

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



Université de Caen  
Basse-Normandie

27 Mars 2018

Alexandre LEDUC

Laurent Maunoury, Thomas Thuillier

Séminaire Doctorant 2<sup>o</sup> Année

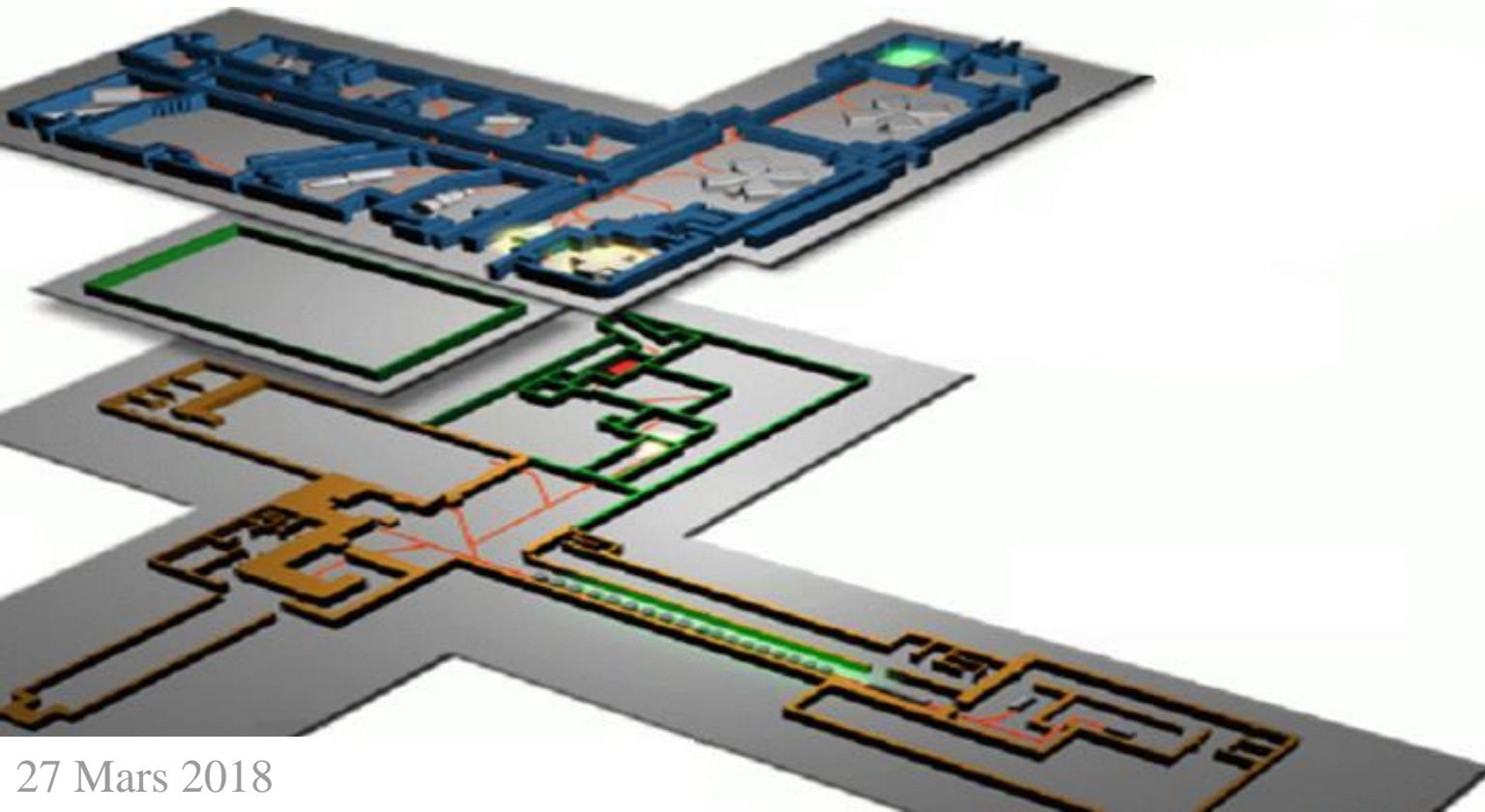
- Motivation de la thèse
- Principe d'une source d'ions ECR
- Modélisation d'une source d'ions
- Production d'ions métalliques
- Perspectives

# Motivation de la thèse

Projet Spiral2 au GANIL à Caen

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

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



# Motivation de la thèse

Objectifs :

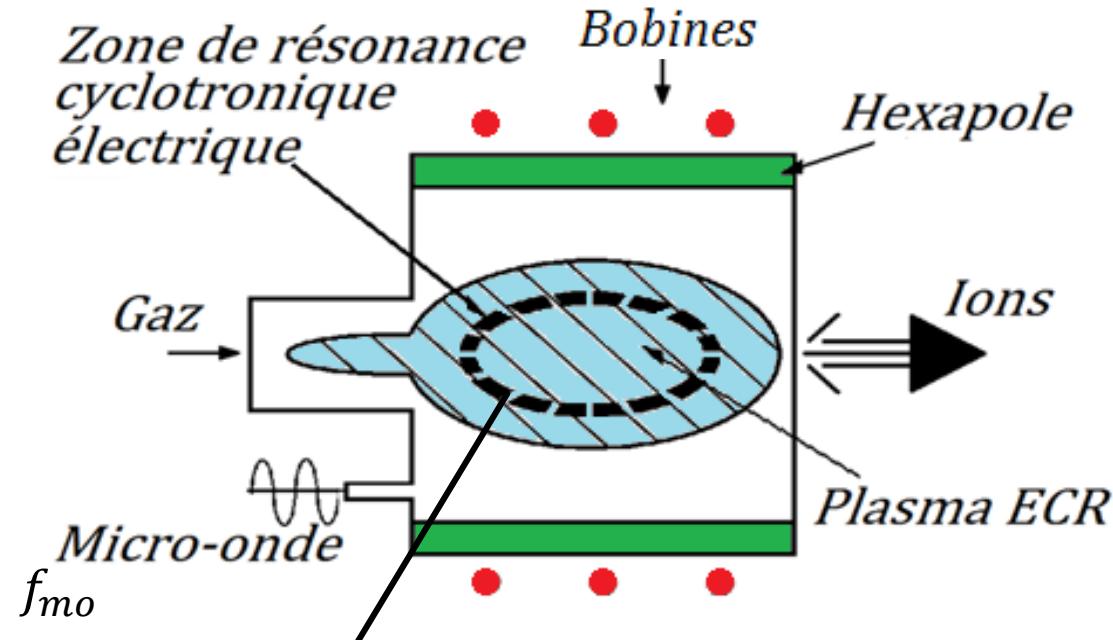
Doubler le rendement

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

Augmentation du rendement  
d'ionisation avec une paroi chauffée  
thermorégulée

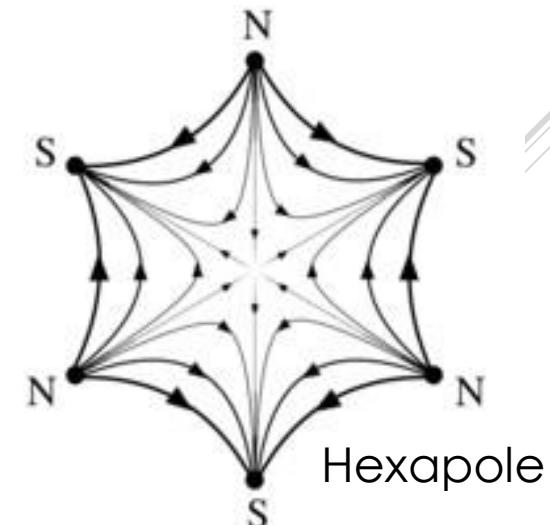
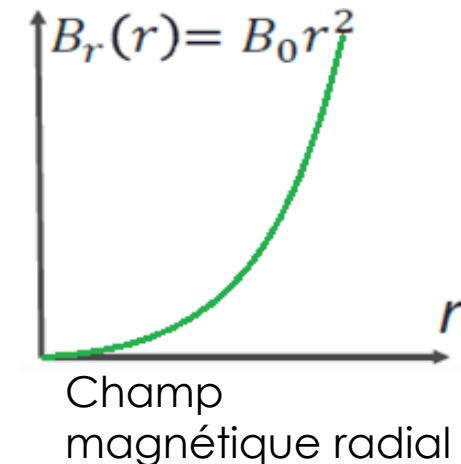
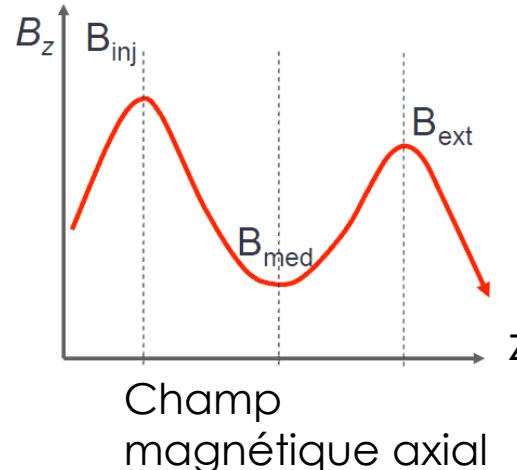
# Principe d'une source d'ions ECR

## Formation du plasma



$$f_{mo} = f_{ce} = \frac{q B}{2\pi m}$$

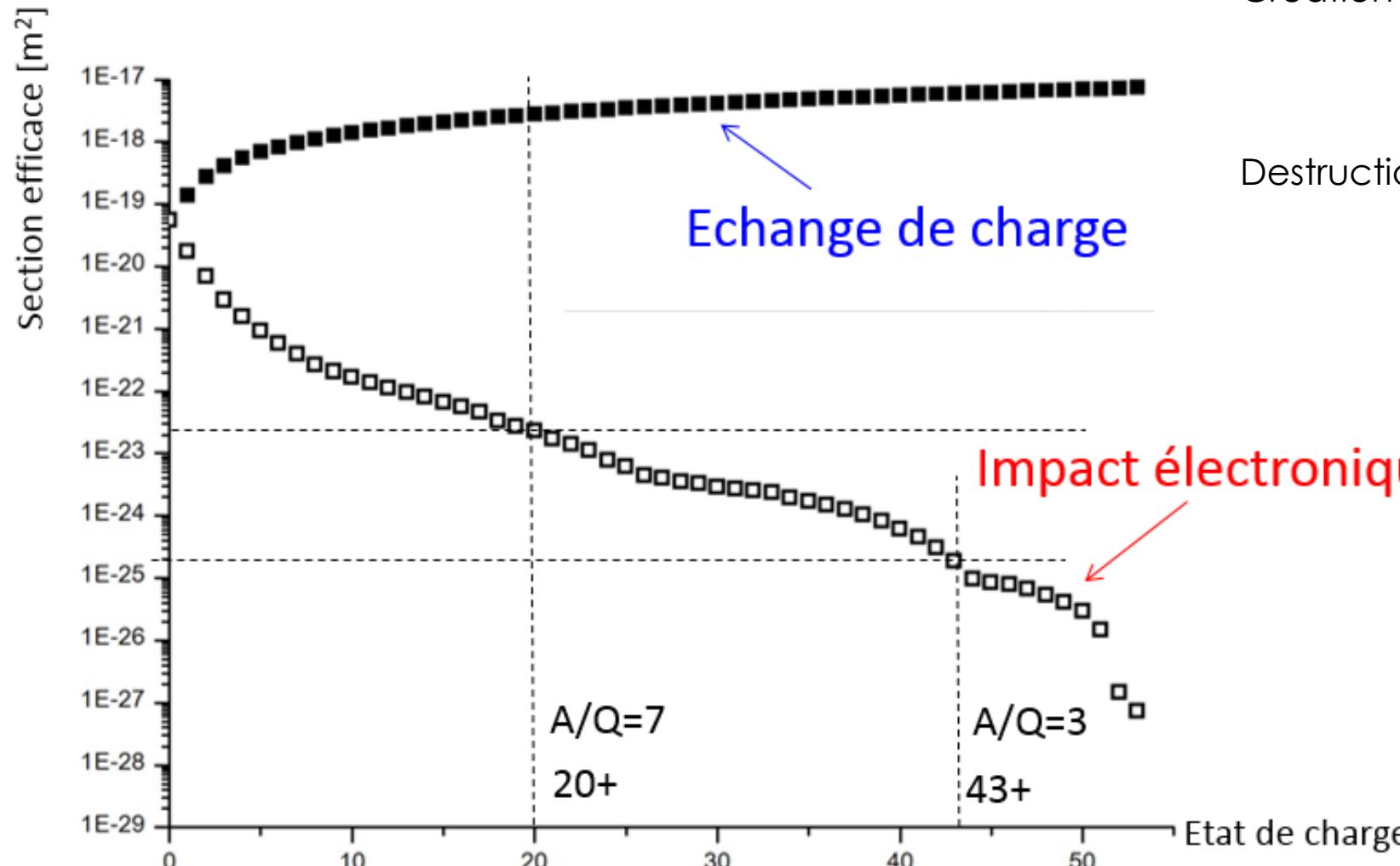
Utilisation d'un gaz support  
confinement magnétique  
multiples aller-retour des électrons



