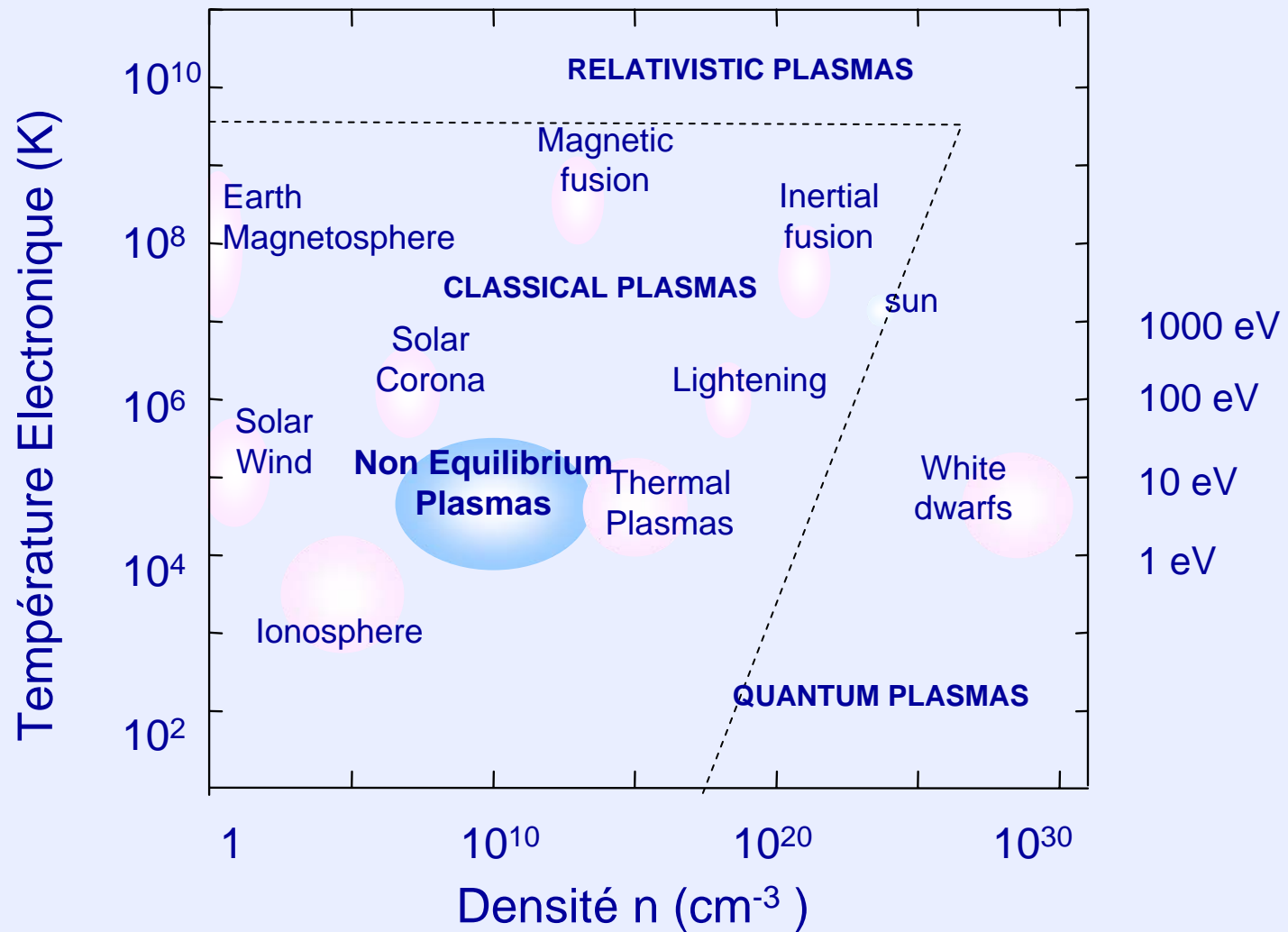


J.P. BOEUF
CNRS - CPAT - Université de Toulouse III





➤ Degré d'ionisation – Plasma froid

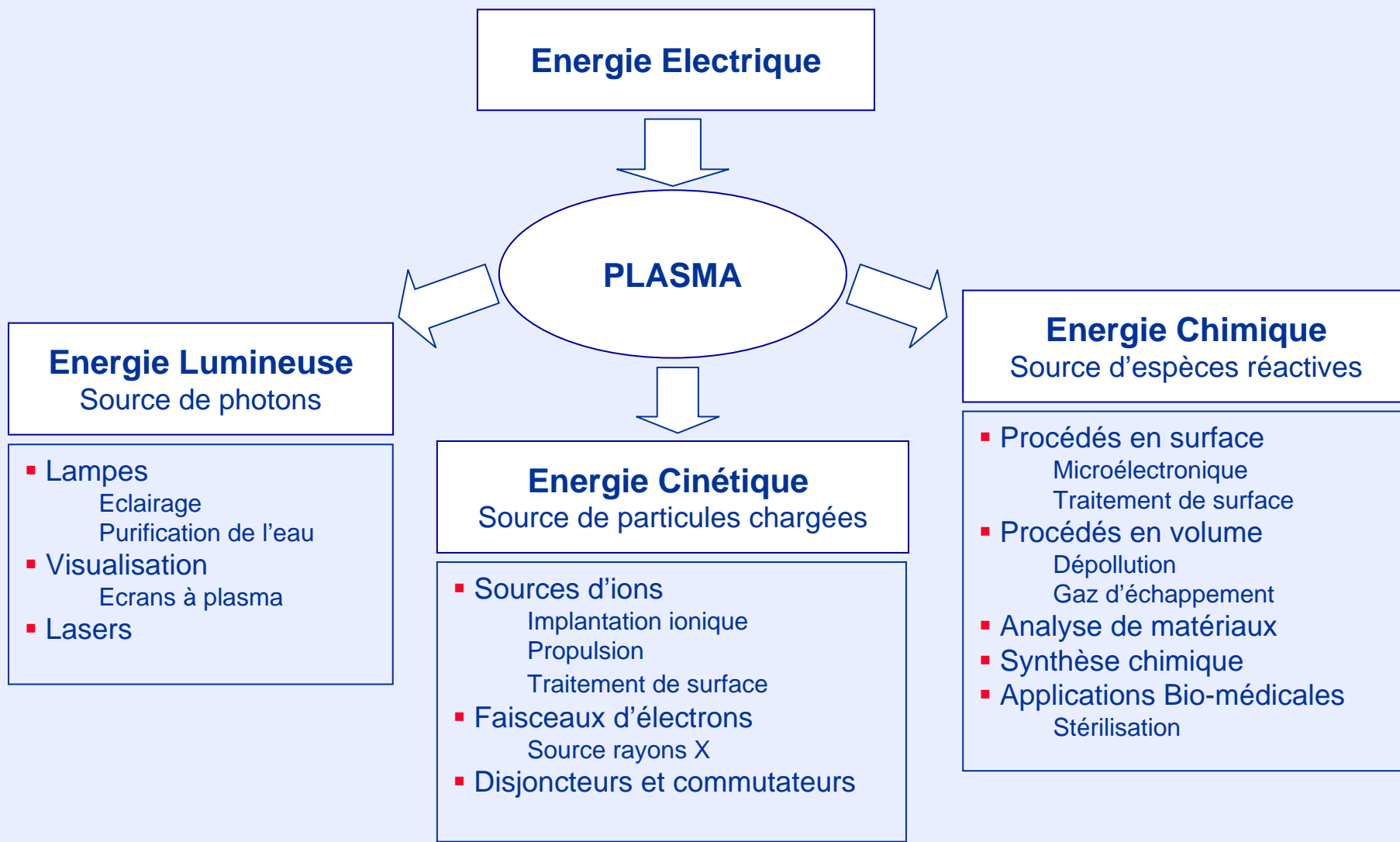
- densités d'électrons et d'ions faibles devant la densité de molécules neutres (10^{-7} - 10^{-2})
- collisions électron-neutre et ions-neutre jouent un rôle important (excitation, ionisation, dissociation)
- plasma « froid » faible degré ionisation par opposition aux plasmas chauds

➤ Plasma froid hors équilibre

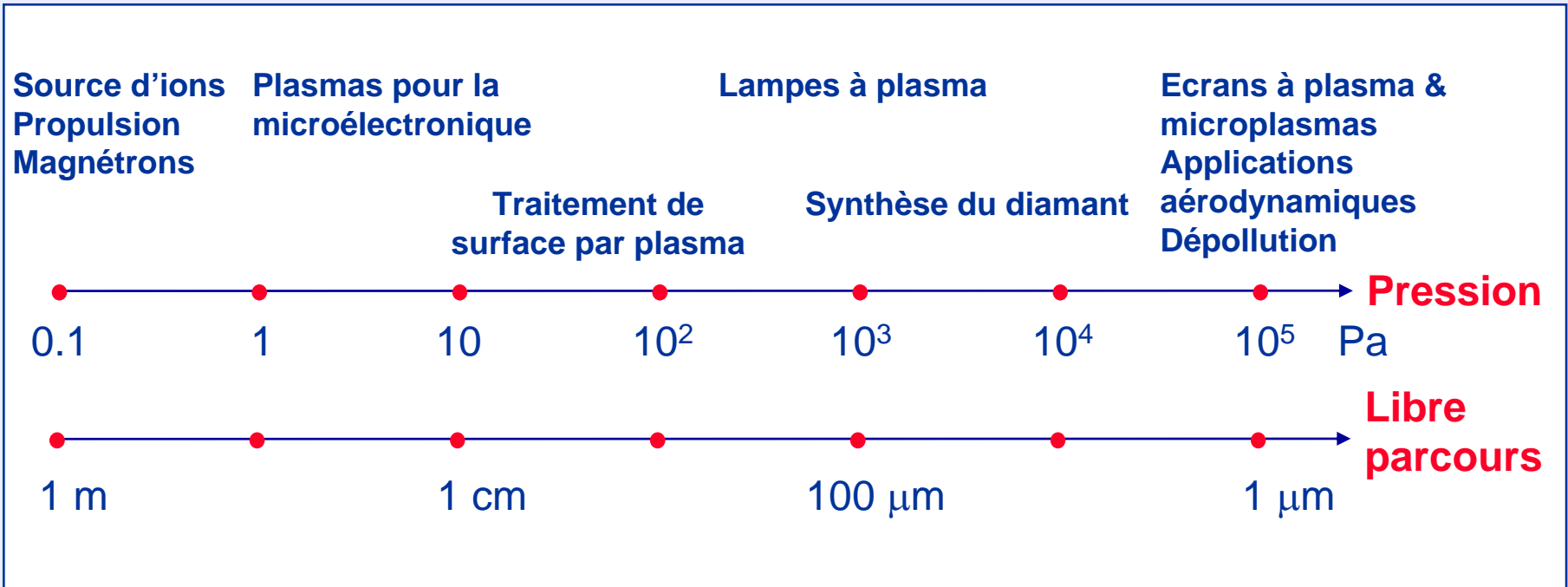
- électrons beaucoup plus énergétiques (10^4 - 10^5 K ou 1-10 eV) que ions et molécules
 - milieu réactif à basse température de gaz (application au traitement de surface)
 - milieux complexes car hors d'équilibre – physique riche et variée
- phénomènes de transport, électromagnétisme, physique atomique & moléculaire, chimie, physico-chimie des surfaces

➤ Entretien du plasma – Couplage d'énergie au plasma

- équilibre création-pertes de particules chargées
- couplage d'énergie peut se faire de manières très diverses: chauffage des électrons par tension continue, RF capacitif, inductif, hélicon, microonde, Résonance Cyclotron Electronique ...



