

Réseau des Plasmas froids du CNRS

Atelier « Fonctionnalisation de Surfaces par Plasma:
Techniques et Applications »
12 au 14 juin 2013 – GREMI, Orléans

Jean-Pierre Boeuf

LAPLACE - GREPHE

CNRS – Université Paul Sabatier – INP Toulouse

1. Plasmas DC et RF - Introduction

- Décharges DC – propriétés, entretien du plasma, rôle des gaines
- Décharges RF capacitives, inductives, microondes – généralités

2. Plasma RF capacitifs

- Dynamique des gaines, chauffage ohmique et non-collisionnel
- Différents régimes: basses → hautes pressions, faibles → fortes puissances
- Fonction de distribution électronique
- Transport des ions dans les gaines, fonction de distribution ionique

3. Plasmas RF inductifs

- Principes

1. Plasmas DC et RF - Introduction

- Décharges DC – propriétés, entretien du plasma, rôle des gaines
- Décharges RF capacitives, inductives, microondes – généralités

2. Plasma RF capacitifs

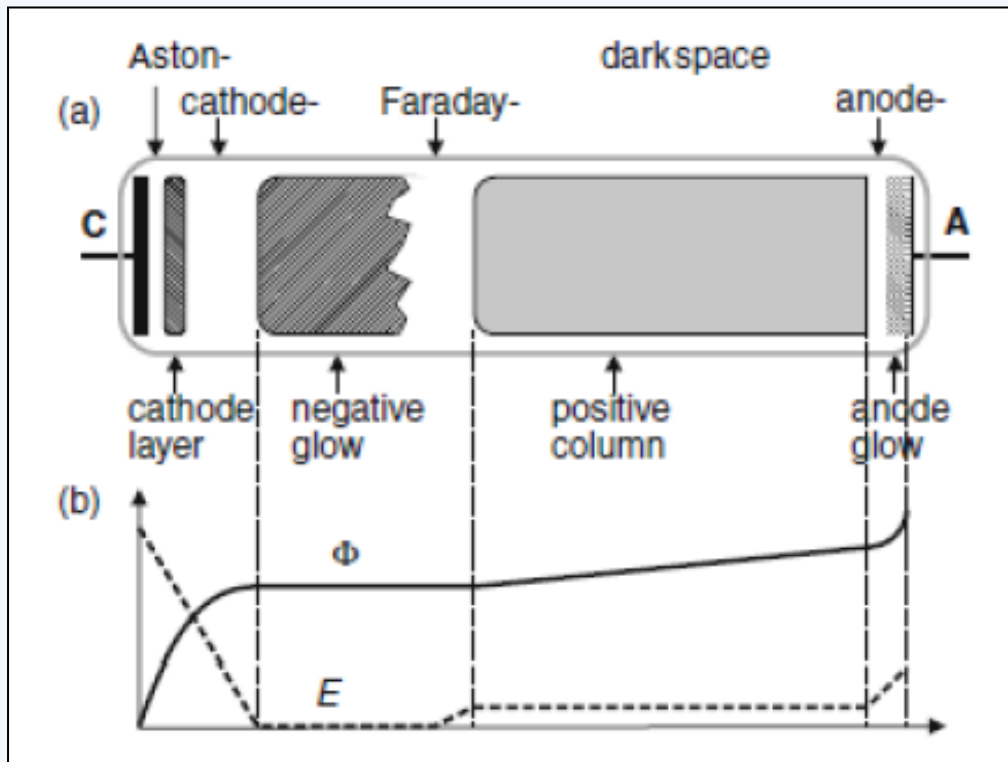
- Dynamique des gaines, chauffage ohmique et non-collisionnel
- Différents régimes: basses \rightarrow hautes pressions, faibles \rightarrow fortes puissances
- Fonction de distribution électronique
- Transport des ions dans les gaines, fonction de distribution ionique

3. Plasmas RF inductifs

- Principes

➤ Décharge lumineuse

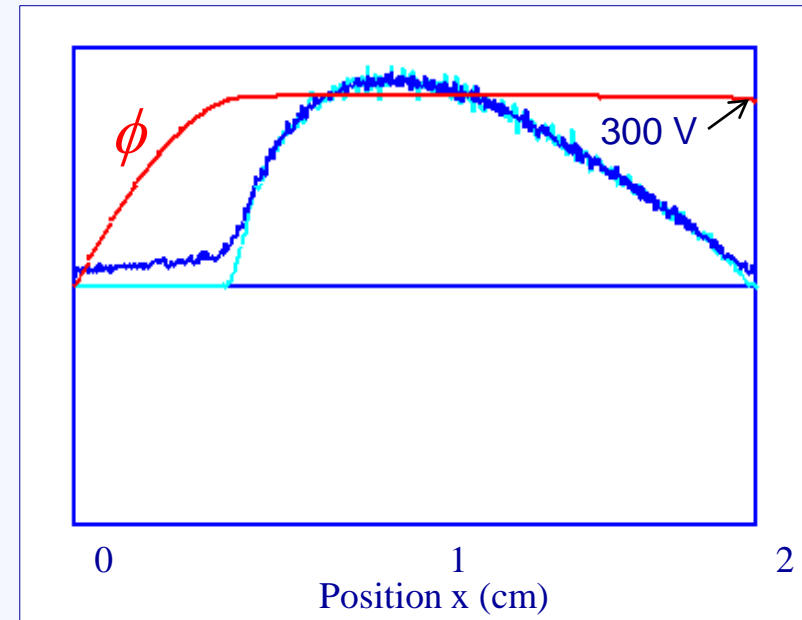
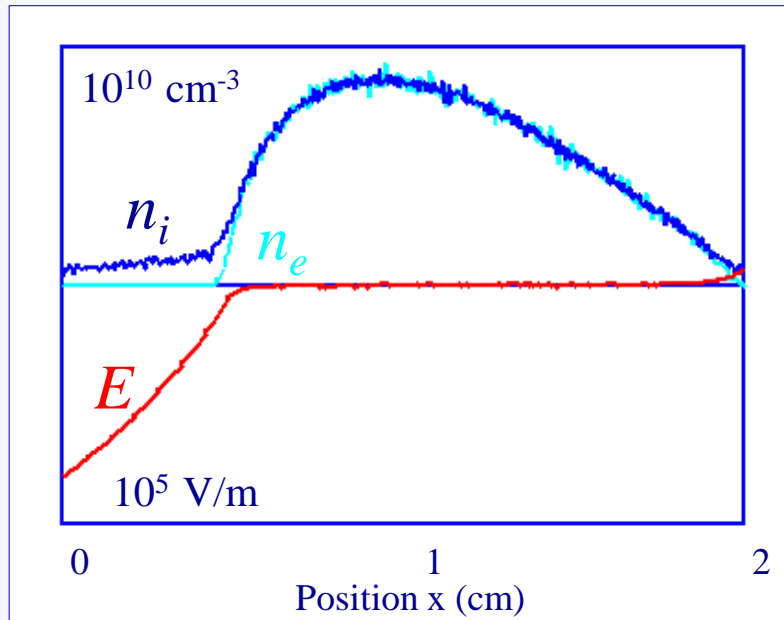
- Décharges DC – propriétés, entretien du plasma, rôle des gaines
- Décharges RF capacitives, inductives, microondes – généralités



- Emission électronique secondaire par bombardement ionique de la cathode
- Plasma de lueur négative entretenu par électrons rapides accélérés dans la gaine
- Plasma de colonne positive: champ électrique tel que ionisation=perles (parois etc...)
- Température électronique très faible dans la lueur négative, champ ~ 0 (ambipolaire)

➤ Exemple de décharge luminecente DC

- Argon, 0.2 torr, $d=2$ cm, $V_{DC}=300$ V, $\gamma=0.2$



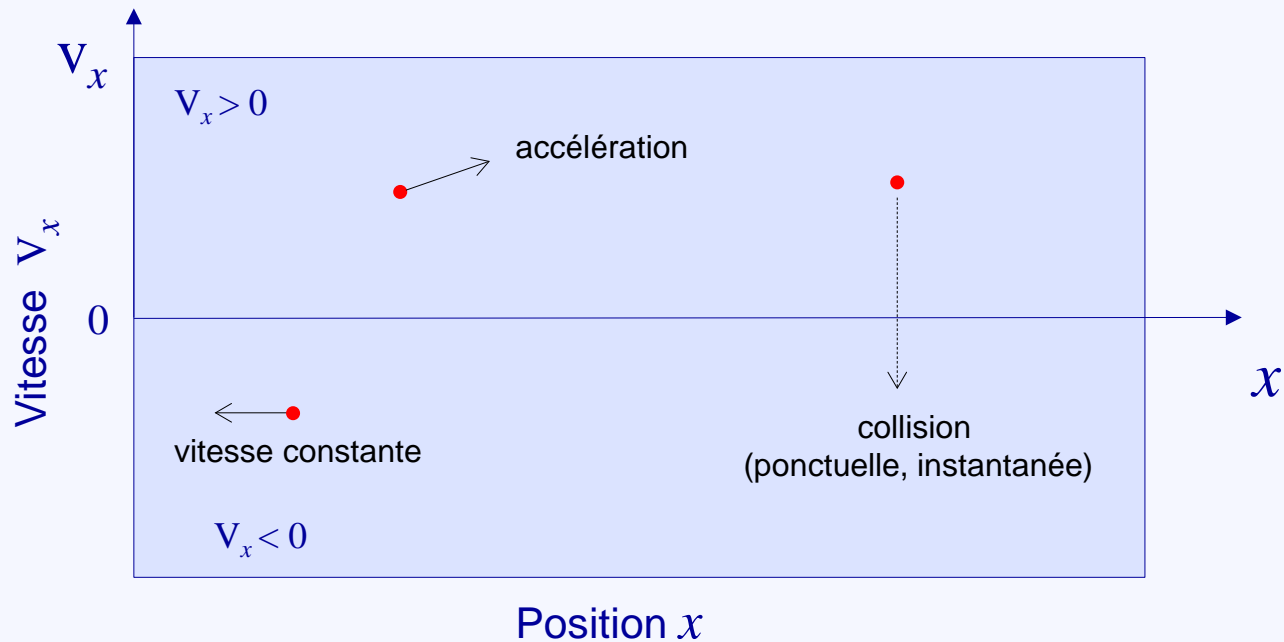
- Résultat de simulation PIC-MCC (particle-In-Cell Monte Carlo Collisions)
- Gaine + leur négative – pas de colonne positive

