

Moteur de Hall : Etat des lieux des connaissances





Laurent Garrigues, Directeur de Recherche CNRS



laurent.garrigues@laplace.univ-tlse.fr

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

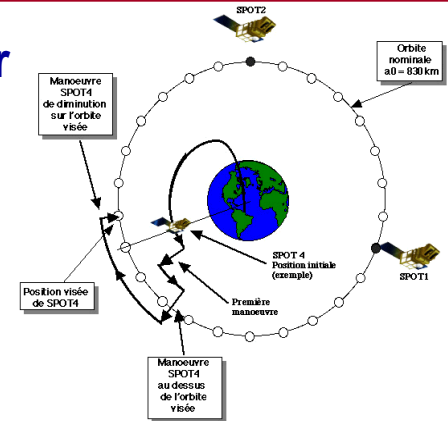
Plan

- **Introduction à la propulsion plasma** 
- **Décharge magnétisée : moteur de Hall** 
- **Instabilité de derive électronique** 
- **Conclusions et perspectives** 

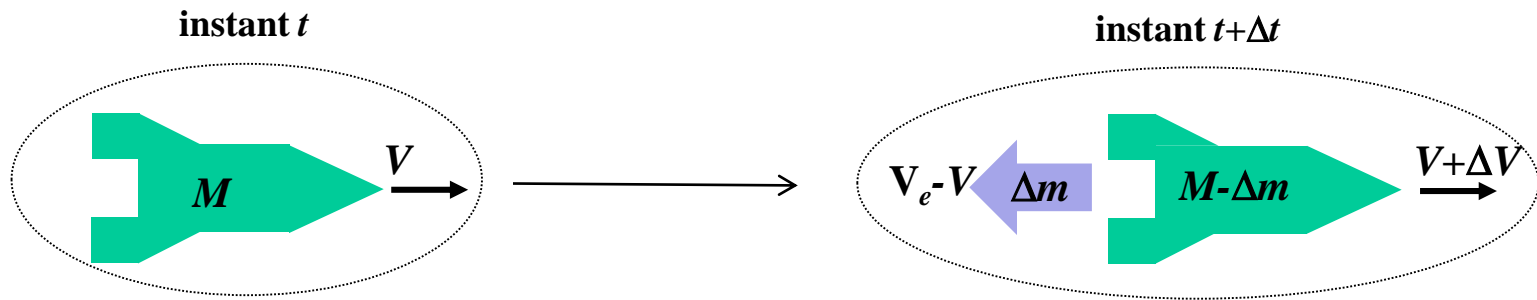
Besoins

- **Système propulsif nécessaire pour déplacer et contrer les forces agissant sur un engin spatial**

- Envoyer un engin dans l'espace
- Effectuer des manœuvres
- Contrôler l'attitude de l'engin (mission, dé-orbitation)



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



Masse du véhicule

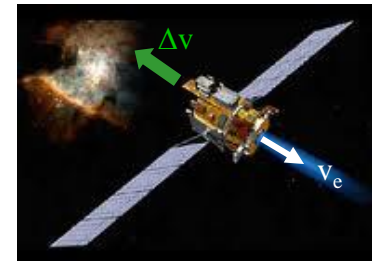
Variation de la masse due à l'expulsion de l'ergol

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

(Poussée)

Accélération du véhicule

Vitesse du jet du propulseur

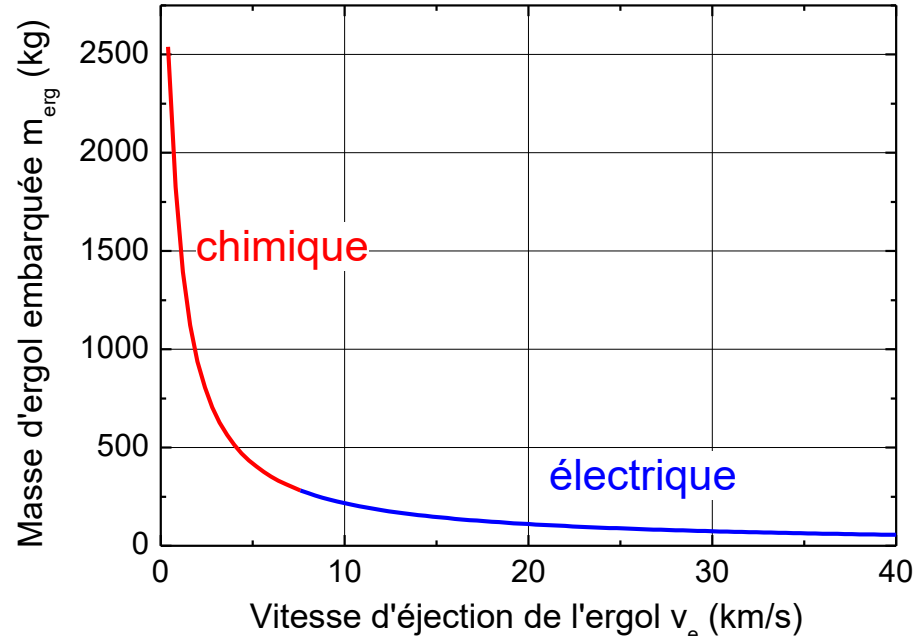


Equation de Tsiolkovsky

- Equation maitresse – équation de Tsiolkovsky

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

- 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**

moteur à grilles
ions Xe accélérés à quelques centaines de volts

Catégories des propulseurs à plasma

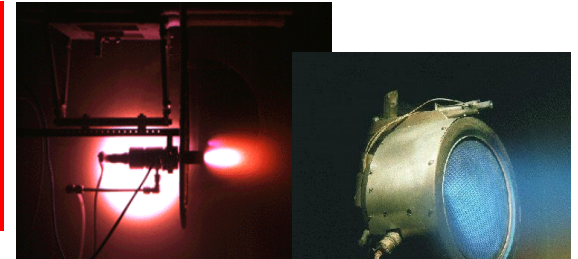
■ Définition de la propulsion électrique selon Jahn

« the acceleration of gases for propulsion by electrical heating and/or electric and magnetic body forces »

R.G. Jahn, Physics of Electric Propulsion, McGraw-Hill, New York, 1968

■ Propulseurs électrothermiques

→ énergie électrique utilisée pour chauffer l'ergol + expansion à travers une tuyère



