

# Atelier Calcul pour Accelérateur GDR SCIPAC – 10/10/2024



## Simulation des Sources d'Ions Multichargés

*A. Cernuschi<sup>1</sup> and T. Thuillier<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>CNRS-LPSC – Grenoble INP - Université Grenoble Alpes*

*Remerciement au GdR SCIPAC pour la Bourse Sébastien Bousson.*



# Contenu

---

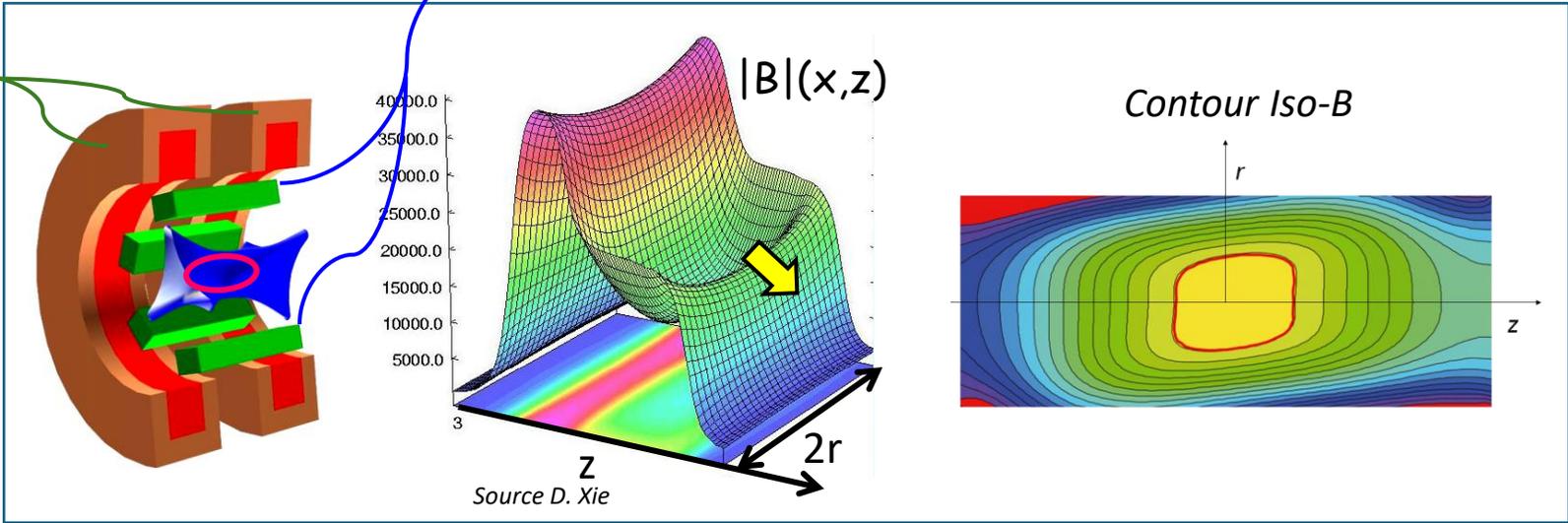
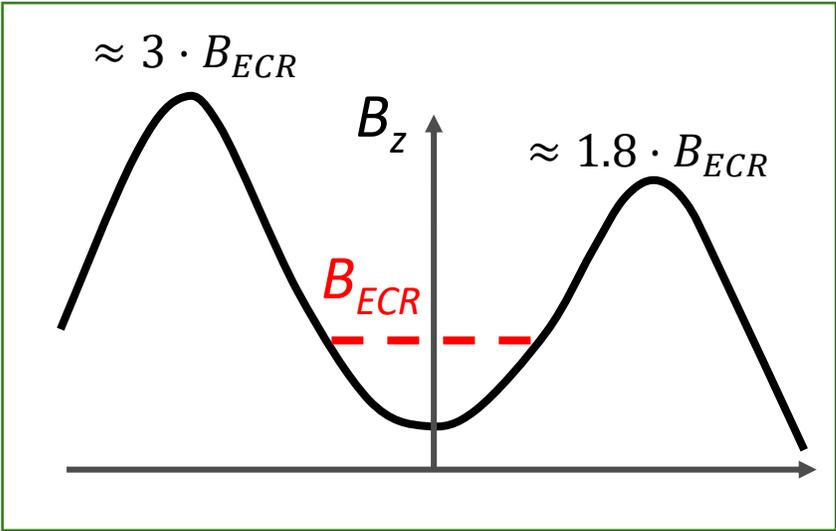
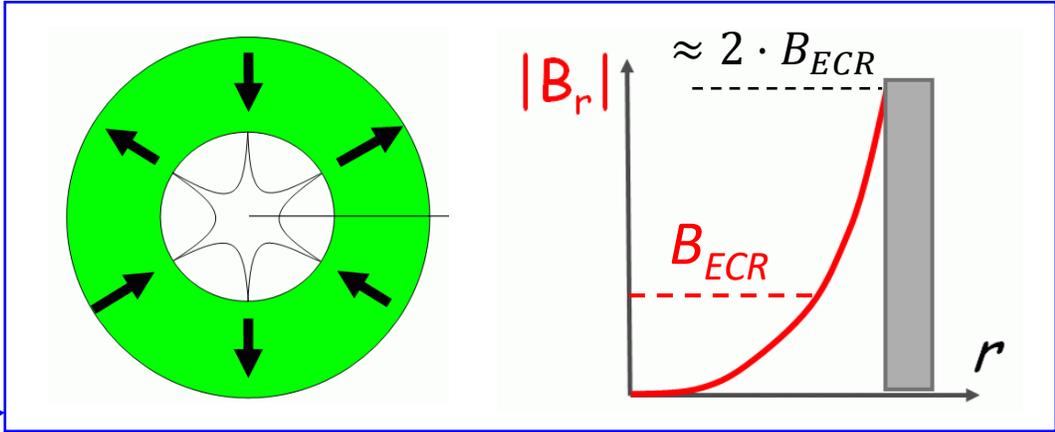
- 1) Spécificité des sources d'ions ECR multichargés:**
  - a) Champ magnétique.
  - b) Formation de plasma.
- 2) Physique à modéliser:**
  - a) Ordres de grandeurs.
  - b) Difficultés numériques pour simuler un plasma d'ECRIS.
  - c) Extraction de la gaine du plasma.
- 3) Etat de l'art international pour la simulation.**
- 4) Champs de recherche ouverts:**
  - a) Etat des lieux de la communauté de simulation ECRIS en France.
  - b) Perspectives des simulations d'ECRIS.

