

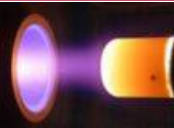
# Jets de plasma partiellement magnétisés pour la propulsion électrique

**Laurent Garrigues, Directeur de Recherche CNRS**



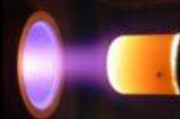
*[laurent.garrigues@laplace.univ-tlse.fr](mailto:laurent.garrigues@laplace.univ-tlse.fr)*

**Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie – LAPLACE**  
**Université de Toulouse, CNRS-UPS-INPT**  
**31062 Toulouse Cedex 09, France**



# Plan

- **Propulsion électrique**
- **Modélisation hybride**
- **Modèle 1D**
- **Modèle 2D**
- **Conclusions**



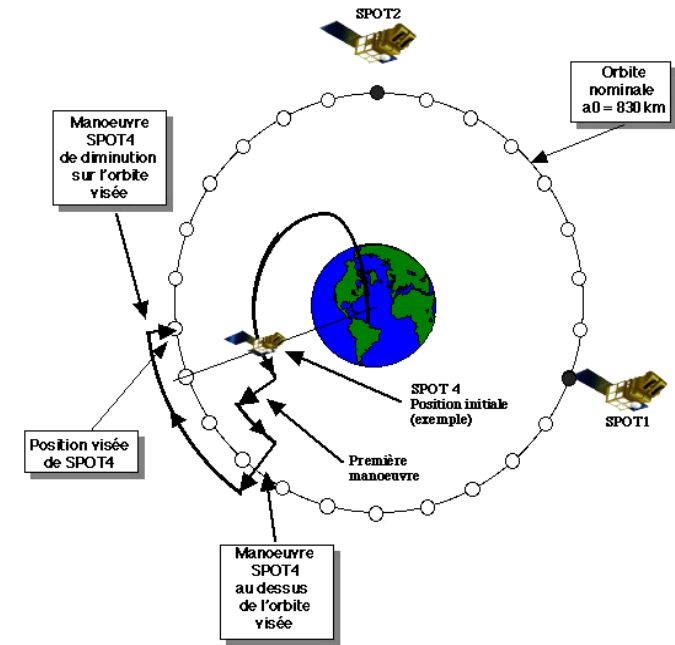
# Besoins

## ■ Satellites artificiels

- Placés sur une orbite pour effectuer la mission après séparation du lanceur
- Contrôle leur attitude de manière à pointer vers la Terre
- Satellites en orbite GEO : combattre l'attraction des astres/corps environnants
- Satellites en orbite LEO : compenser la force de trainée
- Désorbitation en fin de vie

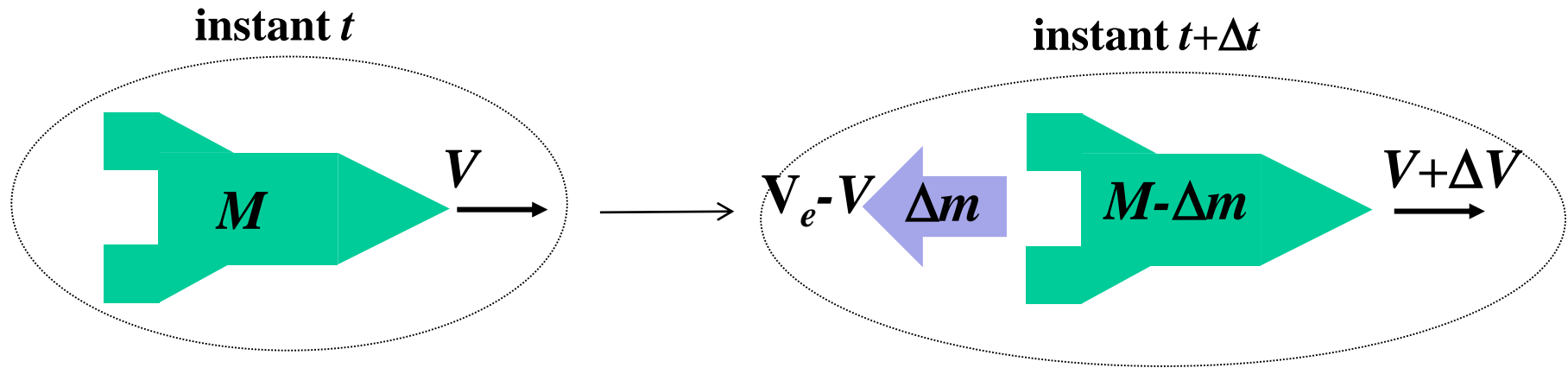
## ■ Engins spatiaux

- Échapper à l'attraction terrestre
- Naviguer dans le système solaire
- Se mettre en orbite autour de l'objet étudié



# 2<sup>nd</sup>e loi de Newton

- Principe d'action – réaction ou conservation de la quantité de mouvement

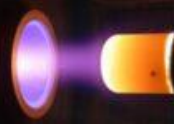


- $\frac{d\vec{p}}{dt} = \mathbf{0}$  système isolé : véhicule + ergol (négligeant les forces extérieures)

$$p(t) = VM \quad \text{et} \quad p(t + \Delta t) = (M - \Delta m)(V + \Delta V) - \Delta m(v_e - V)$$

$$p(t + \Delta t) - p(t) = M\Delta V - v_e\Delta m$$

$$\Delta m = -dm \text{ (décroissance de la masse après éjection)}$$



# Equation de Tsiolkovsky

- Equation maitresse – équation de Tsiolkovsky

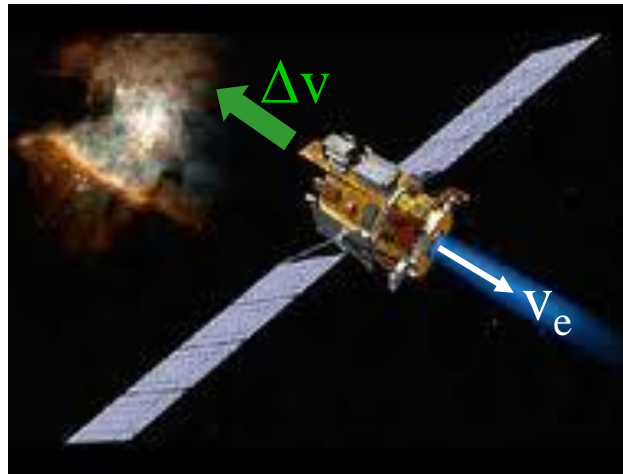
Masse du véhicule

Variation de la masse due à l'expulsion de l'ergol

$$M \frac{dv}{dt} = -v_e \frac{dm}{dt}$$

Accélération du véhicule

Vitesse du jet du propulseur



# Consommation d'ergol

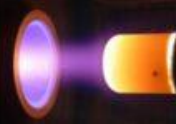
$v_e = \text{constant}$

$$\Delta v = \int_{v_0}^{v_f} dv = - \int_{m_0}^{m_f} v_e \frac{dm}{m} = -v_e \int_{m_0}^{m_f} \frac{dm}{m} = -v_e \ln \left[ \frac{m_f}{m_0} \right]$$

$$m_0 = m_f + m_{erg}$$

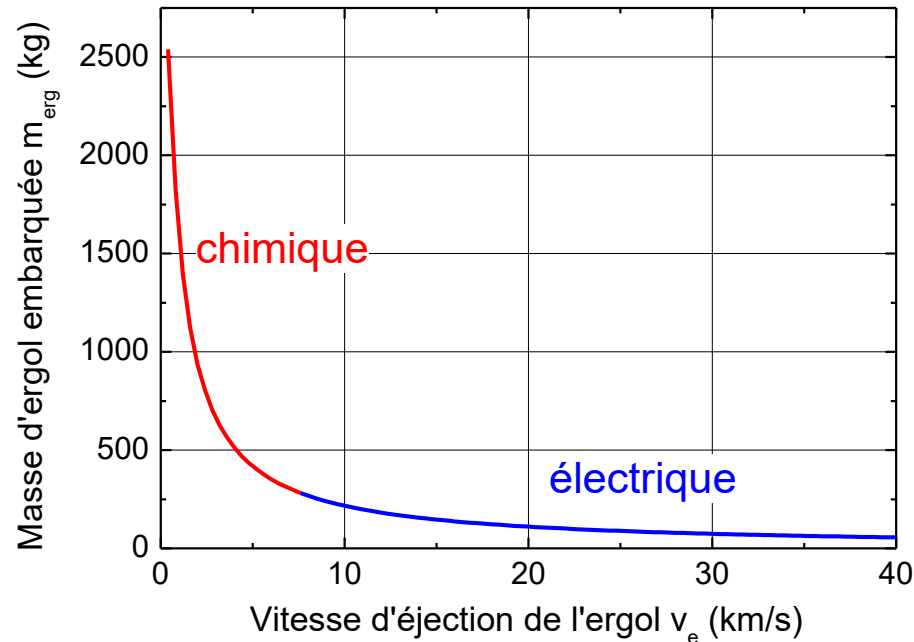
$$m_{erg} = m_0 \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\Delta v}{v_e} \right) \right] \quad [\text{kg}]$$

- A  $\Delta v$  fixé : consommation d'ergol plus faible à forte vitesse d'éjection de l'ergol



# Propulseurs chimiques vs électriques

- **Satellite géostationnaire (15 ans), 3 tonnes,  $\Delta v = 750$  m/s**



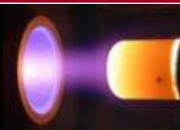
- **Propulseur chimique**

Hydrazine ( $N_2-H_4$ ) brûlée à 3000 K  
vitesse d'éjection liée au chauffage thermique

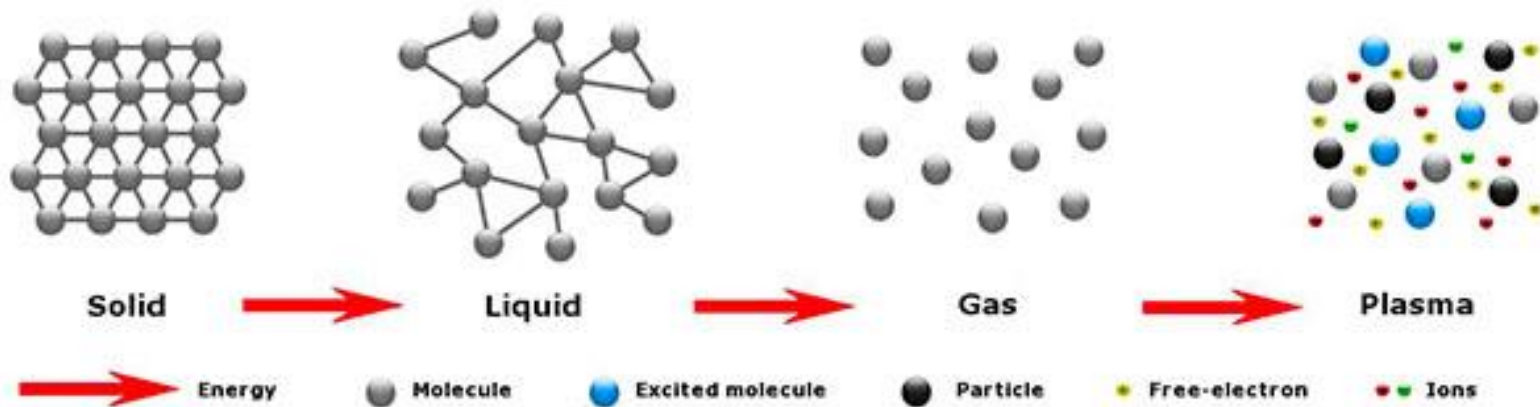
- **Propulseur électrique**

Ions Xe accélérés à quelques centaines de volts

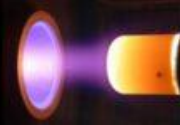
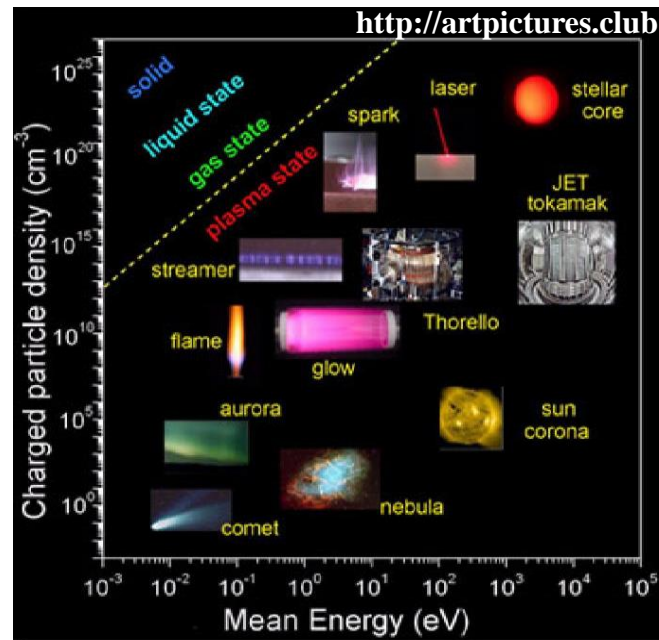
R. G. Jahn and E. Choueiri, Encyclopedia of Physical Science and Technology, 2002  
S. Mazouffre, Plasma Sources Sci. Technol. 25, 033002 (2016)



# Plasma ?



<https://www.acxys.com/ub>

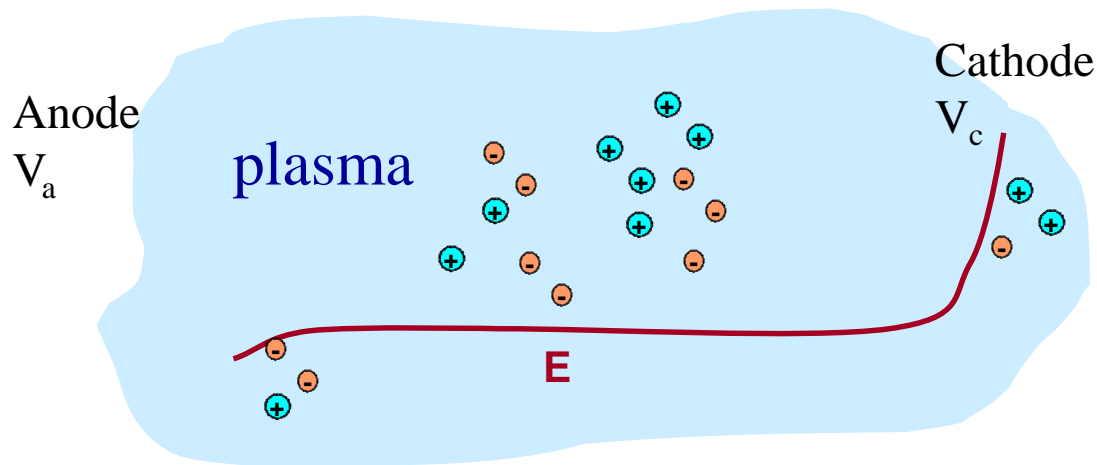


# Plasma froid hors-équilibre

- **Espèces avec différentes températures**
  - $T_e > T_i > T_N$
  - Espèces neutres dominant
  - Différentes manières d'initier la décharge : DC, RF, ICP, microonde, etc.
- **Collisions dominantes**
  - Collisions électron-neutre (chimie potentiellement très complexe)
  - Rôle clé des électrons
- **Forces agissant sur les particules chargées**
  - Electrique
  - Champ magnétique extérieur : électrons, ions trop lourds
- **Plasmas confinés dans des enceintes**
  - Phénomènes aux électrodes à considérer (génération/perte de particules)
  - Basse pression : système sous vide