- Applications dans une gamme très large de pression de gaz
- Collisions nécessaires à la génération du plasma (ionisation par collisions e-neutre)
- Couplage d'énergie et génération de plasma sont très dépendants de la pression



← confinement magnétique →

← chauffage DC, RF ou microonde →

← décharges impulsives →

➤ Quoi de neuf en Physique des Plasmas Froids ?

- Progrès technologiques remarquables (microélectronique, écrans à plasma, propulsion ...)
- Rendus possibles grâce à des recherches de base s'appuyant sur des diagnostics sophistiqués

➤ Méthodes de diagnostic de plus en plus fines

▪ Diagnostics laser

- Mesures de densités d'espèces, de champ électrique, de distribution de vitesses d'ions/atomes
 - ❖ Fluorescence Induite par Laser LIF, TALIF, TALISE,
- Mesures de densité, température, fonction de distribution électroniques
 - ❖ Diffusion Thomson
- Mesures de concentrations et températures d'espèces moléculaires
 - ❖ Diffusion Raman Anti-Stokes Cohérente (CARS)
- Détection de molécules lourdes (niveaux d'excitation dans le rouge ou l'infrarouge)
 - ❖ Absorption par Diode Laser Accordable (TDLAS, CRDS)

▪ Imagerie rapide

▪ Progrès des méthodes numériques

- Modèles fluides 2D et 3D de plasmas hors-équilibre
- Modèles particuliers « Particle In Cell » 1D et 2D
- Modèles hybrides

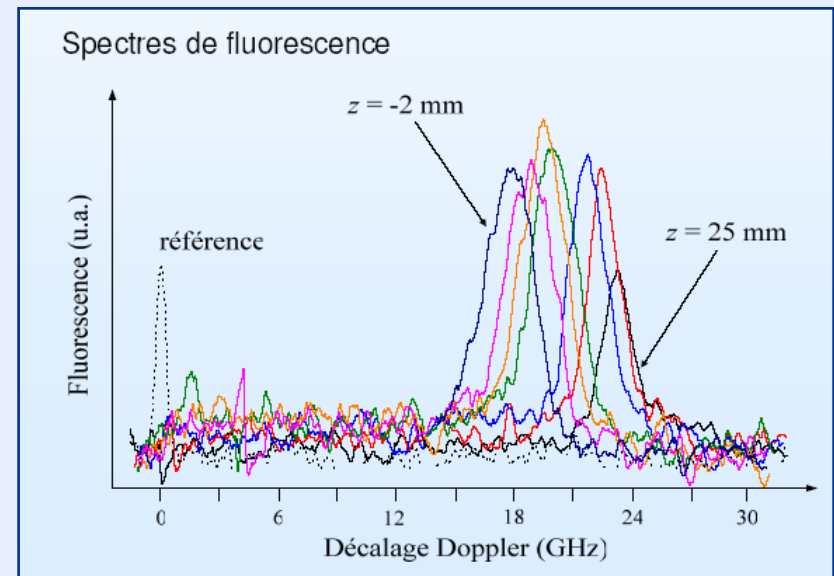
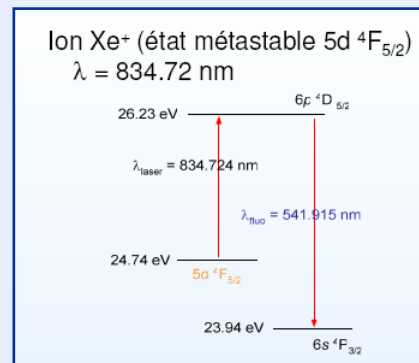
➤ Méthodes de diagnostic de plus en plus fines

■ Diagnostics laser

- Mesures de densités d'espèces, de champ électrique, de distribution de vitesses d'ions/atomes

❖ Fluorescence Induite par Laser LIF

- Mesure de la fonction de distribution des ions de xénon dans un propulseur plasma
- Décalage Doppler des raies de fluorescence: $\nu_e = \nu_0 + \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} / 2\pi$
- Le profil de fluorescence correspond à la fonction de distribution des vitesses

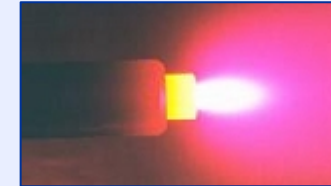


GDR Propulsion

- 1. Propulsion plasma pour satellites**
- 2. Micro-nano particules et plasmas**
- 3. Ecrans à plasma**
- 4. Applications aérodynamiques**

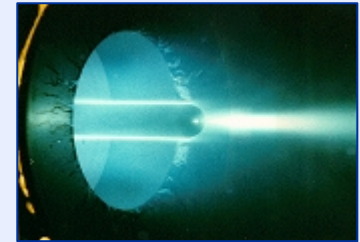
■ Electrothermique

- Chauffage d'un gaz + expansion
- Arcjet, resistojet



■ Magnétodynamique

- Expansion d'un plasma – Force de Laplace
- Pulsed Plasma Thruster, Lorentz force accelerator



■ Propulseur ionique

- Source de plasma + extraction et accélération par grilles polarisées



➤ Propulsion électrique et propulsion chimique

- Propulsion électrique: faible poussée mais forte vitesse d'éjection du fluide propulsif
- Mieux adaptée au contrôle d'orbite: gain en masse fluide propulsif (qqes 100 kg ie qqes M€)
- Applications au contrôle d'orbite, transfert d'orbite, missions interplanétaires

➤ Historique

- Propulseurs à effet Hall étudiés et testés en URSS à partir des années 1970
- Propulseur à grille sur mission Américaine Deep Space 1
- 1er propulseur plasma Européen (PPS1350 SNECMA) sur sonde lunaire SMART 1 en 2003-2004

➤ En France: GDR Propulsion Plasma CNRS/CNES/SNECMA/ONERA > 1996

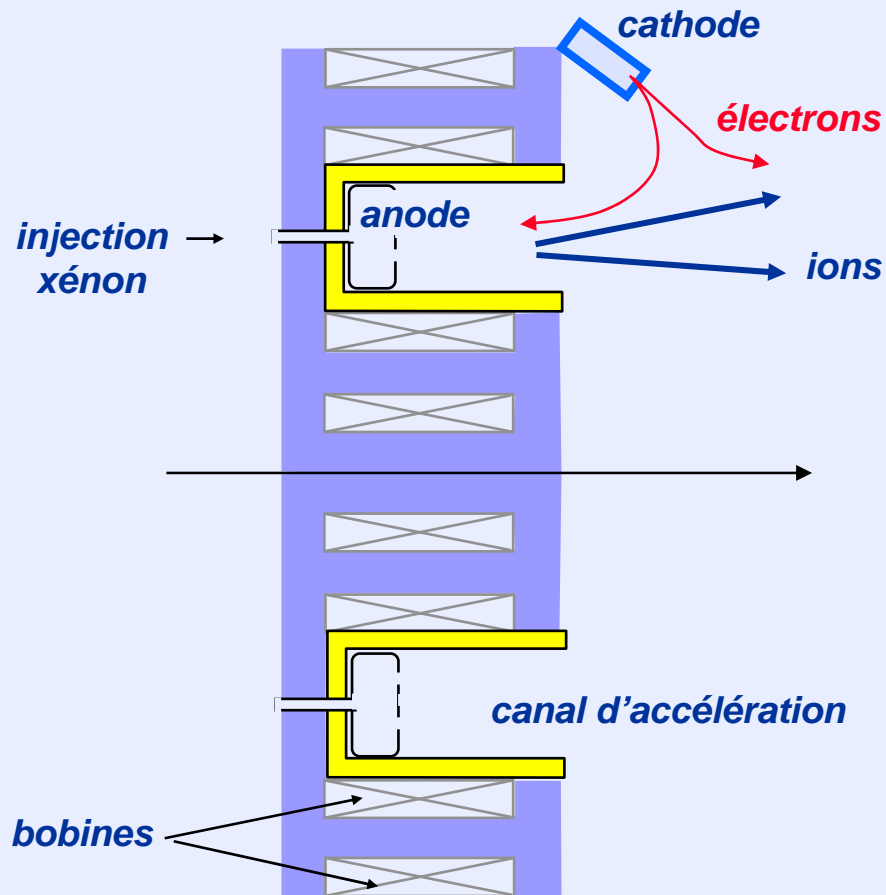
- Etude d'un type de propulseur: le propulseur à effet Hall ou SPT
- Objectifs: réduction de l'empirisme , développement d'un savoir-faire et d'outils de conception
- Diagnostics expérimentaux et numériques – Moyen d'essai PIVOINE
- Laboratoires: Aérothermique, GREMI, LPGP, CPHT, LPTP, CPAT