# Principe d'une source d'ions ECR

## Formation du plasma

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



Création : Impact électronique

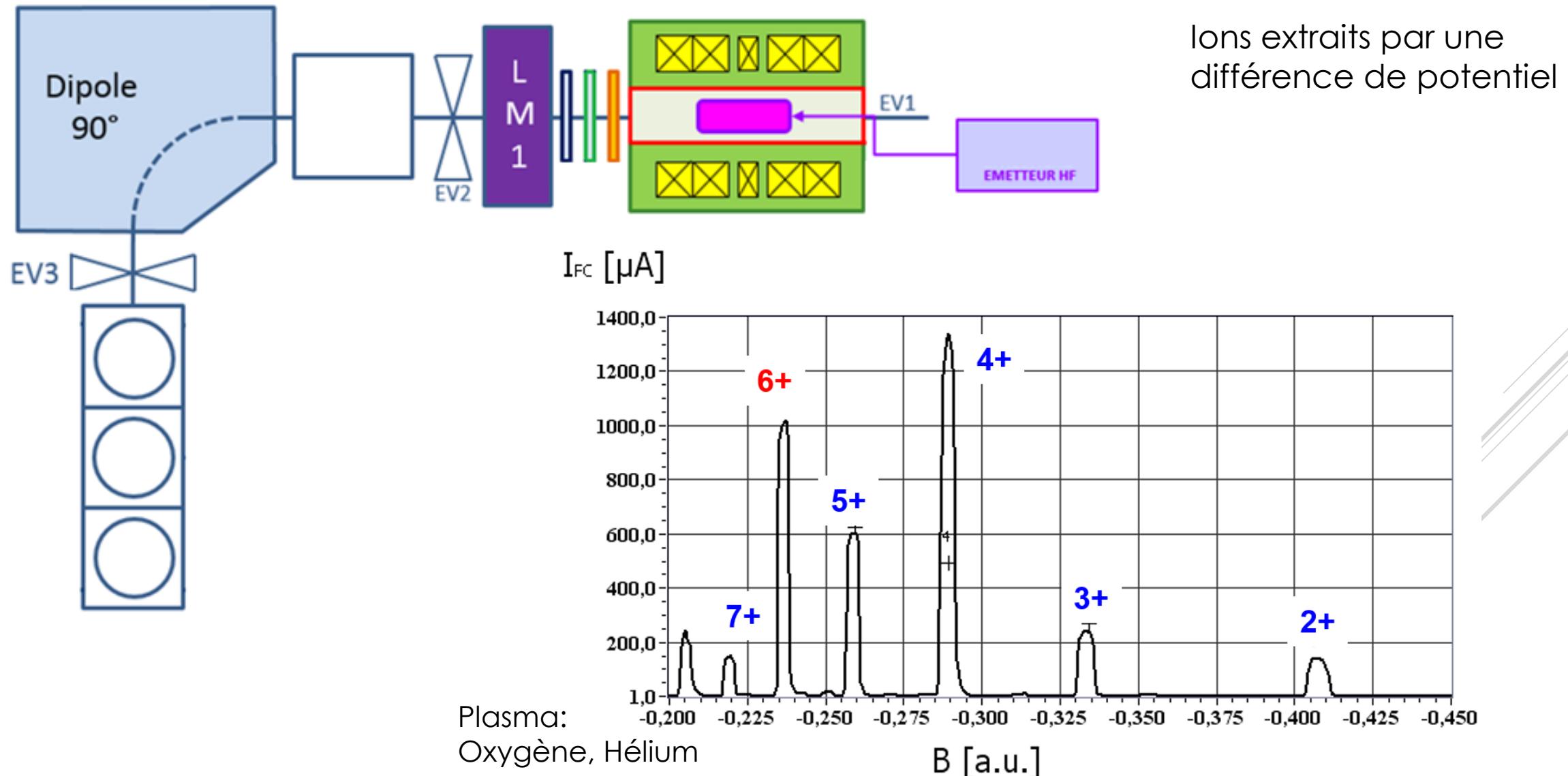


Destruction : Echange de charge



# Principe d'une source d'ions ECR

## Analyse de faisceaux

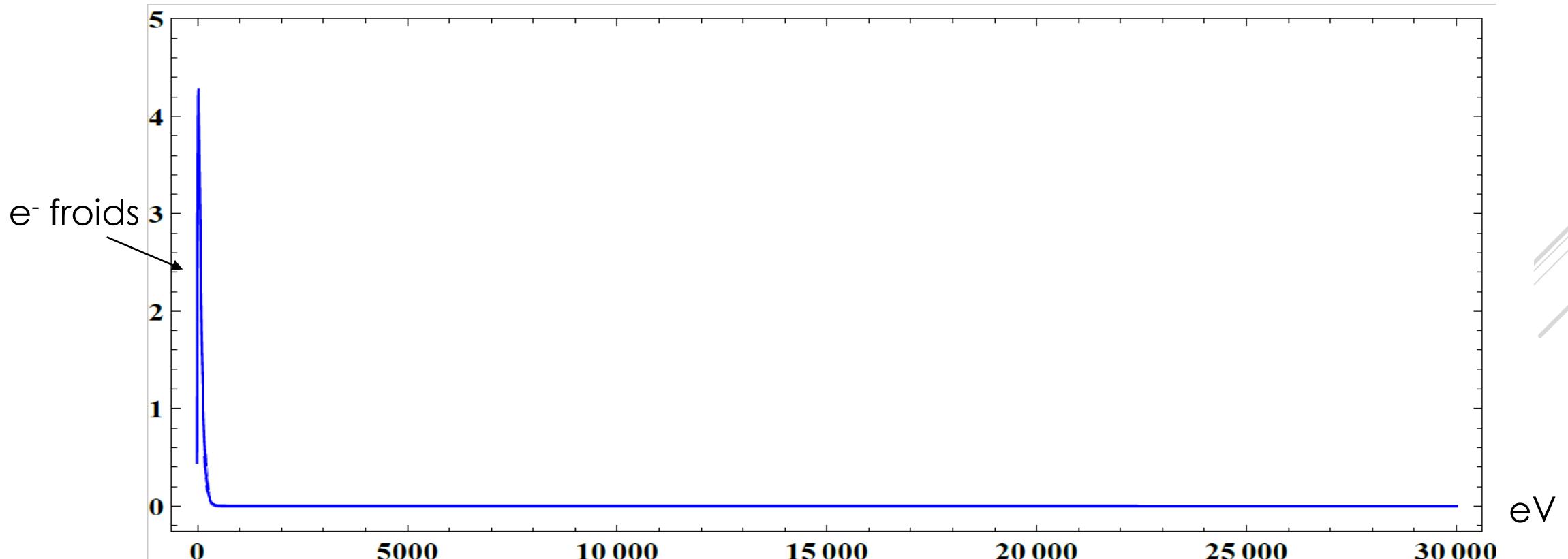


# Principe d'une source d'ions ECR

## Caractéristiques du plasma

3 composantes qualitatives :

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



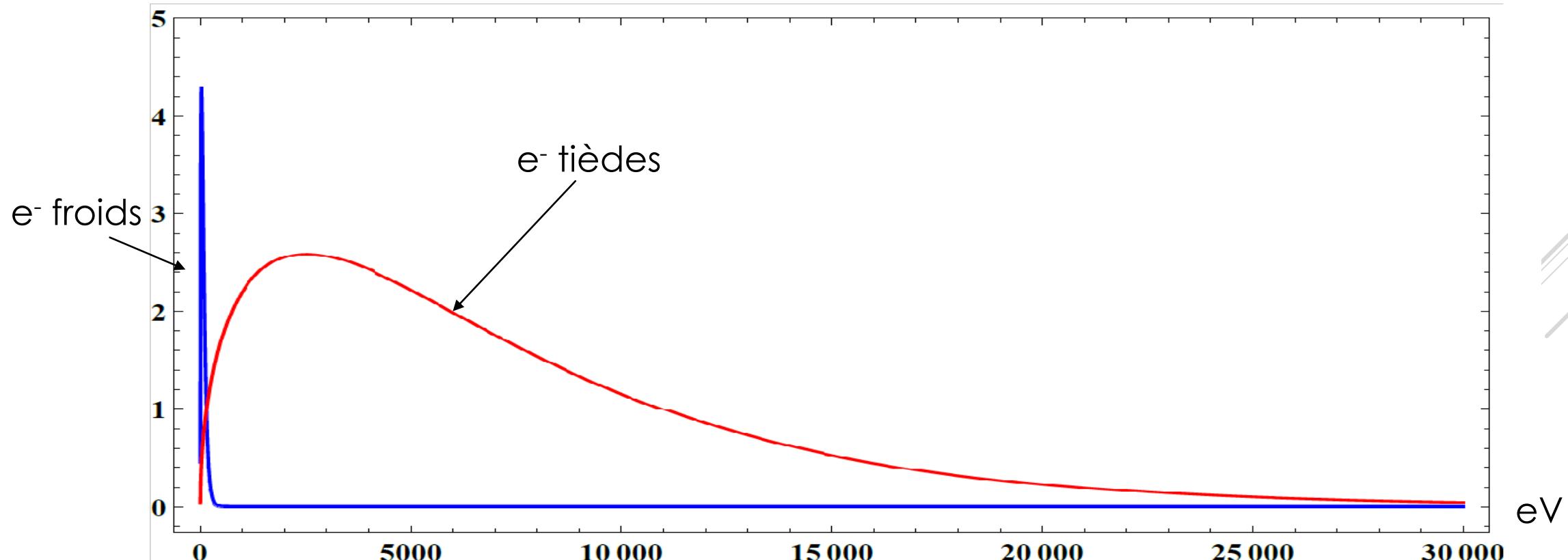
# Principe d'une source d'ions ECR

## 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

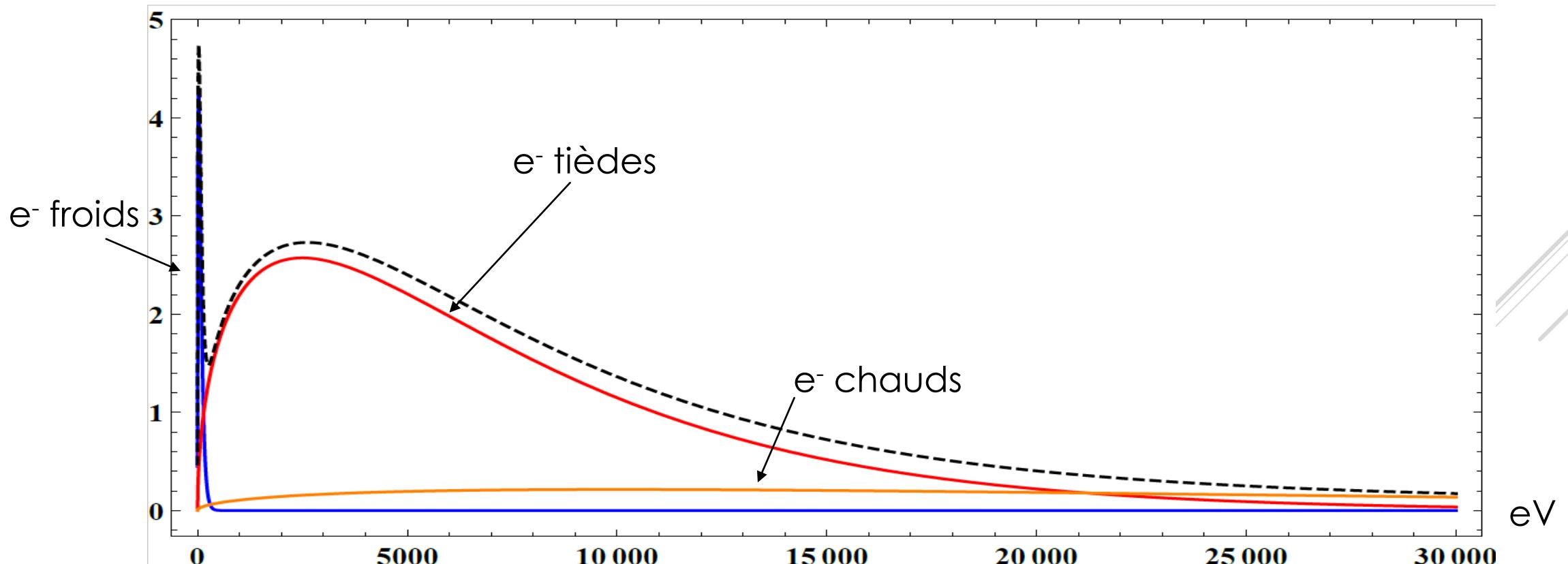
## Caractéristiques du plasma

3 composantes qualitatives :

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

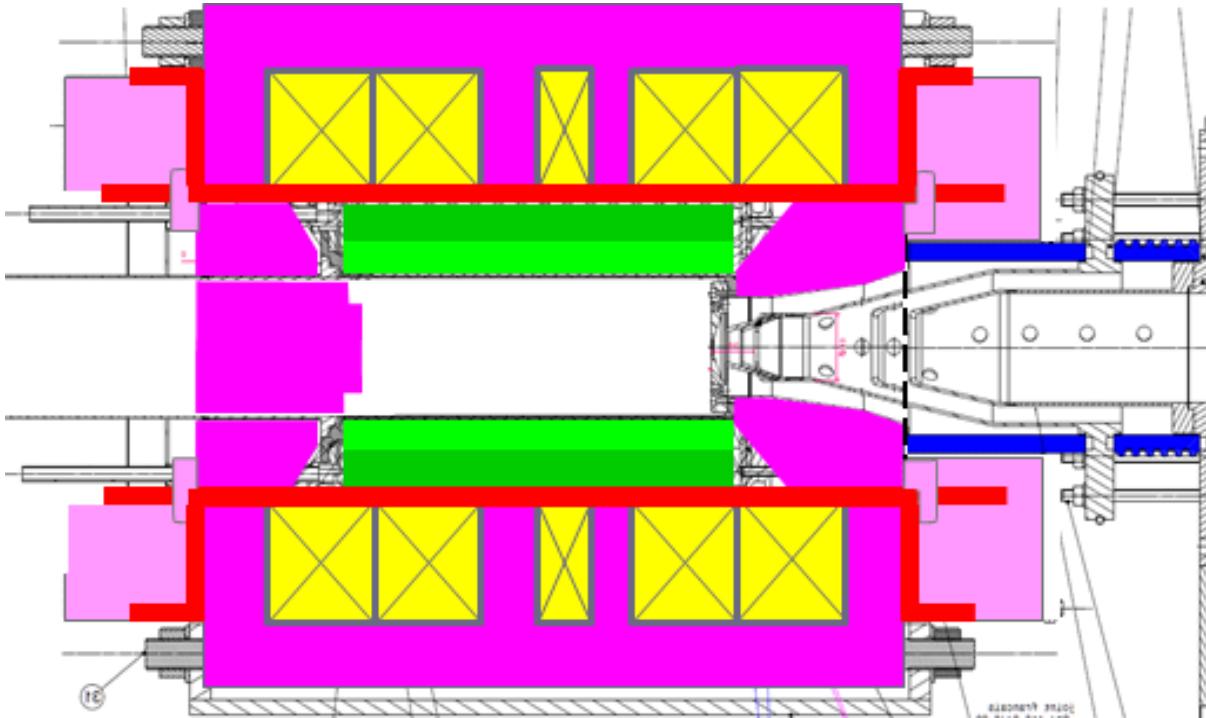
électrons tièdes 1-5 keV: ceux qui multi-ionisent

