

# ETUDE PAR LA SIMULATION ET L'EXPÉRIMENTATION DE L'ÉVAPORATION DES MÉTAUX DANS UNE SOURCE D'IONS ECR



Université de Caen  
Basse-Normandie

Présentation aux Journées accélérateurs  
de la Société Française de Physique  
Roscoff, 3 – 6 Octobre 2017



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

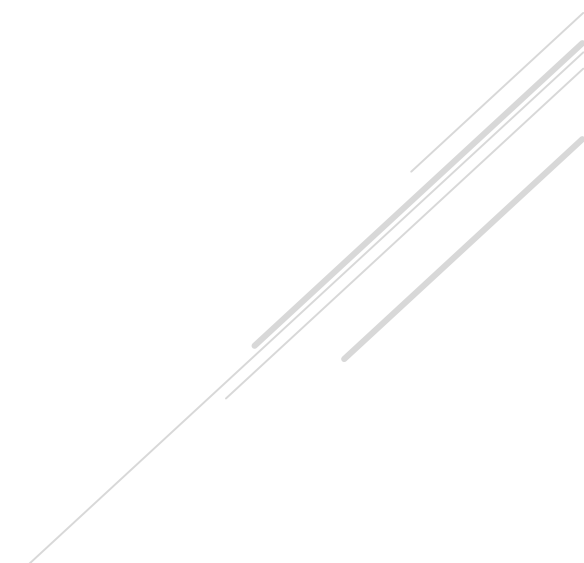
Motivation de la thèse

Principe d'une source ECR

Modélisation d'une source d'ions ECR

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  $\sim 10\%$

Objectifs :

Viser 20% à 60% de rendement

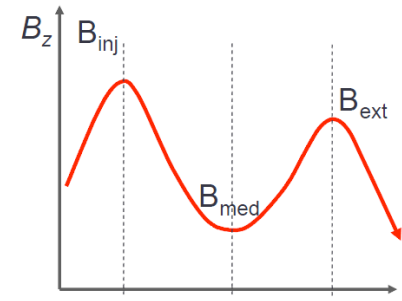
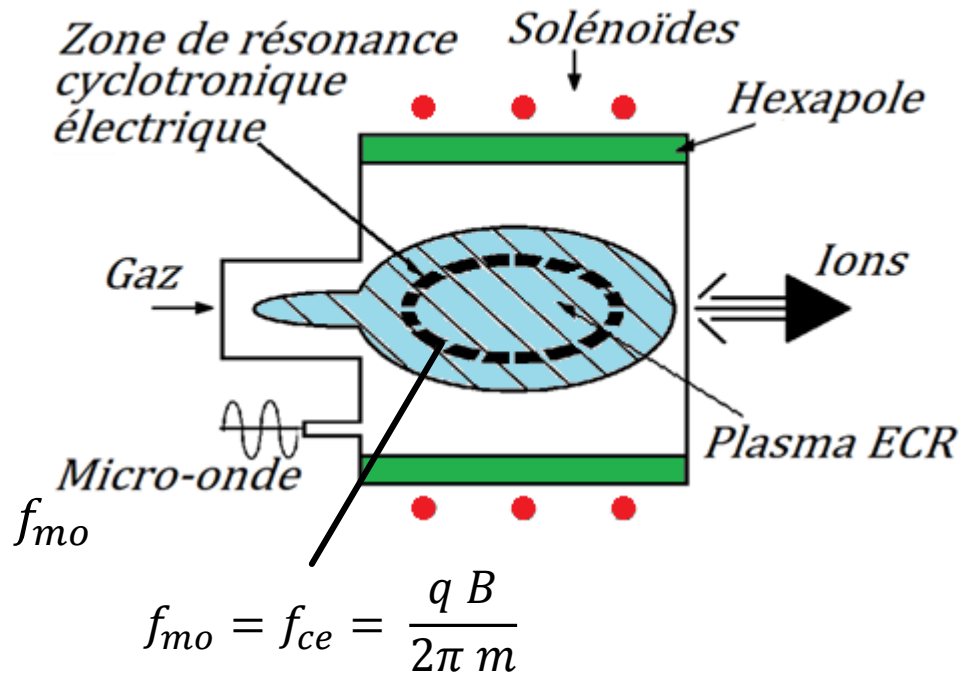
Etude de la dynamique de production des ions dans le plasma ECR

Etude de la ré-évaporation des atomes métalliques sur une paroi chauffée thermorégulée

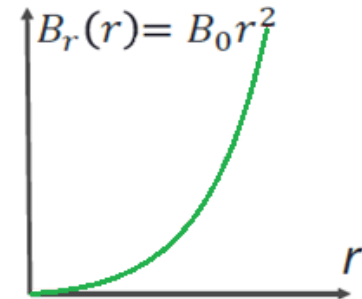


# PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Formation du plasma



Champ magnétique axial

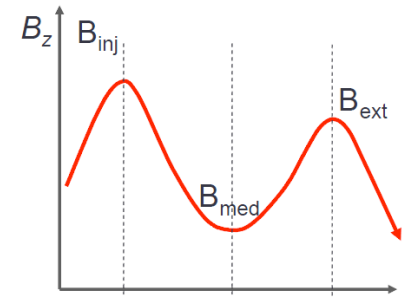
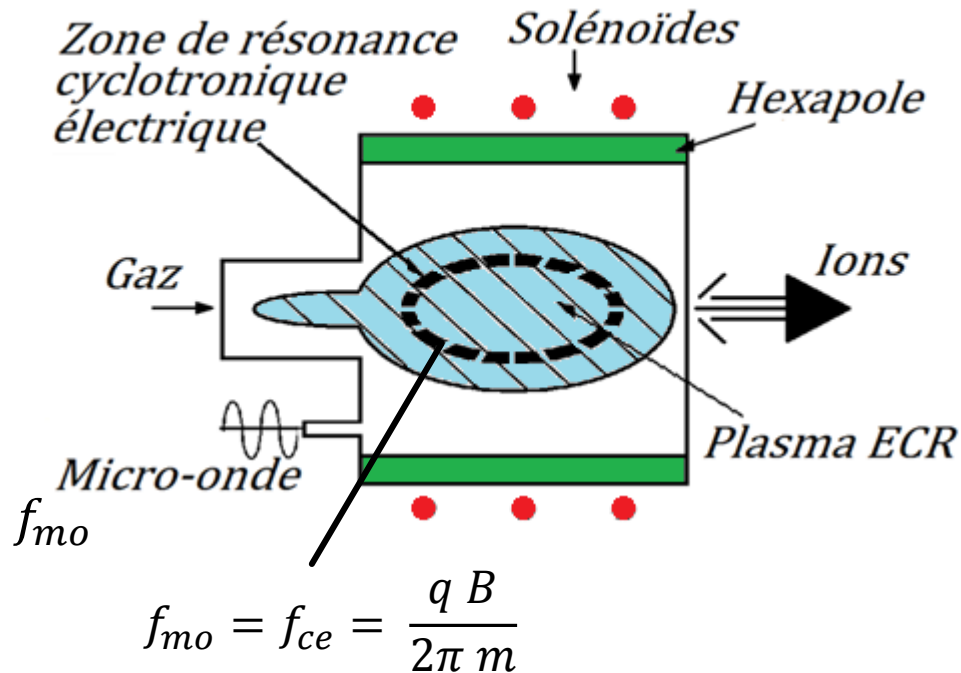


Champ magnétique radial

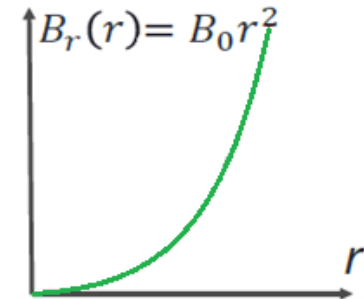
confinement magnétique par effet miroir  
multiples aller-retour des électrons

# PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Formation du plasma



Champ magnétique axial



Champ magnétique radial

Création : Impact électronique



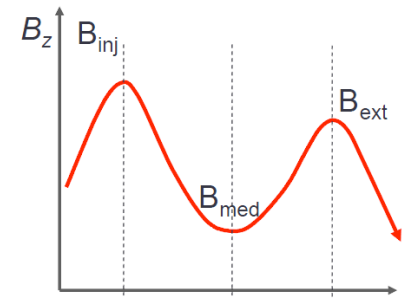
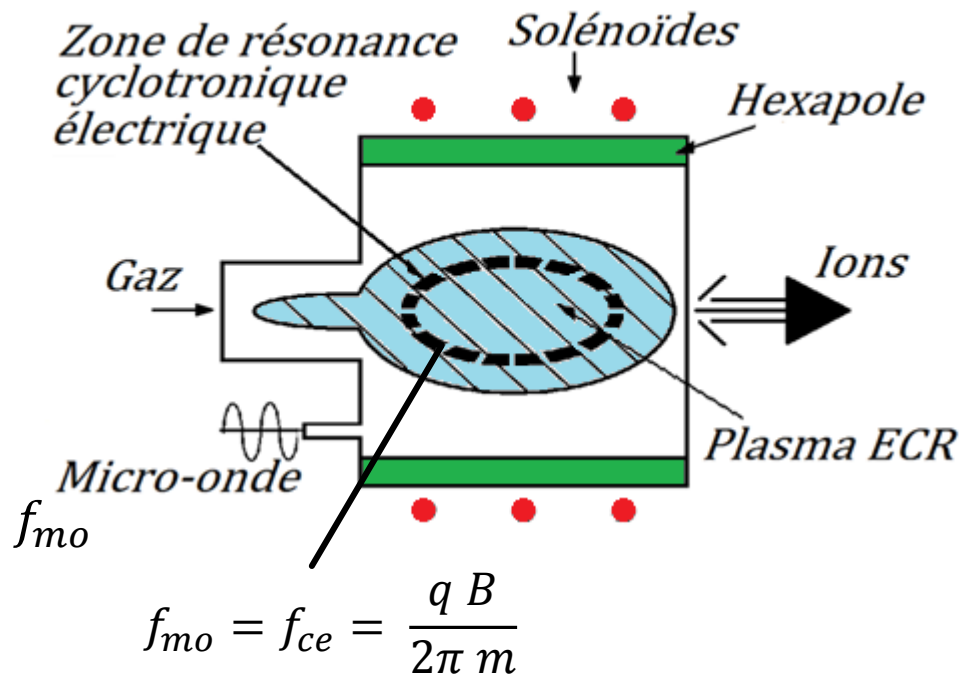
Destruction : Echange de charge



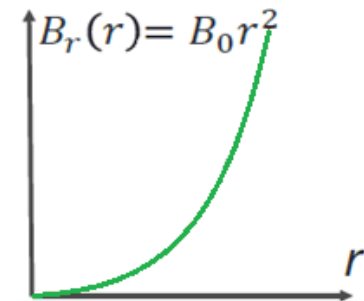
confinement magnétique par effet miroir  
multiples aller-retour des électrons  
multi-ionisation des ions

# PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Formation du plasma



Champ magnétique axial



Champ magnétique radial

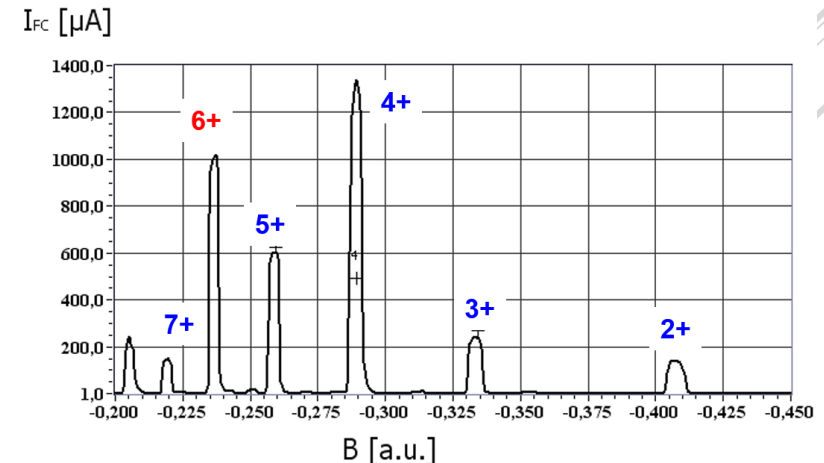
Création : Impact électronique



Destruction : Echange de charge



confinement magnétique par effet miroir  
multiples aller-retour des électrons  
multi-ionisation des ions  
différents états de charges



# PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Caractéristiques du plasma

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

Champ magnétique jusqu'à 2 T

Température

Plasma Hors équilibre thermodynamique

Temps à simuler de  
l'ordre de la milliseconde

Longueur de Debye

Temps caractéristique

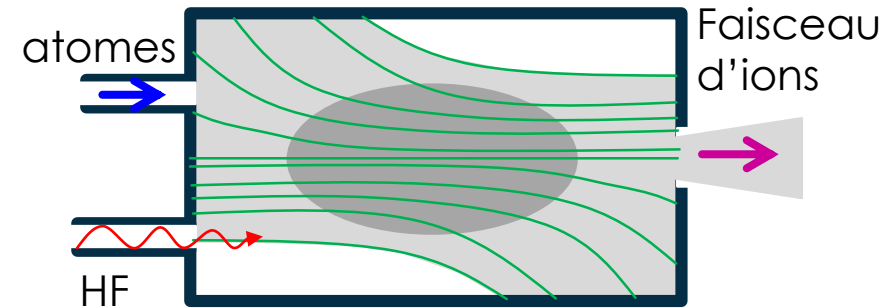
électrons  
 $T_e \sim 1 \text{ keV}$

ions  
 $T_i \sim 1 \text{ eV}$

électrons  
 $\lambda_D = \sim 10^{-8} \text{ m}$   
 $T = \sim 10^{-12} \text{ s}$

ions  
 $\lambda_D = \sim 10^{-8} \text{ m}$   
 $T = \sim 10^{-8} \text{ s}$

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

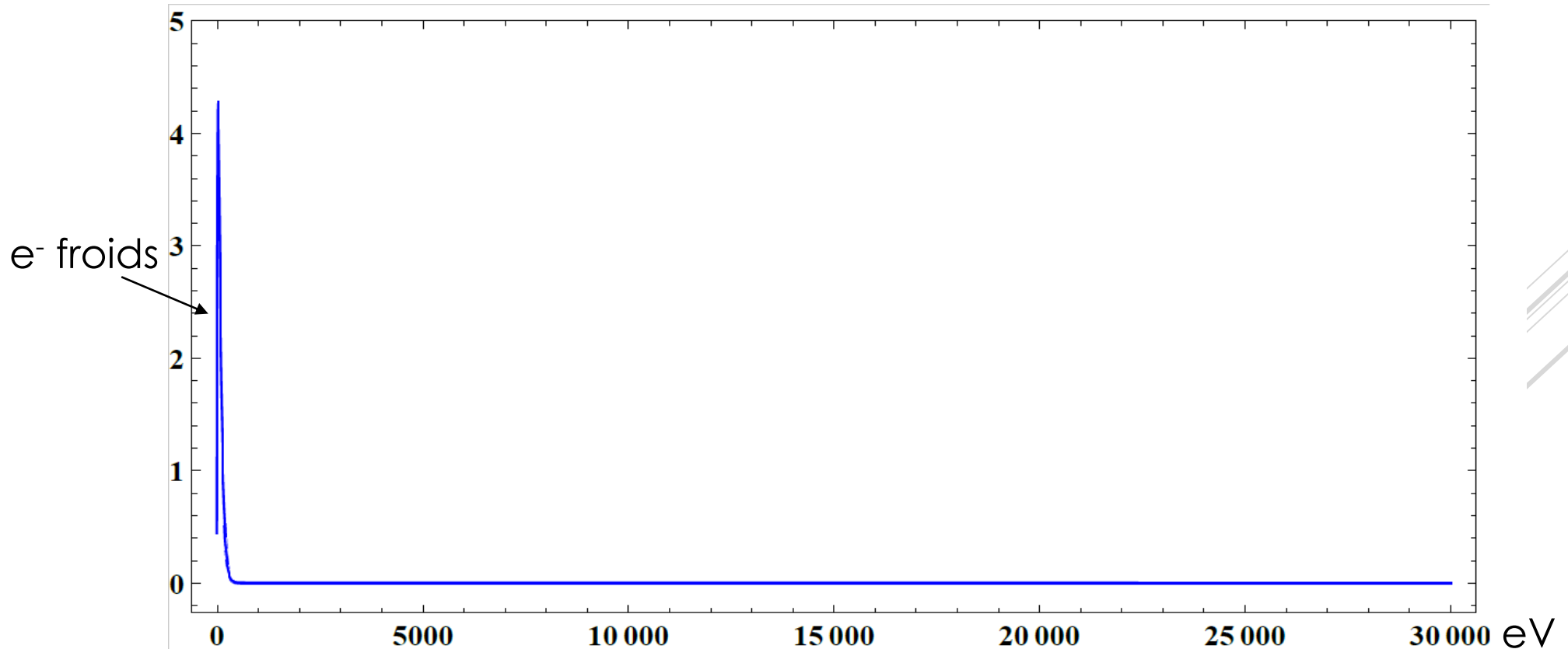


# **PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR**

## **Fonction de distribution en énergie des électrons**

3 composantes qualitatives :

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





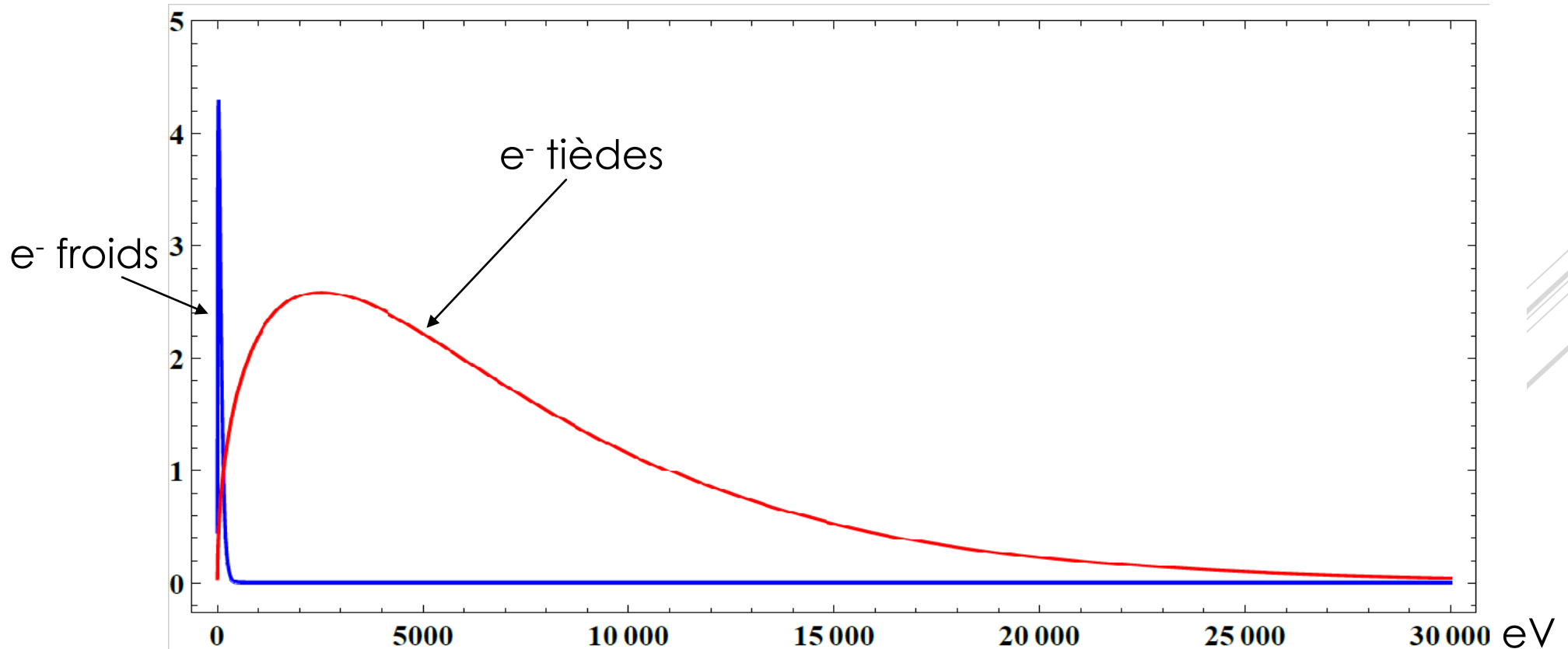
# PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Fonction de distribution en énergie des électrons

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

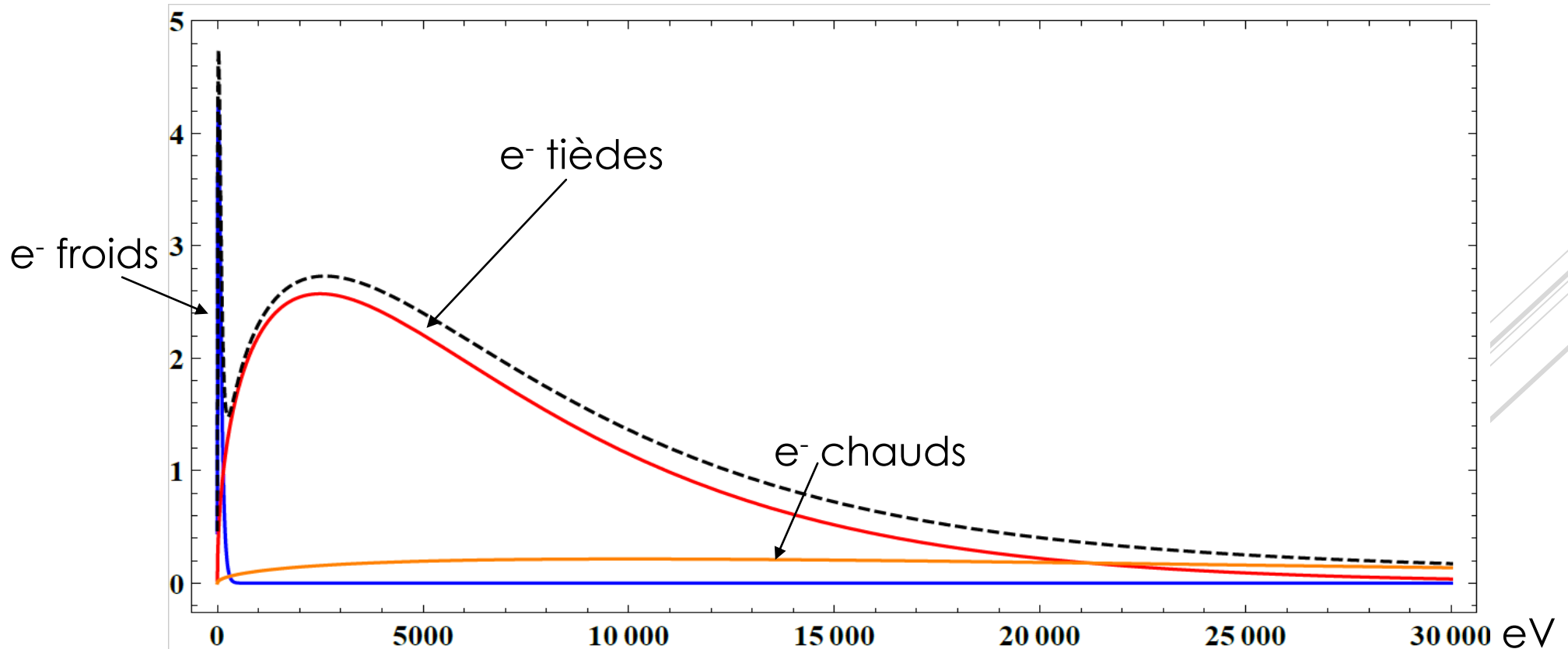
## Fonction de distribution en énergie des électrons

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)



# PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

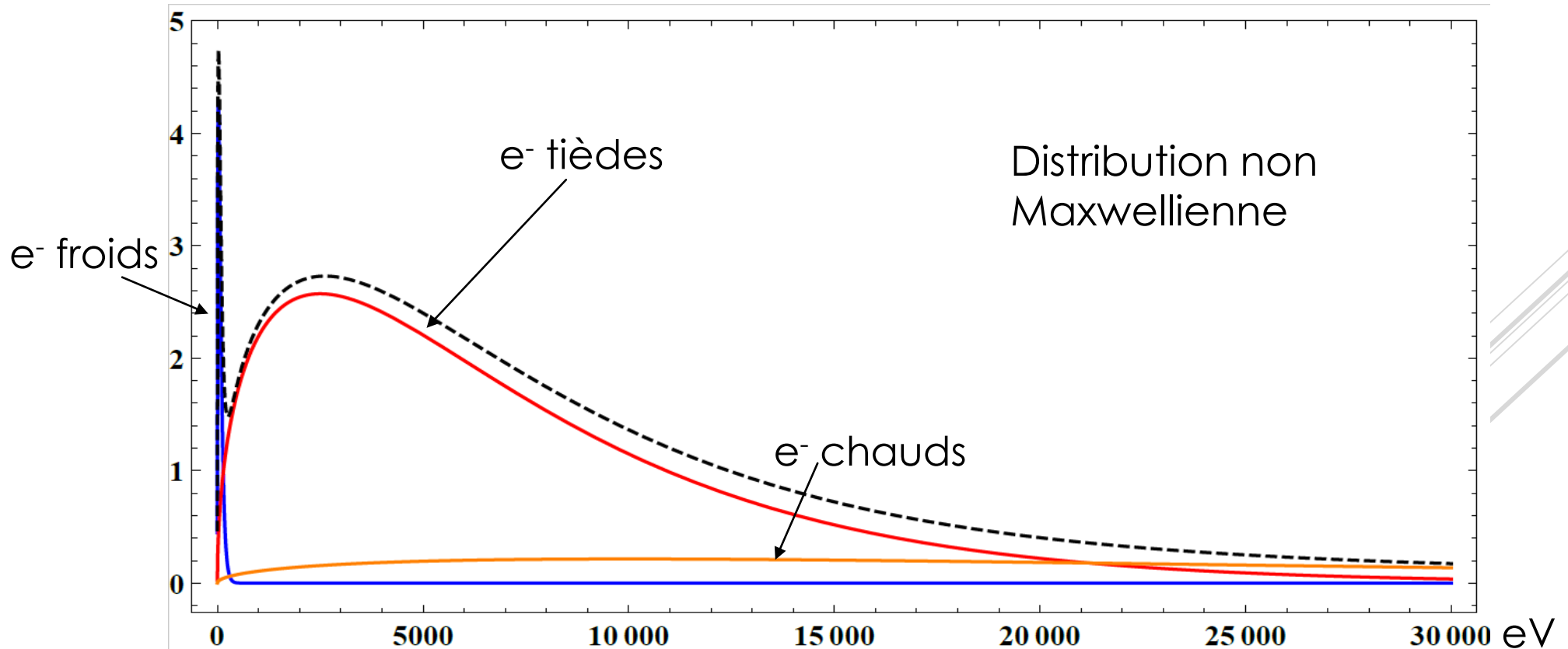
## Fonction de distribution en énergie des électrons

