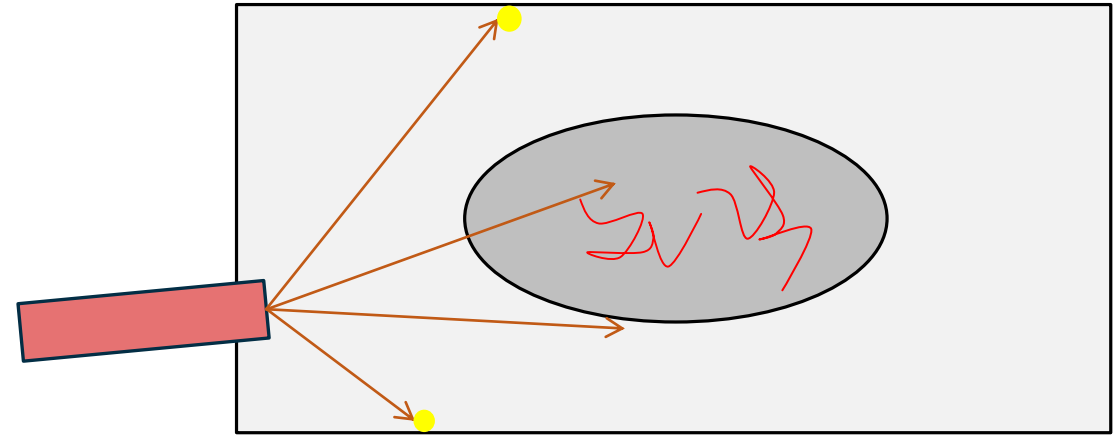
$C_o$  le coefficient de collage

Réémission des particules

$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{E_d}{kT}\right)}$$

$\tau$  temps de collage moyen

$E_d$  énergie de liaison



# Evaporation de métaux

## Production d'ions métalliques

Atomes métalliques sublimés à l'aide d'un four

Injectés dans la source en dehors du plasma

Probabilité d'ionisation en vol (10-20%)

Collage des particules

$$P_{collage} = C_o$$

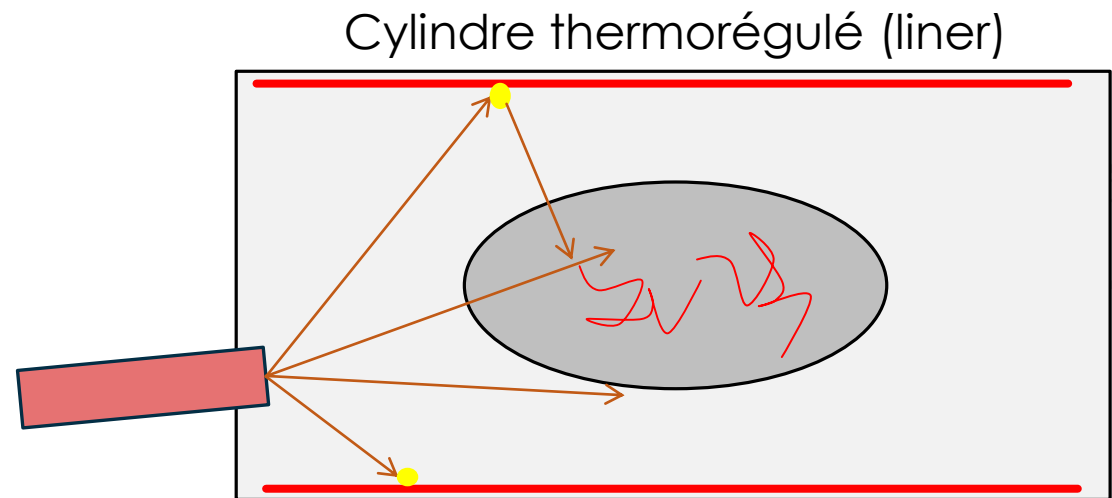
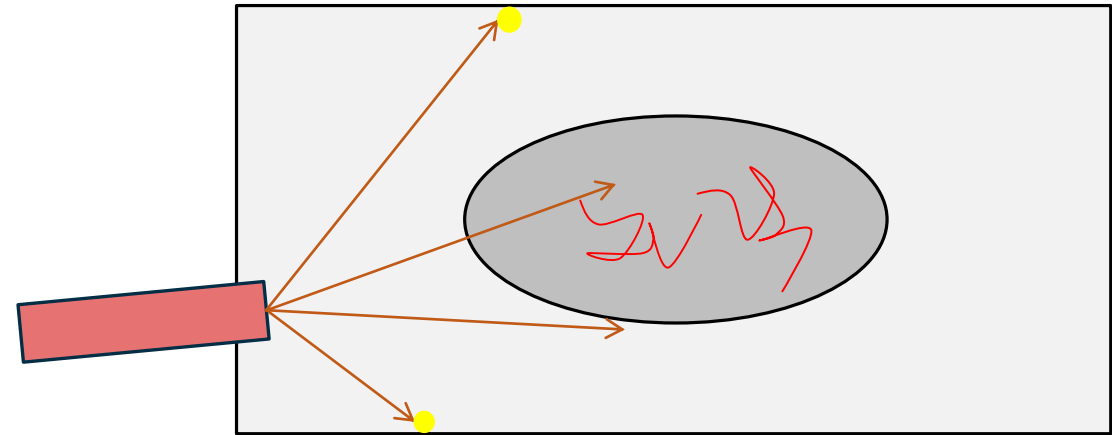
$C_o$  le coefficient de collage