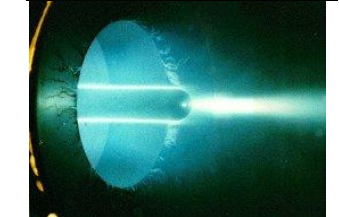
■ Propulseurs électrostatiques

→ énergie électrique utilisée pour accélérer les ions

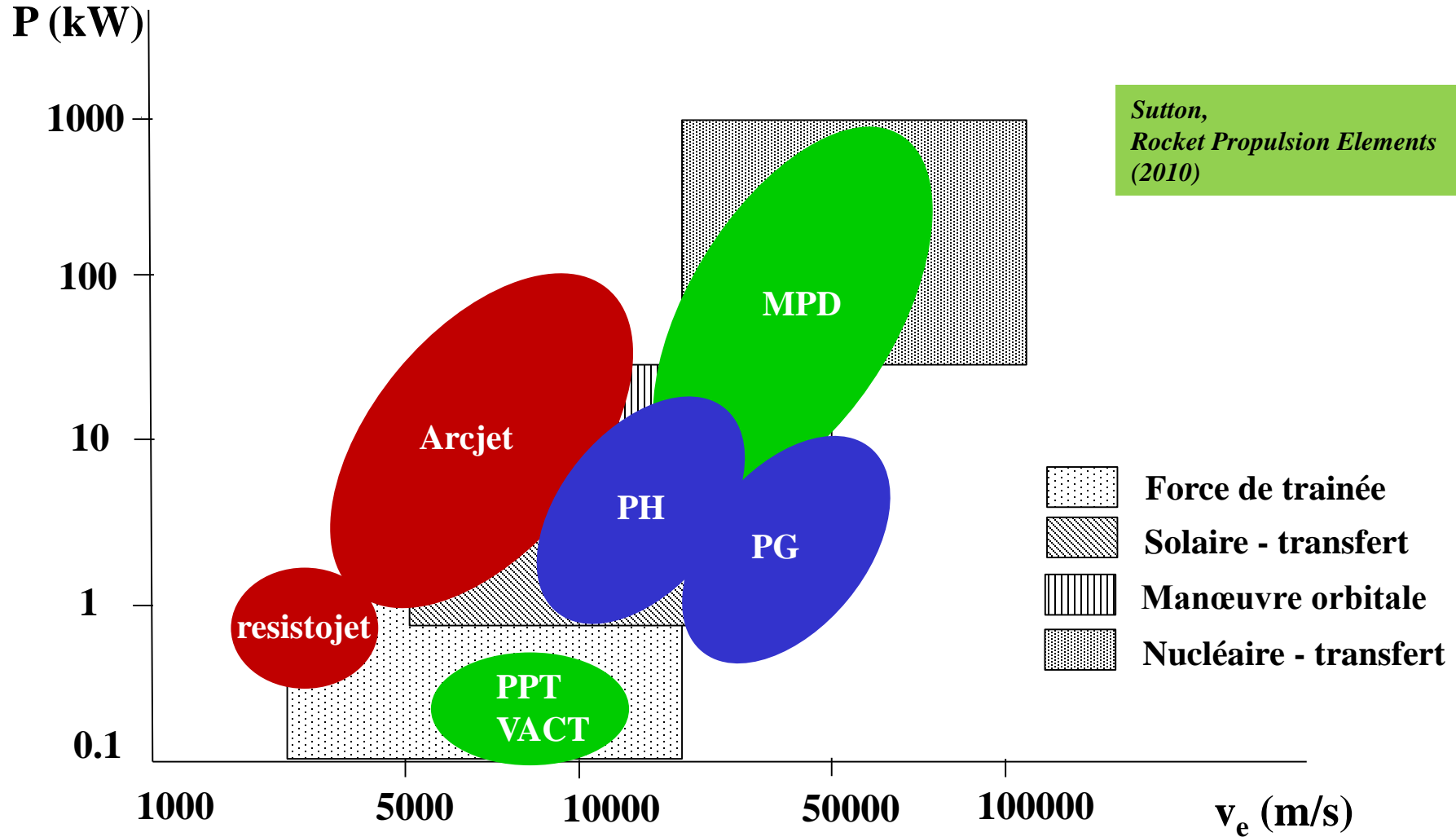


■ Propulseurs électromagnétiques

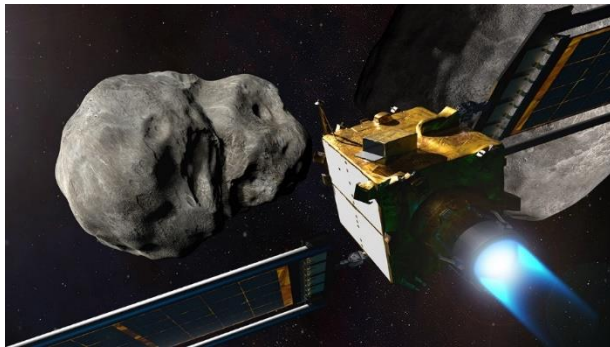
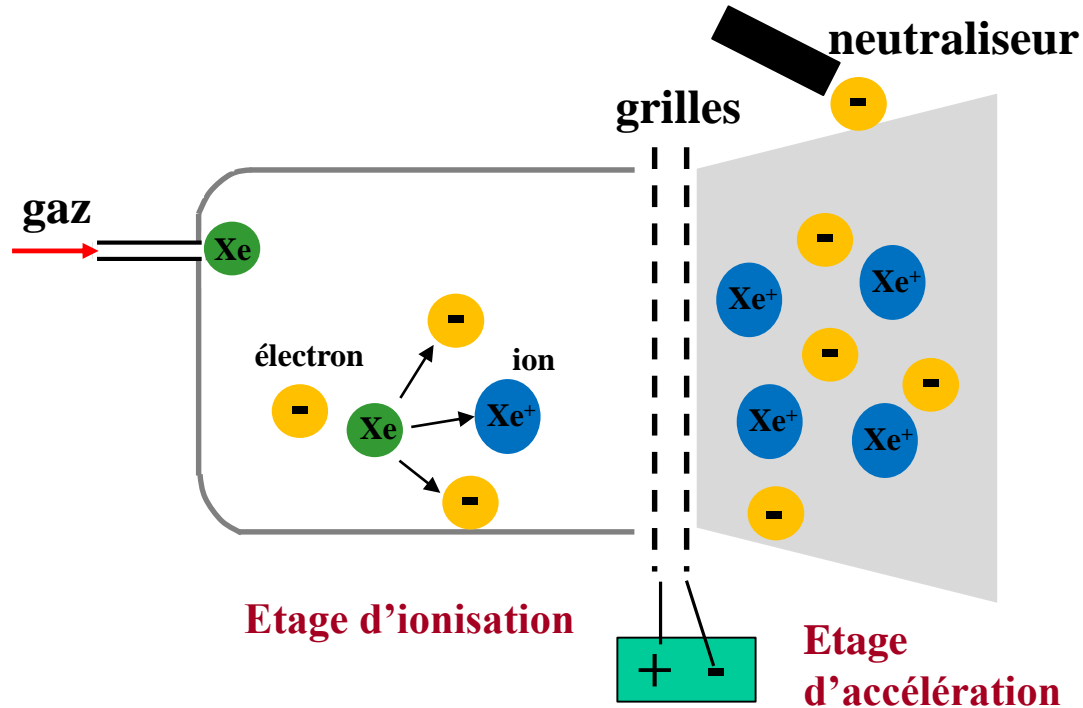
→ forces électromagnétiques pour accélérer le plasma



Missions assurées par les prop. à plasma



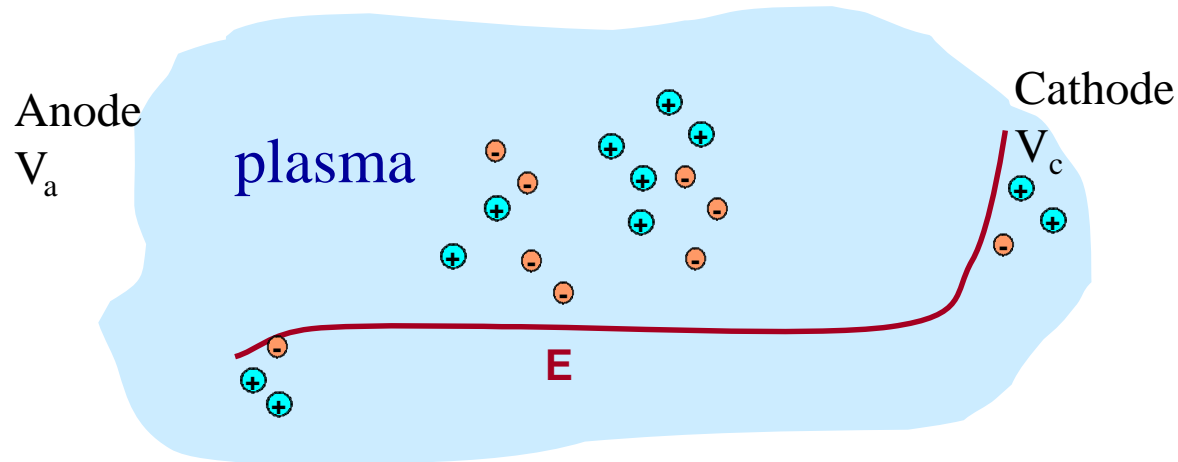
Propulseurs à grille



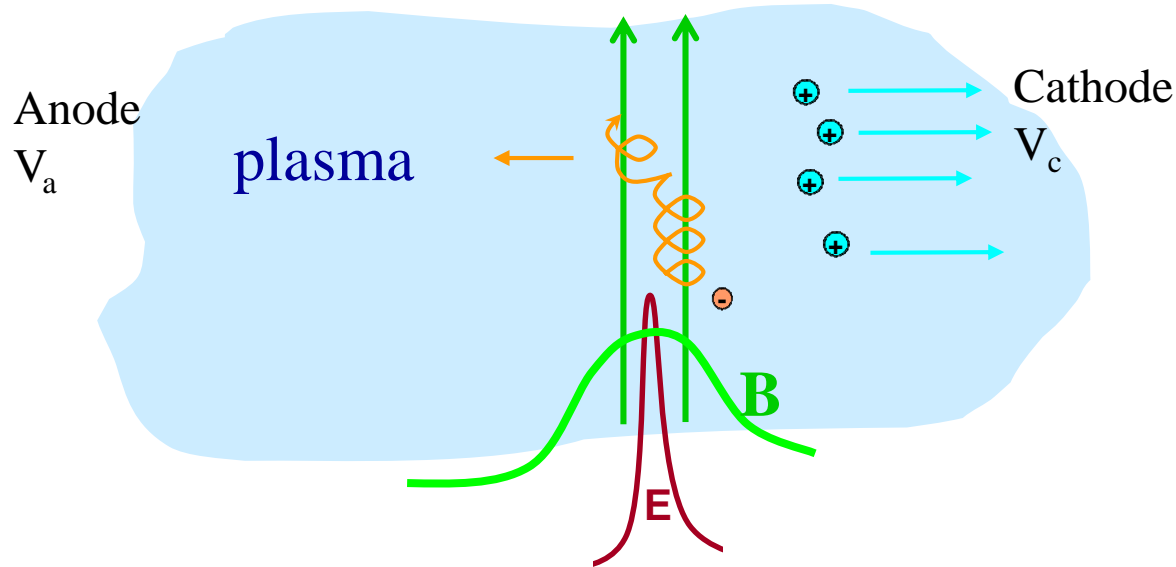
Credit:
NASA/Johns Hopkins
University APL

- **Etage d'ionisation**
 - Décharge DC + confinement B multipolaire
 - Décharge RF
 - Décharge micro-onde
- **Mission DART (11/2021-09/2022)**
- **Difficultés**
 - Child-Langmuir
 - Limitation Poussée/Surface
 - Erosion
 - Fiabilité électronique

Champ électrique au cœur du plasma ?



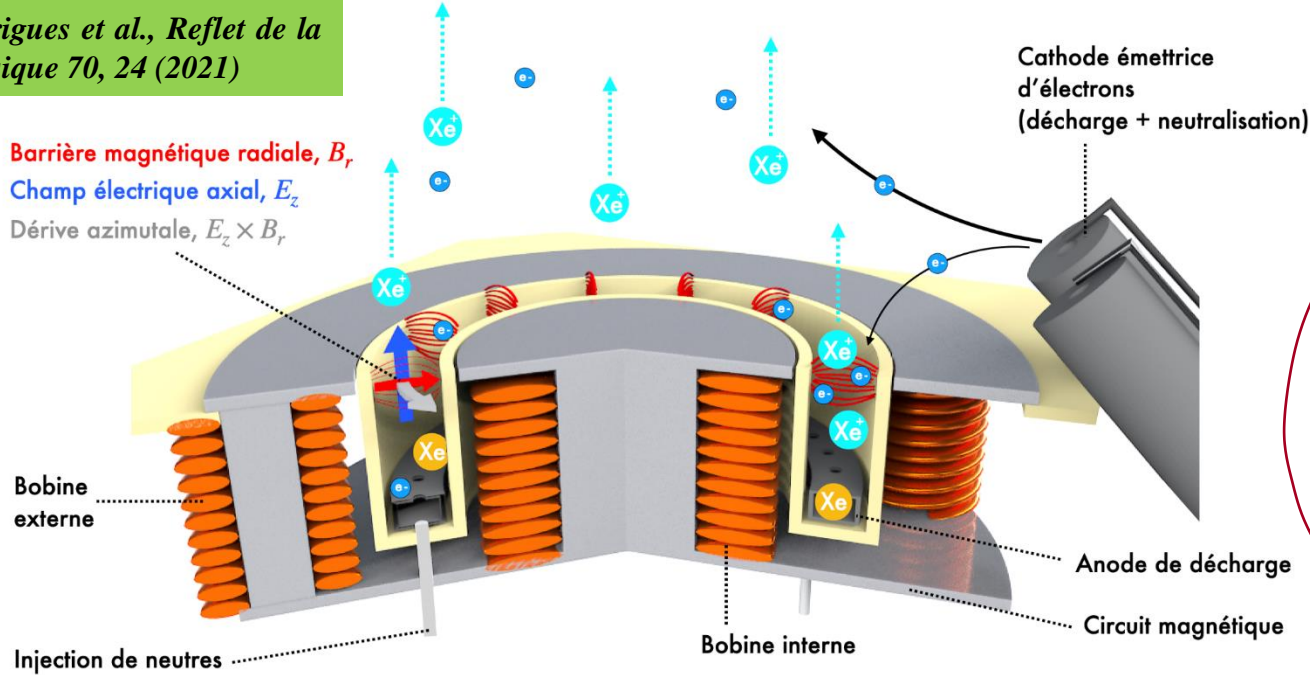
- Plasma milieu conducteur : champ E dans les gaines
- Utiliser un système de grilles
 - ➔ limitation poussée/unité de surface