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



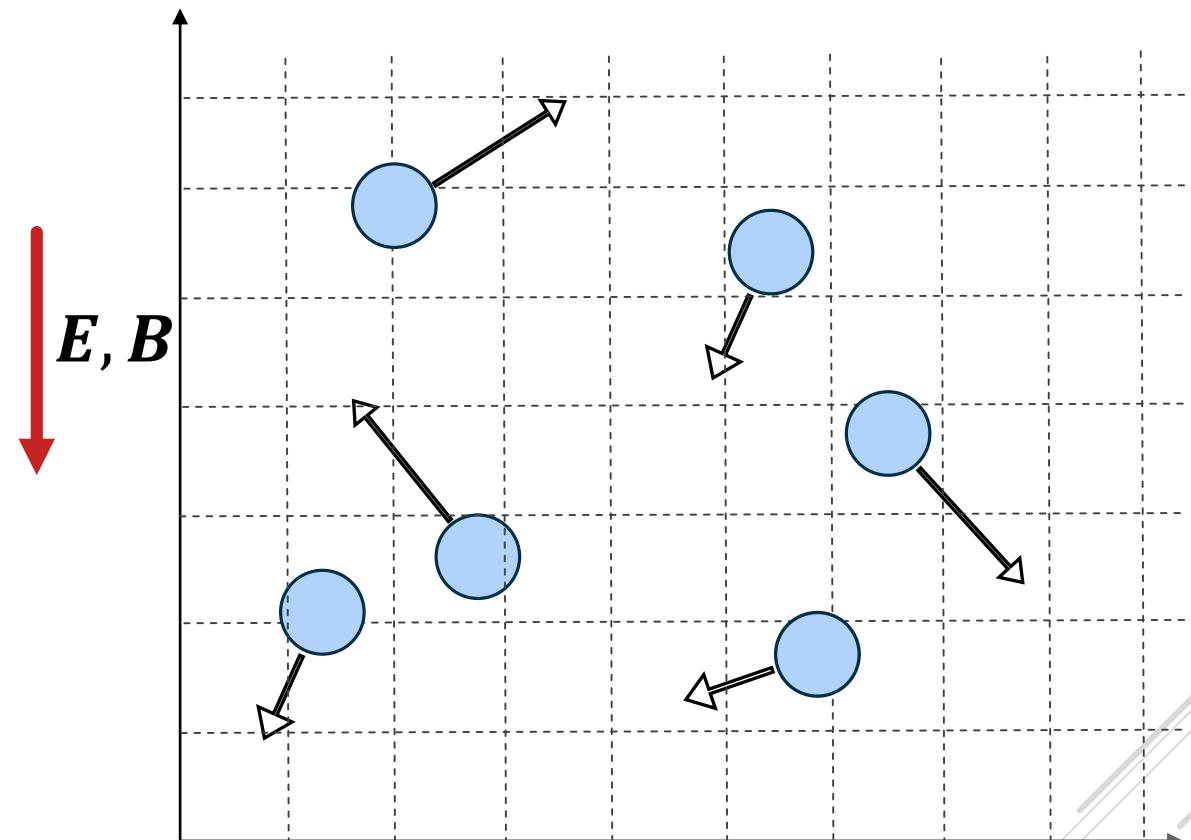
Objectif : la production  
d'ions métalliques

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

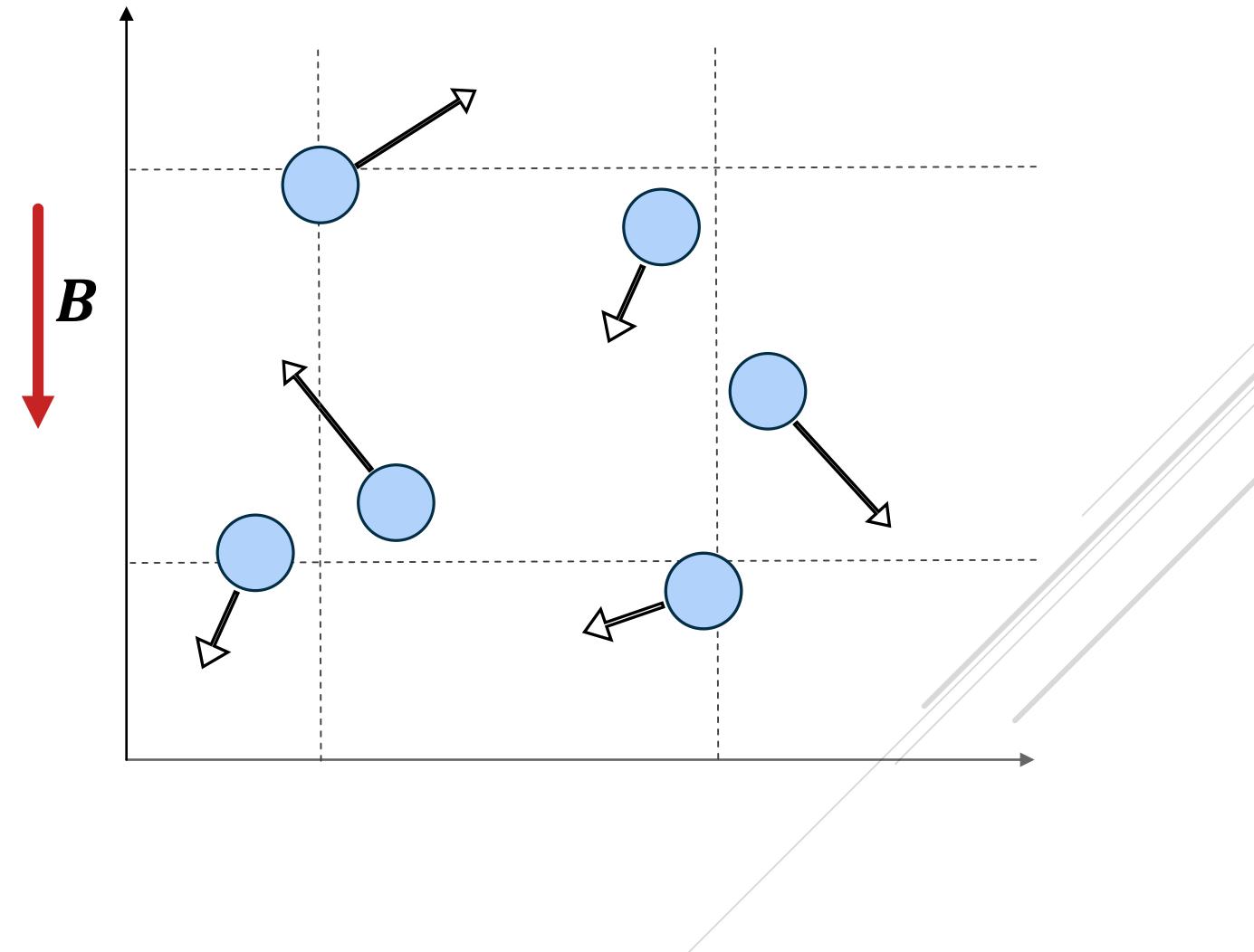
Energie des électrons constante

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

# Modélisation d'une source d'ions ECR

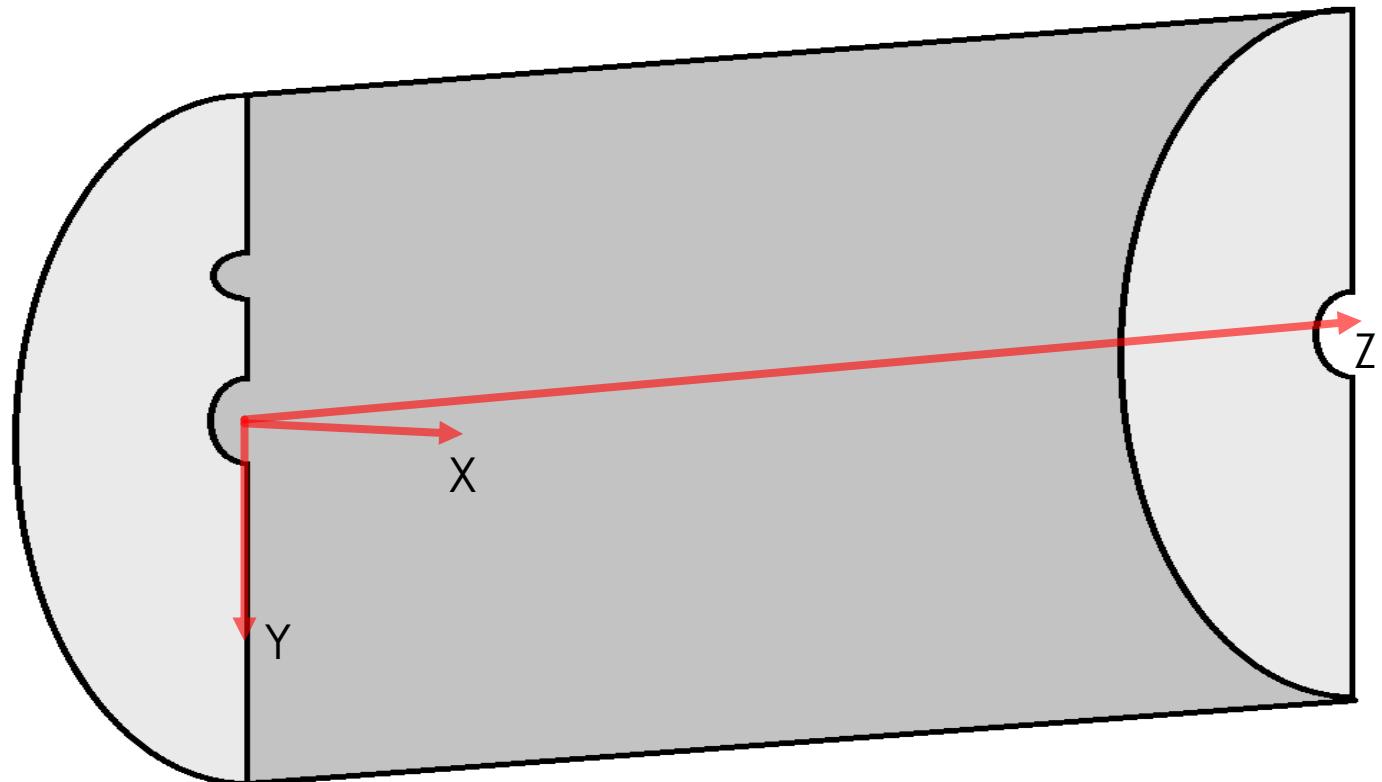
## Simulation pour PHOENIX V3

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

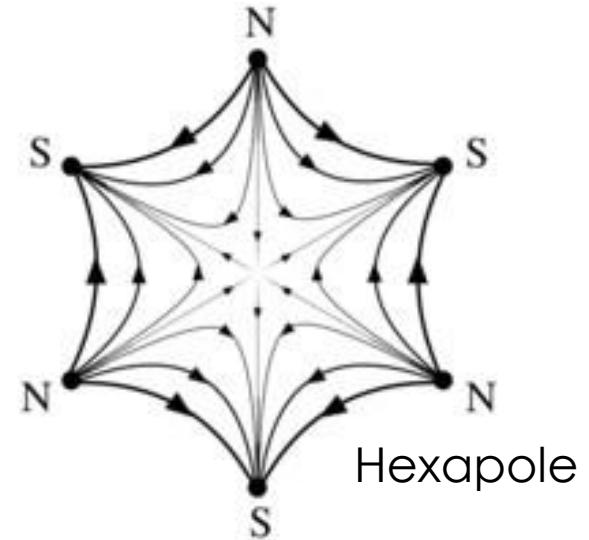


# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Symétrie de PHOENIX V3



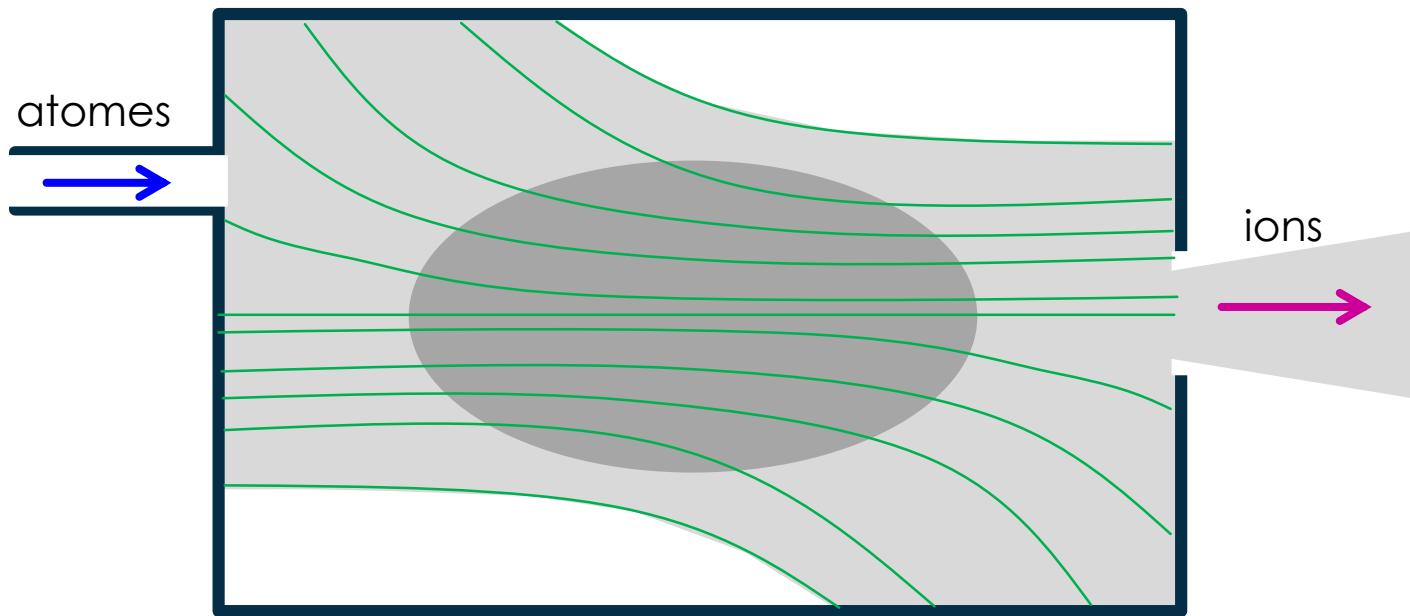
Simulation de la moitié de la source d'ions