Réémission des particules

$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{E_d}{kT}\right)}$$

$\tau$  temps de collage moyen

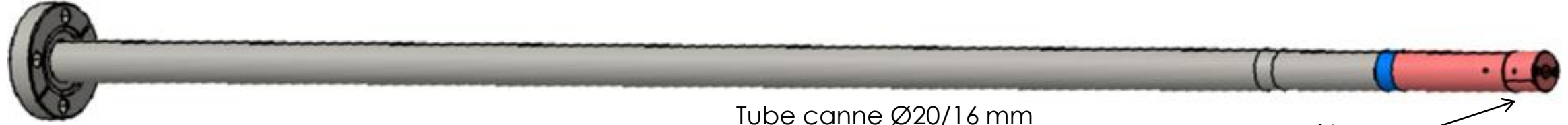
$E_d$  énergie de liaison



Amélioration efficacité attendue

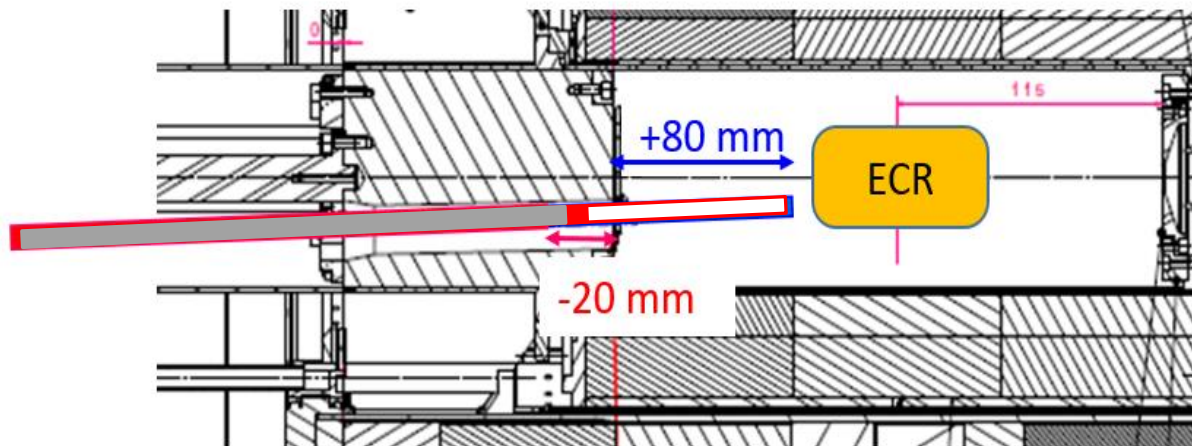
# Évaporation de métaux

## Évaporation de métaux: PHOENIX V3

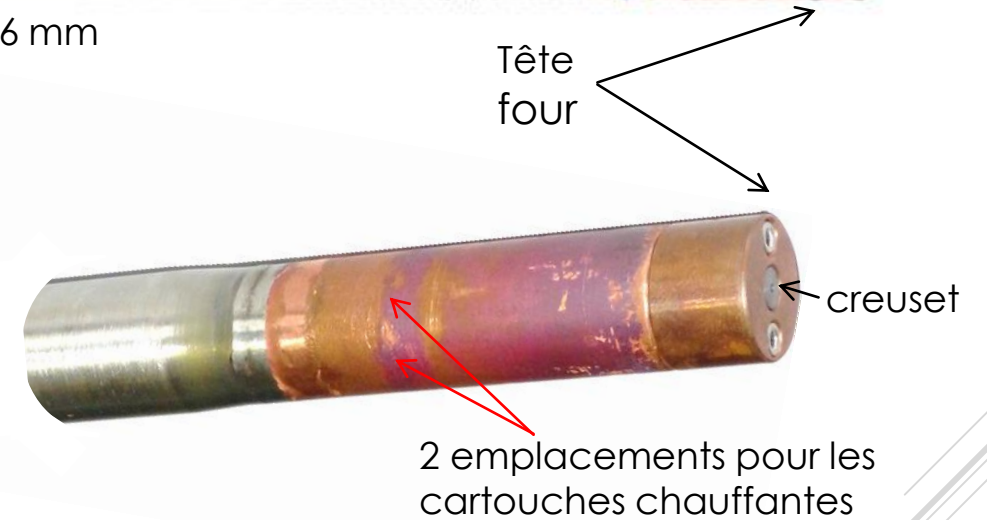


Évaporation des atomes métalliques  
dans un creuset

Injection des atomes dans la source  
à l'aide d'une canne

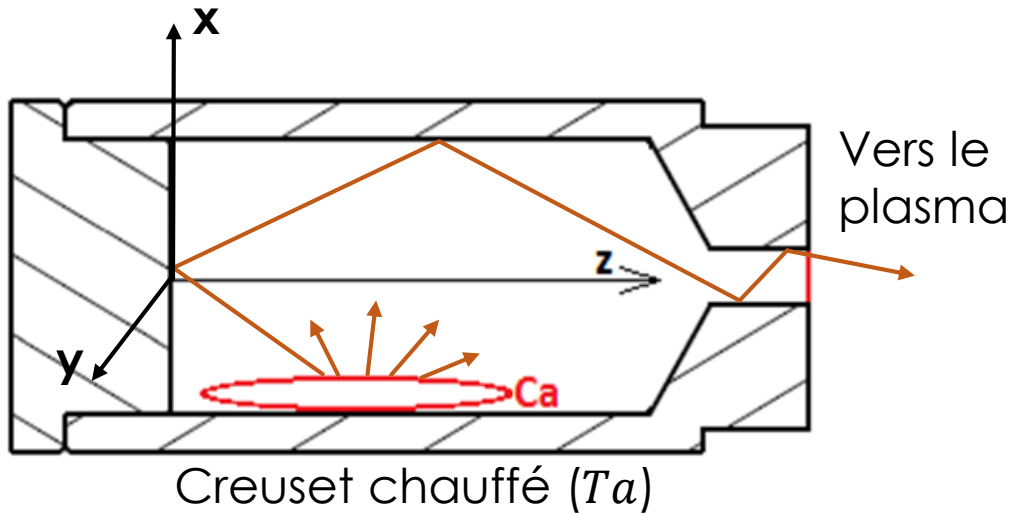


Simulation simple du creuset



# Evaporation de métaux

## Simulation du four de Calcium



### Hypothèse de travail

Pas d'interaction entre particules  
Profil de température linéaire  
entre le fond et la sortie du creuset

Modélisation PIC simple

Distribution de vitesse  
maxwellienne

Collage des particules

$$P_{collage} = C_o$$

et décollage

Temps de collage

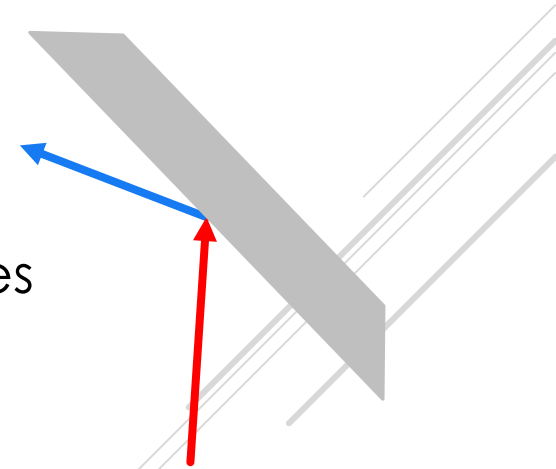
$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{E_d}{kT}\right)}$$