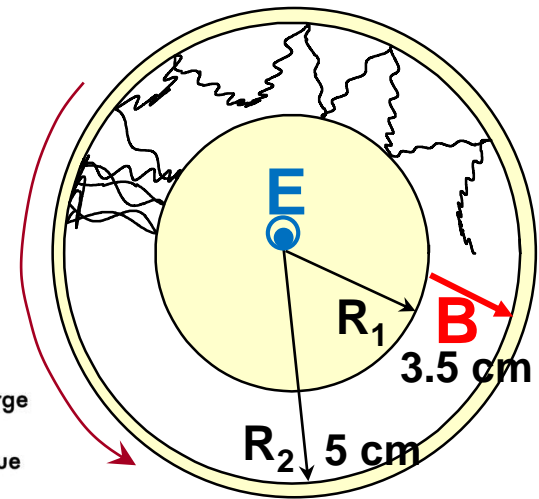
- **En présence d'un champ magnétique localisé (barrière)**
 - Décroissance de la conductivité électronique localement σ
 - Génération un champ électrique à l'intérieur du plasma - $E = j/\sigma$
➔ **pas de limite poussée/unité de surface**
- **Le champ électrique sert à**
 - Chauffer les électrons pour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

Caractéristiques du moteur de Hall

Garrigues et al., *Reflète de la Physique* 70, 24 (2021)



$$V_{d,\theta} = \frac{E \times B}{B^2}$$



Courant de Hall

Principe

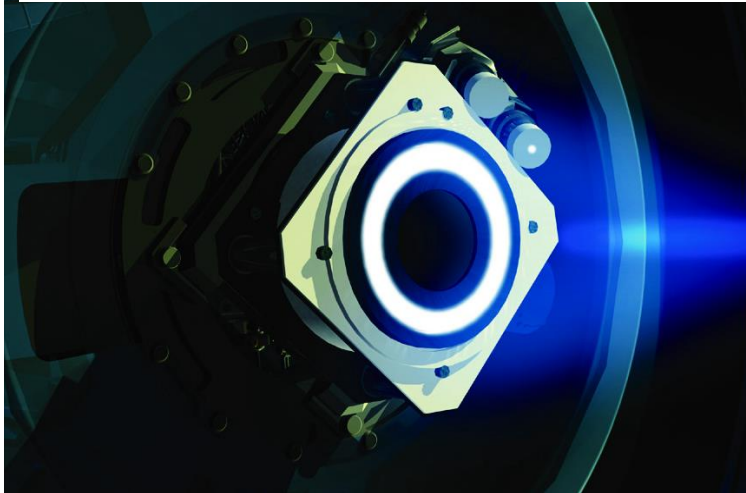
- $l_{pm} \ll L$
- Intensité de B (~ 100 G)
- piégeage des électrons
- Ions non magnétisés et non collisionnels

Grandeurs typiques

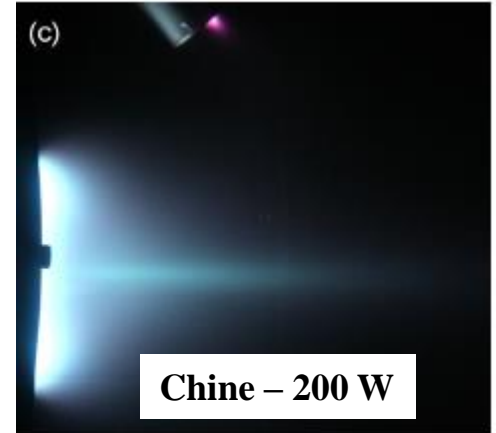
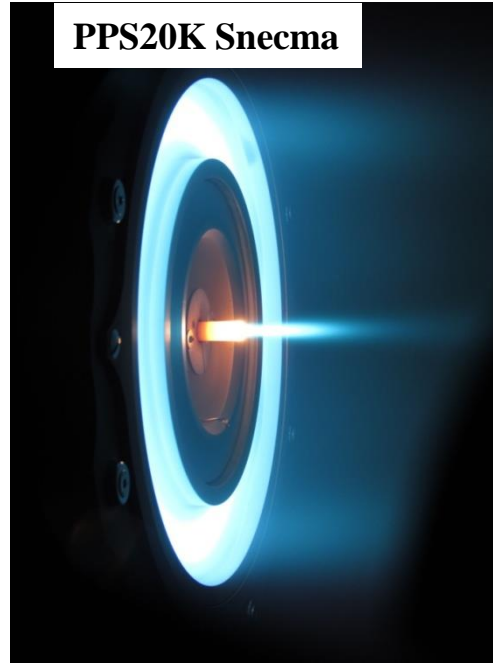
- Tension : 300 V, courant ~ 4 A
- Diamètre : 10 cm, L = 2.5 cm
- Débit Xe : 5 mg/s (densité ~ 10^{20} m^{-3})
- Densité de plasma : 10^{18} m^{-3}
- Température électronique : 50 eV

Moteurs de Hall dans le monde

PPS®1350 Snecma sur la sonde ESA Smart-1

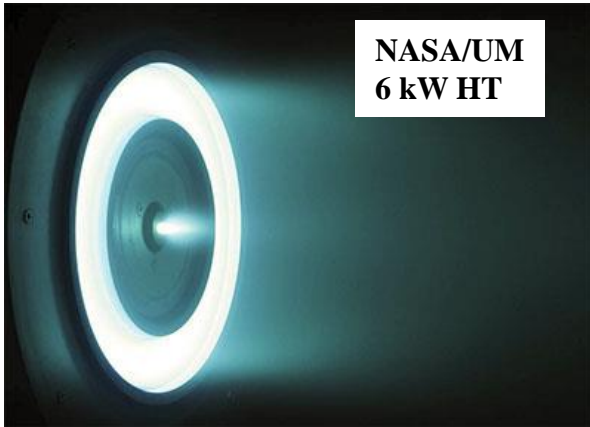


PPS20K Snecma



Chine – 200 W

NASA/UM
6 kW HT

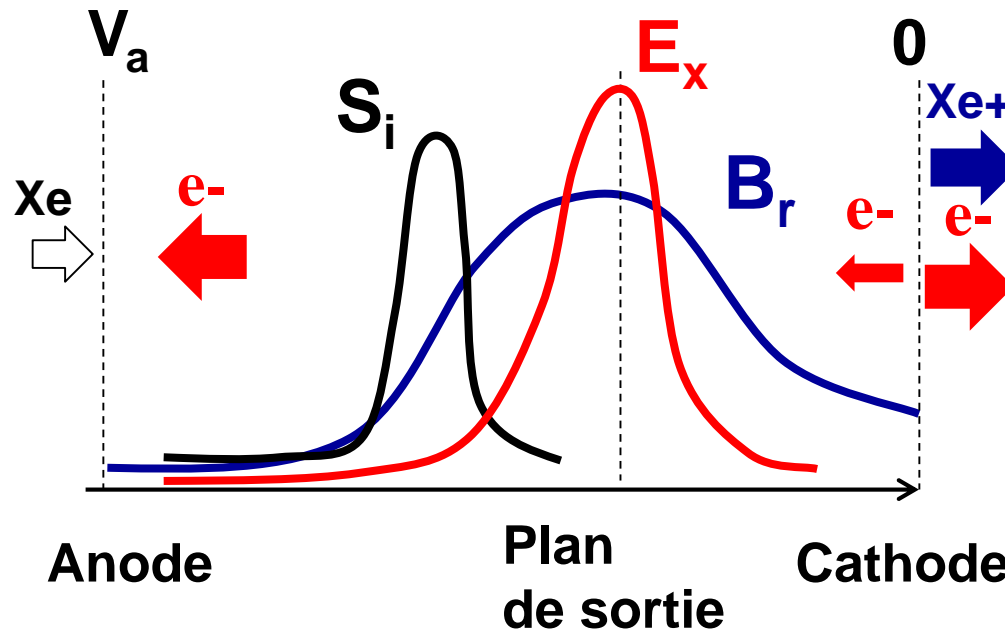


<https://pepl.engin.umich.edu>



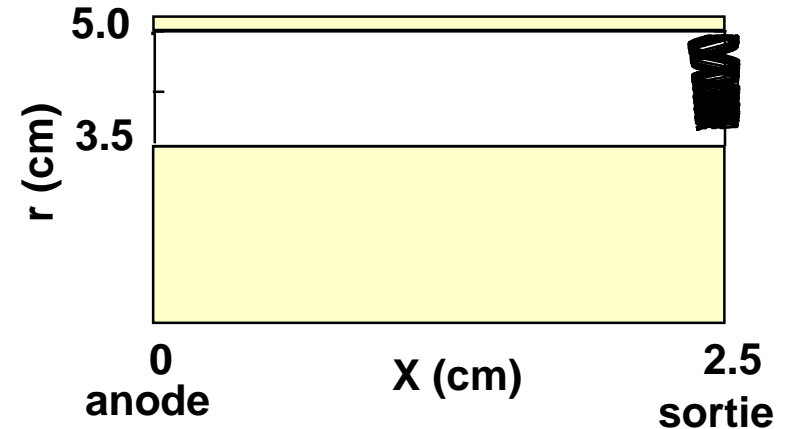
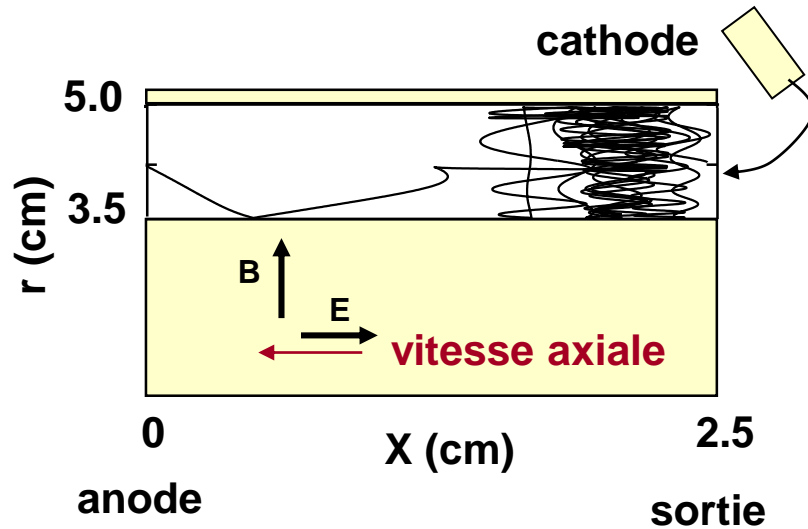
Russe – SPT100

Fonctionnement du moteur de Hall



- Tension DC appliquée entre anode et cathode
- Gaz injecté (xénon facile à ioniser, grande masse)
- Chute locale de la conductivité ➡ fort E_x dans le plasma
- Fraction du courant électronique de la cathode neutralise les ions

Transport anormal



- Ionisation complète du flux de gaz (> 90 %)
- Mécanismes responsables du transport des électrons sans collisions ?
- Instabilités peuvent elles expliquer le transport électronique ?