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)



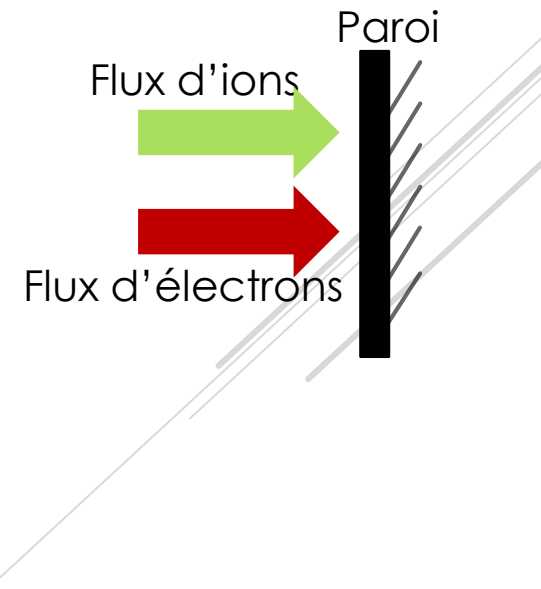
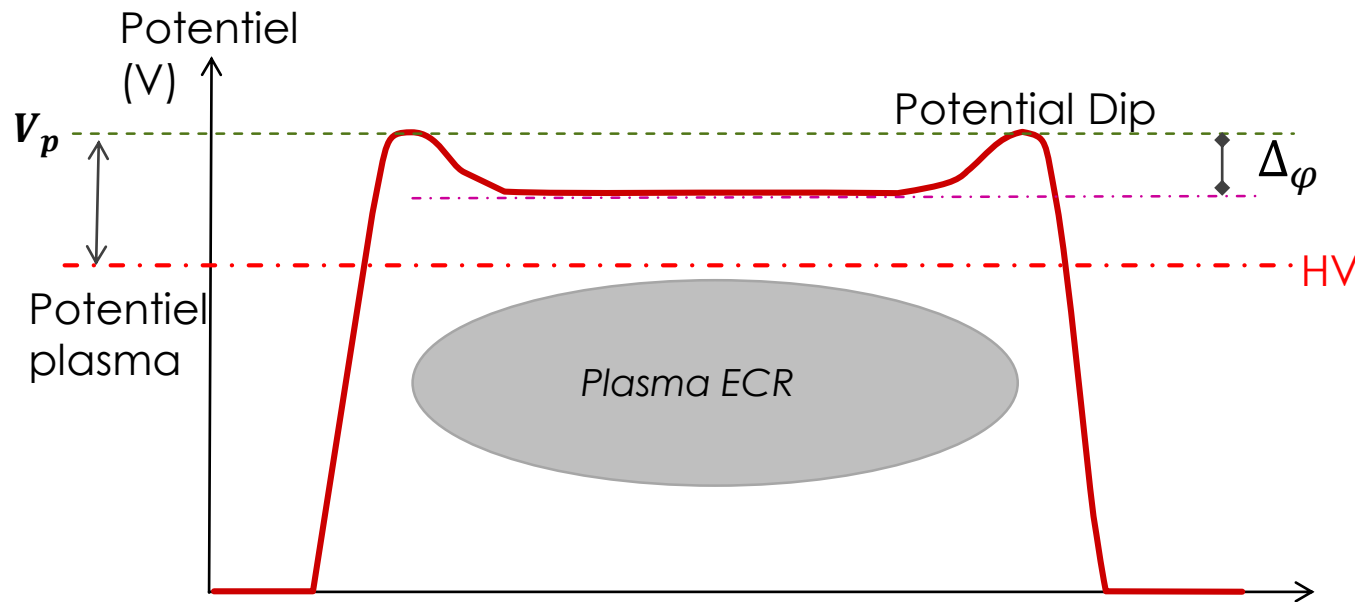
# PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Confinement électrostatique des ions

Existence d'un puit de potentiel électrostatique (potential dip)  
dans la zone ECR

Maintien les ions multichargés confinés au centre du  
plasma

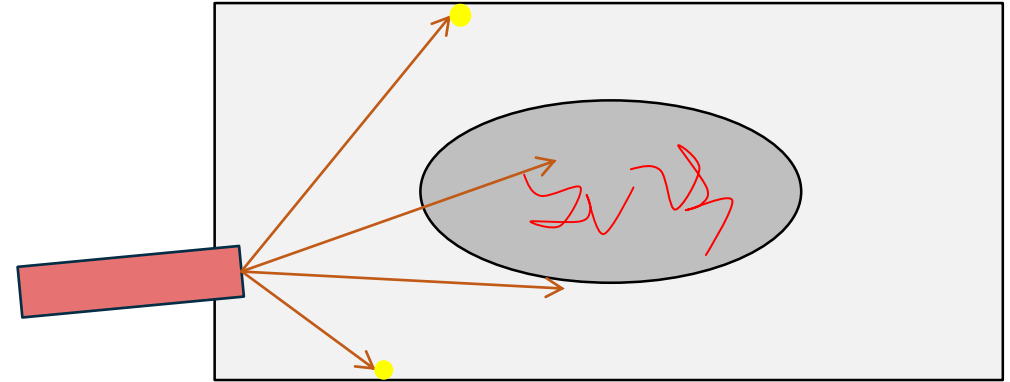
$$\tau_{iQ} = \frac{\sqrt{\pi}RL}{v_i} \exp\left(\frac{Q\Delta\phi}{T_i}\right)$$



# PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Décollage des atomes métalliques

Atomes métalliques évaporés  
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

# PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Décollage des atomes métalliques

Atomes métalliques évaporés  
à l'aide d'un four  
Injectés dans la source  
en dehors du plasma  
Probabilité d'ionisation en vol  
(10-20%)

Collage des particules

$$P_{collage} = C_o$$

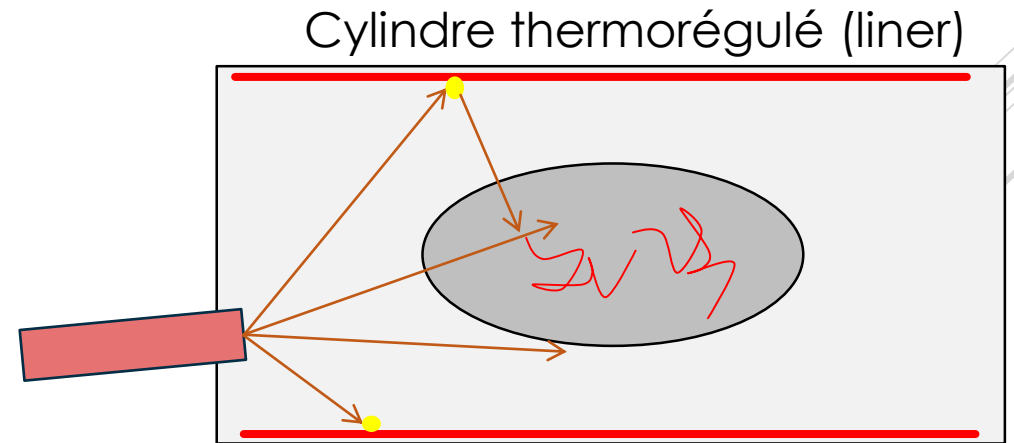
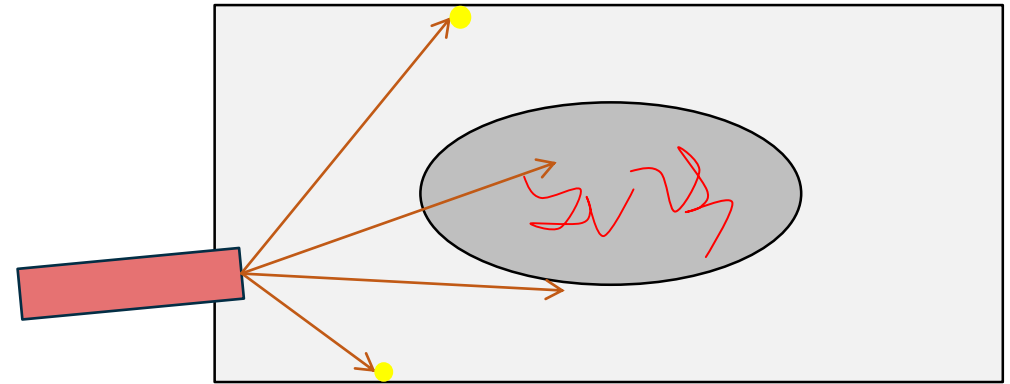
$C_o$  le coefficient de collage

