

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

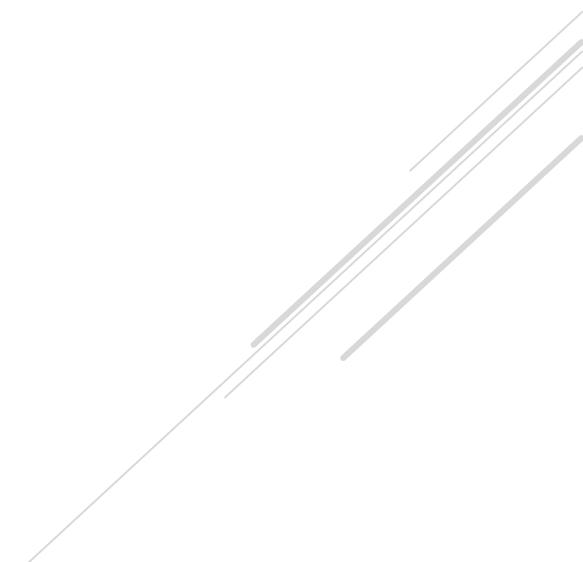
Motivation de la thèse

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}Ca)

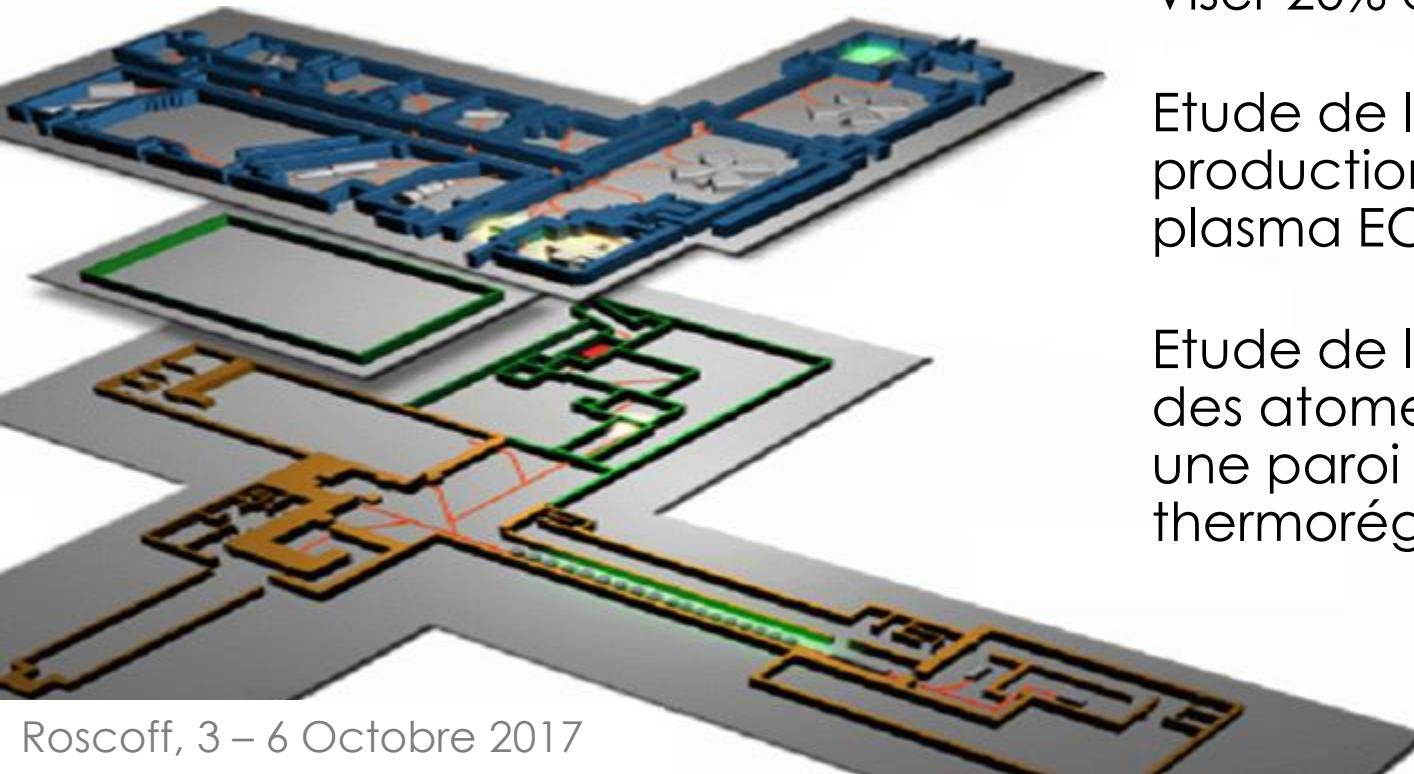
Rendement actuel de production d'ions métalliques ~10%

Objectifs :

Viser 20% à 60% de rendement

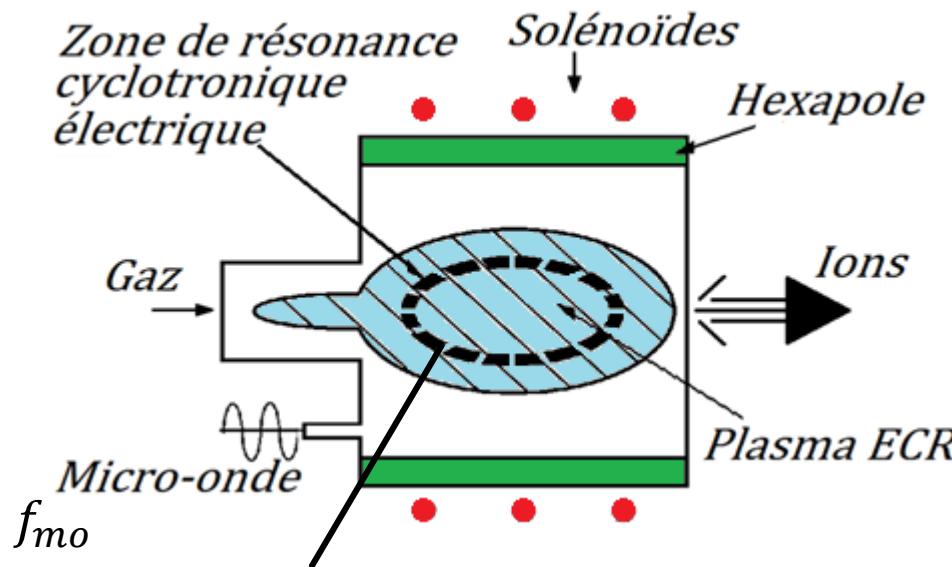
Etude de la dynamique de production des ions dans le plasma ECR

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

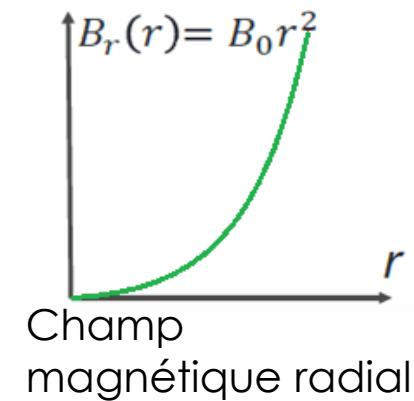
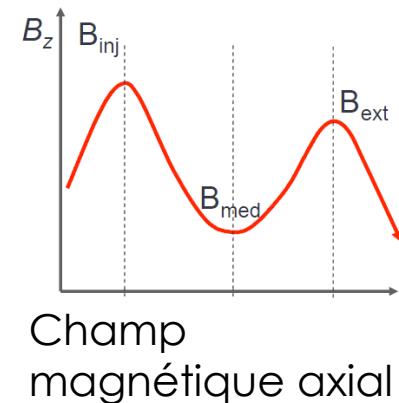


PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

Formation du plasma



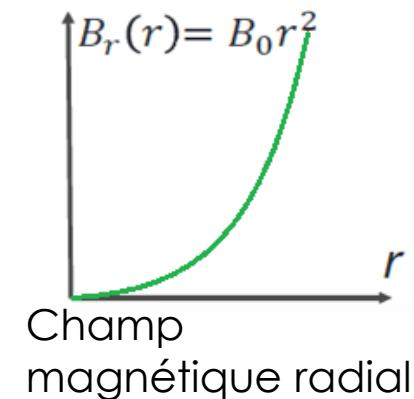
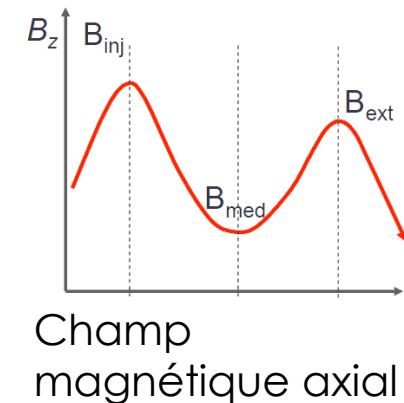
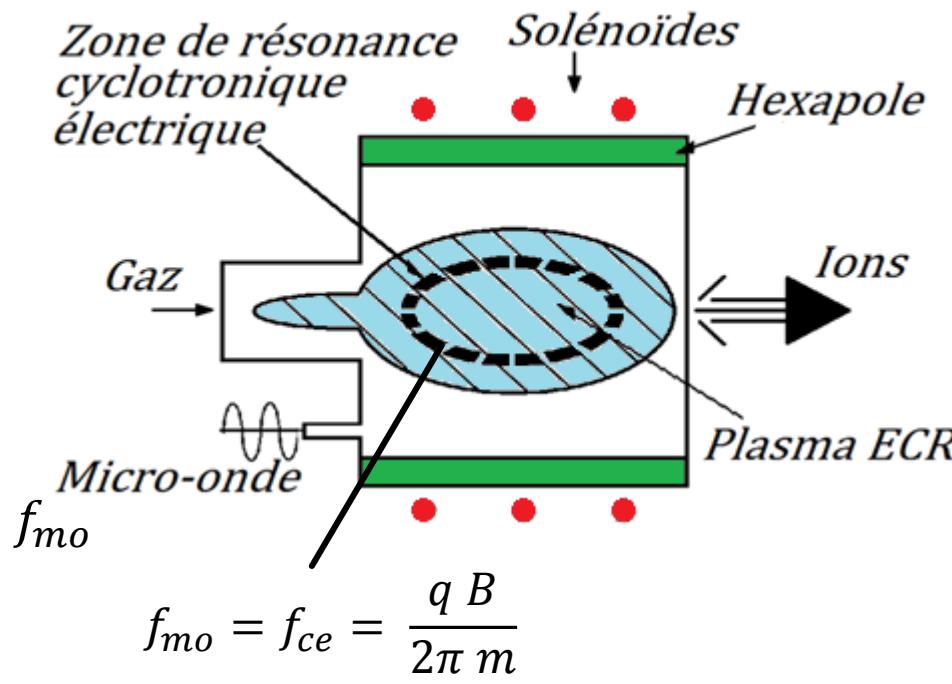
$$f_{mo} = f_{ce} = \frac{q B}{2\pi m}$$



confinement magnétique par effet miroir
multiples aller-retour des électrons

PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

Formation du plasma



Création : Impact électronique



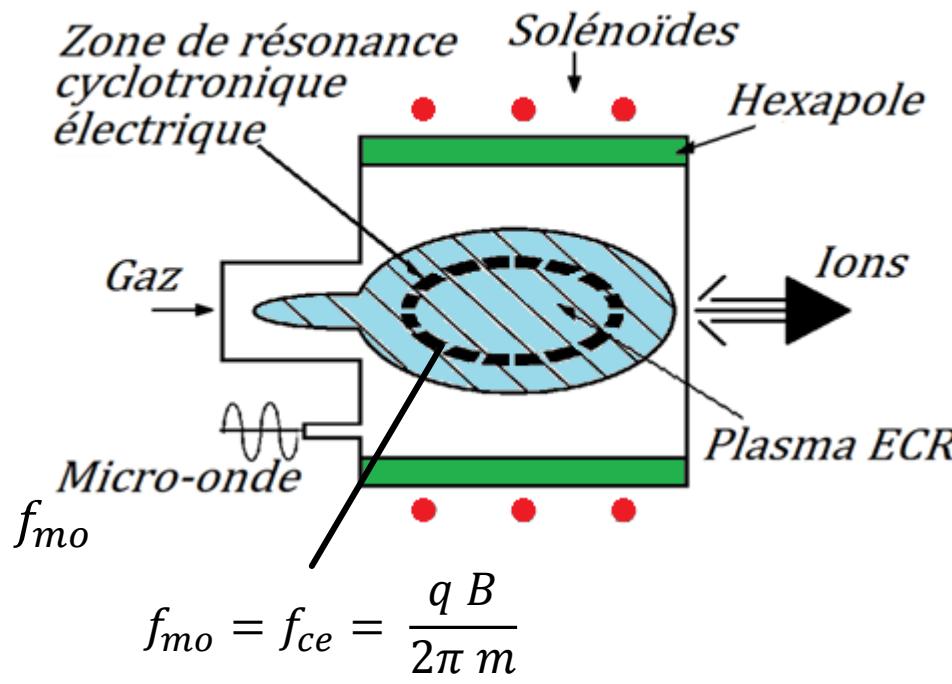
Destruction : Echange de charge



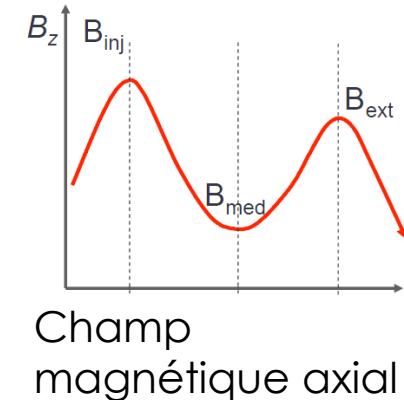
confinement magnétique par effet miroir
multiples aller-retour des électrons
multi-ionisation des ions

PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

Formation du plasma

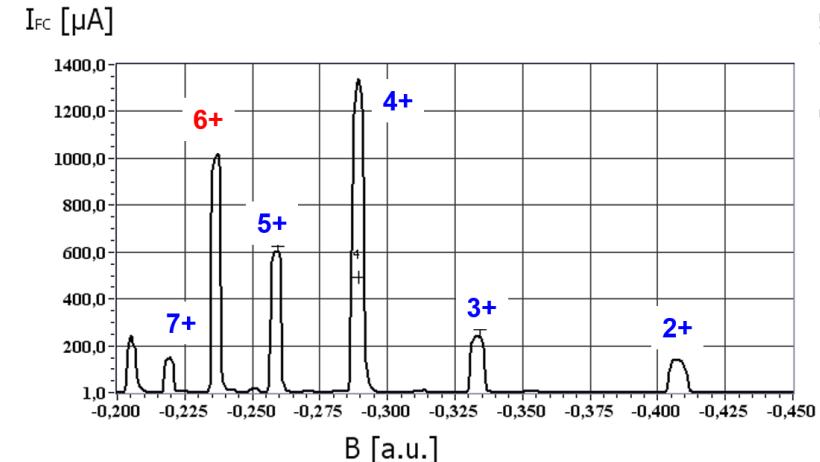


confinement magnétique par effet miroir
multiples aller-retour des électrons
multi-ionisation des ions
différents états de charges



Création : Impact électronique
 $A^{n+} + e^- \rightarrow A^{(n+1)+} + 2e^-$

Destruction : Echange de charge
 $A^{n+} + B \rightarrow A^{(n-1)+} + B^+$



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

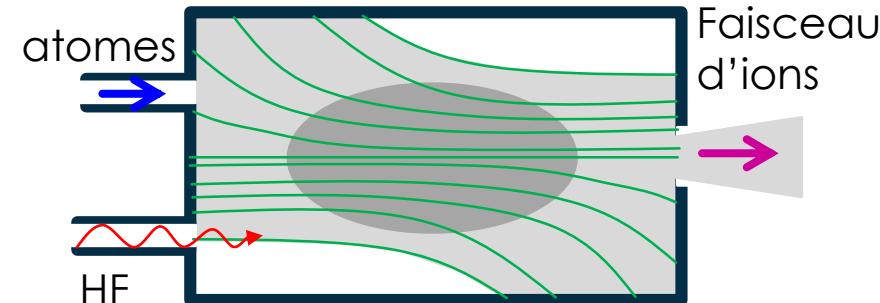
Longueur de Debye
Temps caractéristique

électrons
 $T_e \sim 1 \text{ keV}$

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

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

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



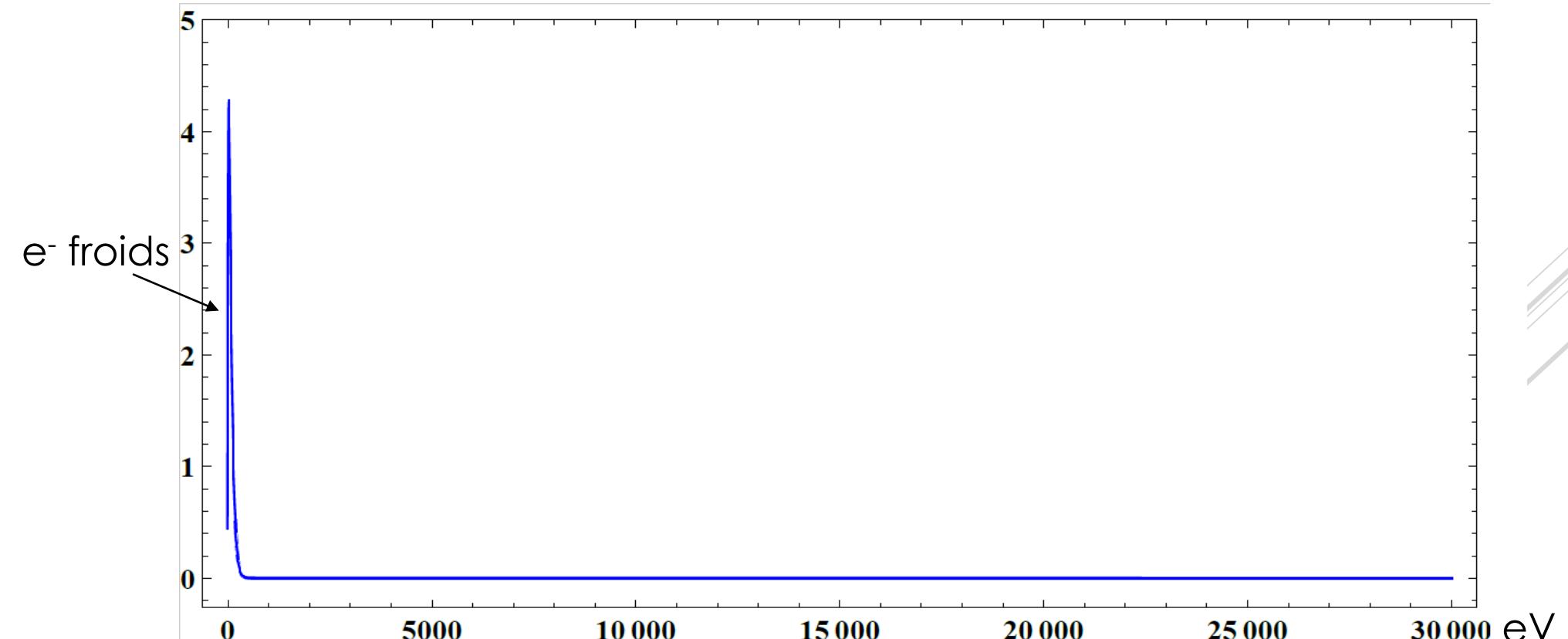
- Ions froids ($\sim \text{eV}$)
- Plusieurs populations d'électrons

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



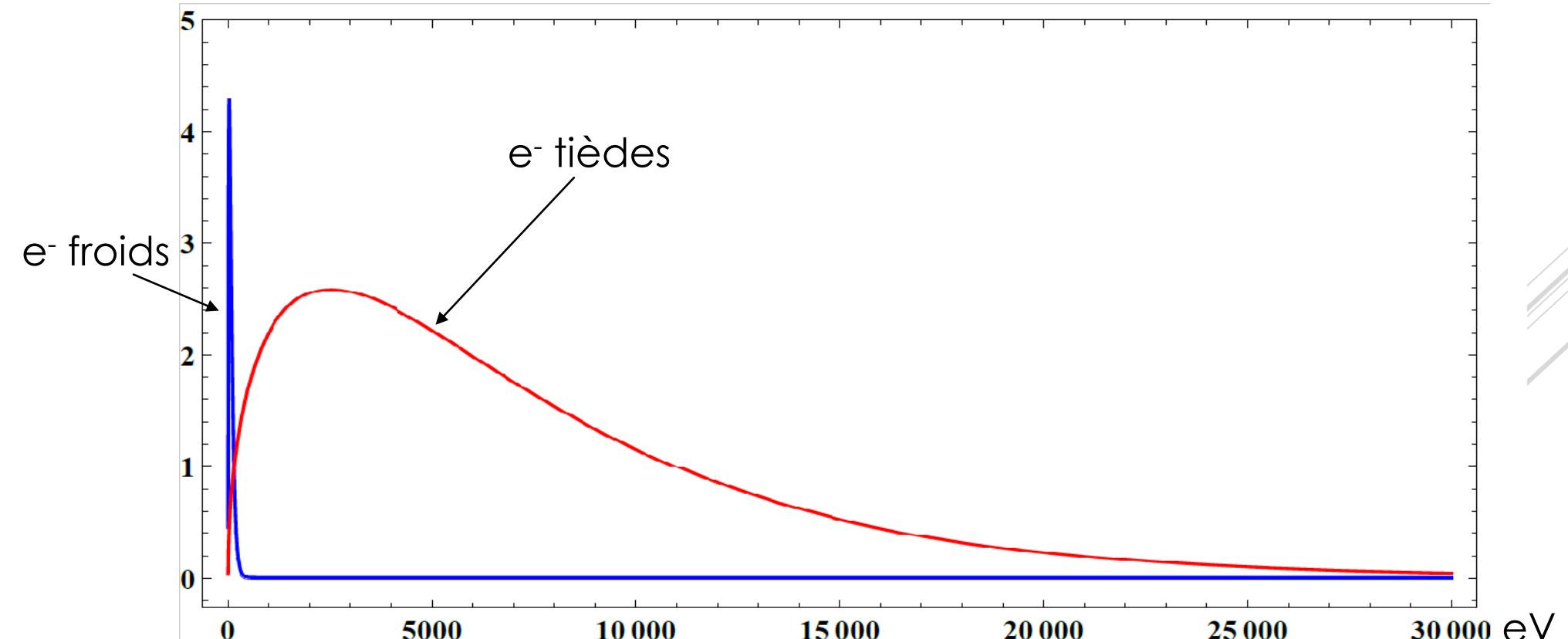
PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

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

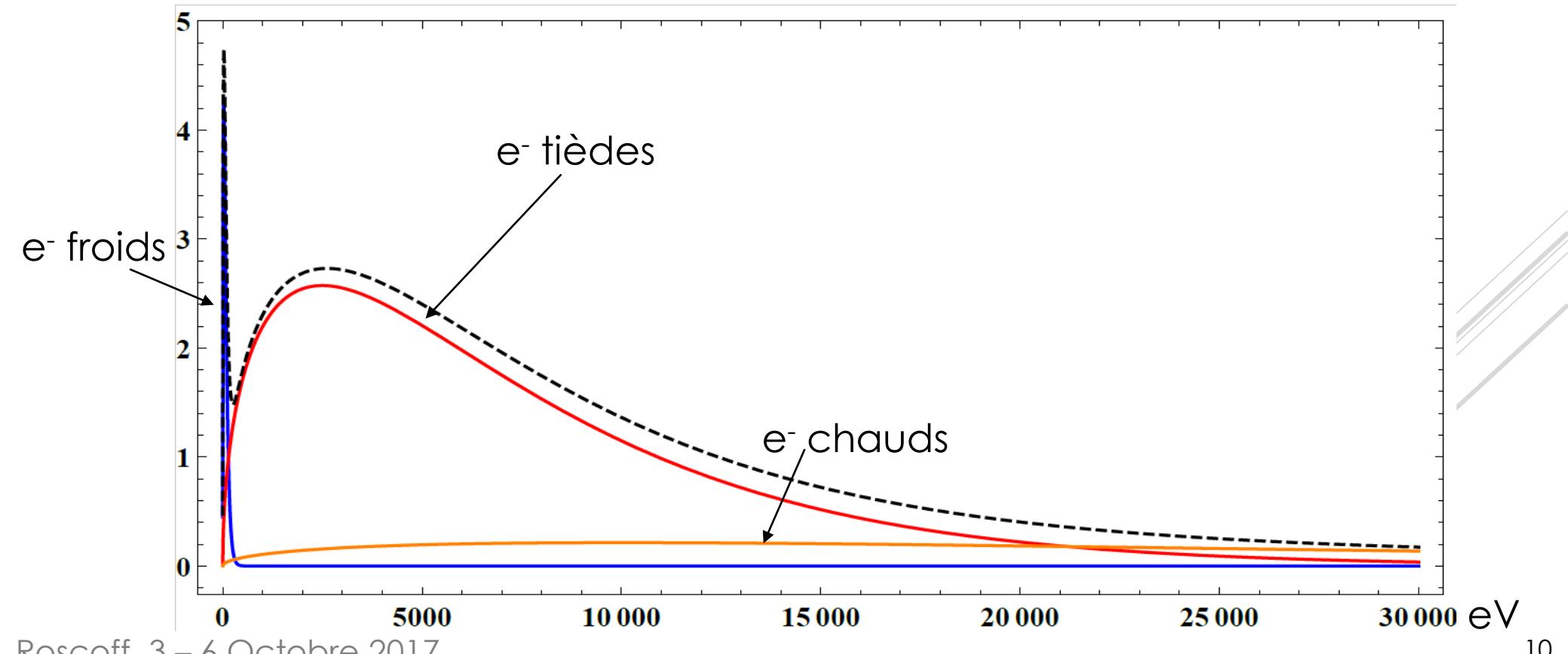
Fonction de distribution en énergie des électrons

