



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

[www.onera.fr](http://www.onera.fr)

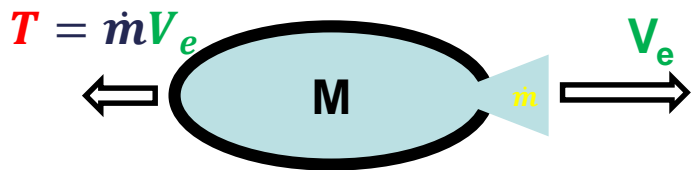
# Modélisation des propulseurs à résonance électronique cyclotronique : enjeux & problématiques

P.-Q. Elias, J. Porto Hernandez

Mais aussi : F. Cannat, T. Vialis, S. Peterschmitt, F. Boni, V. Désangles, D. Packan, J. Jarrige

# Principe de base : propulsion spatiale

- **Poussée d'un moteur**



$$E = \frac{1}{2} M V_e^2$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} V_e^2$$

- **Moteur Chimique**

- $\dot{m}$  fourni par l'éjection de l'ergol
- $V_e$  fourni par l'énergie stockée dans l'ergol

$$V_e = \sqrt{2h_r}$$

$V_e \simeq 4,3 \text{ km/s}$  pour  $\text{H}_2/\text{O}_2$

=> Limité par l'énergie E embarquée

- **Moteur électrique**

- $\dot{m}$  fourni par l'éjection de l'ergol
- $V_e$  fourni par une source de puissance externe (soleil, nucléaire)

=> **Grande vitesse d'éjection possible**

$V_e \sim 10 - 20 \text{ km/s}$  ( Hall)

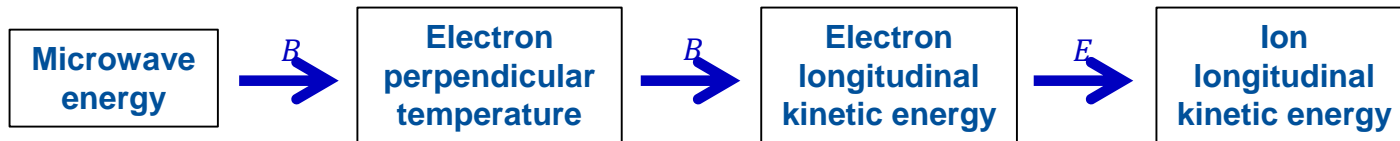
$V_e \sim 20 - 35 \text{ km/s}$  ( Grille)

$$V_e = \frac{2P}{T}$$

=> Limité par la puissance P disponible

# Principe des sources ECR

## ECRT: Electron-Cyclotron Resonance Thruster with Magnetic Nozzle



- Chauffage des électrons (Eperp)

résonance électron-cyclotron

$$f_{EM} = \frac{1}{2\pi} \omega_c = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m}$$

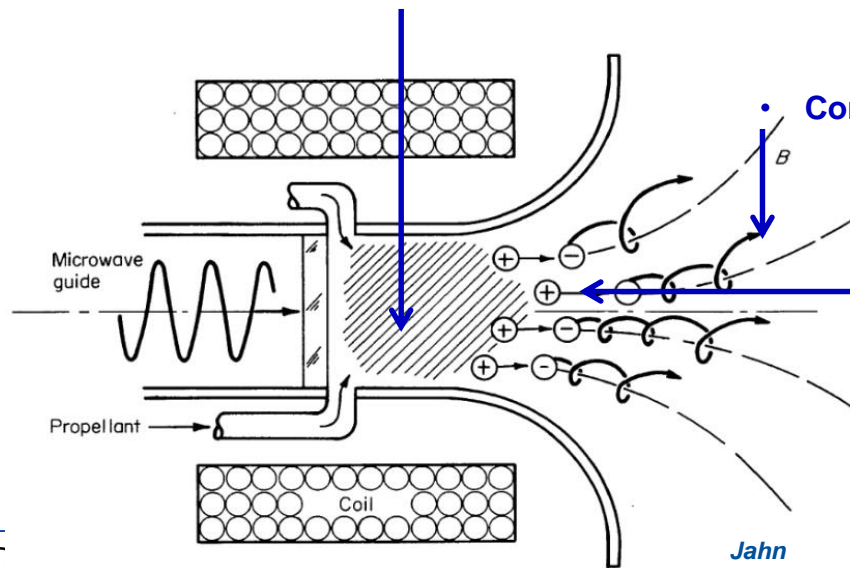
- Conversion en énergie parallèle

Champ B divergent ( $-|\mu| \nabla_{\parallel} B$ )