➤ Verrous scientifiques

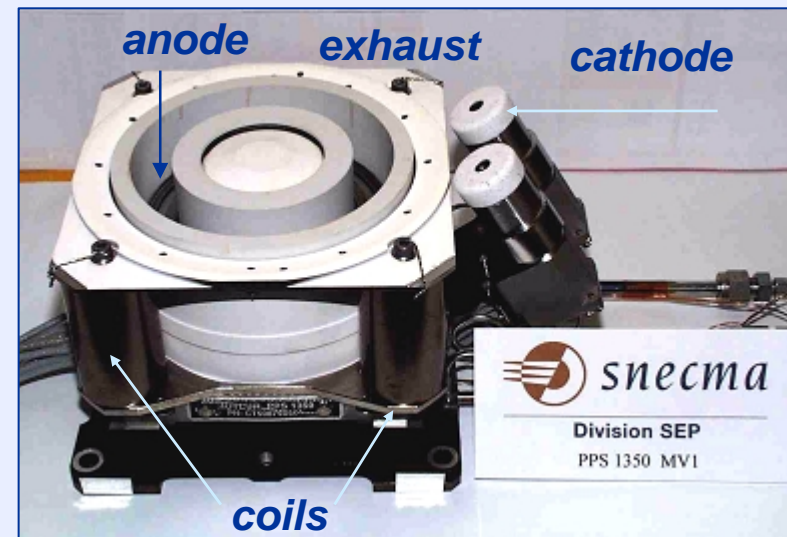
- Conductivité anormale – turbulence plasma
- Développement de codes de calcul prédictifs
- Optimisation de la configuration magnétique
- Durée de vie

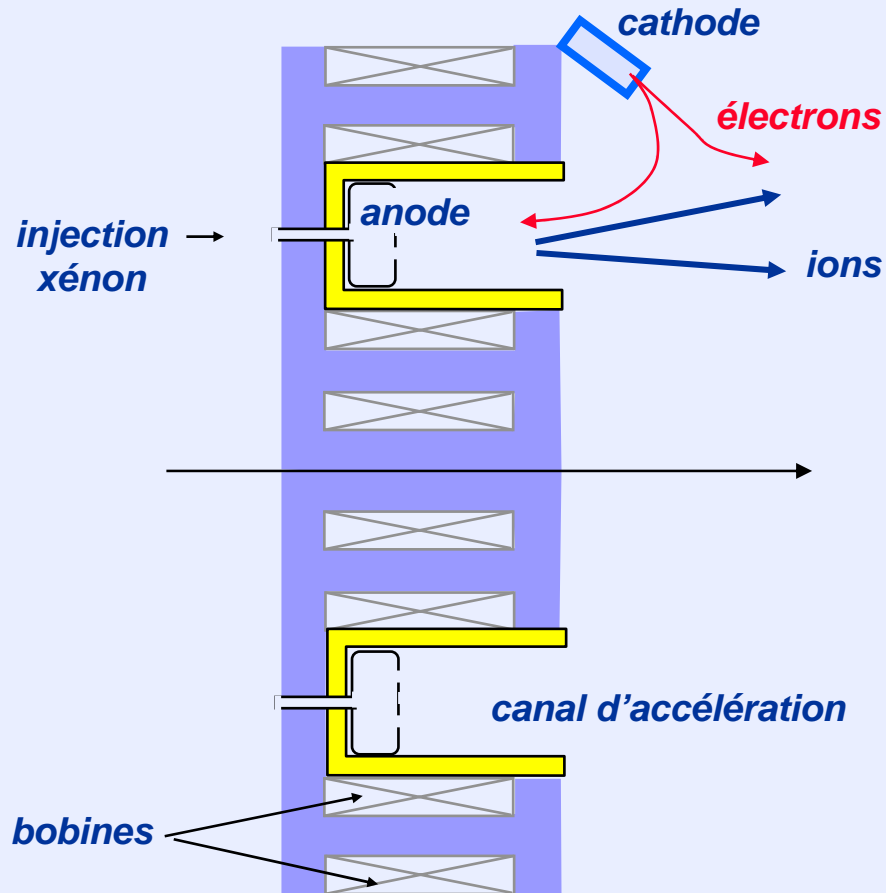
PIVOINE - Orléans



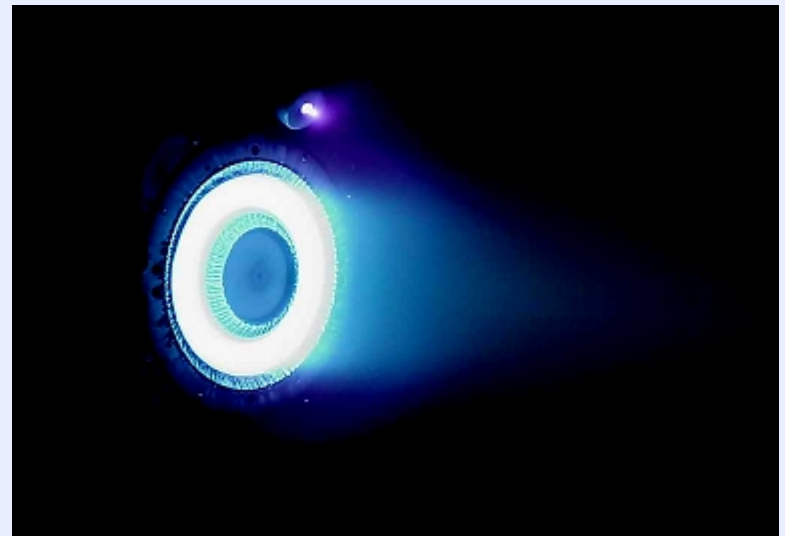


- Contrôle d'orbite
- Réduction de coûts / Propulsion chimique
- Efficacité élevée > 50 %
- Impulsion spécifique ~1800 s
- Poussée / puissance ~ 70 mN/kW
- Moteur ionique sans grille



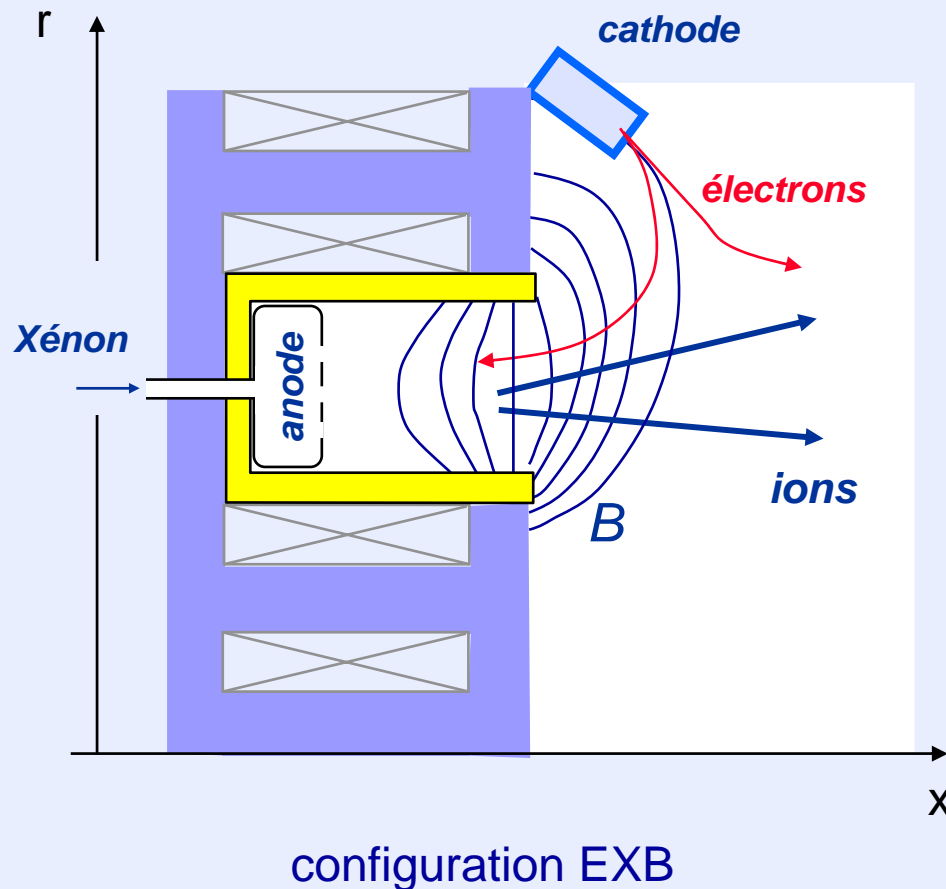


- Contrôle d'orbite
- Réduction de coûts / Propulsion chimique
- Efficacité élevée > 50 %
- Impulsion spécifique ~1800 s
- Poussée / puissance ~ 70 mN/kW
- Moteur ionique sans grille