Relation de dispersion

■ Système étudié

- Electrons magnétisés, non collisionnels, distribution Maxwellienne
- Ions froids, non magnétisés et non collisionnels
- Couplage avec l'équation de Poisson
- Champ magnétique et densité uniformes
- Relation de dispersion : étudier l'existence et le taux de croissance des instabilités

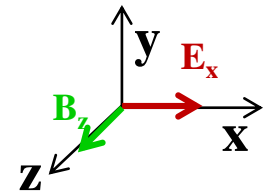
■ Relation de dispersion, ondes électrostatiques

$$1 + k^2 \lambda_{De}^2 + g \left(\frac{\omega - k_y V_d}{\omega_{ce}}, (k_x^2 + k_y^2) \rho^2, k_z^2 \rho^2 \right) - \frac{k^2 \lambda_{De}^2 \omega_{pi}^2}{(\omega - k_x V_{ib})^2} = 0$$

$g(\Omega, X, Y)$: fonction de Gordeev

$$V_d = \frac{E}{B} \quad \lambda_{De} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 n_e}} \quad \omega_{ce} = \frac{eB}{m_e}$$

$$v_{the} = \sqrt{\frac{8k_B T_e}{\pi m_e}} \quad \rho = \frac{v_{the}}{\omega_{ce}} \quad \omega_{pi} = \sqrt{\frac{e^2 n_i}{m_i \epsilon_0}}$$



Gary and Sanderson, J. Plasma Physics 4, 739 (1970)
Fornslund et al., Phys. Rev. Letter, 25, 1266 (1970)
Lampe et al., Phys. Rev. Letter, 22, 1221 (1971)
Ducrocq et al., Phys. Plasmas 13, 102111 (2013)
Cavalier et al., Phys. Plasmas 20, 082107 (2013)

Transition vers instabilité IAM ?

- Transition vers une instabilité acoustique modifiée

- Si $\lambda_{De} < \rho$ et $V_d < V_{the}$
- Transition vers une IAM
- Modes discrets

$$\omega \approx k_x V_{ib} + \frac{kc_s}{(1 + k^2 \lambda_{De}^2)^{1/2}}; \gamma \approx \sqrt{\frac{\pi m}{8M}} \frac{k_y V_d}{(1 + k^2 \lambda_{De}^2)^{3/2}}$$

Lampe et al., Phys. Rev. Letter, 22, 1221 (1971)

- Caractéristiques IAM

- Taux de croissance maximum
- Vecteur d'onde au taux de croissance maximum
- Fréquence angulaire au taux de croissance max.
- Amplitude du champ fluctuant (hypothèse saturation due au piégeage ion-onde)

$$\gamma_{max} \approx a \omega_{pi} \frac{V_d}{V_{the}}, a \sim 0.2$$

$$k_{y,max} \approx \frac{1}{\sqrt{2} \lambda_{De}}, \lambda_{y,max} \approx 2\pi \sqrt{2} \lambda_{De}$$

$$\omega_{R,max} \approx \frac{\omega_{pi}}{\sqrt{3}}$$

$$|\delta E| \approx \frac{1}{3\sqrt{2}} \frac{T_e}{\lambda_{De}}$$

$$|\delta\phi| \approx \frac{1}{2} \frac{M}{e} \left(\frac{\omega_{R,max}}{k_{y,max}} \right)^2$$

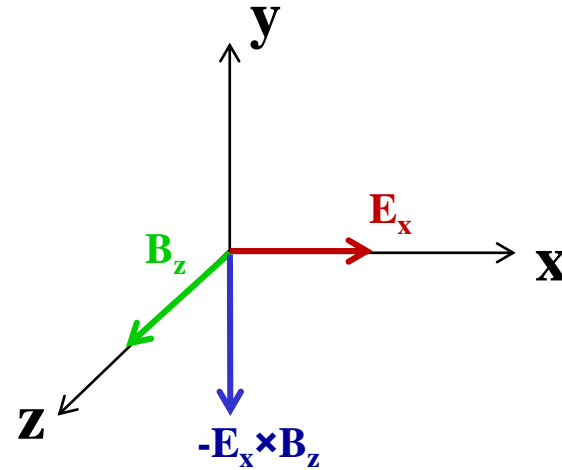
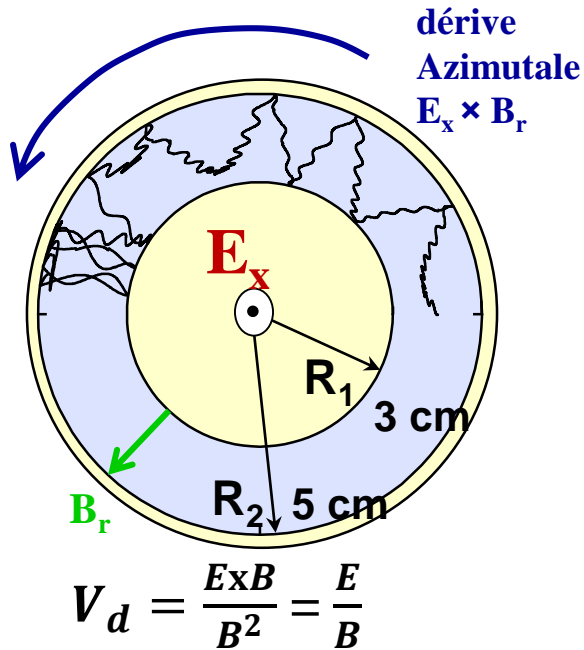
Lafleur et al., PoP 23, 053503 (2016)

- Longueur d'onde

$$\lambda_{y,IAM} \approx 2\pi \sqrt{2} \lambda_{De}$$

E = 200 V/cm, B = 200 G, n_e ~ 10¹⁷ m⁻³, T_e ~ 50 eV, λ_{y,IAM} ~ 1 – 2 mm

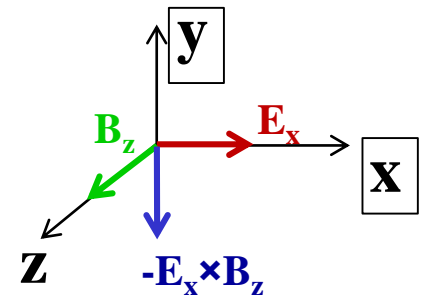
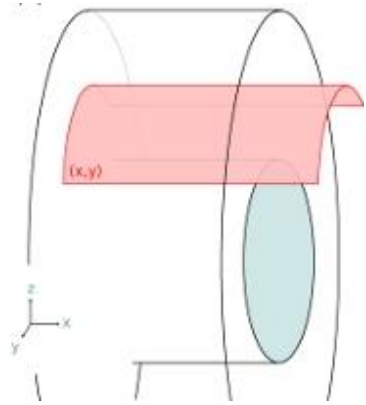
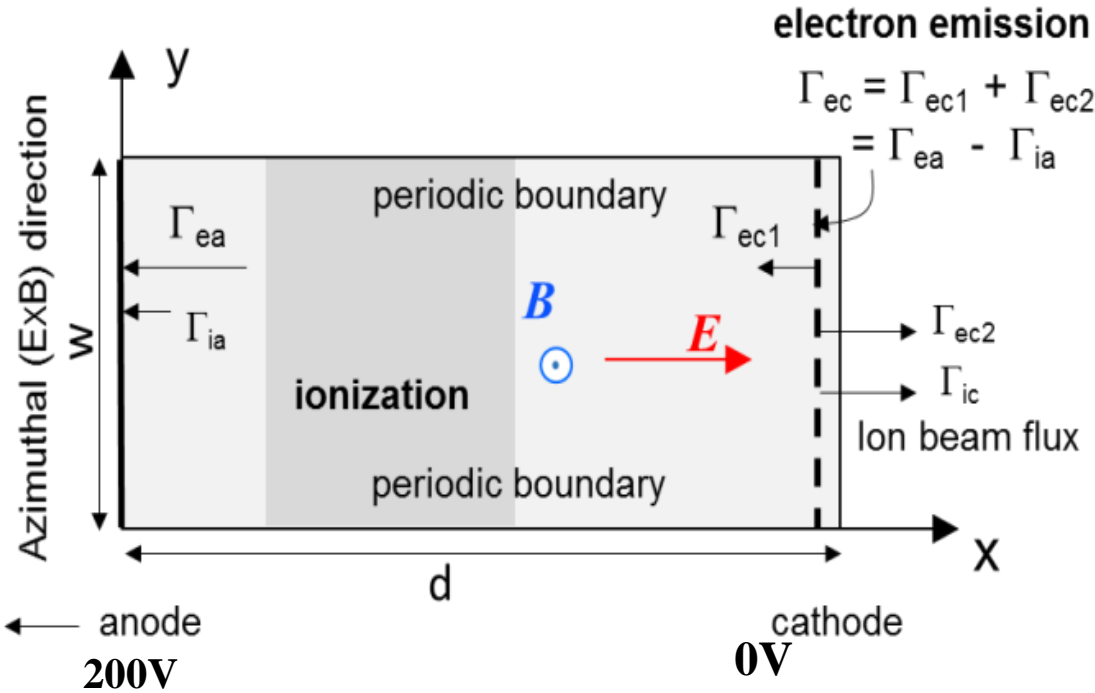
Moteur de Hall : configuration $E \times B$