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

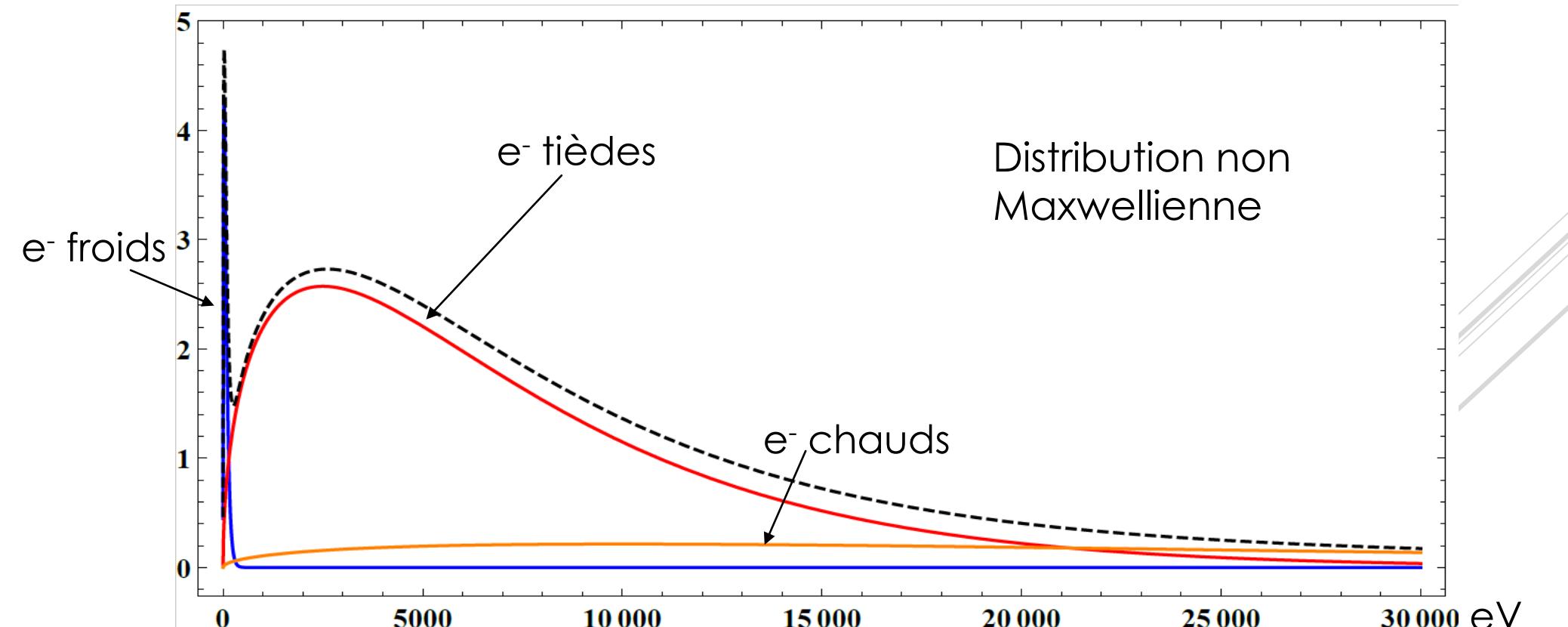
Fonction de distribution en énergie des électrons

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)



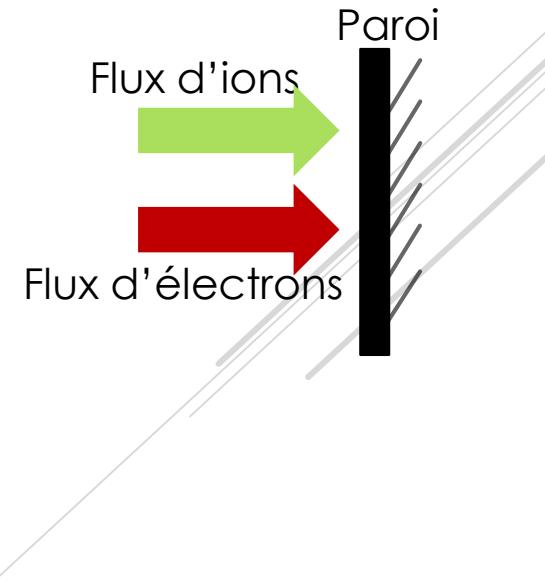
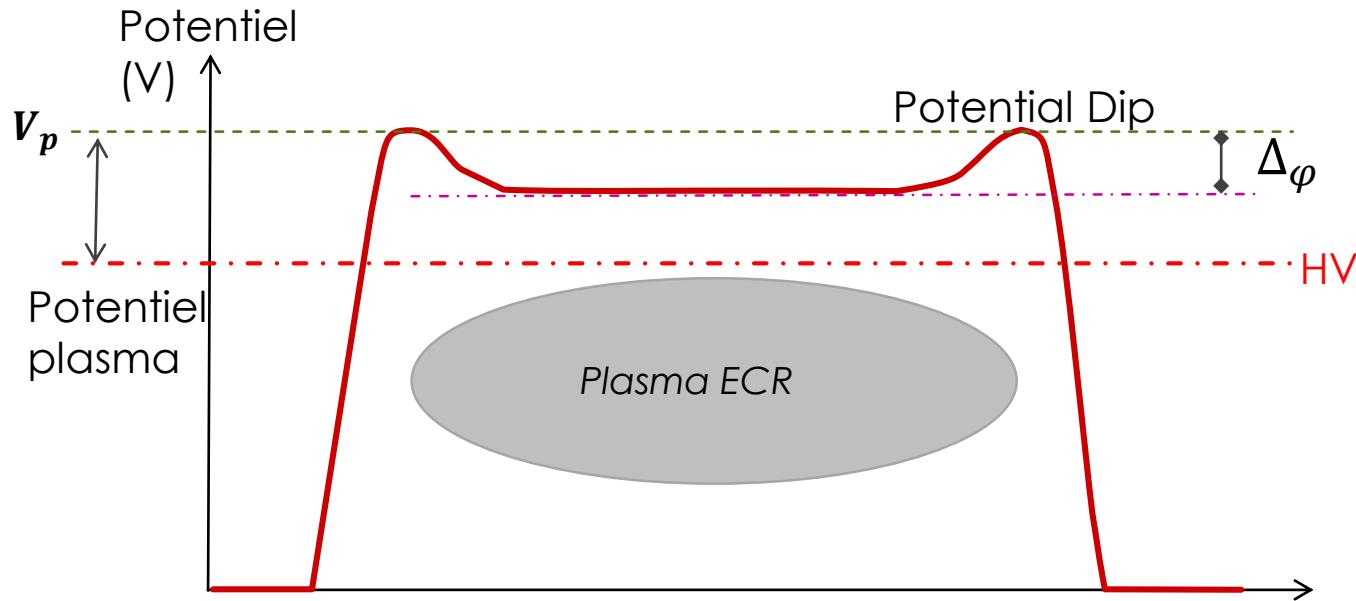
PRINCIPE D'UNE SOURCE D'IONS ECR

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

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



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

$$P_{collage} = C_o$$

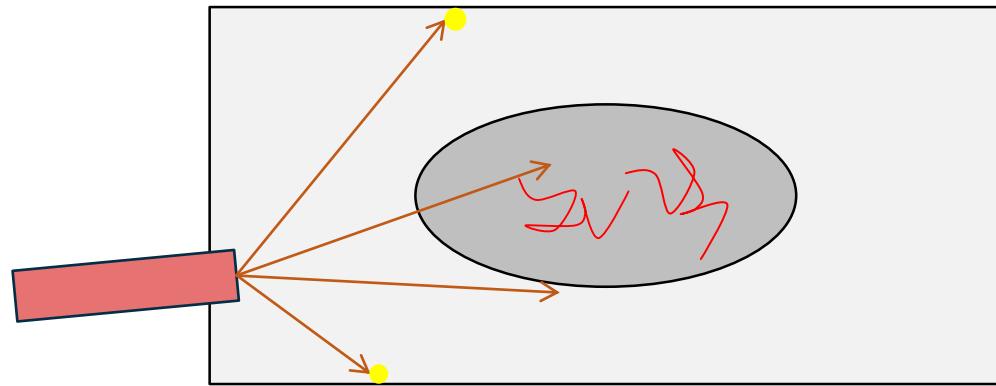
C_o le coefficient de collage

Réémission des particules

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

τ 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

$$P_{collage} = C_o$$

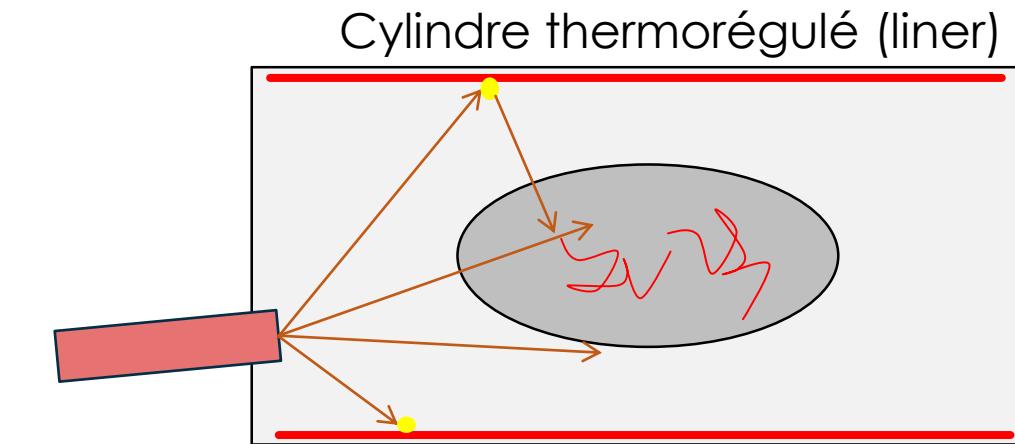
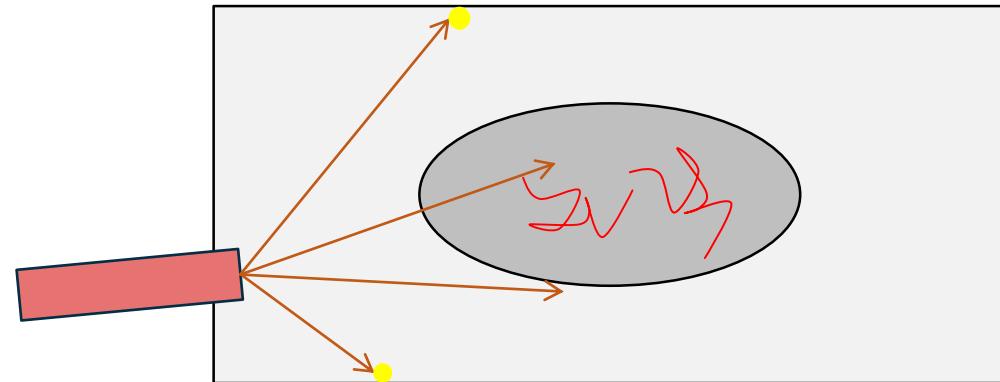
C_o le coefficient de collage

