

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



Simulation des Sources d'Ions Multichargés

A. Cernuschi¹ and T. Thuillier¹

¹CNRS-LPSC – Grenoble INP - Université Grenoble Alpes

Remerciement au GdR SCIPAC pour la Bourse Sébastien Bousson.



Contenu

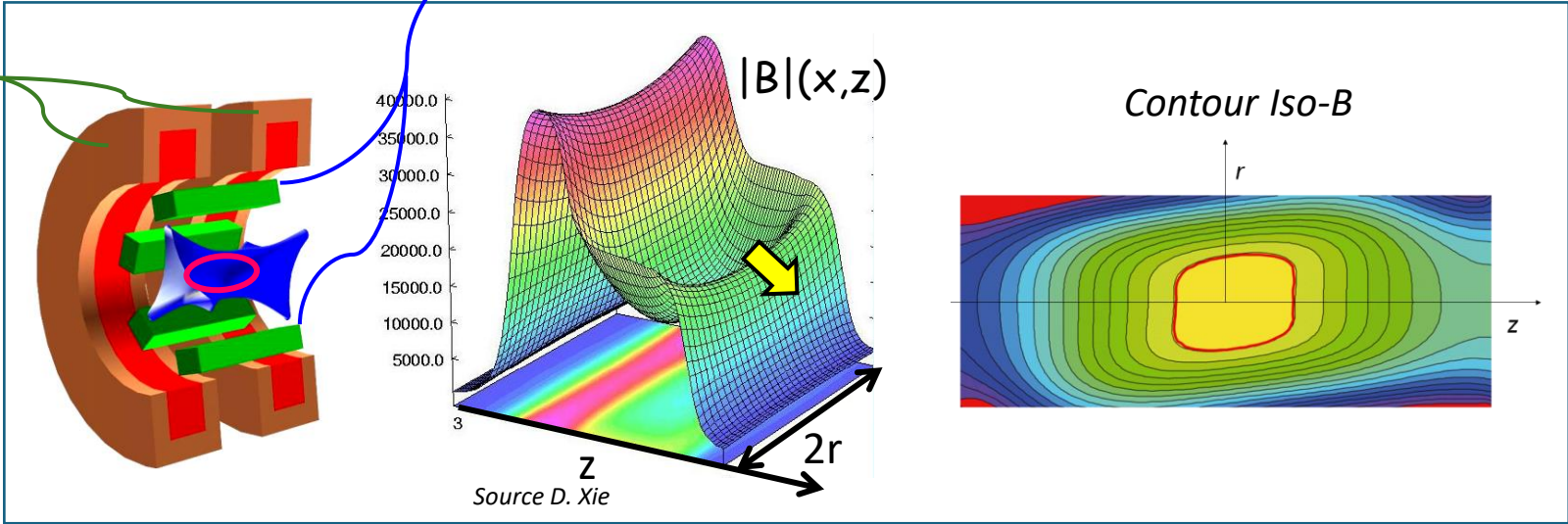
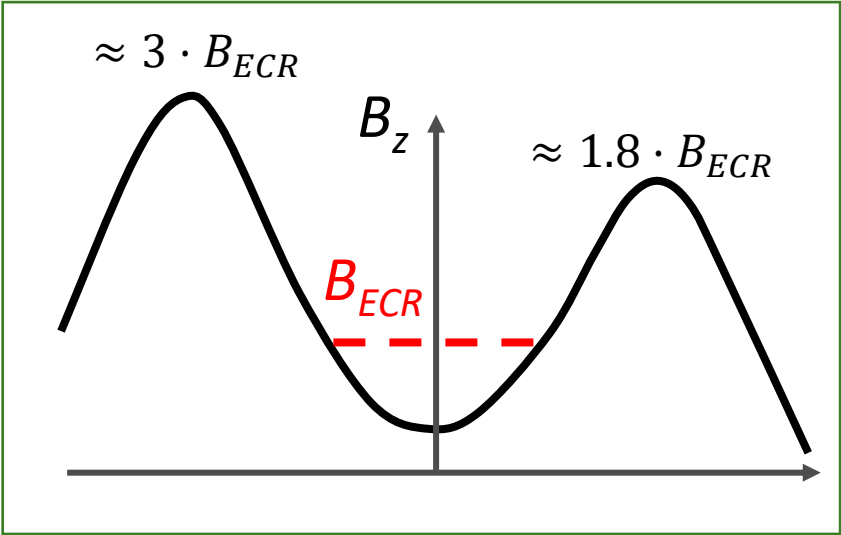
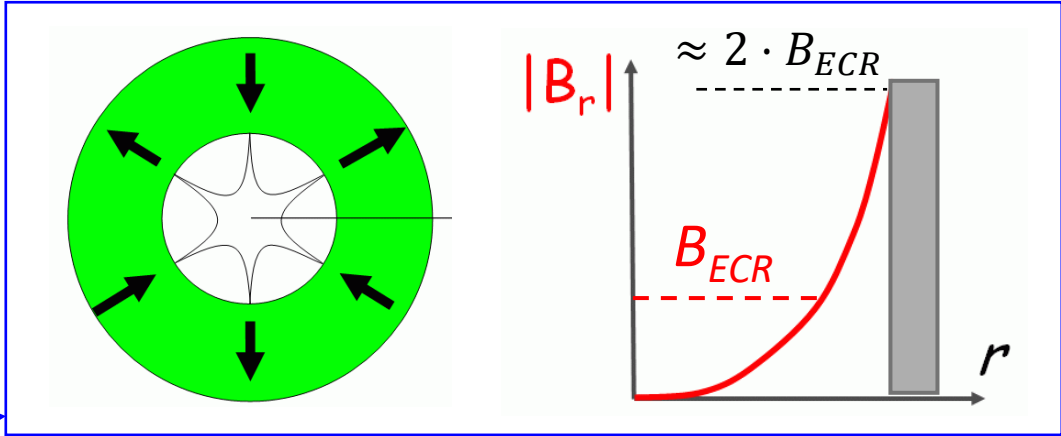
- 1) Spécificité des sources d'ions ECR multichargés:**
 - a) Champ magnétique.
 - b) Formation de plasma.
- 2) Physique à modéliser:**
 - a) Ordres de grandeurs.
 - b) Difficultés numériques pour simuler un plasma d'ECRIS.
 - c) Extraction de la gaine du plasma.
- 3) Etat de l'art international pour 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