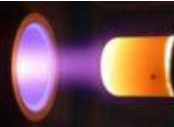


# Comment accélérer des ions ?

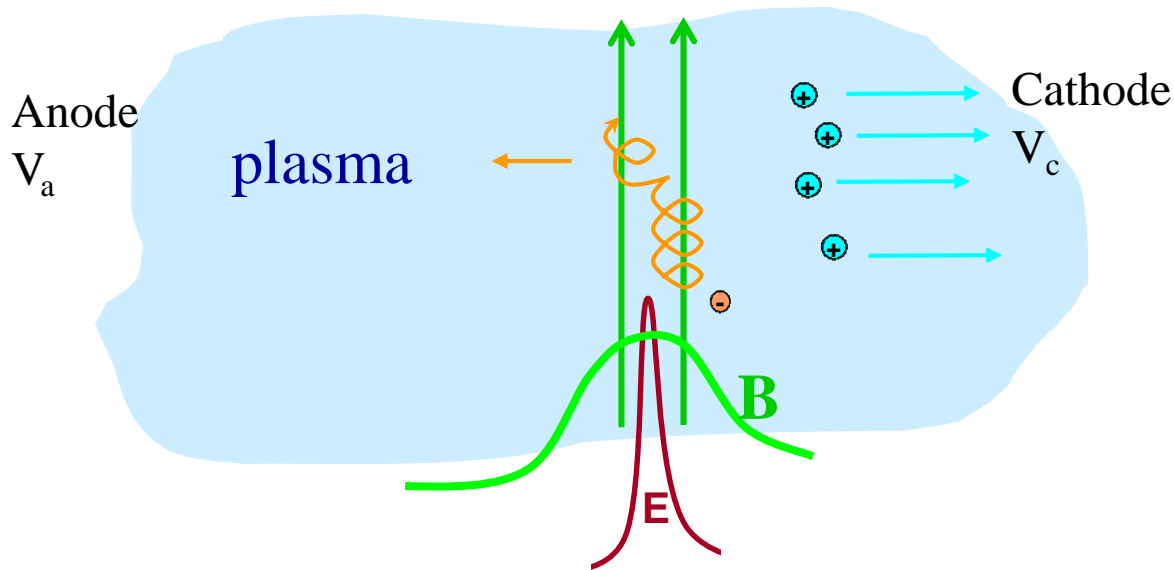


Crédit : QinetiQ

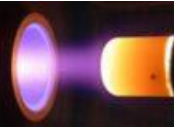
- Plasma – tension continue (DC)
- Force électrique : énergie potentielle en énergie cinétique
- Plasma milieu conducteur : champ  $E$  dans les gaines
- Utiliser un système de grilles accélératrices
  - ➔ érosion des grilles
  - ➔ limitation poussée/unité de surface



# Présence d'un champ magnétique

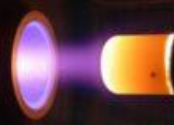
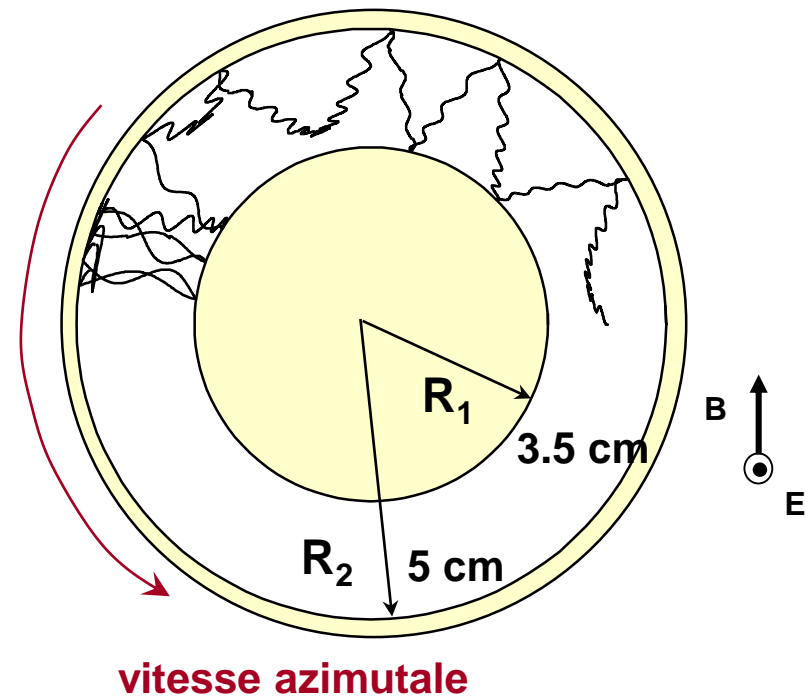
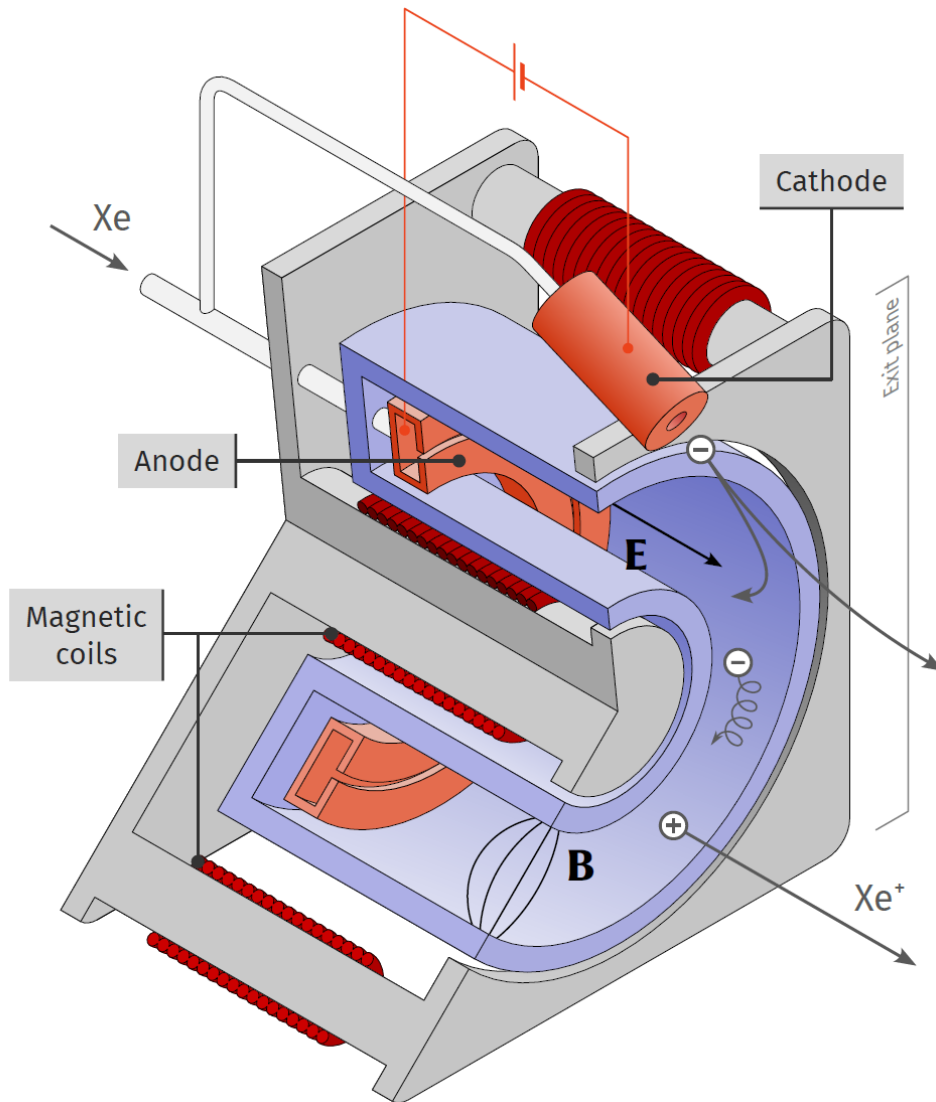


- **En présence d'un champ magnétique localisé (barrière)**
  - Décroissance de la conductivité électronique localement  $\sigma$
  - Génération un champ électrique à l'intérieur du plasma -  $E = j/\sigma$   
➔ **pas de limite poussée/unité de surface**
- **Le champ électrique sert à**
  - Chauffer les électrons pour ioniser le gaz
  - Accélérer les ions

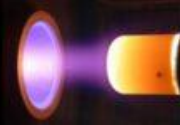
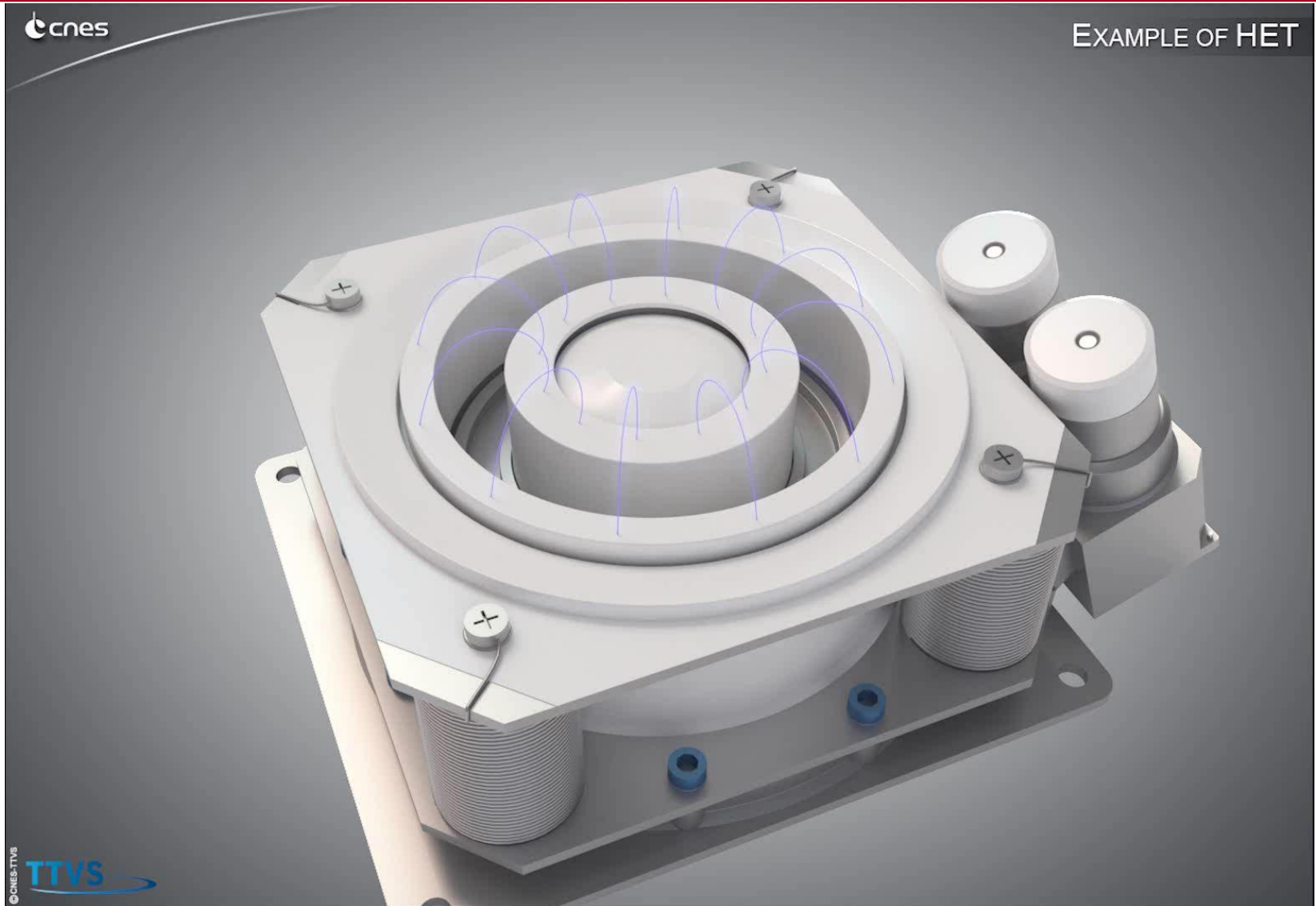