Réémission des particules

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

τ temps de collage moyen

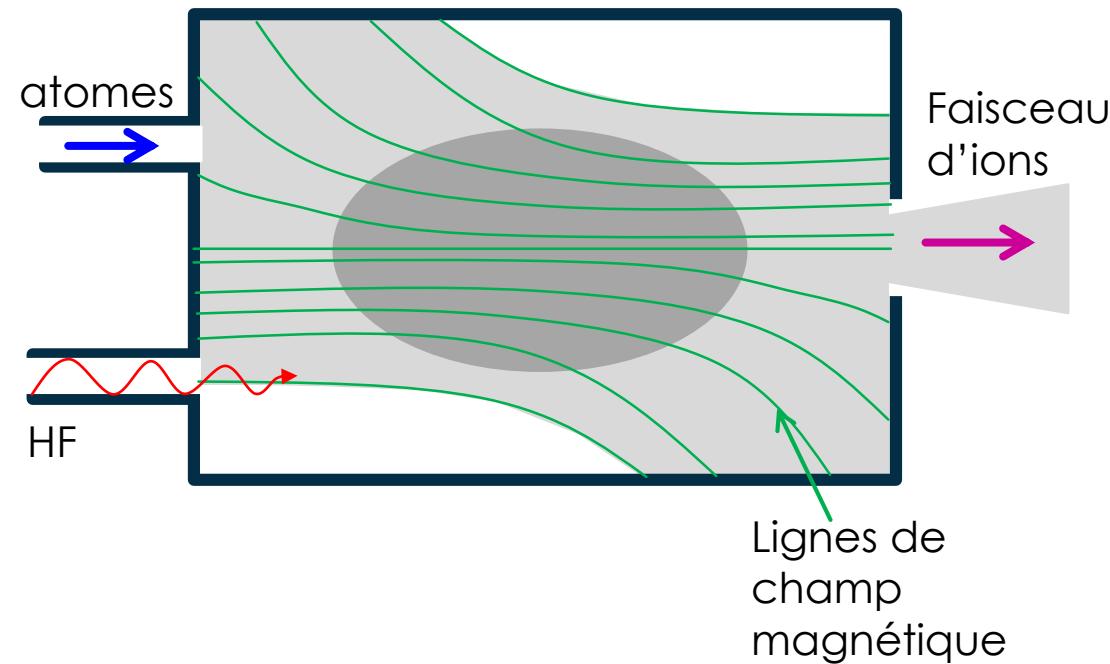
E_d énergie de liaison



Amélioration efficacité attendue

MODÉLISATION D'UNE SOURCE D'IONS ECR

Système considéré



Distribution de charges des ions
Comportement ions différents
électrons

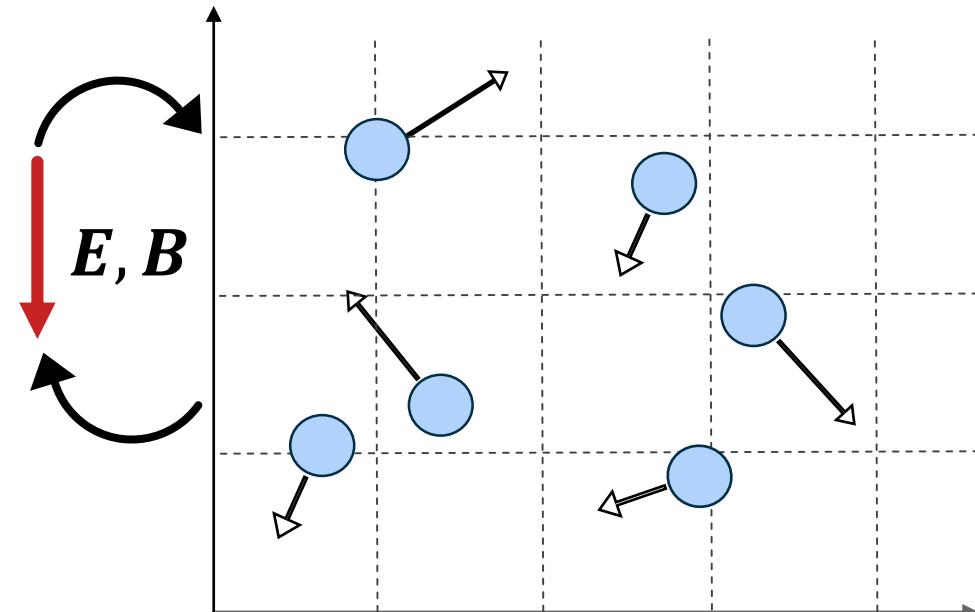
Modélisation d'un liner
Modélisation du ménisque
d'extraction de faisceau

Hypothèses de travail
Pas de chauffage des électrons
Pas de propagation particulière des électrons

MODÉLISATION D'UNE SOURCE D'IONS ECR

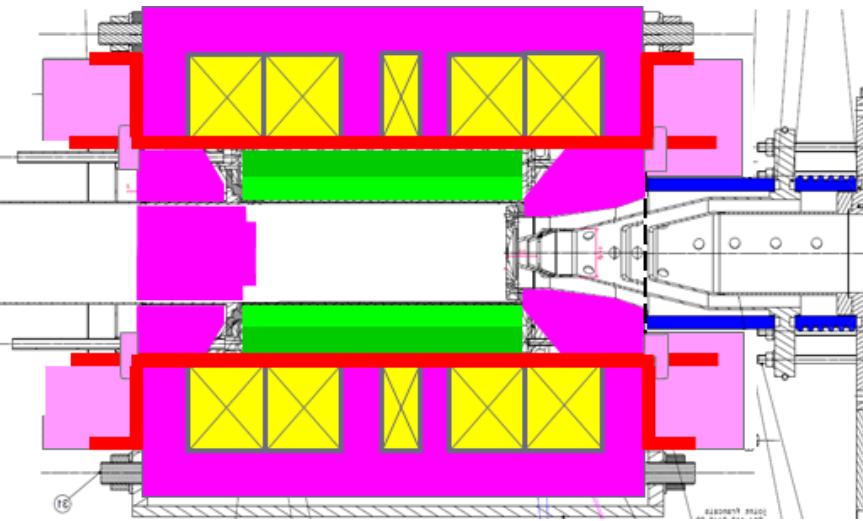
Modélisation Particle In Cell

- 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



A pour objectif la production d'ions métalliques

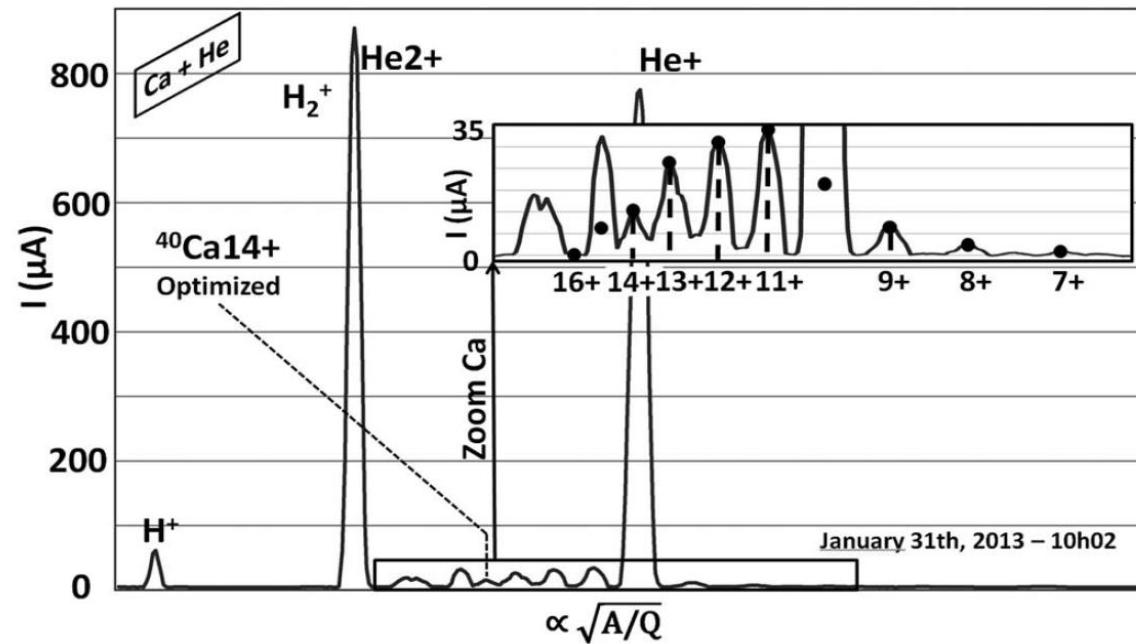
Phoenix V3 pour Spiral2

Longueur de 220 mm

Rayon de 46 mm

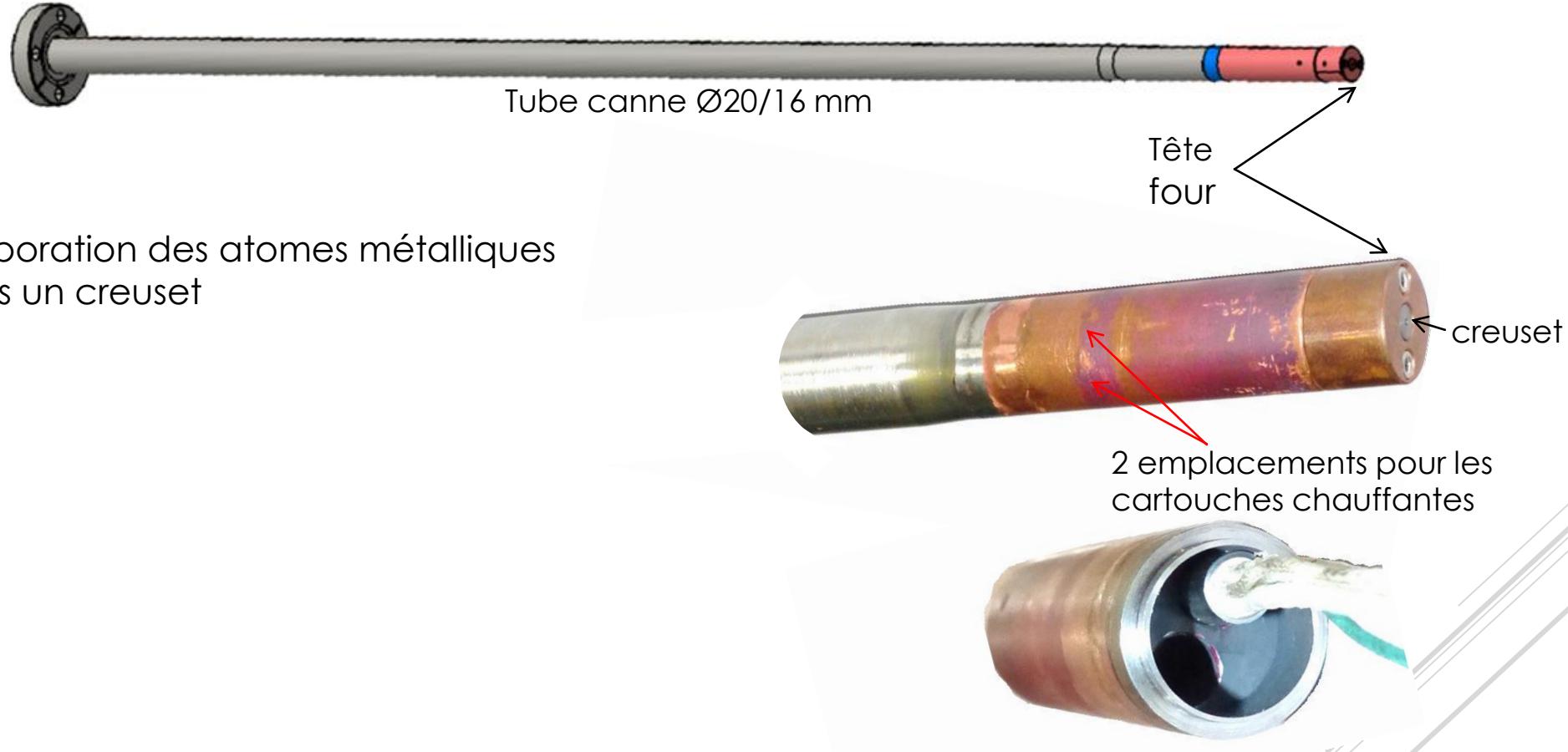
Volume de 1,45 litre

Zone ECR de 95 cm³



PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

Évaporation d'ions métalliques



Évaporation des atomes métalliques
dans un creuset

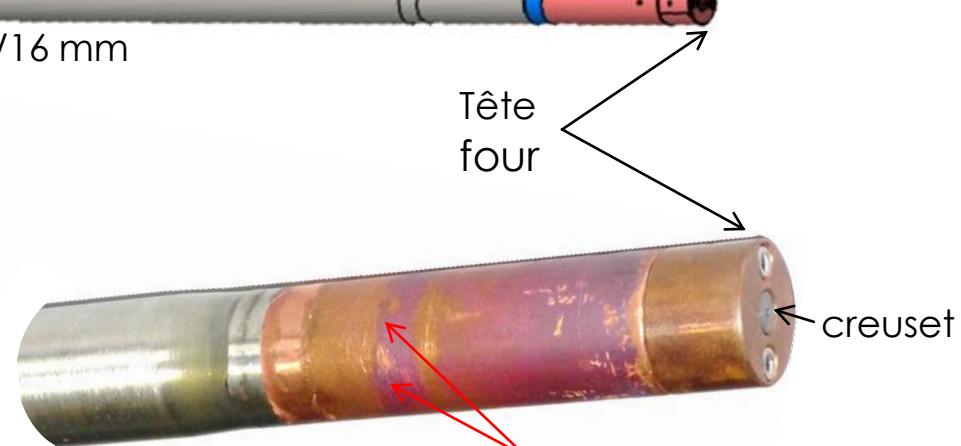
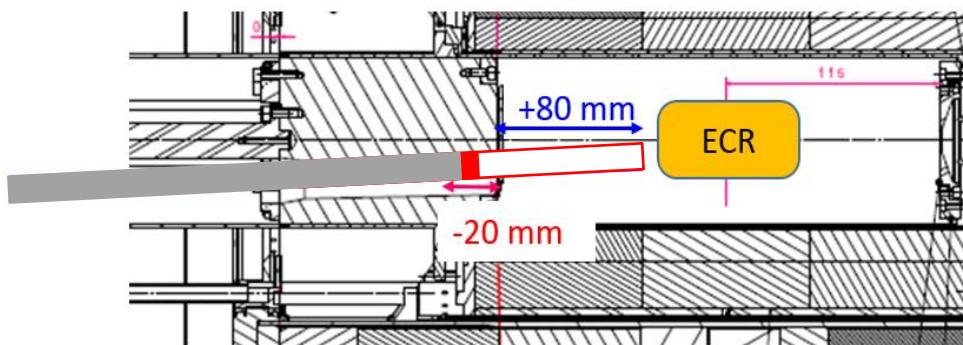
PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