Thermalisation des particules

$$E_r = E_i + \alpha(E_w - E_i)$$

$\alpha$  coefficient d'accommodation  
thermique

$C_o$  et  $E_d$  inconnues pour le couple  $Ca-Ta$

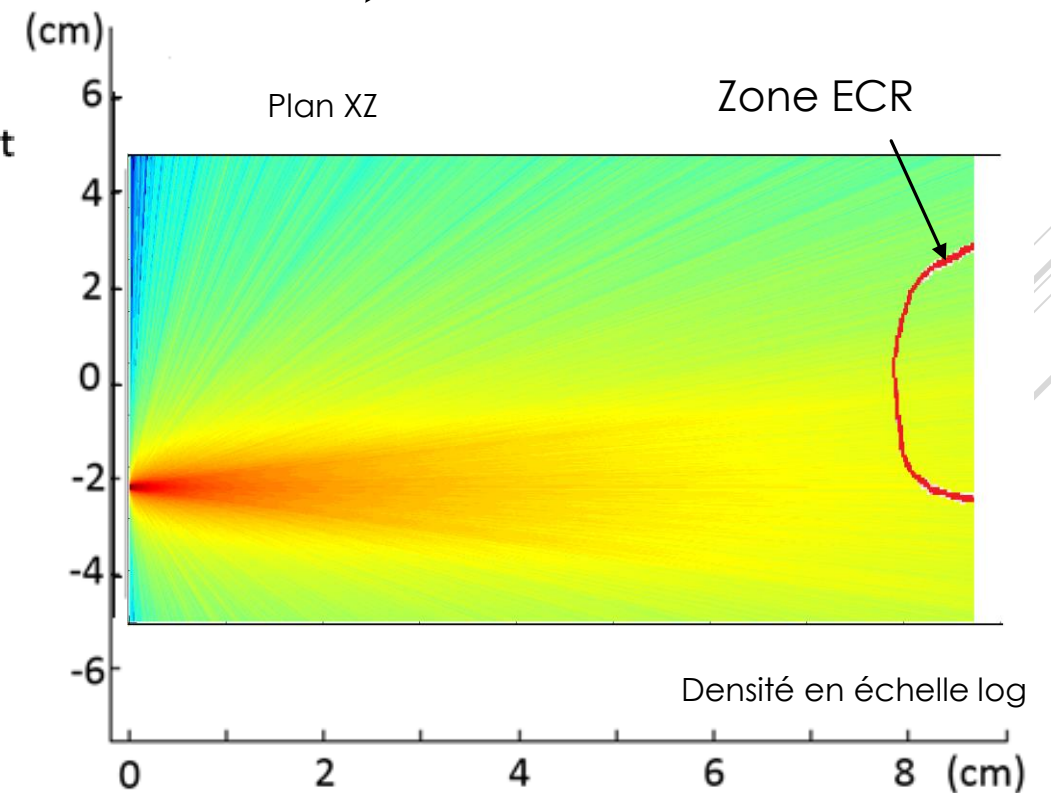
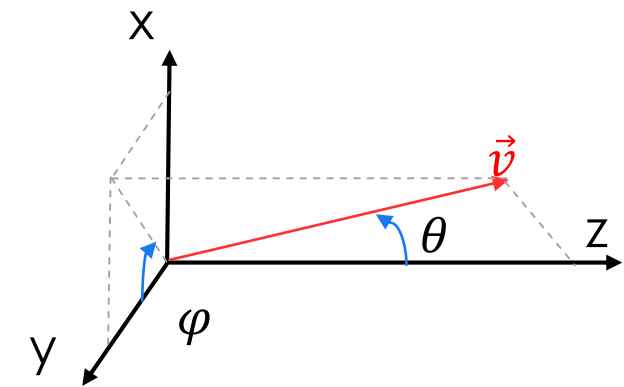
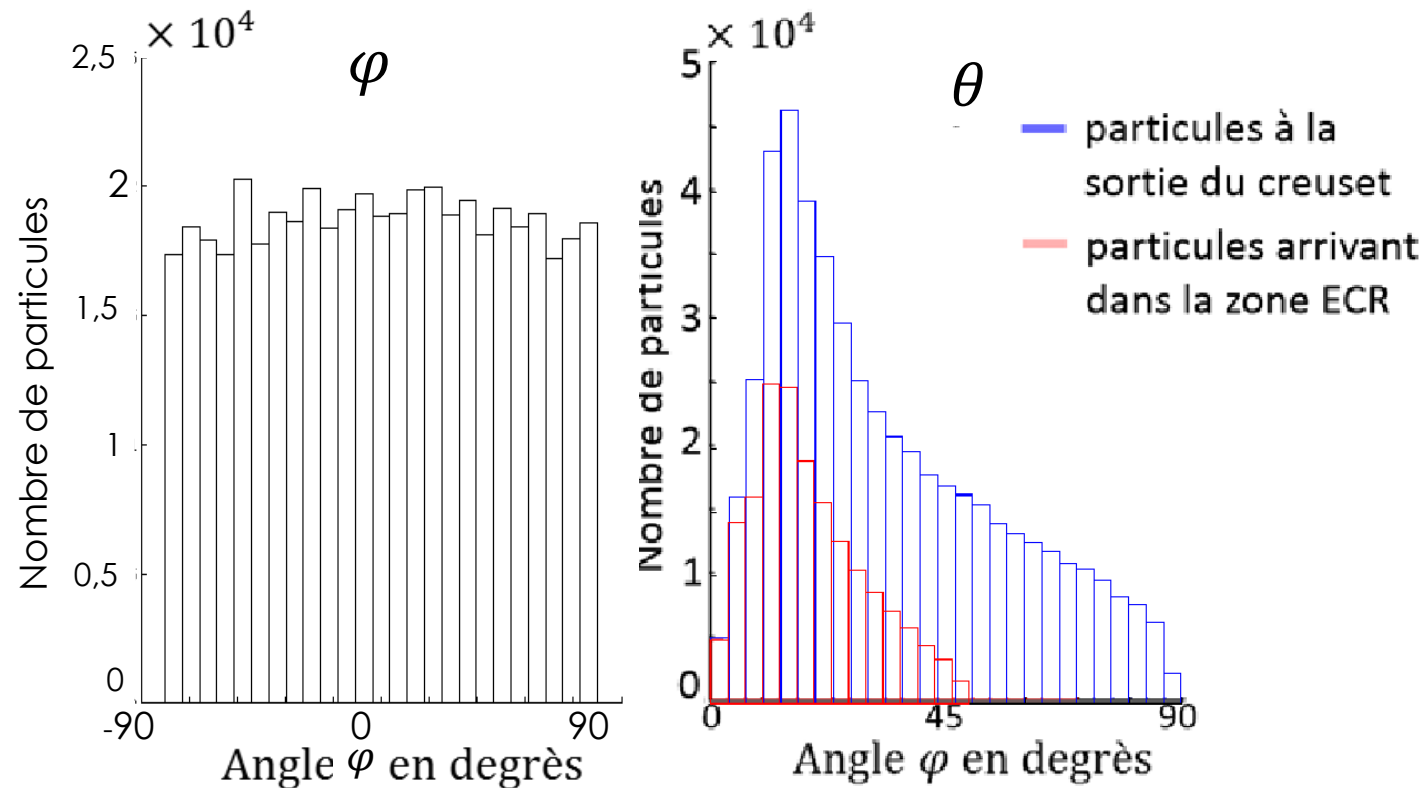




# Evaporation de métaux

## Simulation du four de Calcium

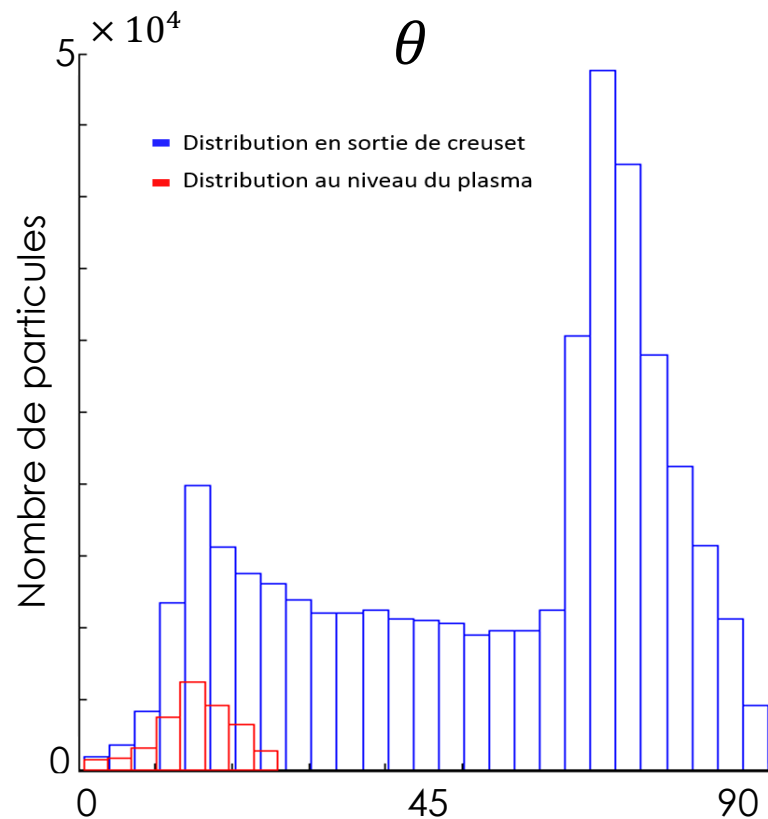
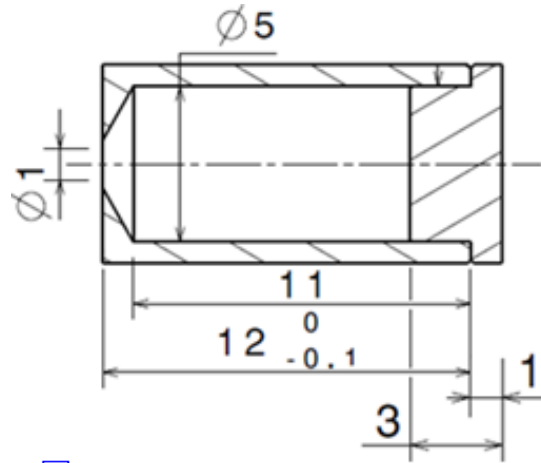
Distribution homogène en  $\varphi$  et inhomogène en  $\theta$