# Sources d'ions ECR multichargés – Champ magnétique

## Structure à Minimum-B

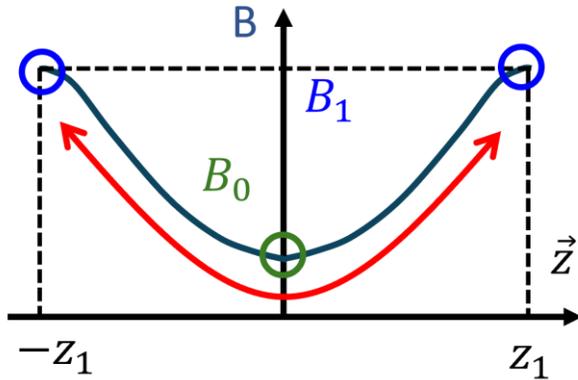
Superposition d'un **miroir magnétique axial** et d'un **miroir magnétique radial multipolaire**.

- La surface ECR ( $|B|=B_{ECR}$ ) est fermée.
- Les particules sont confinées.

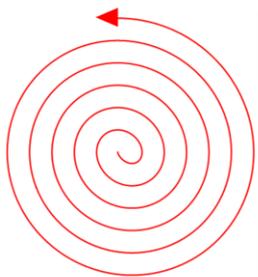


# Sources d'ions ECR multichargés – Formation de plasma

1)



Électrons **confinés** à travers un **miroir magnétique** et **chauffés** par Résonance Cyclotron Électronique (RCE).



$\odot \vec{B}$   
 $\rightarrow \vec{E}(t)$   
*e<sup>-</sup> tournant à une fréquence  $\Omega$*

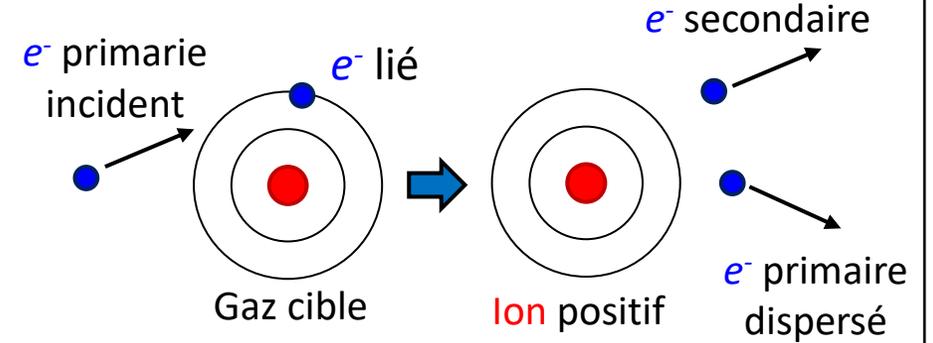
La surface ECR fermée permet de chauffer à chaque passage.

$$2\pi f_{HF} = \frac{eB}{\gamma m_e}$$

2)

Atomes ionisés plusieurs fois par impact électronique.