# Comment marche un propulseur de Hall (1/2)

Crédit : François Réot

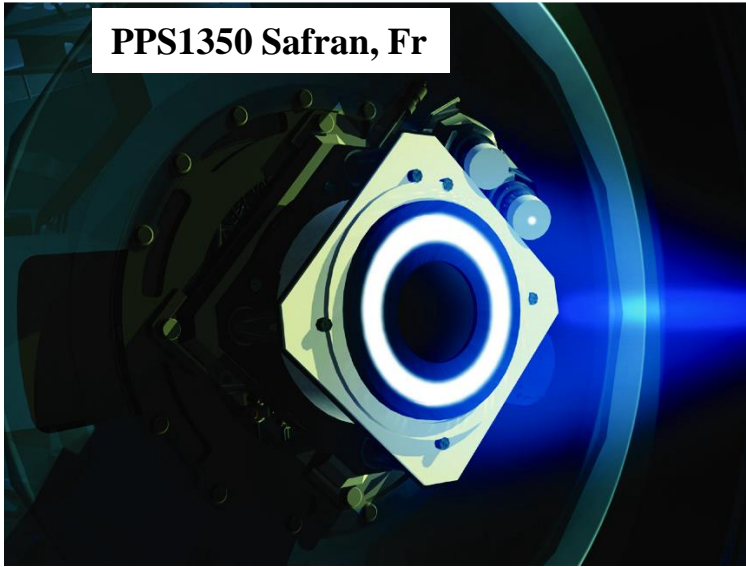


# Comment marche un propulseur de Hall (2/2)

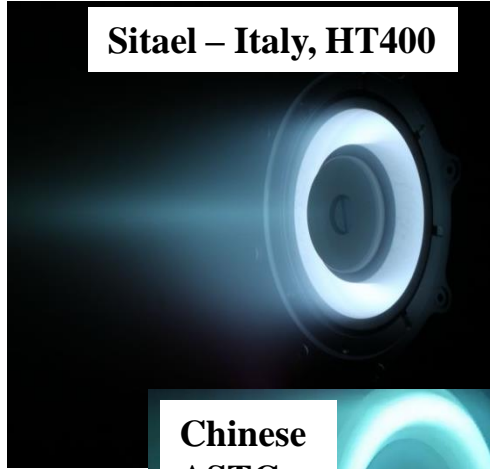


# Les propulseurs de Hall dans le monde

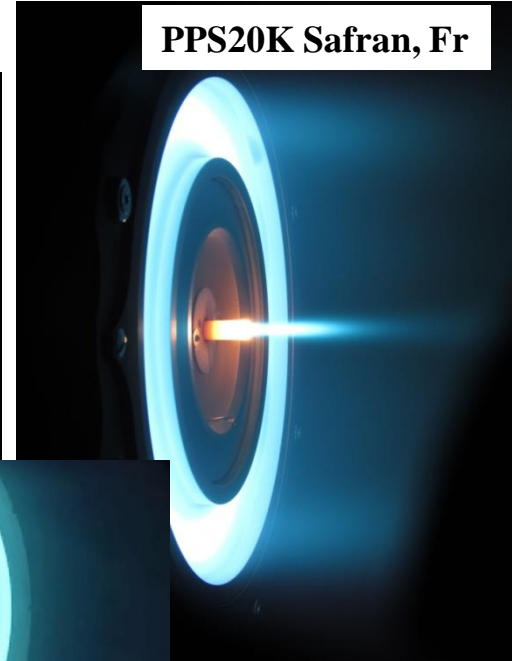
PPS1350 Safran, Fr



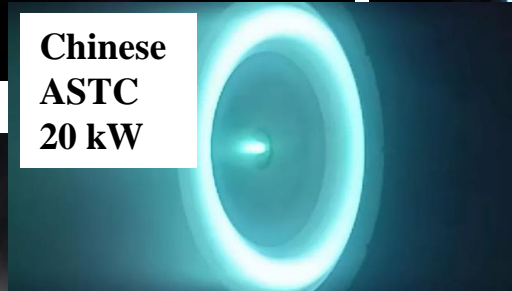
Sitael – Italy, HT400



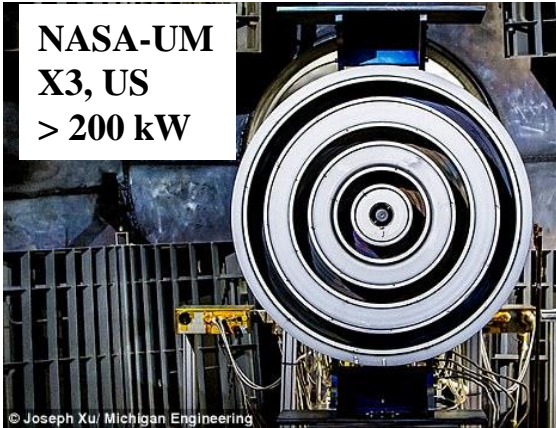
PPS20K Safran, Fr



Chinese  
ASTC  
20 kW

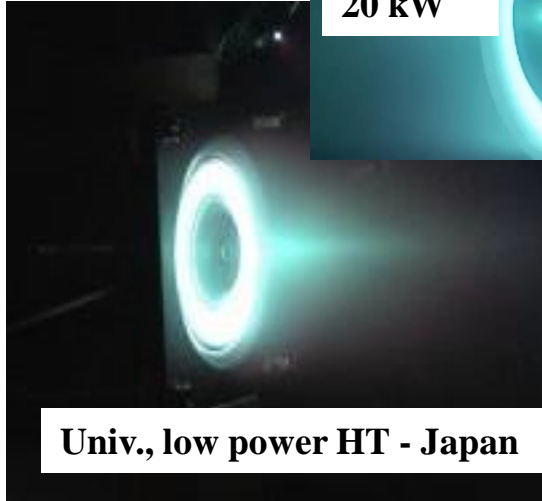


NASA-UM  
X3, US  
> 200 kW

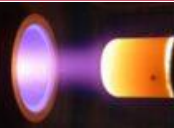


© Joseph Xu/ Michigan Engineering

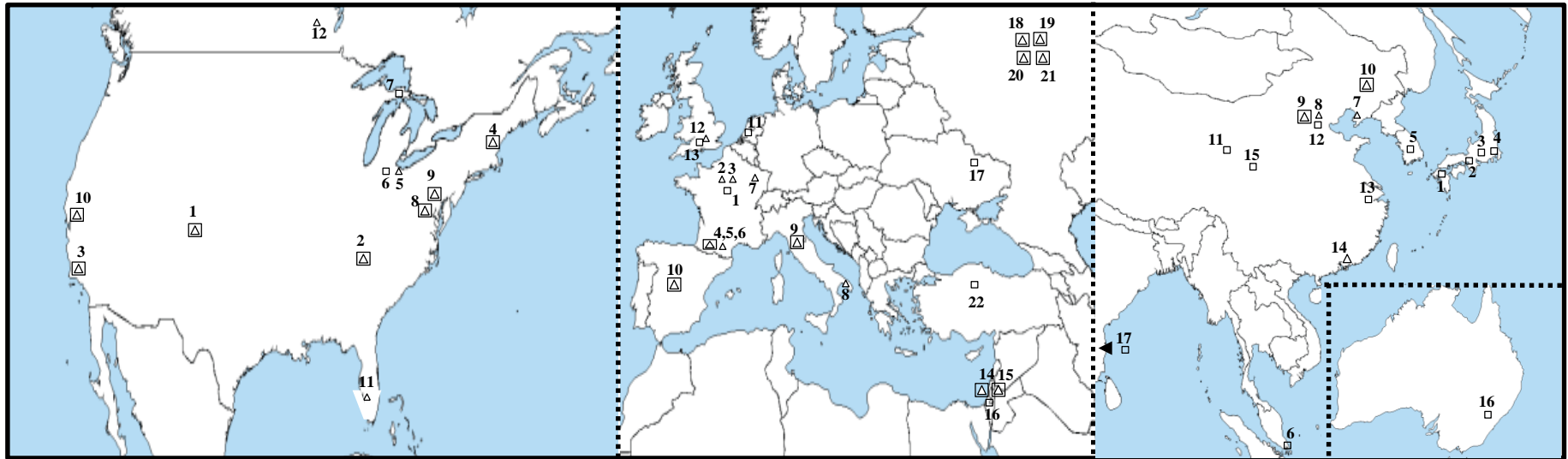
Univ., low power HT - Japan



Fakel, Russia – SPT100



# Les groupes de recherche



△ Modélisation   □ Expériences   ▴ Les deux

## Amérique du Nord

- 1 EPPE, Colorado State Univ. Co
- 2 CSTR, Georgia Institute of Tech., Ge
- 3 NASA-JPL-Cal.Tech, Pasadena, Ca
- 4 SPL, Massachusetts Institute of Tech., Ma
- 5 PEPL, Univ. of Michigan, Mi
- 6 NPPDG, Univ. of Michigan, Mi
- 7 SSRG, Michigan Tech. Univ., Mi
- 8 EPPDyL, Princeton Univ., NJ
- 9 PPPL, Princeton Univ., NJ
- 10 SPPL, Stanford Univ. Ca
- 11 DMP, Eckert College, Fl
- 12 PEP, Univ. Saskatchewan, Canada

## Europe

- 1 ICARE, CNRS, Orléans, Fr
- 2 DPHY-Onera, Palaiseau, Fr
- 3 LPP, E. Polytech., Palaiseau, Fr
- 4 LAPLACE, Univ. Toulouse, Fr
- 5 DPHY-Onera, Toulouse, Fr
- 6 CERFACS, Toulouse, Fr
- 7 IJL, Univ. Nancy, Fr
- 8 IMIP, Univ. Bari, It
- 9 DCIE, Univ. Pisa, It
- 10 EP2, Univ. Carlos III Madrid, Es
- 11 ESA, Noordwijk, Neth.
- 12 Imp. Coll., London, UK
- 13 Univ. South., South., UK

## Russie-Ukr.-Tur.-Israel

- 14 HIT, Holon, Is
- 15 TIIT, Haifa, Is
- 16 PPL, Soreq NRC, Is
- 17 Khai, Aero. Univ. Kharkiv, Uk
- 18 TsNIIMASH, Moscow, Ru
- 19 MIREA, Moscow, Ru
- 20 RIAME-MAI, Moscow, Ru
- 21 Keldysh Res. C., Moscow, Ru
- 22 Tubitak Uzay, Ankara, Tu

Mise à jour 2025

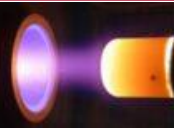
## Asie-Océanie

- 1 ASPL, Kyushu Univ., Ja
- 2 ARL, Osaka Univ., Ja
- 3 AML, Gifu Univ., Ja
- 4 DAA, Univ. Tokyo, Ja
- 5 KAIST, Daejeon, Ko
- 6 NIE, Nanyang Univ., Si
- 7 SS, Dalian Maritime Univ., Ch
- 8 SA, Beihang Univ., Beijing, Ch
- 9 BICE, China. Aearo. Space Sci., Beijing, Ch
- 10 LPP, Harbin Instit. Tech., Ch
- 11 Lanzhou Institute of Physics, Ch
- 12 SSE, Beihang Univ., Beijing, Ch
- 13 Shanghai Inst. of Space Prop., Ch
- 14 School of A&A, Shenzhen, Ch
- 15 School of E&E, Xi'an, Ch
- 16 UNSW, Canberra, Au
- 17 LPSC-ISRO, Thiruvananthapuram, In



plasma-flow : Plasmas et mécanique des fluides

17-20 nov. 2021 Saint-Étienne de Reuilly (France)

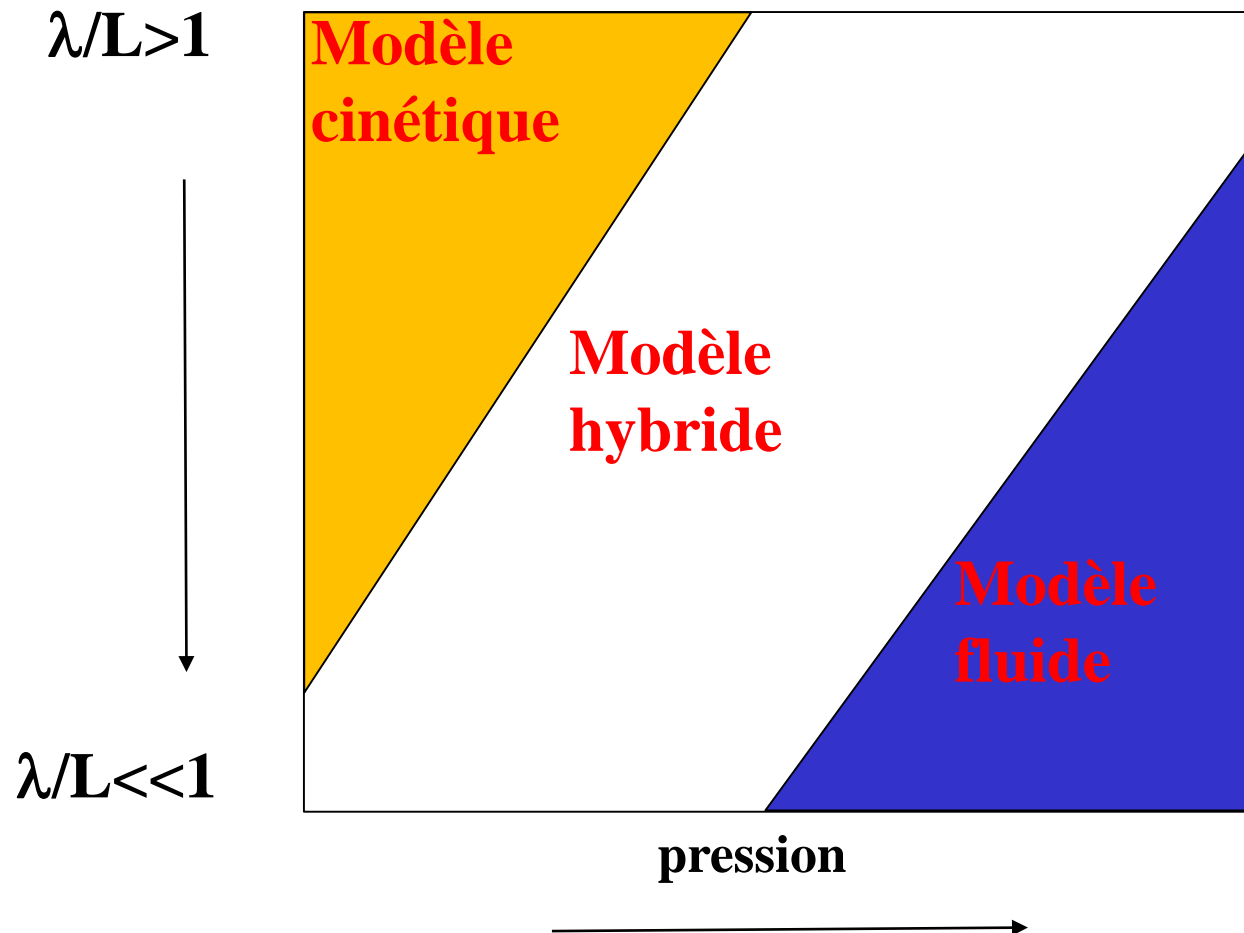


Laurent Garrigues

Jets de plasma partiellement magnétisés pour la propulsion électrique

Laplace

# Type de modélisation plasmas froids

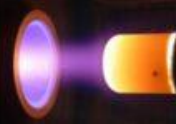


# Approche cinétique – équation de Boltzmann

- Fonction de distribution  $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v})$  = densité de particules dans l'espace des phases (positions  $\mathbf{x}$ , vitesses  $\mathbf{v}$ )
- $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d\mathbf{x} d\mathbf{v}$  = nombre de particules dans volume 6D infinitésimal  $d\mathbf{x} d\mathbf{v}$  autour d'une position 6D  $(\mathbf{x}, \mathbf{v})$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f + \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = \left( \frac{\delta f}{\delta t} \right)_{\text{collisions}}$$

- Evolution spatio-temporelle de  $f$  décrite par l'équation de Boltzmann
- Résolution particulaire (génération de particules et suivi de trajectoires)
- **Ions**



# Approche fluide

- Grandeurs macroscopiques, moyennées sur les vitesses

**Densité de particules:**  $n(\mathbf{x}, t) = \iiint f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) d^3 \mathbf{v}$

**Vitesse moyenne:**  $\mathbf{w} = \langle \mathbf{v} \rangle = \frac{1}{n} \iiint \mathbf{v} f d^3 \mathbf{v}$

**Energie moyenne:**  $\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{m}{2n} \iiint v^2 f d^3 \mathbf{v}$

**Température:**  $k_B T = \frac{1}{3} m \langle |\mathbf{v} - \mathbf{w}|^2 \rangle = \frac{m}{3n} \iiint |\mathbf{v} - \mathbf{w}|^2 f d^3 \mathbf{v} = \frac{2}{3} \bar{\varepsilon} - \frac{1}{3} m w^2$

- Equations de transport macroscopiques = moments de l'équation de Boltzmann

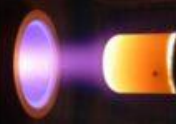
$$\iiint \left( \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f + \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f \right) \mathbf{v}^m d^3 \mathbf{v} = \iiint \left( \frac{\delta f}{\delta t} \right)_{\text{col}} \mathbf{v}^m d^3 \mathbf{v}$$

**m = 0: équation de continuité**

**m = 1: équation de quantité de mouvement**

**m = 2: équation d'énergie**

...



# Equation de continuité

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n \mathbf{w}) = S$$

(1)                      (2)                      (3)

(1) Taux de changement densité

(2) Divergence du flux : « bilan local entre départ et arrivée de particules »

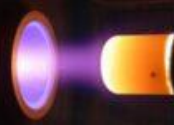
(3) Terme source = taux de création nette, sommé sur différents processus physico-chimiques  $k$

$$S = \sum_k N_k R_k \quad N = +1 \text{ (création), } +2 \text{ (création double), } -1 \text{ (perte), etc}$$

Proportionnel aux densités des réactants avec coefficient  $K$

– 2 corps	$R = K n_1 n_k$	$K = \langle \sigma v_{12} \rangle \quad [\text{m}^3/\text{s}]$
– 3 corps	$R = K_{3-c} n_1 n_2 n_3$	$K_{3-c} \text{ en } [\text{m}^6/\text{s}]$

Équation de continuité pour les électrons et les atomes (  $-S$ ,  $w = v_0$  )



# Equation de quantité de mouvement

$$m \frac{\partial n \mathbf{w}}{\partial t} + m \nabla \cdot (n \mathbf{w} \otimes \mathbf{w}) + \nabla \cdot \mathbf{P} - qn(\mathbf{E} + \mathbf{w} \times \mathbf{B}) = \mathbf{R}$$

(1)
(1)
(2)
(3)
(4)

(1) Inertie « mémoire de la vitesse »

(2) Gradient du tenseur de pression

$$\mathbf{P} = m \iiint (\mathbf{v} - \mathbf{w}) \otimes (\mathbf{v} - \mathbf{w}) f d^3 \mathbf{v}$$

Relation de fermeture, électrons

$$\mathbf{P} = nk_B T \mathbf{I}$$

$$nk_B T = \frac{1}{3} m \iiint |\mathbf{v} - \mathbf{w}|^2 f d^3 \mathbf{v}$$

(3) Force électromagnétique macroscopique

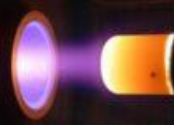
(4) Transfert de quantité de mouvement vers d'autres espèces par collisions

$$\mathbf{R} = - \sum_j \frac{m M_j}{m + M_j} n N_j \langle \sigma_{mj} v \rangle_{\text{flux}} (\mathbf{w} - \mathbf{W}_j) + \text{chimie} \equiv -m \bar{v}_m n \mathbf{w} + \mathbf{R}'$$