Liner pour la ré-évaporation d'atomes métalliques  
Distributions en entrée de la simulation de la source

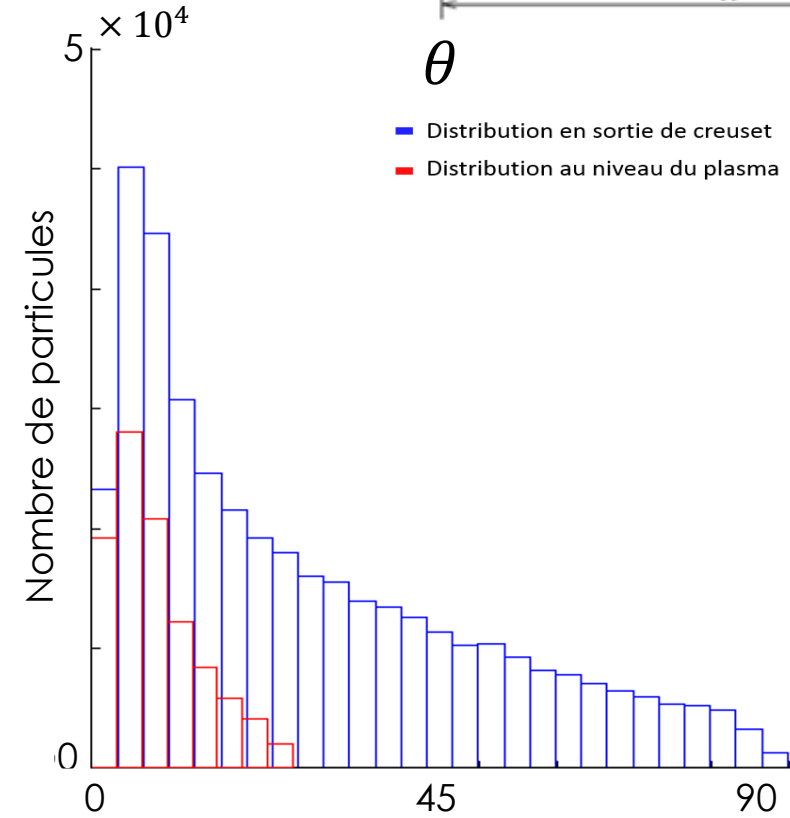
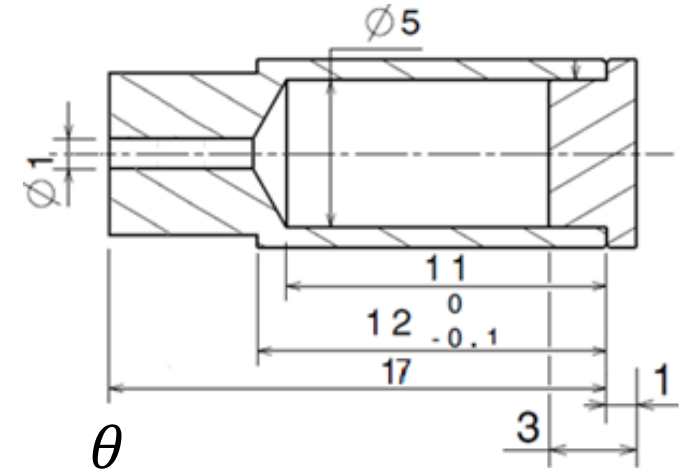
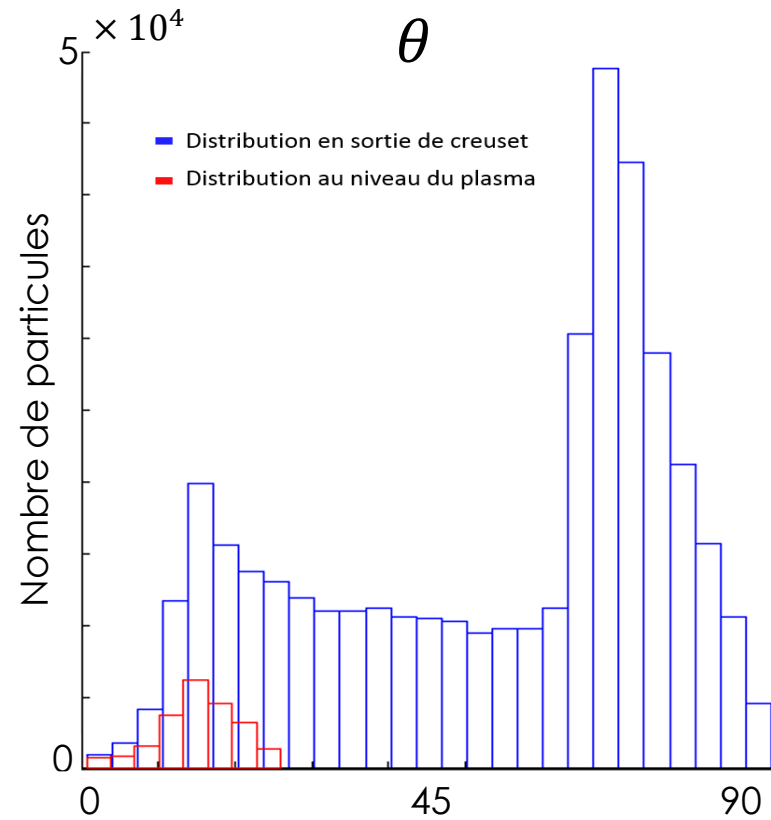
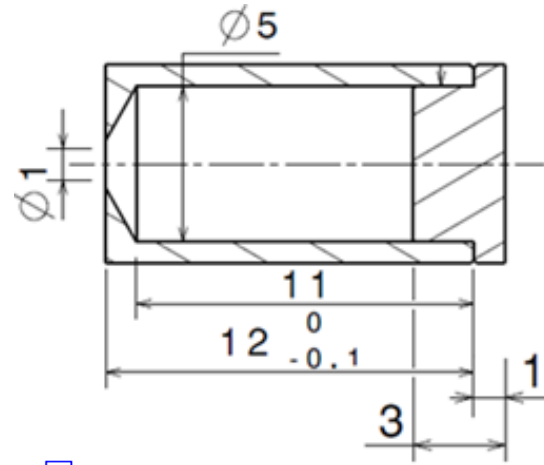
# Evaporation de métaux