Réémission des particules

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

$\tau$  temps de collage moyen

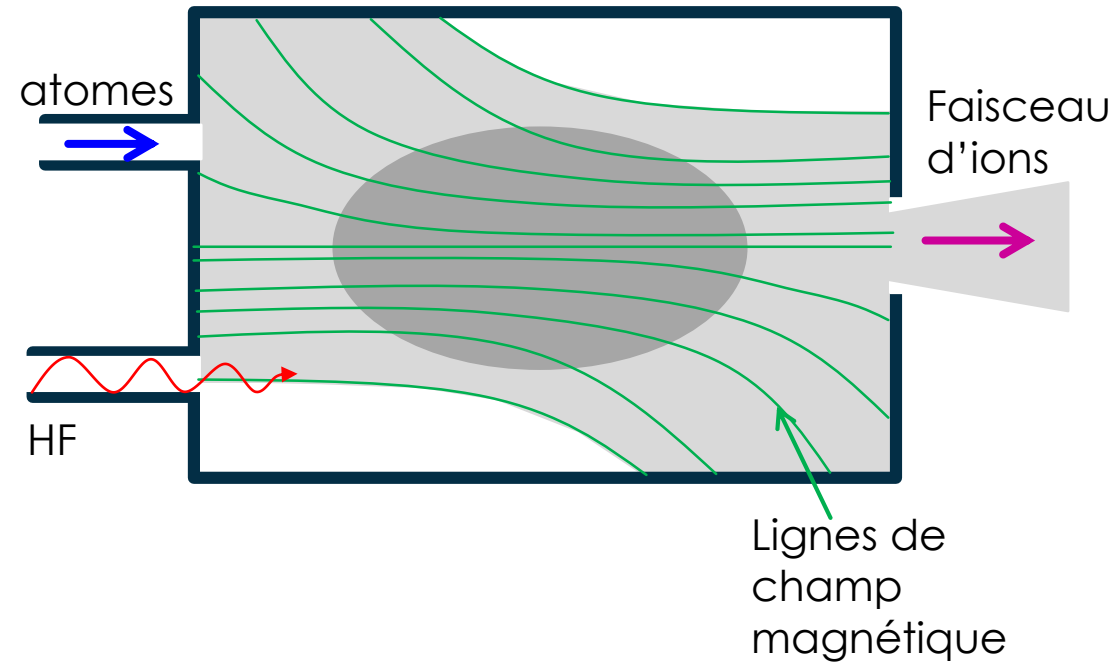
$E_d$  énergie de liaison



Amélioration efficacité attendue

# MODÉLISATION D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Système considéré



Distribution de charges des ions  
Comportement ions différents  
électrons

Modélisation d'un liner  
Modélisation du ménisque  
d'extraction de faisceau

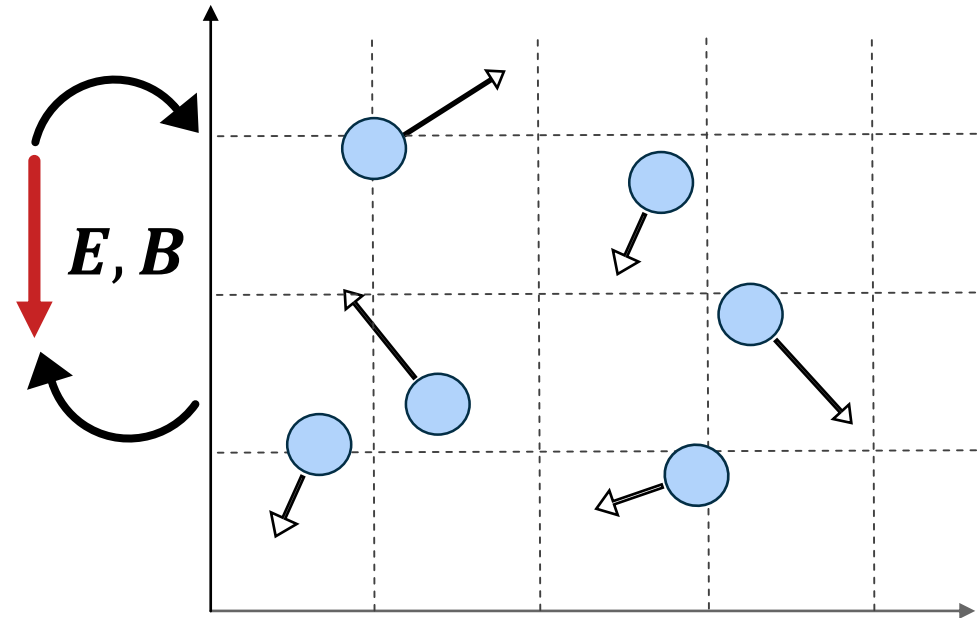
### Hypothèses de travail

Pas de chauffage des électrons  
Pas de propagation particulière des  
électrons

# MODÉLISATION D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Modélisation Particle In Cell

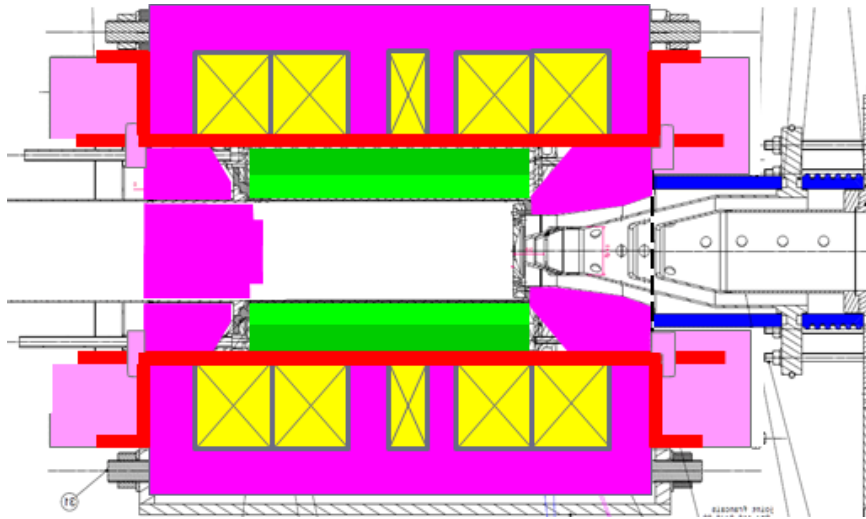
- Propagation de particules neutres ou chargées
- Initialisation aléatoires
- Maillage cartésien
- Propagation avec la méthode du « Leap Frog »
- Tirage aléatoire de la collision
- Collage et décollage des particules sur les parois





# MODÉLISATION D'UNE SOURCE D'IONS ECR

## Particle In Cell appliqué à PHOENIX V3



Phoenix V3 pour Spiral2

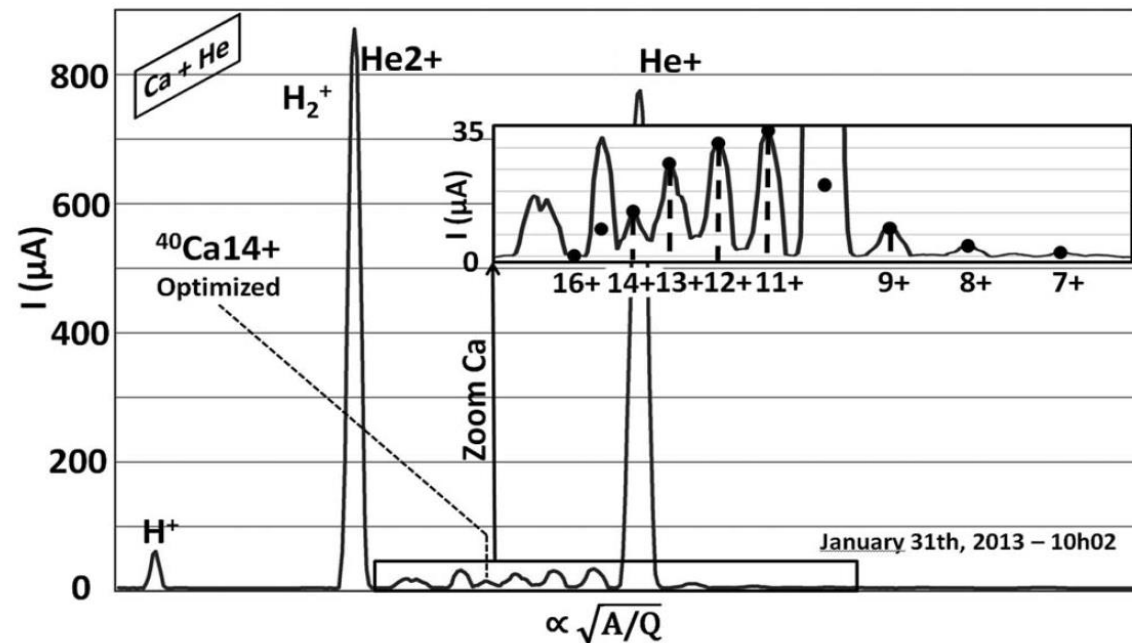
Longueur de 220 mm

Rayon de 46 mm

Volume de 1,45 litre

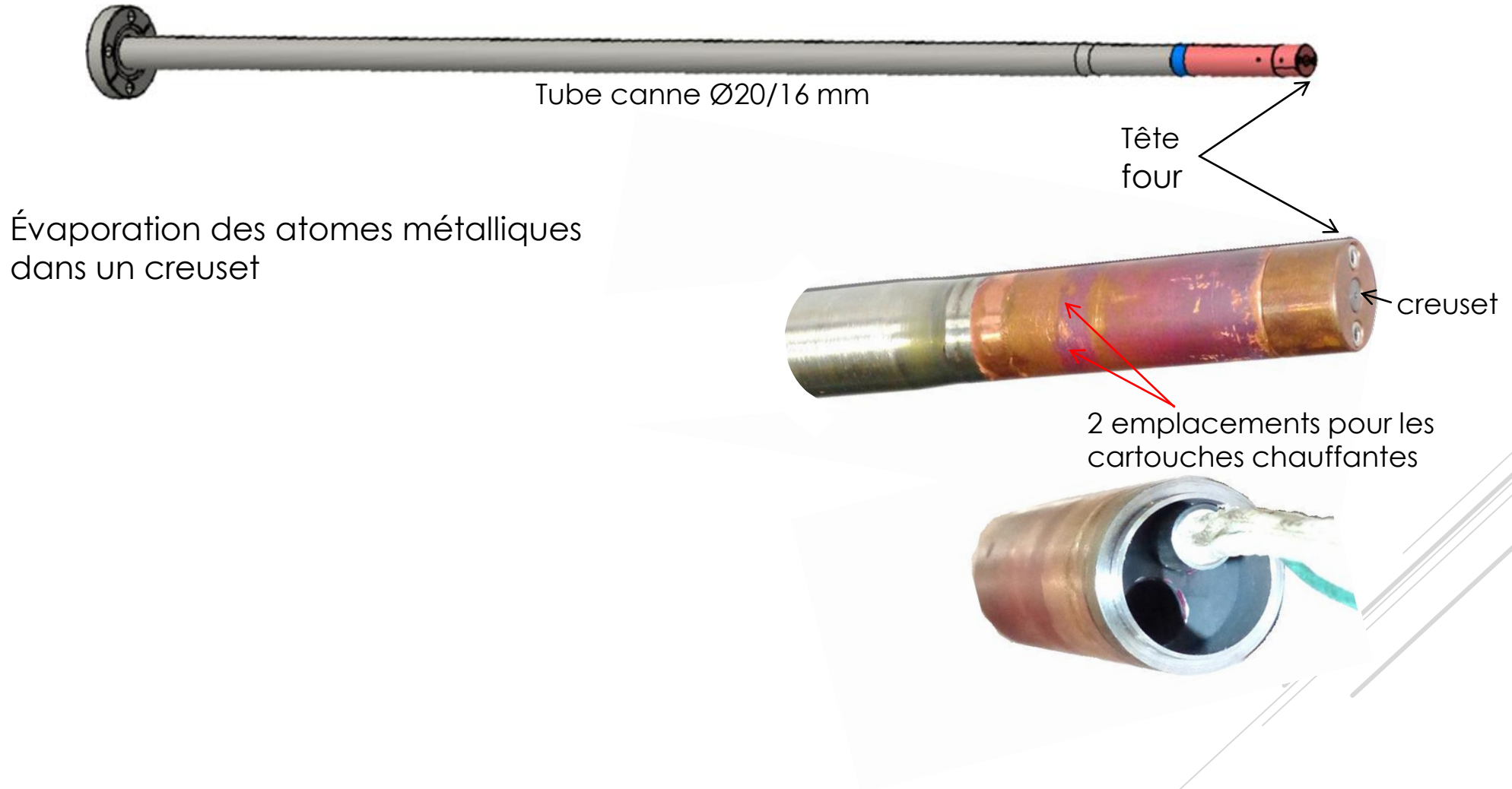
Zone ECR de 95 cm<sup>3</sup>

A pour objectif la production  
d'ions métalliques



# PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

## Évaporation d'ions métalliques



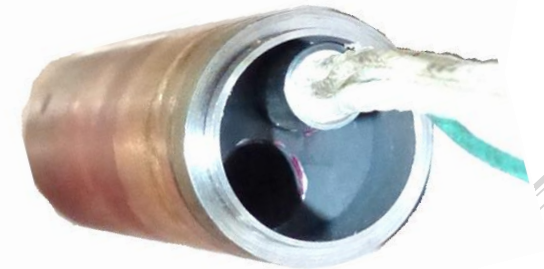
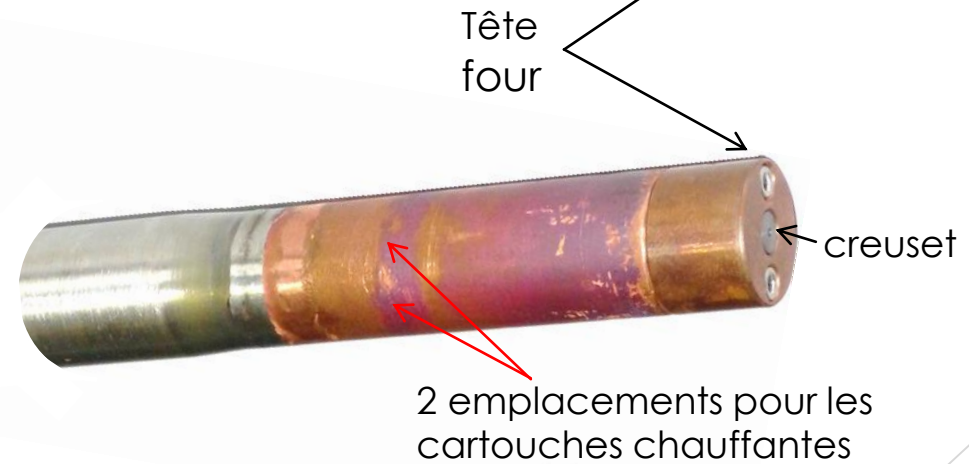
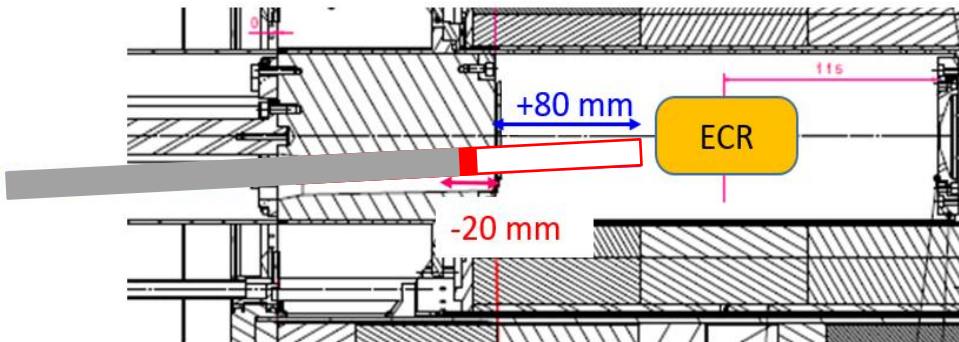
# PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