Évaporation d'ions métalliques



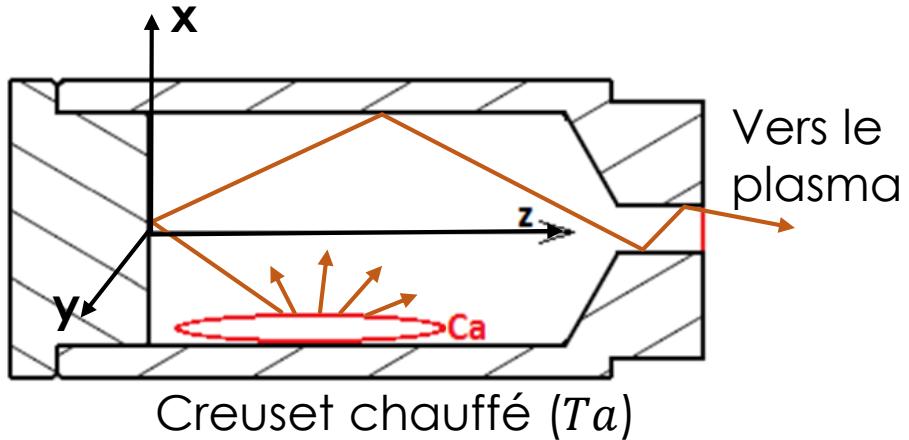
Évaporation des atomes métalliques
dans un creuset

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



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

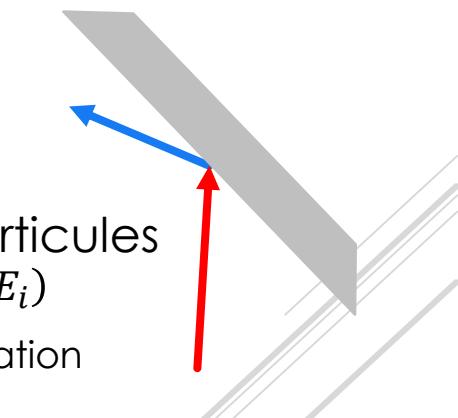
$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{E_d}{kT}\right)}$$

Thermalisation des particules

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

α coefficient d'accommodation
thermique

C_o et E_d inconnues pour le couple
Ca-Ta



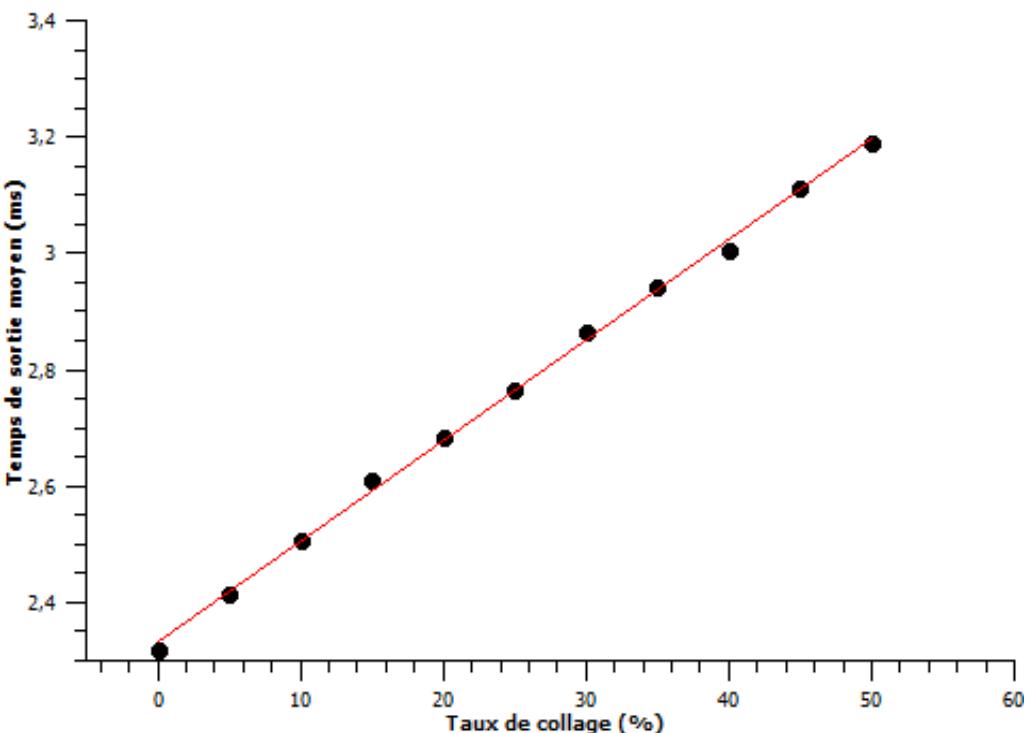
PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