- Accélération des ions

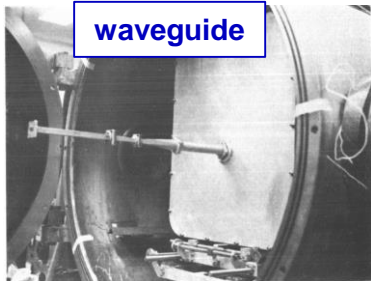
Champ ambipolaire ( $q E$ )

- Sans grille
- Pas de cathode de neutralisation
- Un seul générateur



Jahn  
(1968)

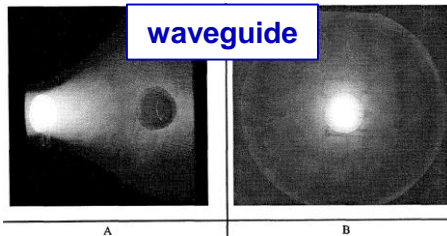
source Peterschmitt (2020)



waveguide

Crimi et al. (1965)

General Electric Laboratory



waveguide

California Institute of Technology Sercel (1993)

1960s

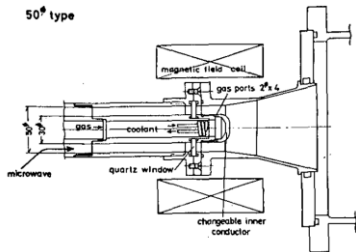
1990s

2010s

coaxial

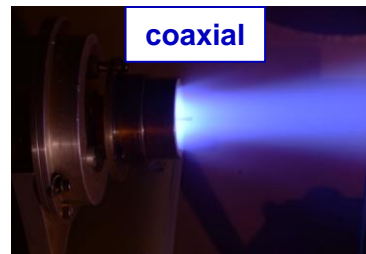
University of Tokyo

Nagatomo (1967)



$$\eta_{tot} = \frac{\text{kinetic power along thrust axis}}{\text{input power to the thruster}} \approx 0,01$$

ONERA



coaxial

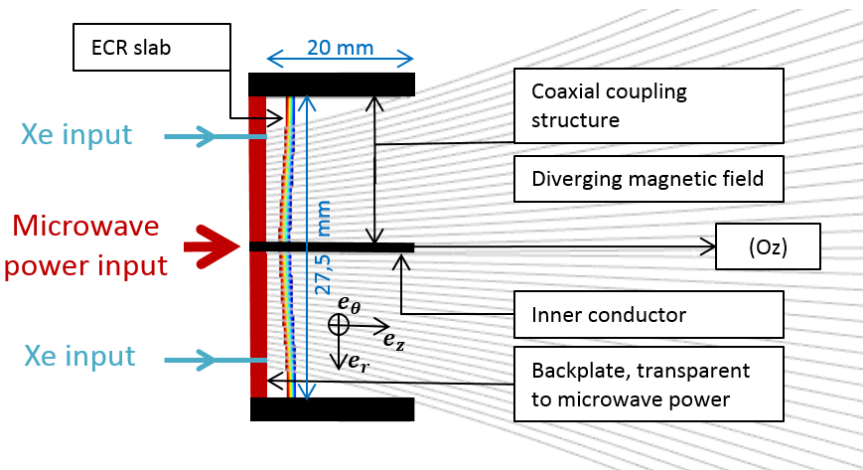
Cannat (2015) Vialis (2018) Peterschmitt (2020) Porto (2021)



2017-2020

$\eta_{tot} \approx 0,1$

# Le propulseur ECR coaxial



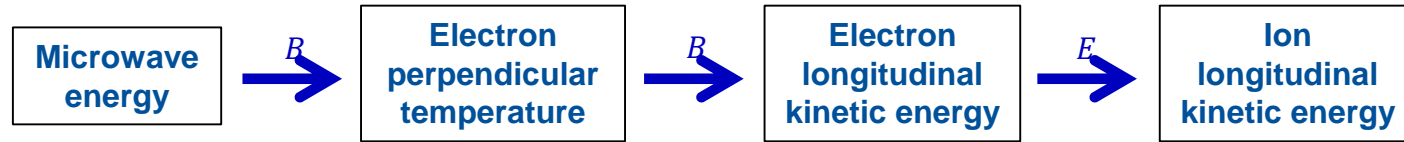
## Operating conditions:

- Xenon: 0,05 → 0.2 mg/s
- Power: 5 → 50 W around 2,45 GHz

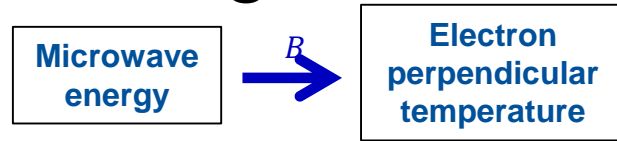
Paramètre	Valeur dans la source	Valeur ~25cm en aval
Champ B	~ 875 G	5 G
Densité électronique	> $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$	~ $2 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$
Energie perpendiculaire	~50 eV	~ 1-10 eV
Energie cinétique des ions		~ 150-200 eV
Potentiel propulseur	200-300 V	
Fréquence EM	2,45 GHz	
Fréquence plasma	> 4 GHz	~ 160 MHz
Densité de neutre	~ $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$	~ $4 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$

source Peterschmitt (2020)