Collisions avec  
gaz au repos

$$\mathbf{R} = -m \bar{v}_m n \mathbf{w}$$

$$\bar{v}_m = \frac{M}{m + M} N \langle \sigma_m(v) v \rangle_{\text{flux}}$$



# Dérive-diffusion avec champ magnétique

- Les termes d'inertie négligés

- Flux d'électrons

$$n\mathbf{w} = \underbrace{-\mu}_{\text{mobilité}} \underbrace{(n\mathbf{E} + \nabla(nT))}_{\text{force nette}} - \mu(n\mathbf{w}) \times \mathbf{B} \quad \swarrow \text{force magnétique}$$

réécriture de l'équation  
tenseur de mobilité

- Tenseur de mobilité

$$n\mathbf{w} = -\boldsymbol{\mu} \cdot (n\mathbf{E} + \nabla(nT)) \equiv$$

$$\equiv \underbrace{-\mu(n\mathbf{E}_{//} + \nabla_{//}(nT))}_{\text{parallèle à } \mathbf{B}} - \underbrace{\mu_{\perp}(n\mathbf{E}_{\perp} + \nabla_{\perp}(nT))}_{\text{perpendiculaire to } \mathbf{B}} + \underbrace{\mu_{\times}(n\mathbf{E}_{\perp} + \nabla_{\perp}(nT)) \times (\mathbf{B}/B)}_{\text{perpendiculaire à } \mathbf{B} \text{ et aux forces}}$$

$$\mu = \frac{q}{mv}$$

parallèle à  $\mathbf{B}$   
Très grande, pas de confinement

$$\mu_{\perp} = \frac{\mu}{1 + (\mu B)^2} \approx \frac{mv}{qB^2}$$

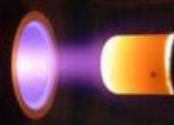
perpendiculaire to  $\mathbf{B}$   
Très petite

$$\mu_{\times} = \mu \frac{(\mu B)}{1 + (\mu B)^2} \approx \frac{1}{B}$$

perpendiculaire à  $\mathbf{B}$  et aux forces  
= dérive magnétique

Forte anisotropie en fonction du paramètre de Hall  $\Omega_{\text{Hall}} = \omega/\nu \gg 1$

Typiquement  $\mu_{//} : \mu_{\perp} : \mu_{\times} = \underline{1000000} : \underline{1} : \underline{1000}$



# Equation d'énergie cinétique totale

$$\underbrace{\frac{\partial(n\bar{\varepsilon})}{\partial t}}_{(1)} + \nabla \cdot \left( \underbrace{n\mathbf{w}\bar{\varepsilon}}_{(2)} + \underbrace{\mathbf{P} \cdot \mathbf{w}}_{(3)} + \underbrace{\mathbf{Q}}_{(4)} \right) - \underbrace{qn\mathbf{w} \cdot \mathbf{E}}_{(5)} = C$$

(1) Terme temporel

(2) Flux d'énergie convectif, associé au transport de particules

(3) Flux de chaleur :

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{2} m \int |\mathbf{v} - \mathbf{w}|^2 (\mathbf{v} - \mathbf{w}) f d^3 \mathbf{v}$$

conductivité  
thermique

Relation de fermeture

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Loi de Fourier} \\ \text{Plasma magnétisé} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \mathbf{Q} = -\kappa \nabla T \\ \mathbf{Q} + \mu \mathbf{B} \times \mathbf{Q} = -\kappa \nabla T \end{array}$$

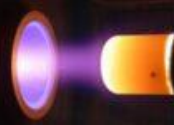
(4) Travail du champ électrique

(5) Puissance nette (gagnée – perdue) dans collisions ou chimie

$$C = \underbrace{\sum_j \frac{2mM_j n \bar{v}_{mj}}{(m + M_j)^2} (\bar{\varepsilon}_j - \bar{\varepsilon})}_{\text{collisions élastiques avec autres espèces}} - \underbrace{\sum_k R_k \varepsilon_k}_{\text{processus inélastiques}} + \dots$$

collisions élastiques avec autres  
espèces

processus inélastiques



# Equation d'énergie pour les électrons

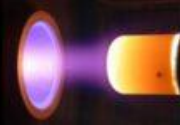
- Vitesse thermique >> vitesse dirigée

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle \approx \frac{1}{2} m \langle |\mathbf{v} - \mathbf{w}|^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

**Fermetures**       $\mathbf{P} = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon} \mathbf{I}$        $\mathbf{Q} = -\frac{5}{3} n D \nabla \bar{\varepsilon}$        $C \sim - \sum_k N n \varepsilon_k K_k(\bar{\varepsilon})$

$$D/\mu = k_B T$$

$$\longrightarrow \frac{\partial(n\bar{\varepsilon})}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \frac{5}{3} n \mathbf{w} \bar{\varepsilon} - \frac{10}{9} n \mu \bar{\varepsilon} \nabla \bar{\varepsilon} \right) = -e n \mathbf{w} \cdot \mathbf{E} + C$$



# Couplage électrostatique

- Electrons et ions couplés par le champ de charge d'espace

**Poisson :**  $-\varepsilon_0 \nabla^2 \Phi = \rho \equiv -en_e + \sum_i q_i n_i$

$\mathbf{E} = -\nabla \Phi$  ← **potentiel électrostatique**

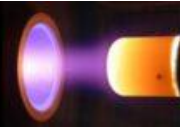
- Forte densité – taille des gaines négligeable
  - Plasma quasineutre
  - Champ  $\mathbf{E}$  déduit de la conservation du courant – loi d'Ohm généralisée

$$n_e = \sum_i (q_i / e) n_i$$

Transport des ions

$$\nabla \cdot (-\mu_e n_e \mathbf{E} - D_e \nabla n_e) = S_e - \frac{\partial n_e}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \sum_i (q_i / e) n_i \mathbf{w}_i \right)$$

Gerjan Hagelaar  
Modelling Methods for Low Temperature Plasmas  
HDR thesis, Toulouse (2008)



# Calcul du potentiel électrique



- Potentiel électrique  $V$  déduit de la relation de « Morozov »

$$\phi = \phi^* + T_e \ln \left[ \frac{n}{n_0} \right]$$

constante le long de B

- $\phi^*$  déterminé à partir de l'équation de courant - normale à la direction B

$$\nabla_{\perp} I_e(\phi^*) = \nabla_{\perp} I_i$$

équation fluide

simulation particulière des ions

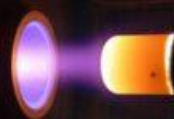
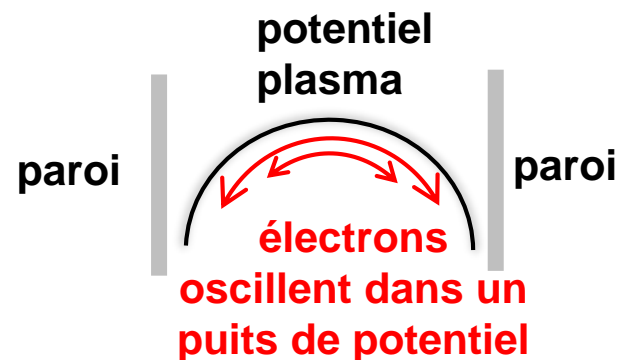
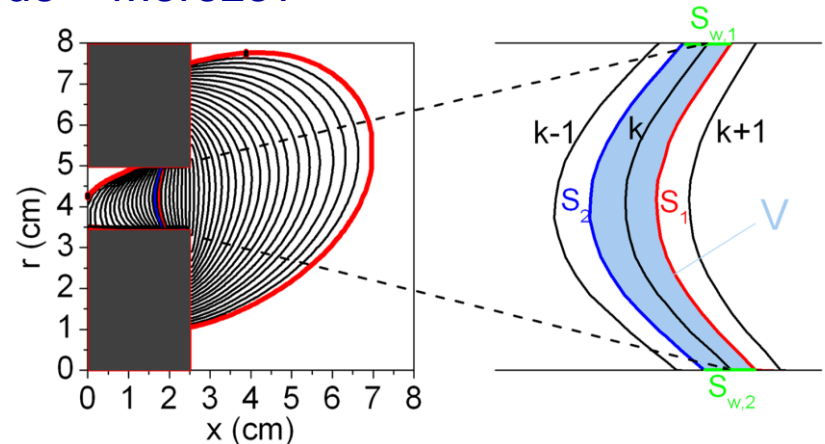
- Electrons : vitesses restent quasi-isotrope à cause du couplage avec les ions (potentiel plasma) – le long de B

→ relation de Boltzmann

Equilibre dérive – diffusion

$$\mu n \mathbf{E} \approx -D \nabla n$$

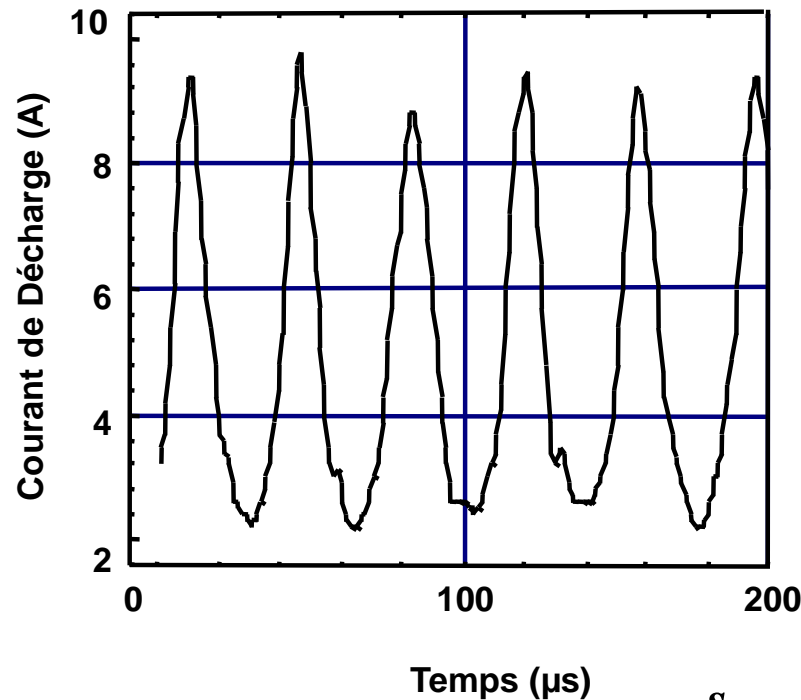
$$n(\mathbf{x}) = n_0 \exp \left( \frac{e(\Phi(\mathbf{x}) - \Phi_0)}{k_B T} \right)$$



# Caractère instationnaire du propulseur

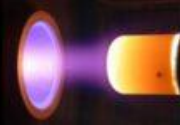
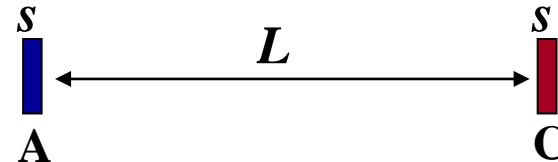
PPS100, 250 V, 5 mg/s

mesures



F. Darnon *et al.*,  
IEEE TPS 27, 98 (1999)

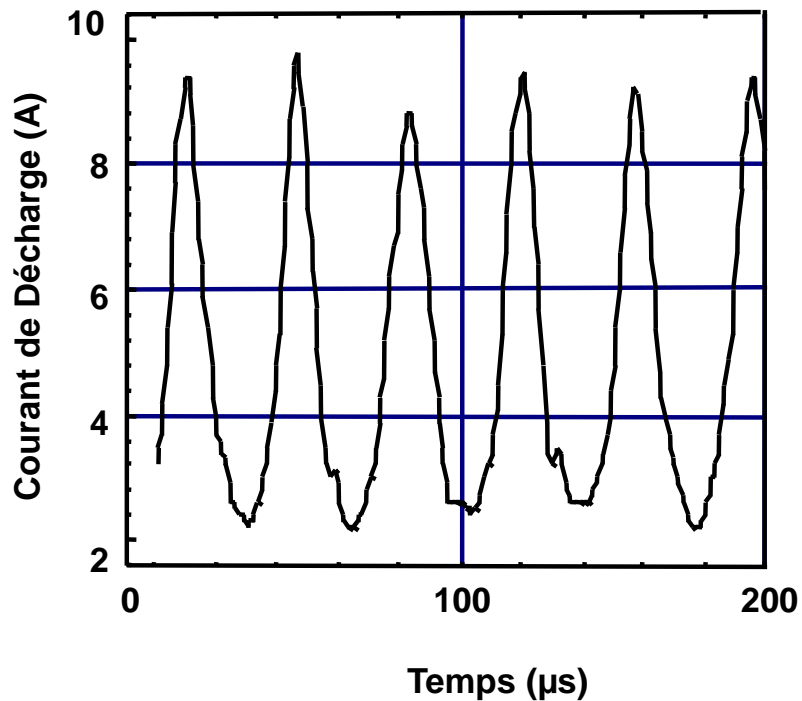
- Modélisation 1D axiale, temps



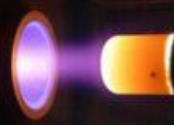
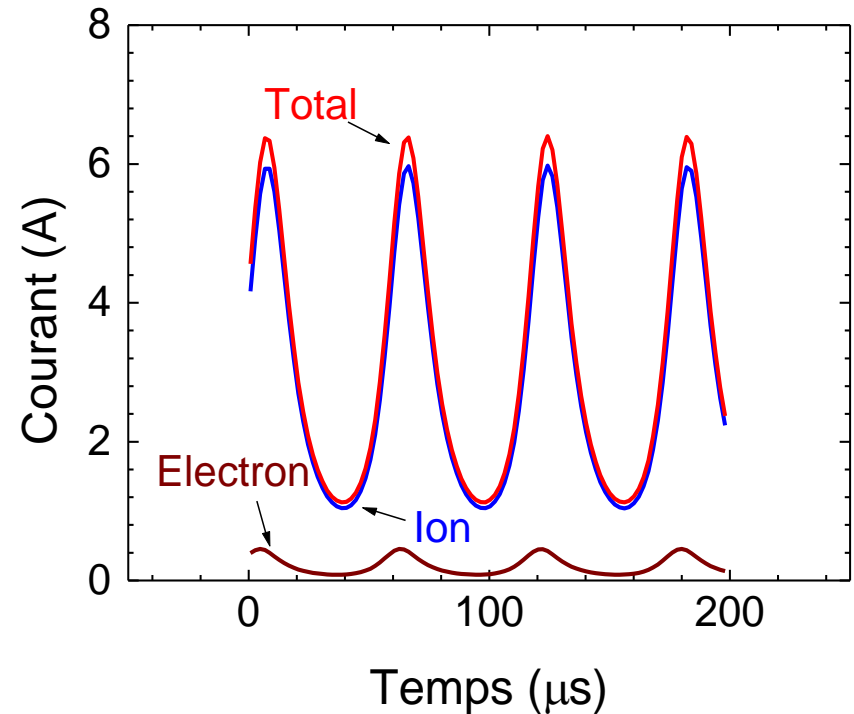
# Variation du courant vs time