Validation du code de simulation du four

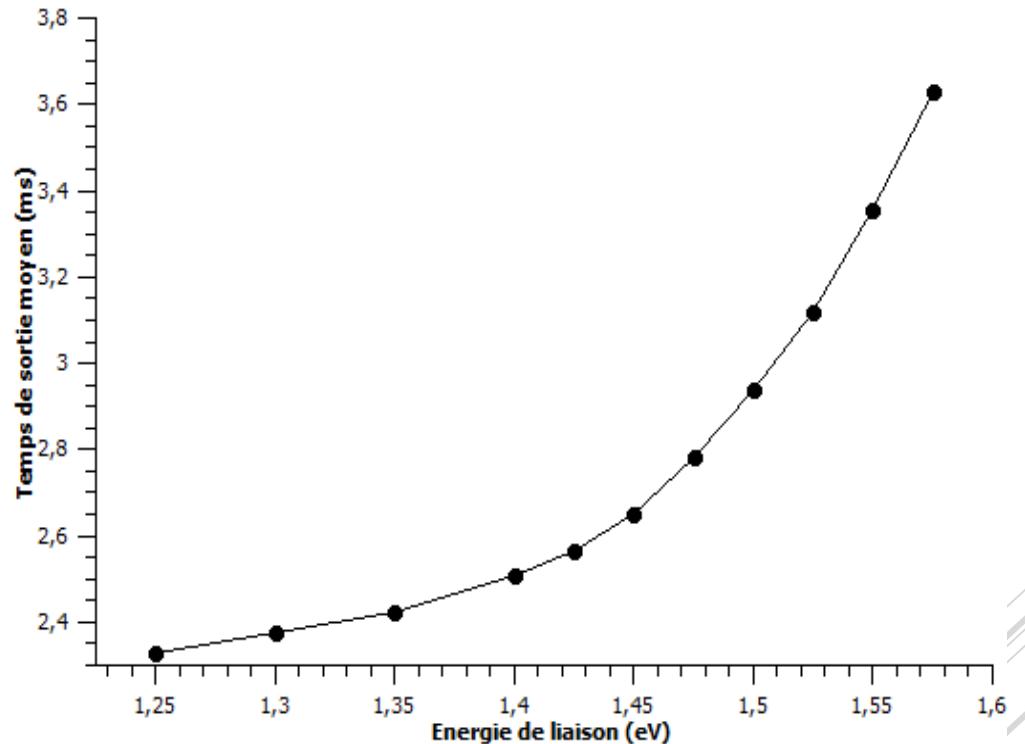
Taux de collage des particules

$$P_{collage} = C_o$$

Temps de sortie en fonction du taux de collage



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

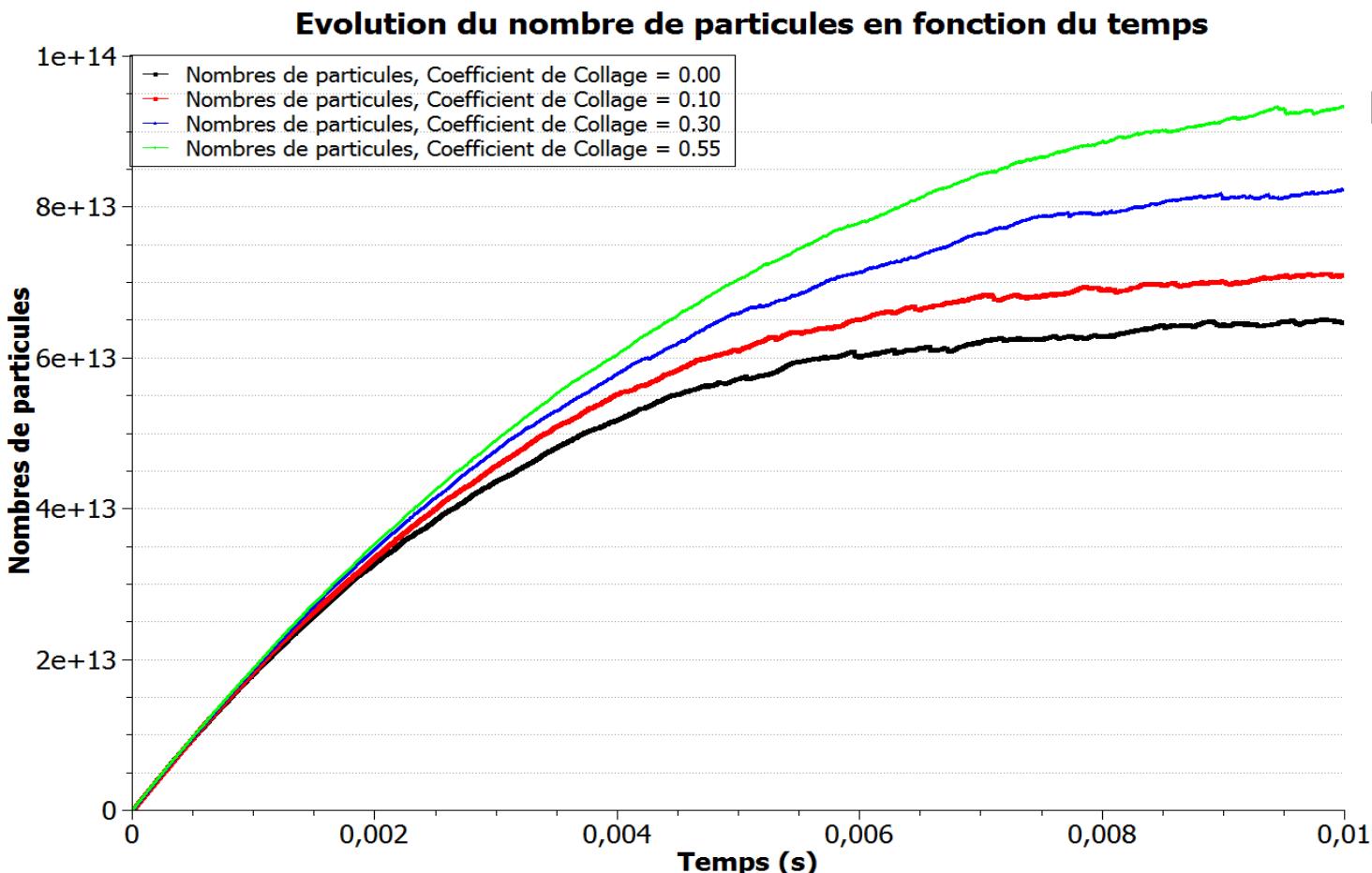


Réémission des particules

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

PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

Modélisation du four



Réémission des particules

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

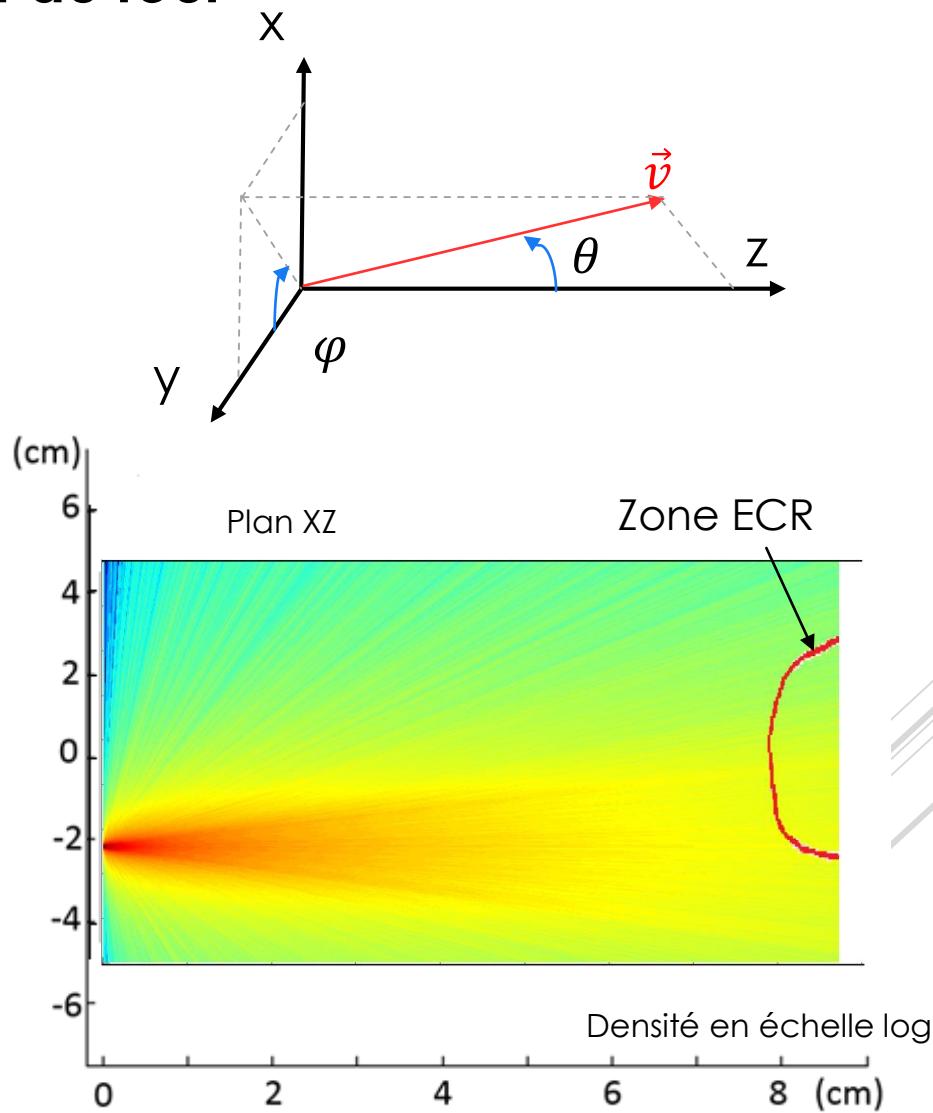
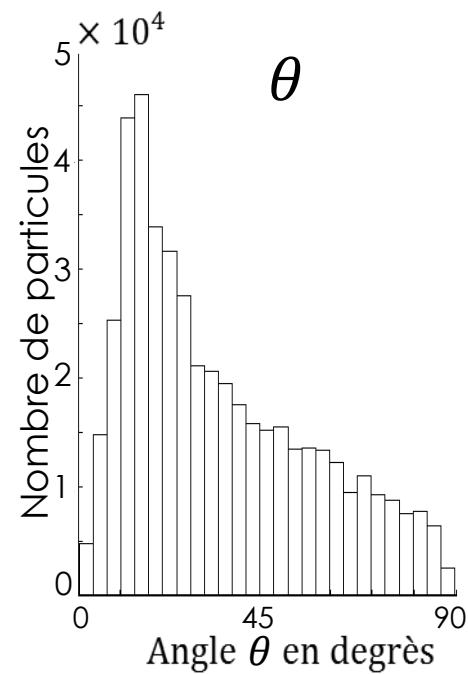
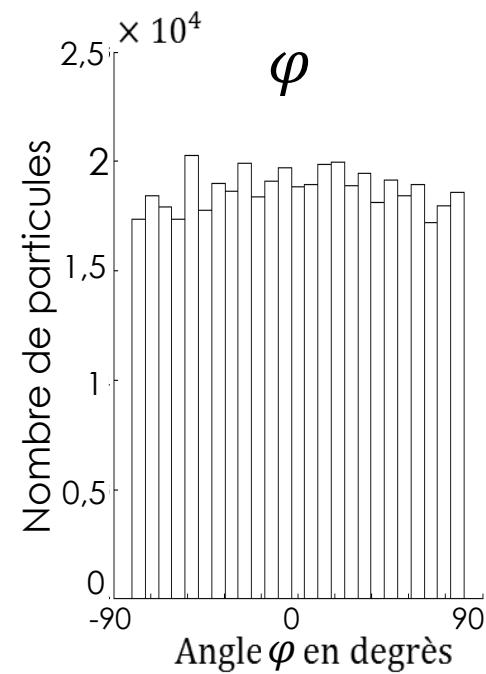
Collage des particules
 $P_{collage} = C_o$

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

PRODUCTION D'IONS MÉTALLIQUES

Résultats de la modélisation du four

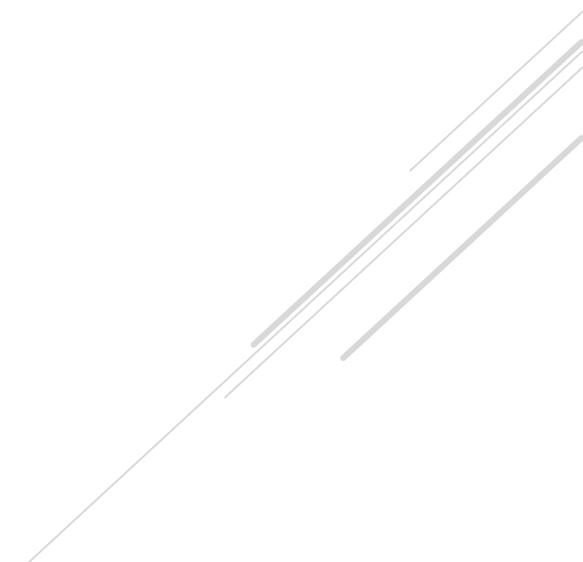
Distribution homogène en φ et inhomogène en θ



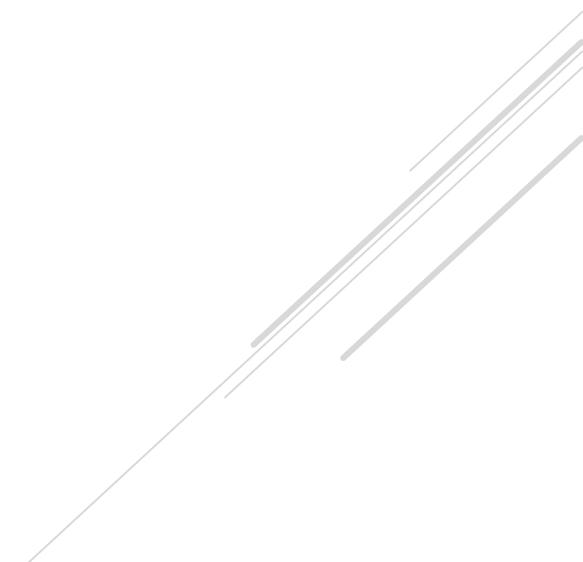
Liner pour la ré-évaporation d'atomes métalliques