## Évaporation d'ions métalliques



Évaporation des atomes métalliques  
dans un creuset

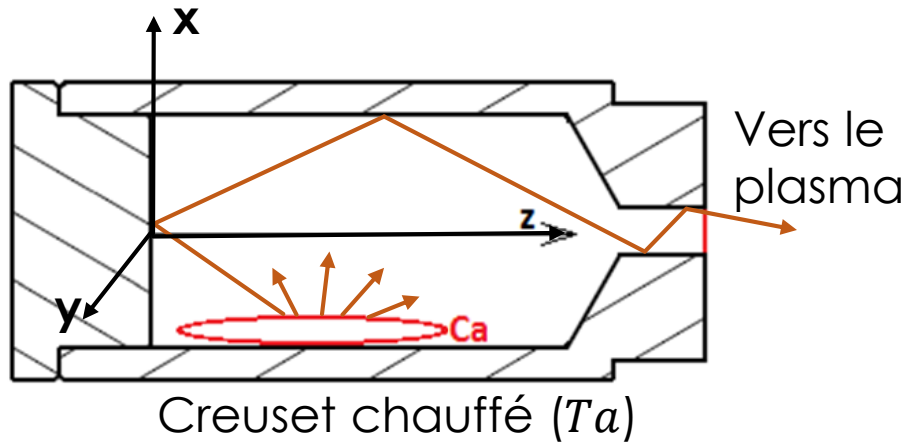
Injection des atomes dans la source à  
l'aide d'une canne



Simulation simple du creuset

# PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

## 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

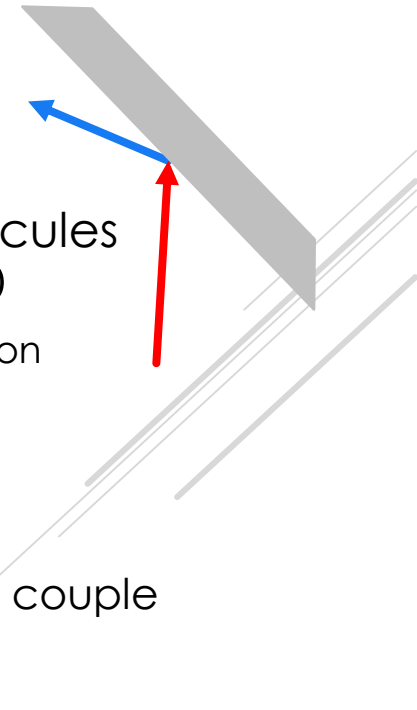
$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{E_d}{kT}\right)}$$

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  
 $Ca-Ta$



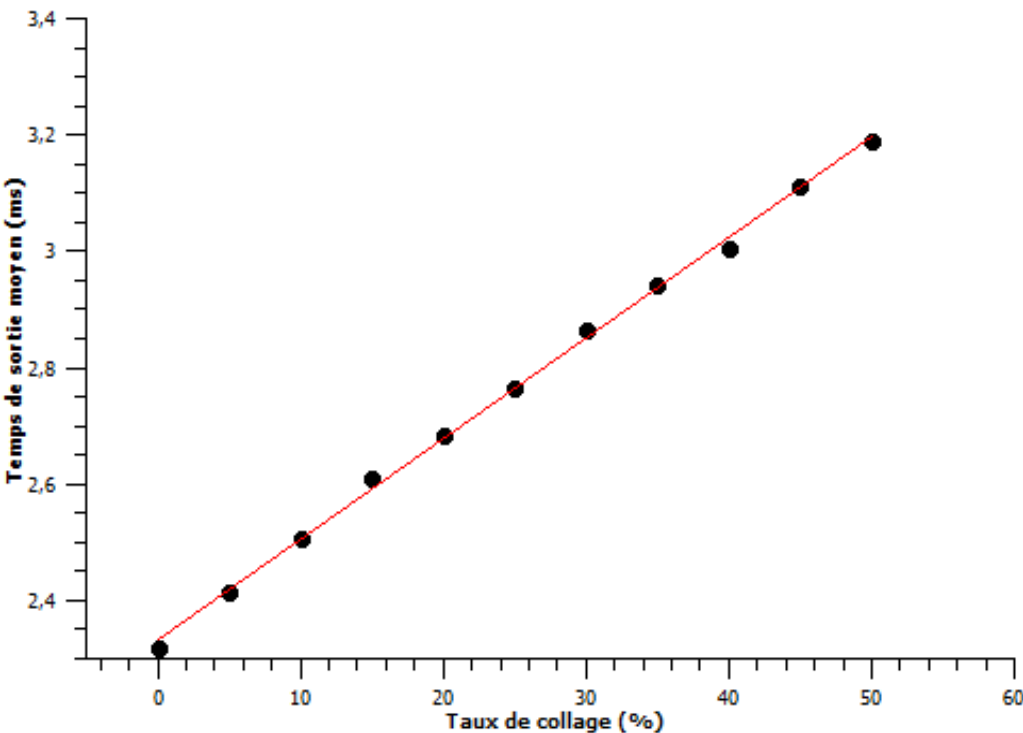
# PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