➤ **Modèle PIC MCC** (Particle-In-Cell Monte Carlo Collisions)

- Description cinétique du transport des particules chargées (on suit les trajectoires d'un grand nombre d'électrons et d'ions sous l'effet du champ électrique et des collisions – le champ E est recalculé à intervalle de temps régulier en résolvant l'équation de Poisson)
- Equivalente à la résolution des équations de Boltzmann des électrons et des ions, couplées à l'équation de Poisson
- Méthode puissante permettant d'avoir accès aux fonctions de distributions des particules chargées (qui sont très souvent non-Maxwelliennes dans les plasmas de décharges), par opposition aux méthodes fluides qui ne décrivent que les grandeurs moyennes (densités, vitesses moyennes, énergie moyenne) et nécessitent de fortes approximations

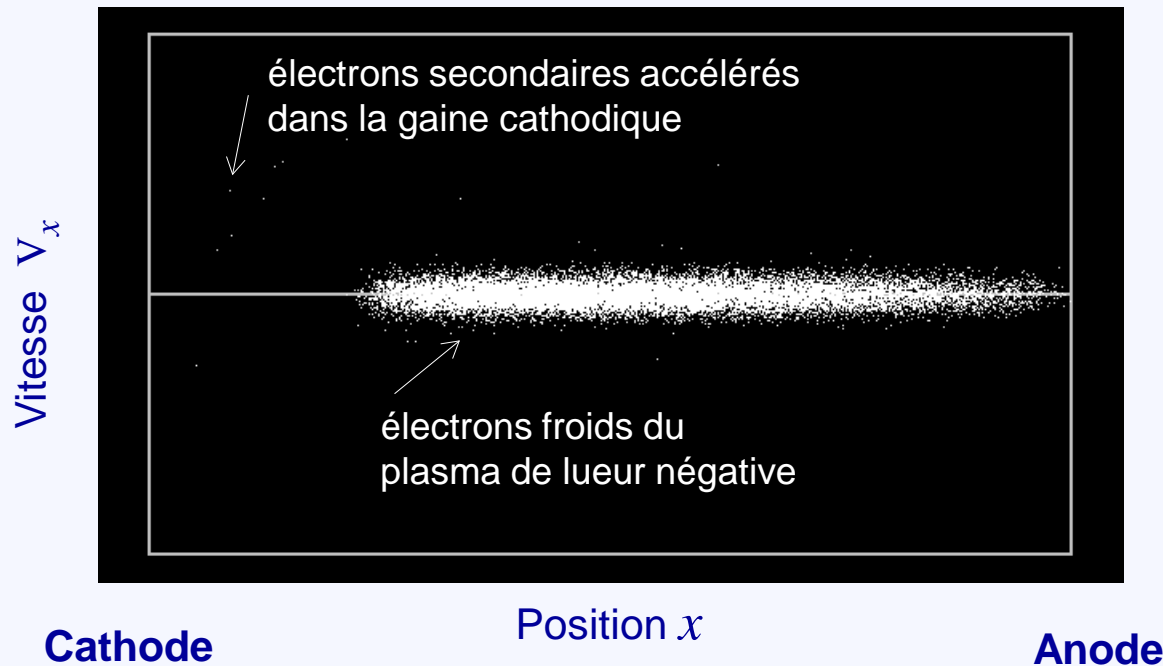
➤ **Modèle PIC MCC** (Particle-In-Cell Monte Carlo Collisions)

- On a accès à chaque instant aux positions des particules chargées dans l'espace des phases position-vitesse
- On peut visualiser un plan de l'espace des phases, par exemple (x, v_x)



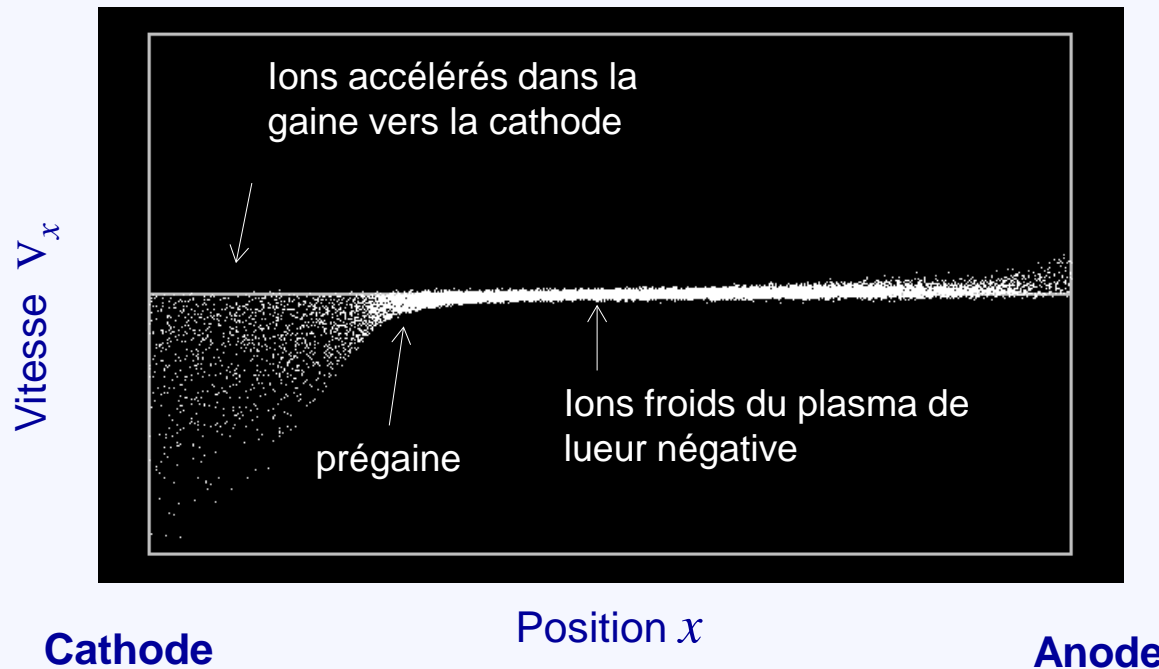
➤ **Modèle PIC MCC** (Particle-In-Cell Monte Carlo Collisions)

- Espace des phases, plan (x, v_x)
- Electrons (décharge DC, Argon, 0.2 torr, $d=2$ cm, $V_{DC}=300$ V, $\gamma=0.2$)



➤ **Modèle PIC MCC** (Particle-In-Cell Monte Carlo Collisions)

- Espace des phases, plan (x, v_x)
- Electrons (décharge DC, Argon, 0.2 torr, $d=2$ cm, $V_{DC}=300$ V, $\gamma=0.2$)



➤ Décharge luminescente

- Décharges DC – propriétés, entretien du plasma, rôle des gaines
- Décharges RF capacitives, inductives, microondes – généralités

- Inconvénients des décharges DC pour certaines applications
 - A basse pression (eg < 0.1 torr) les décharges DC nécessitent l'utilisation de tensions élevées (pas assez d'ionisation si faible pd – cf courbes de Paschen)
 - Les ions bombardant la cathode sont très énergétiques – Utile pour les applications de type pulvérisation-dépôt – Plus efficace si un champ magnétique est appliqué perpendiculairement à la cathode pour augmenter le temps de séjour des électrons et l'ionisation (magnétron). Les ions sont peu sensibles au champ magnétique
 - Fortes tensions et fortes énergies des ions peu adaptées au traitement de surface (microélectronique ou autre)
 - Dans les applications au traitement de surface, l'électrode peut se couvrir d'une couche diélectrique
 - Décharges DC peu adaptées au traitement de surface

➤ Décharge luminescente

- Décharges DC – propriétés, entretien du plasma, rôle des gaines
- Décharges RF capacitives, inductives, microondes – généralités

- Décharges RF mieux adaptées à basse pression
 - Meilleur confinement du plasma
 - ➔ Possibilité de fonctionnement à plus basse pression et à plus basse tension
 - Possibilité de fonctionner avec une couche diélectrique recouvrant les électrodes
 - Deux manières de coupler la puissance RF: couplage capacitif et couplage inductif
 - Trois domaines de fréquences
 - **Basses fréquences:** les électrons et les ions sont sensibles aux variations instantanées du champ: $\omega < 1/\tau_i \sim \omega_{pi} < \omega_{pe}$. Par exemple: DBD
 - **Domaine RF:** les électrons sont sensibles au champ instantané, les ions ne voient que le champ moyen: $1/\tau_i \sim \omega_{pi} < \omega < \omega_{pe}$
 - **Domaine microonde:** les électrons et les ions ne sont sensibles qu'au champ moyen: $1/\tau_i \sim \omega_{pi} < \omega_{pe} < \omega$

1. Plasmas DC et RF - Introduction

- Décharges DC – propriétés, entretien du plasma, rôle des gaines
- Décharges RF capacitives, inductives, microondes – généralités

2. Plasma RF capacitifs

- Dynamique des gaines, chauffage ohmique et non-collisionnel
- Différents régimes: basses → hautes pressions, faibles → fortes puissances
- Fonction de distribution électronique
- Transport des ions dans les gaines, fonction de distribution ionique