Moteur SNECMA PPS1350

Testé sur la sonde lunaire ESA SMART 1

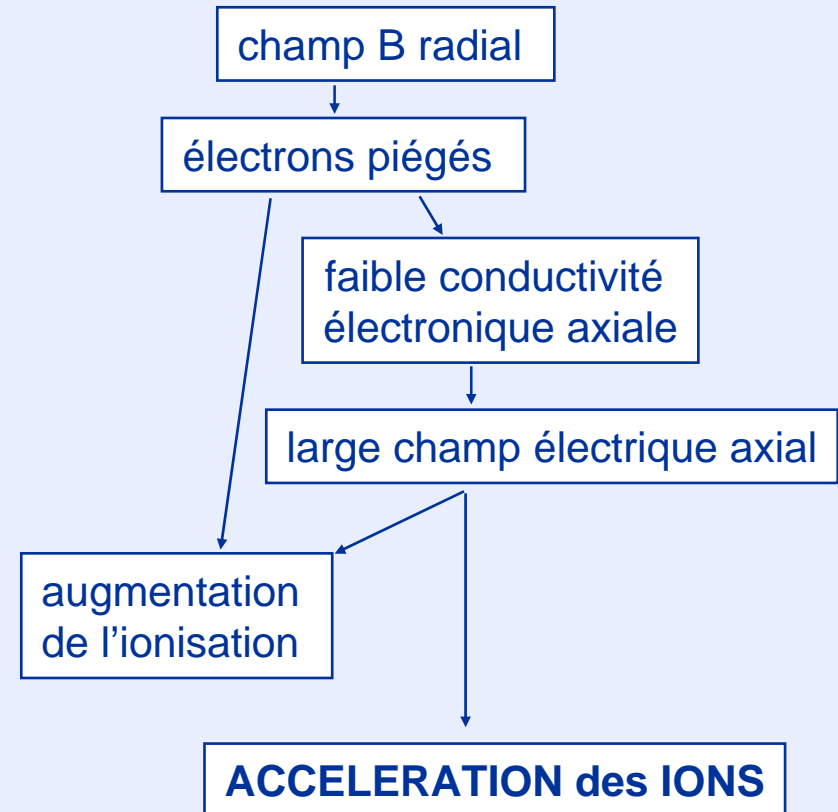
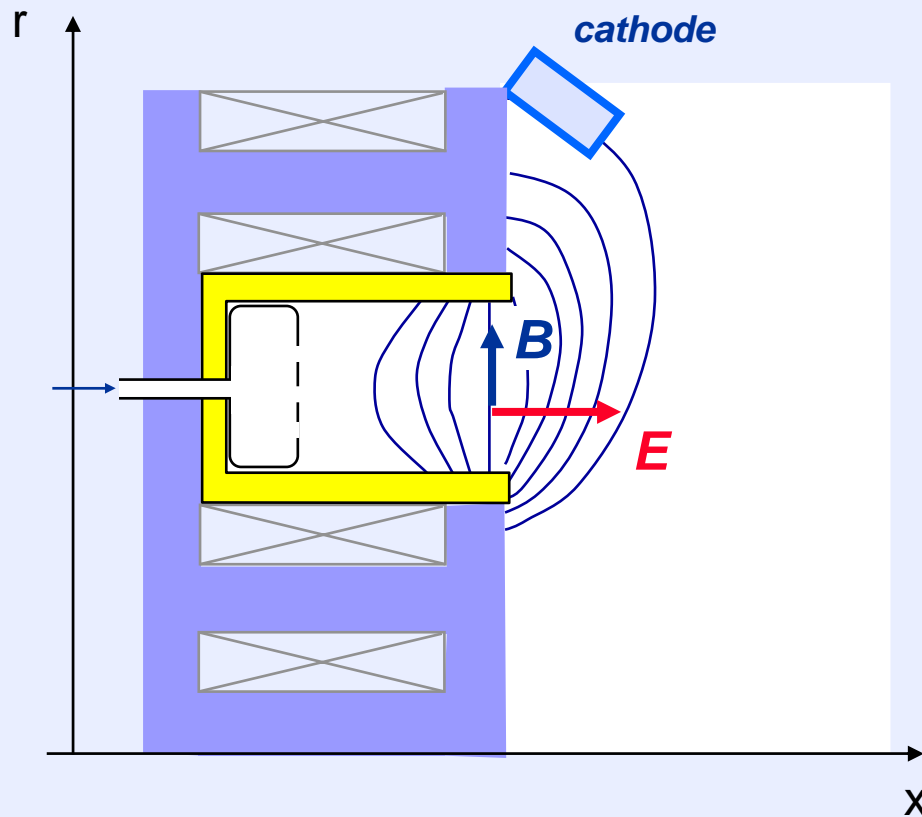


Principes

- Large champ magnétique en sortie (200 G)
- Libres parcours \gg dimensions
- Electrons confinés par champ magnétique
- Electrons collisionnels car confinés
- Ions non collisionnels (insensibles à B)
- Flux de neutres \sim ionisé à plus de 90%

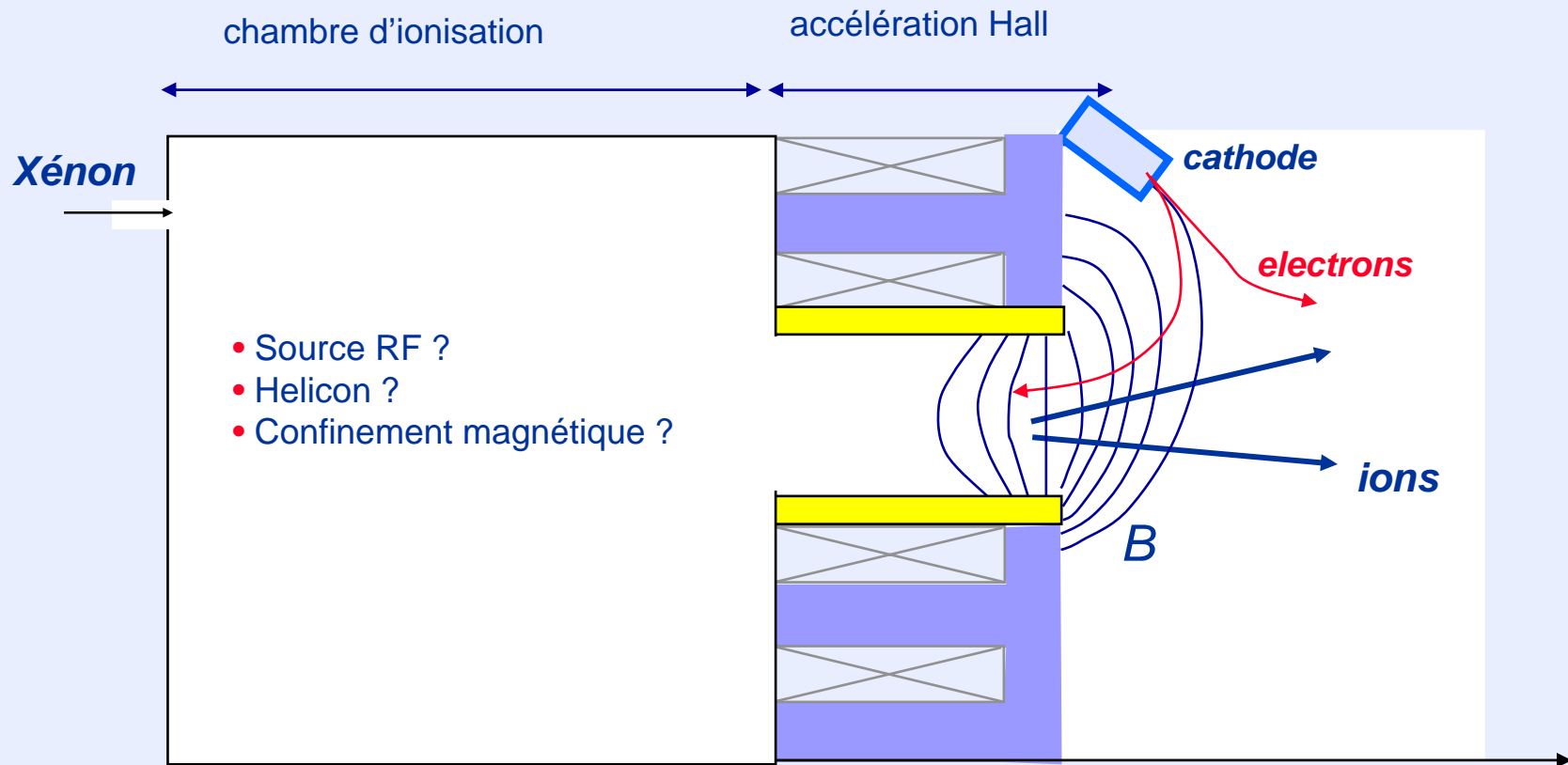
Ordres de grandeur

- Tension 300 V
 - Dimensions typiques ϕ 10 cm, L 3 cm
 - Débit de Xénon 5 mg/s
 - Densité de plasma 10^{18} m^{-3}
 - Température électronique 15 eV
- | | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| \rightarrow vitesse des ions | $\sim 18 \text{ km/s}$ |
| \rightarrow poussée | $\sim 80 \text{ mN}$ |
| \rightarrow courant | $\sim 4 \text{ A}$ (3 A d'ions) |
| \rightarrow courant de Hall | $\sim 20 \text{ A}$ |