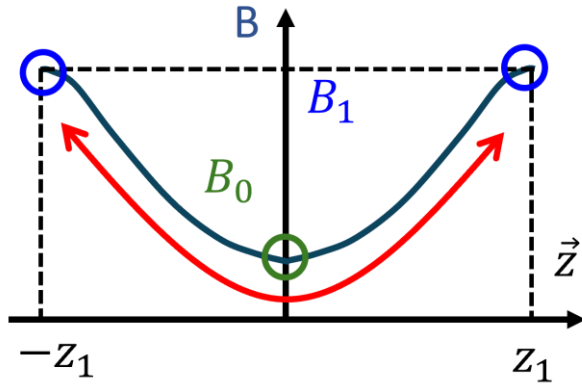
Superposition d'un miroir magnétique axial et d'un miroir magnétique radial multipolaire.

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

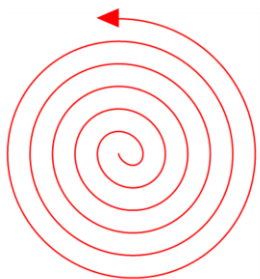


Sources d'ions ECR multichargés – Formation de plasma

1)



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



\vec{B}
 $\vec{E}(t)$
e⁻ tournant à une fréquence Ω

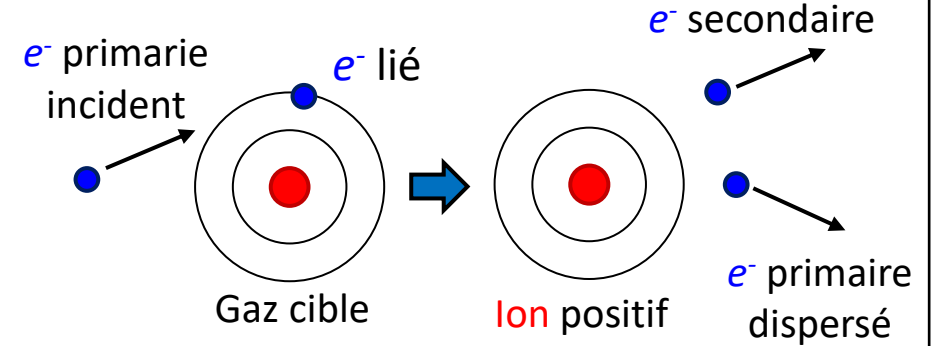
La surface ECR fermée permet de chauffer à chaque passage.

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

2)

Atomes ionisés plusieurs fois par impact électronique.

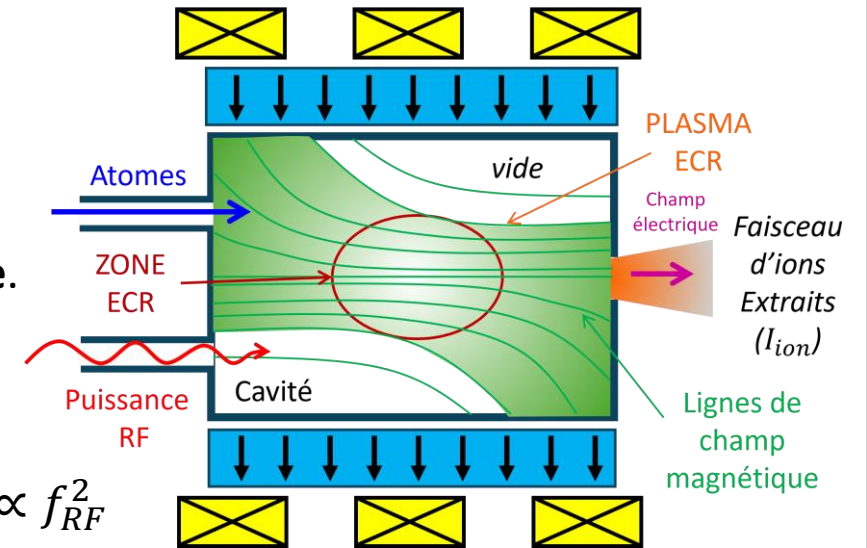
➤ Ions confinés magnétiquement et électrostatiquement.



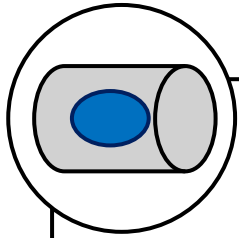
3)

Faisceau d'ions extrait par un champ électrique.

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

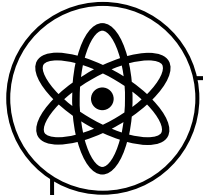


Paramètres physiques – Ordres de grandeur



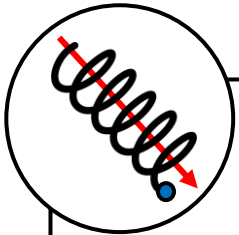
Grand volume de chambre à plasma: de 0.15 à 15 litres.

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 μs .

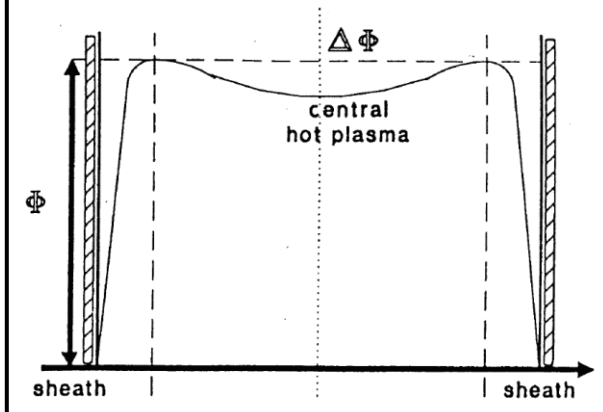


Population électronique: non-maxwellienne temperatures.

- 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-Pari: effets non négligeable.