## Simulation du four de Calcium



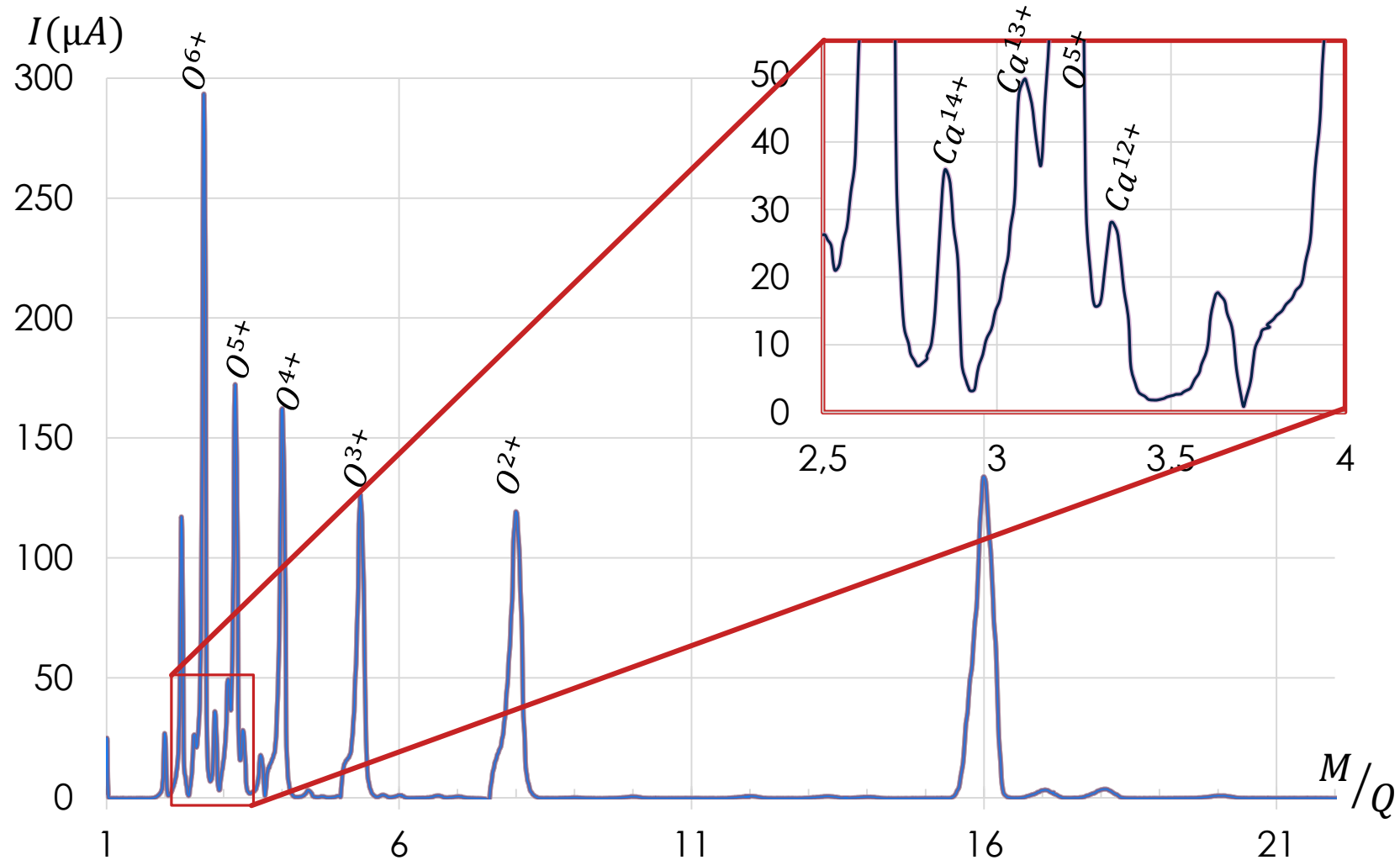
# Evaporation de métaux

## Simulation du four de Calcium



# Evaporation de métaux

## Production Calcium



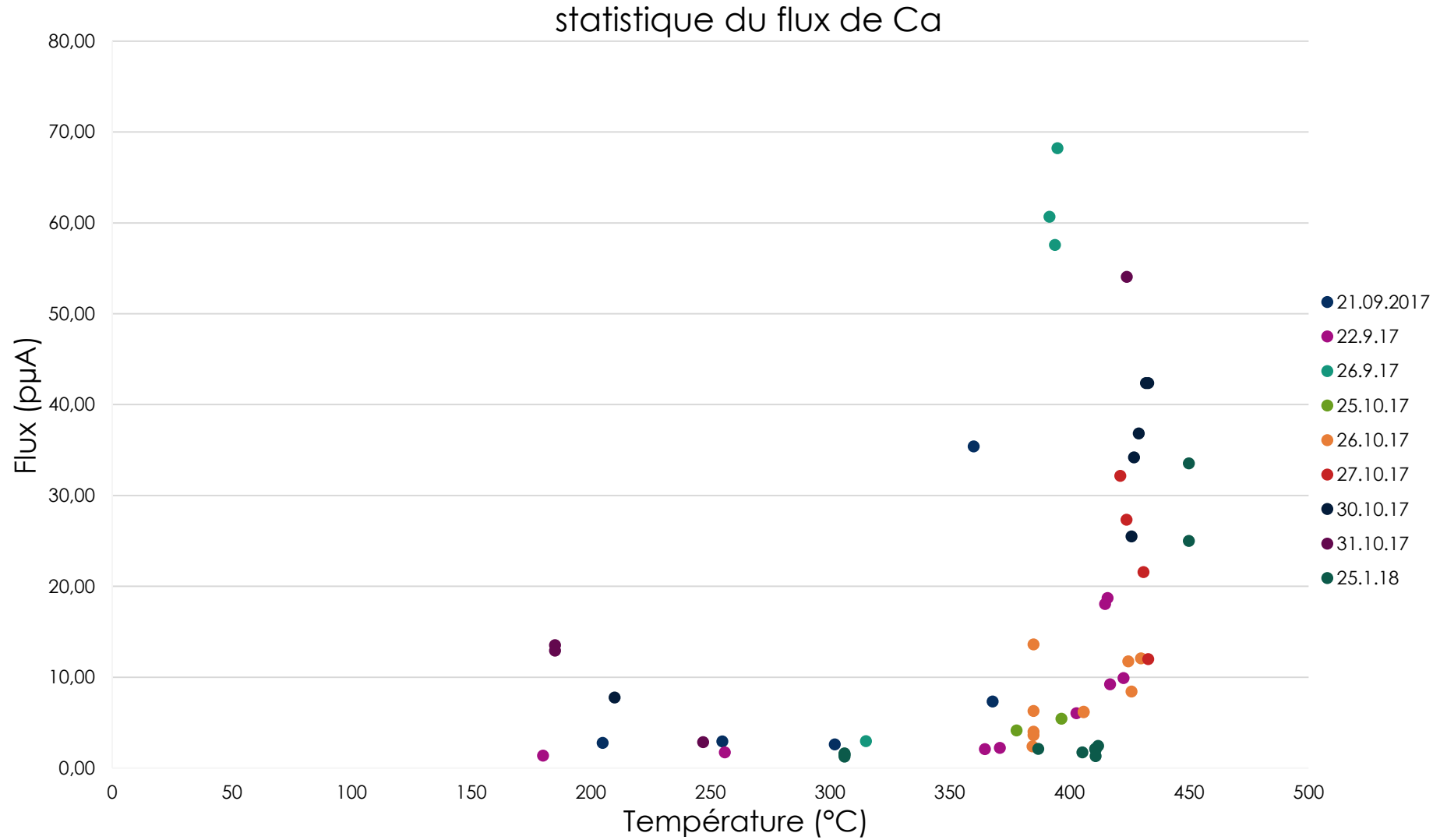
Fonctionnement du four

Production d'ion  $M/A = 3$

Fonctionnement de la source pour les atome métalliques

# Evaporation de métaux

## Production Calcium



Rendement de 20%

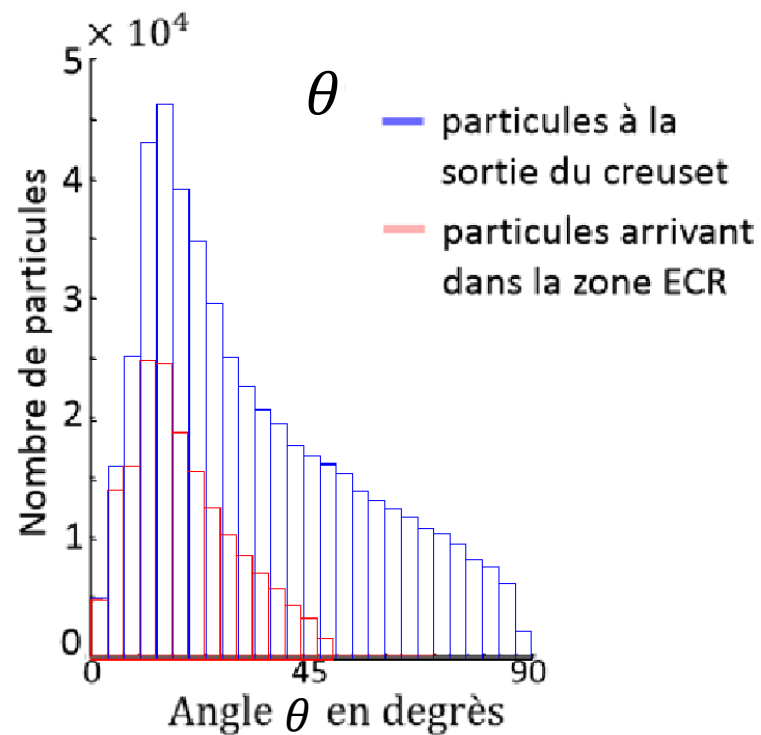
Contrainte des  
paramètres de la  
simulation

