





### Nouveaux concepts en propulsion plasma

#### Laurent Garrigues, Directeur de Recherche CNRS

Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie – LAPLACE Université de Toulouse, CNRS-UPS-INPT Bâtiment 3R2, 118 Route de Narbonne 31062 Toulouse Cedex 09, France



laurent.garrigues@laplace.univ-tlse.fr







# Propulsion plasma ?



# Concepts avancés

# Moteur ID-Hall

# Conclusions et perspectives













## **Equation de Tsiolkovsky**

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



### **Propulseurs chimiques vs électriques**

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

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



#### Propulseur chimique

Hydrazine (N<sub>2</sub>-H<sub>4</sub>) brulée à 3000 K vitesse d'éjection liée au chauffage thermique

#### Propulseur électrique

moteur à grilles ions Xe accélérés à quelques 100' de volts

25<sup>e</sup> Congrès Général de la Société Française de Physique



Nantes, 8 – 12 juillet 2019

Laplace

### Champ électrique dans un plasma ?



- Plasma milieu conducteur : champ E dans les gaines
- Utiliser un système de grilles accélératrices
  - → moteur à grilles







## Moteurs à grilles



#### NSTAR/NASA/Deep Space-1 (1998-01)



T6/ESA-JAXA/Bepi Colombo (Oct. 18)



#### Etage d'ionisation

- Décharge DC + confinement magnétique multipolaire : NSTAR (EU), Q T6 (GB)
- o Décharge RF : RIT X à l'université de Giessen en Allemagne
- Décharge micro-onde : sonde Hayabusa (Japon)







### Limitation poussée/unité de surface

Densité de courant *J<sub>i</sub>* extraite des PG limitée
loi Child Langmuir
 $4\epsilon_0 \ 2q_i V^{3/2}$ 

$$J_i = \frac{4\varepsilon_0}{2} \sqrt{\frac{2q_i}{m_i}} \frac{V^{3/2}}{d^2}$$



- Tension d'accélération V=1 kV, ions Xe, espacement des grilles d=1 mm  $J_i \sim 10$  mA /cm<sup>2</sup>
- Courant ionique de 6 A surface des grilles extractrices of 600 cm<sup>2</sup> ( $\phi$  = 30 cm)
- Poussée/unité de surface ~ quelques N/m<sup>2</sup>



## Présence d'un champ magnétique





#### En présence d'un champ magnétique localisé (barrière)

- Décroissance de la conductivité électronique localement σ
- o 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
- o Accélérer les ions

25<sup>e</sup> Congrès Général de la Société Française de Physique





### **Comment marche un PH ?**



### PH dans le monde



25° Congrès Général de la Société Française de Physique





## Se passer de la propulsion chimique ?

#### Transfert d'orbite

- Propulsion chimique, pas de source d'énergie extérieure
- o grande quantité de carburant forte poussée

#### Simplifier l'architecture des satellites

- o S'affranchir de la propulsion chimique (mise à poste plus longue)
- Plateforme « tout électrique »
- Réduire les coûts au lancement
- Utilisation d'un moteur de Hall « conventionnel » ?



Eutelsat 172B (Crédit Airbus D& S), 2017

25<sup>e</sup> Congrès Général de la Société Française de Physique





### Gamme étendue de fonctionnement ?



12

### Limite des PH « conventionnels »





## Concept propulseur double-étage



- étage d'accélération : barrière magnétique, PH « conventionnel »
- étage d'ionisation : créer un plasma à moindre coût (Pioni./Ptotale)







## LGIT (NASA/Univ. Michigan)





### Galatea – confinement magnétique



A.I. Morozov et al., Physics Uspekhi (2003)

- système de confinement 60-70' (Union. Sov.)
- piéger des électrons pour atteindre des plasmas forte densité
- système abandonné au profit des tokamaks







## **SPT-MAG configuration magnétique**



25<sup>e</sup> Congrès Général de la Société Française de Physique





### **SPT-MAG électrodes**



25° Congrès Général de la Société Française de Physique





## **Trajectoires électroniques**



#### lignes de champ magnétique ~ équipotentielles

25<sup>e</sup> Congrès Général de la Société Française de Physique



Nantes, 8 – 12 juillet 2019

Laplace 19

### **Rôle cathode intermédiaire ?**





#### cathode étage d'ionisation émissive

simulations prédisent l'établissement 0 d'un puit de potentiel (lignes B ~ equipotent.) densité de plasma « confinée » dans le puit 0 ions guidés vers l'étage d'ionisation

#### cathode étage d'ionisation non-émissive

expériences Ο

moteur fonctionnant dans ces conditions pas d'établissement du puit de potentiel 0 maximum de densité de plasma étage d'accélération

remise en cause du concept existence du puit de potentiel? intérêt de l'étage d'ionisation ?



L. Garriques et al. PoP 15, 113502 (2008)

> 25° Congrès Général de la Société Francaise de Physique 5

6

290

7





### **Concept ID-Hall ?**

#### Inductively Coupled Double Stage Hall Thruster

ID-Hall = ICP + HT

- Source d'accélération : moteur de Hall
- Source d'ionisation : décharge RF antenne intérieur partie centrale
- Augmenter la densité de plasma : bobines pour confiner les électrons
- Limiter les pertes d'électrons paroi interne (« festons »)
- Densité de plasma torique











### Fonctionnement simple/double étage



Simple étage Puissance RF = 0 Tension DC : ionisation et accélération

Double étage Puissance RF : ionisation Tension DC : accélération

J. P. Boeuf et al., GEC (2018)

25° Congrès Général de la Société Française de Physique





## **Caractérisation source d'ionisation**

#### Système de sondes : mesure des propriétés électroniques



- Effet de B : forte augmentation de la densité électronique
- Zone de plasma dense autour de l'axe

L. Dubois et al., PoP (2018)

25° Congrès Général de la Société Française de Physique



Nantes, 8 - 12 juillet 2019

Laplace 23

### Poussée et effacité



- Saturation à forte puissance : Poussée limitée par le débit
- Concept de double étage plus pertinent à faible tension





Nantes, 8 - 12 juillet 2019

24

Laplace

### **Test 1<sup>er</sup> prototype moteur ID-Hall**

#### **Puissance 100 – 300 W**



Fonctionnement mode double-étage



Caisson LAPLACE, Uni. Toulouse Transfert du GREMI, Orléans



A



## **Distributions des ions**





Sonde de Langmuir Sonde de Faraday

RPA

26

Laplace



### **Conclusions et perspectives**

- Moteur « simple étage » non adapté aux missions du futur
- Moteur « double étage » candidat sérieux à condition de générer le plasma proche de la zone d'accélération
- ID-Hall prometteur
- Forte ionisation du gaz, forte densité plasma
- Décharge ExB sont le siège de phénomènes intéressants à étudier (instabilités)







#### Remerciements



- RTRA, Sciences et Technologies de l'Aéronautique de l'Espace, Toulouse via le projet INNPULSE
- Programme R et T, CNES
- Laboratoire GREMI, Titaina GIBERT, Caisson à vide

J.P. Boeuf



**F. Gaboriau** 



25° Congrès Général de la Société Française de Physique





## VASIMR – Mars en 39 jours !





#### Caractéristiques

- Antenne hélicon ICP
- Aimants supraconducteurs
- Électrons et ions magnétisés
- Chauffage cyclotronique ICR
- Tuyère magnétique

Performances

- Poussée : 40 1200 N
- lsp:1000 30000 s
- P: 100 MW réacteurs nucléaires



Nantes, 8 - 12 juillet 2019

Laplace

30

### Source de puissance







31