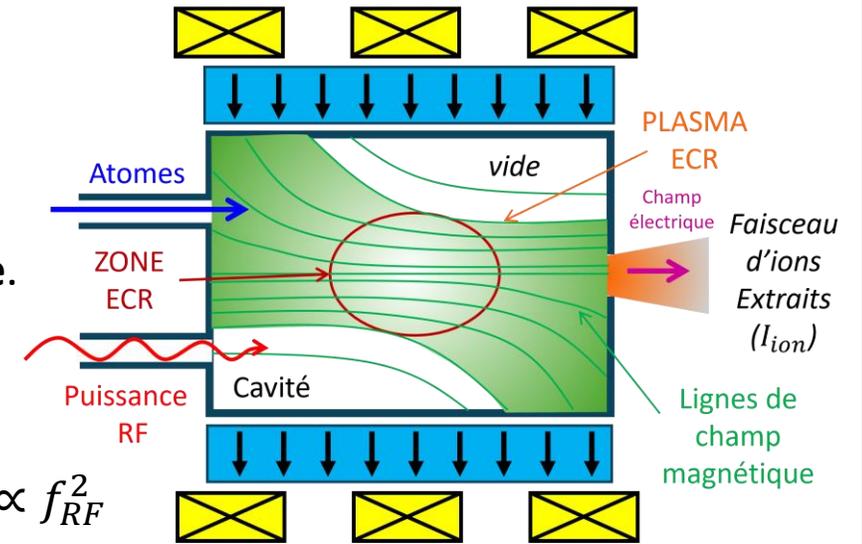
➤ Ions confinés magnétiquement et électrostatiquement.



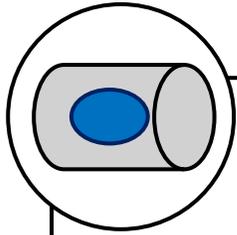
3)

Faisceau d'ions extrait par un champ électrique.

- $B \propto f_{RF}$
- $I_{ion} \propto n_{plasma} \propto f_{RF}^2$

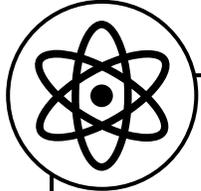


# Paramètres physiques – Ordres de grandeur



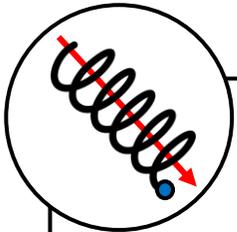
Grand volume de chambre à plasma: de 0.15 à 15 litres.

Plasma magnétisé, inhomogène, anisotrope, hors équilibre thermodynamique.



Population d'ions froids (1-20 eV).

- Confinés électrostatiquement et magnétiquement.
- Temps de multi-ionisation + extraction: 10 – 1000  $\mu\text{s}$ .

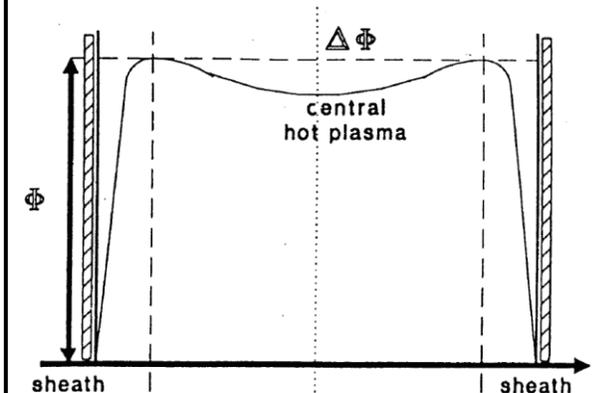


Population électronique: non-maxwellienne temperatures.

- $e^-$  froids peu confines:  $\sim 1 - 100 \text{ eV}$ ,  $t \sim 1 \mu\text{s}$ ,  $\uparrow$  nombreux.
- $e^-$  chauds confines:  $\sim 1 - 10 \text{ keV}$ ,  $t \sim 10 - 100 \mu\text{s}$ ,  $\uparrow$  nombreux.
- $e^-$  très chauds très confines:  $\sim 10 - 1000 \text{ keV}$ ,  $t \sim 100 - 1000 \mu\text{s}$ ,  $\downarrow$  nombreux.

Interaction Plasma-Paroï: effets non négligeable.

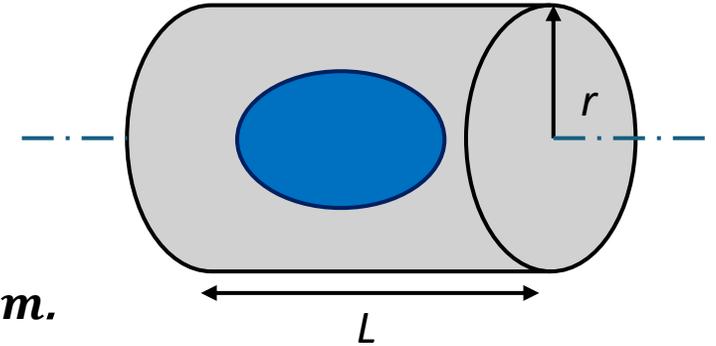
- Pulvérisation.
- Émission d'électrons secondaires.
- Thermodynamique et Chimie de surface.
- Rebonds des électrons.