PPS100, 250 V, 5 mg/s

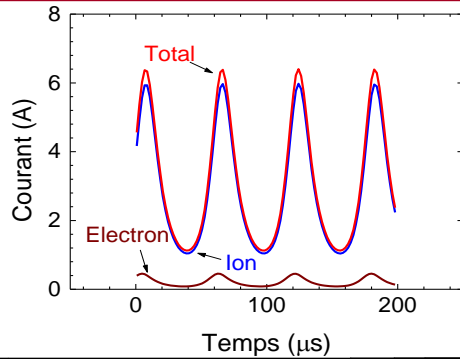
mesures



modélisation 1D du canal

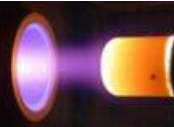
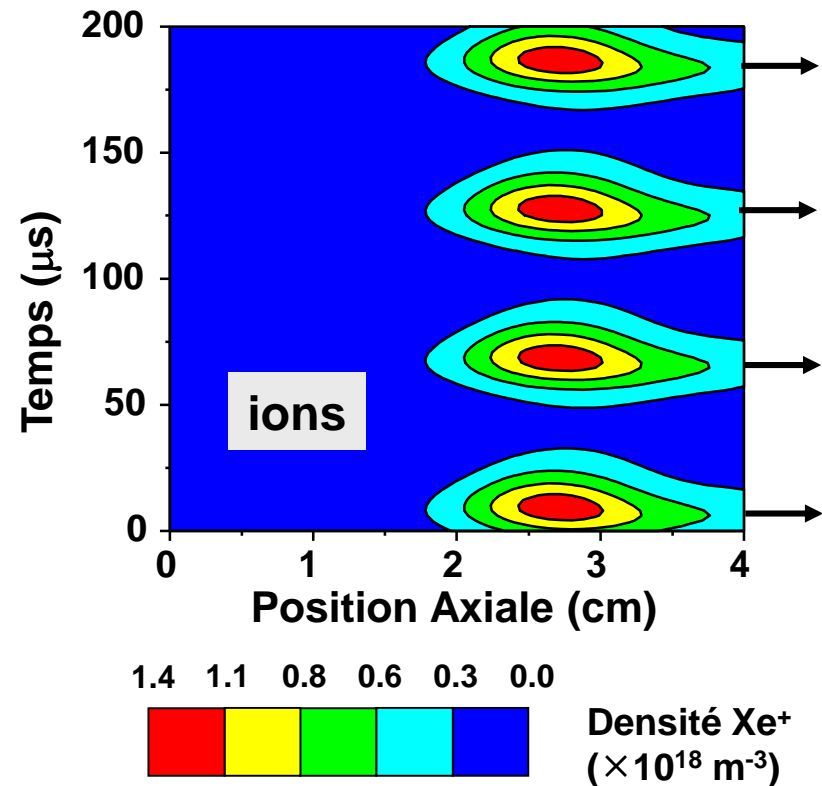
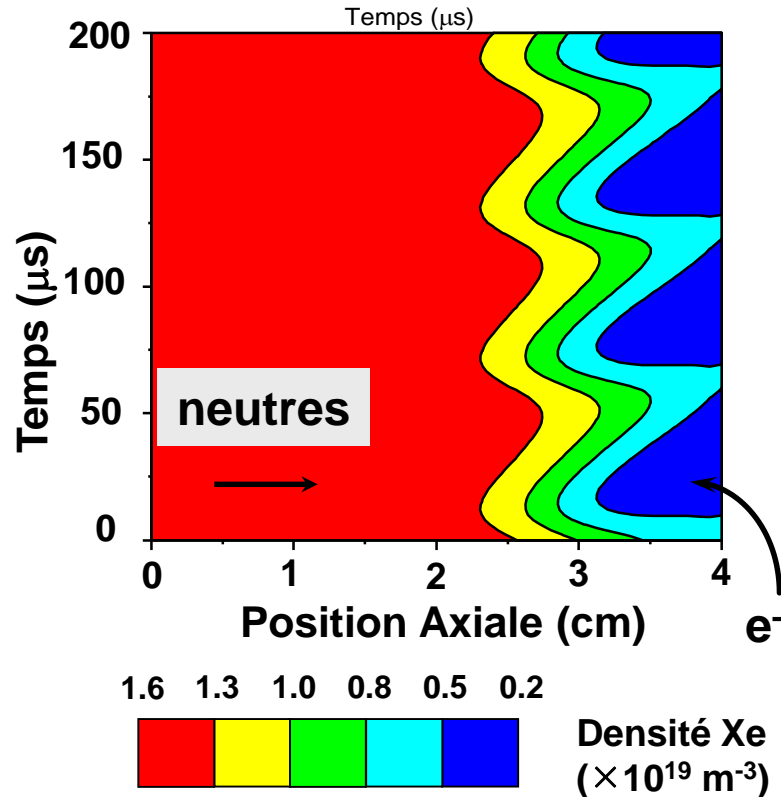


# Mode de respiration

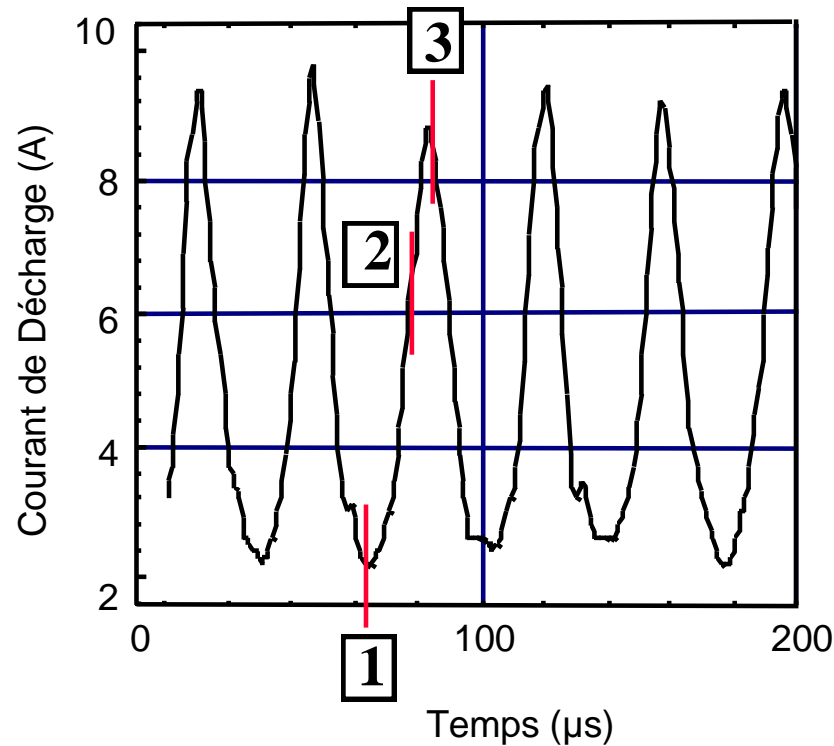


250 V, 5 mg/s

J. P. Boeuf and L. Garrigues,  
JAP 84, 3541 (1998)

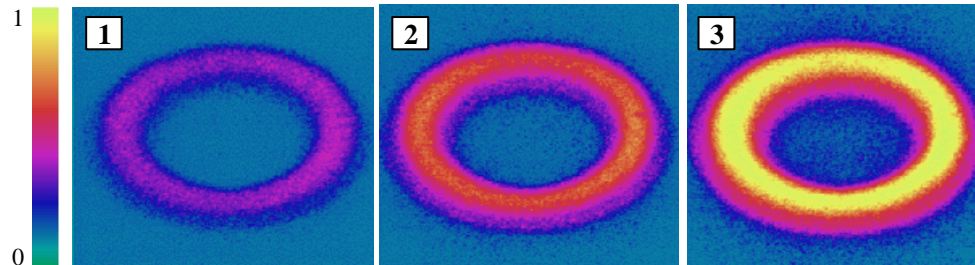


# Ions expulsés par bouffées



250 V, 5 mg/s

F. Darnon *et al.*,  
IEEE TPS 27, 98 (1999)



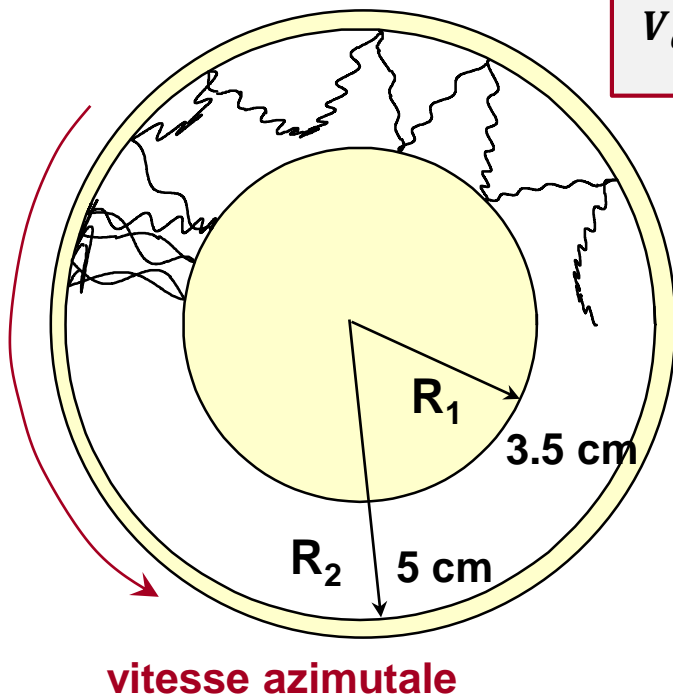
mesure  
de l'émission  
lumineuse



# Transport électronique axial (1/2)

## conductivité classique « collisionnelle »

- vitesse de dérive azimutale indépendante de la fréquence de collision
- vitesse de dérive axiale proportionnelle à la fréquence de collision  
donc à la densité de gaz



$$V_{d,\theta} = \overline{v_{e,\theta}} = \frac{E}{B}$$

$$\omega = \frac{eB}{m}$$

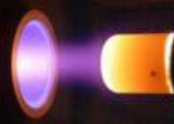
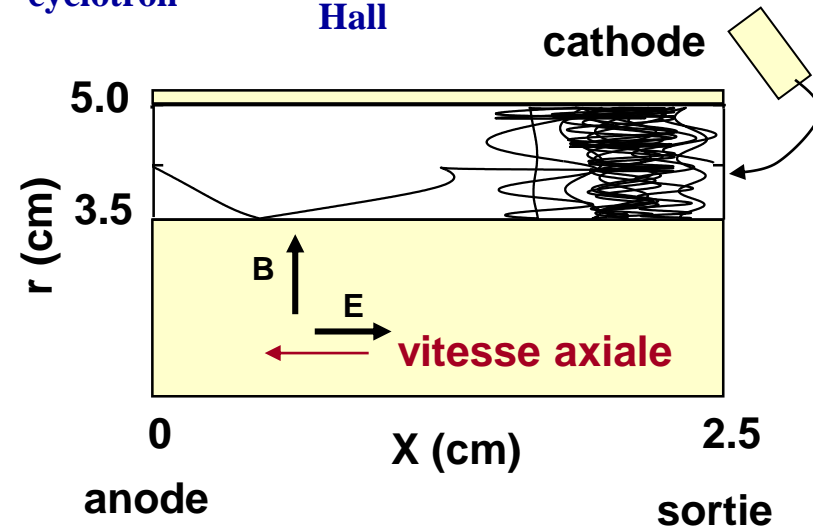
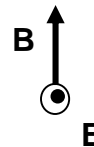
pulsation  
cyclotron

$$V_{d,x} = \overline{v_{e,x}}$$

$$= -\frac{E}{B} \frac{v}{\omega} = -\frac{E}{B} \frac{1}{\Omega_{Hall}}$$

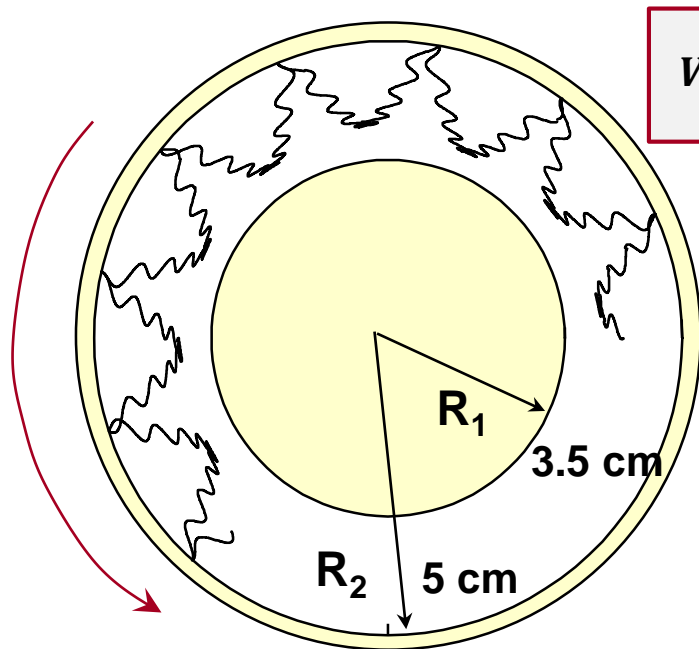
paramètre de  
Hall

fréquence  
collisions



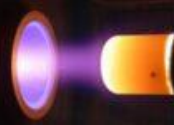
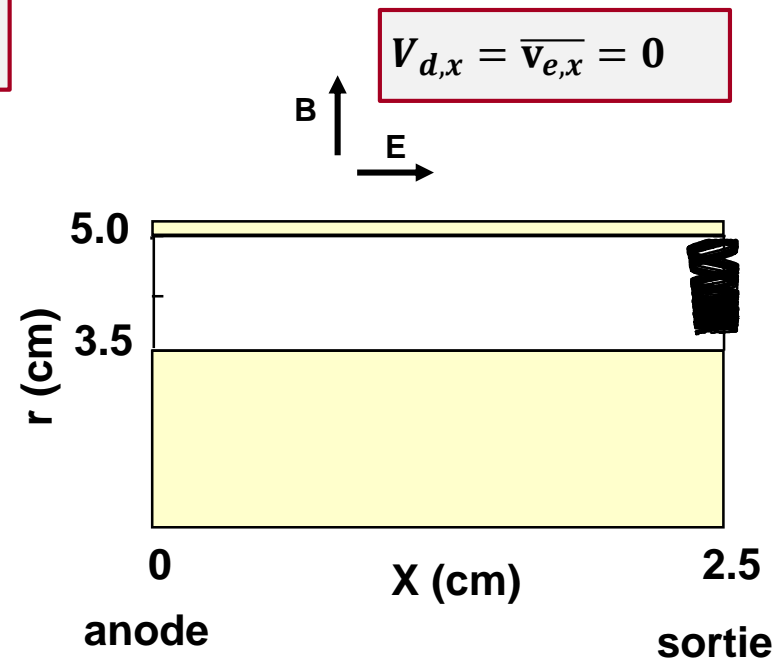
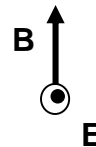
# Transport électronique axial (2/2)

- vitesse de dérive azimutale indépendante de la fréquence de collision
- vitesse de dérive axiale nulle quand la densité de gaz est nulle

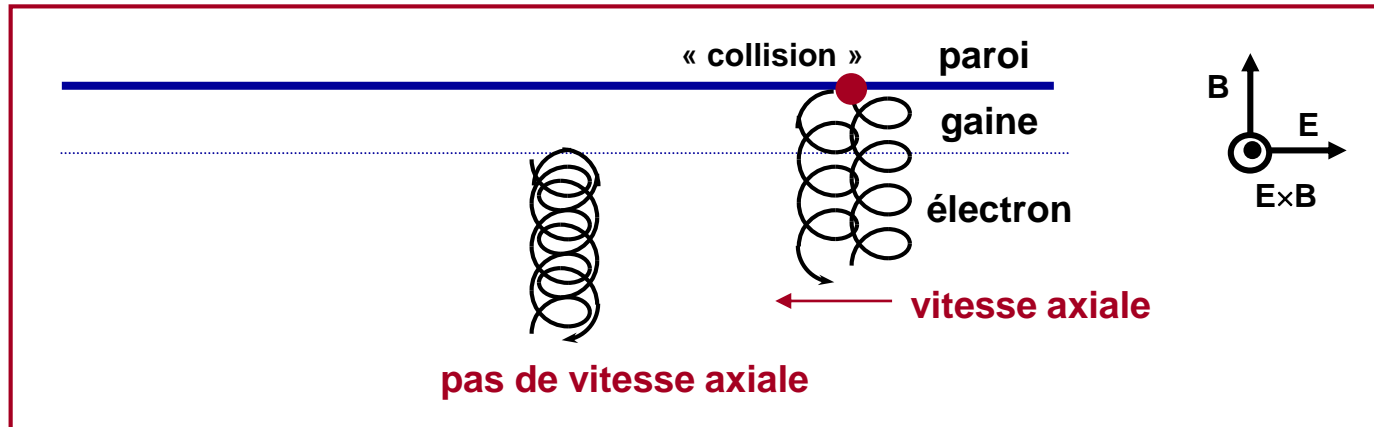


vitesse azimutale

$$V_{d,\theta} = \overline{v_{e,\theta}} = \frac{E}{B}$$

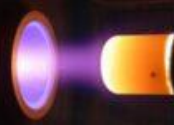


# Interactions électron-paroi



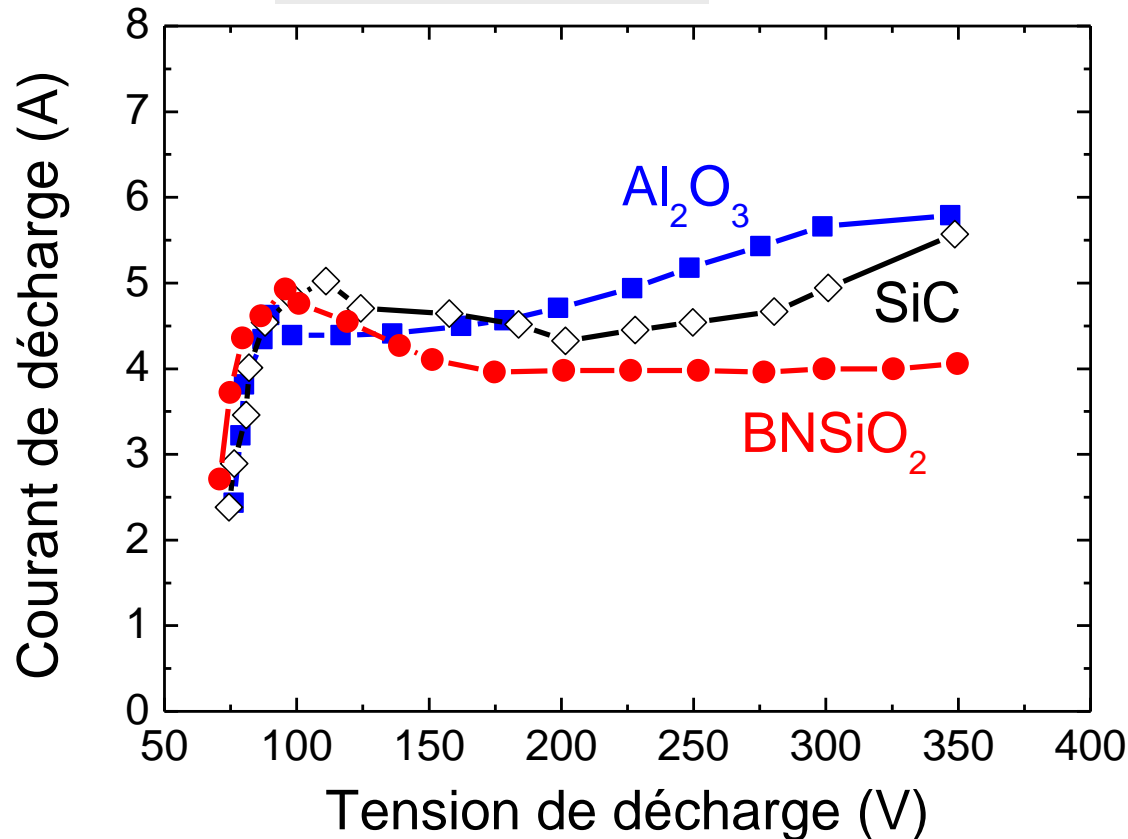
- « conductivité pariétale » - littérature russe abondante (Morozov)
  - transfert de quantité de mouvement
  - changement de trajectoire confinée
- théorie d'émission secondaire électronique par impact électronique
  - influence sur le potentiel de gaine
  - appuyée par des études sur des parois constituées de diverses céramiques
- prise en compte de manière très empirique dans notre modèle
  - fréquence de collision « effective »