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

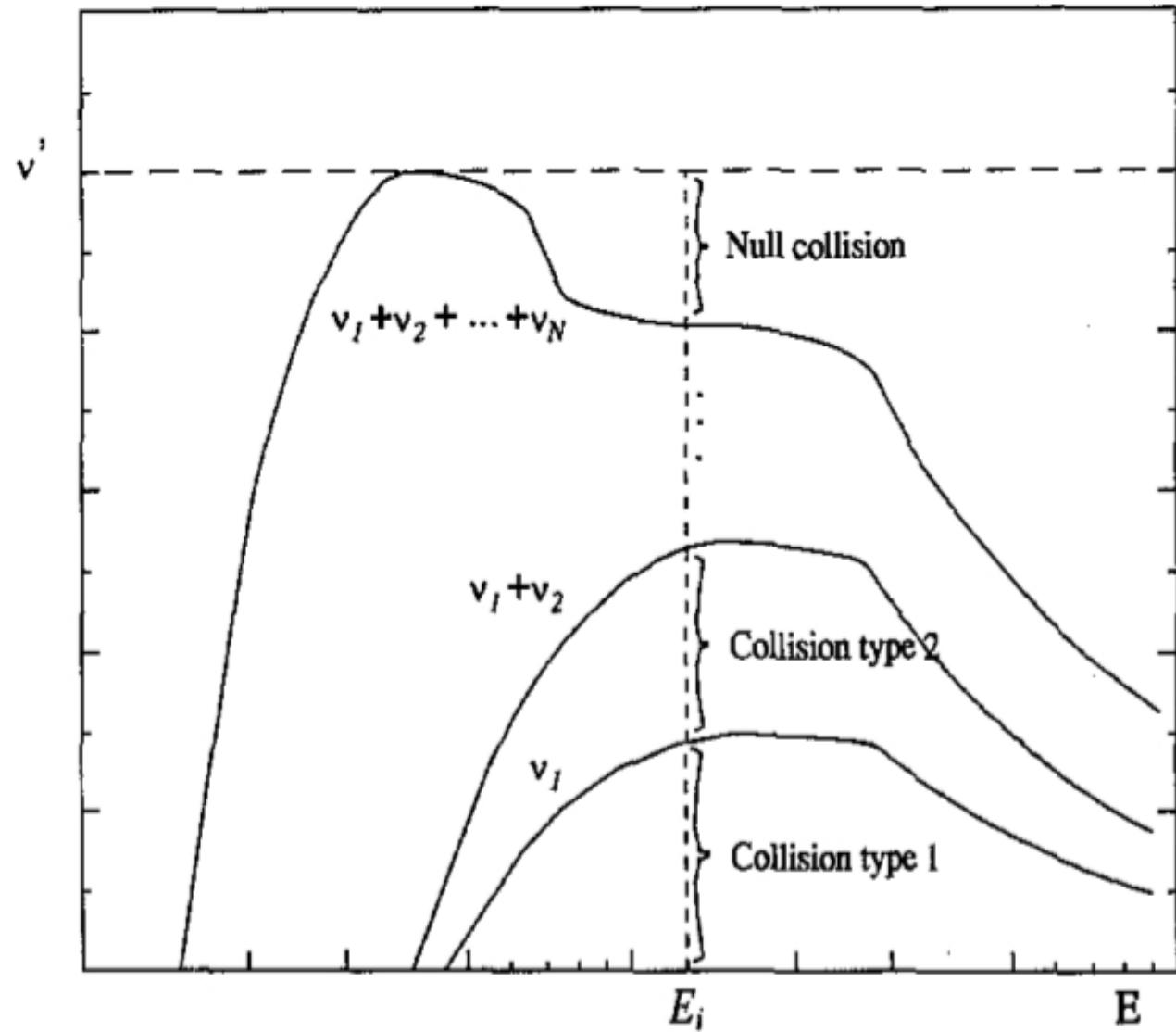
## Collisions

Théorie de la collisions nulle

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

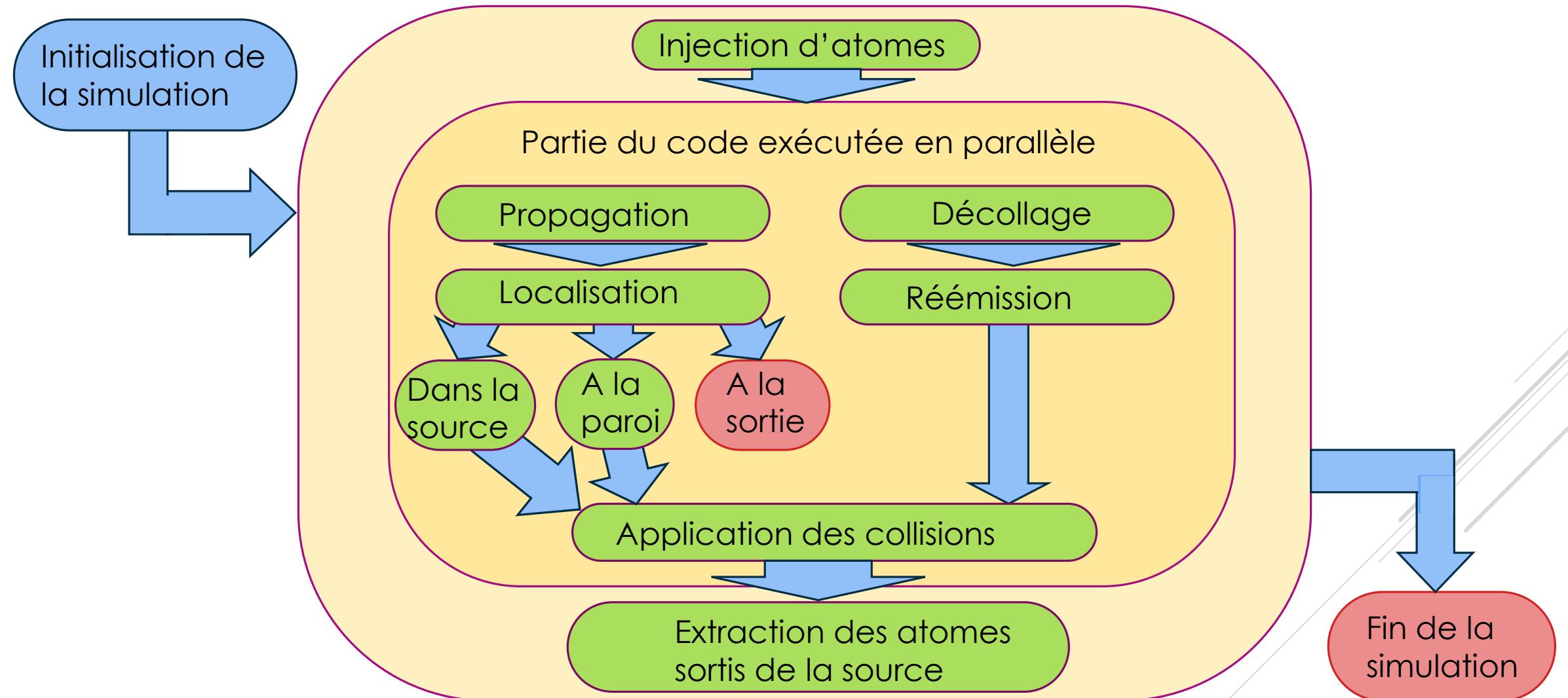
Collisions coulombiennes

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



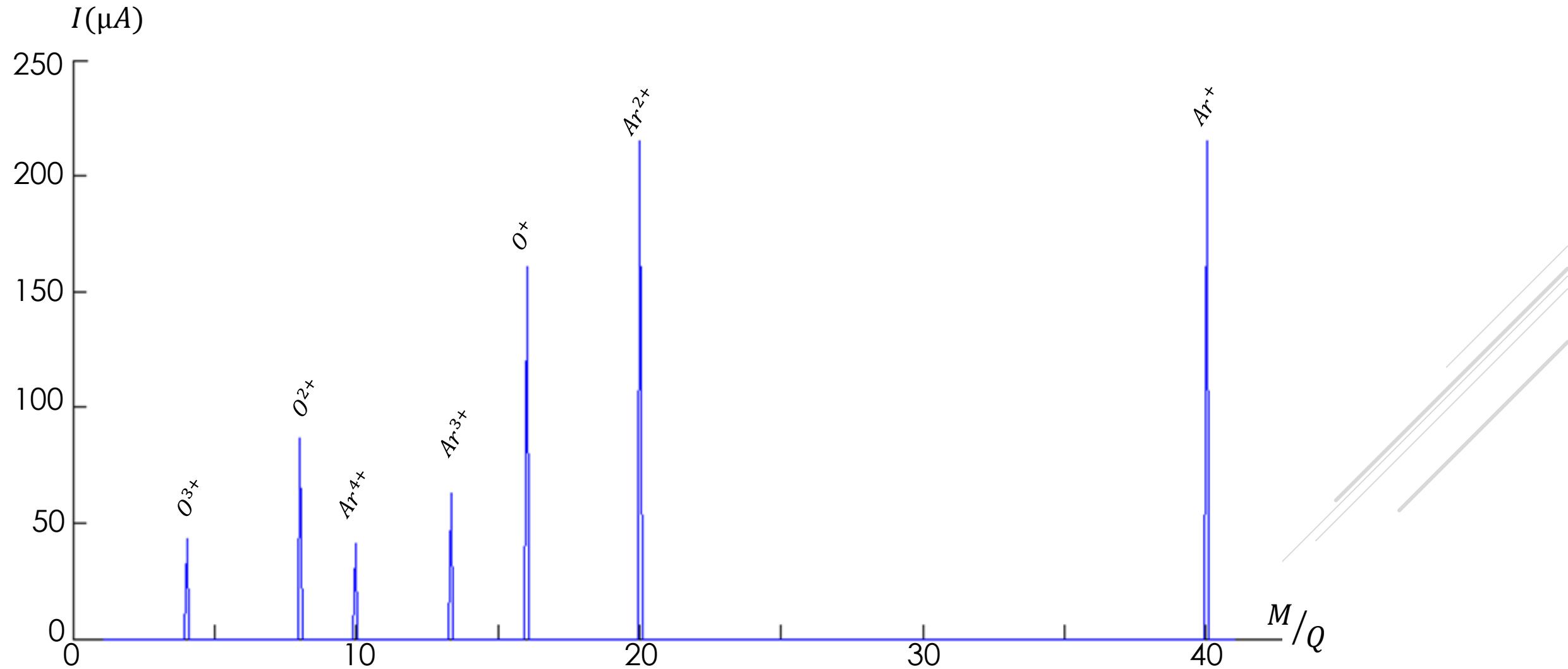
# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Organigramme du code



# Modélisation d'une source d'ions ECR

## Résultats



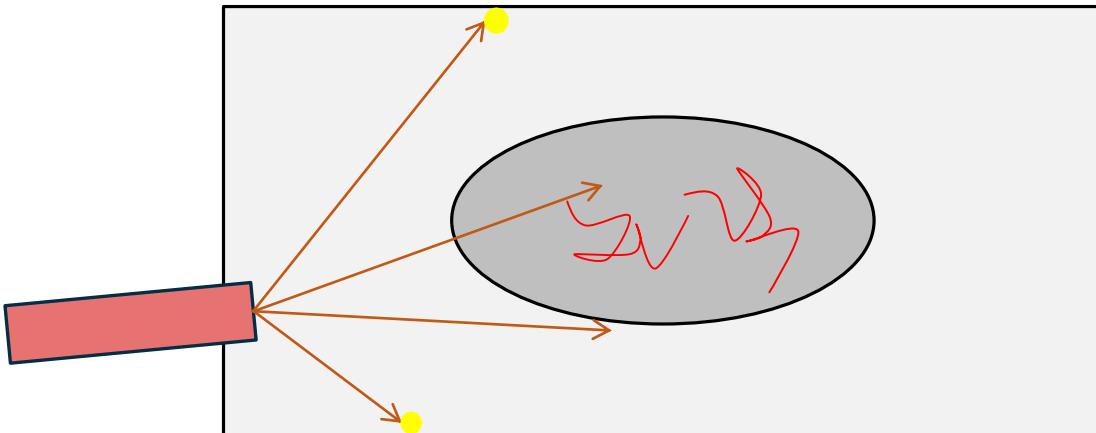
# Evaporation de métaux

## 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

$$P_{collage} = C_o$$

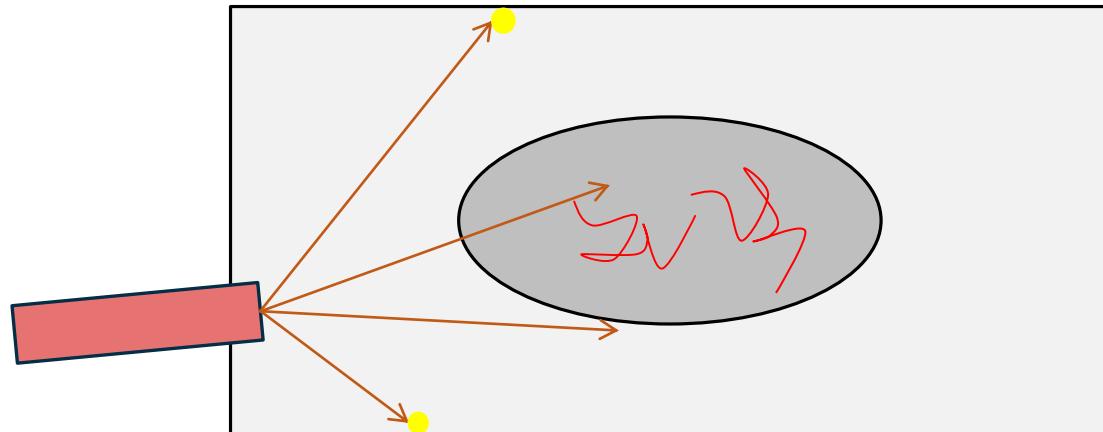
$C_o$  le coefficient de collage

Réémission des particules

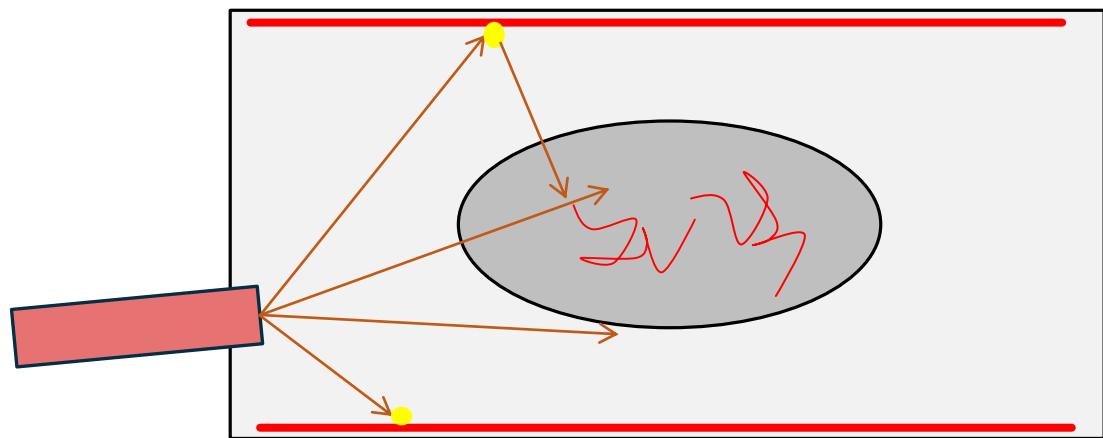
$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{E_d}{kT}\right)}$$