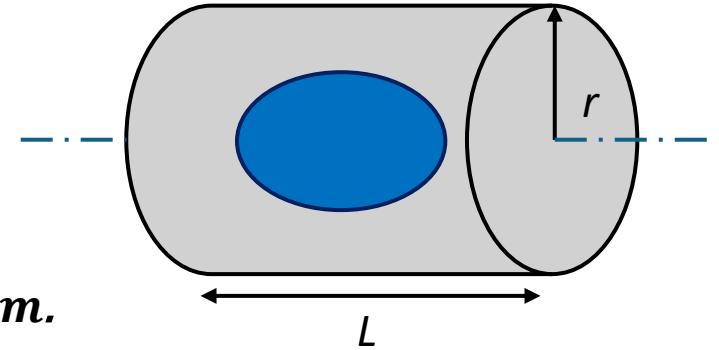
- Pulvérisation.
- Émission d'électrons secondaires.
- Thermodynamique et Chimie de surface.
- Rebonds des électrons.



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

Considérons la source ECRIS suivante:

- **Volume ≈ 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 $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3} = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$.
- $T_e = 5 \text{ keV}$.
- $T_i = 5 \text{ eV}$.
- λ_{DB} entre ~ 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 !**

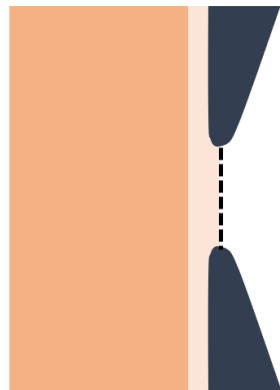
Extraction de la gaine du plasma

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**.