$$\nu_{e-w} = \frac{\alpha v_{e,th}}{(R_2 - R_1)}$$



# Interactions électron-paroi

SPT100, 5 mg/s



- Forte influence du matériau de paroi
- Taux d'EES différents
- Littérature très abondante

E. Ahedo *et al.*, PoP 10, 3397 (2003)

S. Barral *et al.*, PoP 10, 4137 (2003)

Y. Raitses *et al.*, PoP 12, 073507 (2005)

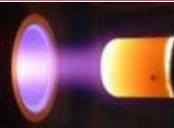
Y. Raitses *et al.*, PoP 13, 014502 (2006)

F. I. Parra *et al.*, JAP 100, 023304 (2006)

L. Garrigues *et al.*, JAP 100, 123301 (2006)

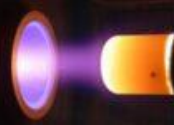
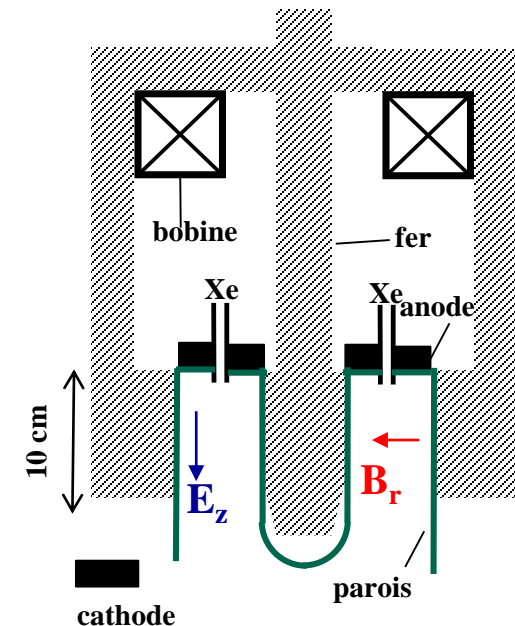
D. Sydorenko *et al.*, PRL 103, 145004 (2009)

- Transport à l'extérieur du canal ?



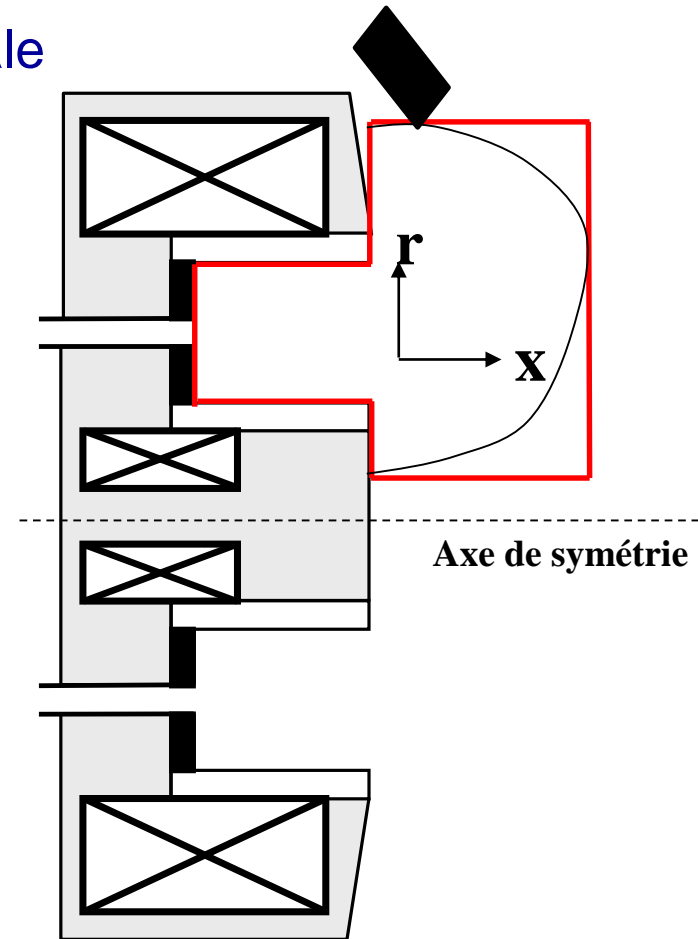
- instabilités du plasma qui provoquent un transport des électrons normal au champ magnétique
- bien connue dans les plasmas de fusion
  - Tokamaks - ITER
  - limite le temps du confinement du plasma
- plasmas froids - configuration ExB
  - mesurer l'effet de la turbulence ?
  - $V_{e,\theta} = E/B$ ,  $V_{e,x} = -Ev/B\omega$
  - rapport : paramètre de Hall  $\Omega_{Hall} = \frac{\omega}{\nu}$
  - diffusion anormale :  $\nu \gg \nu_{e-atome}$
  - $\Omega_{Hall} \sim \text{constant [0.1-0.3]}$
  - fréquence de collision effective  $\nu_{turb} = k\omega$

Janes and Lowder, PFL 9,1115 (1966)

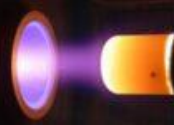


# Modèle hybride 2D (x, r, t)

- 2D axisymétrique – directions radiale and axiale
- Régions interne et externe du canal
- Champ magnétique imposé
- Description particulières : ions et **neutres**
- Plasma quasineutre :  $n = n_e = n_i$
- Description fluide des électrons
- Equation énergie, FDEE maxwellienne  
taux d'ionisation



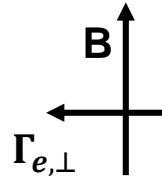
G.J.M. Hagelaar *et al.*, JAP 91, 5592 (2002)



# Transport modifié

- flux perpendiculaire aux lignes de champ B

$$\Gamma_{e,\perp} = -\mu_{e,\perp}(nE_{\perp} + \nabla_{\perp}(nT_e))$$



- mobilité

$$\mu_{e,\perp} = \frac{e}{mv} \frac{1}{1 + (\omega/\nu)^2} \approx \frac{e}{m} \frac{\nu}{\omega^2}$$

- $\nu$  fréquence de quantité de mouvement totale

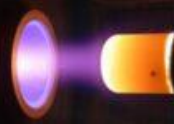
$$\nu = \nu_{coll} + \nu_{ano}$$

$$\mu_{e-w} \propto \alpha \nu_{e-w} / B^2$$

- $\nu_{ano}$  fréquence de collision effective

$$\mu_{turb} \propto k \nu_{turb} / B^2 \propto k / B$$

- par analogie, effet des parois, turbulence
- prise en compte de manière « empirique » - coefficients ajustables ( $\alpha, k$ )
- coefficients ajustés : comportement du moteur (performances, courant)



- Téléchargeable gratuitement
- Interface graphique
- Facile d'utilisation

<https://www.hallis-model.com>



HOME

HALLIS PHYSICS

HALLIS SOFTWARE

DOWNLOAD

CONTACT

## HALL Ion Sources simulation software

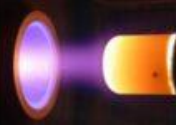
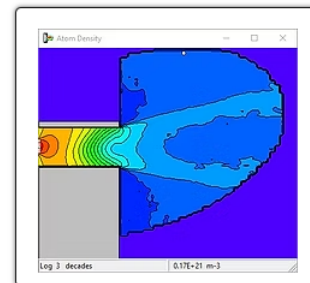
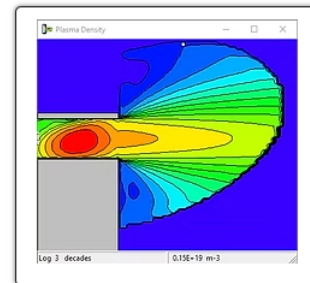
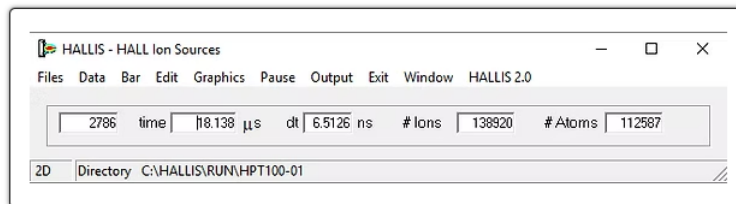
HALLIS is a simulation software package based on a hybrid fluid/particle model of HALL Ion Sources such as Hall thrusters, developed at the LAPLACE laboratory in Toulouse/France. It can operate in 1D or 2D axisymmetric configurations.

The Graphical User Interface of HALLIS allows simple use of the software for non-specialists in modeling and simulations.

HALLIS can be downloaded and installed on any PC operating under windows 10 or earlier 64 bit version. The 1D can be used freely for any set of parameters. For unregistered users, the 2D model is limited to a given geometry and magnetic field distribution. The 1D full version and the 2D limited version can be extremely useful for **educational purpose** or for **benchmark** simulations.

**The full 2D version will be available after May 10, 2021**, for university students and researchers (on the condition that they are not using it in the frame of a contract or collaboration with a company or a space agency). Registration is required. Go to the download page.

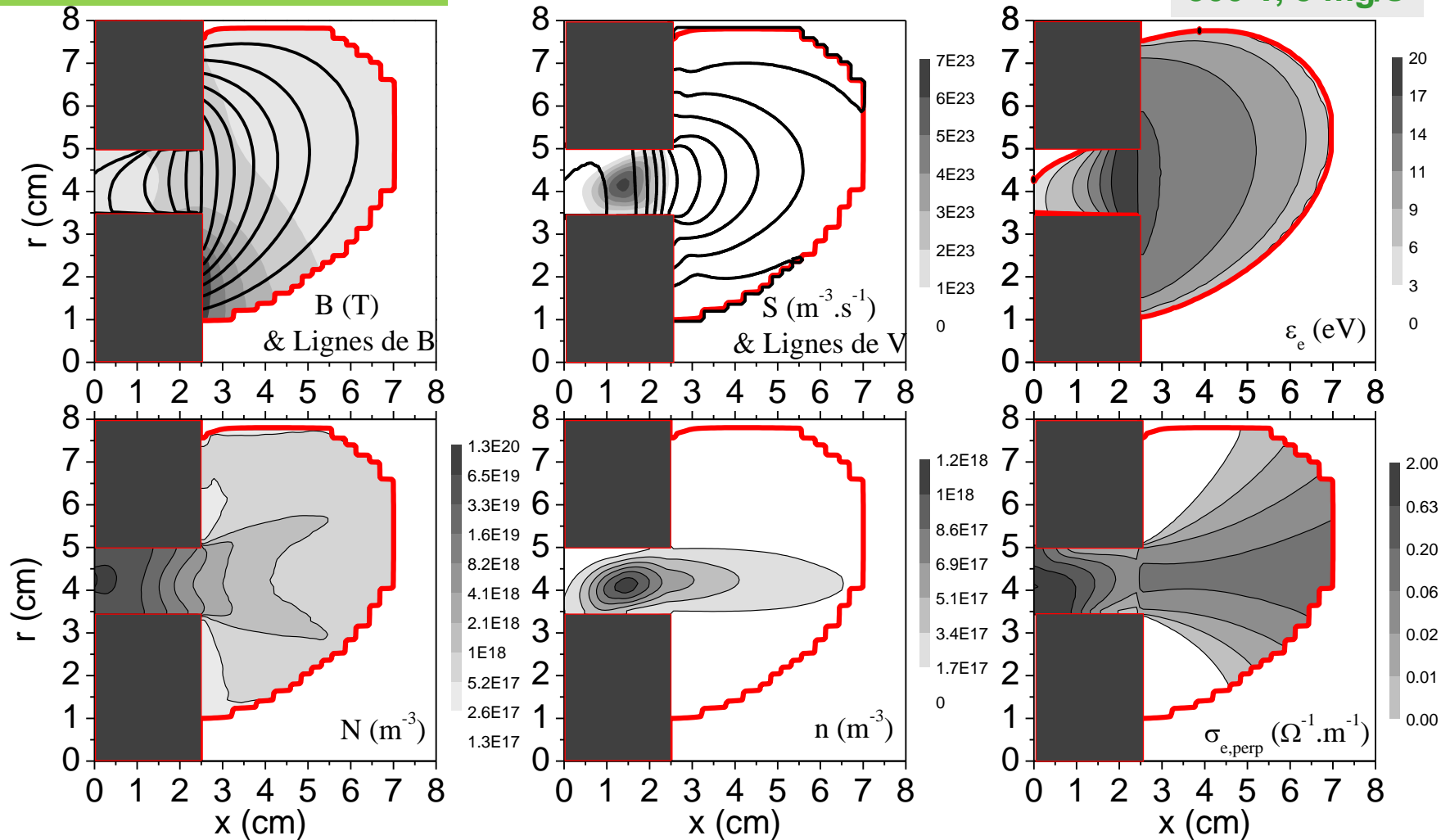
More information : [hallis.info@gmail.com](mailto:hallis.info@gmail.com) (or go to the [CONTACT](#) page)