■ Caractéristiques moteur de Hall

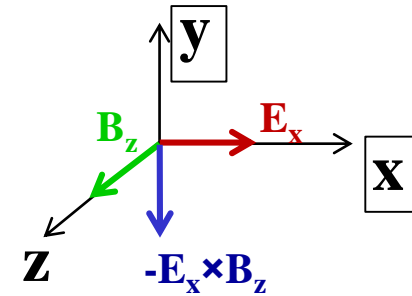
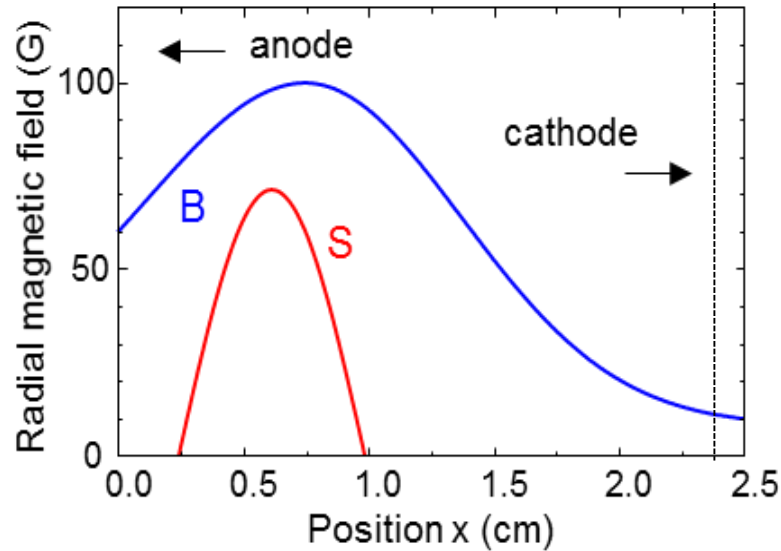
- Electrons sont magnétisés
- Ions sont non magnétisés
- Dérive fermée dans la direction azimutale
- Instabilités dues à la différence de vitesse entre les électrons et les ions

2D PIC modèle simplifié – plan (x,y) (1/2)



- Méthode PIC explicite (parallélisation OpenMP/MPI)
- Domaine de simulation rectangulaire directions (x,y)
- B perpendiculaire au plan de simulation (profil fixé)
- Conditions aux limites périodique suivant y (secteur angulaire, w = 1 cm)
- d = 2.5 cm, cathode @ 2.4 cm
- Tension appliquée 200 V

2D PIC modèle simplifié – plan (x,y) (2/2)

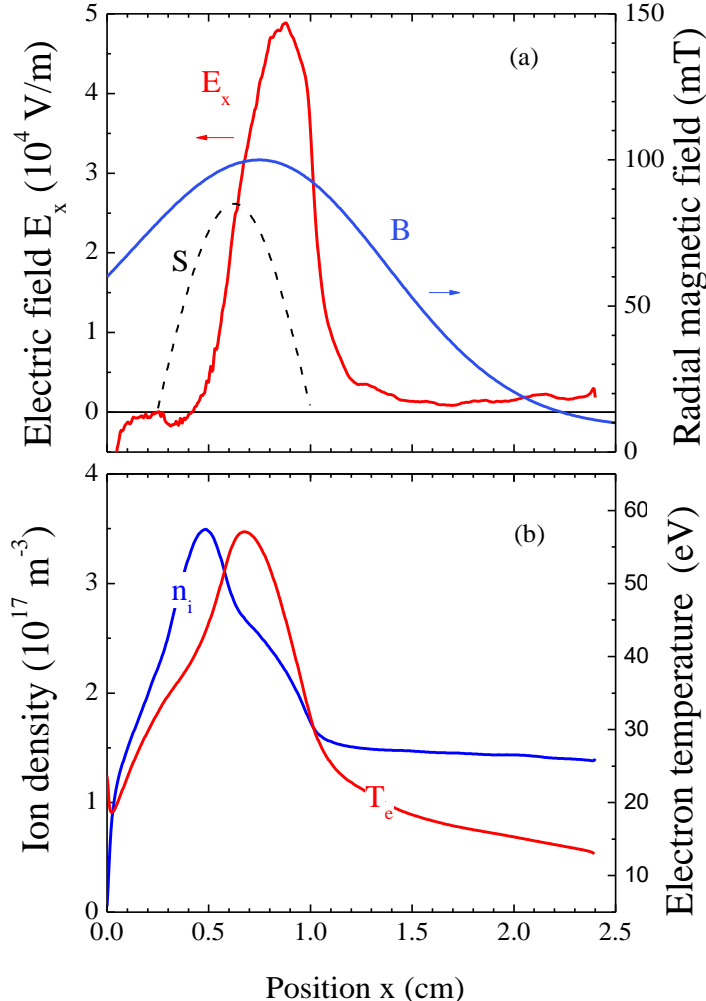


- Terme source de particules chargées fixé (variation paramétrique possible)

$$J_M = e \int_0^d S(x) dx$$

- En changeant J_M la densité de plasma change
- Pas de collisions

Propriétés du plasma 1D – moyennées y et t



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

■ Champ électrique au cœur du plasma

- Maximum $\sim 4 \times 10^4$ V/m
- Profil cohérent avec les mesures de LIF

Mazouffre et al., PSST 22, 013001 (2013)

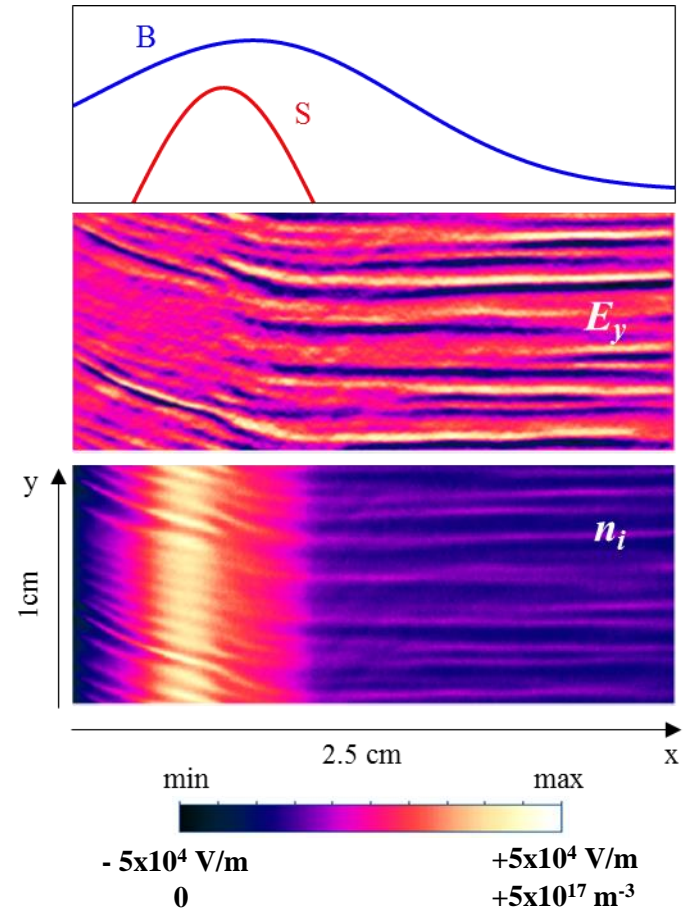
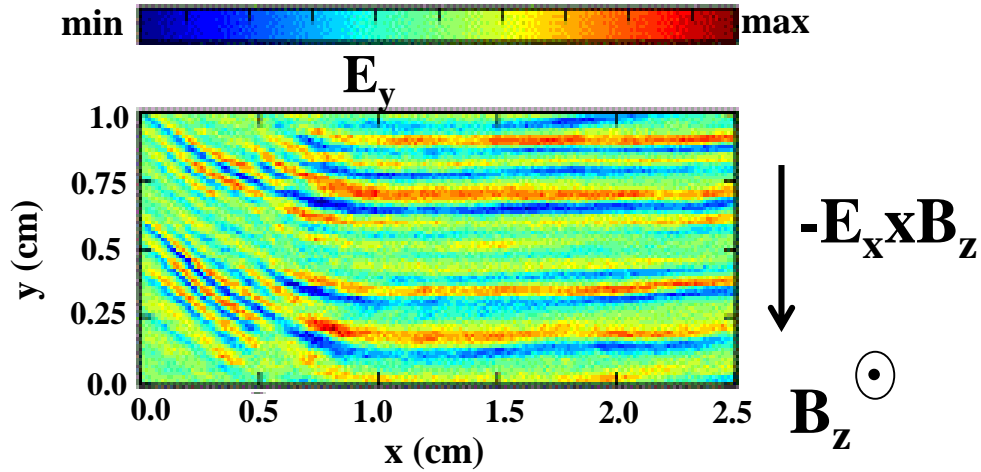
■ Propriétés du plasma