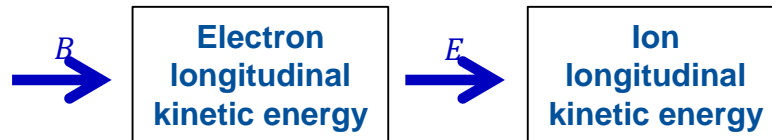
# Problématiques



- Chauffage

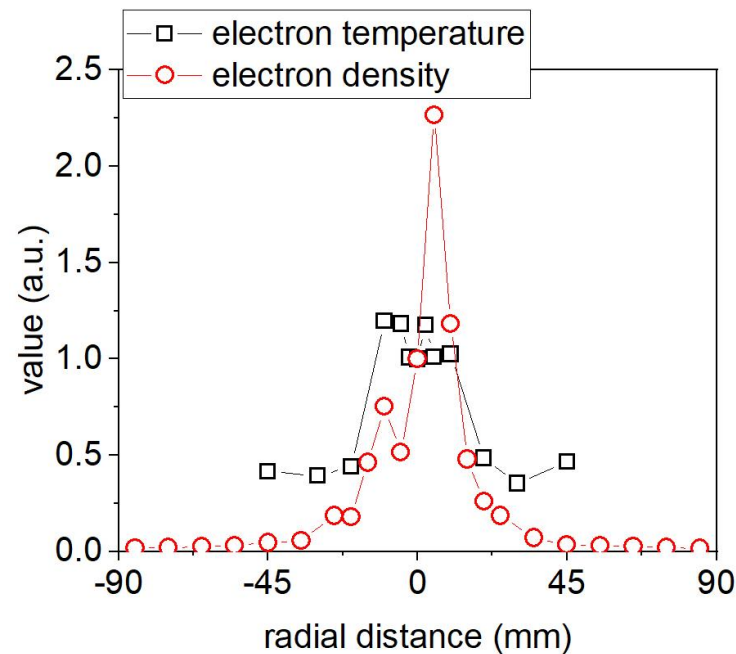
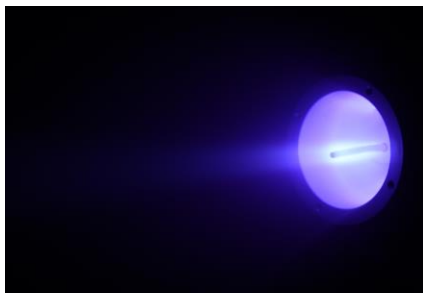