# Conclusion et Perspectives

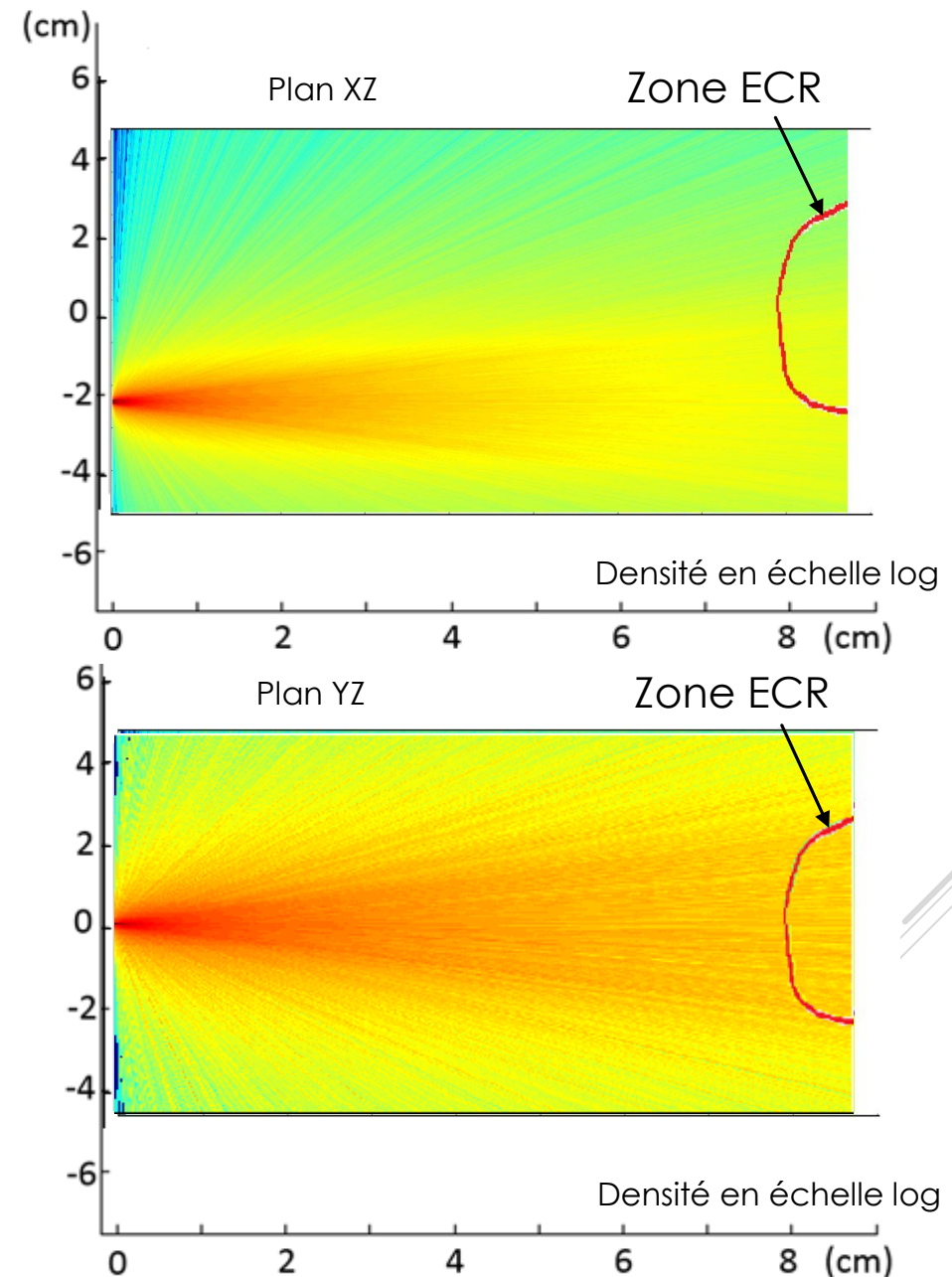
- Simulation de la source d'ions
  - Production de spectre d'ions par simulation
  - Etude du flux d'atomes en sortie de creuset
  - Production d'ions métalliques
- 
- Étude expérimentale de la ré-évaporation d'atomes métallique avec un liner
  - Mesure de coefficient de collage et de l'énergie de liaison du couple Ta-Ca
  - Simulation du Liner et de la production d'ions Ca
  - Comparaison entre la simulation et l'expérimentation