$\tau$  temps de collage moyen

$E_d$  énergie de liaison



Cylindre thermorégulé (liner)



Amélioration efficacité attendue

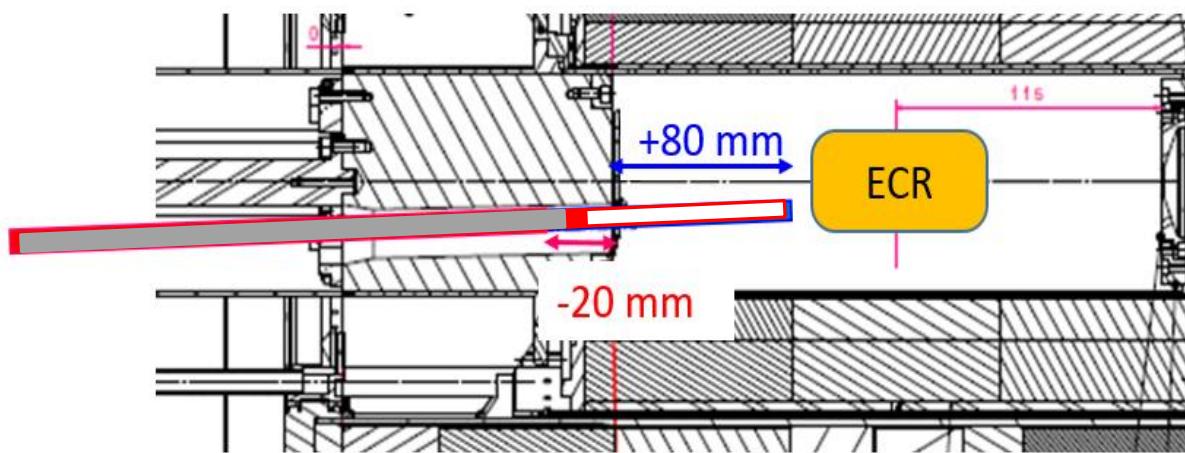
# Evaporation de métaux

## Évaporation de métaux: PHOENIX V3

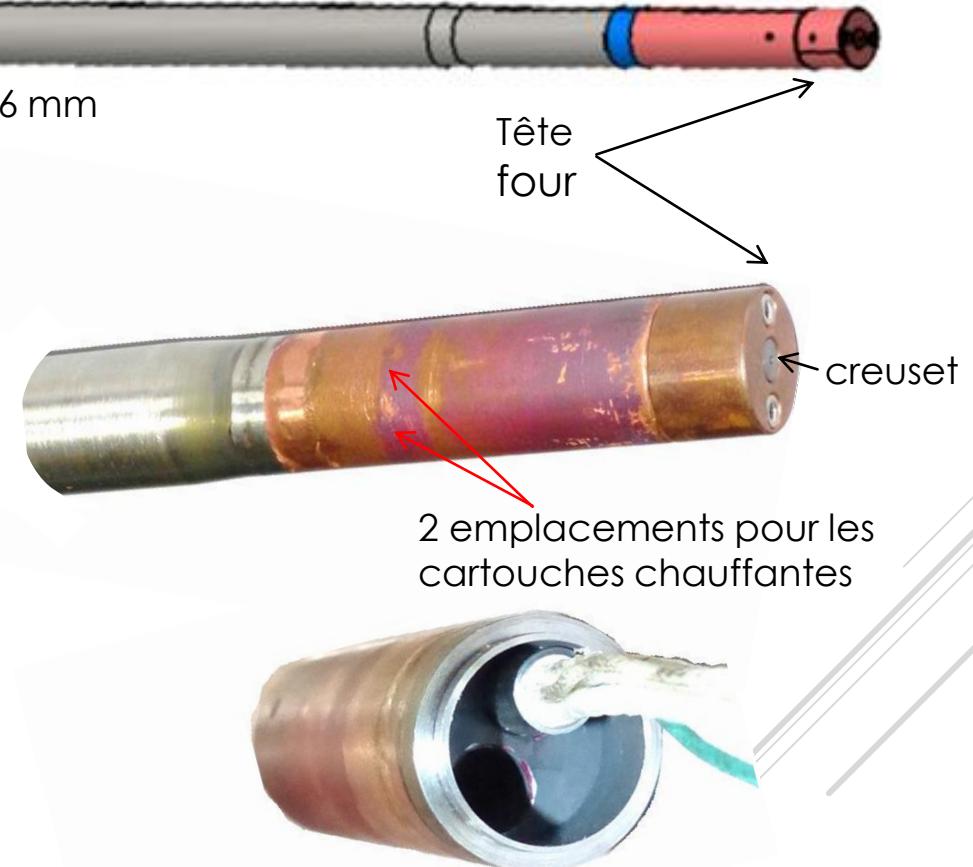


Évaporation des atomes métalliques  
dans un creuset

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

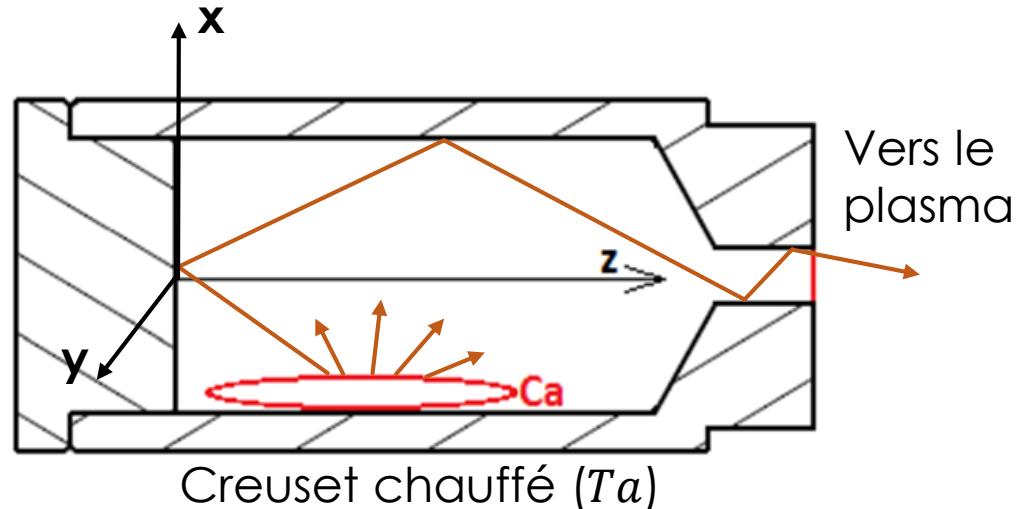


Simulation simple du creuset



# 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

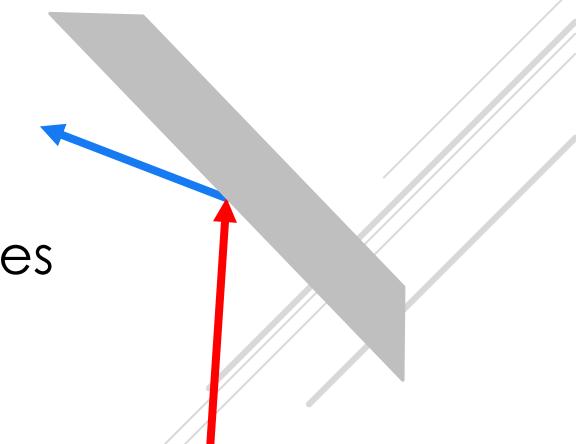
Collage des particules

$$P_{collage} = C_o$$

et décollage

Temps de collage

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



Thermalisation des particules

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

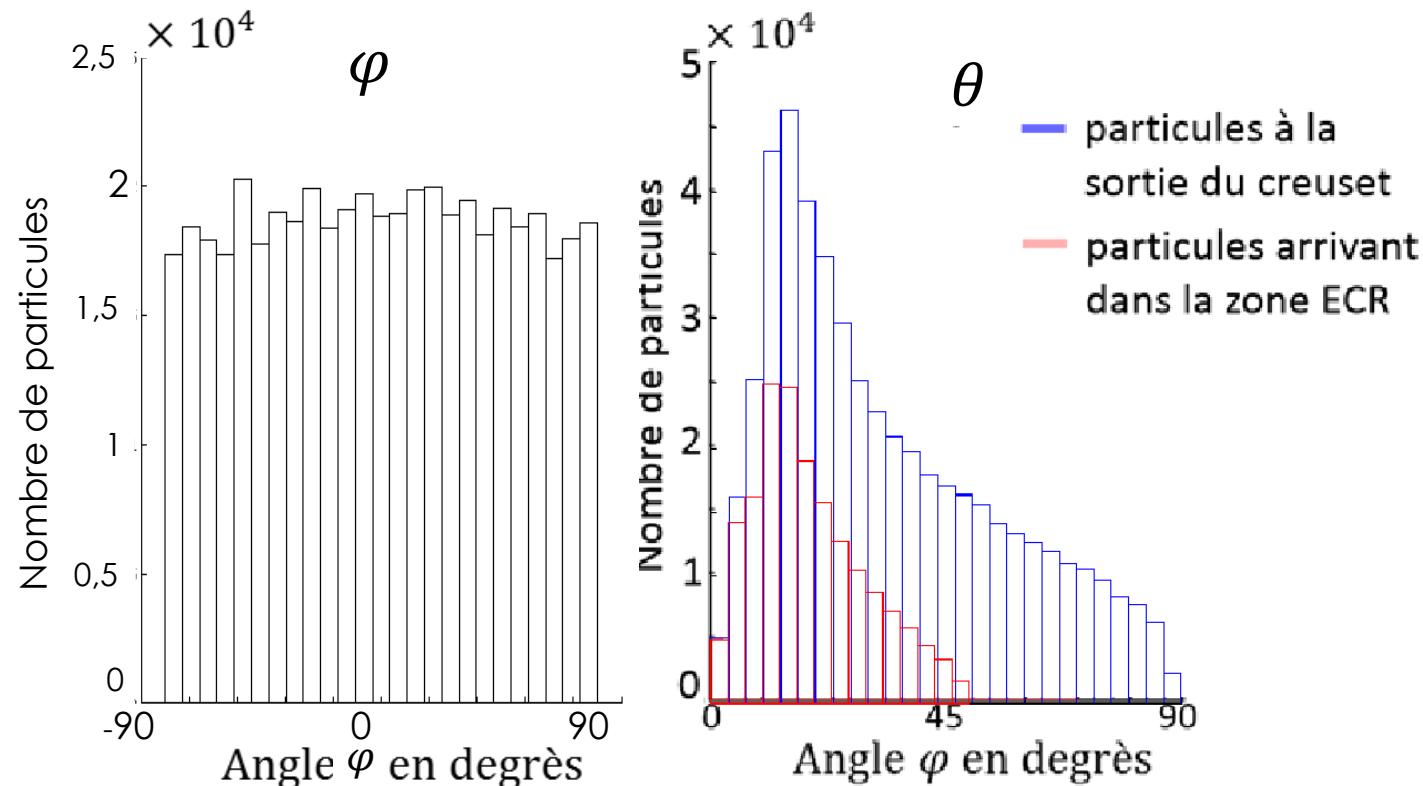
$\alpha$  coefficient d'accommodation  
thermique