- Confinement / tuyère magnétique



# Chauffage

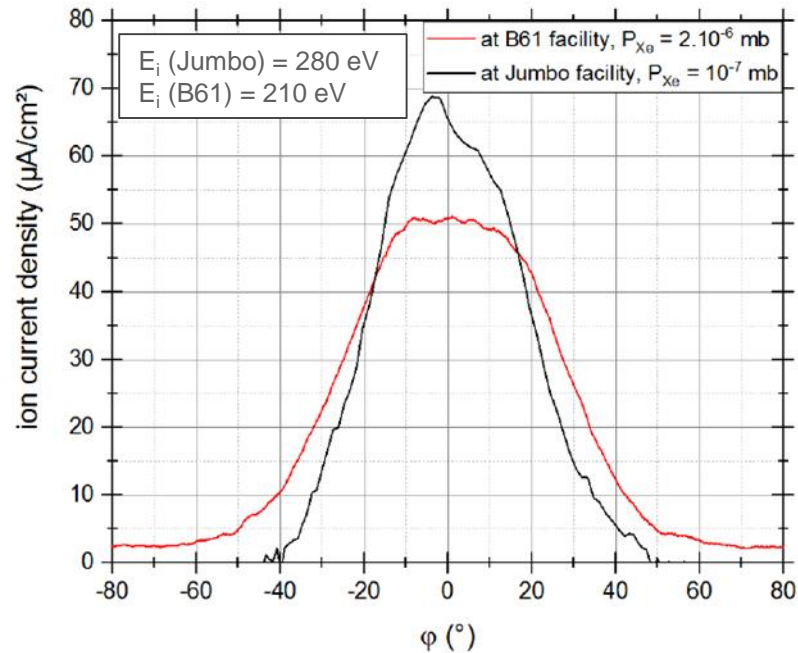
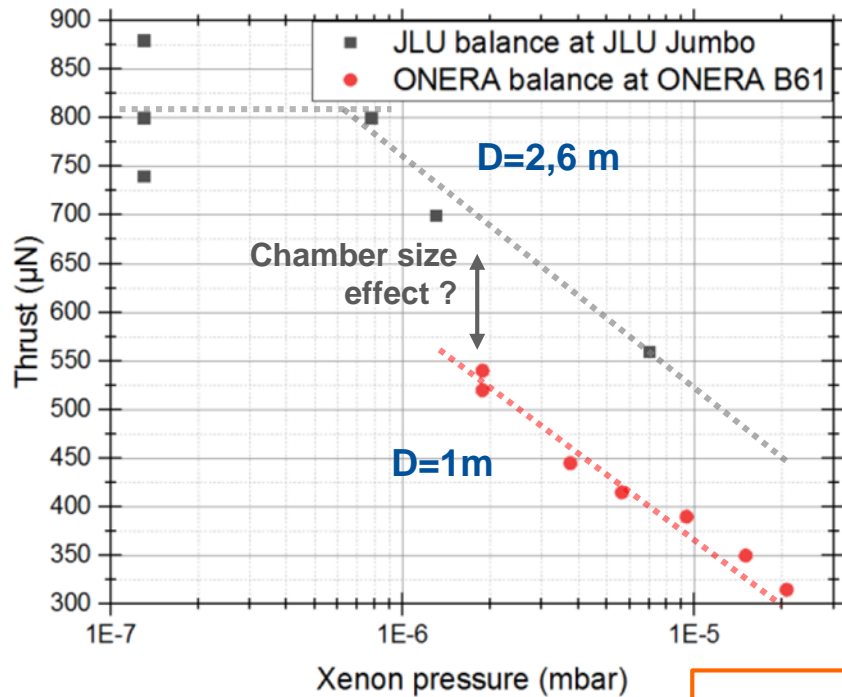
- Observations :
  - Couplage MO
    - Source coaxiale : >80%
    - Source guide d'onde : ~50-60%
  - Faisceaux rapides



Source Boni (2021)



# Confinement / tuyère magnétique

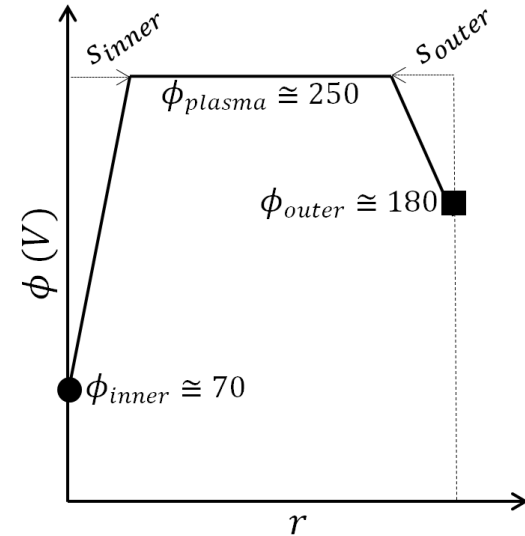
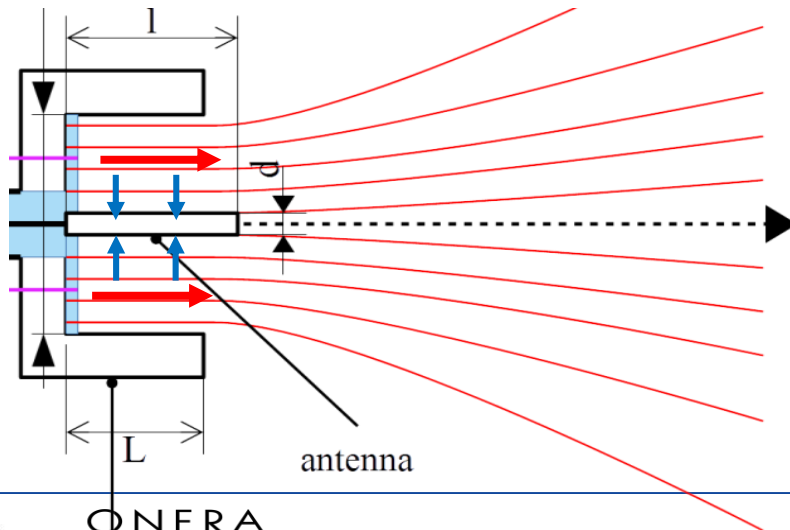


source Désangles (2021)