Merci pour votre attention

# DE LA SORTIE DU CREUSET À LA ZONE ECR

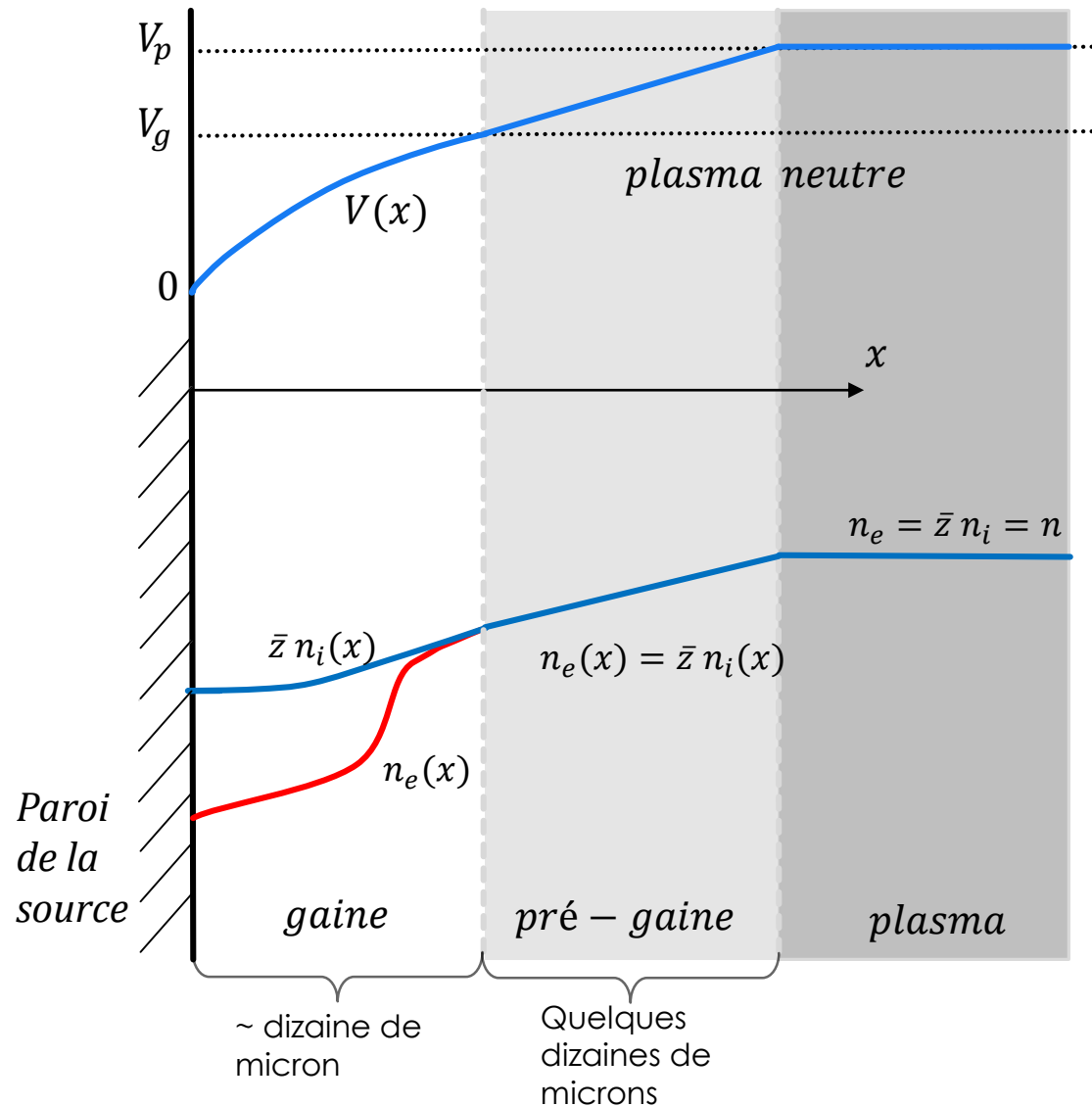


15% des particules atteignant la zone ECR  
(jusqu'à 50% suivant la position du four)  
Les particules avec des angles  $\theta > 50^\circ$   
n'atteignent pas la zone ECR.





# CARACTÉRISTIQUES DU PLASMA



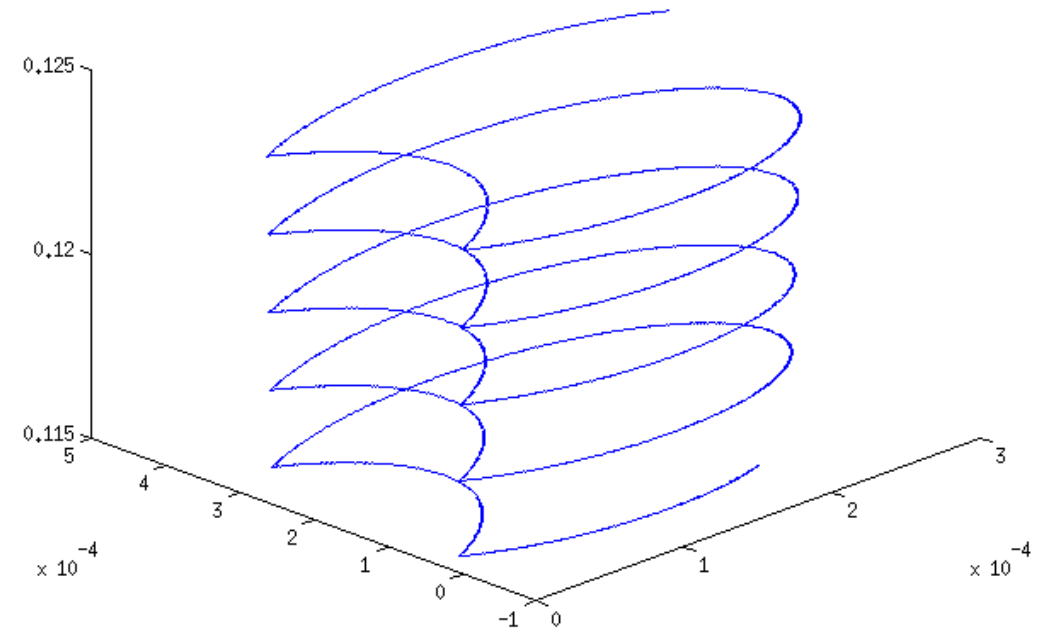
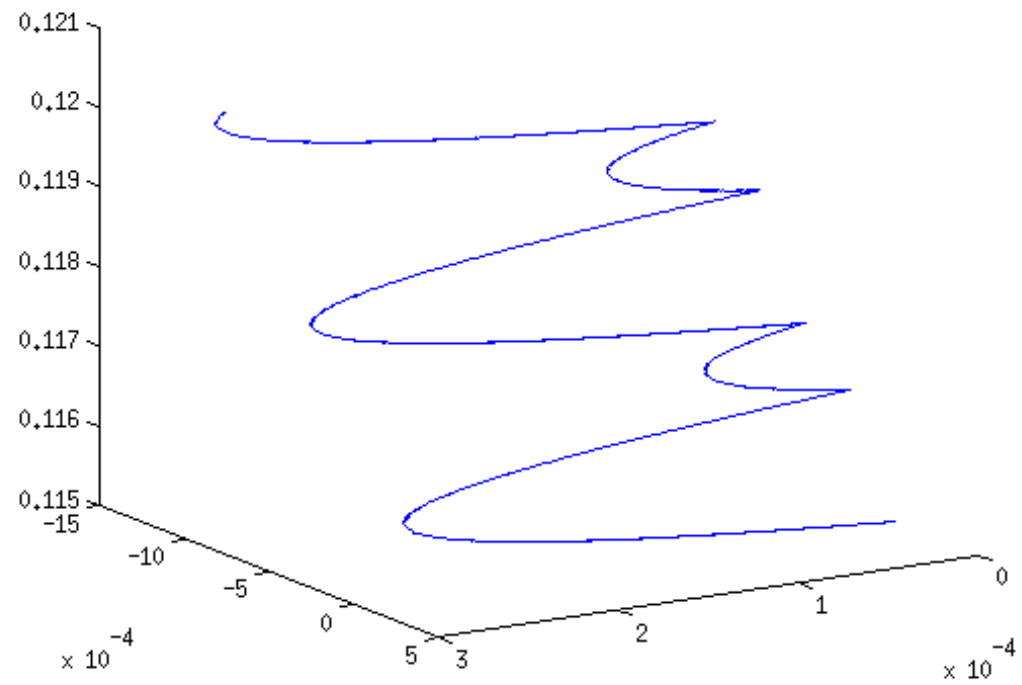
Densité plasma  $\sim 10^{12} / \text{cm}^3$