## Validation du code de simulation du four

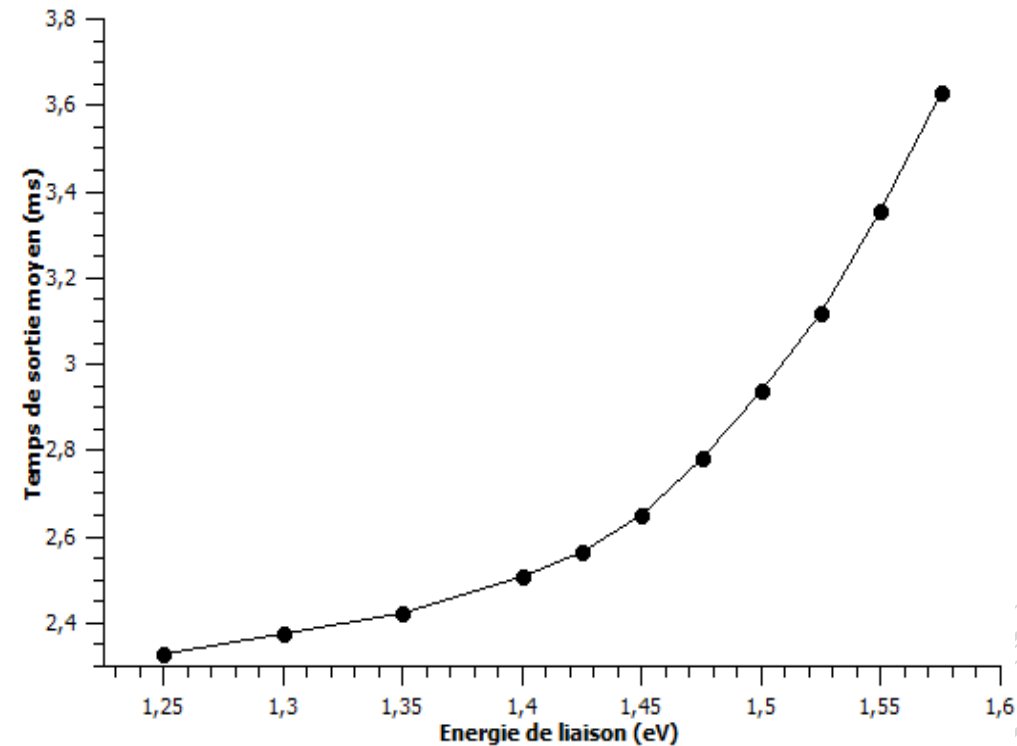
Taux de collage des particules

$$P_{\text{collage}} = C_o$$

Temps de sortie en fonction du taux de collage



Temps de sortie moyen en fonction de l'énergie de liaison



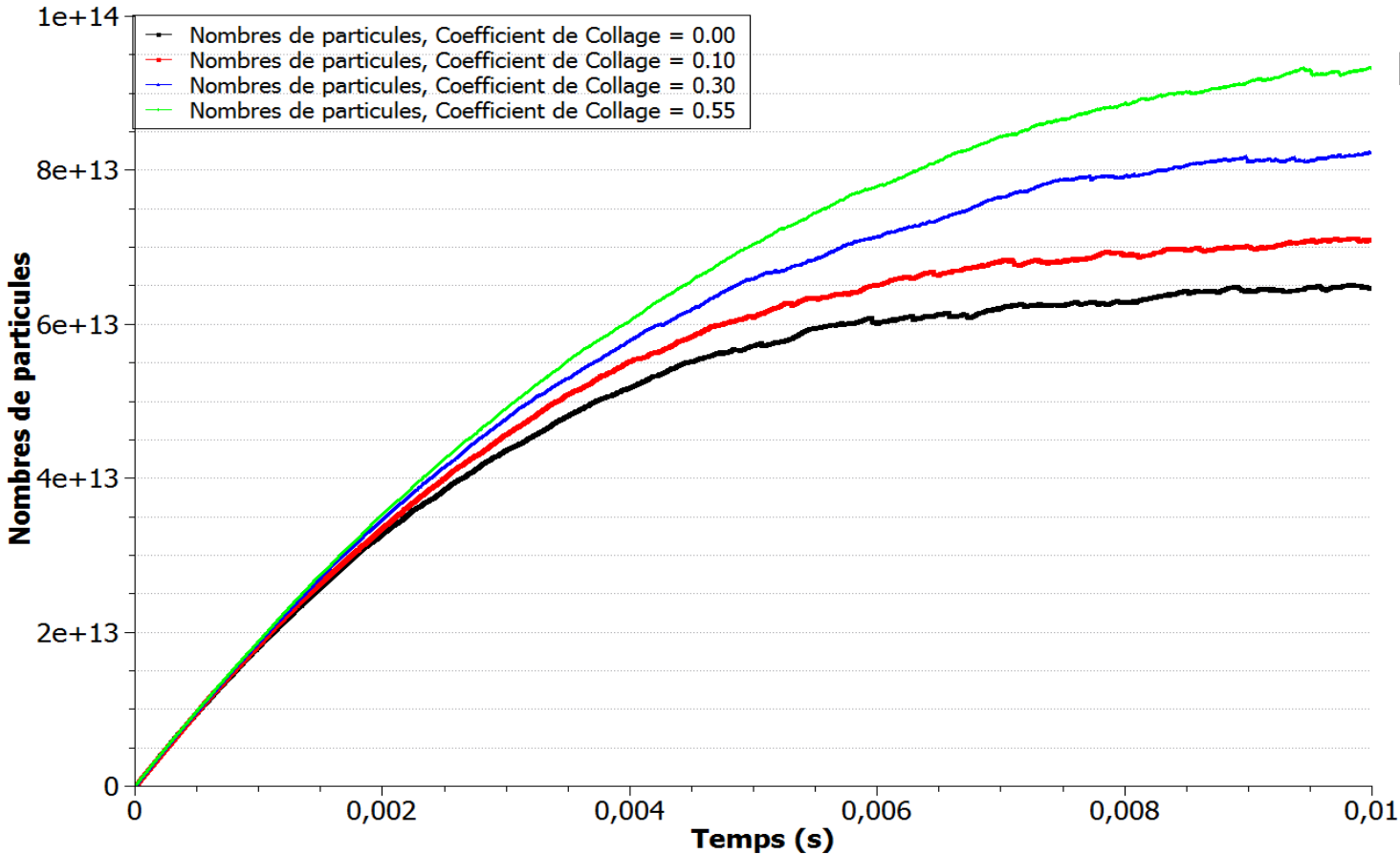
Réémission des particules

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

# PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

## Modélisation du four

Evolution du nombre de particules en fonction du temps



Réémission des particules

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

Collage des particules

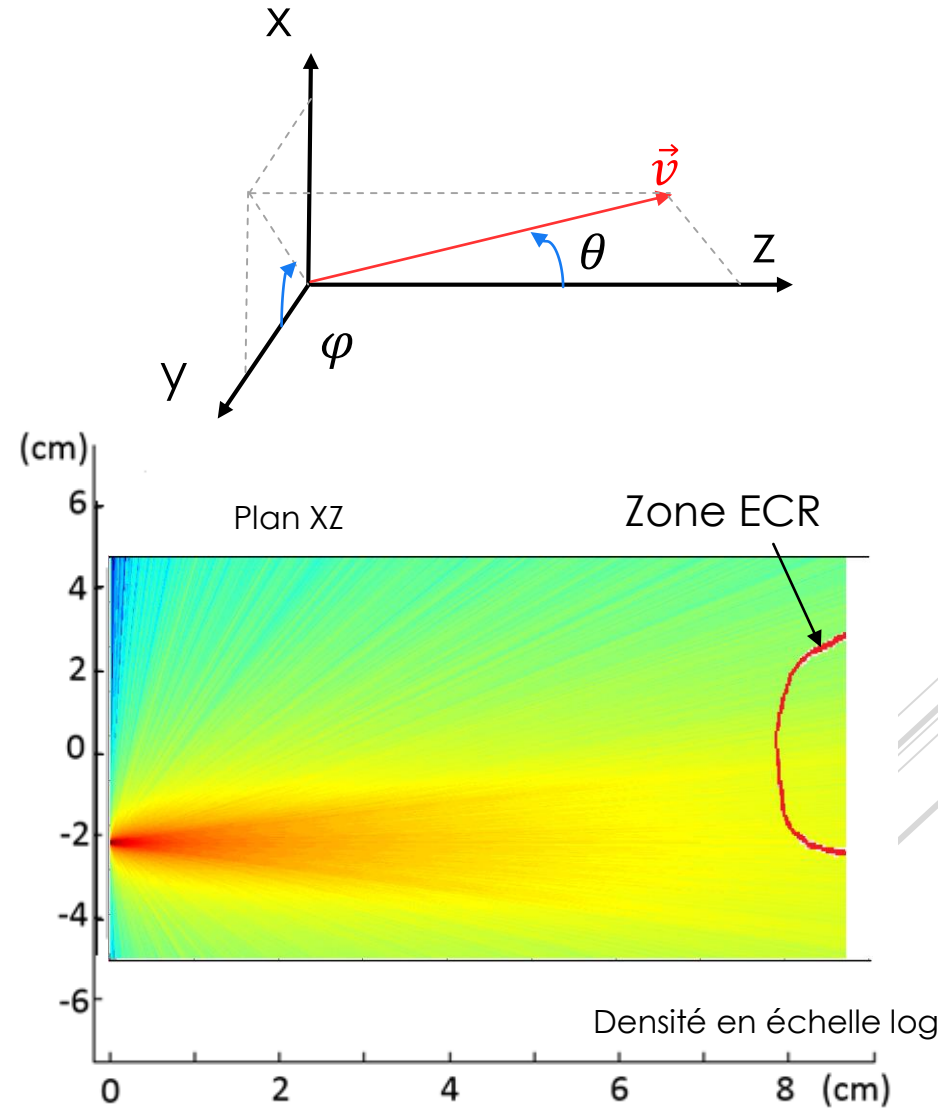
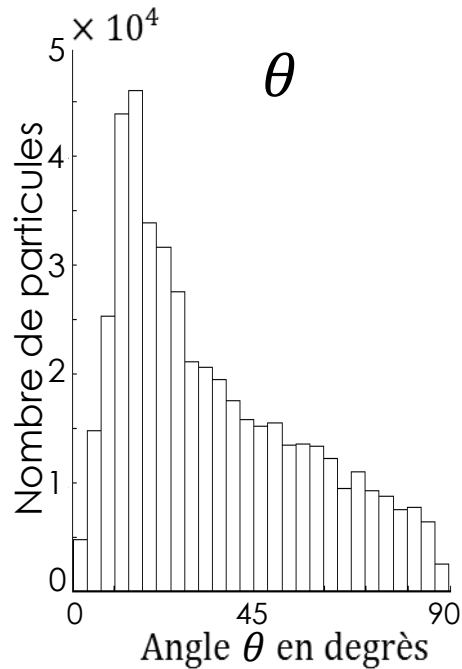
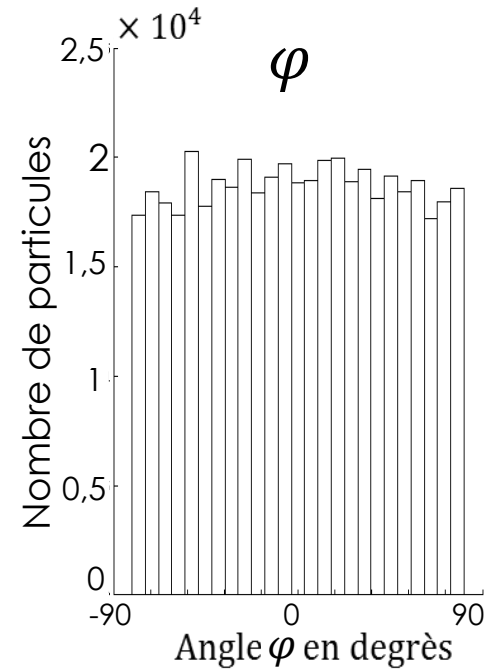
$$P_{collage} = C_o$$

Estimation possible de  $C_o$  et  $E_d$   
pour le couple  $Ca-Ta$

# PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

## Résultats de la modélisation du four

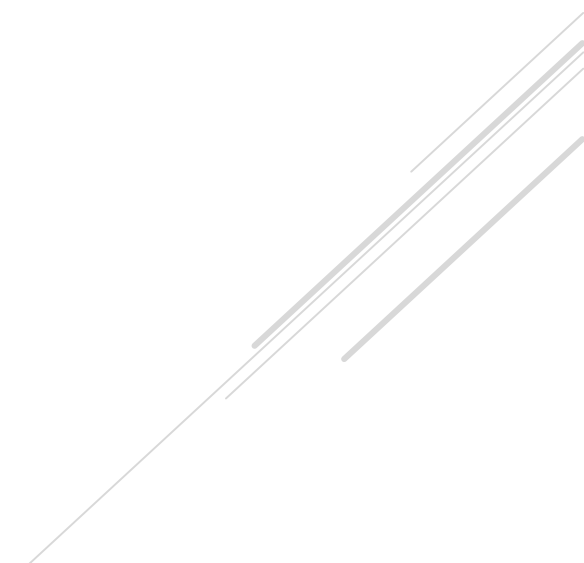
Distribution homogène en  $\varphi$  et inhomogène en  $\theta$



Liner pour la ré-évaporation d'atomes métalliques

# Perspectives

- Complexification progressive du code  
(modélisation du potentiel dip, de la distribution d'énergie des électrons, ...)
- Reproduction de spectres d'ions
- Étude expérimentale de la ré-évaporation d'atomes métallique avec un liner
- Comparaison entre la simulation et l'expérimentation