**Niveau de vide**  
**Distance aux parois**

# Confinement / tuyère magnétique

- Points clés du propulseur ECR:
  - Auto-polarisation
  - Source de type ExB



Forme du potentiel radial DC  
Peterschmitt 2020

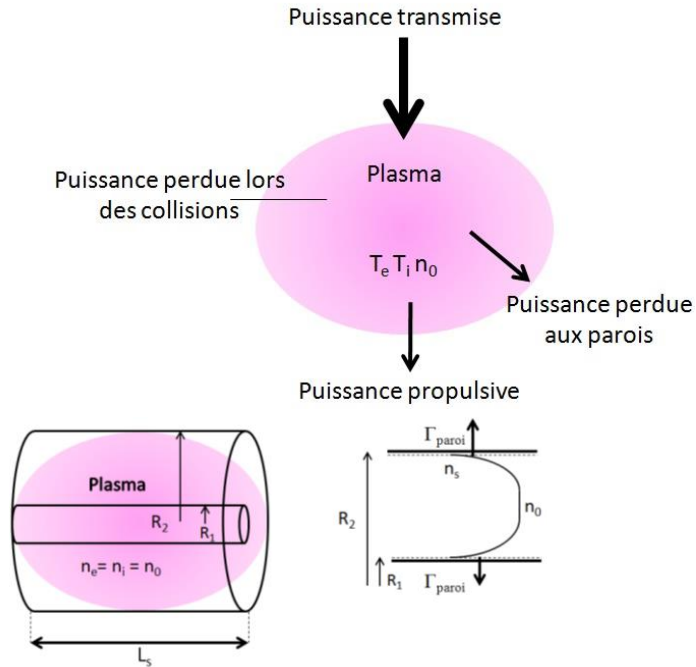
# Approches pour la modélisation

- Modèle global : bilan d'énergie
- Modèle quasilinéaire : chauffage anisotrope
- Modèle cinétique 1D : accélération dans la tuyère
- Modèle PIC 1D3V
- Modèle 2D : hybride & PIC
- Modèle 3D



# Modèle global

## Bilan de puissance:



- Bon accord pour débits élevés

**Mais :  $T_e$  sous-estimée à faible débit => anisotropie**

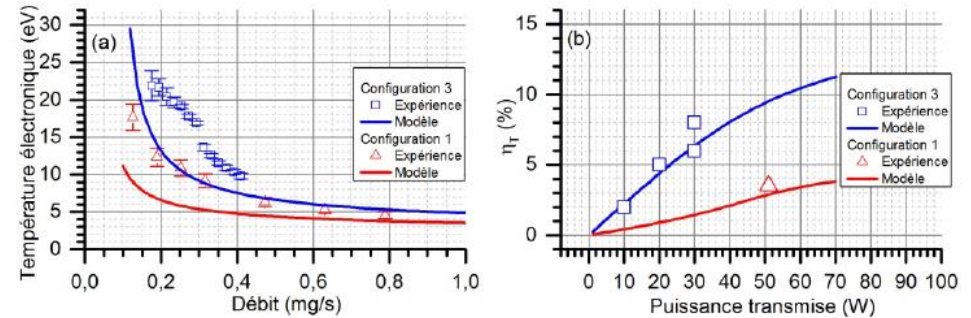
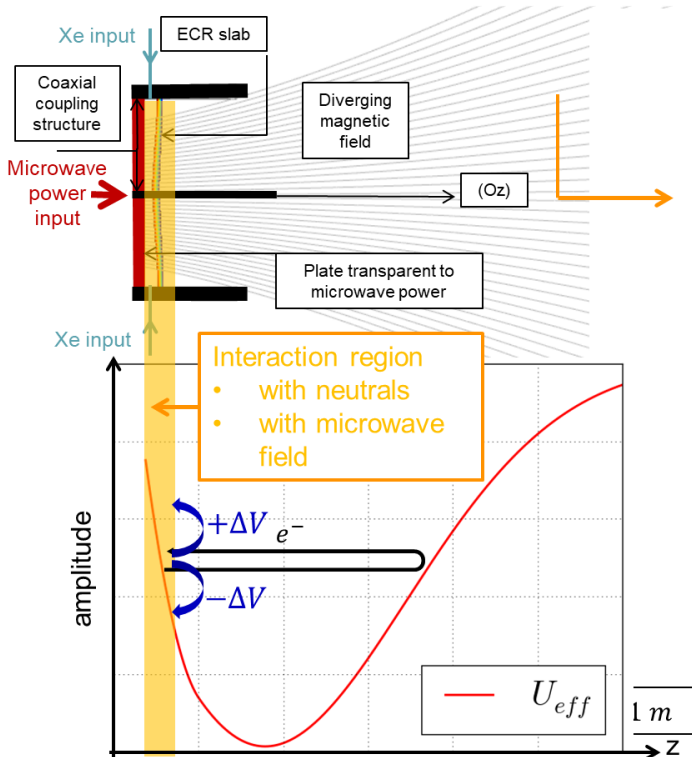


FIGURE 5.1.3 – Comparaison des résultats expérimentaux avec le modèle global pour la configuration 1 et 3, (a) température électronique à 20 W en fonction du débit, (b) rendement du propulseur à  $I_0 = 130 A$  en fonction de la puissance.