# Simulation du plasma d'ECRIS: difficulté d'utiliser un PIC

Considérons la source ECRIS suivante:

- **Volume  $\approx 1$  litre** ( $r = 38$  mm,  $L = 225$  mm).
- **Temps = 1 ms.**
- $f_{RF}$  entre 2.45 et 28 GHz = **28 GHz.**
- $n_e$  entre  $\sim 10^{10}$  et  $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3} = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .
- $T_e = 5 \text{ keV}$ .
- $T_i = 5 \text{ eV}$ .
- $\lambda_{DB}$  entre  $\sim 2$  et  $\sim 200 \mu\text{m} = 16 \mu\text{m}$ .



Pourquoi pas un PIC ?

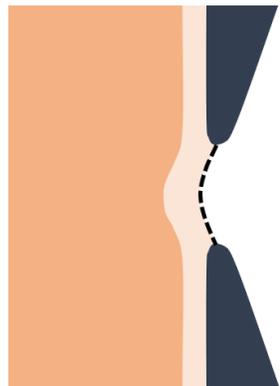
- **Nombre de pas de temps**  $\rightarrow N_t = \begin{cases} 1.7 \cdot 10^9 \text{ steps } (\%T_{RF}) \\ 3.1 \cdot 10^{10} \text{ steps } (CFL \text{ condition}) \end{cases}$
- **Maillage spatial**  $\rightarrow N_x = N_y = 2300, N_z = 13500 \rightarrow N_{xyz} \leq 10^{10}$ 
  - Plus bas si l'on exploite la symétrie
- **Nombre de macroparticules simulées**  $\rightarrow N_{MP} = 2.12 \cdot 10^{11} \text{ particles}$

**Coût de calcul  
énorme pour une  
simulation PIC !**

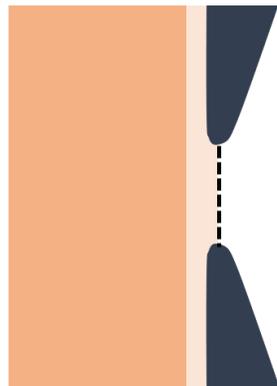
# Extraction de la gaine du plasma

A ce jour pas d'étude avec un code PIC

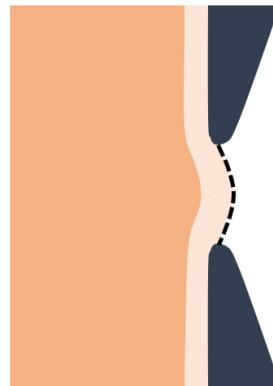
- **Multi-espèces** ioniques.
- Présence d'**électrons** magnétisés chauds **co-extraits**.
- Compensation de **charge d'espace** complexe.
- Fortement auto-consistant → **PIC requis**.
- **Données** d'entrée du plasma de bord **mal connues**.