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

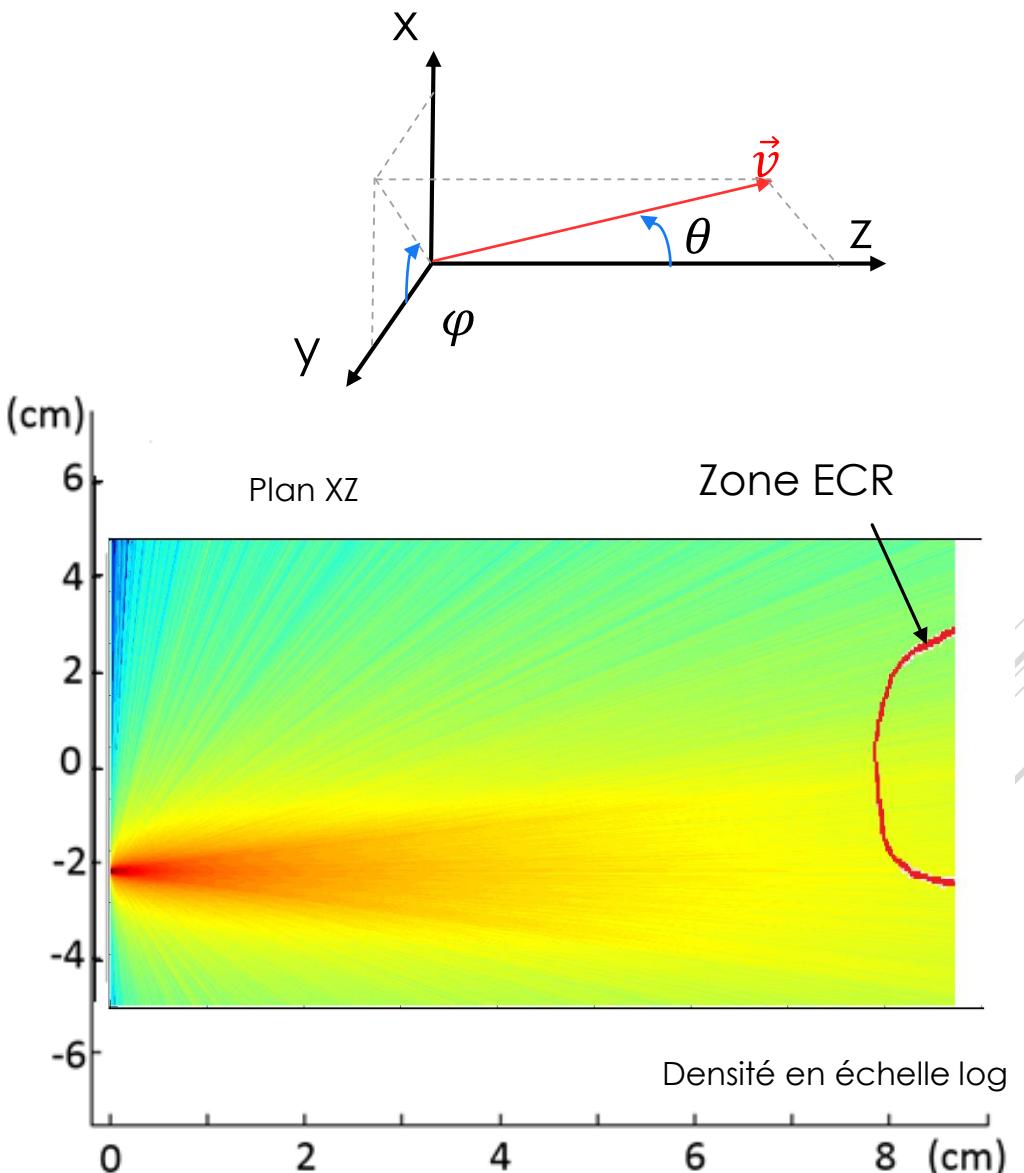
# Evaporation de métaux

## Simulation du four de Calcium

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

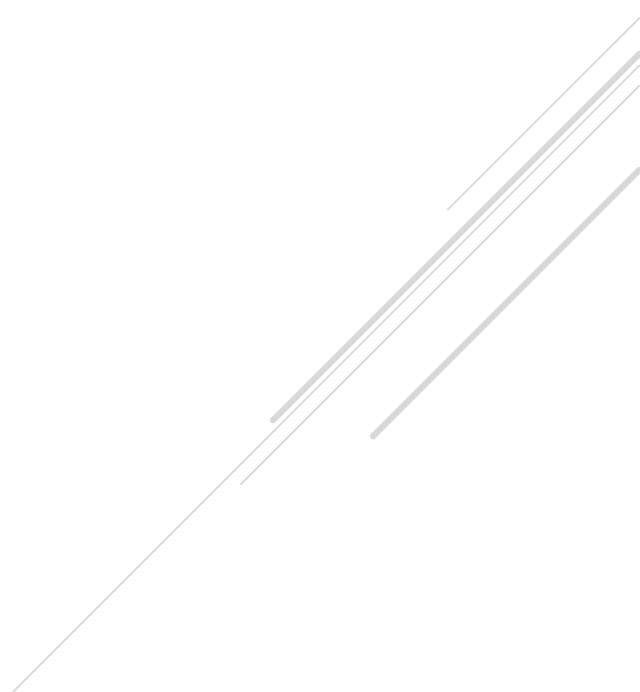
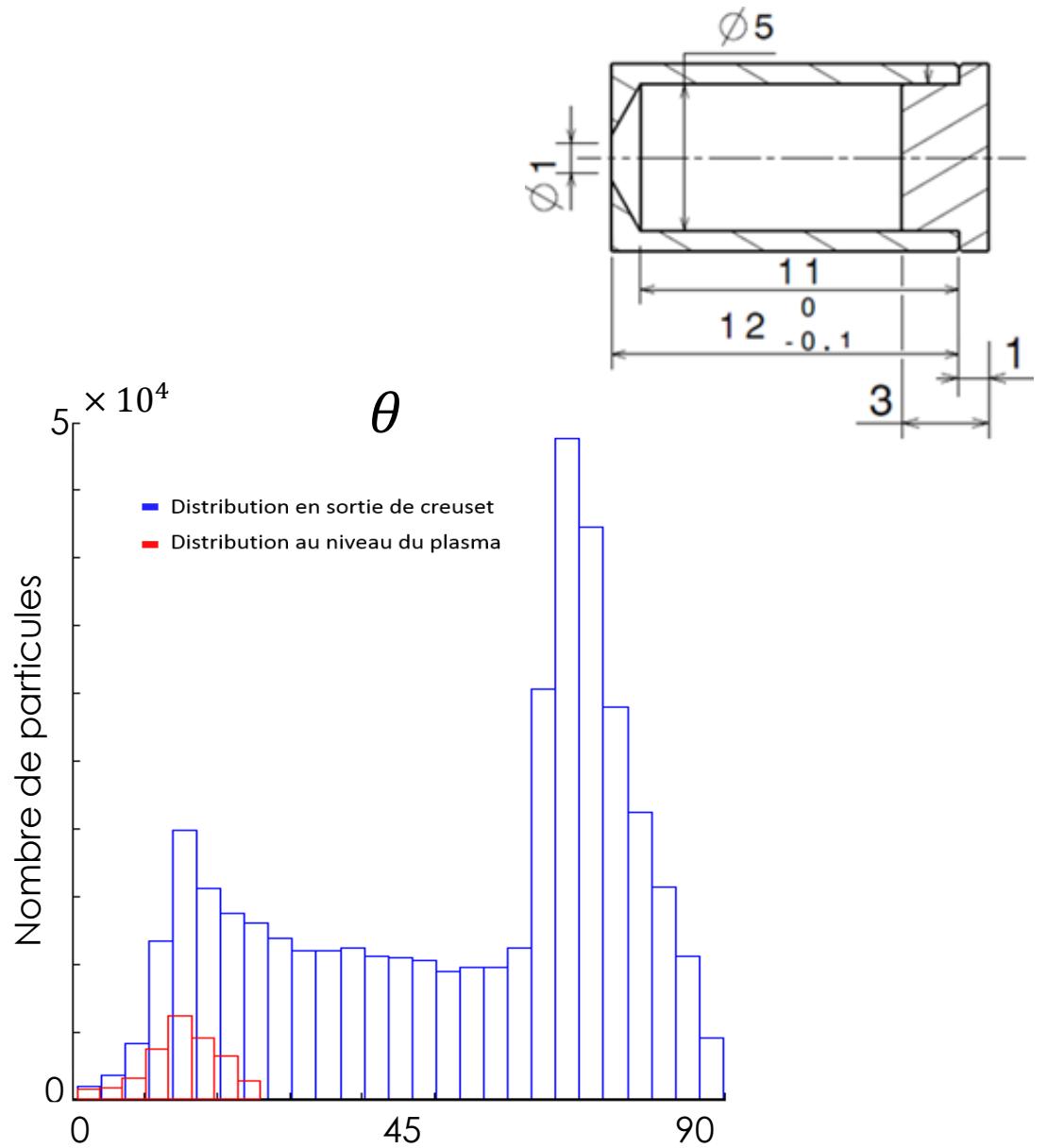


Liner pour la ré-évaporation d'atomes métalliques  
Distributions en entrée de la simulation de la source



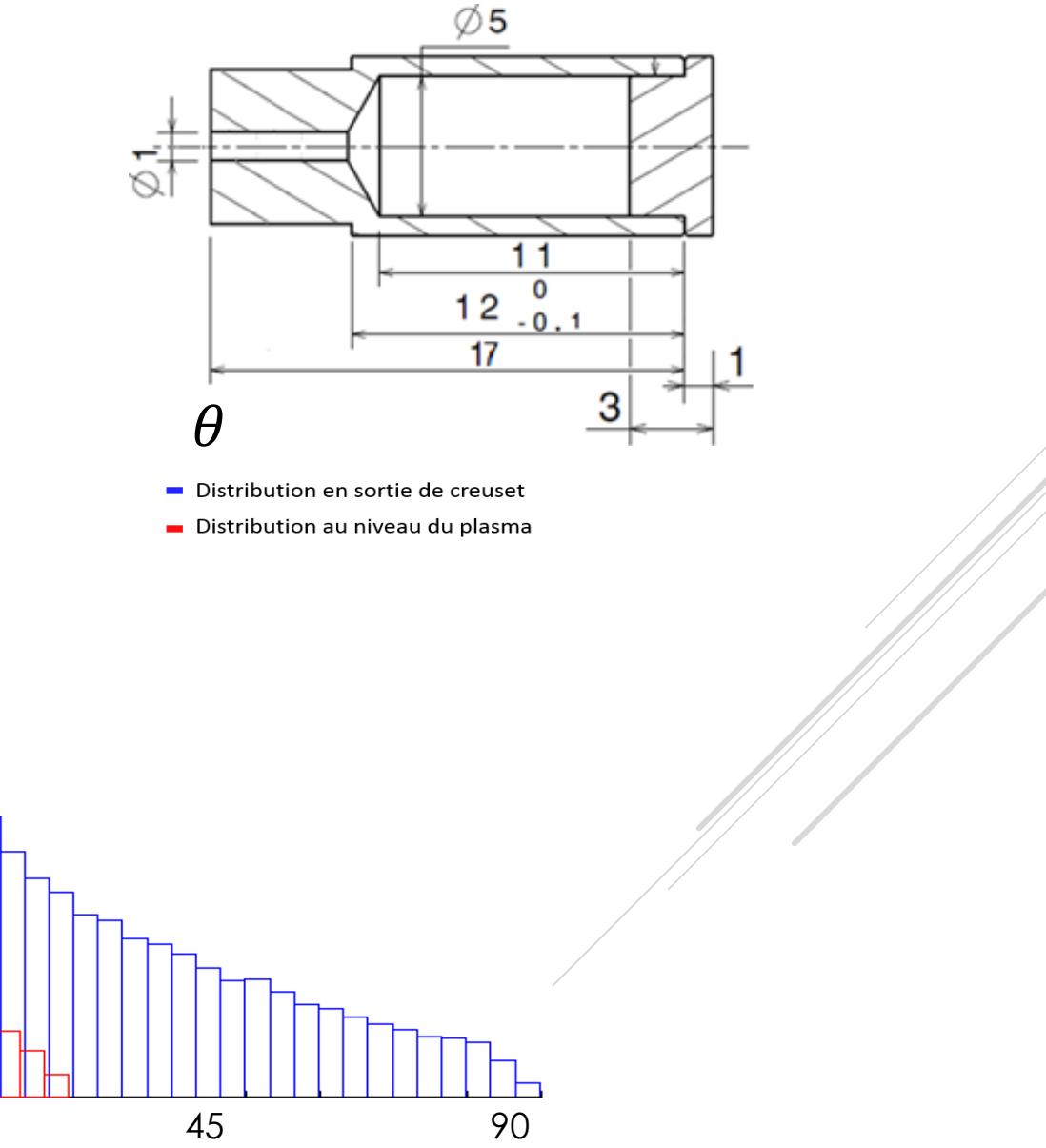
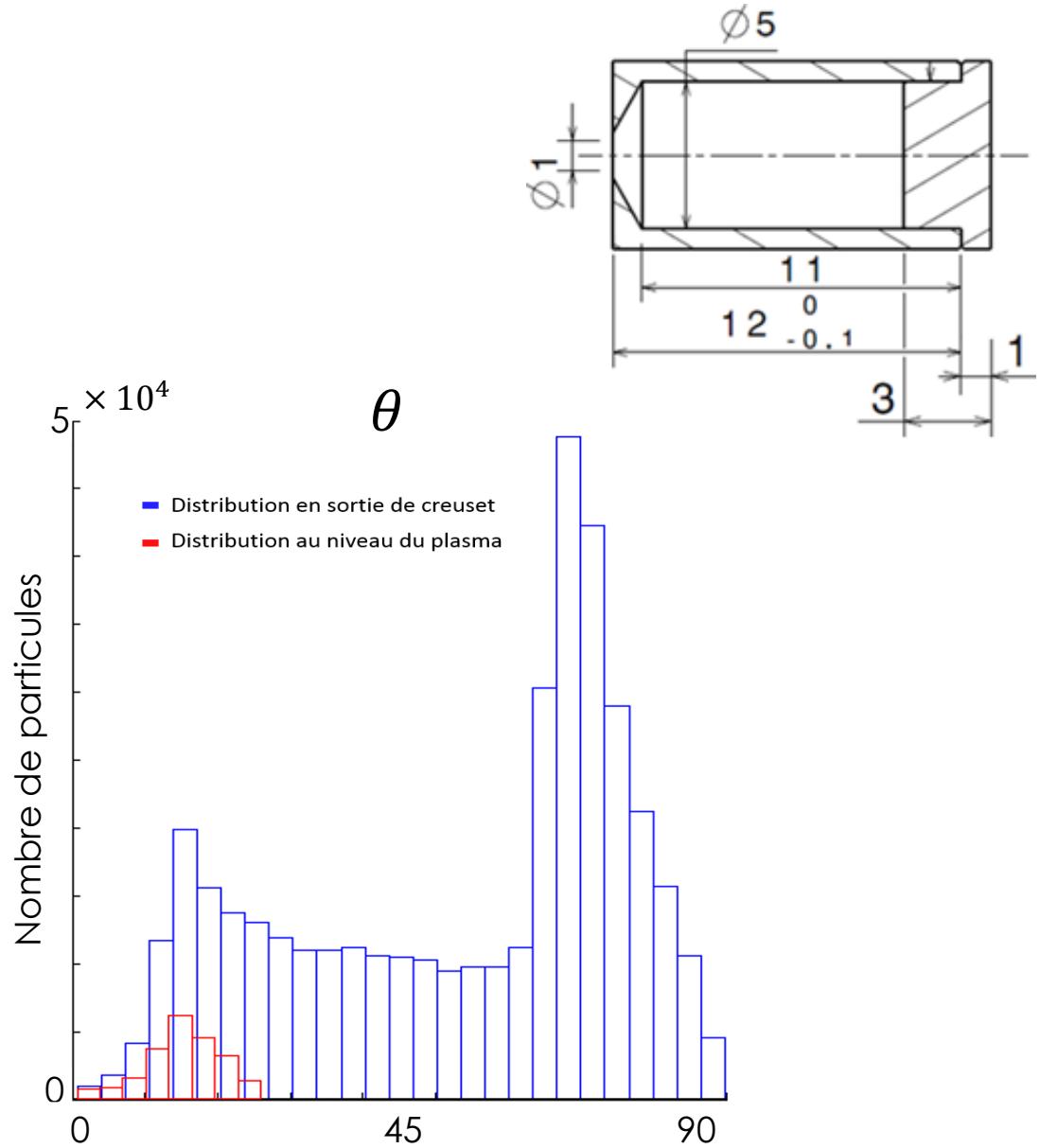
# Evaporation de métaux