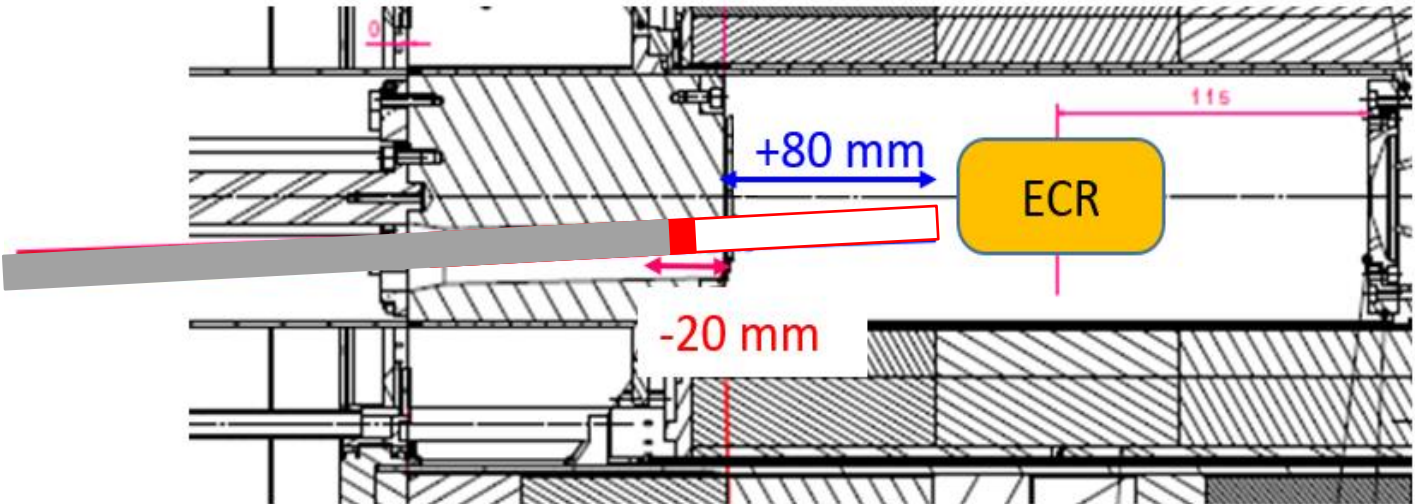




Merci pour votre attention

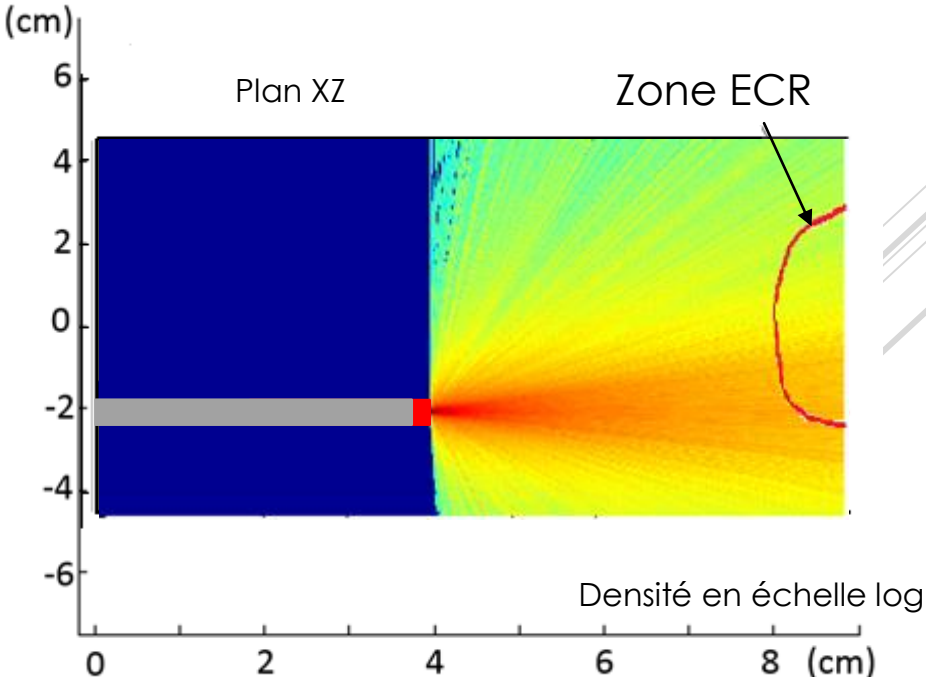
# POSITION DU CREUSET DANS LA SOURCE

La proximité avec la zone ECR augmente le rendement

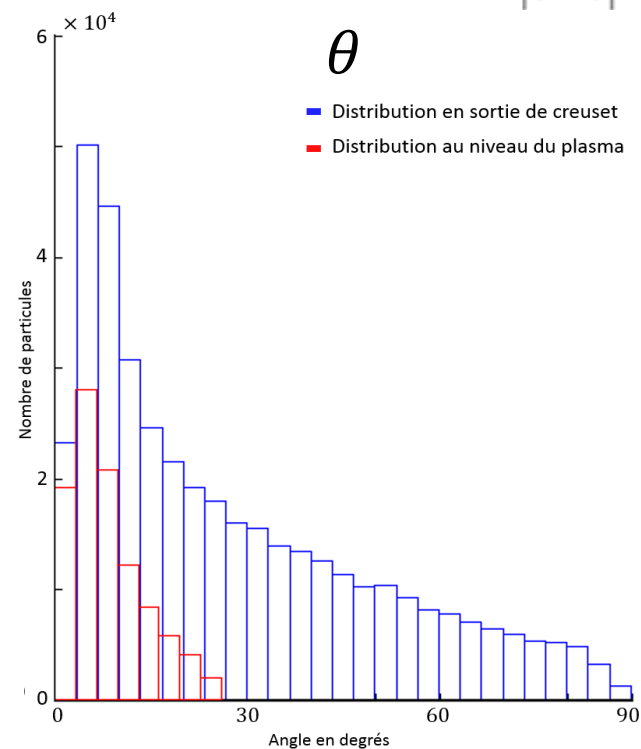
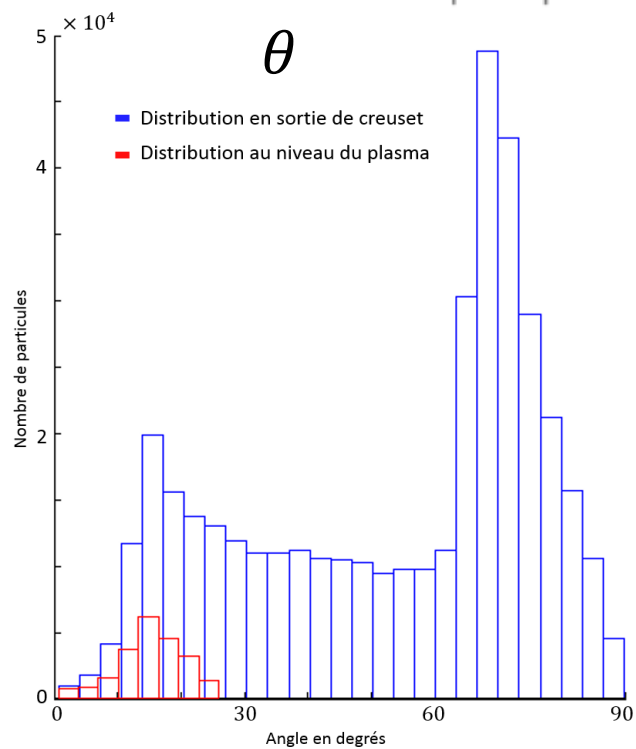
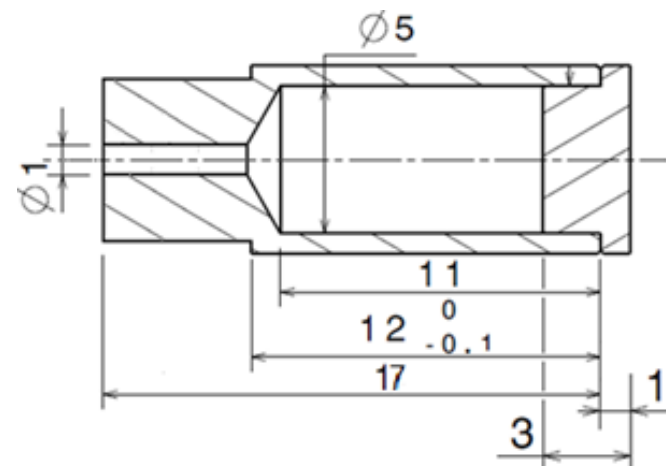
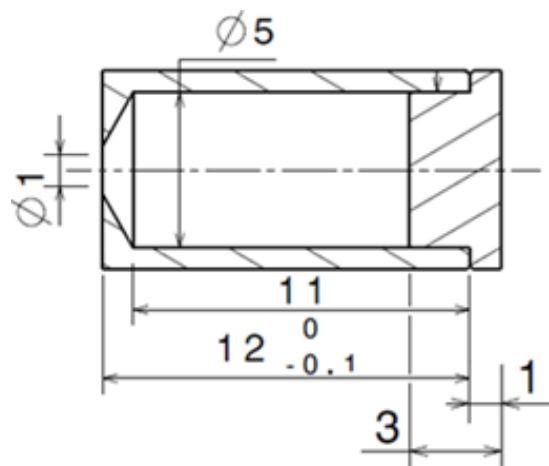


À +0mm, 100°C de chauffage dû au plasma

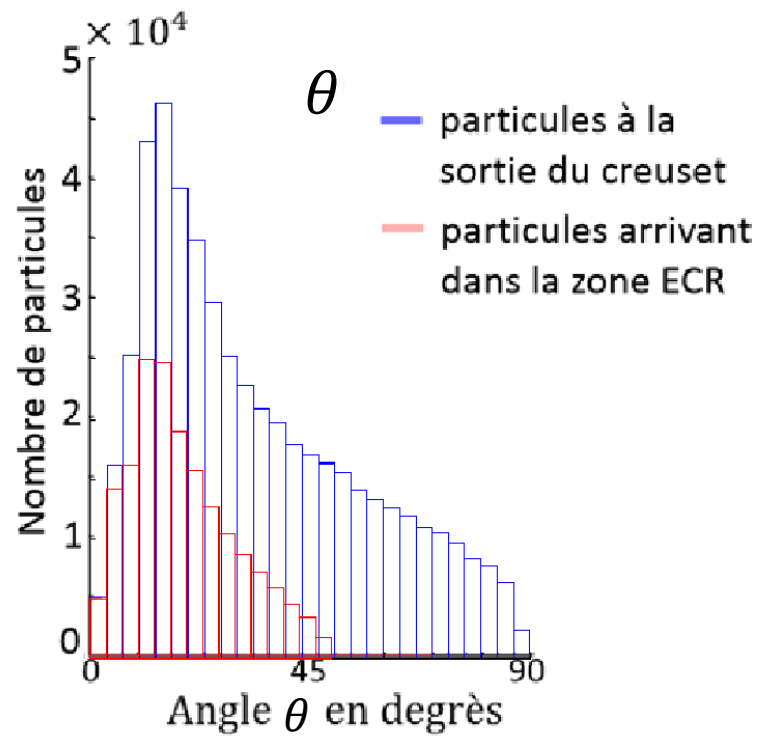
Évaporation du Ca à plus de 350°C



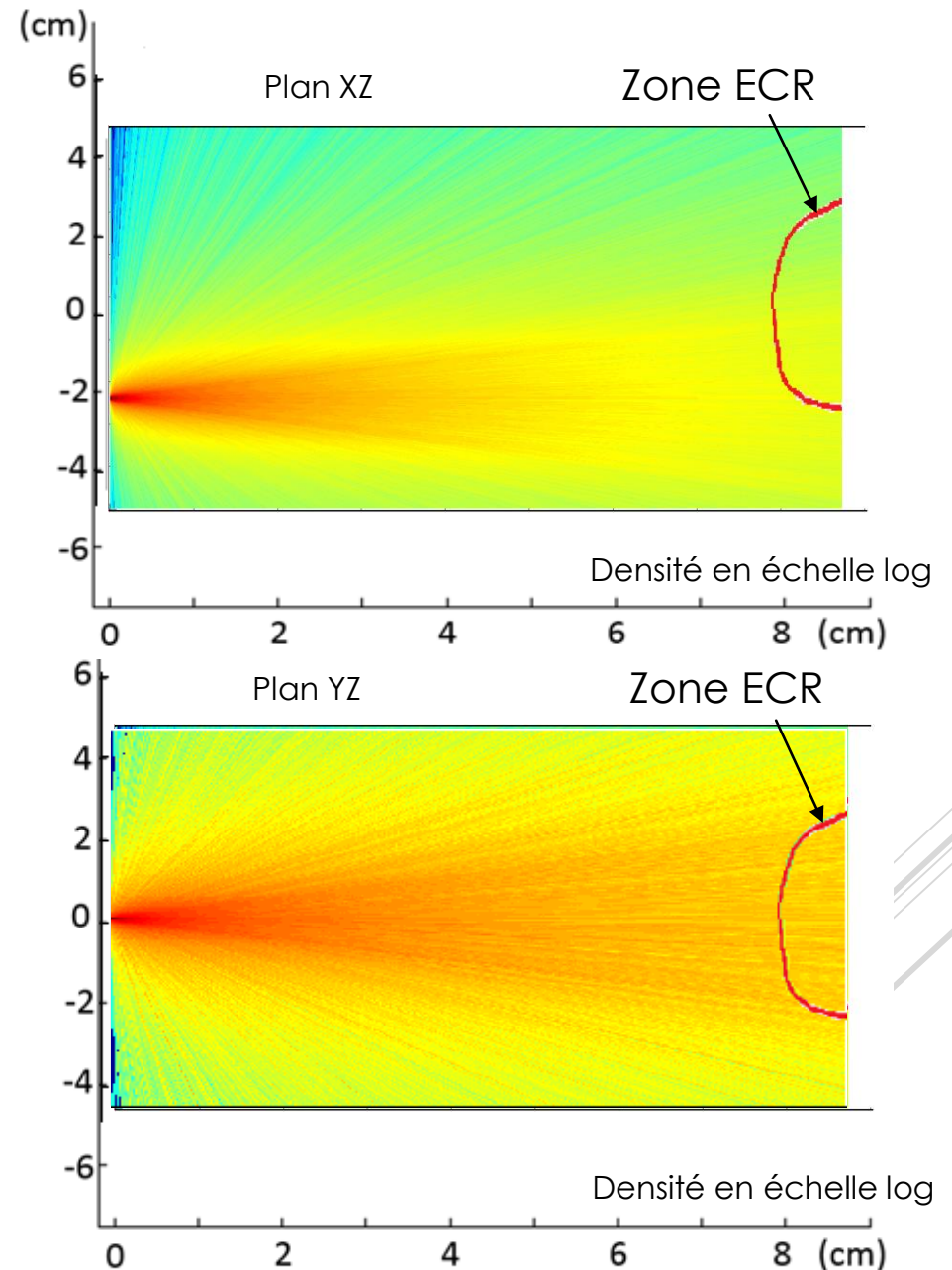
# SIMULATION DU CREUSET



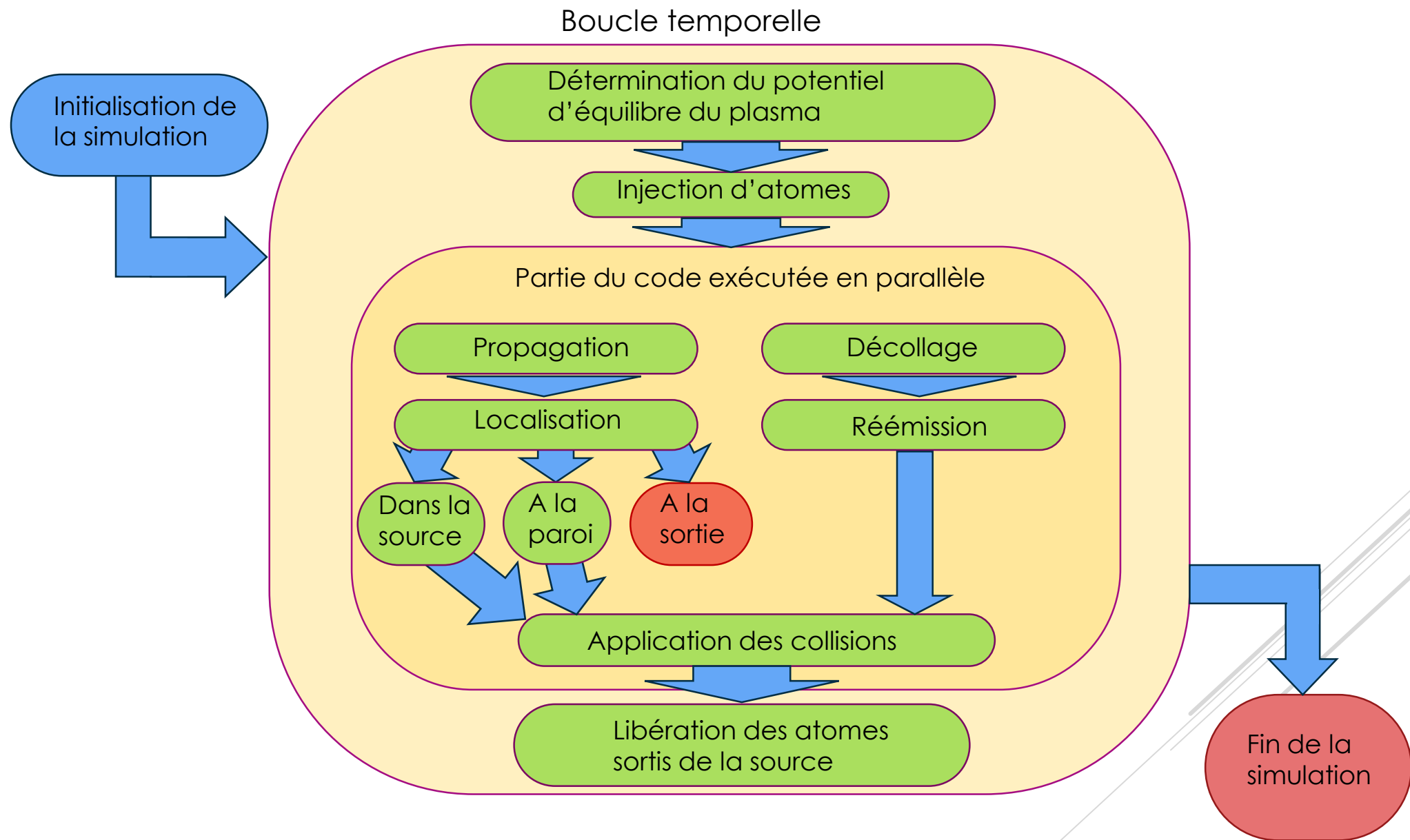
# DE LA SORTIE DU CREUSET À LA ZONE ECR



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.