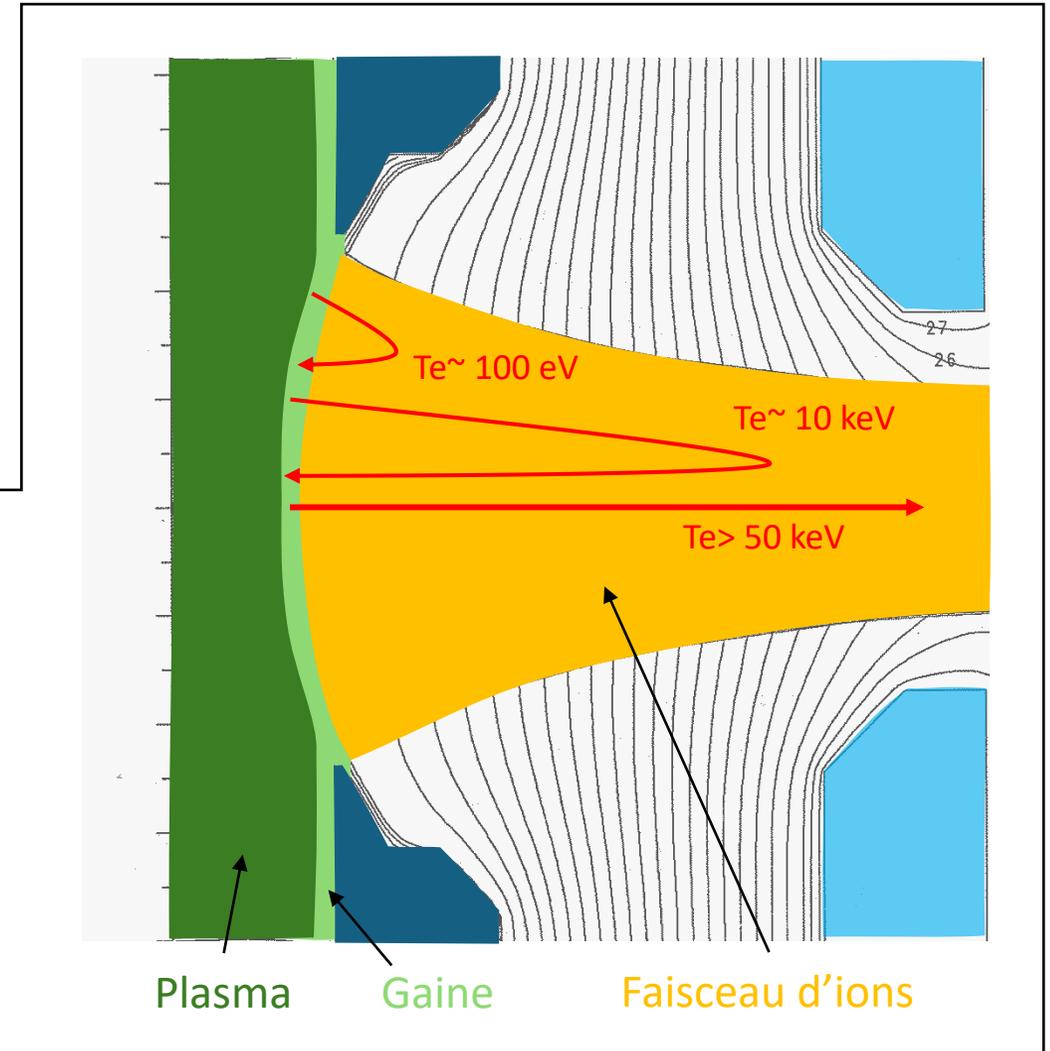
Concave Meniscus



Flat Meniscus



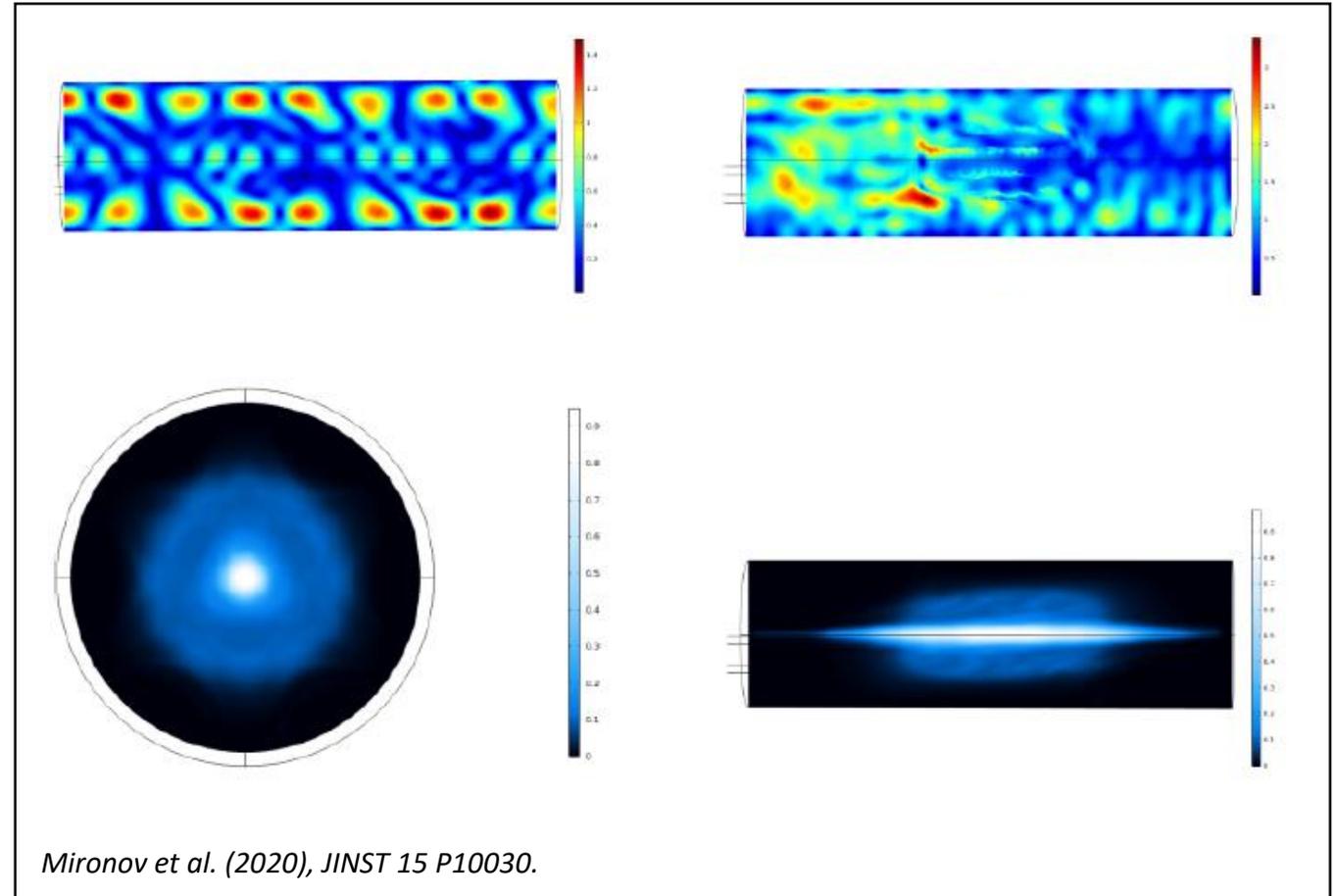
Convex Meniscus



# Etat de l'Art des simulations de source ECR (1)

## Code NAM-ECRIS (JINR, Russie)

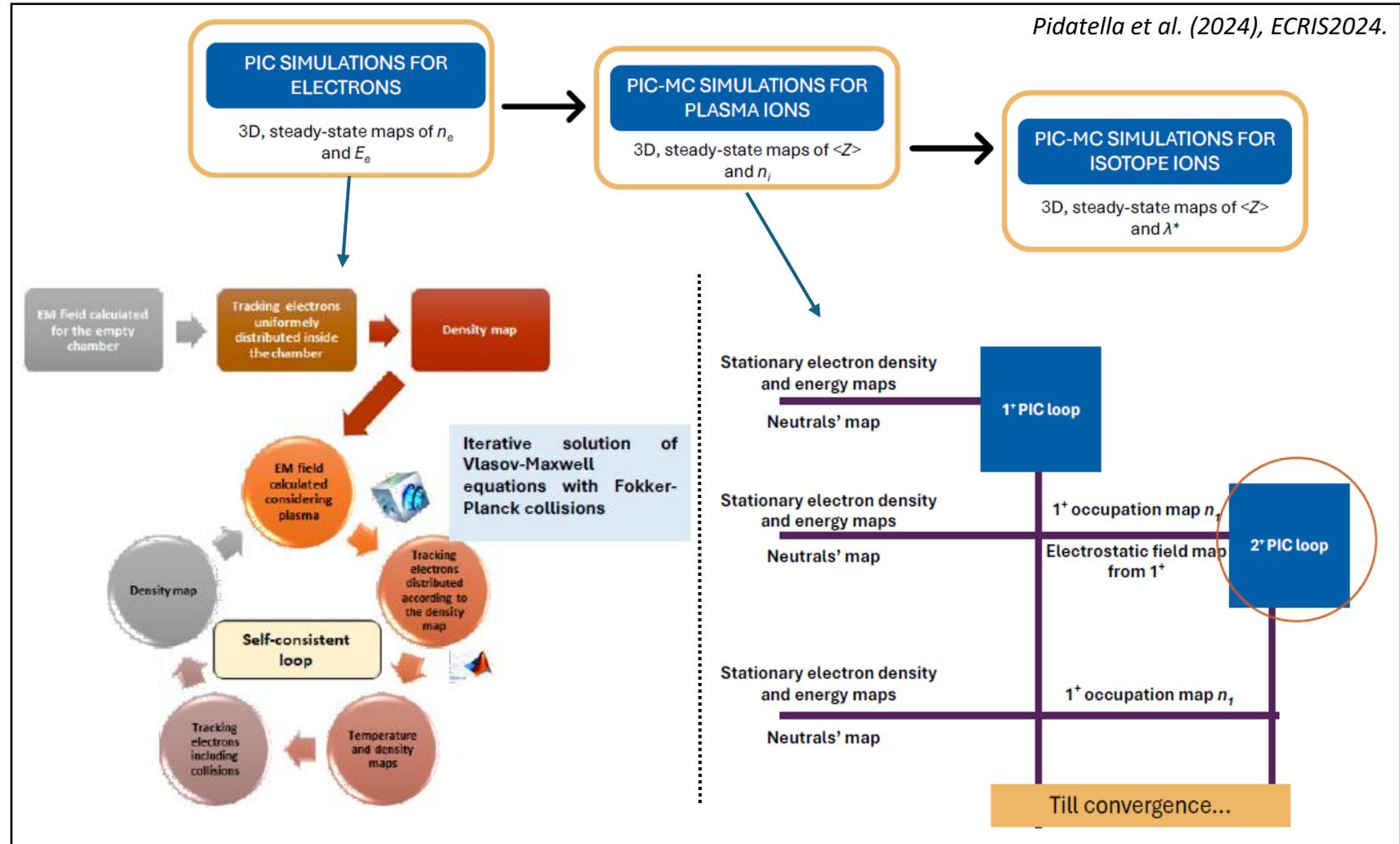
- 20 ans de développement itératif.
- **Propagation itérative** d'ions puis d'électrons à travers un **PIC électrostatique stationnaire**.
  - Taille de maille  $> 1 \text{ mm}$ .
  - Collisions élastiques et inélastiques.
  - Calcul 1 journée sur  $\approx 20$  cœurs.
  - Pas de gaine plasma.
- Calcul du **mode RF** de la cavité avec **interaction onde-plasma** (COMSOL Multiphysics).