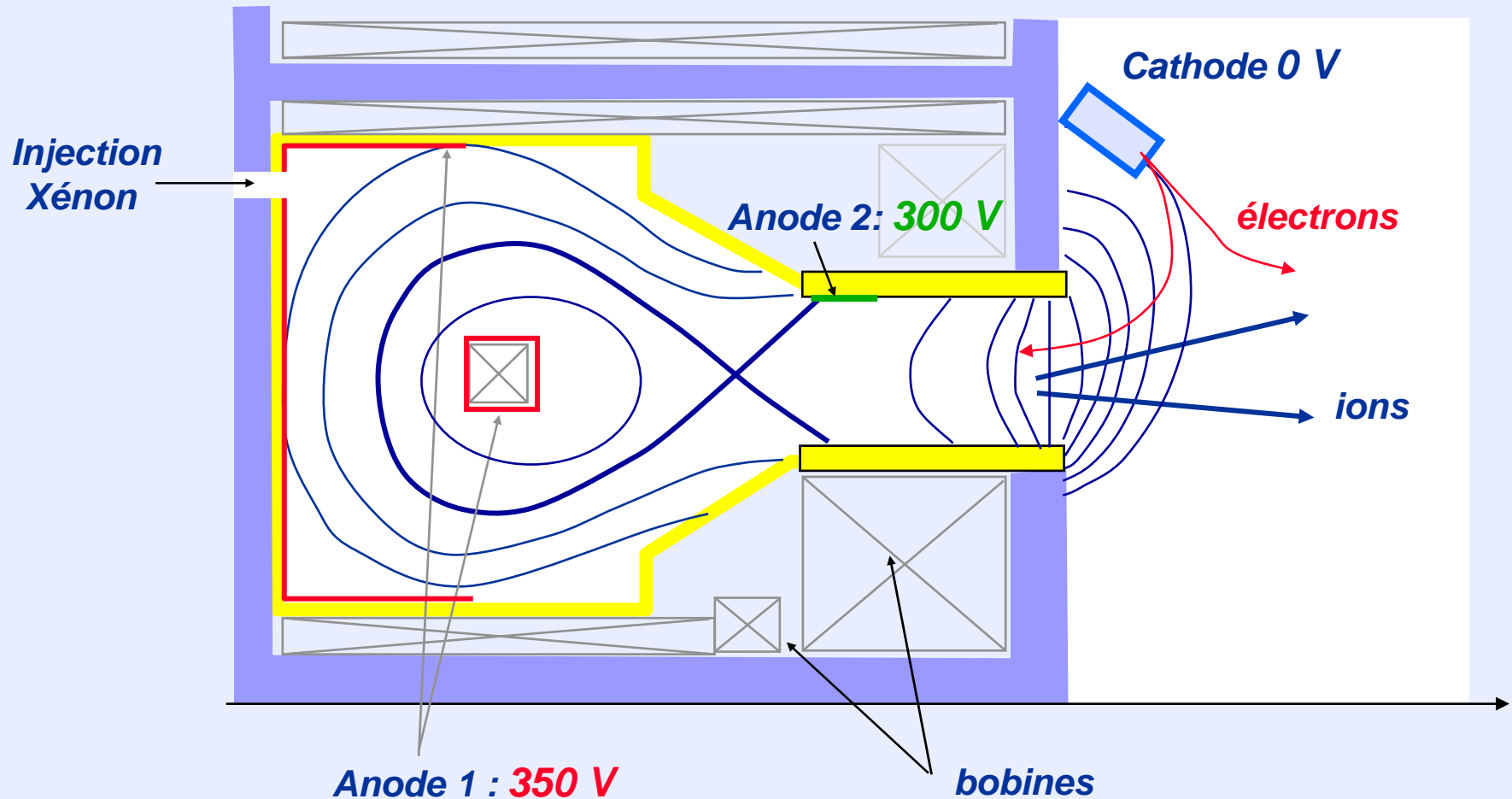


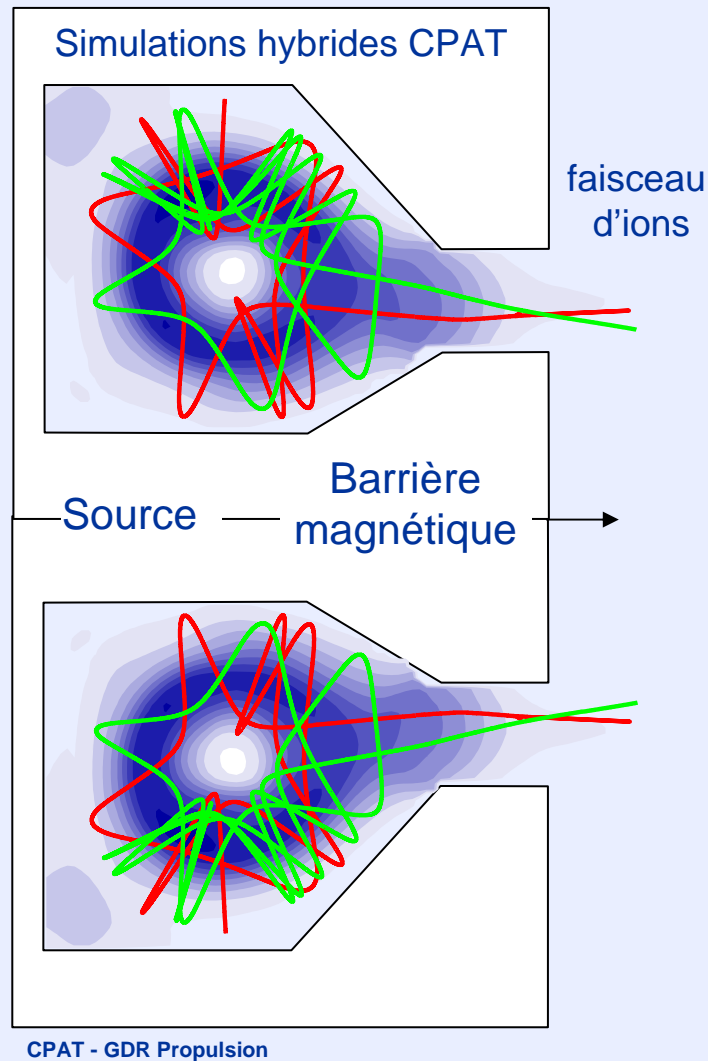
Concept de moteur double étage

- **Recherche de moteurs plus versatiles** (réglage séparé de la poussée et de l'impulsion spécifique)
- **Séparation de la production du plasma et de l'accélération des ions**
- **Moteurs à deux étages**



Moteur à double étage – Brevet SNECMA, (2003, O. Secheresse, A. Bugrova, A. Morozov)





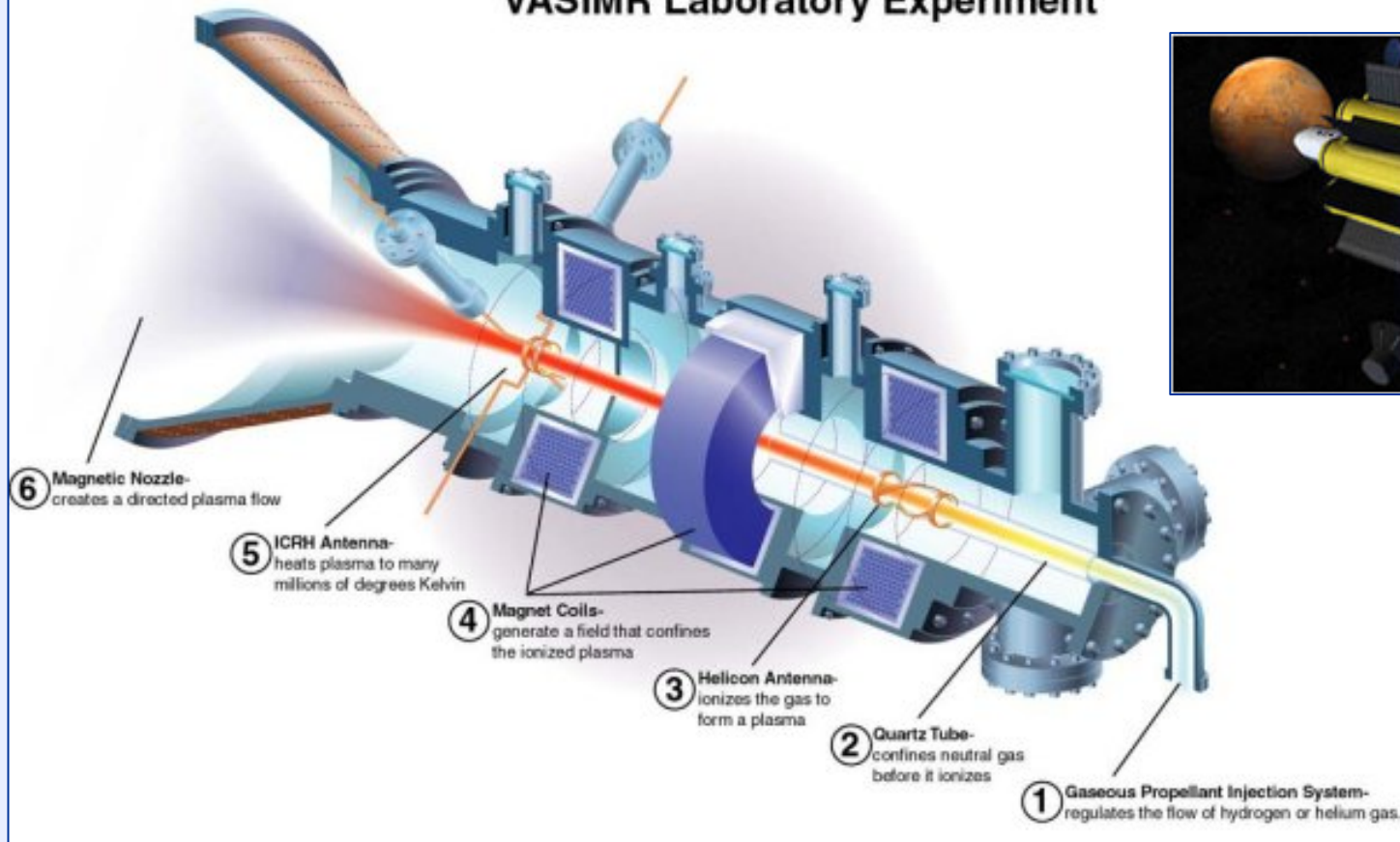
- Ions piégés dans le puit de potentiel généré par la configuration magnétique
 - Guidés vers le canal d'accélération par le puit
 - Accélérés par la barrière magnétique
-
- Peut fonctionner dans une gamme plus large de débits et de tensions appliquées
 - Réglage séparé puissance et vitesse des ions
 - Donc contrôle séparé poussée et impulsion spécifique

Propulsion plasma pour satellites

Propulseur pour missions interplanétaires – Projet VASMIR - **V**Arable **S**pecific Impulse **M**agnetoplasma **R**ocket

VASIMR Laboratory Experiment

NASA



- source hélicon
- chauffage par résonance cyclotron ionique
- aimants supra-conducteurs
- tuyère magnétique

- Poussée : 40 N -1200 N, ISP: 1000 s -30000 s
- puissance jusqu'à 100 MW → réacteur nucléaire

1. Propulsion plasma pour satellites
- 2. **Micro-nano particules et plasmas**
3. Ecrans à plasma
4. Applications aérodynamiques

➤ Formation de particules dans les plasmas réactifs

- Des nano-micro particules peuvent se former dans des plasmas
- polymérisation de radicaux et croissance par coalescence et par dépôt
- particules négatives lourdes piégées dans le plasma
- peuvent se former également par interaction plasma-surface (tokamaks)
- particules doivent être éliminées dans la plupart des applications

➤ Synthèse de nano-particules et dépôt de couches minces

- synthèse de particules nanométriques en volume, nano-cristaux
 - dépôt ou inclusion dans une couche mince
 - change les propriétés de surface (conductivité, émission électronique etc...)
 - quantum dots, dispositifs à un électron, ...

➤ Introduction de particules micrométriques dans un plasma

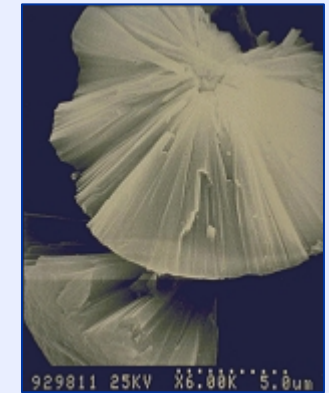
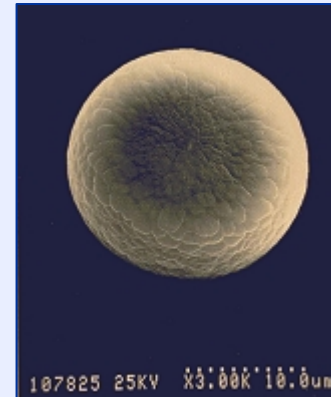
- possibilité de formation d'un plasma fortement corrélé: « **cristal plasma** »
- étude de transitions de phase, propagation d'ondes etc...