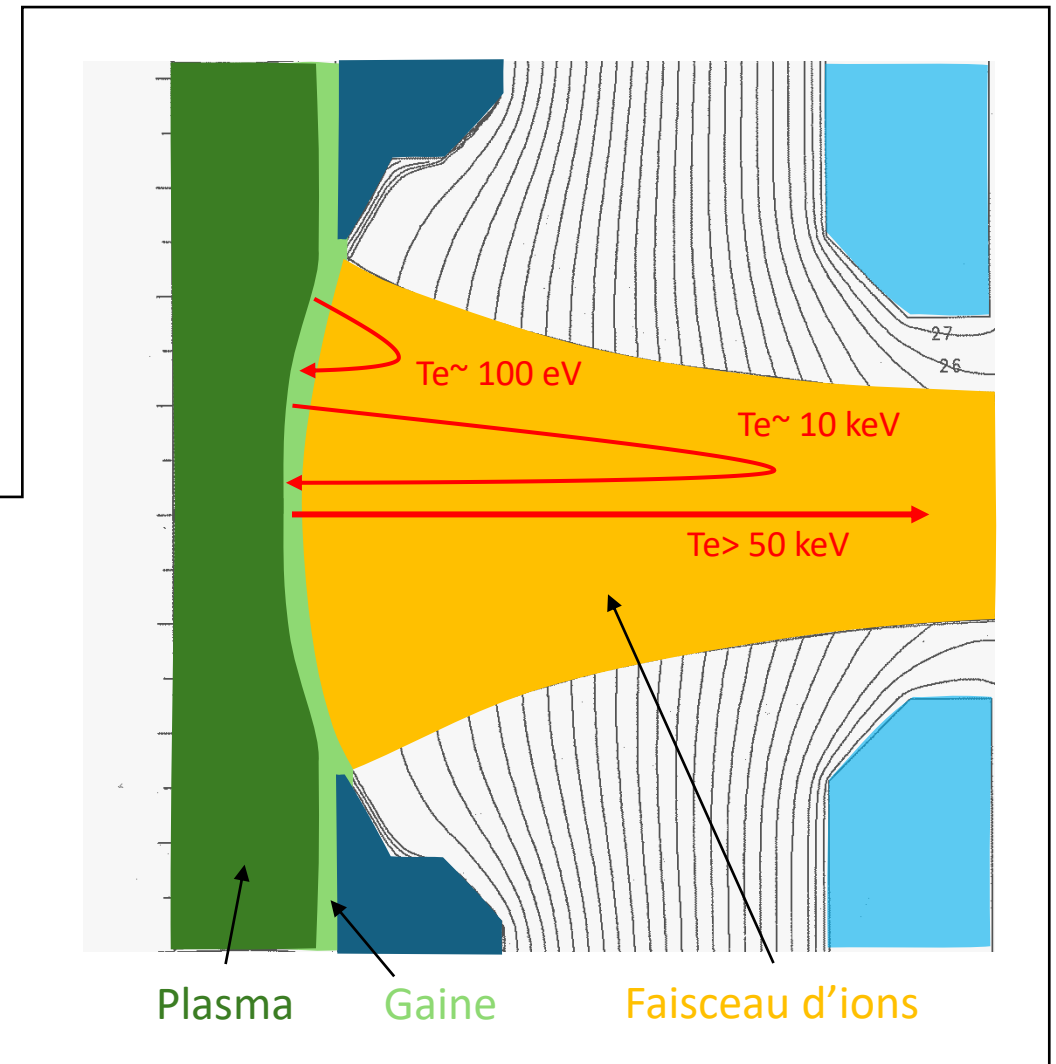
Concave Meniscus



Flat Meniscus



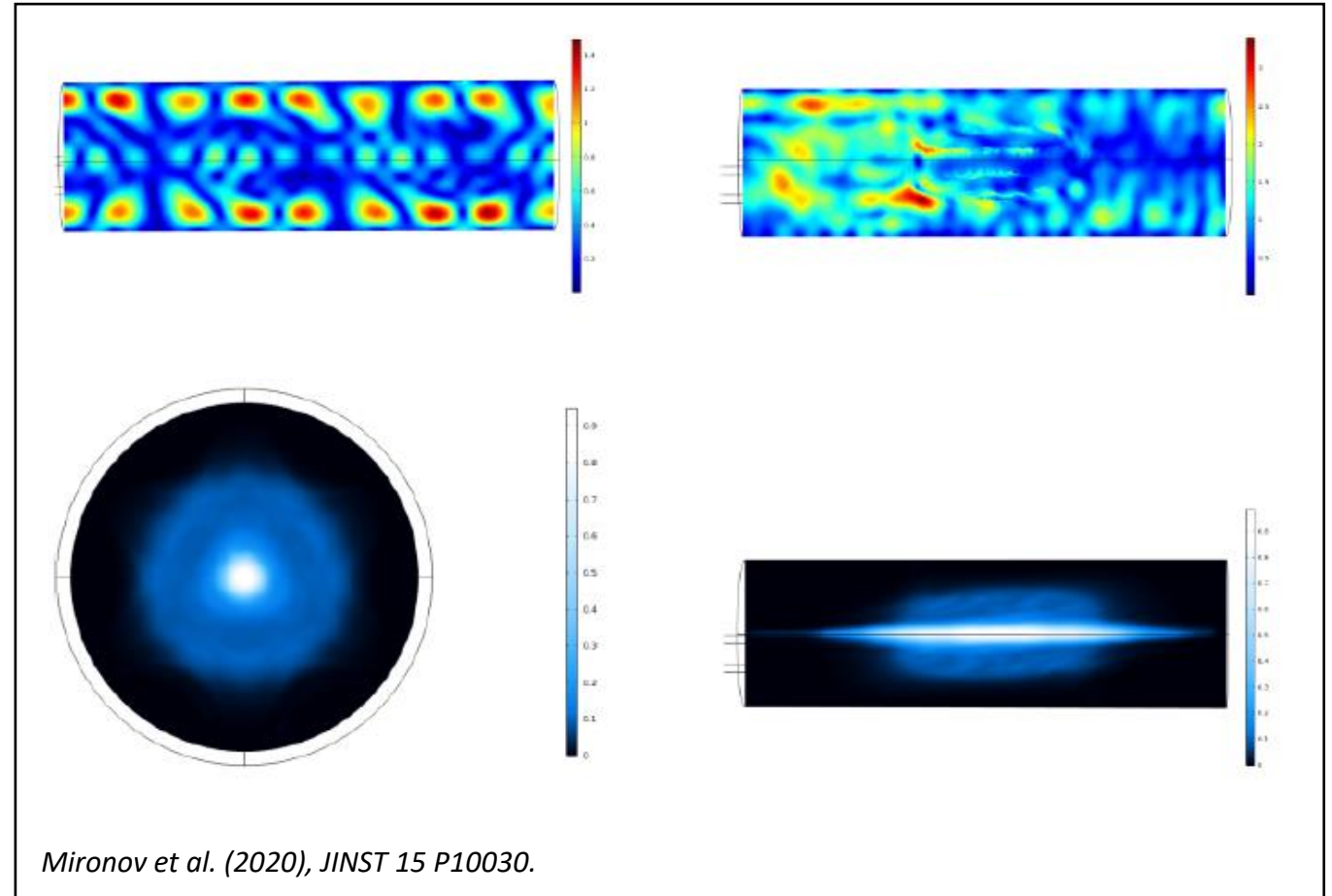
Convex Meniscus



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