# Etat de l'Art des simulations de source ECR (2)

## Code INFN (LNL, LNS)

- 15 ans de développement itératif.
- **Propagation itérative** d'ions puis d'électrons à travers un **PIC électrostatique stationnaire**.
- Approche **Monte-Carlo intégrée** pour simuler les **collisions** et les **réactions** (chimiques et nucléaires).
- Calcul du **mode RF** de la cavité avec **interaction onde-plasma** (COMSOL Multiphysics)



# Etat des lieux de la communauté de simulation ECRIS en France

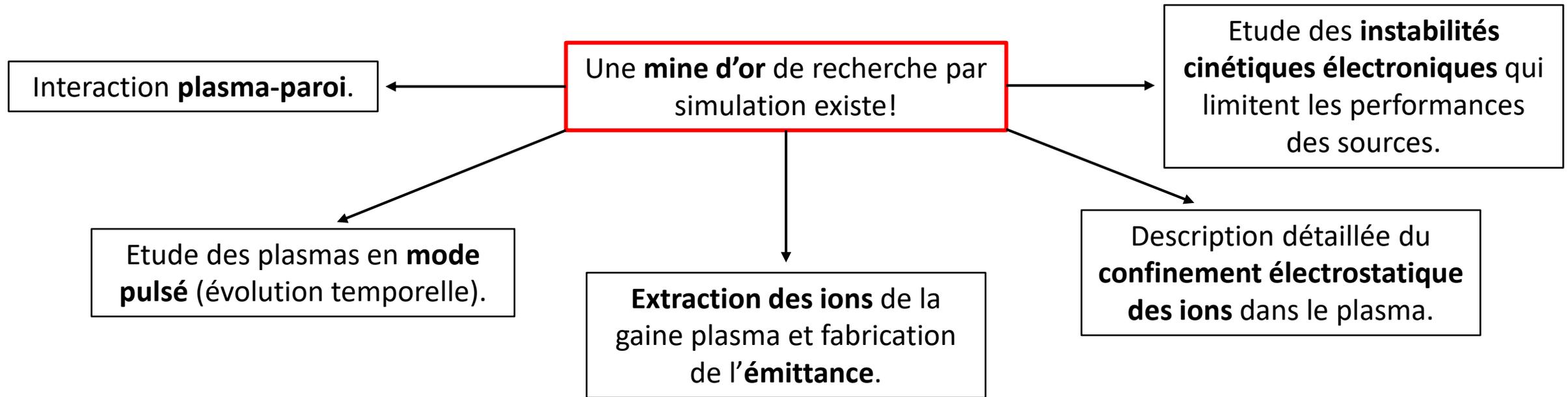
## Communauté sous-critique en France

- 🏠 A. Cernuschi (Doctorant, UGA-LPSC) → 100% ETP.
- 🏠 T. Thuillier (Ingénieur de recherche, CNRS-LPSC) → 30% ETP.
- Et 1 nouvelle équipe simulation **source 1+** au CEA Saclay.

Sujet très **riche en physique**, mais **peu d'intérêt** exprimé par la communauté de physique des plasmas.

**Peu de lien** avec les enseignants (exemple: zéro à l'UGA) et étudiants universitaires pour susciter des vocations et **créer des projets**.

# Les perspectives des simulations d'ECRIS



Possibilité d'atteindre **sur le long terme la prédictibilité** pour concevoir les futures sources d'ions.