# Point nominal - stationnaire

J. Bareilles et al., PoP 11, 3035 (2004)

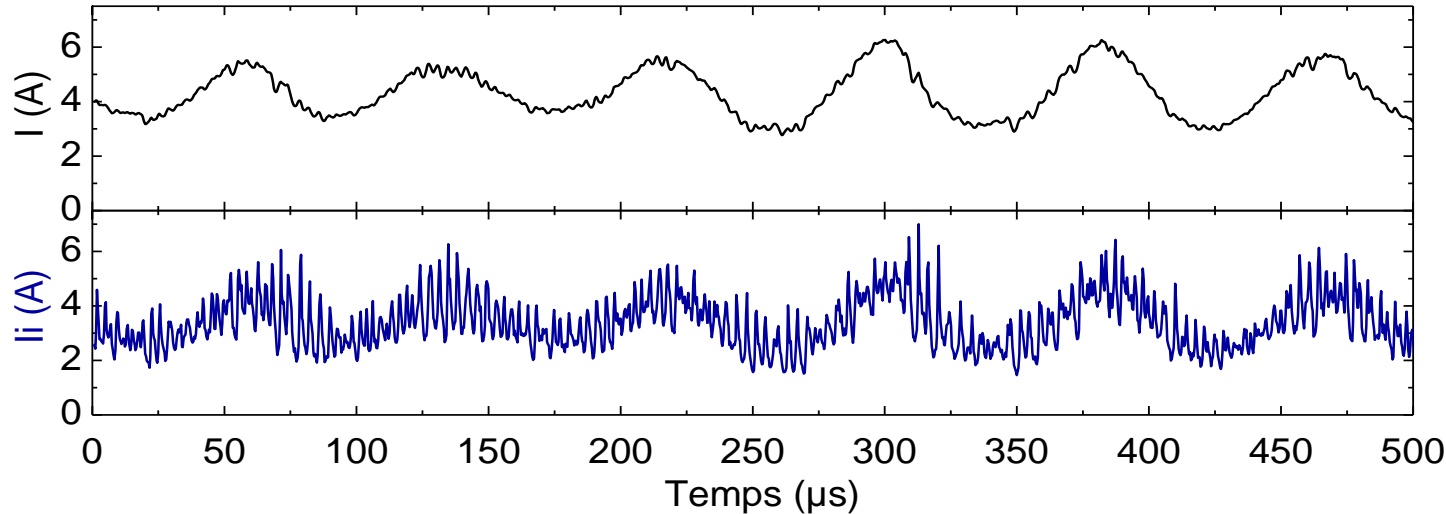
300 V, 5 mg/s



# Point nominal - dynamique

J. Bareilles et al., PoP 11, 3035 (2004)

300 V, 5 mg/s

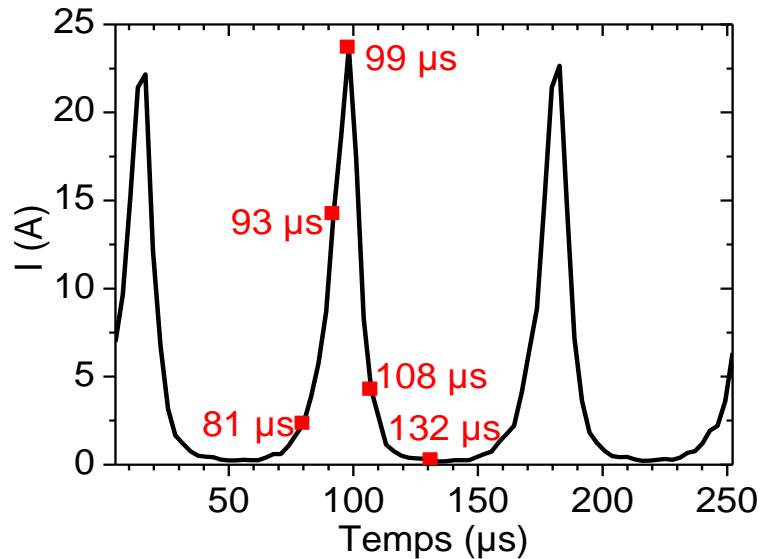


- **Oscillations basses fréquences 10 – 20 kHz**
  - Déplétion périodique des atomes à l'échelle du temps de transit des neutres
  - Observées expérimentalement et prédites par la modélisation 1D
- **Oscillations hautes fréquences 100 – 400 kHz**
  - Extraction périodique des ions par oscillation de la zone d'accélération à l'échelle du temps de transit des ions
  - Observées expérimentalement (surtout dans les « anciens » propulseurs russes) et responsables de l'élargissement de la fonction de distribution des ions

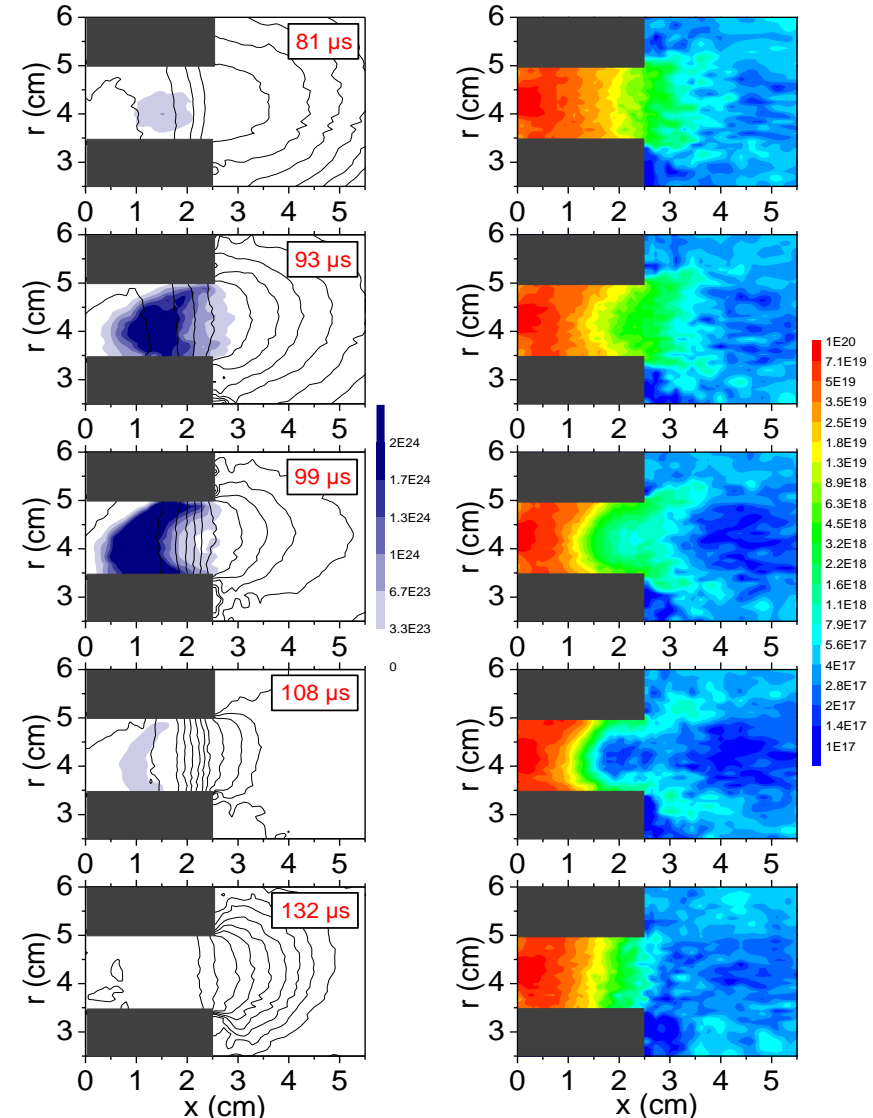


# Point nominal - oscillations BF

J. Bareilles et al., PoP 11, 3035 (2004)

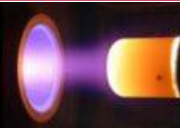
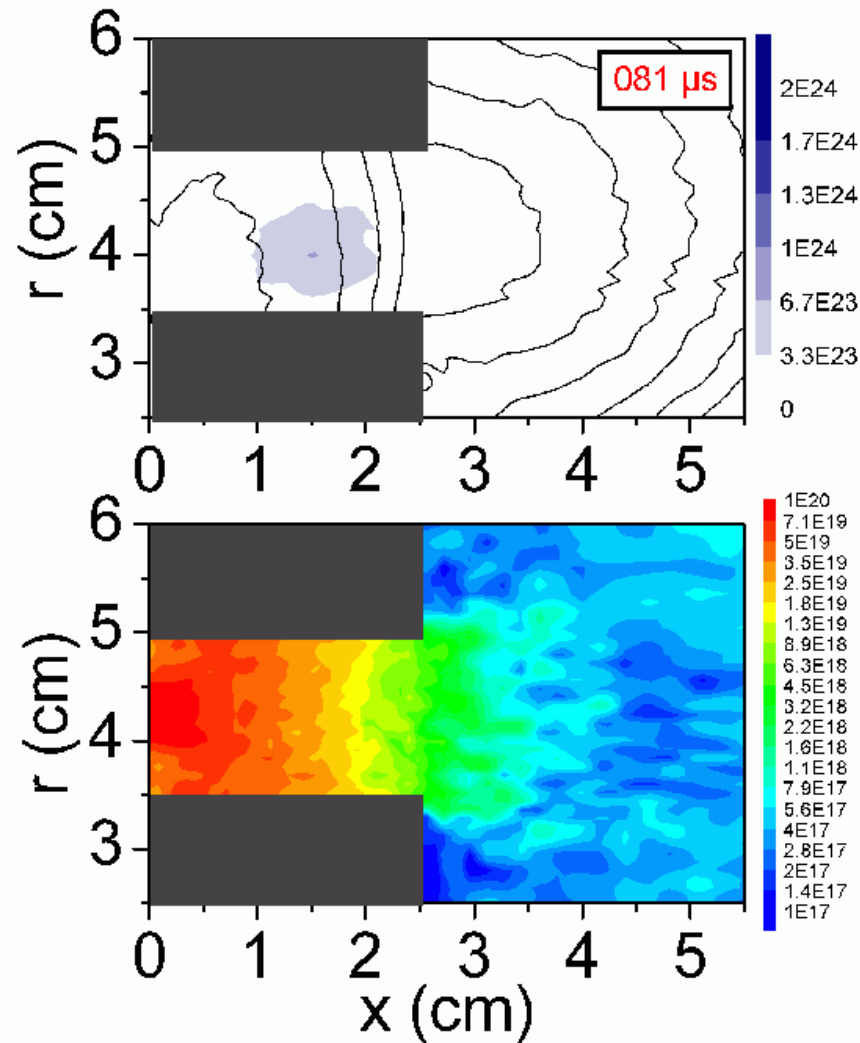


- **Ionisation**
  - Déplétion du front de neutres
- **Extinction de la décharge**
  - Remplissage du canal
  - Phénomène prédateur-proie
- **Divergence varie avec le temps**

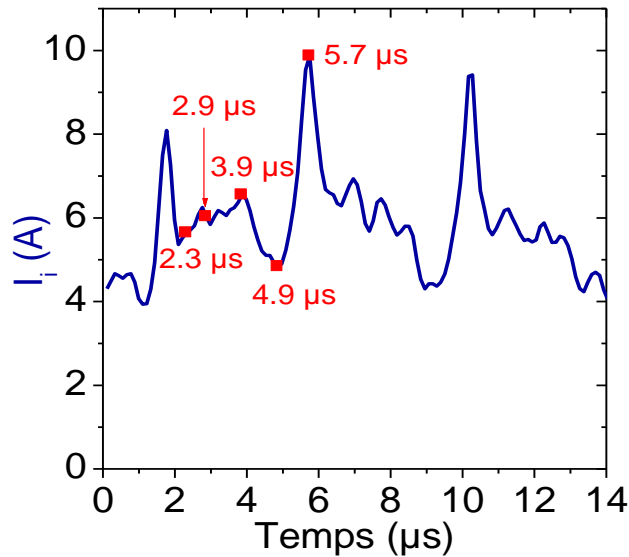


# Point nominal - oscillations BF - vidéo

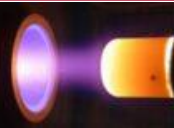
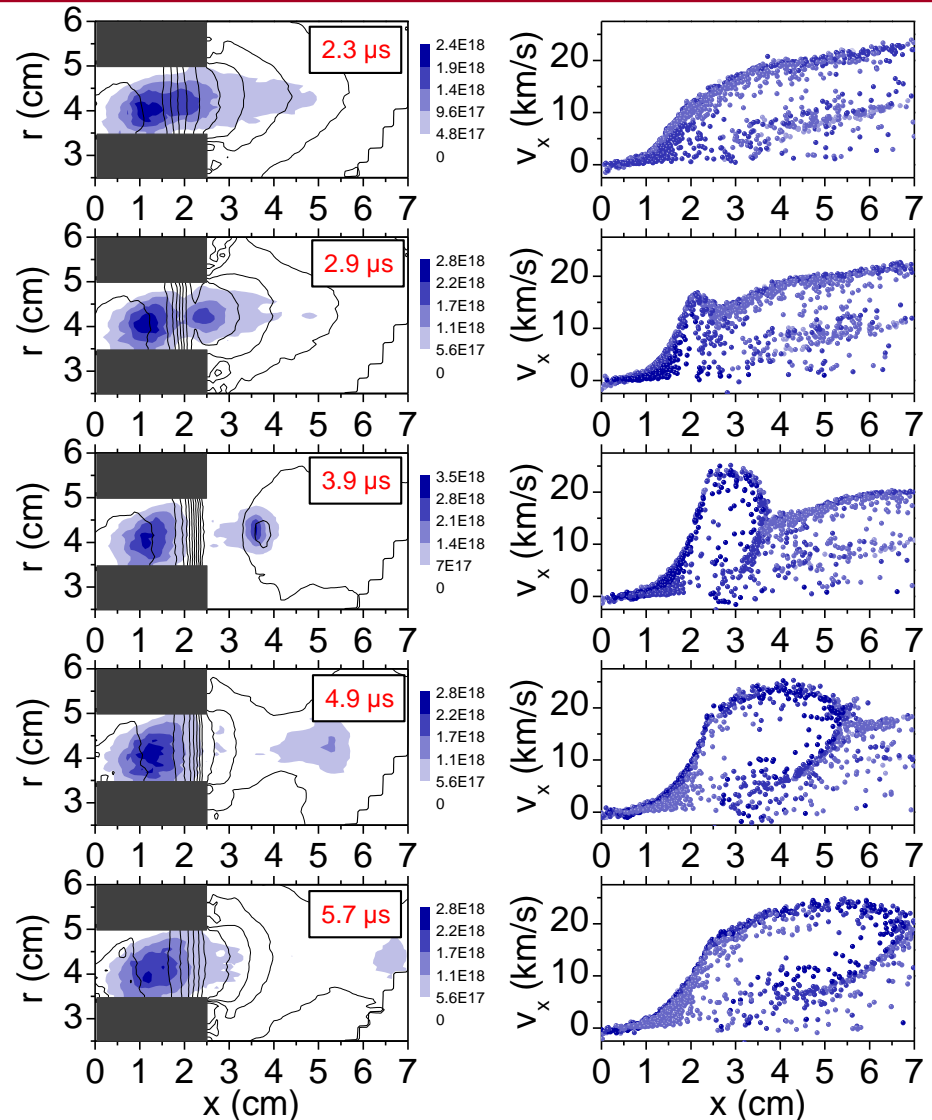
J. Bareilles et al., PoP 11, 3035 (2004)