Code NAM-ECRIS (JINR, Russie)

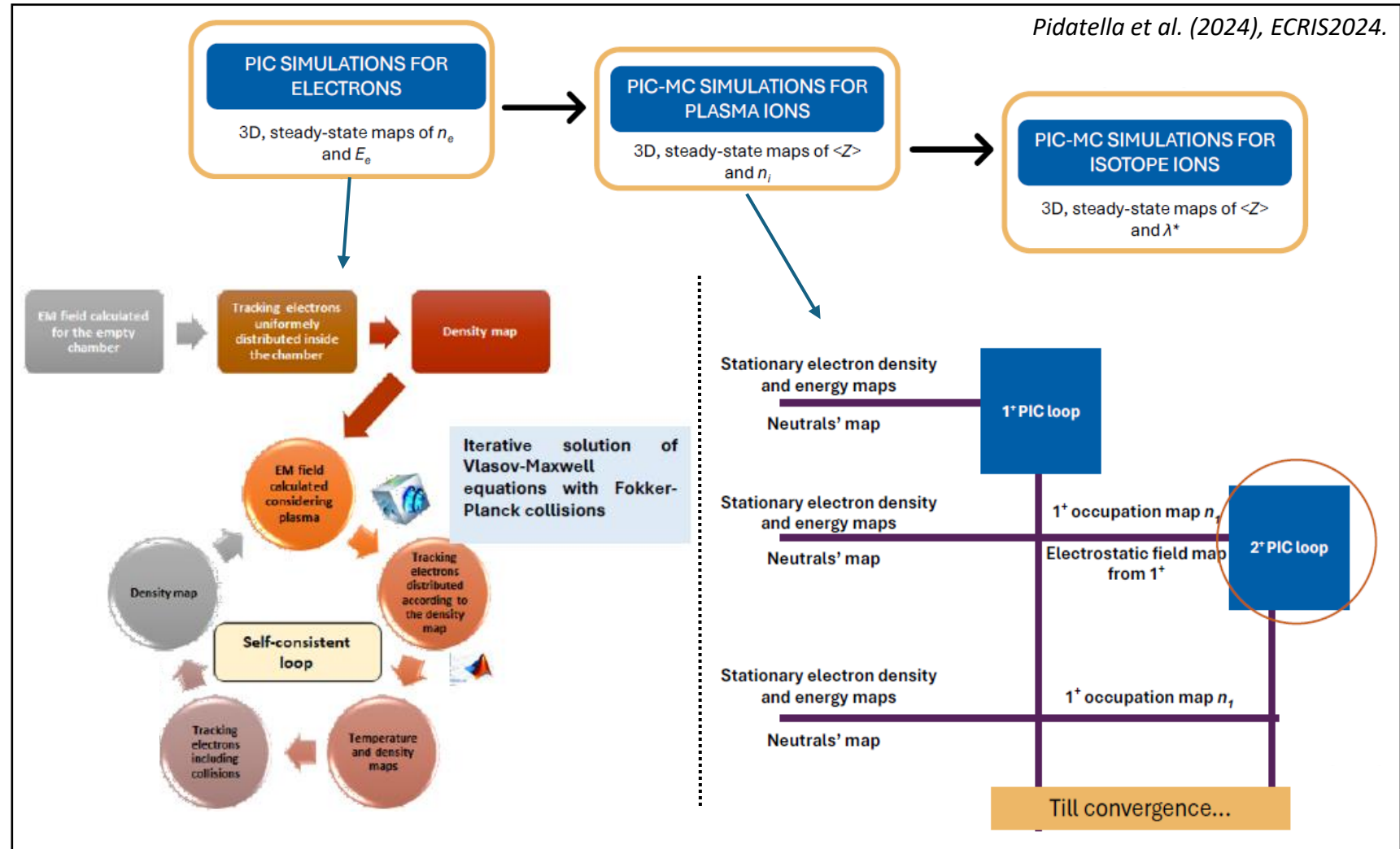
- 20 ans de développement itératif.
- **Propagation itérative** d'ions puis d'électrons à travers un **PIC électrostatique stationnaire**.
 - Taille de maille $> 1 \text{ mm}$.
 - Collisions élastiques et inélastiques.
 - Calcul 1 journée sur ≈ 20 cœurs.
 - Pas de gaine plasma.
- Calcul du **mode RF**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