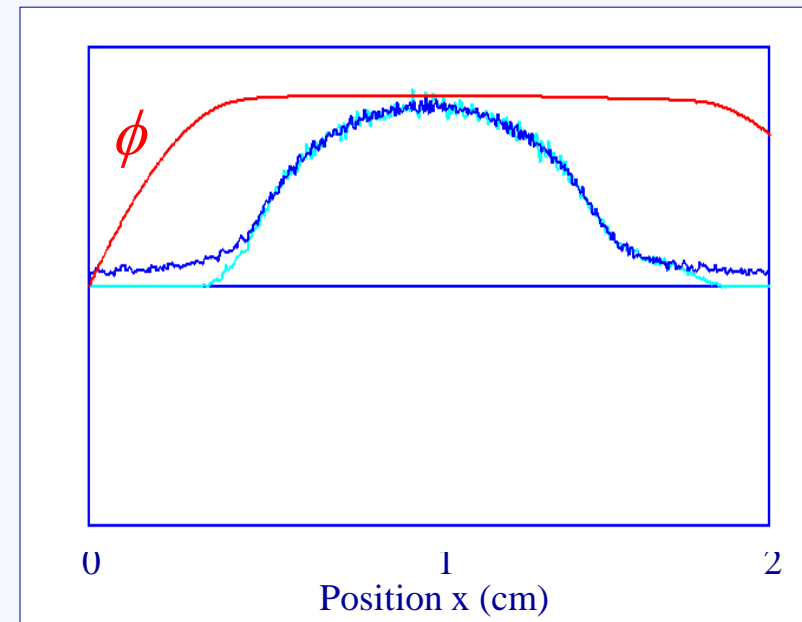
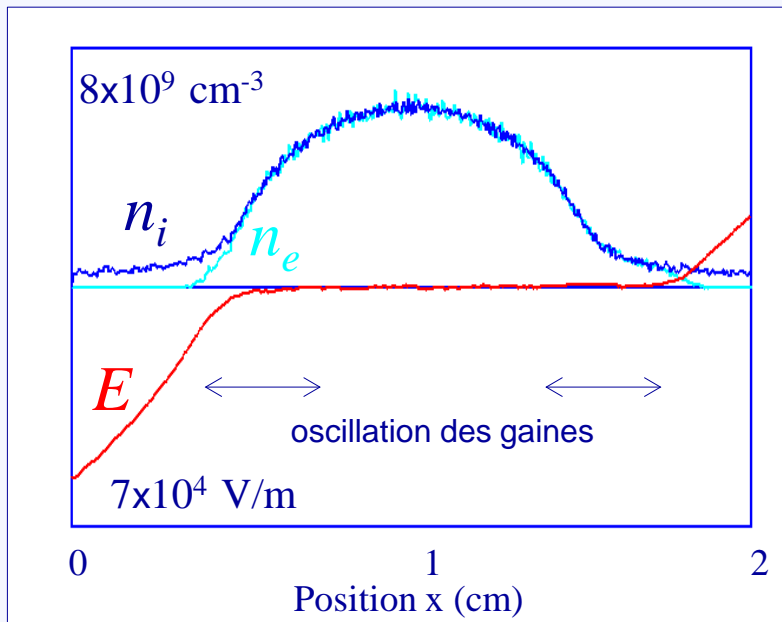
3. Plasmas RF inductifs

- Principes

➤ Dynamique des gaines

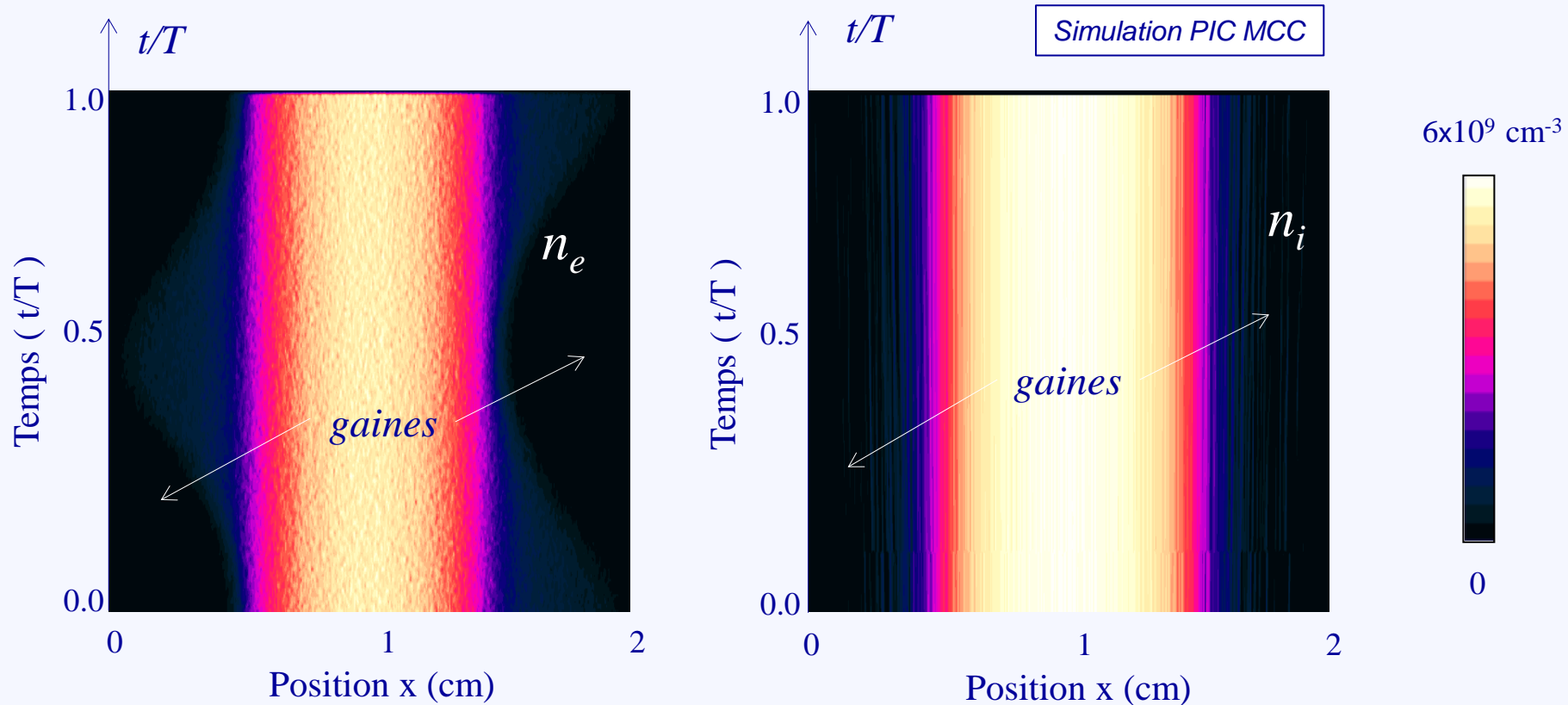
- Aux fréquences RF usuelles (~ 10 MHz), $\omega_{pi} < \omega < \omega_{pe}$
- Les électrons répondent aux variations instantanées du champ, les ions non
- Oscillations des gaines couplées au mouvement électronique, ions sensibles au champ électrique ou au potentiel moyen
- Exemple: Argon, 0.1 torr, $d=2$ cm, $F=13.56$ MHz, $V_{RF}=200$ V

Simulation PIC MCC



➤ Décharge RF capacitive

- La densité électronique est modulée dans la gaine et constante dans le plasma
- La densité ionique n'est pas modulée dans le temps