- Densité $\sim 3 \times 10^{17}$ m $^{-3}$
- Température électronique ~ 50 eV

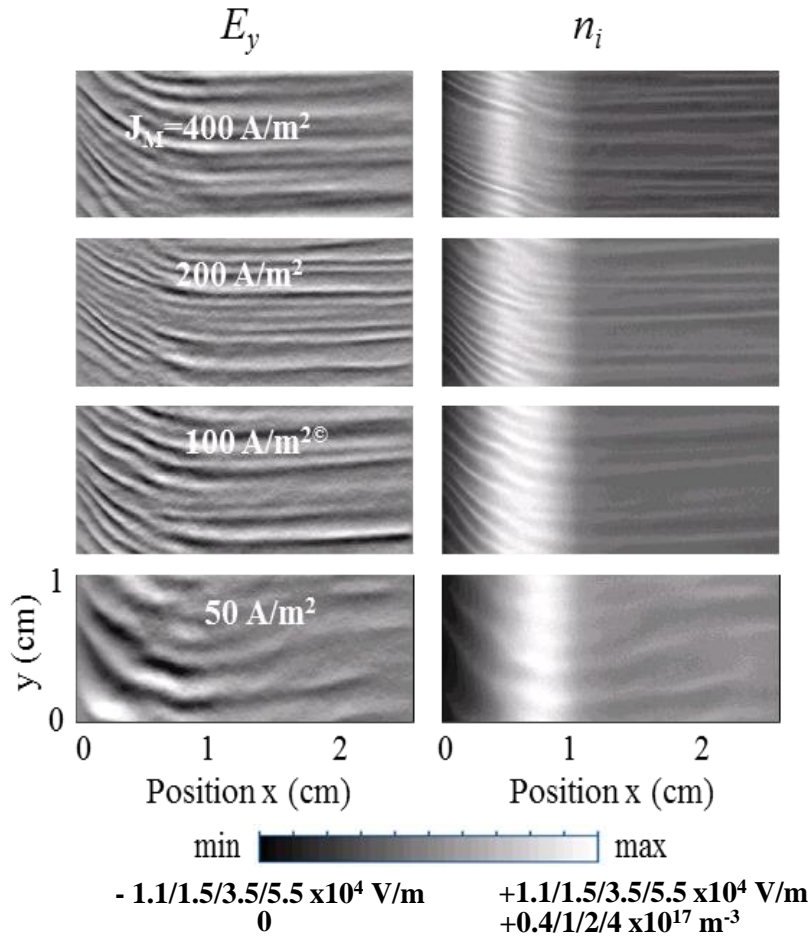
Dubois et al., IEPC, Boston, MA, 2022

Propriétés spatio-temporelles de E_y

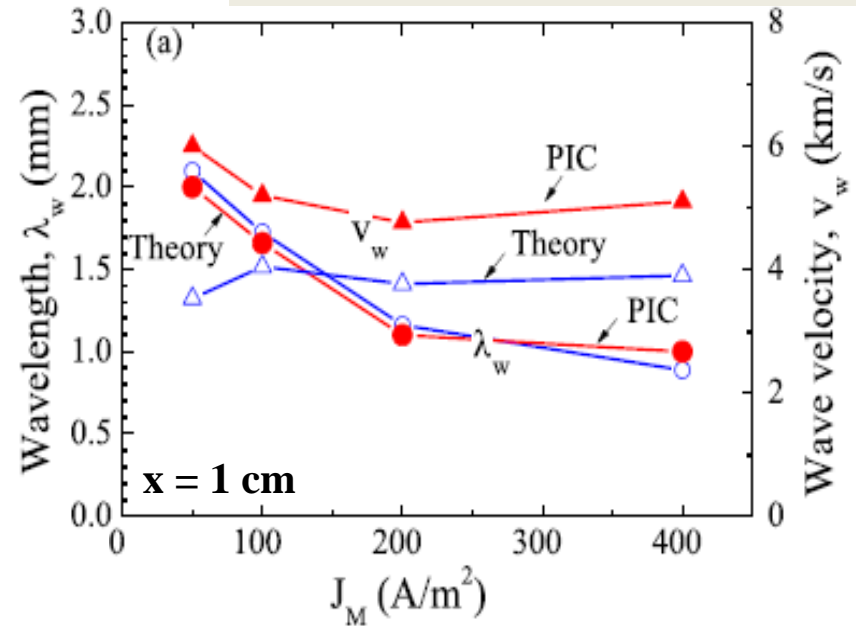
$J_M = 400 \text{ A/m}^2$



Etude paramétrique



$$k_{y,max} \approx \frac{1}{\sqrt{2}\lambda_{De}}, \lambda_{y,max} \approx 2\pi\sqrt{2}\lambda_{De}$$



$$v_w = \frac{\omega_{r,max}}{k_{y,max}} = c_s \sqrt{\frac{2}{3}}$$

Boeuf and Garrigues, PoP 25, 061204 (2018)

LANDMARK

Low temperature magnetized plasma benchmarks

HOME PHYSICS ISSUES TEST CASES WORKSHOP FORUM MEMBERS CONTACT

Test Cases

Three first test cases have been defined and are described below. These cases correspond to typical conditions of Hall thrusters. The problem has however been oversimplified in order to address specific issues related to the numerical method and/or to physics questions. Other test cases will be proposed in the future

Test Case 1 - 1D azimuthal PIC simulation of the ExB EDI

This test case is aimed at studying the possible development of microinstabilities induced by the large ExB electron drift in the magnetic barrier of a Hall thruster. The Electron Cyclotron Drift Instability (which we call ExB Drift Instability, ExB EDI, in the present context) studied in the 1970's in space plasmas, has been evidenced in axial-azimuthal PIC simulations of Hall thrusters. The proposed benchmark is aimed at studying the ExB EDI under 1D conditions (constant E and B, and description of the ExB, azimuthal direction) and the conditions of the possible transition to an ion acoustic instability. The effects of numerical noise, accuracy of the simulations, and spatial periodicity in the ExB direction must also be evaluated

details

Test Case 2a - 2D axial-azimuthal PIC simulation of the ExB EDI

Here we study the ExB EDI under slightly more realistic conditions that can naturally take into account the finite transit time of electrons in the acceleration region, and the effects of density and magnetic field gradients. We simplify the problem by assuming a given ionization rate profile. This suppresses the non-linear coupling of the plasma density and atom density leading to the well known low frequency ("breathing") oscillations of Hall thrusters. The proposed benchmark allows to study the formation, convection and saturation of the ExB EDI. The issues are the transition to an ion acoustic instability, the effect of the instability on the anomalous electron cross-field mobility, the possible effect of numerical noise and of the finite period of the model in the azimuthal direction.

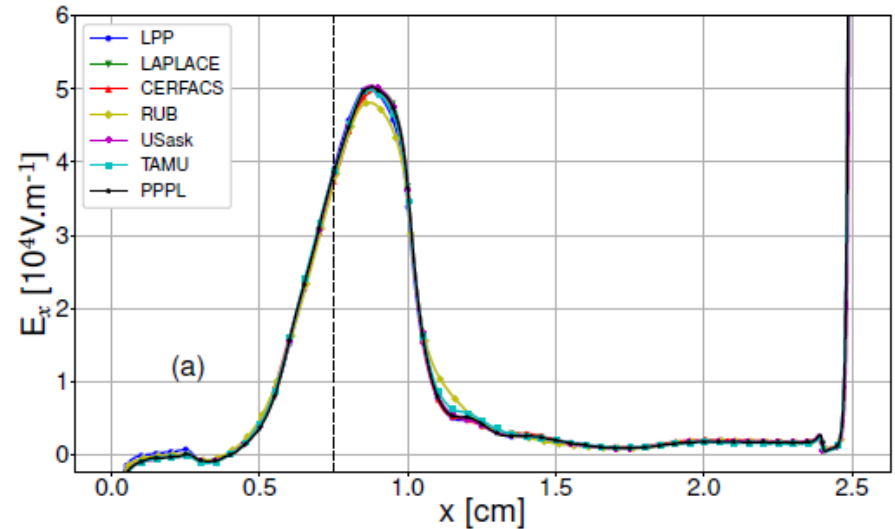
details

Test Case 2b - 2D radial-azimuthal PIC simulation of the ExB EDI

In this case the ExB EDI is studied in the radial and azimuthal directions. The electron and ion transport in the axial direction is described as in Test Case 1 (constant electric field in the axial direction, constant magnetic field in the radial direction).

details

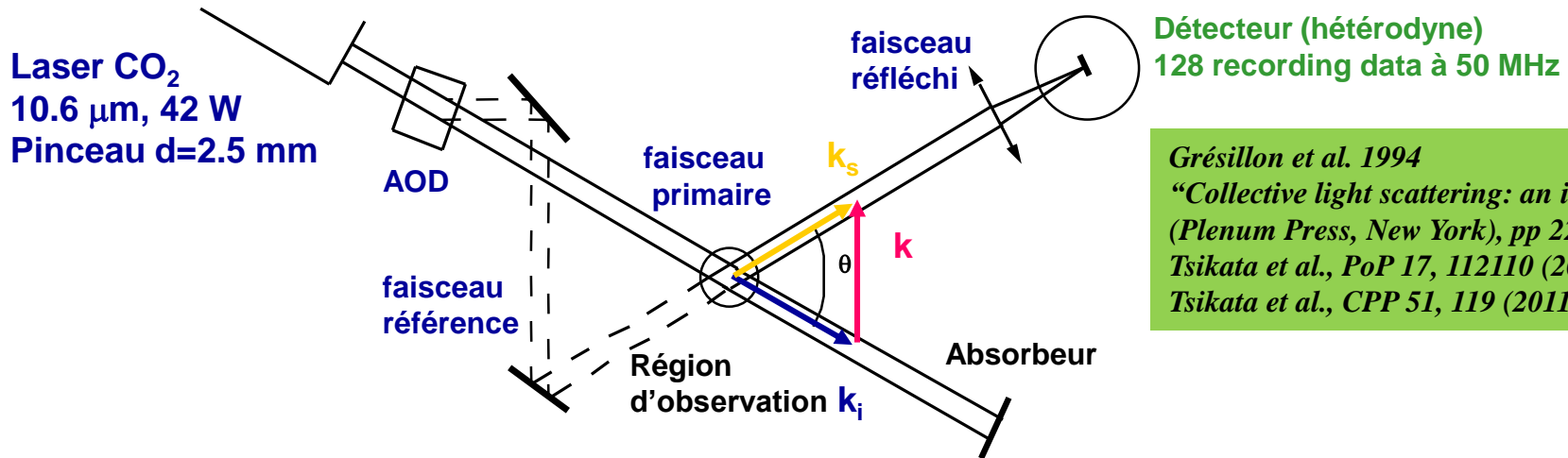
Résultats Test Case 2a



Charoy et al. , PSST 28, 105010 (2019)

Villafana et al. , PSST 30, 075002 (2021)

Diffusion collective



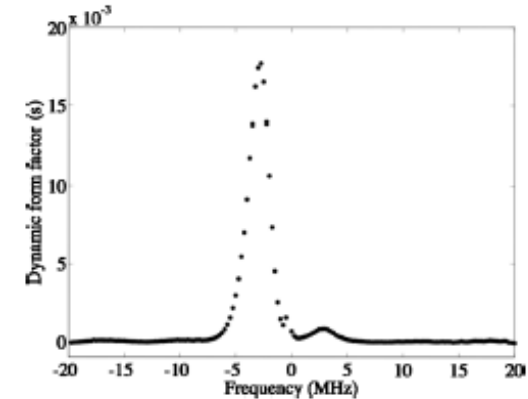
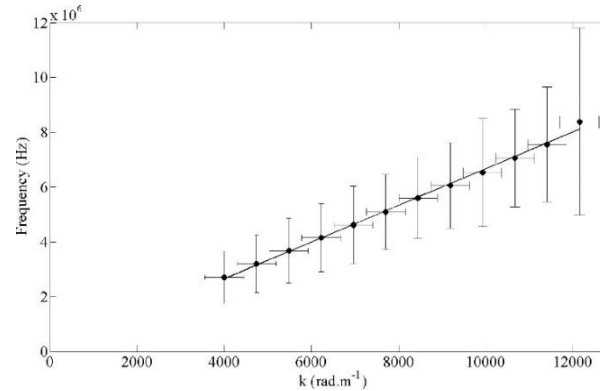
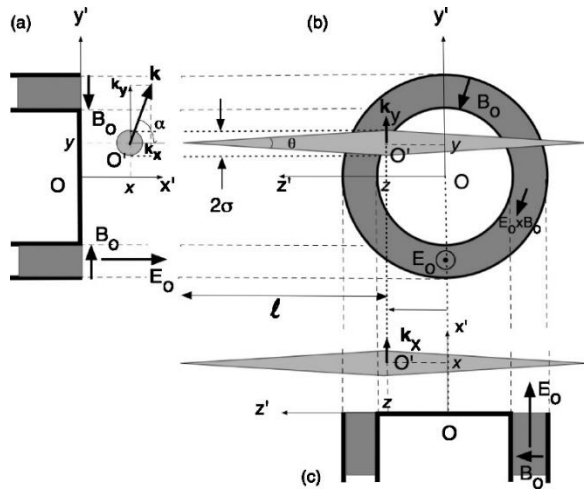
Grésillon et al. 1994
"Collective light scattering: an introduction"
(Plenum Press, New York), pp 229-243.
Tsikata et al., PoP 17, 112110 (2010)
Tsikata et al., CPP 51, 119 (2011)