## Simulation du four de Calcium



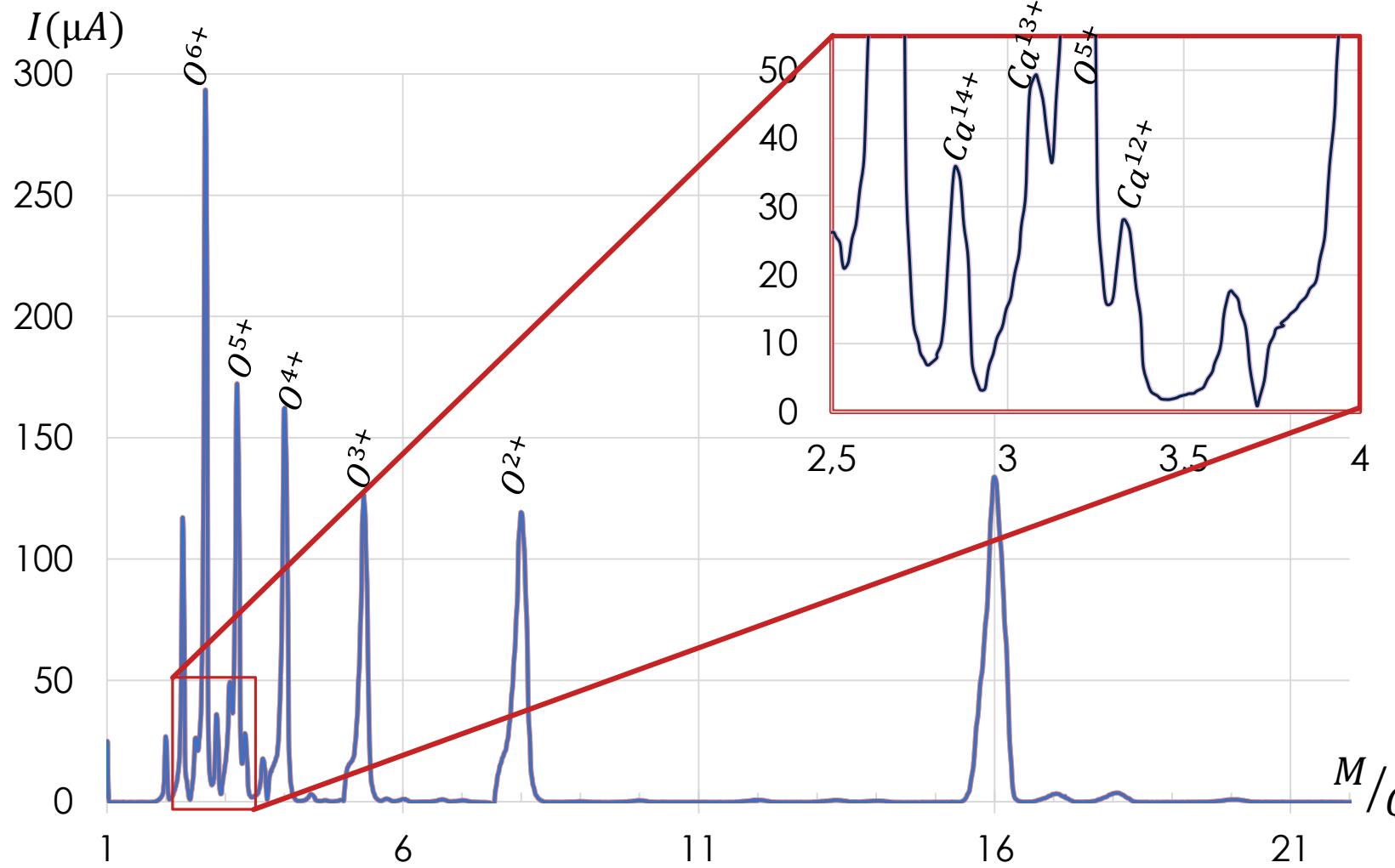
# Evaporation de métaux

## Simulation du four de Calcium



# Evaporation de métaux

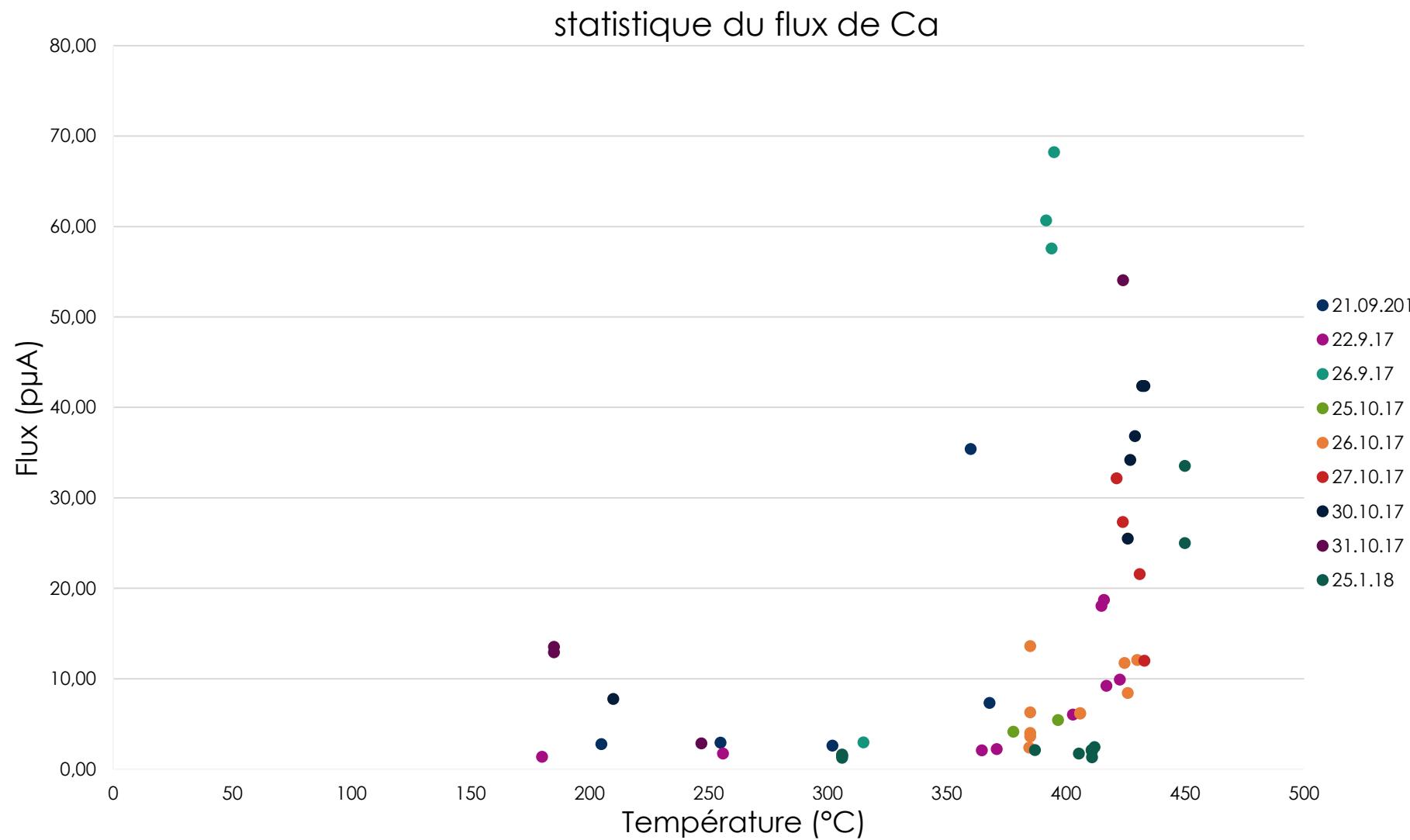
## Production Calcium



Fonctionnement du four  
Production d'ion  $M/A = 3$   
Fonctionnement de la source pour les atomes métalliques