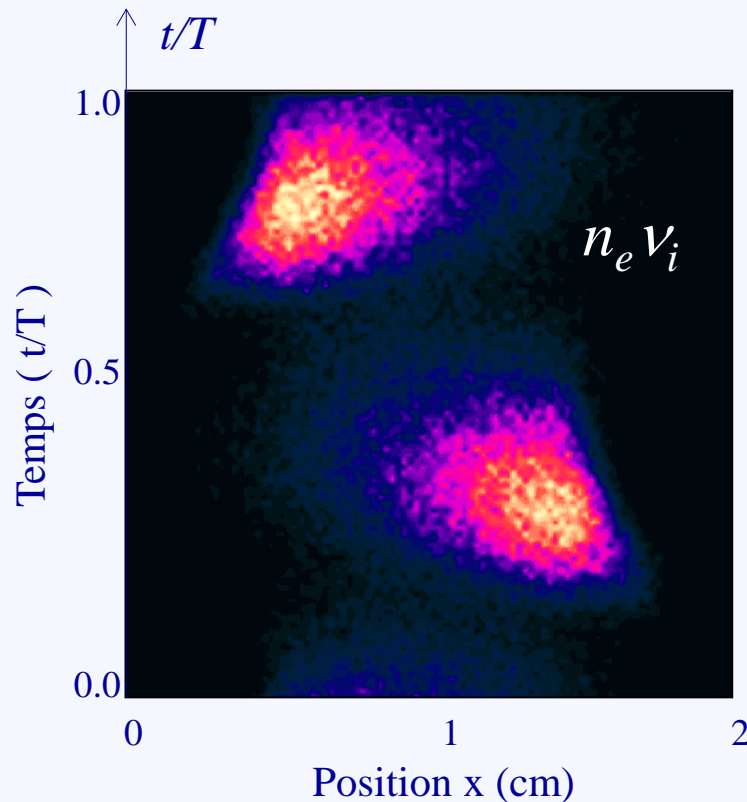
Densité électronique

- Argon, 0.1 torr, 2 cm
- 200 V, 13.56 MHz

Densité ionique

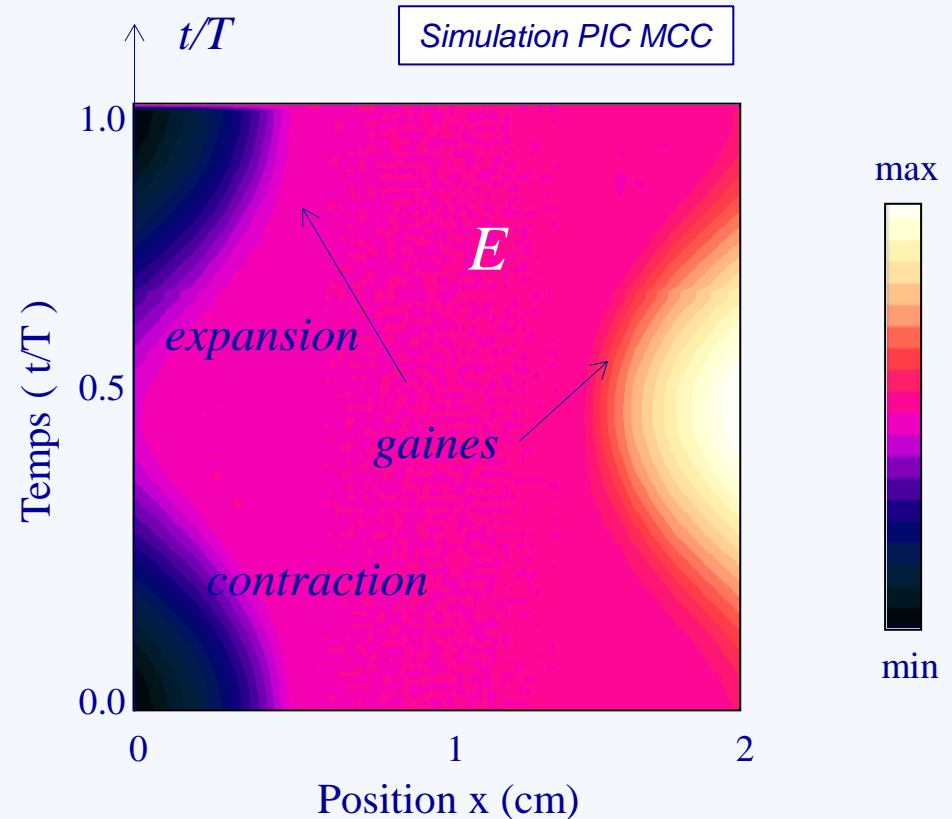
➤ Décharge RF capacitive

- Les électrons gagnent de l'énergie dans les gaines
- Chauffage ohmique (collisionnel) ou non collisionnel pendant l'expansion des gaines



Taux d'ionisation

- Argon, 0.1 torr, 2 cm
- 200 V, 13.56 MHz



Champ électrique

➤ Décharge RF capacitive – Absorption de puissance

- Dans un champ électronique uniforme oscillant, la densité puissance absorbée par les électrons moyennée sur une période s'écrit:

$$P_a = \langle \mathbf{J}_e \cdot \mathbf{E} \rangle$$

où $\mathbf{J}_e = -en_e \mathbf{u}_e$ est la densité de courant électronique

- La vitesse moyenne électronique, solution de $\frac{\partial \mathbf{u}_e}{\partial t} = -\frac{e}{m_e} \mathbf{E} - \nu_m \mathbf{u}_e$ est déphasée par rapport au champ électrique $\mathbf{E} = E_0 \cos(\omega t)$
- Le déphasage tend vers $\pi/2$ quand la fréquence de collisions ν est faible devant la pulsation du champ ω (régime non-collisionnel) et tend vers zéro quand ν devient grand devant ω (régime collisionnel)
- On peut montrer facilement que:

$$P_a = n_e \frac{e^2 E_0^2}{2m_e} \frac{\nu_m}{\nu_m^2 + \omega^2}$$

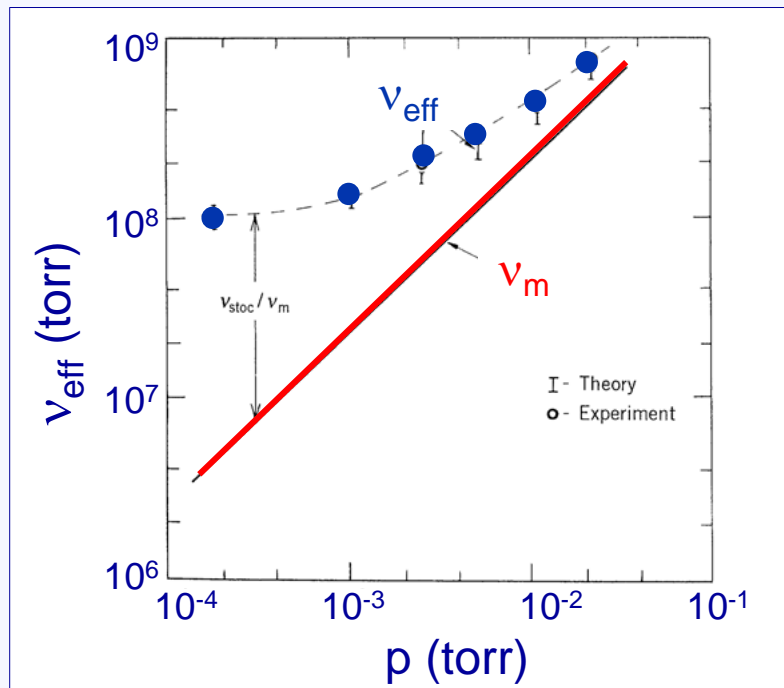
chauffage ohmique

les collisions transforment l'énergie dirigée gagnée sur le champ électrique, en énergie thermique

- Il n'y a pas d'absorption moyenne de puissance si $\nu \ll \omega$, i.e. à faible pression. Par exemple, à 10 mtorr, 13.56 MHz, on a: $\nu \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ et $\omega \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$
- ➔ Régime « non-collisionnel » en dessous de 10 à 100 mtorr

➤ Décharge RF capacitive – Absorption de puissance

- Le chauffage ohmique (« collisionnel ») ne peut pas expliquer l'entretien des plasma RF capacitifs au voisinage ou en-dessous de 10 à 100 mtorr (pas assez de collisions)
- Phénomène de « chauffage non-collisionnel » ou stochastique dû à l'interaction entre les électrons et la gaine en expansion
- On définit une fréquence de collision effective (stochastique) telle que la puissance absorbée soit fournie par la même expression qu'en régime collisionnel



$$P_a = n_e \frac{e^2 E_0^2}{2m_e} \frac{\nu_{eff}}{\nu_{eff}^2 + \omega^2}$$

$$\nu_{eff} = \nu_m + \nu_{stoc}$$

F=40 MHz

Popov and Godyak, 1985

La **fonction de distribution électronique** mesurée par sondes de Langmuir est « sur-Maxwellienne » à basse pression (régime non-collisionnel) et « sous-Maxwellienne » à haute pression (régime collisionnel)

Godyak and Piejak
Phys. Rev. Lett. **65**
 996, 1990

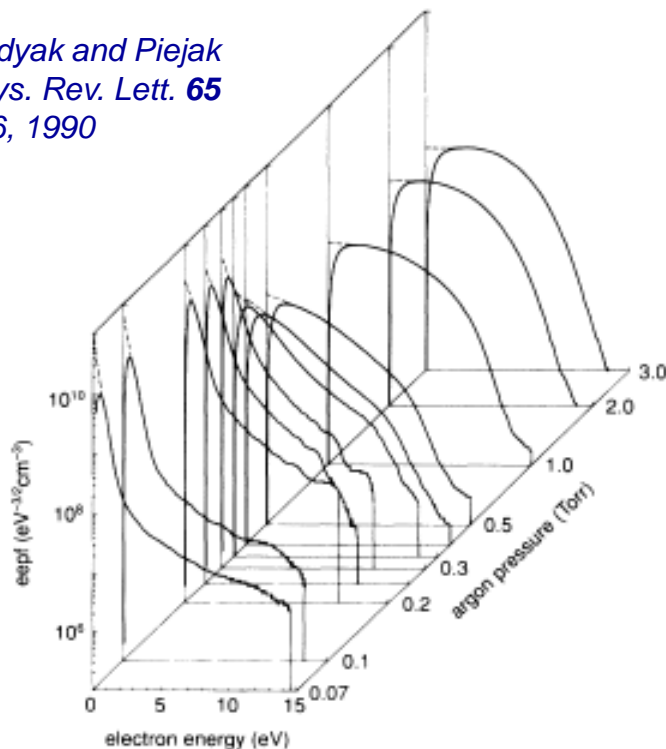


FIG. 3. The EEPF evolution with changing argon pressure, $I_d = 0.3$ A rms.