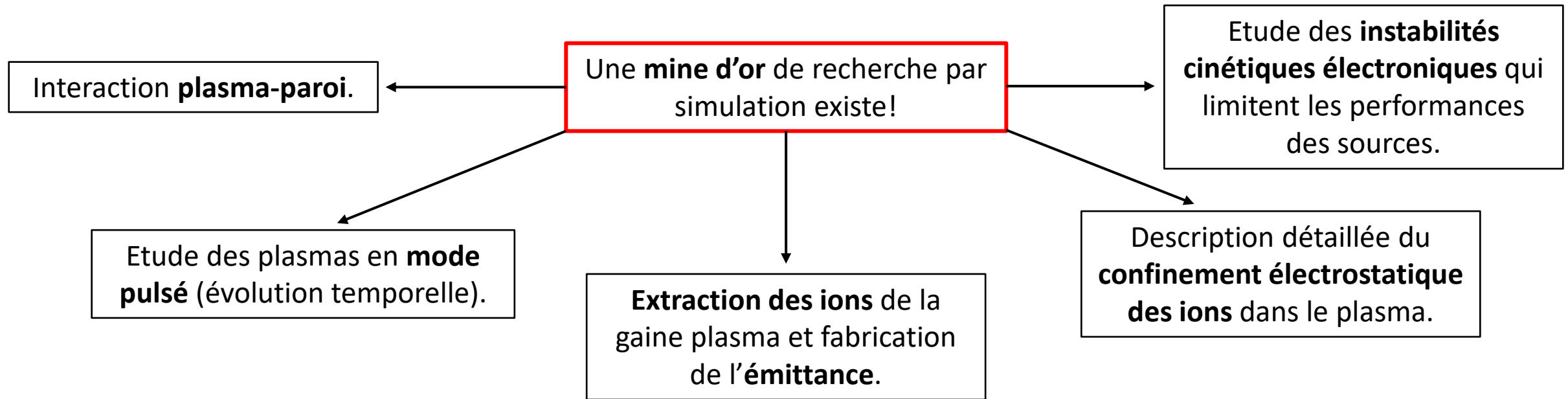
Communauté sous-critique en France

- 🏠 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 ?