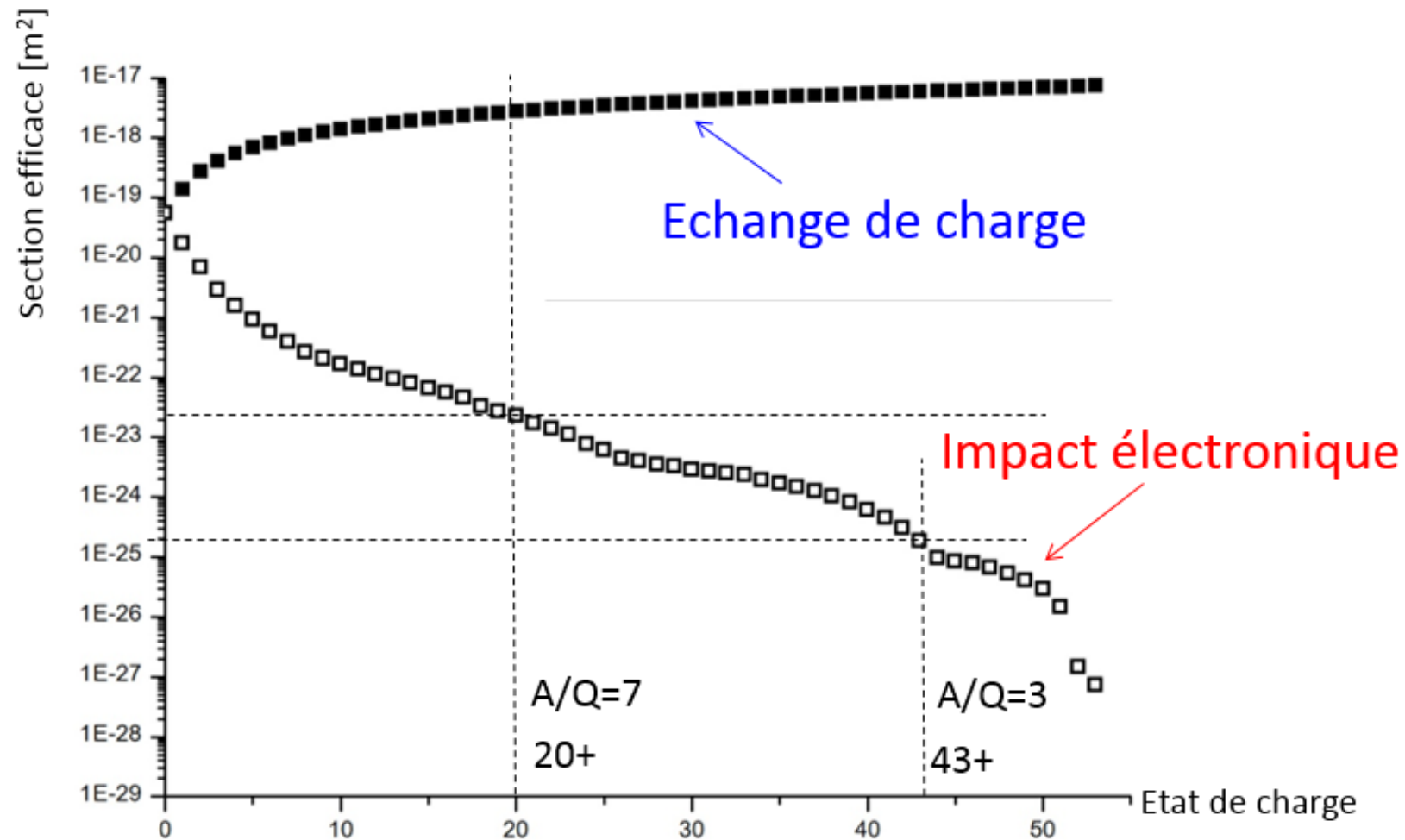


# ORGANIGRAMME DU CODE



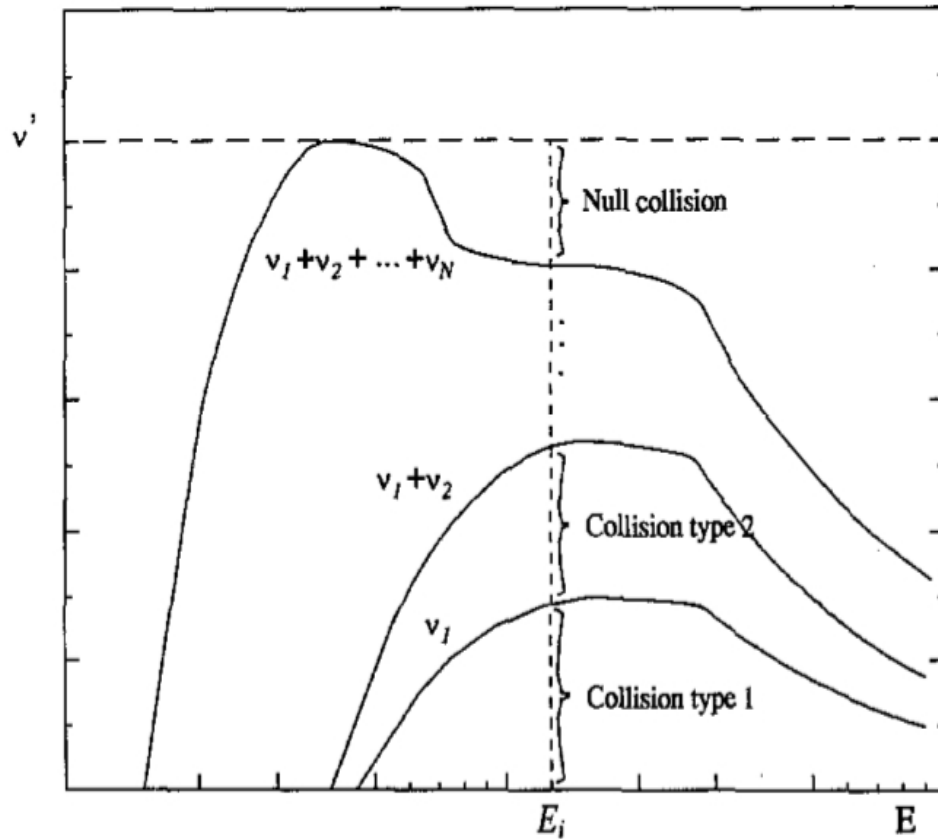
# SECTIONS EFFICACES D'IONISATIONS ET D'ÉCHANGE DE CHARGE

$^{128}\text{Xenon}$



# MODÉLISATION DES COLLISIONS ENTRE PARTICULES

## Méthode de la collision nulle



Collision coulombienne entre particules  
théorie d'accumulation des collisions à faible angle dans les plasmas (K. Nanbu)

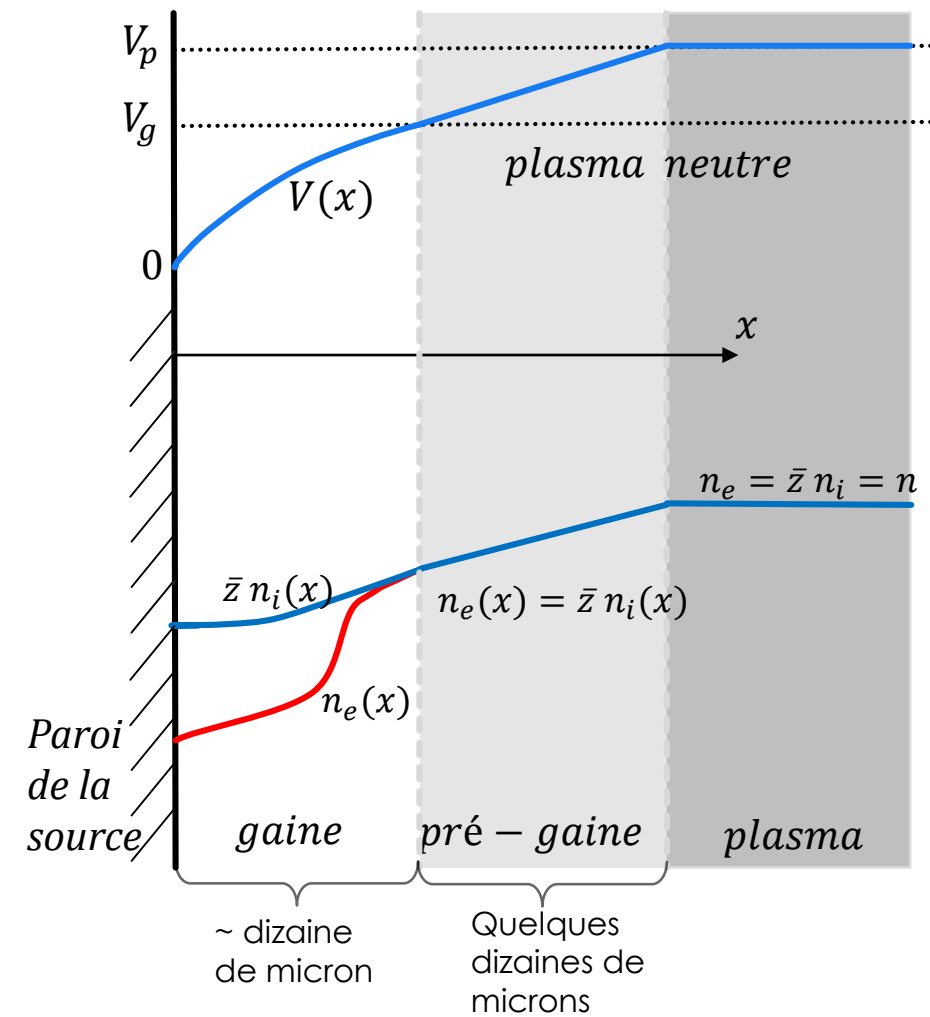
Ionisation

Ionisation par impact électronique,  
section efficace avec la  
formule de Bote et Lotz  
Impact ion/ion et molécule/ion

Echange de charge

Calcul de la section efficace à  
l'aide de la formule de Muller et  
Salzborn

# CARACTÉRISTIQUES DU PLASMA



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

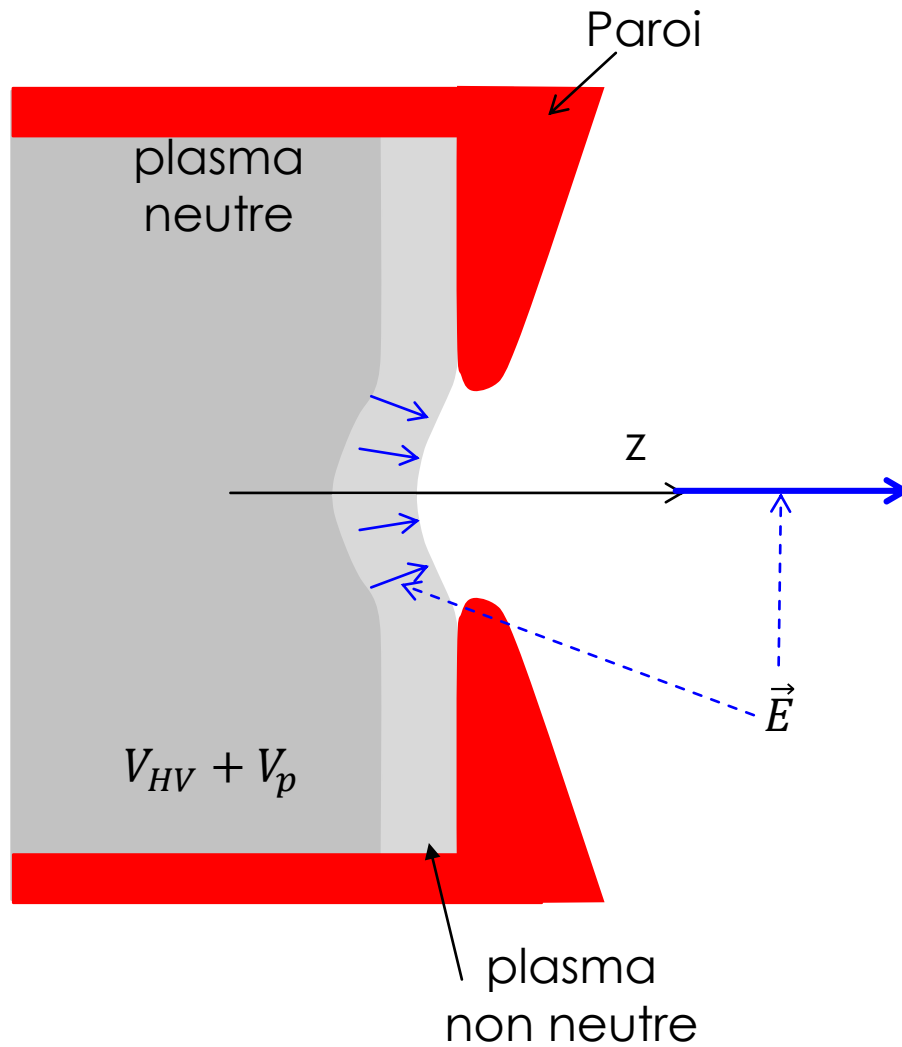
Champ magnétique jusqu'à 2 T

Plasma Hors équilibre  
thermodynamique

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



# EXTRACTION DE FAISCEAU



Déformation locale  
de la gaine plasma

Impact important sur  
les émittances