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

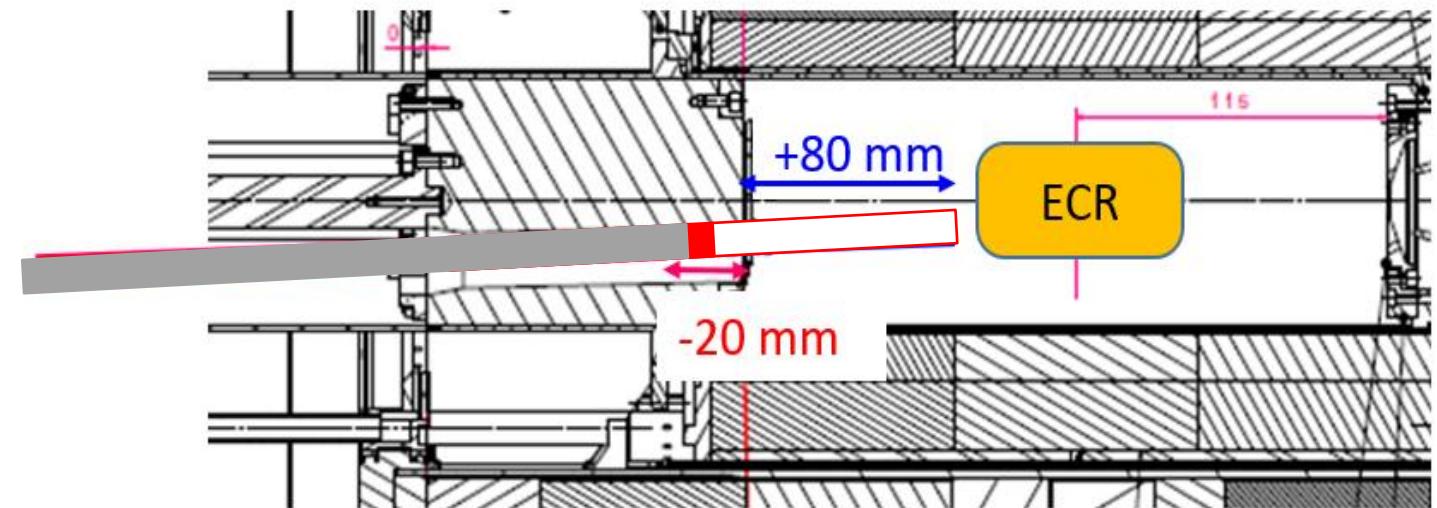


Merci pour votre attention



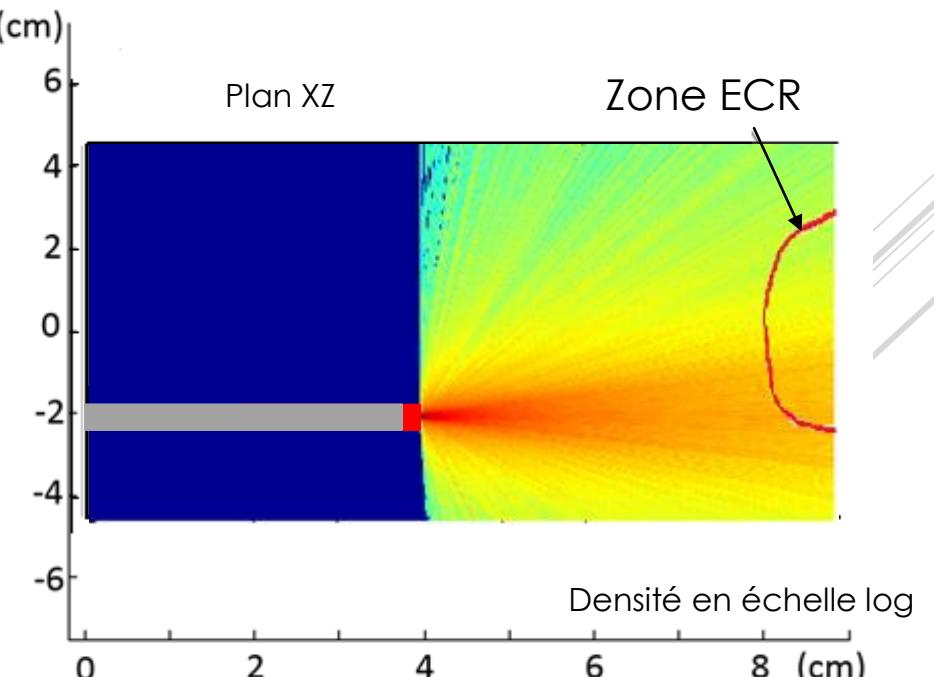
POSITION DU CREUSET DANS LA SOURCE

La proximité avec la zone ECR augmente le rendement

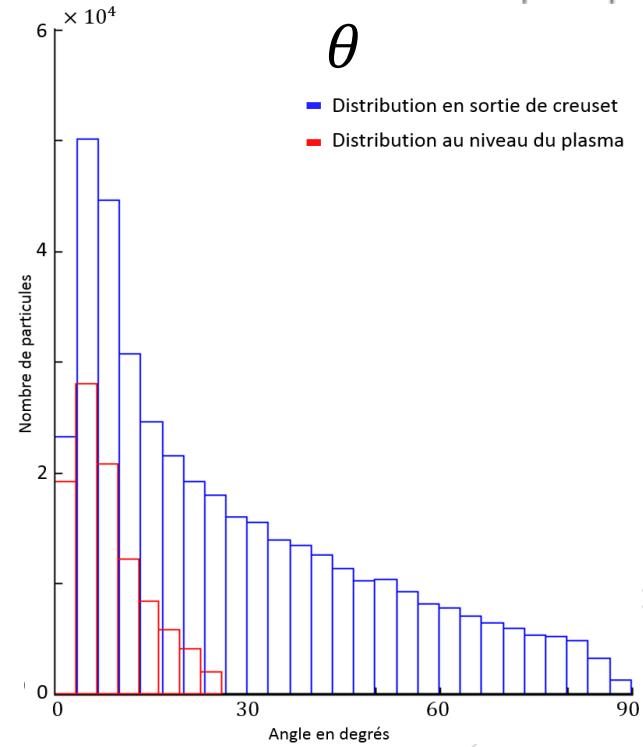
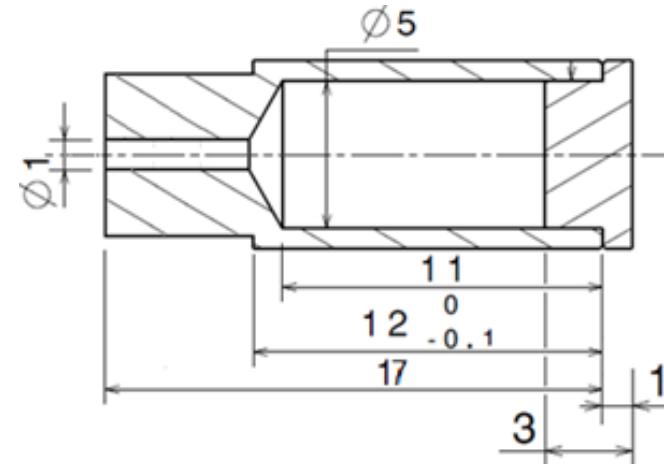
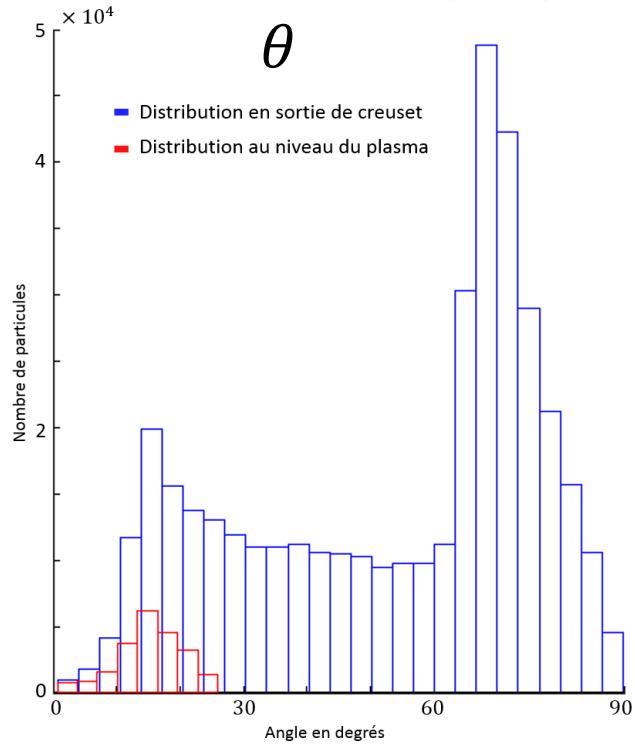
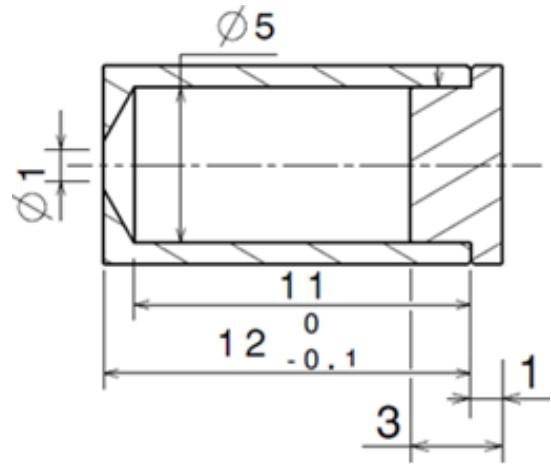


À +0mm, 100°C de chauffage dû au plasma

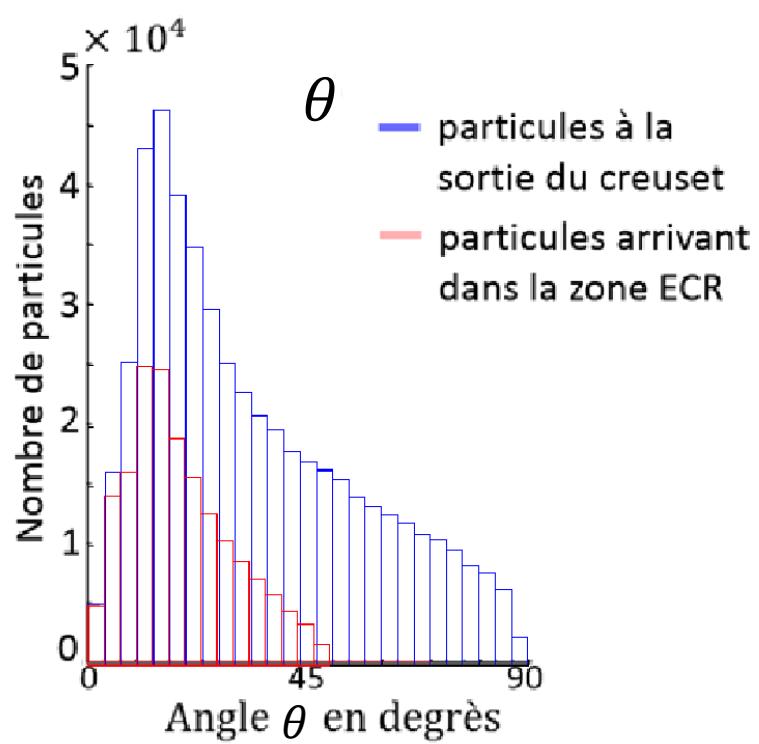
Évaporation du Ca à plus de 350°C



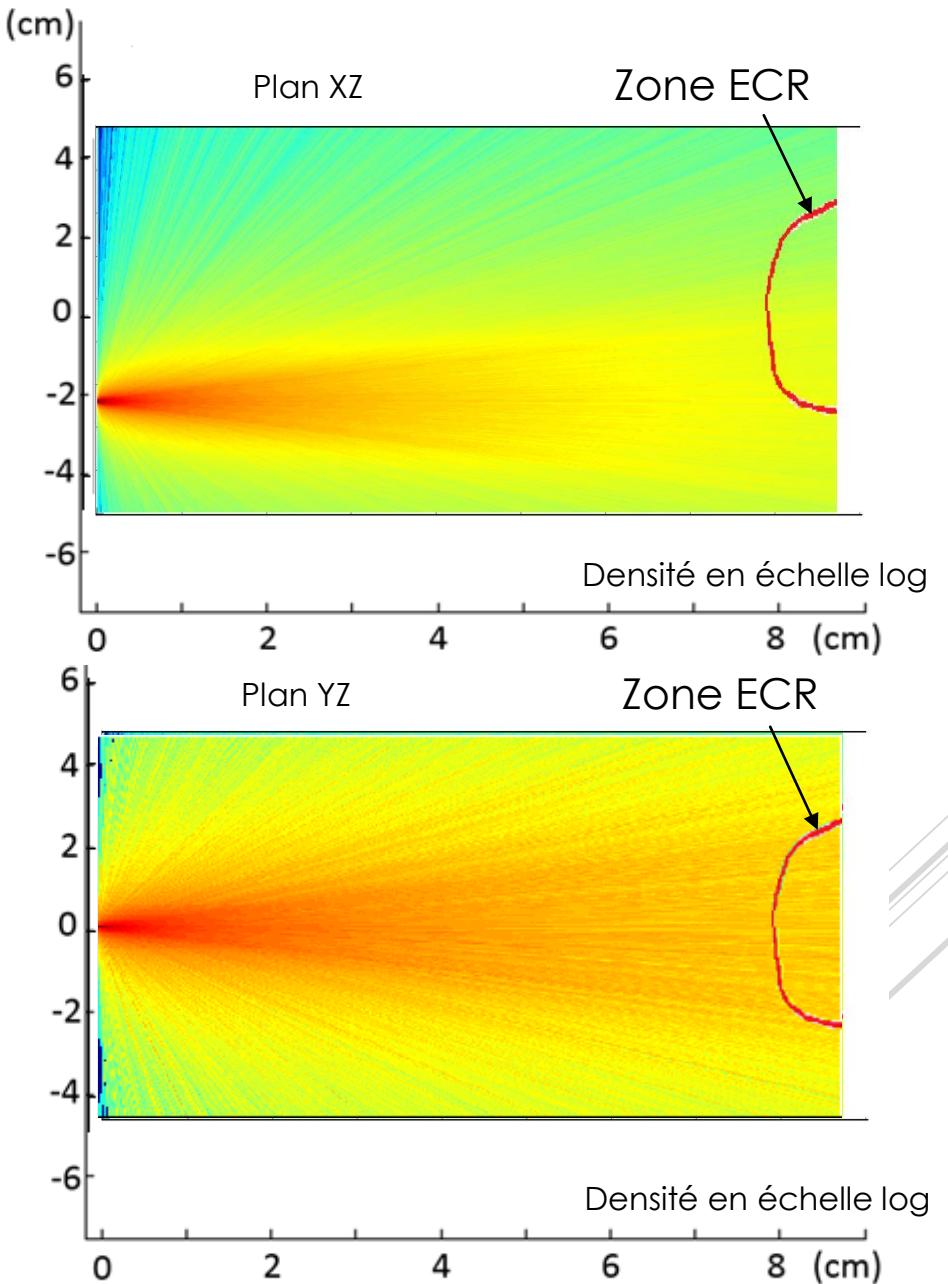
SIMULATION DU CREUSET



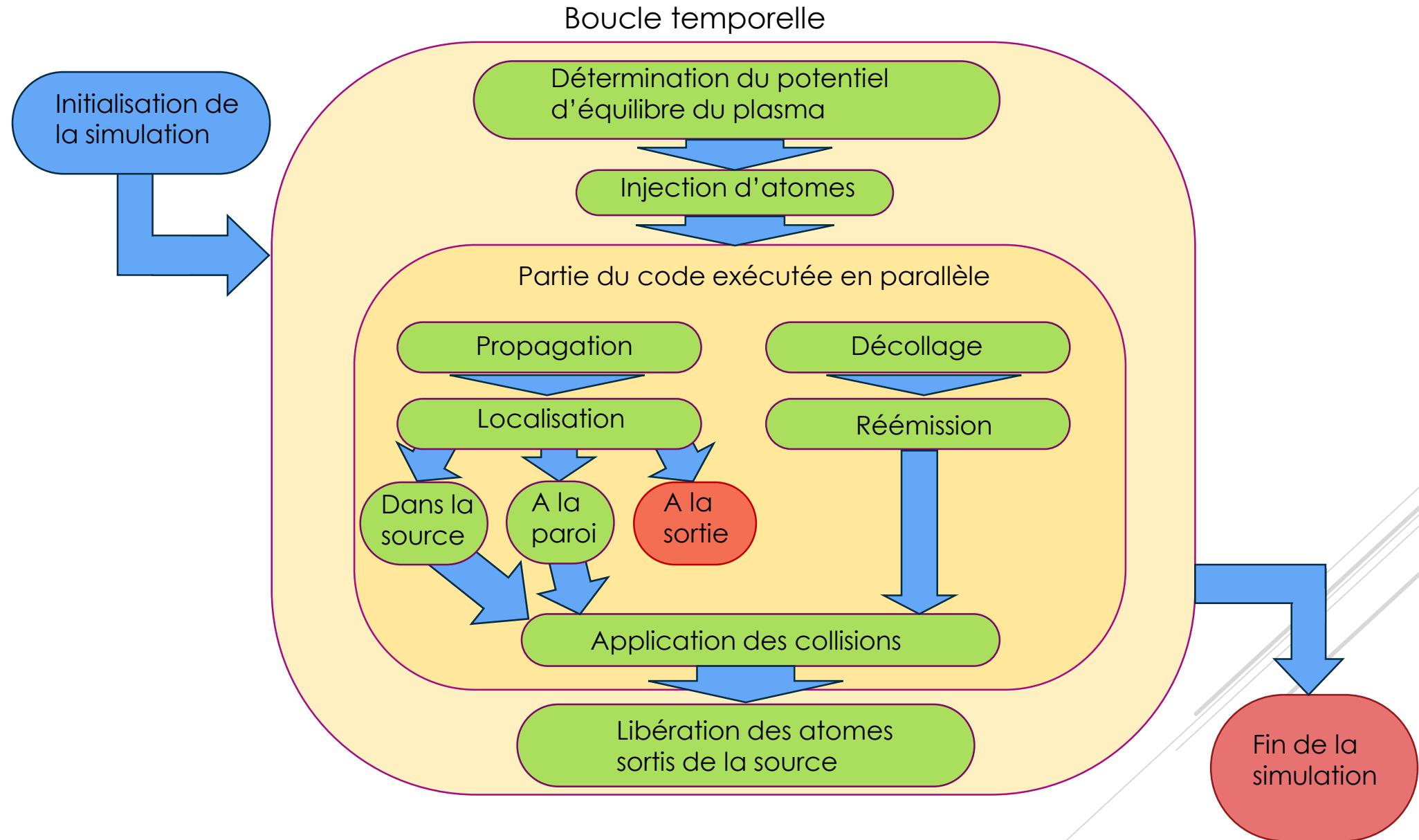
DE LA SORTIE DU CREUSET À LA ZONE ECR



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.