➤ Formation de particules dans des plasmas pour la microélectronique

Nuage de particules dans un plasma de gravure
(Selwyn, IBM 1994) – Diffusion laser

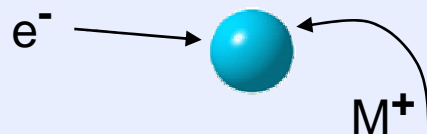


Particules formées dans un plasma réactif



Charge d'une particule

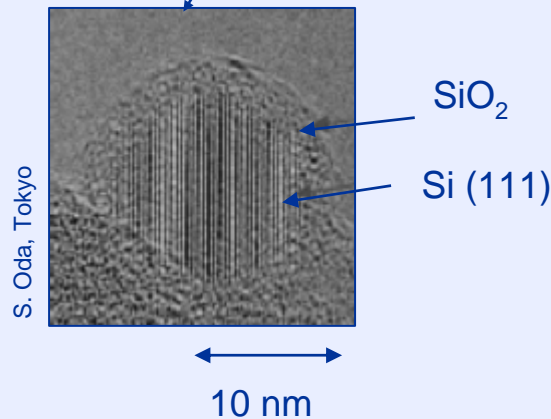
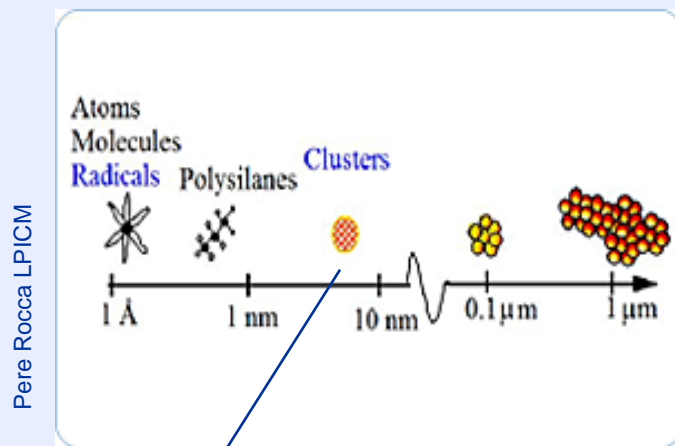
- Charge négative car $v_e \gg v_M$
- Potentiel flottant tel que $I^- = I^+$
- 10^3 charges (-) sur particule $\sim 1 \mu\text{m}$



Particules soumises à plusieurs forces

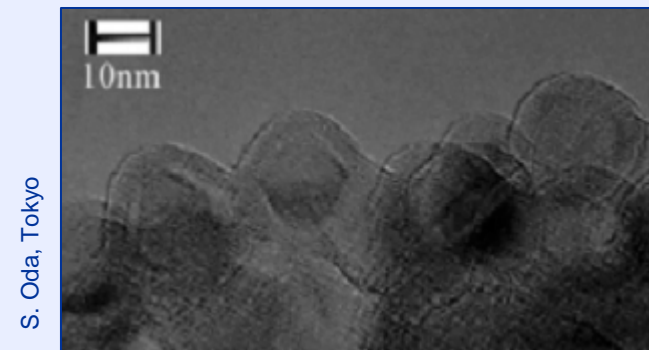
- Coulomb
 - poussée des ions
 - thermophorèse
 - gravité
- formes complexes des nuages de particules

➤ Formation de nano-cristaux dans les plasmas de SiH_4 et dépôts de couches minces



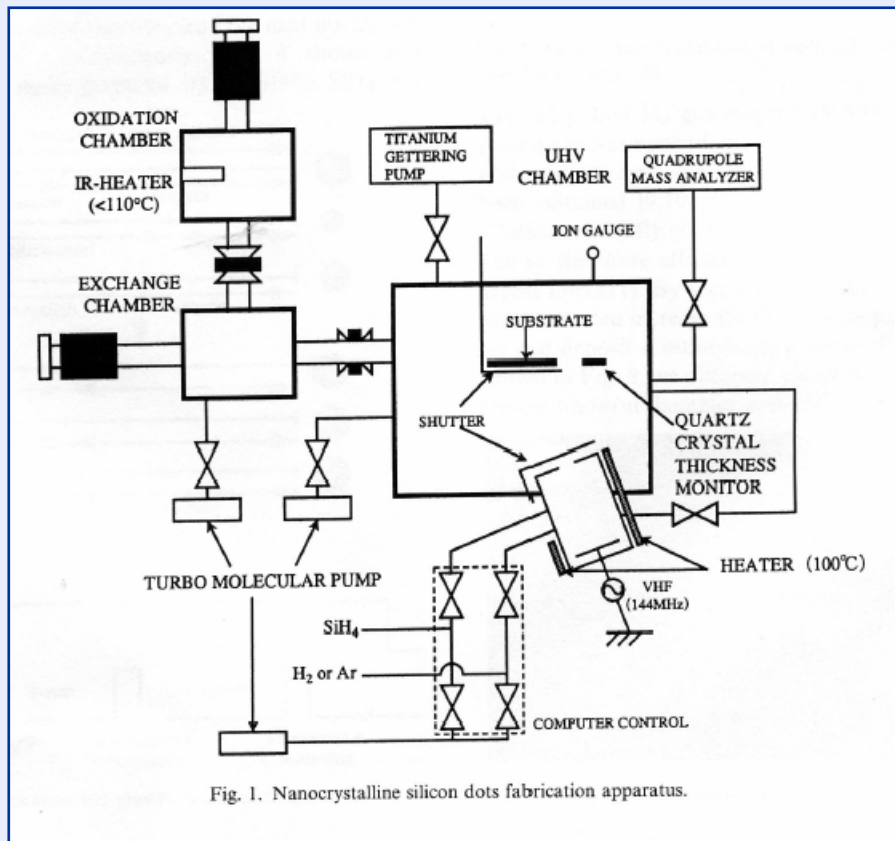
TEM image of an nc-Si dot

- Radicaux → polymérisation → agrégats → poudres
- Contrôle de la taille et de la densité des nano-cristaux
- Dépôt ou inclusion dans une couche mince
- changement des propriétés de surface
 - conductivité
 - émission électronique
- Applications
 - cellules solaires
 - microélectronique (grille transistors MOS)
 - diodes électroluminescentes
 - quantum dots, dispositifs à un électron, ...

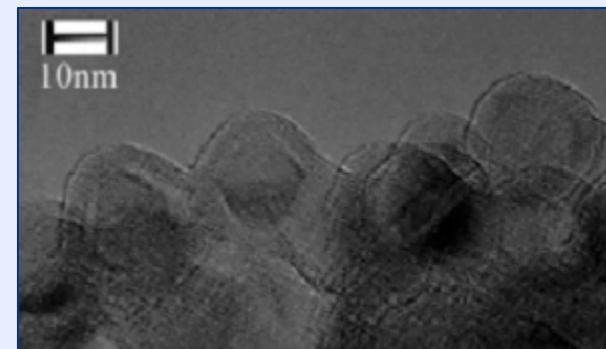


TEM image of surface oxidized nc-Si dots

➤ Formation de nano-cristaux dans les plasmas de SiH_4 et dépôts de couches minces



- séparation phases de nucléation & croissance
- réacteur RF 144 MHz dans le silane (SiH_4)
 - injection pulsée de $\text{H}_2 \rightarrow$ nucléation
 - stop $\text{H}_2 \rightarrow$ croissance par dépôt radical
 - obtention nanocristaux $8 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$
- passage des nanocristaux dans chambre de dépôt sur substrat de Si en présence d'argon
- passage du substrat dans chambre d'oxydation \rightarrow couche 1 nm SiO_2



- en France: LPICM, GREMI

TEM image of surface oxidized nc-Si dots

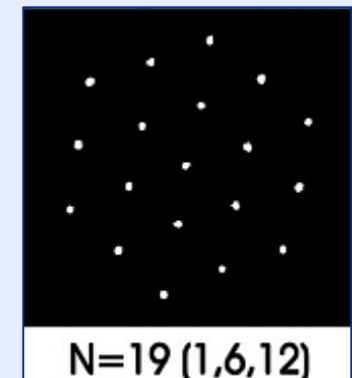
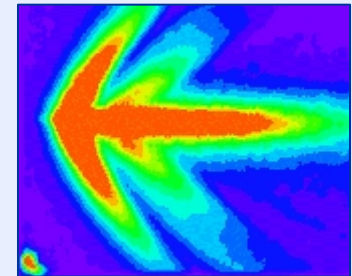
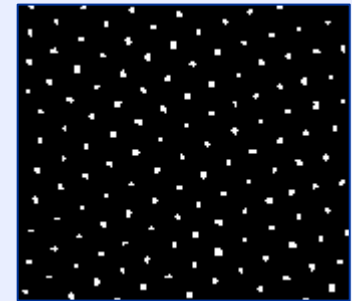
➤ Cristal plasma : un système physique très riche

- Particules de qqes μm portant 10^4 charges peuvent être piégées dans un plasma froid de décharge RF
- Possibilité de former un cristal de Coulomb si densité de particules élevée et nombre de charges/particule élevé
- Paramètre de couplage

$$\Gamma = \frac{\text{énergie potentielle interparticule}}{\text{énergie d'agitation thermique}} = \frac{Q_D^2}{4\pi\epsilon_0 d} \frac{1}{kT_D}$$

$\Gamma < 1$: gaz, $\Gamma \sim 1$ liquide; $\Gamma \gg 1$ solide

- ✓ Etude de transitions de phase
- ✓ Charge élevée, faible Q/M oscillations et ondes basse fréquence
- ✓ Charge dépend des conditions du plasma → nouvelle variable dynamique → nouveaux types d'ondes et d'instabilités
- ✓ Contrôle individuel du nombre de particules → petits clusters de particules → dynamique dépend de la taille