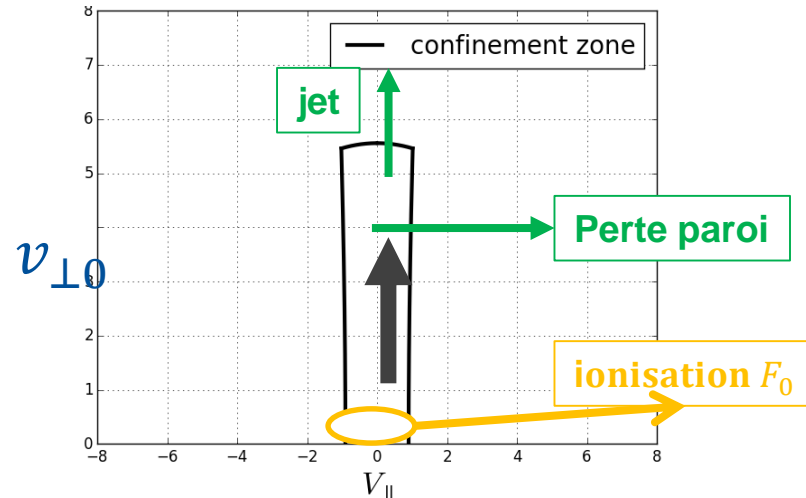
F. Cannat, T. Lafleur, J. Jarrige, P. Chabert, P.-Q. Elias, et D. Packan, « Optimization of a coaxial electron cyclotron resonance plasma thruster with an analytical model », *Physics of Plasmas*, vol. 22, n° 5, p. 053503, mai 2015, doi: [10.1063/1.4920966](https://doi.org/10.1063/1.4920966).

# Modèle quasi-linéaire de diffusion dans l'espace des phases



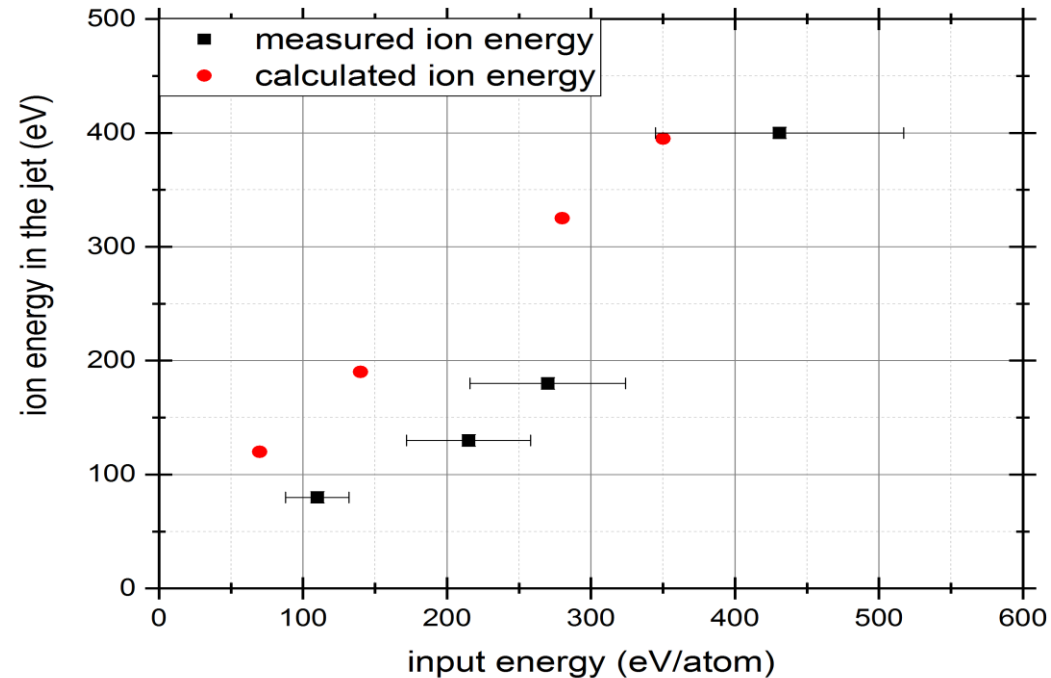
$$\frac{\partial}{\partial v_{\perp 0}} \left[ D(v_{\perp 0}) \frac{\partial P(v_{\perp 0})}{\partial v_{\perp 0}} \right] - \left( \frac{1}{\tau_{el}} + \frac{1}{\tau_i} \right) P(v_{\perp 0}) = 0$$