Champ magnétique jusqu'à 2 T

Plasma Hors équilibre  
thermodynamique

- Ions froids ( $\sim \text{eV}$ )
- Plusieurs populations d'électrons

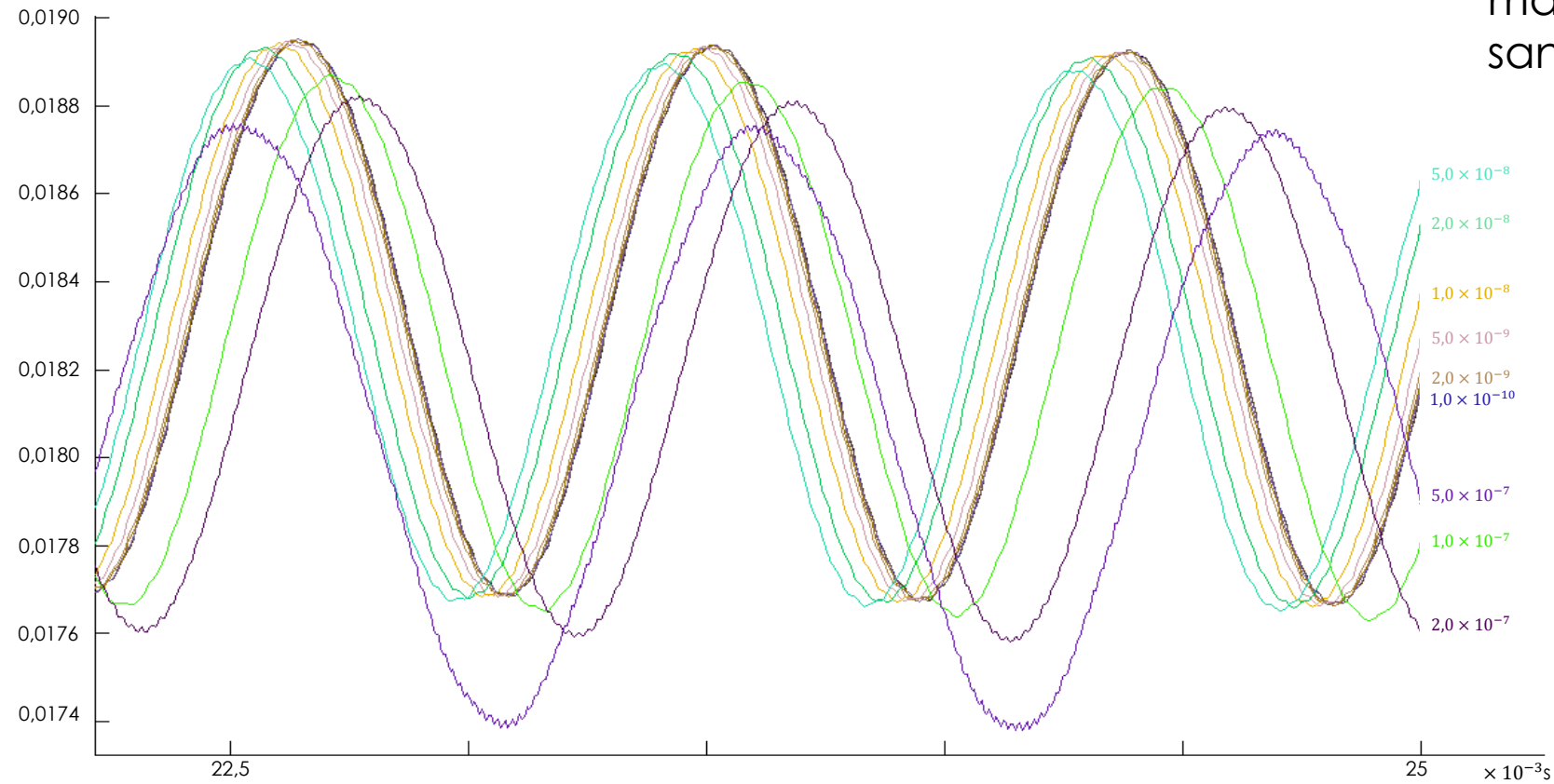
# PROPAGATION DE PARTICULE



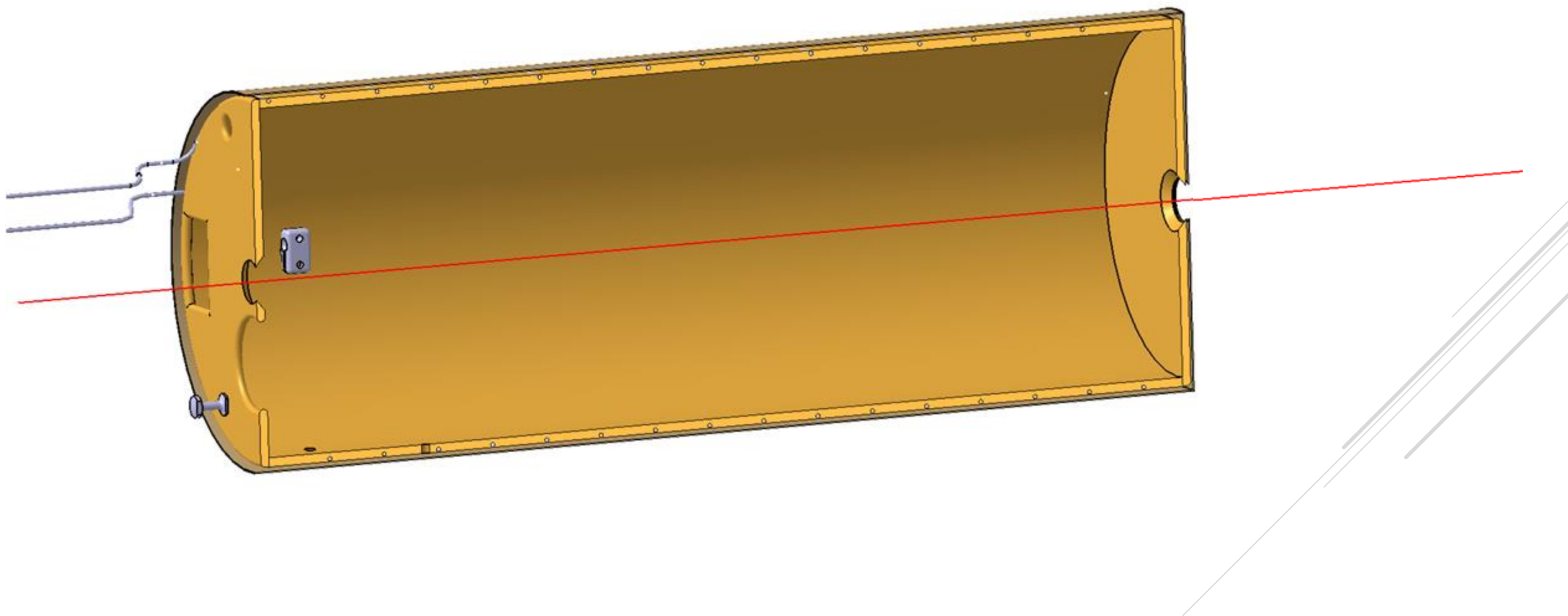
# CONVERGENCE DU PAS DE TEMPS

Simulation :

une seule particule chargée  
magnétiquement piégée  
sans collisions



# CYLINDRE THERMORÉGULÉ



# COEFFICIENT DE COLLAGE ET ENERGIE DE LIAISON