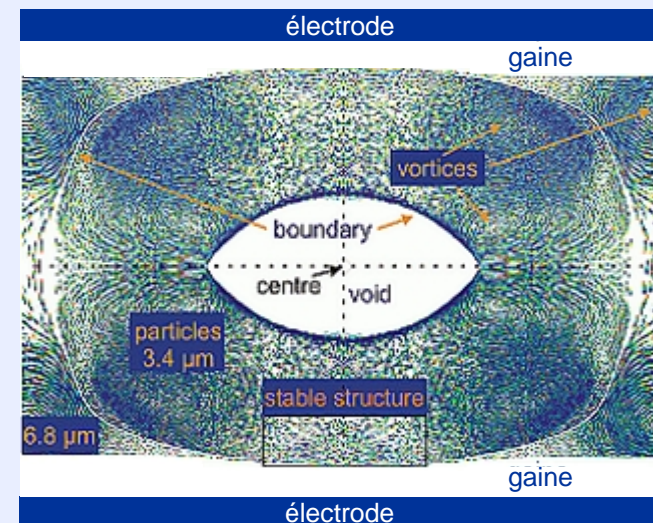
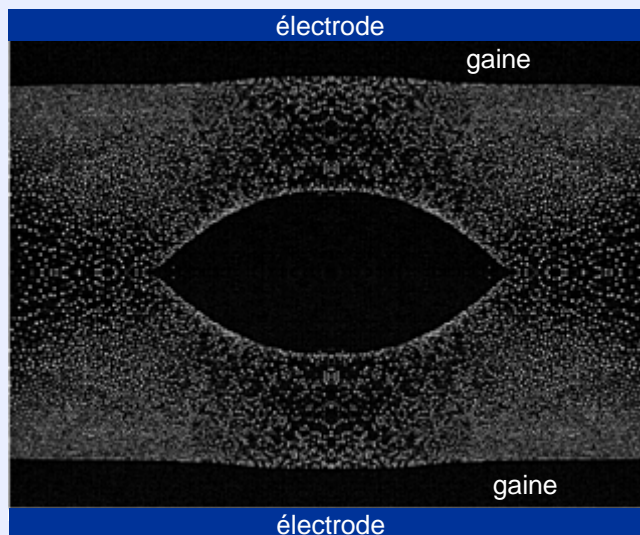


➤ Intérêts d'étudier les transitions de phase dans les « dusty plasmas »

- Observation individuelle des particules beaucoup plus facile que dans un cristal usuel. Observation de systèmes multi-particules au niveau cinétique
- Echelle de temps dilatée en raison de la masse élevée des particules. Observation à haute résolution temporelle
- Particules peuvent être contrôlées et manipulées individuellement: expériences « actives »

➤ Expériences dans la station spatiale internationale

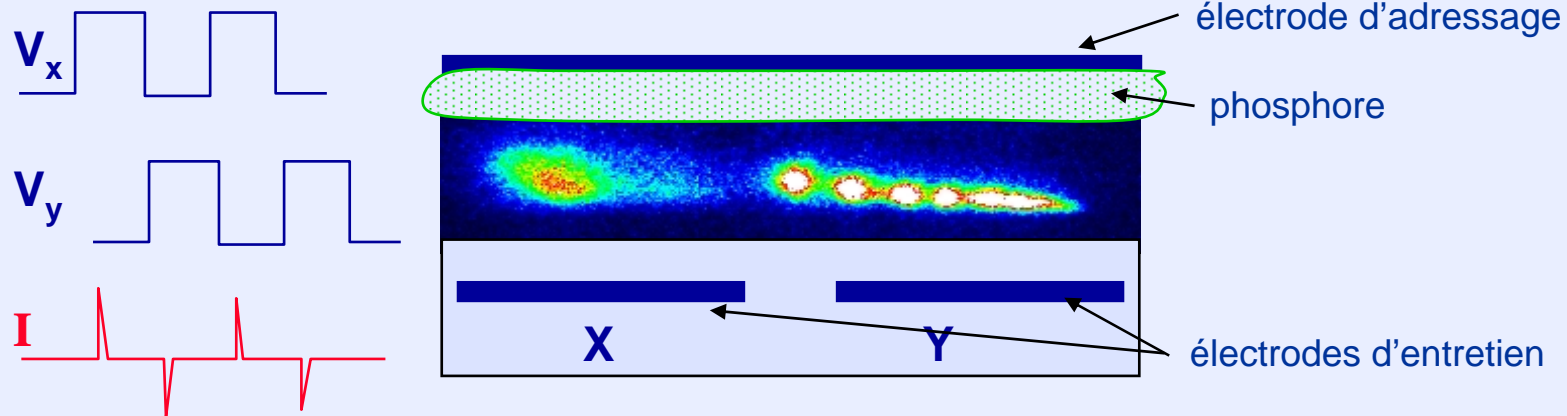
- Equipes Allemande (Max Planck), Russe, Françaises (GREMI), Américaine, Néerlandaise
- Etude d'un cristal plasma n microgravité, transitions de phase, Forces agissant sur les particules
Dynamique du nuage de particules



1. Propulsion plasma pour satellites
2. Micro-nano particules et plasmas
- **3. Ecrans à plasma**
4. Applications aérodynamiques

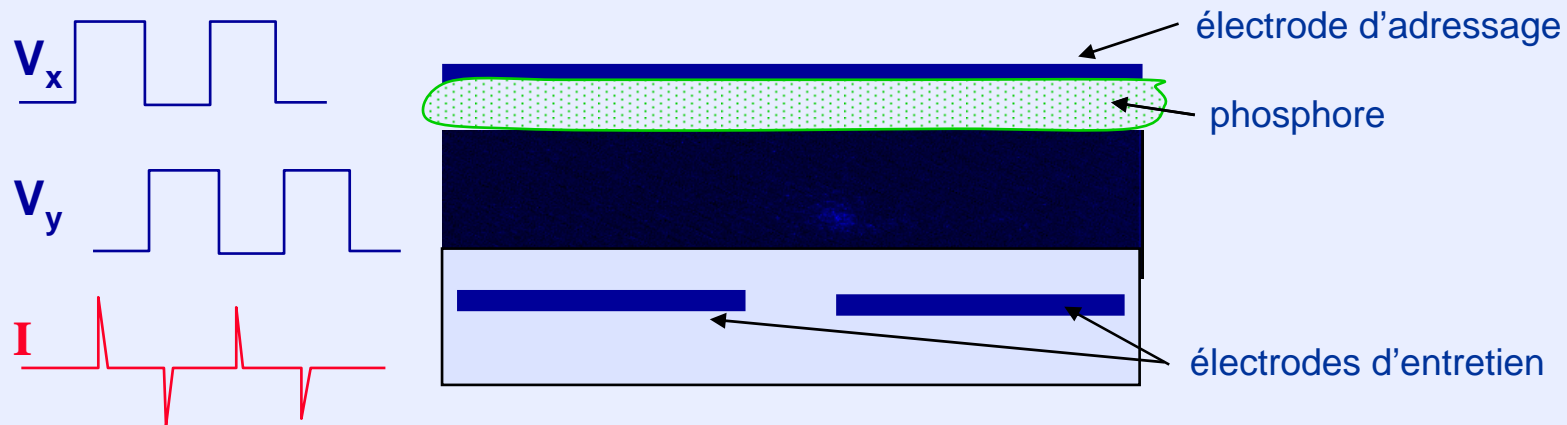
➤ Ecran à plasma = réseau matriciel de micro-plasmas émettant dans l'UV

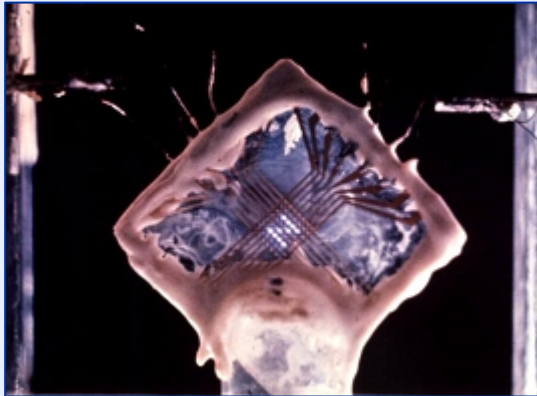
- Micro-plasma dans un mélange de gaz rares à pression ~ 70 kPa
- Emission UV convertie en Rouge Vert Bleu par des phosphores
- Barrières diélectrique pour limiter le courant et permettre l'adressage
- Tension AC rectangulaire (~ 100 kHz), impulsions de courant (~ 100 ns)
- Intensité des pixels ajustée par le nombre d'impulsions par image



➤ Ecran à plasma = réseau matriciel de micro-plasmas émettant dans l'UV

- Micro-plasma dans un mélange de gaz rares à pression ~ 70 kPa
- Emission UV convertie en Rouge Vert Bleu par des phosphores
- Barrières diélectrique pour limiter le courant et permettre l'adressage
- Tension AC rectangulaire (~ 100 kHz), impulsions de courant (~ 100 ns)
- Intensité des pixels ajustée par le nombre d'impulsions par image





1964

1971

1972

1973

1979 - 1986

1990

1994

1995

1999

Invention, University of Illinois

Premier produit, Owen-Illinois

Niveaux de gris, Mitsubishi, Hitachi

Durée de vie, IBM, Owen-Illinois, Fujitsu

Design électrodes, Fujitsu, ATT Bell Labs

Adressage ADS, Fujitsu

Contraste, Plasmaco

Premier écran 42 pouces couleur 850x420, Fujitsu

Premier écran haute définition 60 pouces 1366x768, Plasmaco



1964

Invention, University of Illinois

→ 1971

Premier produit, Owen-Illinois

1972

Niveaux de gris, Mitsubishi, Hitachi

1973

Durée de vie, IBM, Owen-Illinois, Fujitsu

1979 - 1986

Design électrodes, Fujitsu, ATT Bell Labs

1990

Adressage ADS, Fujitsu

1994

Contraste, Plasmaco

1995

Premier écran 42 pouces couleur 850x420, Fujitsu

1999

Premier écran haute définition 60 pouces 1366x768, Plasmaco

Ajustement de l'intensité des pixels par modulation du nombre d'impulsions par image



1964

Invention, University of Illinois

1971

Premier produit, Owen-Illinois

→ **1972**

Niveaux de gris, Mitsubishi, Hitachi

1973

Durée de vie, IBM, Owen-Illinois, Fujitsu

1979 - 1986

Design électrodes, Fujitsu, ATT Bell Labs

1990

Adressage ADS, Fujitsu

1994

Contraste, Plasmaco

1995

Premier écran 42 pouces couleur 850x420, Fujitsu

1999

Premier écran haute définition 60 pouces 1366x768, Plasmaco

Utilisation d'une couche de MgO (protection du bombardement ionique, et émission secondaire)