Chauffage MO :  $v_{\perp}$       Interaction avec le gaz



# Modèle quasi-linéaire de diffusion dans l'espace des phases

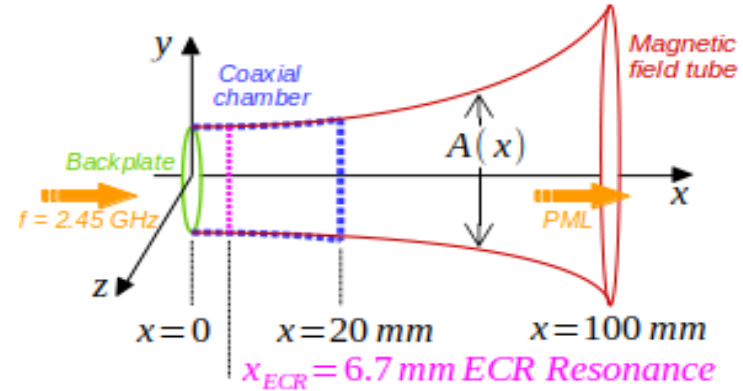
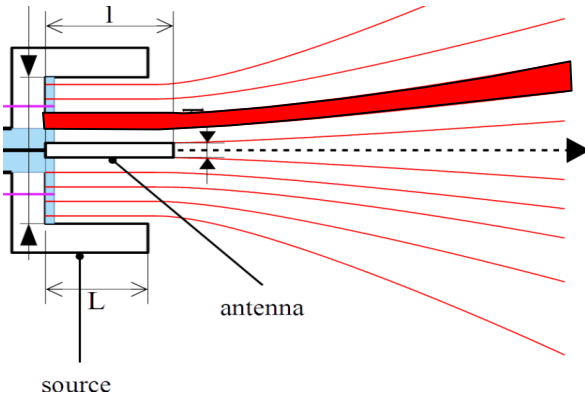
- Accord raisonnable avec les mesures d'énergie ionique
- **Mais :**
  - **Importance des pertes aux parois**
  - **Le modèle néglige :**
    - **Collisions dans la tuyères et la source**
    - **Piégeage des électrons**



[S. Peterschmitt, J. C.Porto, P.-Q. Elias, D. Packan "A diffusion model in velocity space to describe the electron dynamics in an ECR plasma thruster with magnetic nozzle" EUCASS2019, EUCASS association, Madrid, Spain, 2019.](#)

# Modèle PIC 1D3V

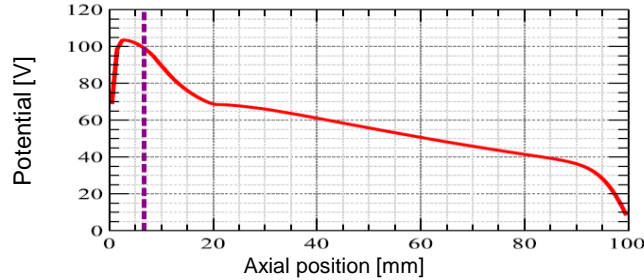
- Modèle quasi-1D sur un tube de champ B (10 cm)



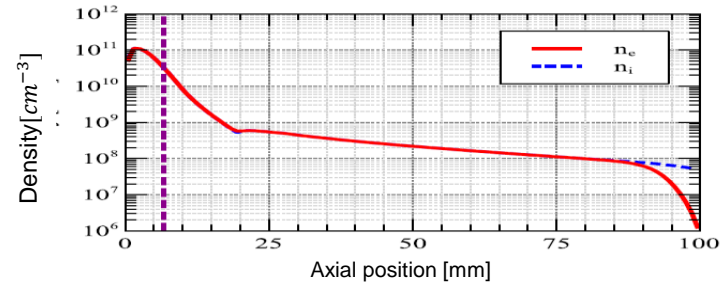
- Calcul auto-consistant du champ électromagnétique
- Traitement cinétique des ions & électrons
- Collisions avec un fond de neutre

source Porto (2021)

# Chauffage des électrons

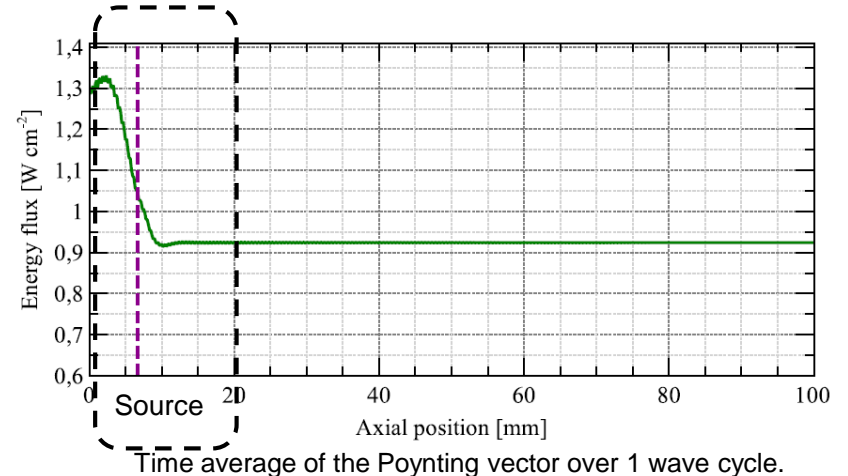


Steady-state plasma potential profile.