# Evaporation de métaux

## Production Calcium



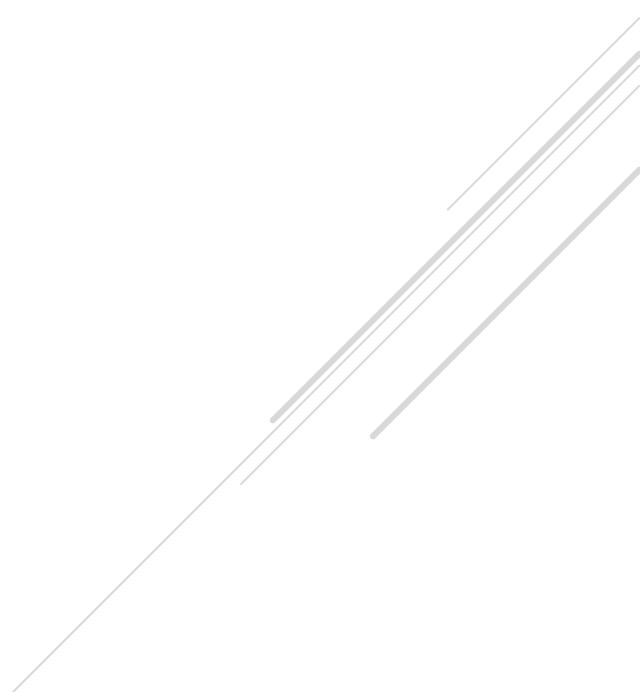
Rendement de 20%

Contrainte des paramètres de la simulation

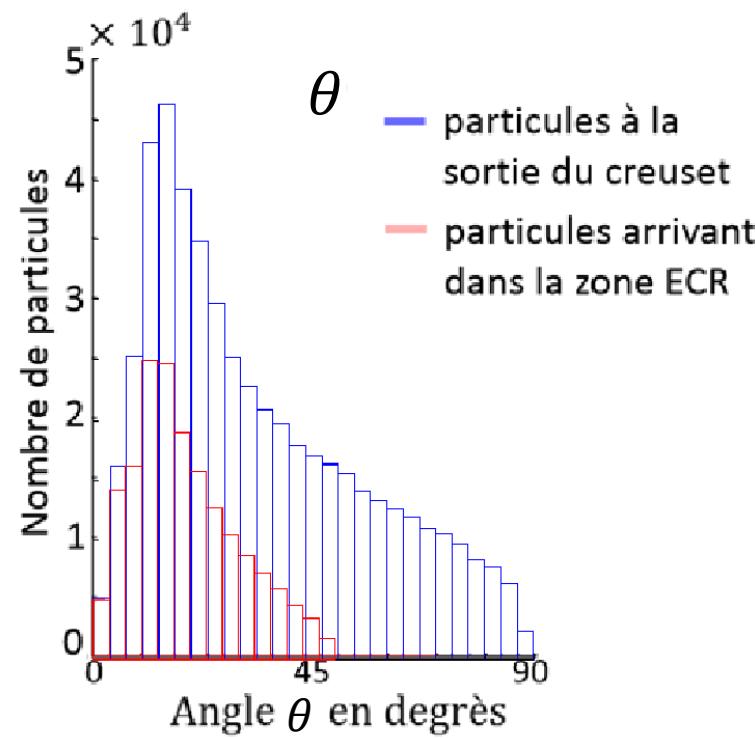
# Conclusion et Perspectives

- 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

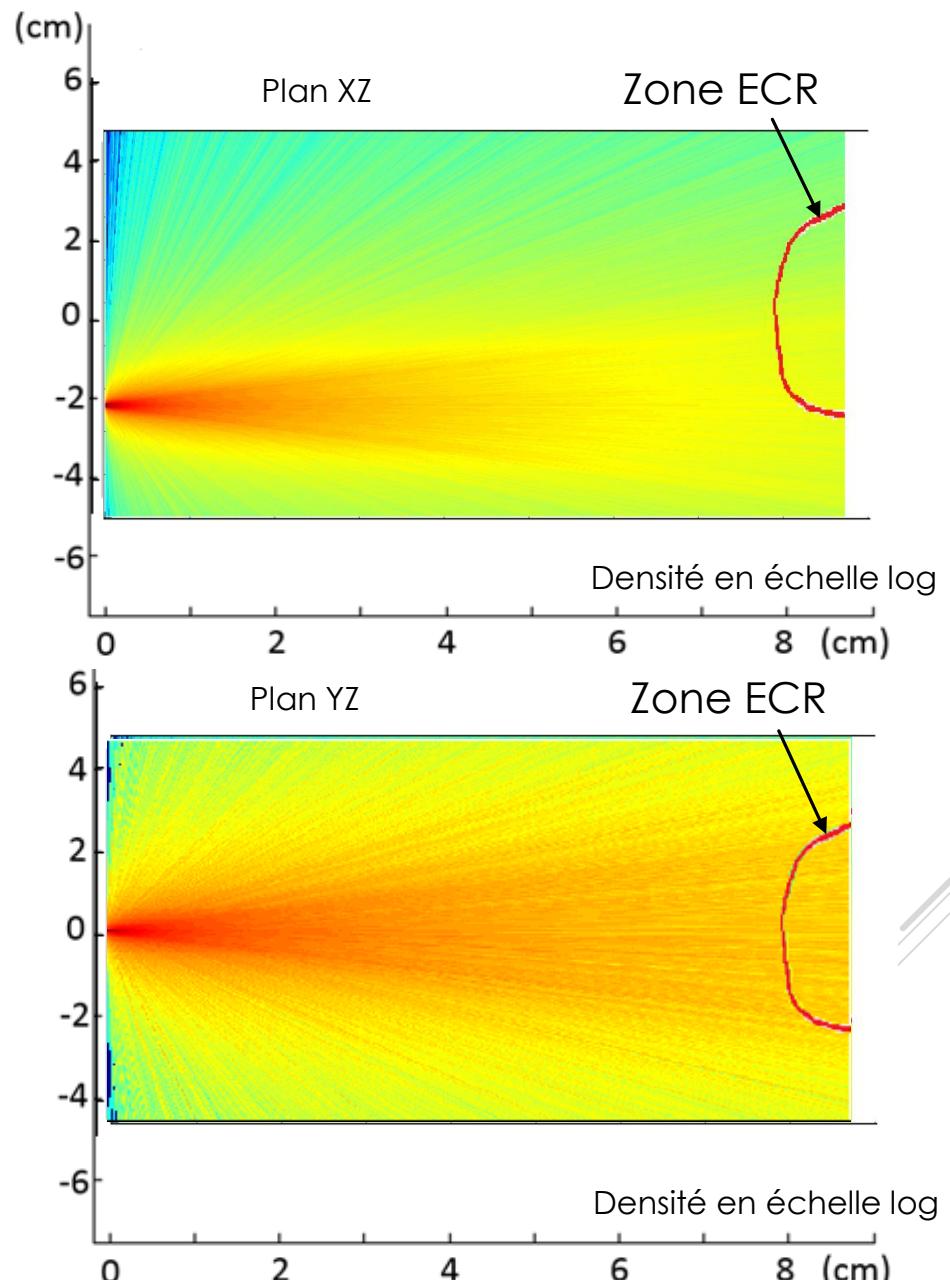
Merci pour votre attention



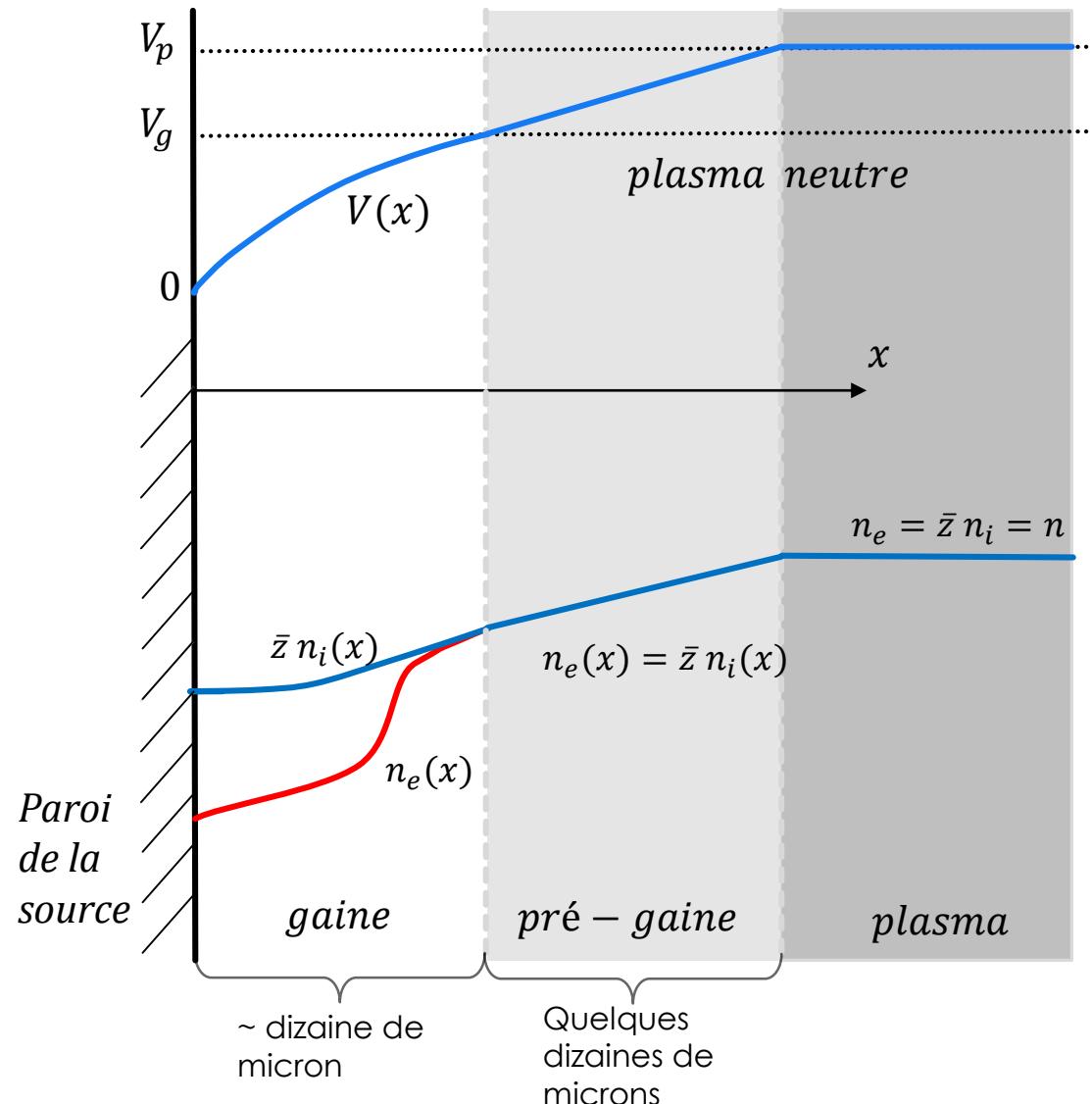
# DE LA SORTIE DU CREUSET À LA ZONE ECR



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



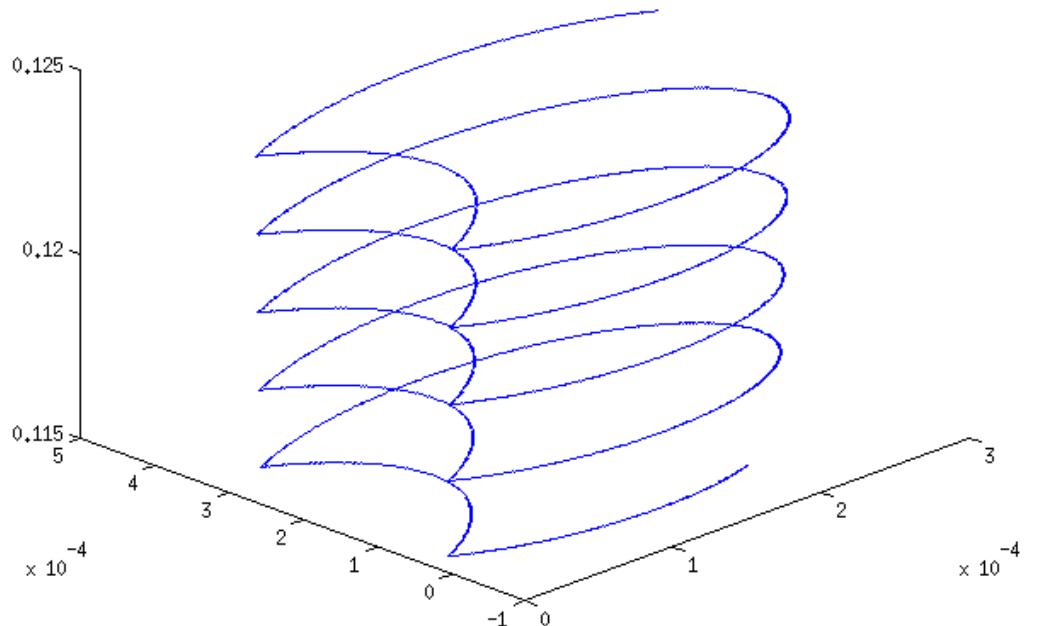
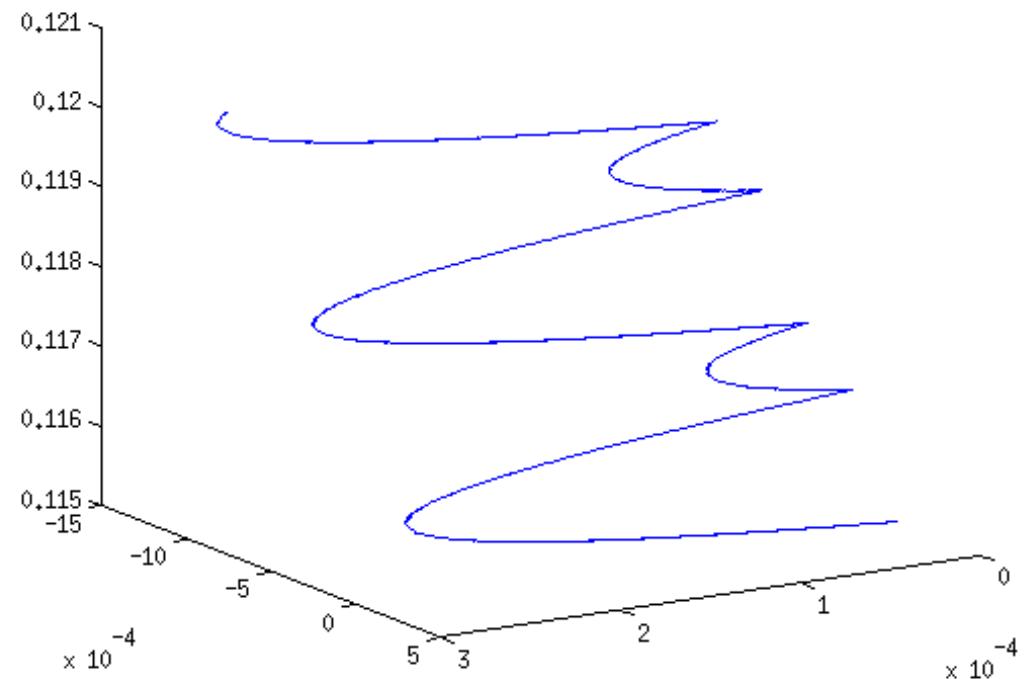
Densité plasma  $\sim 10^{12} / \text{cm}^3$

Champ magnétique jusqu'à 2 T

Plasma Hors équilibre thermodynamique

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

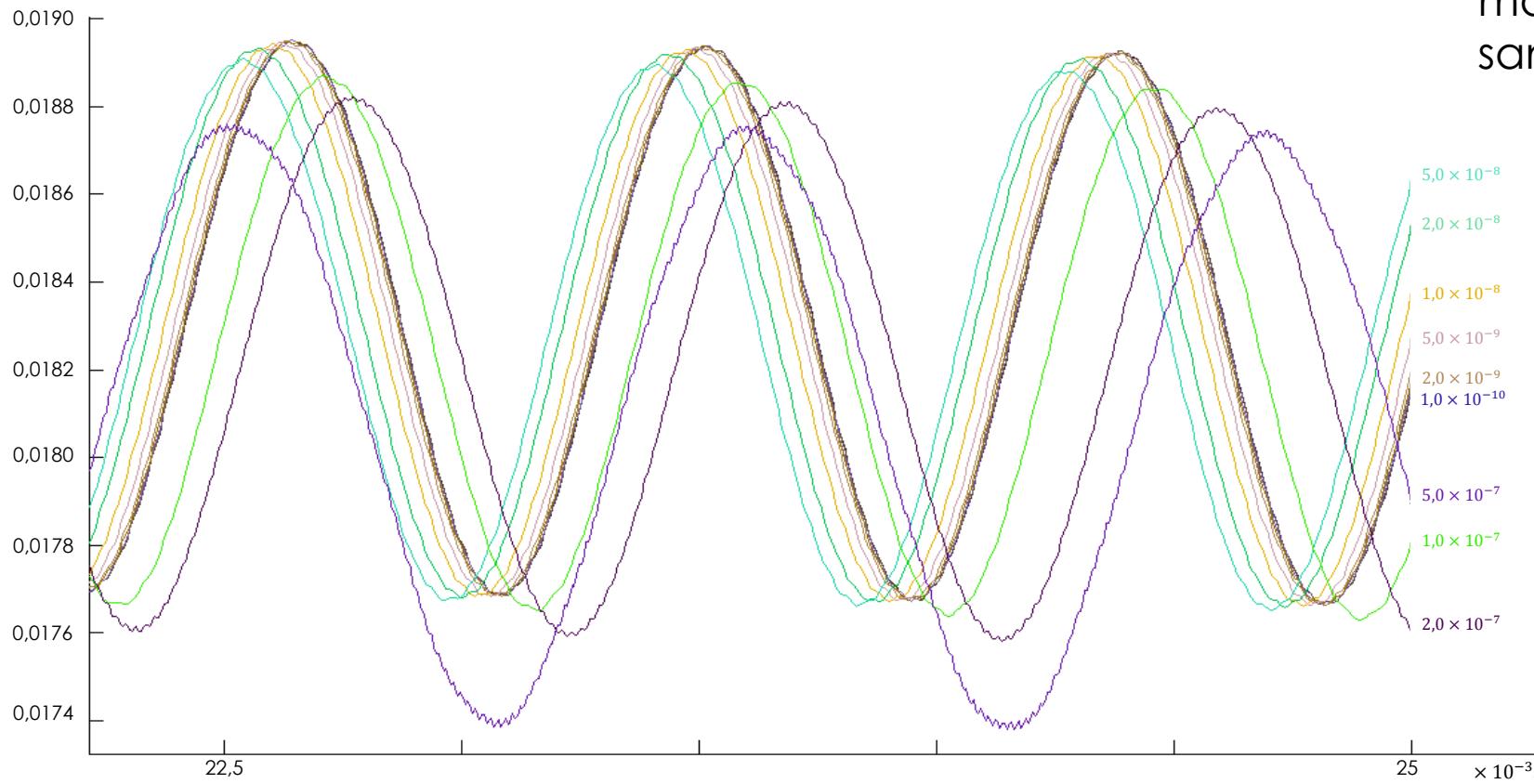
# PROPAGATION DE PARTICULE



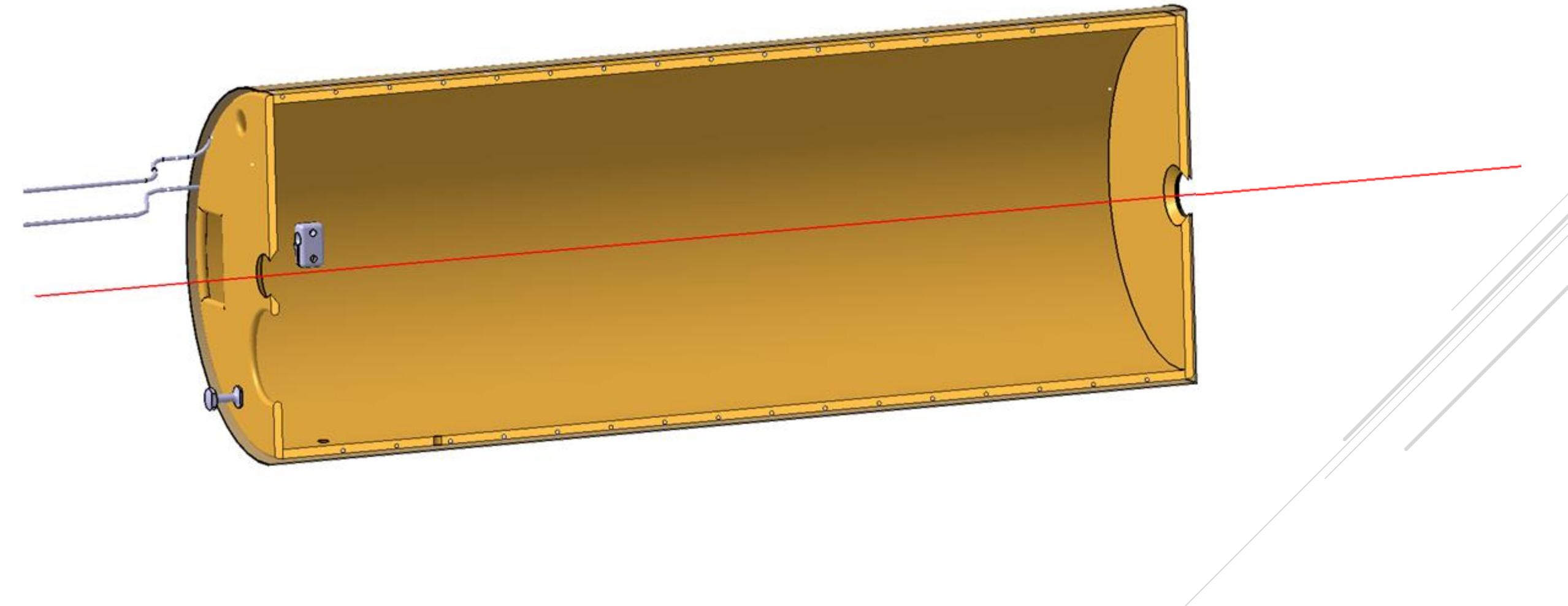
# CONVERGENCE DU PAS DE TEMPS

Simulation :

une seule particule chargée  
magnétiquement piégée  
sans collisions



# CYLINDRE THERMORÉGULÉ



# COEFFICIENT DE COLLAGE ET ENERGIE DE LIAISON