Argon, L=2 cm, F=13.56 MHz Mesures par sonde

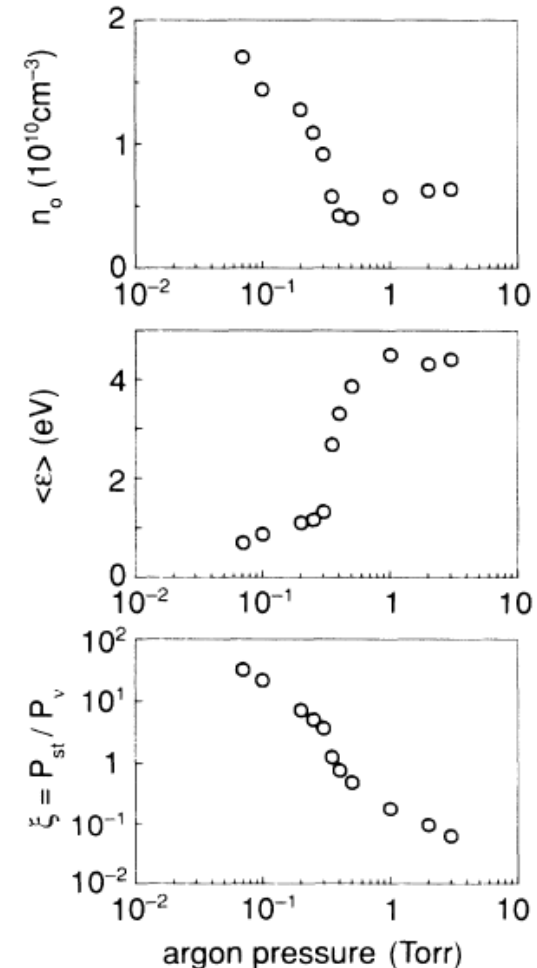
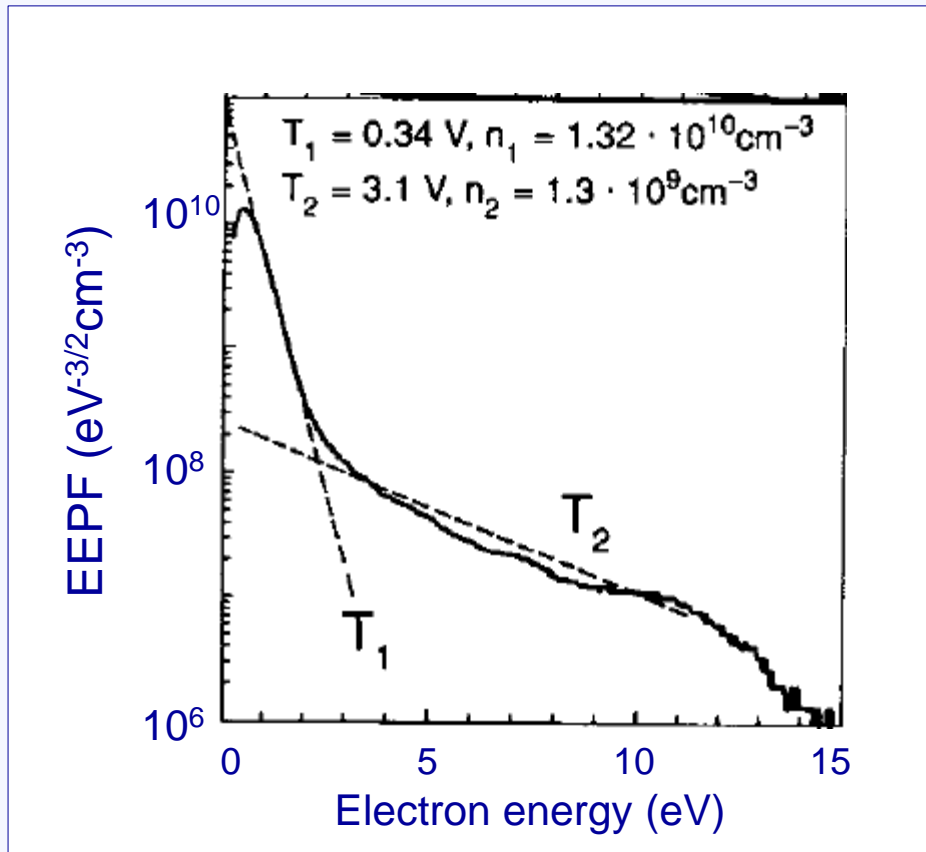


FIG. 4. Plasma density n_0 , mean electron energy $\langle \epsilon \rangle$, and ratio of stochastic to collisional power ξ vs argon pressure at fixed $I_d = 0.3$ A rms.

Fonction de distribution électronique mesurée par sondes de langmuir
Godyak and Piejak, Phys. Rev. Lett. 65 996, 1990

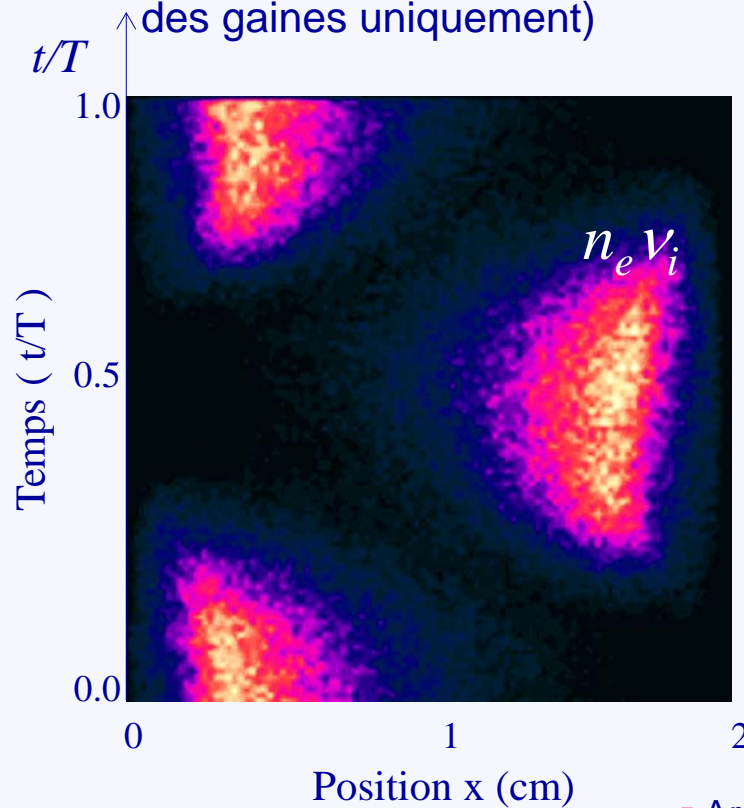
Argon, L=2 cm, F=13.56 MHz, p=0.1 torr



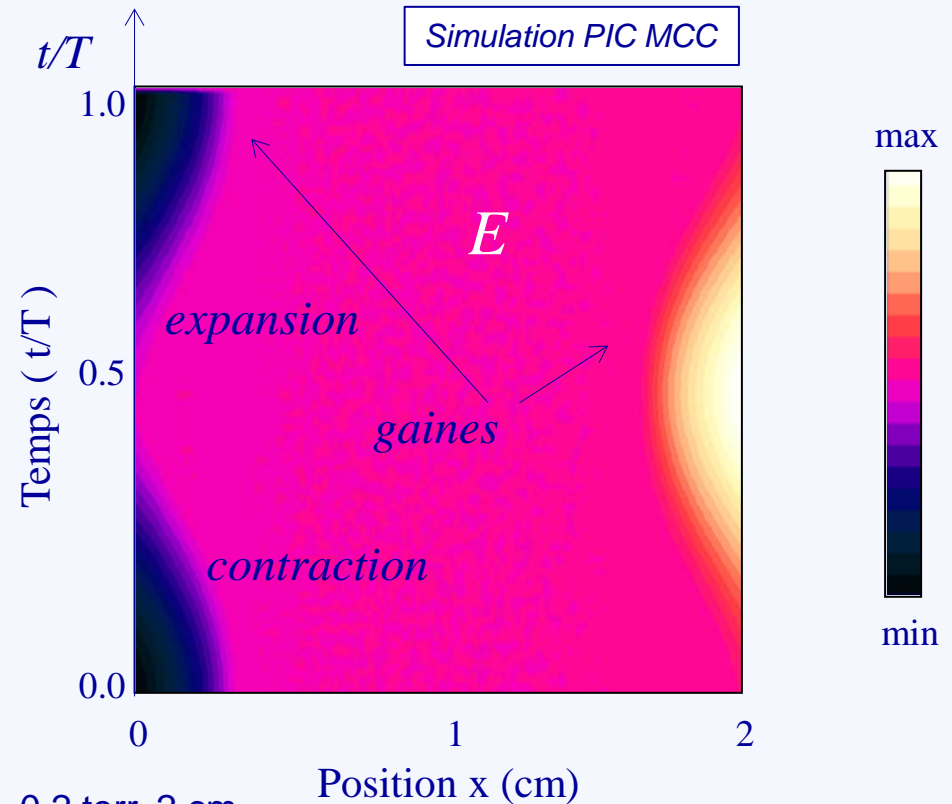
Godyak and Piejak
Phys. Rev. Lett. 65 996, 1990

➤ Décharge RF capacitive – Régime γ

- A des tensions RF suffisamment élevées les électrons secondaires commencent à jouer un rôle dans l'entretien du plasma
- C'est le régime γ , par opposition au régime α (chauffage des électrons dû à l'oscillation des gaines uniquement)