Steady-state electron and ion number densities.

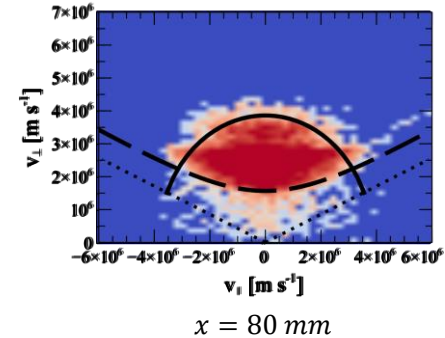
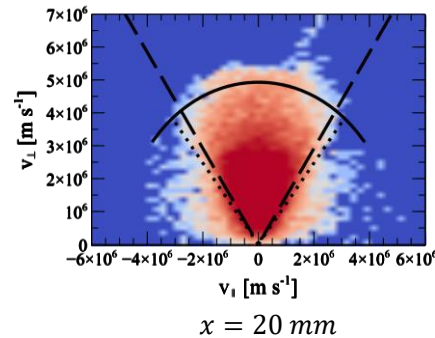
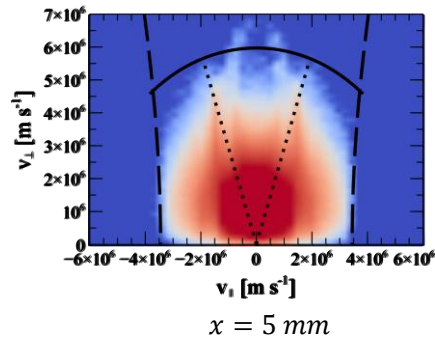
- Energie déposée dans la source uniquement
- Importance de l'élargissement (**6 mm** autour de la surface de résonance).



source Porto (2021)



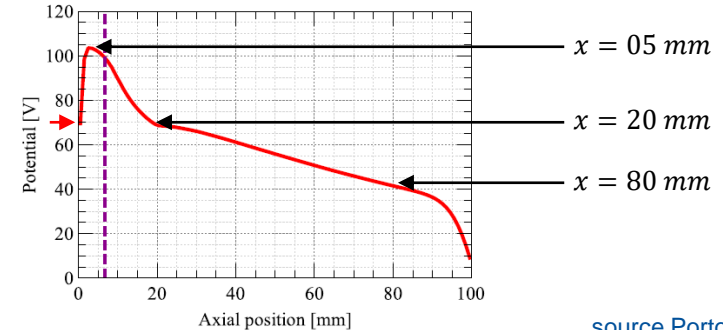
# Confinement des électrons



Piégeage d'une population à haute énergie dans la tuyère

**Mais :**

- **modèle phénoménologique pour la diffusion latérale**
- **Pas d'ondes perpendiculaires**



source Porto (2021)

# Discussion : points clés pour la modélisation

- Couplage source - tuyère
- Couplages onde Plasma :
  - Générations d'ondes transverses, différents régimes d'absorption
  - Conversion de mode?
- Diffusion transverse :
  - $ExB \Rightarrow$  même phénoménologie que propulseur à courant de Hall?
  - Instabilités dans la tuyères magnétique
  - Détachement

Á. Sánchez-Villar, J. Zhou, E. Ahedo, et M. Merino, « Coupled plasma transport and electromagnetic wave simulation of an ECR thruster », *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 30, n° 4, p. 045005, avr. 2021, doi: [10.1088/1361-6595/abde20](https://doi.org/10.1088/1361-6595/abde20).

S. Hepner, B. Wachs, et B. Jorns, « Wave-driven non-classical electron transport in a low temperature magnetically expanding plasma », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 116, n° 26, p. 263502, juin 2020, doi: [10.1063/5.0012668](https://doi.org/10.1063/5.0012668).

# Perspectives

- Modélisation 2D Full-PIC (en cours)
  - Modèle simplifié pour la tuyère?
  - Prise en compte de la diffusion anormale?
- Modèles hybrides (en cours, UC3M)
  - Importance de l'anisotropie
  - Prise en compte des effets cinétiques
- Modèles 3D Full –PIC...