# Point nominal - oscillations HF

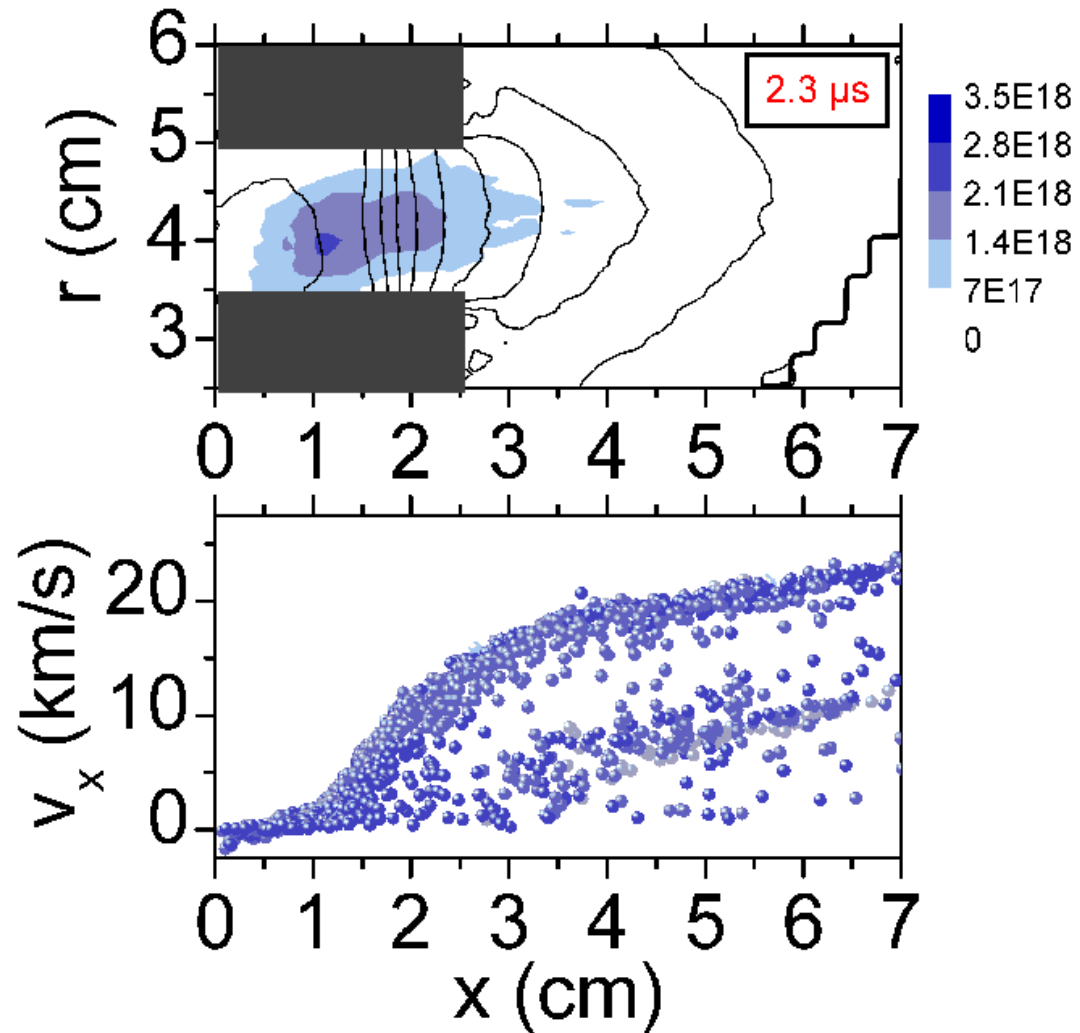


- **Extraction des ions par paquet**
  - Oscillation de la position de la zone d'accélération
- **Variation de la vitesse des ions**
  - $v_x \sim 10$  km/s soit 70 eV
  - $v_x \sim 23.5$  km/s soit 380 eV ( $> V_{appl}$ )

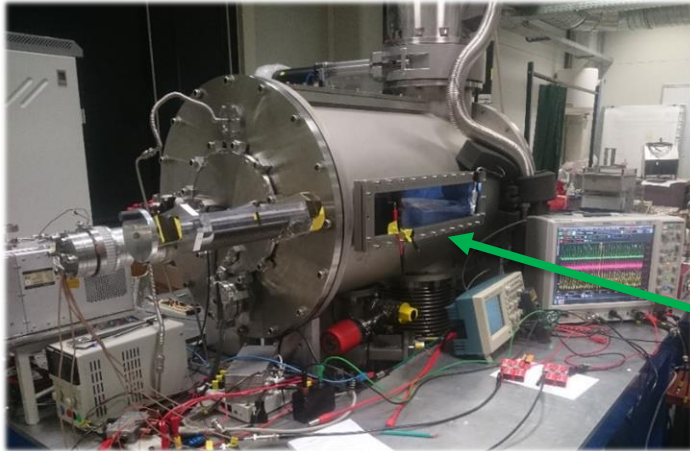


# Point nominal - oscillations HF - vidéo

J. Bareilles et al., PoP 11, 3035 (2004)



# Expériences @laplace



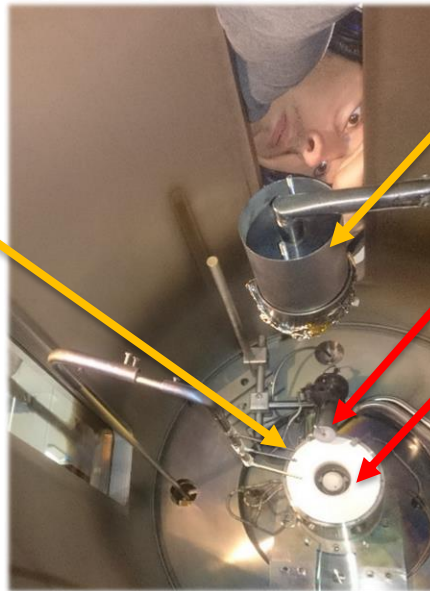
## ■ Caisson à vide

- Taille : 1 m longueur, 0.5 m largeur
- Pression résiduelle :  $10^{-4}$  mbar ( $10^{-2}$  Pa)
- Puissance électrique  $\sim 300$  W

Caisson

Sondes de  
Langmuir

Mesures des  
Propriétés  
électroniques



Analyseur à champ retardé (RPA)  
Mesures de la FDEI

Cathode

Moteur de  
Hall

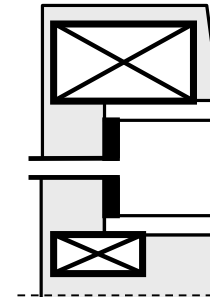
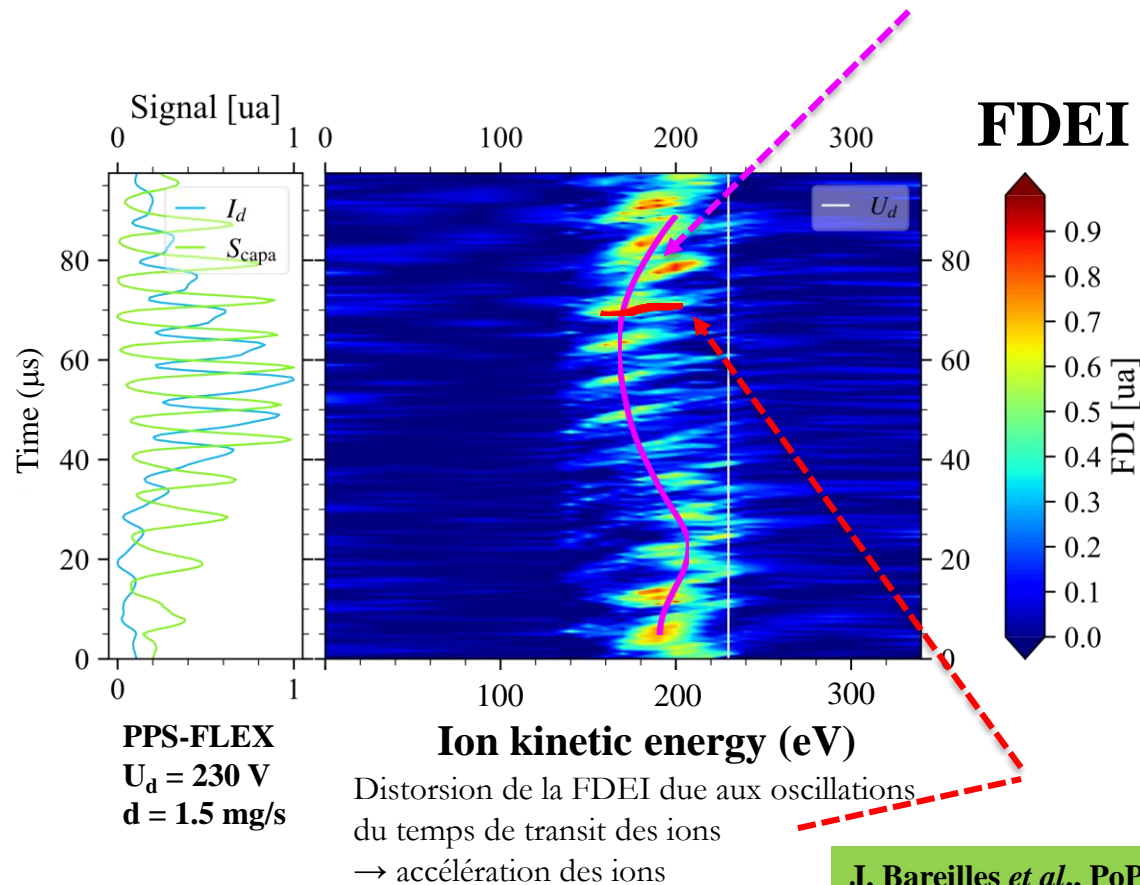
Q. Delavière-Delion *et al.*, PoP 31, 07210 (2024)



# Evolution temporelle de la FDEI

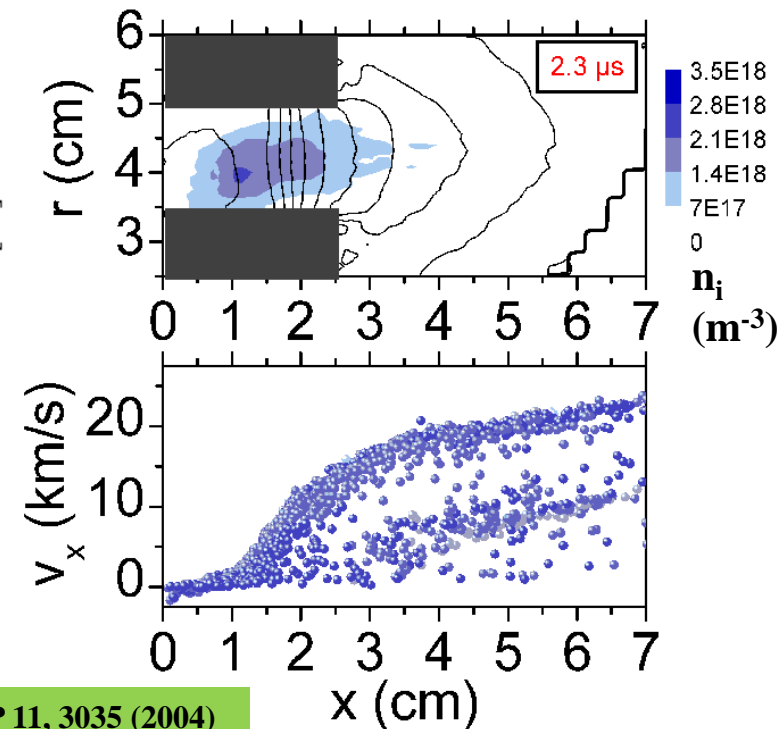
Q. Delavière-Delion *et al.*, to appear in Phys. Rev. Lett.

Distorsion de la FDEI à cause du mode  
De respiration



Symmetry axis

RPA



J. Bareilles *et al.*, PoP 11, 3035 (2004)



plasma-flow : Plasmas et mécanique des fluides  
17-20 nov. 2021 Saint-Denis de la Réunion (France)

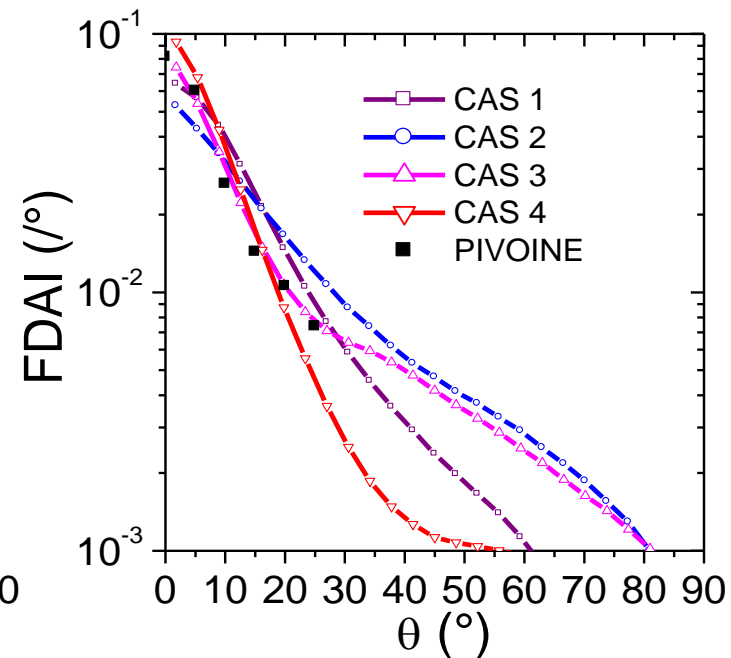
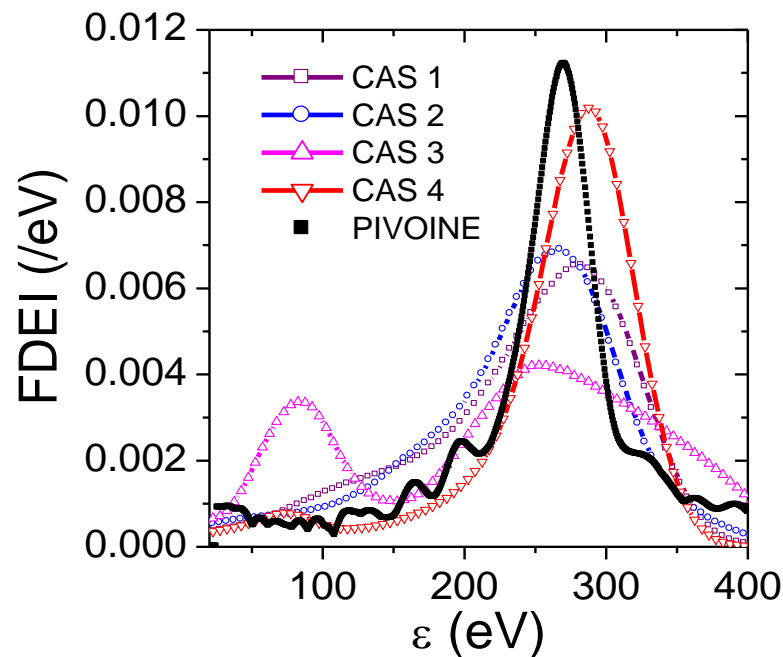


Laurent Garrigues  
Jets de plasma partiellement magnétisés pour  
la propulsion électrique

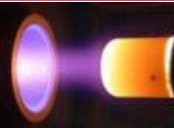
Laplace

45

# Comparaisons expériences PIVOINE



- **FDEI (HF)**
  - Élargissement
  - Diminution énergie moyenne (efficacité du faisceau)
- **FDAI (HF et BF)**
  - Augmentation de la divergence (baisse efficacité de divergence)
- **Performances affectées par la dynamique**

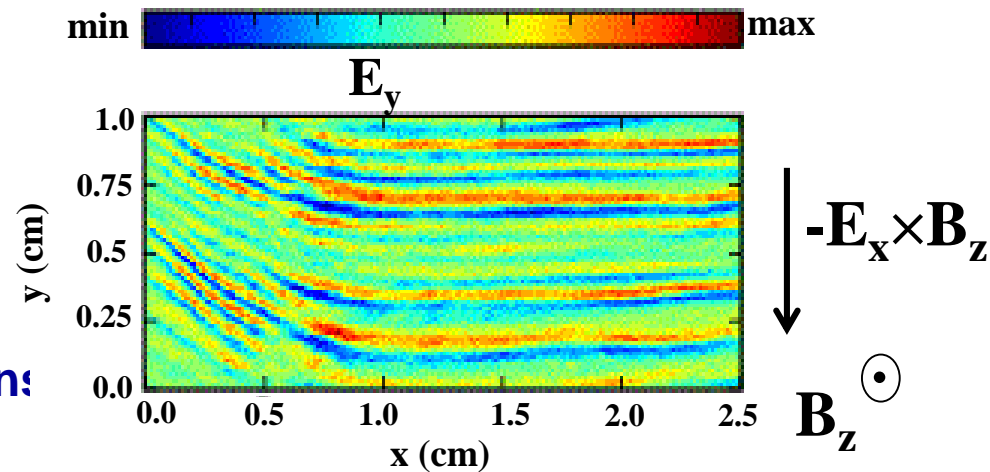


# Conclusions



- **Modèle hybride « simple » permet de qualitativement comprendre le fonctionnement du propulseur**
- **Transport anormal ?**
- **Simulations PIC 2D**  
**azimutal – axial**  
**sans collision**
  - Instabilité ECDI en  $y$  :  $\lambda \sim \text{mm}$
  - $k_y = 4000 \text{ rad.s}^{-1}$ ,  $f \sim \text{MHz}$
  - **Transport des électrons : interaction électron-onde**

$$J_M = 400 \text{ A/m}^2$$



J. P. Boeuf and L. Garrigues, PoP 25, 061204 (2018)