Taux d'ionisation

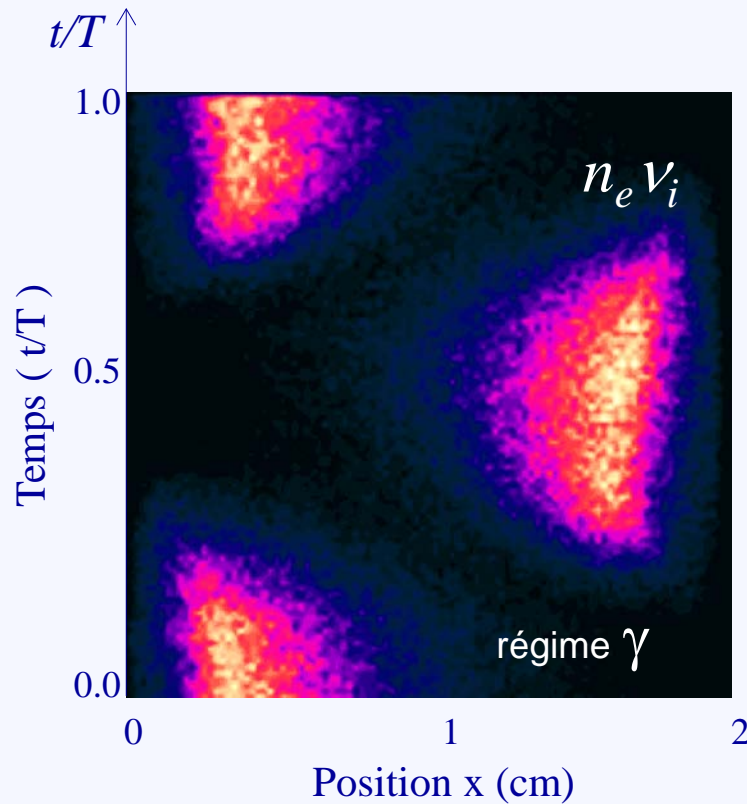


Champ électrique

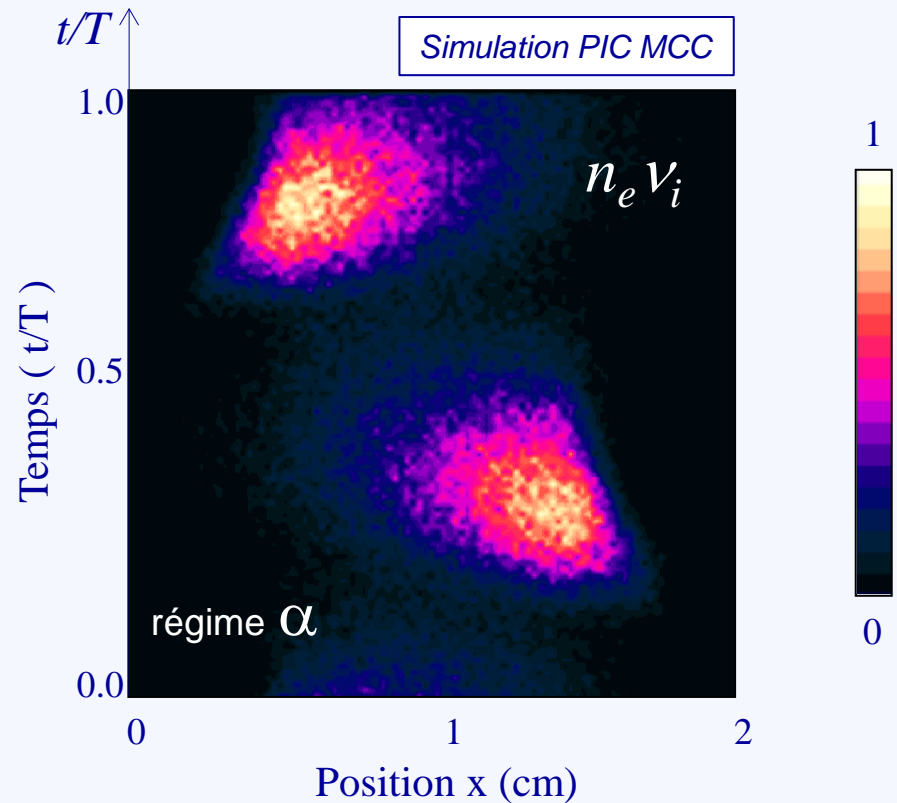
- Argon, 0.2 torr, 2 cm
- 300 V, 13.56 MHz
- $\gamma=0.2$

➤ Décharge RF capacitive – Régime γ vs régime α

- Régime γ : les électrons émis par l'électrode voient tout le potentiel de gaine pendant l'expansion et la contraction de la gaine
- Régime α , chauffage des électrons uniquement pendant l'expansion de la gaine

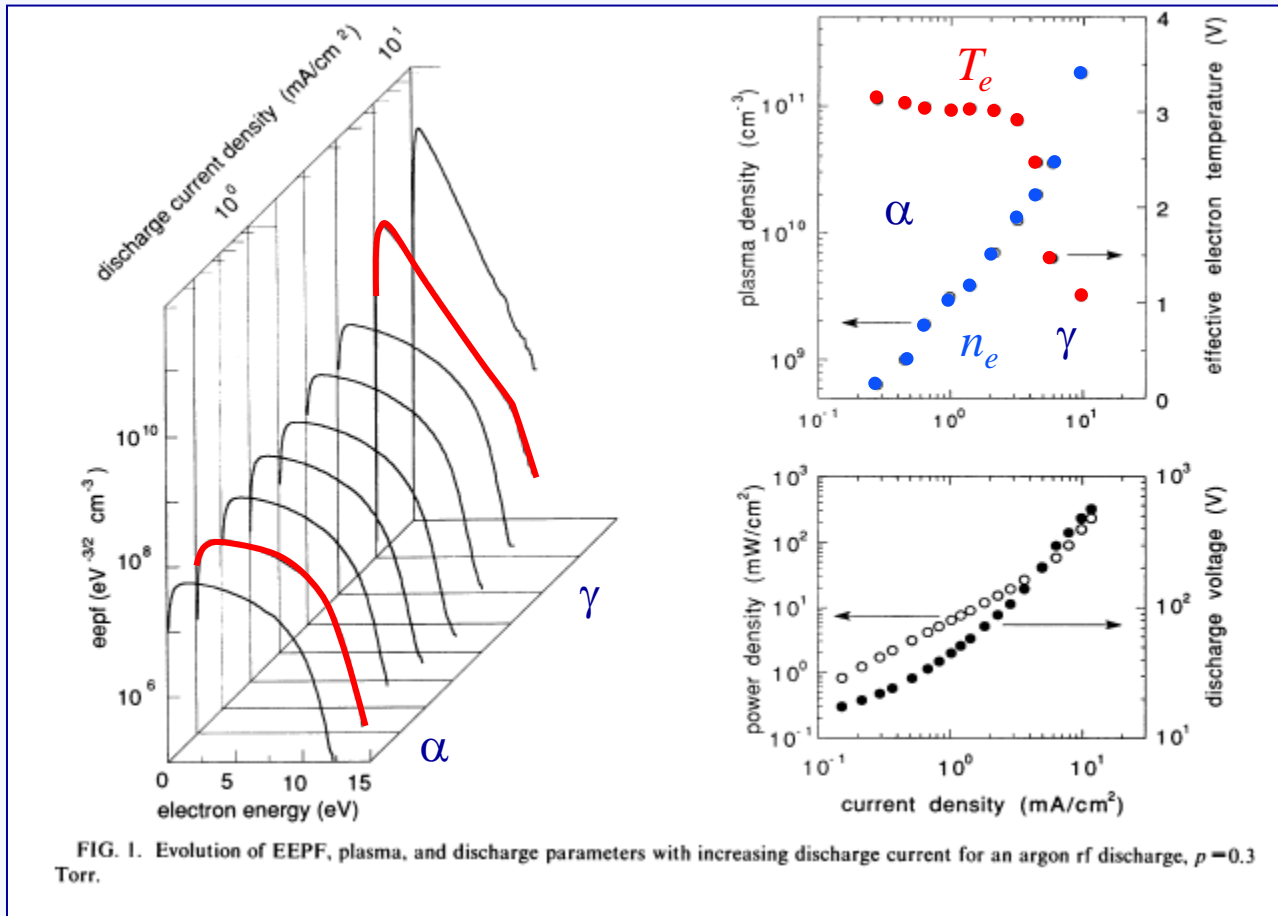


- Argon, 0.2 torr, 2 cm
- 300 V, 13.56 MHz, $\gamma=0.2$



- Argon, 0.1 torr, 2 cm
- 300 V, 13.56 MHz, $\gamma=0$

- Evolution de la **fonction de distribution électronique** avec le courant de décharge (et la tension)
- La température électronique dans le plasma chute en régime γ (comme dans une décharge DC)
- La densité de plasma augmente rapidement lors de la transition $\alpha - \gamma$ (i.e. en augmentant la tension)

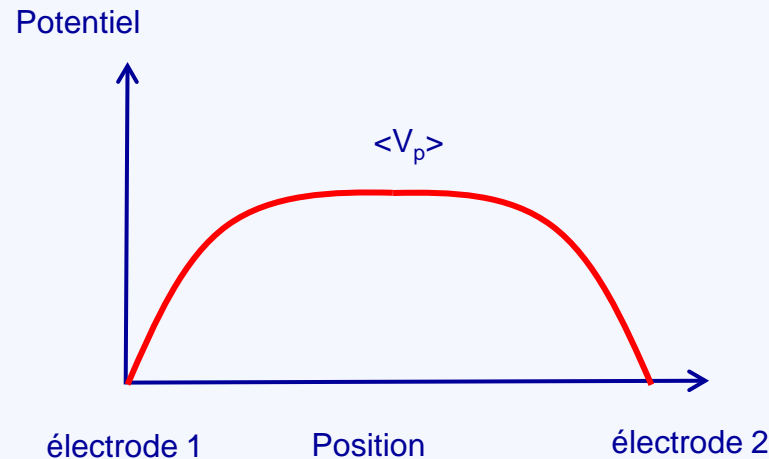


Mesures par sonde

Godyak et al
Phys. Rev. Lett. **68**, 49, 1992

➤ Décharge RF capacitive – Fonction de distribution du flux ionique

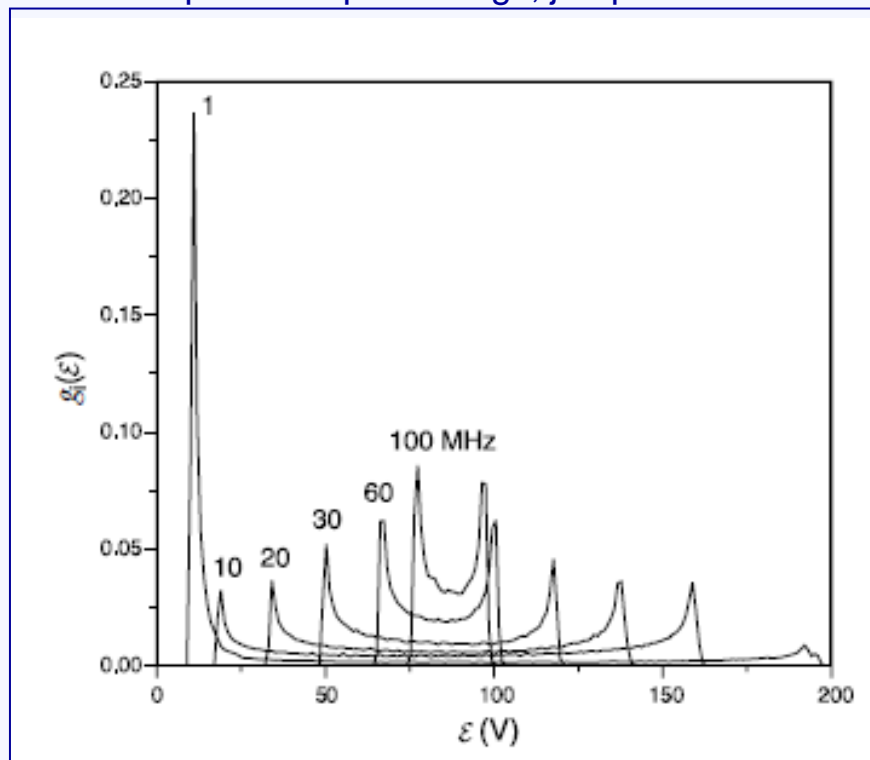
- Fonction de distribution du flux d'ions ions bombardant les surfaces joue un rôle important dans le traitement de surface
- Forme de la fonction de distribution dépend du temps de transit des ions dans la gaine et des collisions, donc de la pression, de la fréquence RF, de la masse des ions
- Si la fréquence est assez élevée et/ou les ions suffisamment lourds, ceux-ci ne « voient » que le potentiel moyen de gaine (de l'ordre de $V_{RF}/2$). En l'absence de collisions, tous les ions arriveraient sur l'électrode avec une énergie correspondant à ce potentiel.