- Un faisceau laser monomode de vecteur d'onde k_i analyse le plasma
- Une petite partie du champ EM incident est réfléchié en tant que nouvelle onde EM en dehors de la direction d'incidence (effet Thomson par les électrons)
- Une détecteur collecte les ondes réfléchies de vecteur k_s , le vecteur d'onde identique à k_i mais dont la direction diffère de celle de k_i d'un angle θ .
- Analyse du vecteur d'onde vertical k (direction $E \times B$ annulaire du plasma), $k = 2\pi\theta/\lambda_{\text{laser}}$
- Un enregistrement de l'amplitude et de la phase du champ E fournit en fonction du temps dans l'espace complexe de Fourier donne la densité électronique dans la direction du vecteur d'onde k

Principaux enseignements

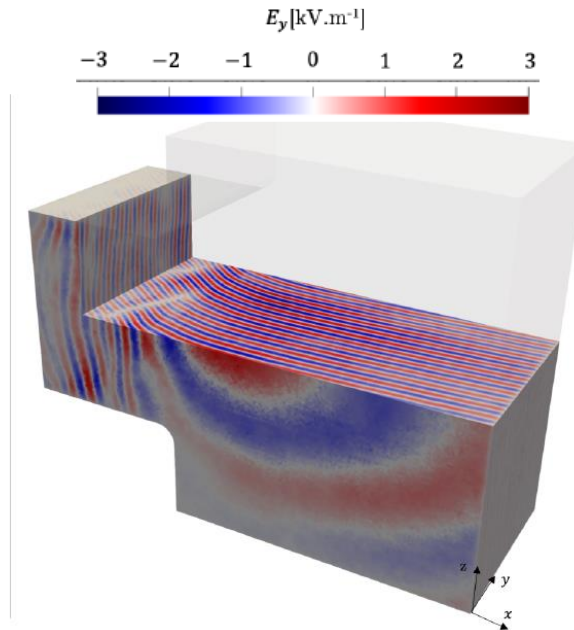
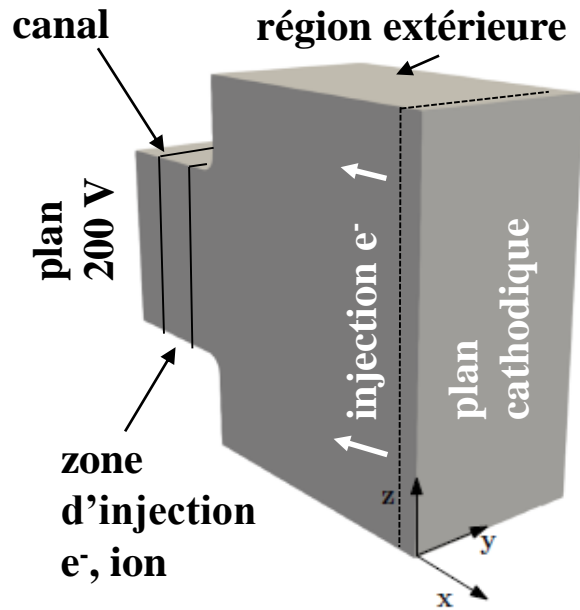
Banc de mesure, PRAXIS

Tsikata et al., PoP 17, 112110 (2010)
Tsikata et al., CPP 51, 119 (2011)



- Mesures effectuées dans le moyeu d'essai PIVOINE, ICARE, Orléans
- Moteur étudié : PPS®1350
- Instabilité observée à une longueur d'onde de l'ordre du mm
- Fréquence de l'ordre du MHz
- Le niveau des fluctuations des densités plus faible que dans les simulations 2D (~ 1 %)

Premières simulations PIC 3D



Villafana
Cerfacs
thèse (2021)

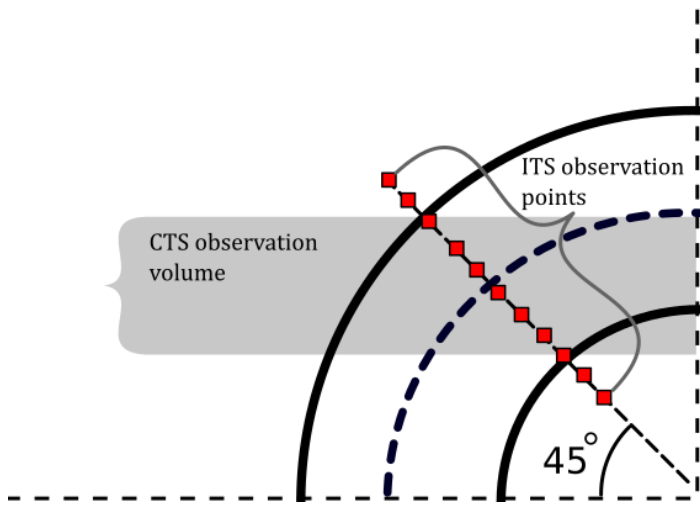
- Code AVI-PIC développé au CERFACS (tétraèdres, géométrie cartésienne)
- Temps de simulation : 1 à 2 mois sur 3000 processeurs (1 Mh)
- Résultats qualitativement proches des simulations 2D
- Champ fluctuant E_y divisé par 10
- Niveau des fluctuations plus conforme aux mesures de diffusion collective
- Calcul géométrie cylindrique au CERFACS en cours

Conclusions

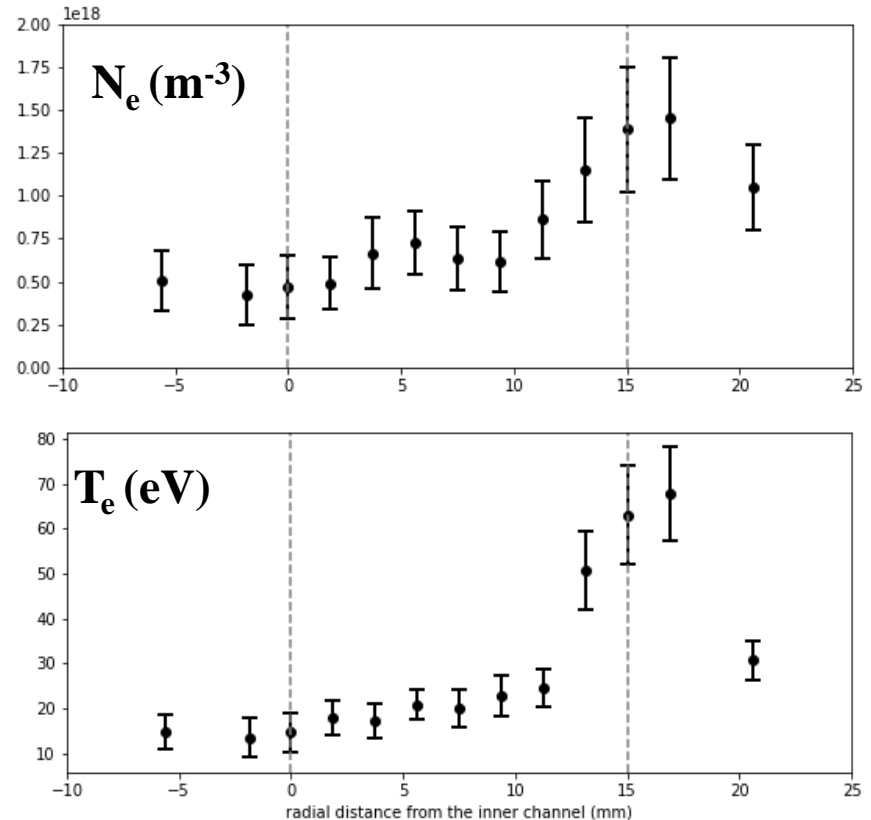
- L'instabilité acoustique ionique modifiée est un candidat sérieux pour expliquer le transport anormal dans les propulseurs de Hall
- Approche conjointe simulations PIC et mesures est un élément clé dans la compréhension du transport élect.
- Benchmarks sont nécessaires pour **vérifier** que les mécanismes obtenus sont physiques et pas des artefacts numériques
- Premières simulations 3D existent, benchmark avec codes de simulations PIC du Laplace sont en cours

Perspectives (1/3)

- Simulations dans des conditions plus réalistes en lien avec mesures de diffusion Thomson incohérente