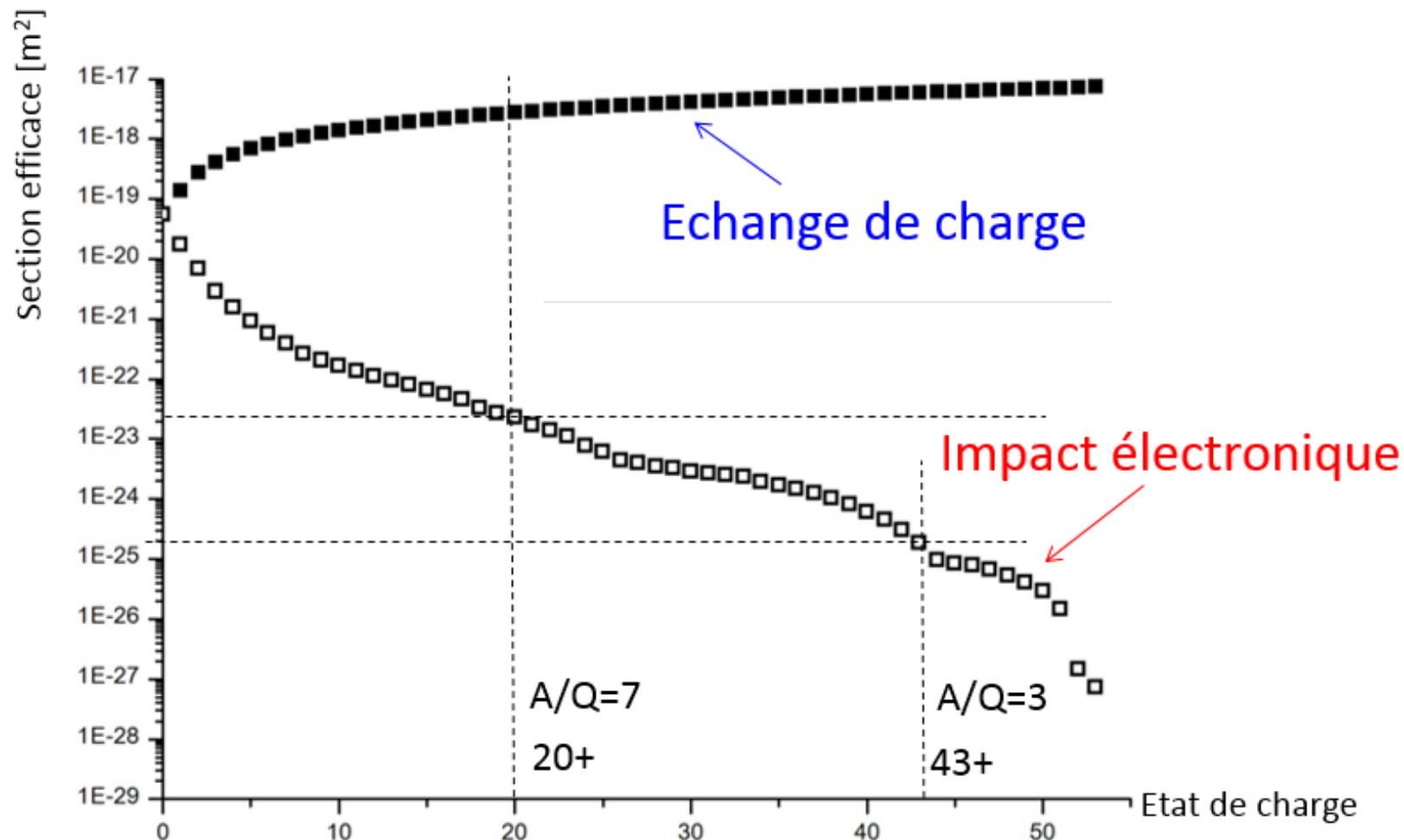


ORGANIGRAMME DU CODE



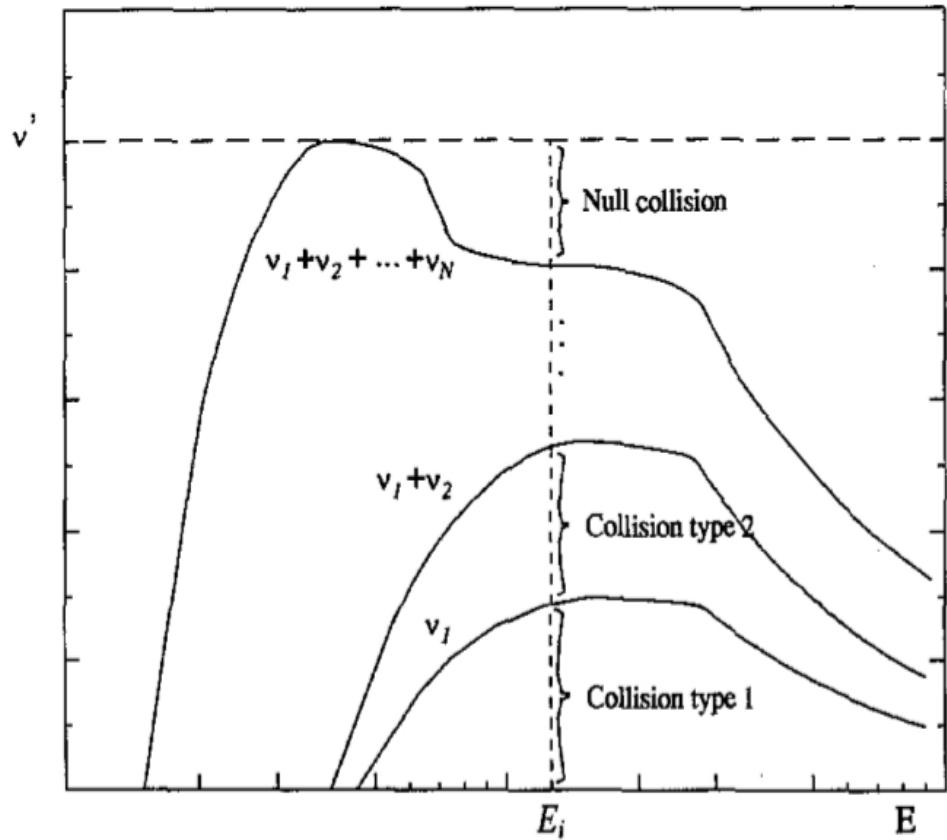
SECTIONS EFFICACES D'IONISATIONS ET D'ÉCHANGE DE CHARGE

$^{128}\text{Xenon}$



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)

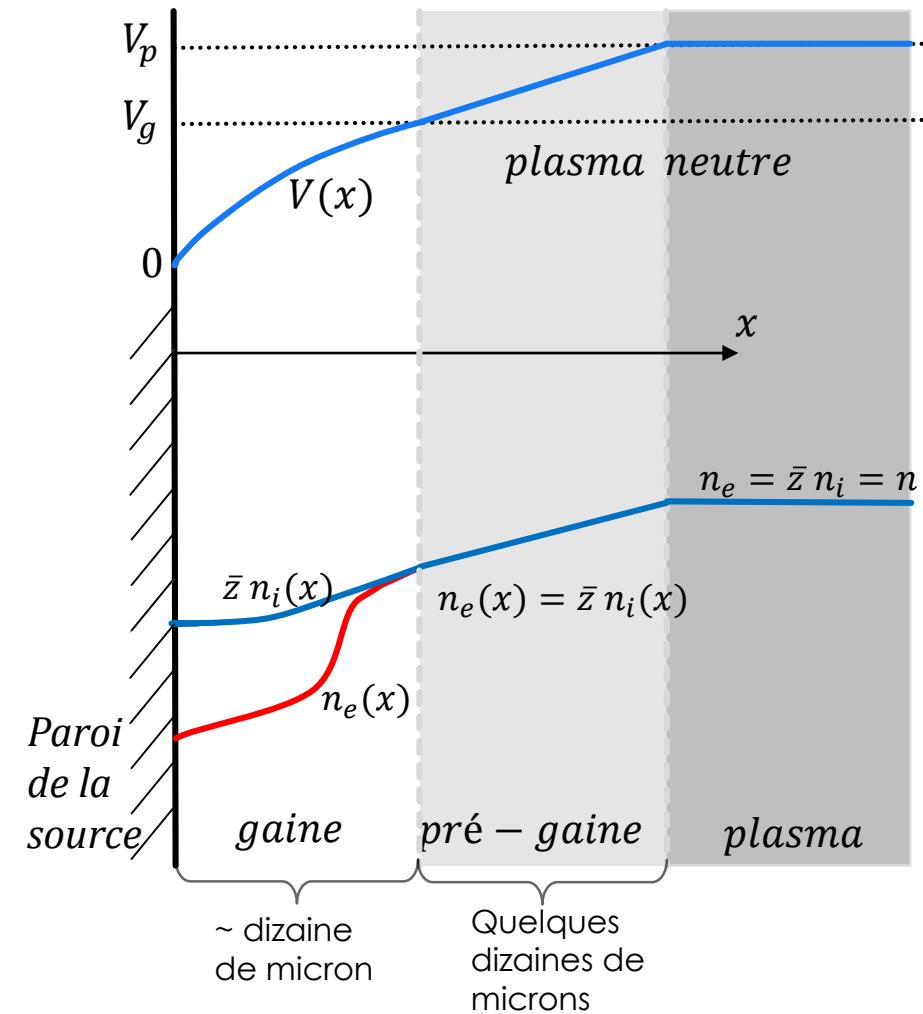
Ionisation

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



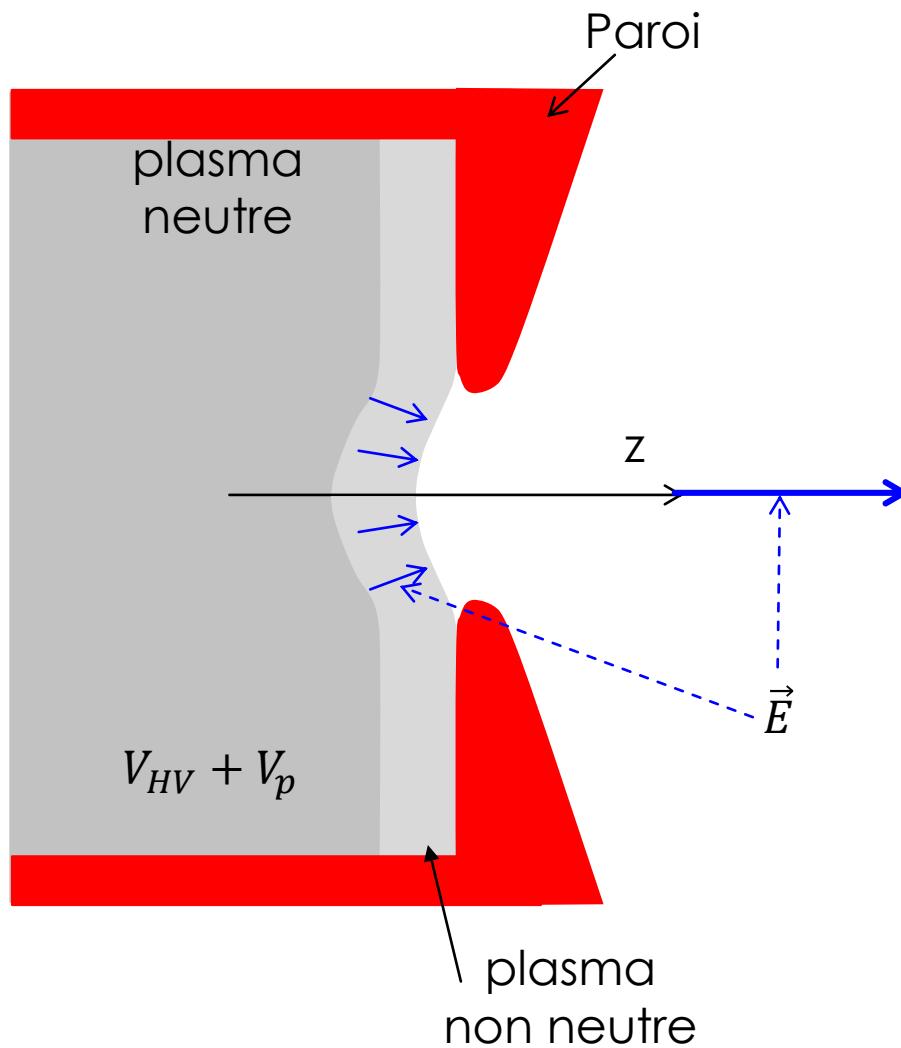
Densité plasma $\sim 10^{12} / \text{cm}^3$

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