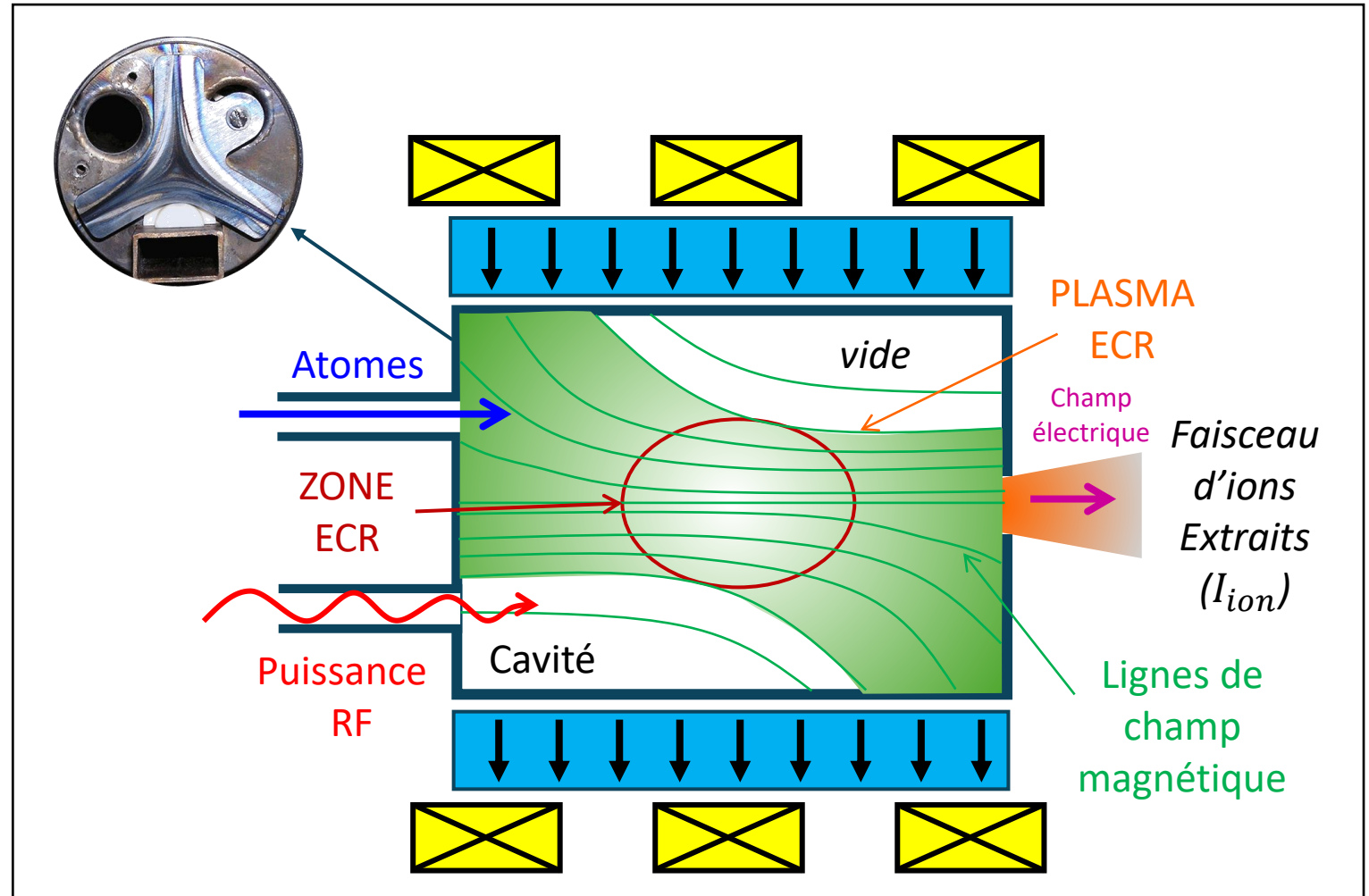
Appendice



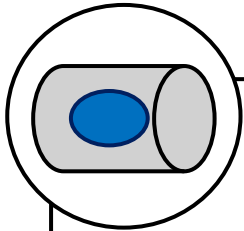
Sources d'ions ECR multichargées – Structure

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

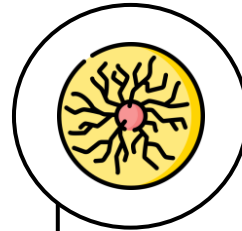


Paramètres Physiques – Ordres de grandeur



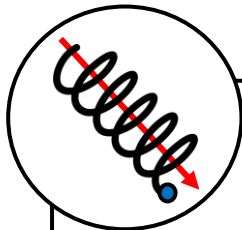
Cavity

- **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** : ~ 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.