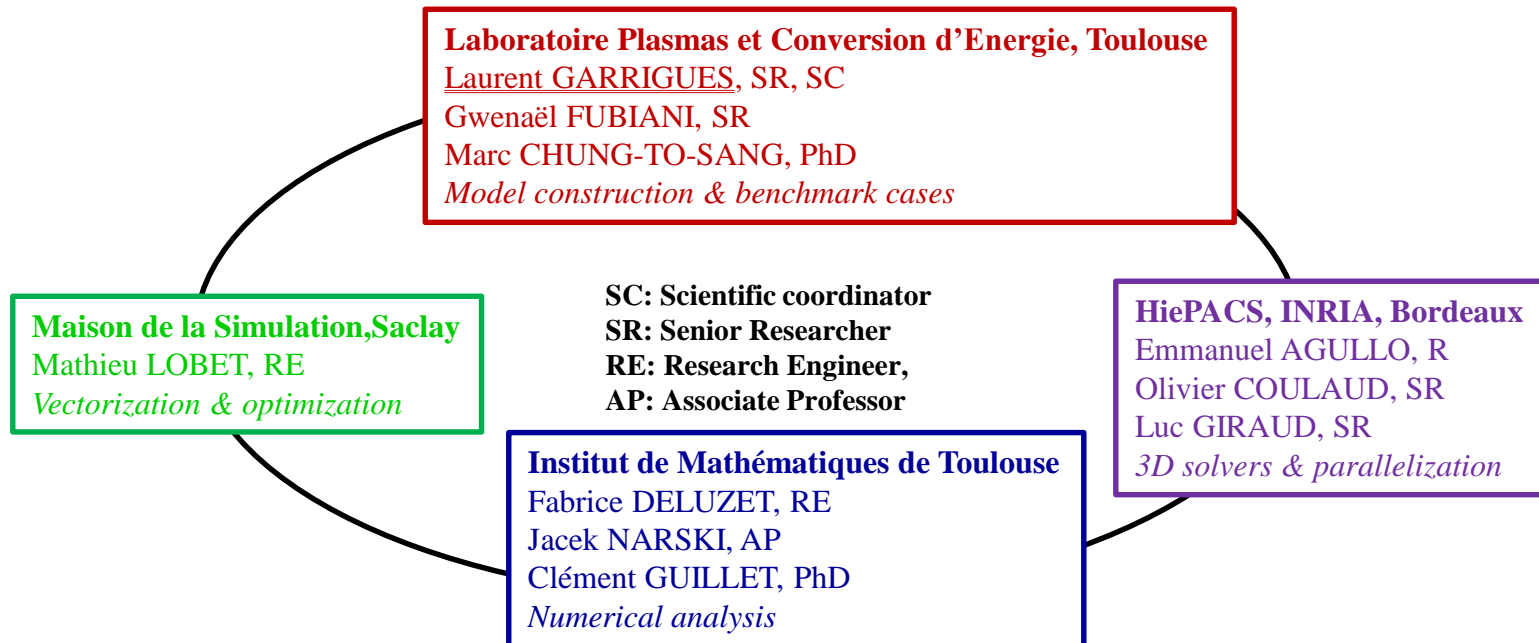


Dubois and Tsikata, ExB Workshop, Madrid 2022



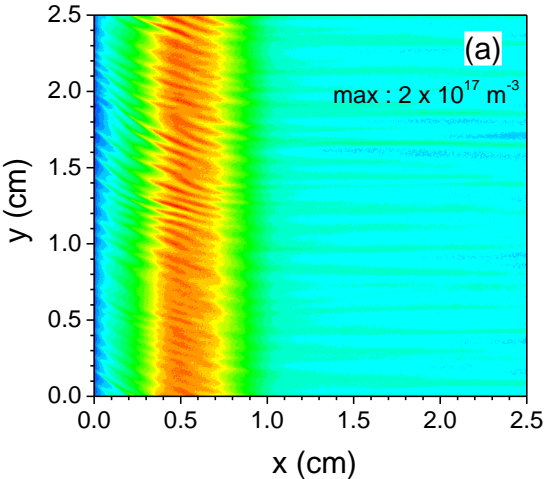
Perspectives (2/3)

- Réduire les coûts de simulation: approche Sparse
- Projet ANR AAPG 2022 – MATURATION (2023-2026)

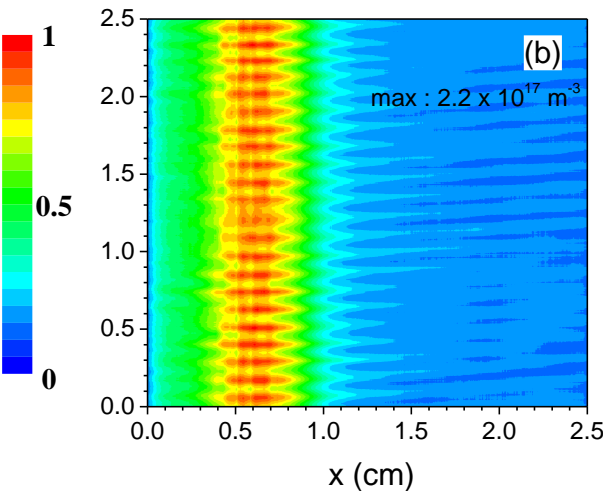




Résultats en 2D

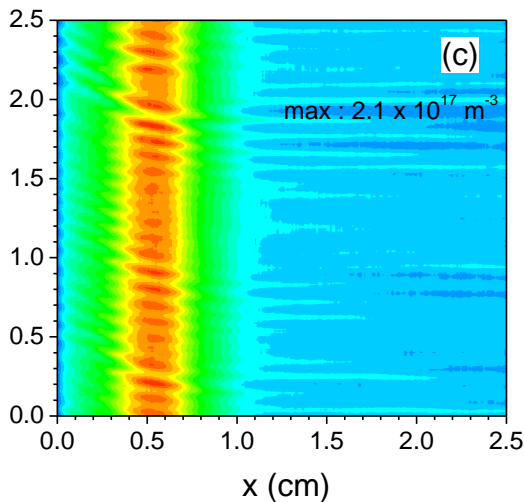


Régulier 512 × 512
Npc : 400



Sparse N = 9, Npc : 400
Gain temps cal. : 6.5

Garrigues et al., JAP 129, 153304 (2021)



Sp N = 9, offset, Npc : 400
Gain temps cal. : 4

Deluzet et al., ESIM 56, 1809 (2022)

Ion trapping

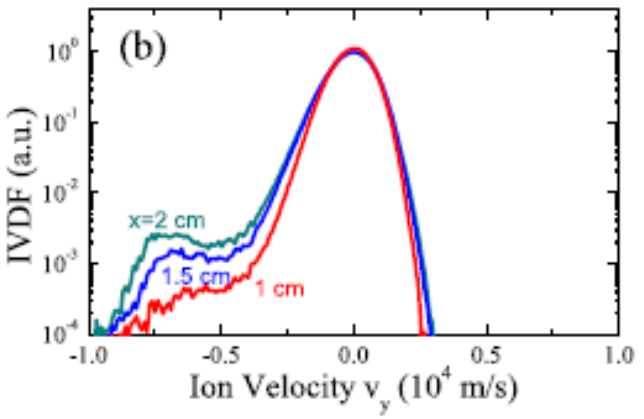
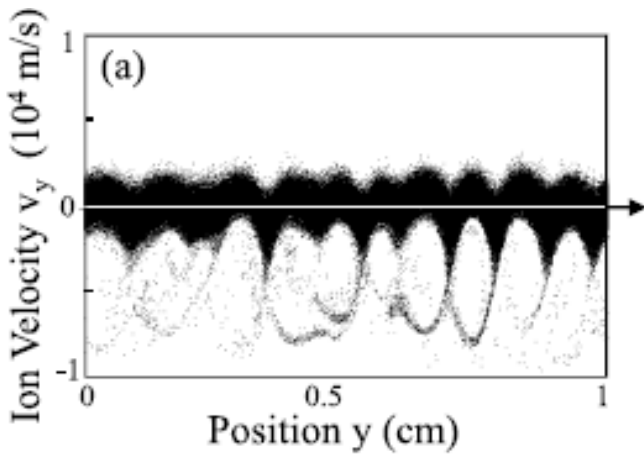
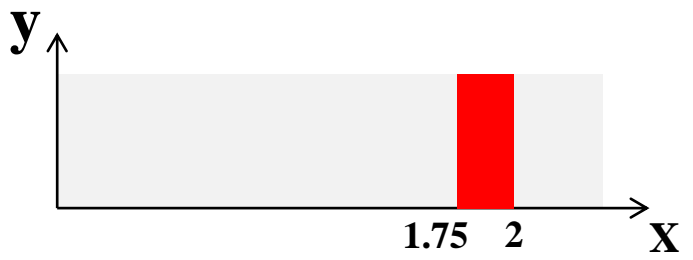


FIG. 10. (a) y - v_y phase space of the ions with axial positions between $x = 1.75$ cm and $x = 2$ cm in the conditions of Fig. 5; (b) Ion velocity distribution function (azimuthally integrated) at three axial positions under the same conditions.



*Boeuf and Garrigues
PoP 25, 061204 (2018)*

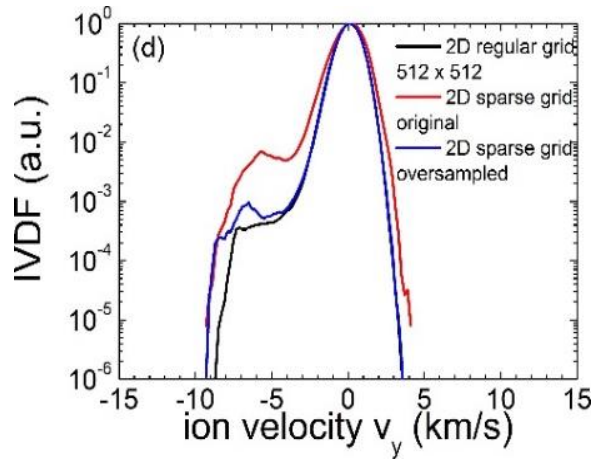




Table 2: Main codes specificities.

	LPP	LAPLACE	CERFACS	RUB	USask	TAMU	PPPL
Algorithms							
Pusher solver	Explicit	Explicit	Explicit	Implicit	Explicit	Explicit	Explicit
Poisson solver	Hypre	Pardiso	Maphys	FFT Thomas	FFT	Hypre	Hypre
Floating-point precision	Double	Single(pusher) Double (Poisson)	Double	Single(pusher) Double (Poisson)	Double	Double	Double
Code acceleration							
Architecture	CPU	CPU	CPU	GPU	CPU	CPU	CPU
Parallelization	MPI	MPI/OpenMP	MPI	CUDA	MPI	MPI	MPI/OpenMP
Decomposition	Domain	Particle	Domain	Both	Domain	Particle	Particle
Language	Fortran	Fortran	Fortran	C+Cuda C	Fortran	C++	C
Simulation times (days)							
Case 1 ($N_{ppc,ini} = 150$)	8 (360 CPU)	5 (108 CPU)	7 (360 CPU)	14 (1 GPU)	21 (32 CPU)	15 (300 CPU)	2.5 (224 CPU)
Case 2 ($N_{ppc,ini} = 75$)	5 (360 CPU)	3 (108 CPU)	4 (360 CPU)	9 (1 GPU)	11 (32 CPU)	11 (200 CPU)	2.5 (112 CPU)
Case 3 ($N_{ppc,ini} = 300$)	14 (360 CPU)	6 (180 CPU)	13 (360 CPU)	14 (2 GPU)	20 (64 CPU)	22 (400 CPU)	2.5 (448 CPU)

Charoy et al. , PSST 28, 105010 (2019)