# Merci pour votre attention !

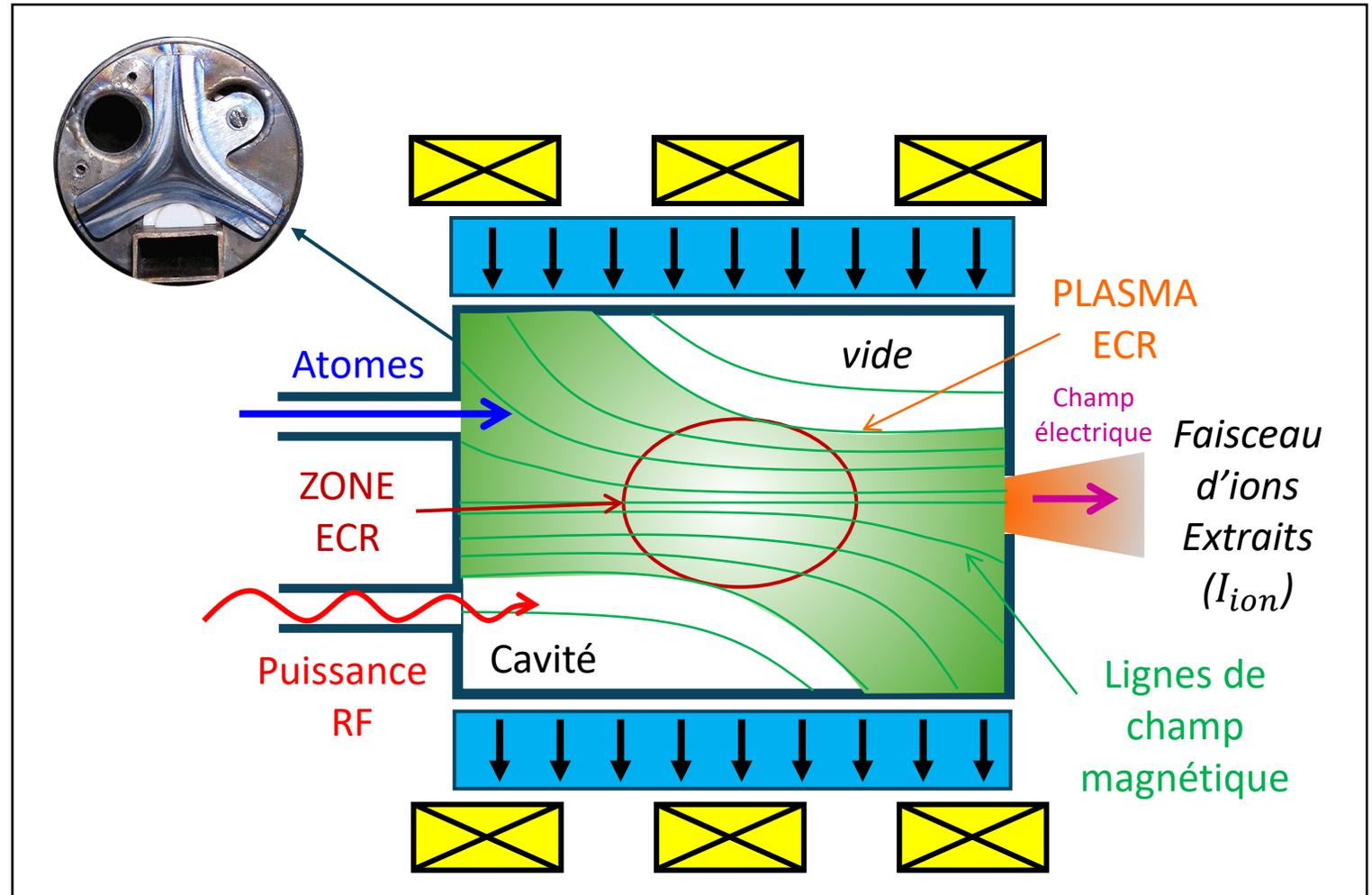
## Questions ?

# Appendice

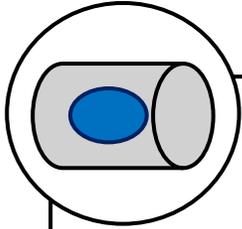
# Sources d'ions ECR multichargées – Structure

## Autres constituants principaux

- Système de vide ( $10^{-6} - 10^{-7}$  mbar).
- Système d'injection d'atomes.
- Champ électrique pour l'extraction d'ions.
- Système d'injection micro-onde dans la cavité:
  - $I_{ion} \sim n_{plasma} \sim f_{RF}^2$
  - $B \sim f_{RF}$

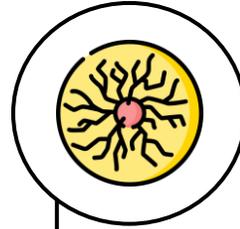


# Paramètres Physiques – Ordres de grandeur



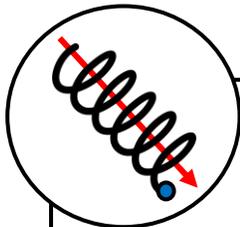
## *Cavity*

- **Volume** : 0.15 à 15 litres.
- **RF frequency** : 2.45 à 28 GHz.
- **Echelle de temps** :  $\%T_{RF} \sim 10^{-12}$  à  $\sim 10^{-14}$  s.



## *Plasma*

- **Density** :  $\sim 10^{10}$  à  $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ .
- **Longueur de Debye** :  $\sim 2$  à  $\sim 200 \mu\text{m}$ .
- **Population ionique** :  $\sim 1 - 10 \text{ eV}$ ,  $t \sim 10 - 1000 \mu\text{s}$ .



## *Population électronique: non-maxwellienne températures*

- **$e^-$  froids peu confines**:  $\sim 1 - 100 \text{ eV}$ ,  $t \sim 1 \mu\text{s}$ ,  $\hat{\uparrow}$  nombreux.
- **$e^-$  chauds confines** :  $\sim 1 - 10 \text{ keV}$ ,  $t \sim 10 - 100 \mu\text{s}$ ,  $\hat{\uparrow}$  nombreux.
- **$e^-$  très chauds très confines** :  $\sim 10 - 1000 \text{ keV}$ ,  $t \sim 100 - 1000 \mu\text{s}$ ,  $\downarrow$  nombreux.