1964

Invention, University of Illinois

1971

Premier produit, Owen-Illinois

1972

Niveaux de gris, Mitsubishi, Hitachi

→ **1973**

Durée de vie, IBM, Owen-Illinois, Fujitsu

1979 - 1986

Design électrodes, Fujitsu, ATT Bell Labs

1990

Adressage ADS, Fujitsu

1994

Contraste, Plasmaco

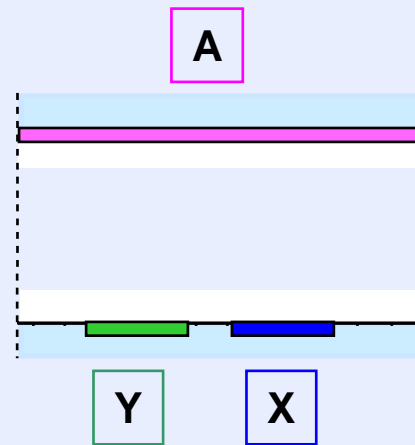
1995

Premier écran 42 pouces couleur 850x420, Fujitsu

1999

Premier écran haute définition 60 pouces 1366x768, Plasmaco

Design actuel d'une cellule: électrodes d'entretien coplanaires + électrode d'adressage



1964	Invention, University of Illinois
1971	Premier produit, Owen-Illinois
1972	Niveaux de gris, Mitsubishi, Hitachi
1973	Durée de vie, IBM, Owen-Illinois, Fujitsu
→ 1979 - 1986	Design électrodes, Fujitsu, ATT Bell Labs
1990	Adressage ADS, Fujitsu
1994	Contraste, Plasmaco
1995	Premier écran 42 pouces couleur 850x420, Fujitsu
1999	Premier écran haute définition 60 pouces 1366x768, Plasmaco

Méthode d'adressage actuelle: 1) Reset , 2) Adressage de tout l'écran 3) Display



1964	Invention, University of Illinois
1971	Premier produit, Owen-Illinois
1972	Niveaux de gris, Mitsubishi, Hitachi
1973	Durée de vie, IBM, Owen-Illinois, Fujitsu
1979 - 1986	Design électrodes, Fujitsu, ATT Bell Labs
→ 1990	Adressage ADS, Fujitsu
1994	Contraste, Plasmaco
1995	Premier écran 42 pouces couleur 850x420, Fujitsu
1999	Premier écran haute définition 60 pouces 1366x768, Plasmaco

Amélioration sensible du contraste



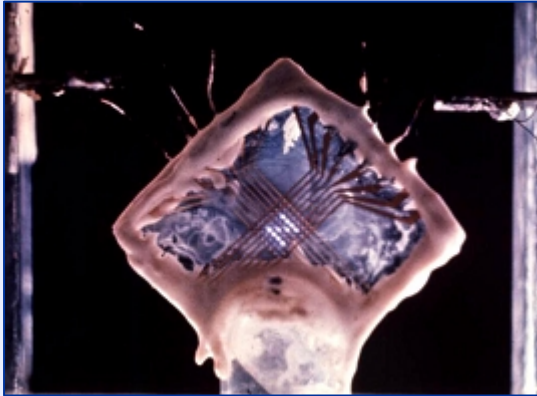
1964	Invention, University of Illinois
1971	Premier produit, Owen-Illinois
1972	Niveaux de gris, Mitsubishi, Hitachi
1973	Durée de vie, IBM, Owen-Illinois, Fujitsu
1979 - 1986	Design électrodes, Fujitsu, ATT Bell Labs
1990	Adressage ADS, Fujitsu
→ 1994	Contraste, Plasmaco
1995	Premier écran 42 pouces couleur 850x420, Fujitsu
1999	Premier écran haute définition 60 pouces 1366x768, Plasmaco



- 1964 Invention, University of Illinois
- 1971 Premier produit, Owen-Illinois
- 1972 Niveaux de gris, Mitsubishi, Hitachi
- 1973 Durée de vie, IBM, Owen-Illinois, Fujitsu
- 1979 - 1986 Design électrodes, Fujitsu, ATT Bell Labs
- 1990 Adressage ADS, Fujitsu
- 1994 Contraste, Plasmaco
- **1995 Premier écran 42 pouces couleur 850x420, Fujitsu**
- 1999 Premier écran haute définition 60 pouces 1366x768, Plasmaco



1964	Invention, University of Illinois
1971	Premier produit, Owen-Illinois
1972	Niveaux de gris, Mitsubishi, Hitachi
1973	Durée de vie, IBM, Owen-Illinois, Fujitsu
1979 - 1986	Design électrodes, Fujitsu, ATT Bell Labs
1990	Adressage ADS, Fujitsu
1994	Contraste, Plasmaco
1995	Premier écran 42 pouces couleur 850x420, Fujitsu
→ 1999	Premier écran haute définition 60 pouces 1366x768, Plasmaco



→ **1964**

1971

1972

1973

1979 - 1986

1990

1994

1995

→ **1999**

Invention, University of Illinois

Premier produit, Owen-Illinois

Niveaux de gris, Mitsubishi, Hitachi

Durée de vie, IBM, Owen-Illinois, Fujitsu

Design électrodes, Fujitsu, ATT Bell Labs

Adressage ADS, Fujitsu

Contraste, Plasmaco

Premier écran 42 pouces couleur 850x420, Fujitsu

Premier écran haute définition 60 pouces 1366x768, Plasmaco

1. Propulsion plasma pour satellites
2. Micro-nano particules et plasmas
3. Ecrans à plasma

→ **4. Applications aérodynamiques**

➤ Contrôle d'écoulements

- Supersonique et hypersonique: interaction plasma/onde de choc, réduction de traînée, modification de l'onde de choc
- Subsonique: actuators plasma → modification de couche limite, contrôle de transition laminaire/turbulent

➤ Combustion

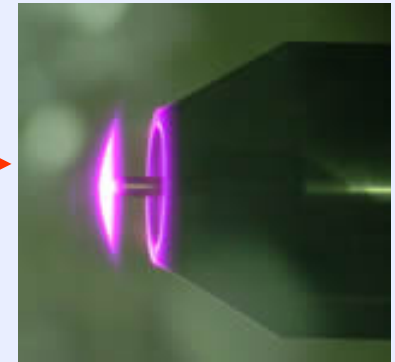
- Initiation et stabilisation de la combustion
- applications super et hypersoniques: statoréacteurs à combustion supersonique

➤ Furtivité et applications radar

- Plasmas non thermiques densité $> 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ à pression atmosphérique
- Masquage points « brillants », diminution SER
- Mirroirs plasma, antennes plasma

➤ Contrôle d'écoulements

- Supersonique et hypersonique: interaction plasma/onde de choc, réduction de traînée, modification de l'onde de choc
- Subsonique: actuateurs plasma → modification de couche limite, contrôle de transition laminaire/turbulent



ONERA

➤ Combustion

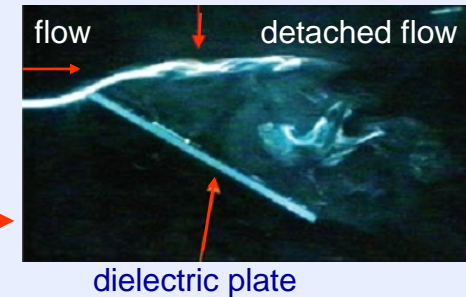
- Initiation et stabilisation de la combustion
- applications super et hypersoniques: statoréacteurs à combustion supersonique

➤ Furtivité et applications radar

- Plasmas non thermiques densité $> 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ à pression atmosphérique
- Masquage points « brillants », diminution SER
- Mirroirs plasma, antennes plasma

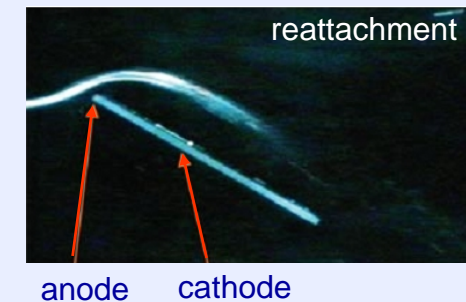
➤ Contrôle d'écoulements

- Supersonique et hypersonique: interaction plasma/onde de choc, réduction de traînée, modification de l'onde de choc
- Subsonique: actuateurs plasma → modification de couche limite, contrôle de transition laminaire/turbulent



➤ Combustion

- Initiation et stabilisation de la combustion
- applications super et hypersoniques: statoréacteurs à combustion supersonique



➤ Furtivité et applications radar

- Plasmas non thermiques densité $> 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ à pression atmosphérique
- Masquage points « brillants », diminution SER
- Mirroirs plasma, antennes plasma

LEA

➤ Contrôle d'écoulements

- Supersonique et hypersonique: interaction plasma/onde de choc, réduction de traînée, modification de l'onde de choc
- Subsonique: actuators plasma → modification de couche limite, contrôle de transition laminaire/turbulent

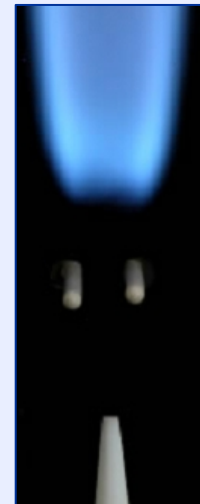
➤ Combustion

- Initiation et stabilisation de la combustion
- applications super et hypersoniques: statoréacteurs à combustion supersonique

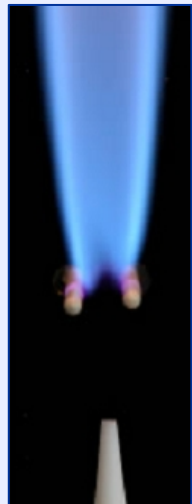
➤ Furtivité et applications radar

- Plasmas non thermiques densité $> 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ à pression atmosphérique
- Masquage points « brillants », diminution SER
- Mirrors plasma, antennes plasma

plasma OFF



plasma ON



ONERA

➤ Plasma froids : Quoi de neuf ?

- Progrès remarquables des applications
- Rendus possibles par des études de base s'appuyant sur des diagnostics sophistiqués

➤ Plasmas froids hors – équilibre : Science et Ingénierie

- Domaine très multidisciplinaire avec des applications très diversifiées à la fois avantage et inconvénient
- Relève de l'ingénierie mais contient une physique riche et complexe
 - complexité des systèmes hors-équilibre
 - instabilités dues au couplage d'énergie, au transport de particules, à la cinétique chimique
 - phénomènes d'auto-organisation, transition de phase
 - fluctuations, turbulence
- Besoin d'une meilleure visibilité de la discipline et d'une plus grande unité des formations
- Besoin d'une communauté plus unie plasmas chauds – plasmas froids