Distribution entre les électrodes du potentiel moyenné sur un période (électrodes symétriques)

➤ Décharge RF capacitive – Fonction de distribution du flux ionique

- Fonction de distribution du flux d'ions ions bombardant les surfaces joue un rôle important dans le traitement de surface
- Forme de la fonction de distribution dépend du temps de transit des ions dans la gaine et des collisions, donc de la pression, de la fréquence RF, de la masse des ions
 - À haute fréquence $\omega \gg \omega_i = 1/\tau_i$ les ions ne voient que le potentiel moyen et la distribution présente un pic correspondant à ce potentiel
 - En diminuant la fréquence le pic s'élargit, jusqu'à couvrir toute la gamme de potentiel entre 0 et V_{RF}

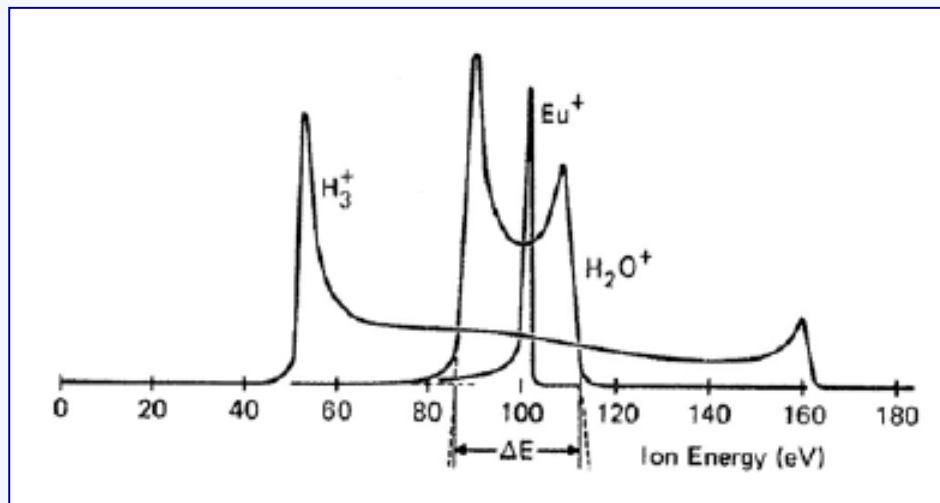


Helium, $V_{RF} = 200$ V
Pas de collisions (théorique)

Simulation

➤ Décharge RF capacitive – Fonction de distribution du flux ionique

- Fonction de distribution du flux d'ions bombardant les surfaces joue un rôle important dans le traitement de surface
- Forme de la fonction de distribution dépend du temps de transit des ions dans la gaine et des collisions, donc de la pression, de la fréquence RF, de la masse des ions
 - La distribution énergétique des ions dépend de la masse des ions (le temps de transit des ions dans la gaine est plus long pour des masses plus grandes). Les espèces les plus lourdes voient le potentiel moyen (pic). Le domaine d'énergie s'élargit quand la masse diminue



Argon, 75 mtorr, 13.56 MHz

Mesures

Coburn & Kay, 1972

➤ Décharge RF capacitive Fonction de distribution du flux ionique

- la présence de collisions ion-neutre dans la gaine introduit des pics supplémentaires et une structure plus complexe de la fonction de distribution des ions

Mesures et simulations

Wild & Koil 1991

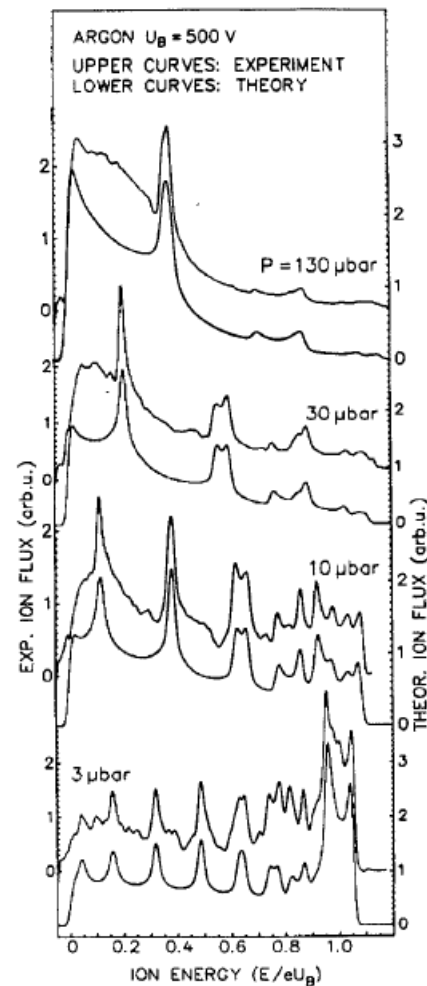


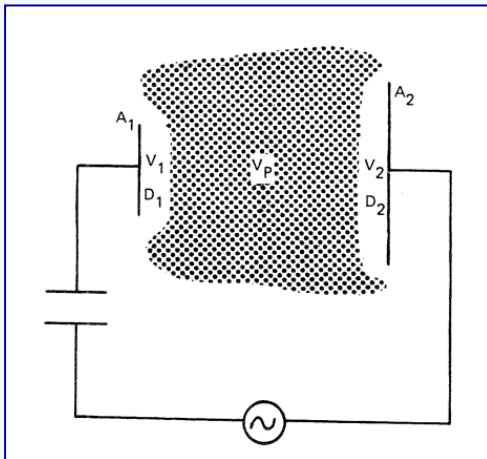
FIGURE 11.26. Comparison of experimental and theoretical ion energy distributions $g_i(\mathcal{E})$ in an argon discharge driven at 13.56 MHz at various pressures ($1 \mu\text{bar} = 0.76 \text{ mTorr}$) (Wild and Koil, 1991).

➤ Décharge RF capacitive – Electrodes asymétriques

- Dans la plupart des cas les électrodes d'une décharges RF sont asymétriques (i.e. la surface de l'enceinte, à la masse est beaucoup plus grande que la surface de l'électrode RF).
- Dans ces conditions, si la tension RF est appliquée à la petite électrode à travers une capacité, on peut montrer qu'une tension DC (d'auto-polarisation) se superpose à la tension RF appliquée: La tension sur l'électrode RF s'écrit alors:

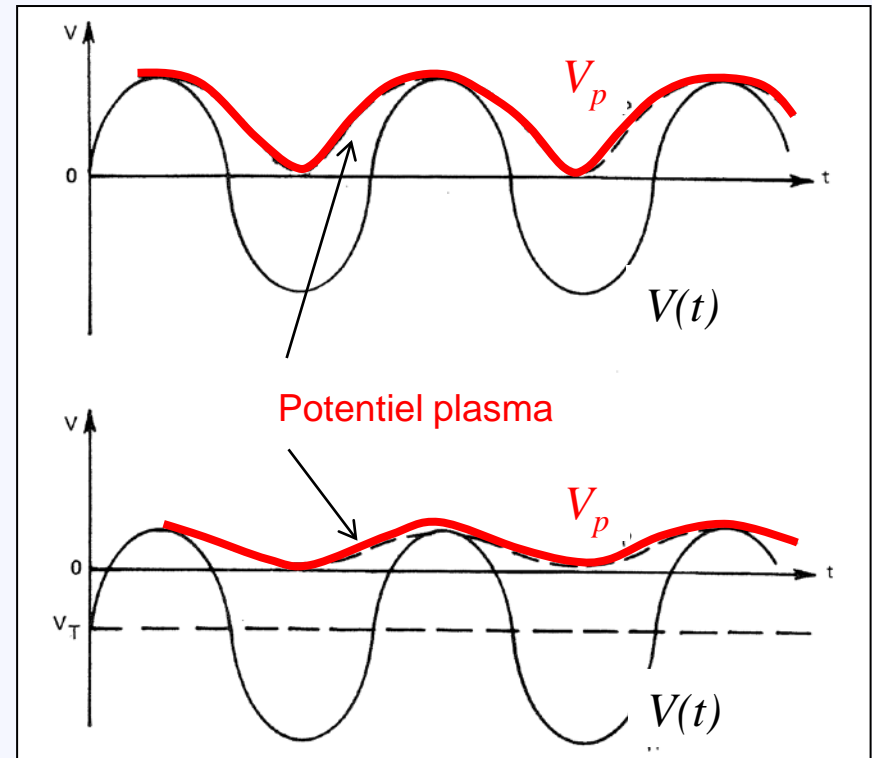
$$V(t) = -V_{DC} + V_{RF} \cos(\omega t)$$

- La tension moyenne de gaine est plus grande sur la petite électrode



$$\frac{\bar{V}_{s1}}{\bar{V}_{s2}} \approx \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^x$$

$$1.5 < x < 4$$



➤ Limitations des décharges RF capacitives

- Pour augmenter la densité de plasma (et la vitesse du procédé), il faut augmenter la tension
- L'augmentation de la tension entraîne une augmentation des potentiels de gaine et donc de l'énergie des ions frappant les surfaces
- Il est donc impossible de régler séparément la puissance (vitesse du procédé), et l'énergie des ions (nature du procédé)

→ Solutions alternatives

- Décharges RF inductives
 - Pas de tension élevée dans les gaines
 - Les électrons sont chauffés par le champ induit (dans l'épaisseur de peau)
 - L'énergie des ions peut être réglée séparément en appliquant une tension de polarisation (continue ou RF) sur le substrat à traiter
- Décharges microondes
- Décharges capacitives multifréquence

1. Plasmas DC et RF - Introduction

- Décharges DC – propriétés, entretien du plasma, rôle des gaines
- Décharges RF capacitives, inductives, microondes – généralités

2. Plasma RF capacitifs

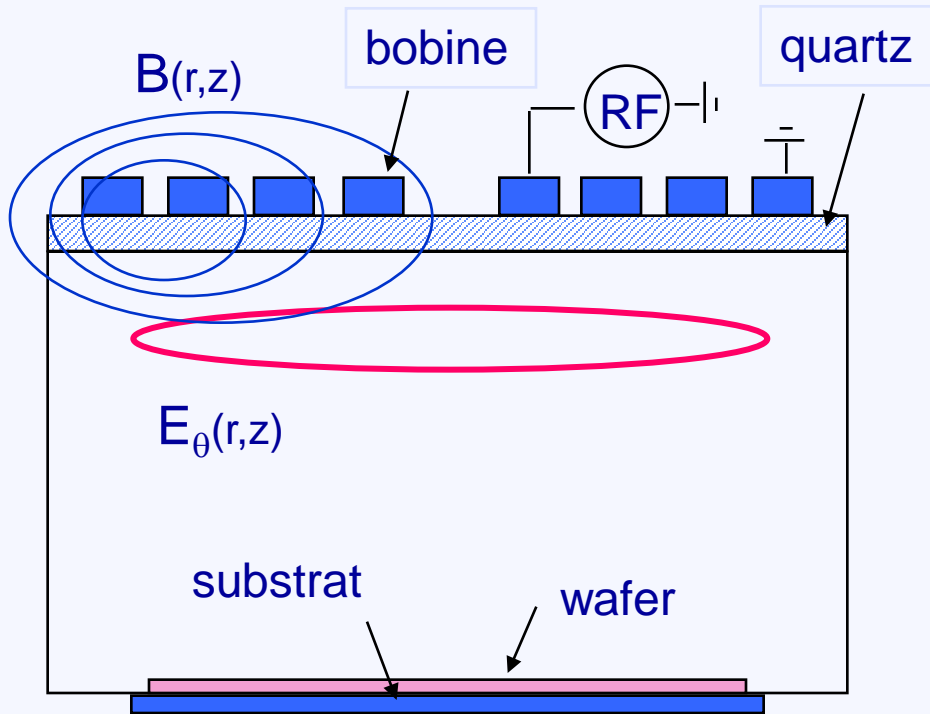
- Dynamique des gaines, chauffage ohmique et non-collisionnel
- Différents régimes: basses \rightarrow hautes pressions, faibles \rightarrow fortes puissances
- Fonction de distribution électronique
- Transport des ions dans les gaines, fonction de distribution ionique

3. Plasmas RF inductifs

- Principes

Décharge RF inductive

- Un courant alternatif (souvent radiofréquence à 13.56 MHz) circule dans une bobine placée à l'extérieur du réacteur (de l'autre côté d'un hublot en quartz)



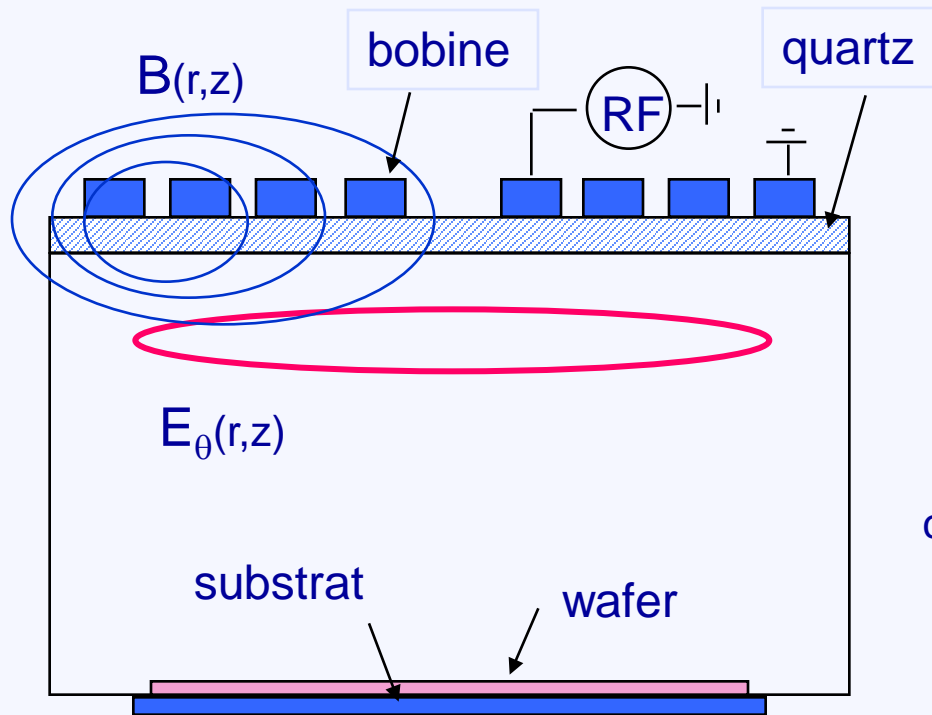
- La puissance est couplée au plasma par couplage inductif. Le courant extérieur induit un courant dans le plasma: le plasma joue le rôle du secondaire d'un transformateur
- Le champ magnétique RF axial créé par la bobine génère un champ électrique azimutal:

$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}$$

- Et un courant azimutal dans le plasma:

$$J_{\theta} = \sigma E_{\theta} \quad \sigma = \varepsilon_0 \omega_p^2 \frac{V_m - i\omega}{V_m^2 + \omega^2}$$

Chauffage électronique dans une décharge RF inductive



$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad \nabla \times H = J + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

Faraday

+ Ampère

champ azimuthal

$$\omega \ll \omega_p$$

$$-\nabla^2 E_\theta + i\omega\mu_0\sigma E_\theta = -i\omega\mu_0 J_{ext}$$

courant de bobine
(0 dans le plasma)

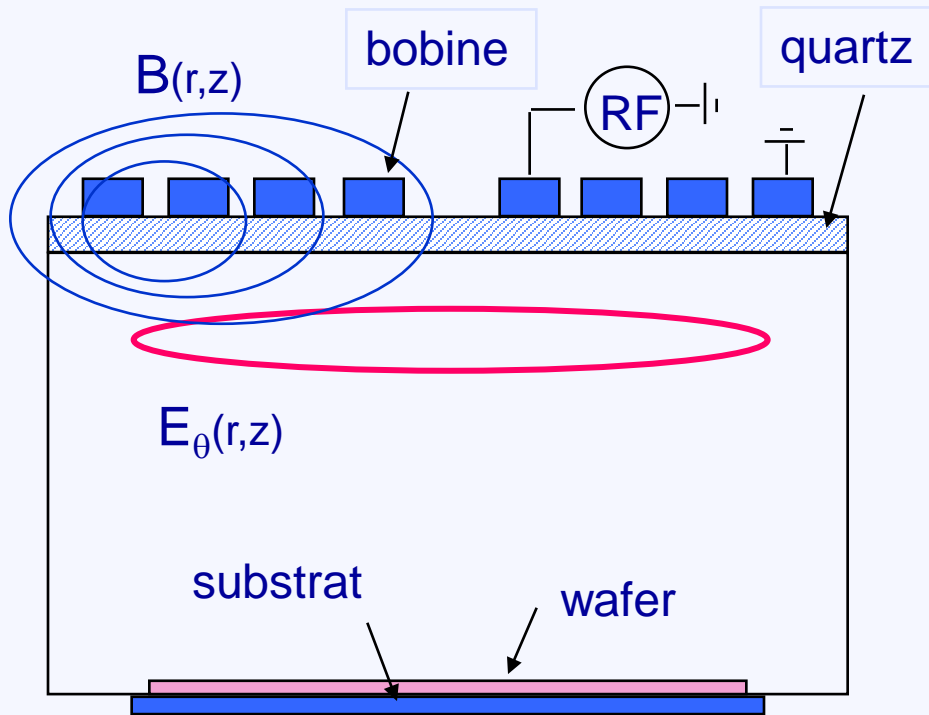
chauffage collisionnel

$$P_a = n \frac{e^2}{m\nu_m} \frac{1}{2} E_\theta^2 \frac{\nu_m^2}{\nu_m^2 + \omega^2}$$

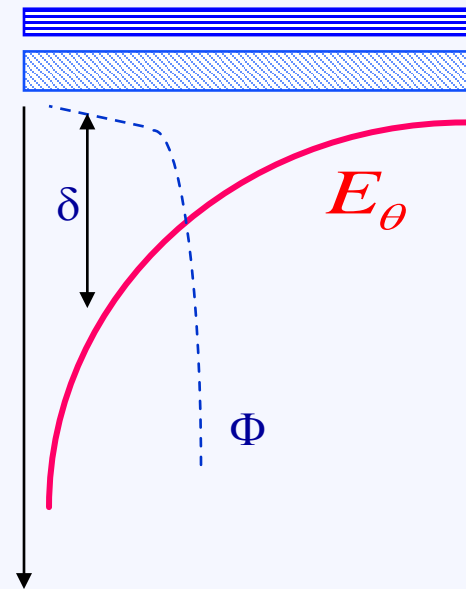
- Possibilité de chauffage non collisionnel dans certaines conditions dans la région de décroissance du champ
- Avantage du couplage inductif: pas de gaine dans laquelle se distribue une tension appliquée pour entretenir le plasma. L'énergie des ions frappant le substrat peut être contrôlée en appliquant une tension capacitive RF au substrat

Les électrons sont chauffés principalement dans l'épaisseur de peau

Le champ azimuthal décroît sur une distance caractéristique égale à l'épaisseur de peau en raison de l'absorption d'énergie par le plasma



$$E_\theta(z, t) = E_0 e^{-z/\delta} \sin \omega_0 t$$



épaisseur de peau δ_c en régime collisionnel (σ réel)
 $\delta_c \sim 1$ cm conditions typiques

$$\delta_c = \left(\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma} \right)^{1/2}$$